

■解説論文／REVIEW PAPER■

植物油燃料のエンジン適用技術—バイオディーゼル燃料について—
Applied Technology of Vegetable Oils for Diesel Engines — Use of Biodiesel Fuel —吉本 康文^{1*}・木下 英二²YOSHIMOTO, Yasufumi^{1*} and KINOSHITA, Eiji²¹ 新潟工科大学 〒945-1195 柏崎市藤橋1719番地
Niigata Institute of Technology, 1719 Fujihashi, Kashiwazaki, Niigata 945-1195, Japan² 鹿児島大学工学部 〒890-0065 鹿児島市郡元1-20-40
Kagoshima University, 1-20-40 Korimoto, Kagoshima-shi, Kagoshima 890-0065, Japan

2008年10月20日受付; 2009年1月5日受理/Received 20 October, 2008; Accepted 5 January, 2009

Abstract : A survey of published papers was carried out to evaluate the technology applied to biodiesel fuel (BDF) in diesel engines. The paper describes the findings and the development of this research field. The analysis of 44 papers in Japanese and English established the following points as important with many related studies: (1) the differences in the combustion characteristics of BDF and ordinary diesel fuel, (2) relations among different feedstock for BDF (FAME composition), the fuel properties, and combustion characteristics, (3) studies of BDF made from waste edible oil, (4) the spray characteristics and the mechanisms of the spray combustion, (5) studies of oxidation deterioration of BDF, (6) improvements of low temperature fluidity for palm oil methyl esters, (7) applications to modern diesel engines, (8) improvements of combustion characteristics by mixing with volatile fuels or by water emulsification. For the future, the following research themes can be suggested: development of special engines fueled with BDF, and application of unused feedstock, especially for non edible oils.

Key Words : Biodiesel, Fatty Acid Methyl Ester, Paper Survey, Research Trend, Diesel Engine, Combustion Characteristic, Fuel Property, Engine Performance, Emission

1. 緒言

噴霧燃焼を主体とするディーゼルエンジンは多種燃料適性を有していることから、この特性を活用した、さまざまなタイプのバイオ燃料適用研究が今日に至るまで試みられてきている。歴史をさかのぼると、開発者のルドルフ・ディーゼル自身が落花生油などの植物油でエンジンを作動させることを構想し、実際に運転も試みていたことが伝えられている。近年においては、再生可能な資源であること、二酸化炭素排出量の削減効果を有することなどの新たな視点が加わることによって、植物油をディーゼル代替燃料として適用すべく、きわめて活発な研究開発が推進されて、現在に至っている[1]。

植物油の性状を一般に使用されている石油ディーゼル燃料と比較すると、粘度がきわめて高く、高沸点・低蒸発性であることが特徴としてあげられる。したがって、既存の

ディーゼルエンジンに対して改質せずにそのまま使用した場合には、ノズルチップ先端部に炭素状物質が堆積するとともに、ピストンリングのスティックが生じるなど、重大な障害を引き起こすことが問題となる[2]。この対策として、エステル変換燃料 (Biodiesel Fuel, 以下 BDF と表記) に改質する方法が一般に広く採用されている。

しかしながら、一方では、この改質工程が比較的煩雑でありコストがかかること、副生物であるグリセリンの処理をとらなうこと、さらには BDF が酸化劣化しやすいという欠点を抱えていることから、エステル変換によらない植物油燃料の改質法も模索されている。そこで、本稿では植物油燃料のエンジン適用技術に関する研究開発の現状と問題点について概観してみたい。

2. BDF の原料油と FAME 組成、品質規格

BDF (バイオディーゼル燃料) とは、バイオマス由来の油脂に対して、ディーゼルエンジンに適合するよう化学処理

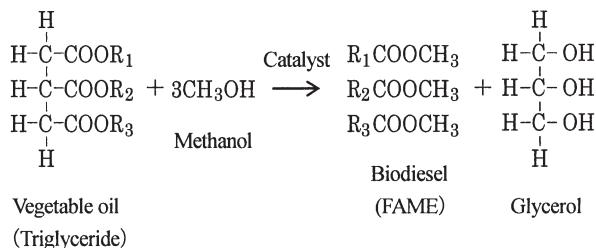
* Corresponding author. E-mail: yosimoto@mce.niit.ac.jp

を施すことにより改質した燃料の総称である。一般的には、トリグリセライドである植物油をメタノールでエステル交換反応を行って得られる脂肪酸メチルエステル (Fatty Acid Methyl Ester: FAME) のことを指している。植物油を BDF に改質する方法としては、図 1 に示すように、アルカリ触媒のもとでエステル交換反応を行う方法 (アルカリ触媒法) が現在のところ広く実用に供されている。このほか、固体触媒法、触媒なしにエステル交換を行う超臨界メタノール法を用いた製造法なども開発されているが、実用段階には至っていない。

原料となる植物油に関しては、EU 諸国では主に菜種油やひまわり油、米国では主に大豆油が使用されており、いずれも未使用の新油が対象となっている。一方、植物油の多くを輸入に依存しているわが国においては、廃食油 BDF の使用が望まれており[3]、自治体や NPO 法人を中心に利

用推進が図られている。

表 1 は、世界における油糧作物の生産量と油分収量、および BDF 改質後の性質を示したものである[4-6]。生産量



R₁, R₂, and R₃ represent the hydrocarbon chain of fatty acid

Fig.1 FAME production scheme

Table 1 Worldwide vegetable oil production [4], production efficiency of oil crops [5], and the fuel properties after transesterification [6] (○ good, △ average, × poor)

Oil	Production [$\times 10^3$ ton]			Yield [ton/ha]	Iodine value *1	Oxidation stability	Pour point °C (FAME)	Low temp. fluidity
	2005/06	2006/07	2007/08 (Prospects)					
Palm	36,024	37,400	41,727	4	50-55	○	14	×
Soy bean	34,923	36,688	38,612	0.3~0.5	124-139	×	-10	○
Rapeseed	18,181	18,443	19,122	0.5~1.1	94-126	△	-10	○
Sunflower	10,987	11,258	9,872	0.4~1.1	120-141	×	-12	○
Palm karnel	4,214	4,363	4,815	0.4~0.5	14-22	○	-5	△
Coconut	3,218	3,067	3,282	0.3~0.5	7-11	○	-5	△
Jatropha	—	—	—	1.8~2.8	95-106	△	-2.5	△

*1 Quoted values from JAS standards.

Table 2 Fatty acid composition of feedstock [8]

Fatty acid		Beef tallow	Linseed	Sunflower	Soy bean	Rapeseed *3	Palm	Coconut
Kind	C : N *2							
Caprylic	8 : 0							6~10
Capric	10 : 0							4~12
Lauric	12 : 0							45~52
Myristic	14 : 0	2~8					1~3	15~22
Palmitic	16 : 0	24~35	4~9	3~8	5~12	4.3	35~48	4~10
Palmitoleic	16 : 1	1~3	0~1			0.1		
Stearic	18 : 0	14~30	2~5	2~5	2~7	1.9	3~7	1~5
Oleic	18 : 1	30~50	20~35	15~35	20~35	59.7	37~50	2~10
Linoleic	18 : 2	1~5	5~20	50~75	50~57	21.7	7~11	1~3
Linolenic	18 : 3		30~58	0~1	3~8	9.4		

*2 C: Carbon number, N: Double bond number

*3 Reference: Nihon-yukagakkai, Kijun-yushibunseki-shikenhon (1996) 1146-1151 (in Japanese)

Table 3 Biodiesel standards of Japan (JIS) and other countries [6]

		USA	EU	Australia	Brazil	Japan
Number of standards		ASTM D6751-02	EN14214		ANP255	JIS K 2390
Density @15°C	kg/m ³	—	0.86-0.9	0.86-0.89	near gas oil	0.86-0.9
Kinematic viscosity @40°C	mm ² /s	1.9-6.0	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0
95% distillation temperature	°C	<360	—	<360	<360	—
Flash point	°C	>130	>120	>120	>120	>120
Cold filter plugging point	°C	—	<5/<-5/<-15	suspension	—	*4
Pour Point	°C	—	<0	—	near gas oil	*4
Sulfur content	mg/kg	<15/<500	<10	<50/<10	<10	<10
Carbon residue (Conradson)	mass %	<0.05	—	<0.05	<0.05	—
10% carbon residue	mass %	—	<0.3	<0.30	<0.30	<0.3
Sulfated ash content	mass %	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Water content	mg/kg	<0.05[vol. %]	<500	<0.05[vol. %]	—	<500
Total contamination	mg/kg	—	<24	<24	—	<24
Copper band corrosion		No.3	Class-1	No.3	No.1	below 1
Cetane number		>47	>51	>51	>45	>51
Acid value	mg KOH/g	<0.80	<0.5	<0.80	<0.80	<0.5
Methanol content	mass %	—	<0.2	<0.2	<0.5	<0.2
Ester content	mass %	—	>96.5	>96.5	—	>96.5
Monoglyceride content	mass %	—	<0.80	—	<1.0	<0.80
Diglyceride content	mass %	—	<0.2	—	<0.25	<0.2
Triglyceride content	mass %	—	<0.2	—	<0.25	<0.2
Free Glycerol	mass %	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Total Glycerol	mass %	<0.24	<0.25	<0.25	<0.38	<0.25
Iodine value		—	<120	—	must be reported	<120
Linolenic Acid Methylster	mass %	—	<12	—	—	<12
Polyunsaturated Methylster	mass %	—	<1	—	—	
Phosphorus content	mg/kg	<10	<10	<10	<10	<10
Na+K	mg/kg	—	<5	<5	<10	<5
Ca+Mg	mg/kg	—	<5	<5	—	<5
Oxidation stability	hr.	—	<6	<6	<6	*4

*4 established by agreement

の多い順にパーム油, 大豆油, 菜種油, ひまわり油となっており, 欧米における BDF の利用実態とよく対応している。なお, パーム油は他の油脂に比べ生産性がきわめて高く, 生産量も多いが, パーム油 BDF には低温流動性の問題があるため, 東南アジアを中心とした一部の国での使用に限られている。昨今においては, バイオ燃料と食料との競合が問題視されてきている中, 食用に適さないヤトロファ(南洋アブラギリ)油の利用に注目が集まっている[7]。

表 2 は, BDF の原料として研究開発に使用されている油脂の脂肪酸組成を示したものである[8]。動物性油脂を含むそれぞれの油脂は固有の脂肪酸組成を有しており, BDF に改質した際には, 原料油脂の脂肪酸組成に対応した FAME

組成が得られる。

表 3 に示すように, EU や米国, オーストラリアなどでは既に BDF に関する品質規格が整備され[6], それに基づいた運用がなされている。日本においても, JIS 規格が制定され(2008 年), 軽油への BDF 5% 混合が品確法により規定されることとなった。

BDF に関するこれまでの研究成果を取りまとめた報告として, 文献[9-10]などがある。とくに, 文献[10]の米国エネルギー省による“Biodiesel Handling and Use Guidelines”には, BDF の製造, 燃焼・排ガス特性, 取り扱い上の注意等が詳細に記述されている。

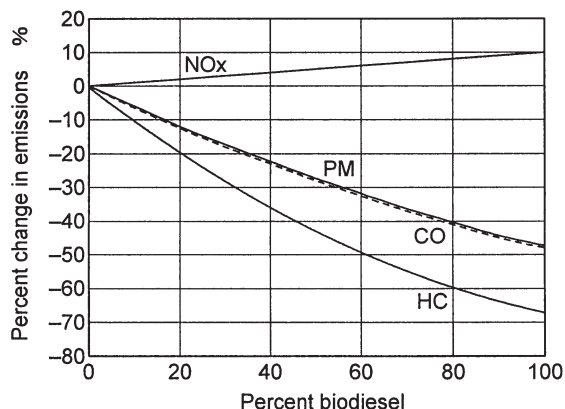


Fig.2 Average emission impact of biodiesel fuels in CI engines [11]

3. BDF と軽油との燃焼特性比較

多様なエンジン形式ならびに運転条件のもとで、ディーゼル機関性能、燃焼特性、排ガス特性などに関する詳細な調査がなされてきており、学術データが蓄積されている。BDF の原料油種も多岐にわたっているが、とくに菜種油メチルエステルや大豆油メチルエステルを対象に、耐久試験を含む多くの研究が実施されてきている。

図 2 は米国環境保護庁 (EPA) によって実施された系統的な調査結果[11]を示したものであり、排ガス特性に及ぼす BDF の影響度合が明瞭に示されている。図 2 によると、BDF100% 燃料を使用した場合 (B100) では、在来のディーゼル燃料を使用する未改造機関の排ガス成分と比較して、排気微粒子 PM は平均で 47% の減少、未燃炭化水素 HC は 67% の減少、一酸化炭素 CO は 48% の減少が得られる一方、窒素酸化物 NOx だけが 10% 増加するとしている。

BDF は燃料蒸発性の悪さから、低中負荷域において PM 中の SOF (可溶性有機成分) が増加し、とくに低負荷での PM が増加することが問題点として指摘されている[12-13]。また、BDF は低発熱量が軽油より約 15% 低下するので、燃料消費率は増大するが、熱効率は軽油の場合とほぼ同じであることが多くの研究で確認されている。

4. FAME 組成と燃料性状、燃焼特性

BDF は FAME (脂肪酸メチルエステル) の混合物であり、FAME 組成の違いにより BDF の燃料性状、ディーゼル燃焼・排ガス特性が異なってくる[10]。たとえば、菜種油メチルエステルなどの不飽和 FAME を多く含有する BDF は、比較的低温流動性に優れ、ディーゼル排ガス中の NOx が軽油に比べ増加する[11]。一方、飽和 FAME を多く含むパーム油メチルエステルは流動点が高く (12.5~15°C) [14-15]、日本の冬季には室温で固化してしまうが、菜種油や大豆油の BDF より高い着火性を示し、NOx を含む排ガスが低減する[14]。

FAME 組成の影響を詳細に検討するために、純度の高い試薬を用いた研究が実施されている[13,16-17]。その結果、飽和 FAME は炭素数が多くなり長鎖になるほど着火性は向上するが、流動点が上昇すること、また、不飽和 FAME は炭素の二重結合数 (不飽和度) が増加するほど、着火性は悪くなるが、流動点が低下するなど、FAME の特性がかなり明らかになってきている。BDF の燃料性状、燃焼・排ガス特性は、これらの研究成果をもとに説明することができると思われる。

5. 廃食油 BDF に関する研究

廃食油 BDF の利用は燃料原料に乏しい日本においては重要な研究の一つであり、また、リサイクルの観点からもこれまでに多くの研究が行われている。日本における廃食油 BDF に関する草分け的研究として、燃料製造から燃焼評価までを総合的に検討した (財) 政策科学研究所による研究報告がある[12]。

廃食油 BDF の原料は使用済みの植物油であり、原料の酸化劣化や原料中の異物が BDF 製造、燃料性状、ディーゼル燃焼・排ガス特性、エンジン材料適合性にどのような影響を及ぼすかについて調査する必要がある。廃食油 BDF の燃焼・排ガス特性は、新油 BDF と同様に植物油の起源、つまり脂肪酸組成に依存するので、FAME 組成が同じならば基本的には新油 BDF と同じと考えられる。廃食油 BDF と新油 BDF を比較した研究[18]では、廃食油 BDF の方が新油 BDF より密度が若干低く、低発熱量が約 1% 低く、着火遅れが短くなり、この理由として動物油脂混入の可能性を示唆している。

6. BDF の噴霧特性・噴霧燃焼機構

噴霧特性・噴霧燃焼機構に関する基礎研究は、実機による燃焼・排ガス特性を解明する上で役立つとともに、BDF の燃焼モデリング、BDF 専用エンジンの開発といったことにも重要な役割を果たす。急速圧縮膨脹装置を用いた研究[19-20]では、①シャドウグラフ法により、BDF (廃食油 BDF) は高粘性および高沸点成分から構成されるために噴霧特性は軽油に比べ悪化し、特に噴霧角の減少が顕著であること、②直接撮影から BDF の混合割合が増加しても噴霧軸下流方向における燃焼領域に差はないが、OH ラジカル自発光撮影から BDF の混合割合の増加に伴い輝炎領域は減少すること、③透過光減衰法により、'すす' 粒子群は BDF 混合割合の増加により噴霧軸下流側に移行すること、④画像二色法により、軽油の火炎高温領域が噴霧火炎中間領域に存在するのに対し、BDF の火炎高温領域は噴霧火炎全体に均一に存在し、KL 値分布は軽油に比べ著しく減少していること、等が報告されている。

また、高圧噴射において菜種油メチルエステルは軽油に比べ油滴直径の増大を除くと、噴射率、噴霧挙動における

顕著な違いはなく, 雰囲気空気が 600 °C以下で燃焼過程は蒸発に律速され, 700 °Cを超えると混合律速となることが報告されている[21]. また, レーザシート光による噴霧可視化により, BDF の到達距離は軽油より短く観測されたこと[13], BDF 噴霧の平均速度と噴霧粒径は軽油とほぼ同じであること[22], 燃焼可視化により BDF は軽油に比べてピストンの噴霧衝突部分において‘すす’の発生が少ないこと[23], 等が報告されている.

7. BDF の酸化劣化に関する研究

BDF は軽油に比べ酸化劣化しやすいという問題がある. BDF が酸化劣化すると有機酸や重合物が生成され, これらがエンジンに悪影響を及ぼす[24]. すなわち, 有機酸は金属材料の腐食やゴム・樹脂の劣化をもたらし, また, 重合物はフィルター目詰まりや燃料漏れの原因となる. さらに, 有機酸や重合物はデポジットの生成・堆積の原因となり, その結果, 燃料噴射ポンプおよびインジェクタの作動不良を引き起こして出力低下や機関停止などのエンジントラブルに至る. BDF の酸化劣化に関しては, 山根らによる一連の研究[24-26]が報告されており, FAME 成分による酸化劣化の影響やメカニズムについての検討がなされている. その結果, 不飽和 FAME では不飽和度が高いほど酸化されやすいこと, 酸化劣化の指標は温度が低い場合には過酸化価値 (Peroxide value, POV) で代表でき, 温度が高い場合には全酸価 (Total acid value, TAV), 動粘度, 残留炭素量によって見きわめる必要があることなどが報告されている.

図 3, および図 4 は, 塩谷らによる BDF の酸化劣化に関する検討結果の一例[27]を示したものである. コモンレールシステムを模擬した装置を用いて燃料系のシミュレーション試験が実施されている. 原料油が異なる 5 種類のメ

チルエステルをそれぞれ 5 % 混合した軽油を試料とし, 酸化劣化の進行度を示す指標である過酸化価値, および全酸価が測定された. 基準燃料である軽油の場合, 試験サイクル数が増加しても, これらの値にはほとんど変化がみられない. 一方, BDF 混合軽油では菜種油メチルエステルを除いて過酸化価値, および全酸価の増加傾向が顕著であり, 燃料の酸化劣化に対する十分な配慮が必要であることを示している.

BDF の燃焼特性に及ぼす酸化劣化の影響についても調査がなされており, 酸化劣化が進んだ BDF では燃焼温度や圧力が上昇して NO_x は増加するが, CO と黒煙が低減することが報告されている[28].

8. パーム油メチルエステルの低温流動性の改善

パーム油メチルエステルは菜種油メチルエステル等より排ガス特性が良好であるため, ディーゼル代替燃料としての期待が大きいが, 流動点が高く (12.5~15°C), 季節によっては利用することができない. パーム油メチルエステルの低温流動性を改善するために, 低温流動性に優れた燃料との混合による方法が試みられている. たとえば, パーム油メチルエステルに JIS 3 号・特 3 号軽油を混合することにより実用的な温度レベル (-12.5 °C程度) まで流動点は改善できること[29], エタノール 10 vol% 混合により曇り点が約 4 °C降下して黒煙濃度が低減すること[30], DME (ジメチルエーテル) はパーム油メチルエステルに相溶性を示し, DME 25 wt% 混合により流動点が -2.2 °C, 50 wt% 混合により -8.8 °Cとなり, DME 混合割合が増加するほど黒煙が低減すること[31], などが報告されている.

また, パーム油をエチルエステル化[32], ブチルエステル化[33]させることによる方法も調査されており, 流動点

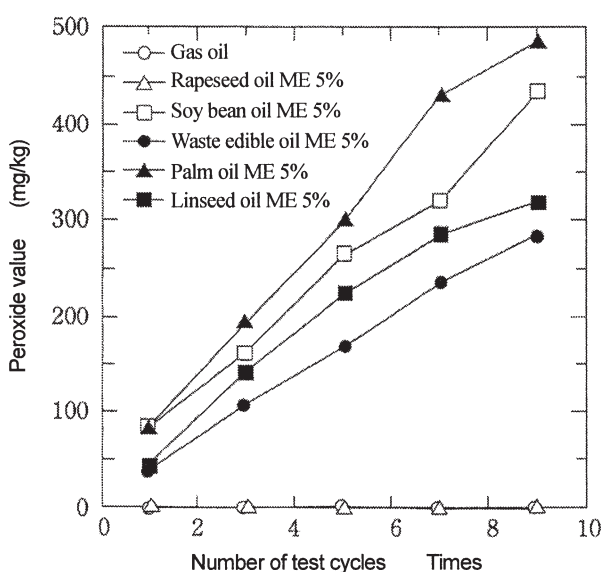


Fig.3 Changes in peroxide value [27]

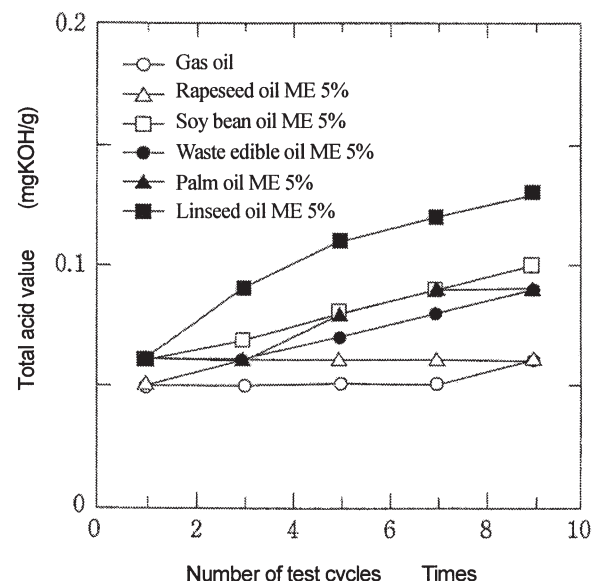


Fig.4 Changes in total acid value [27]

がエチルエステル化で 7.5 °C, ブチルエステル化で 5 °C となり, 排ガスはメチルエステルと有意な差はないことが報告されている. 低温流動性の問題は BDF 原料として動物油を利用する場合にも同様に生じる問題であり, 今後とも研究が必要な領域である.

9. 最新のディーゼルエンジンへの BDF 適用

電子制御高圧噴射のコモンレール式ディーゼルエンジンへの BDF 適用に関する研究[34]では菜種油メチルエステルは低発熱量が低いが, JE05 モード走行に支障をきたす問題は見られず, 精製レベルの優れた BDF は短期間では特に問題となるトラブルはないようである. しかし, コモンレール式エンジンでは噴射系内の燃料温度がジャーク式に比べて高いので, BDF の熱酸化安定性の問題を十分検討する必要があるといわれている.

コモンレール式エンジン (EGR 使用, 米国 2004 年型ディーゼル車両) における BDF の排ガス特性について, 軽油に比べ NOx は約 20 % 増加, PM は約 70 % 低減, CO は約 40 % 低減, HC は約 20 % 低減すると報告されている [35]. また, BDF は軽油より低黒煙のために EGR 率を高く設定でき, NOx と黒煙の同時低減が可能であると報告されている [36]. BDF に対する DPF (Diesel Particulate Filter) の効果も検討されており, 軽油と同様に PM 低減が可能であり [37], また, BDF は軽油より自己再生 DPF の再生までの時間を延ばすことができる [38], と報告されている.

10. その他の研究

軽質燃料・低沸点燃料との混合により燃料特性の改善を図った研究がある [39]. すなわち, ノルマルヘプタンおよびノルマルドデカンの BDF への混合による動粘度低下と揮発性改善により, ‘すす’ 生成が抑制されることが報告されている. パーム油メチルエステルの低温流動性改善において挙げた [30] や [31] も同様の範疇に入るが, これらの場合には燃料中の酸素含有率増加による燃焼・排ガス改善の効果も加わっている.

BDF に対して水乳化燃焼法を適用することにより, NOx と黒煙との同時低減をめざす研究も行われている. BDF においても比較的安定な乳化燃料が作製でき, 30 vol% 水添加の乳化 BDF は軽油における最良燃費率を保ちながら黒煙濃度を悪化することなく, NOx 濃度を 1100 ppm から 400 ppm まで大幅に低減でき, NOx と黒煙のトレードオフが軽油乳化に比べてわずかに改善されたことが報告されている [40]. また, 乳化 BDF のさらなる NOx 低減のためにクールド EGR の効果を検討した研究 [41] があり, 水添加率 30 % の乳化 BDF は EGR 併用によって 4 % の燃料消費率増大をとまなうものの, 黒煙濃度を増大せずに NOx 濃度を 170 ppm まで低減 (EGR なし乳化 BDF では 400 ppm, EGR なし BDF では 1100 ppm) し得ることが報告されてい

る. このほか, BDF 製造時の副生物の粗製グリセリンを乳化剤とする乳化 BDF [42], 乳化剤無添加の乳化 BDF [43], 乳化 BDF のディーゼル燃焼に及ぼす水粒子径の影響 [44], 着火性に優れた乳化パーム油 BDF [45], 等の研究があり, いずれも NOx と黒煙の同時低減が可能であることが報告されている. また, 乳化 BDF の燃焼可視化 [23] もあり, 乳化 BDF は BDF より ‘すす’ 生成の減少とより早い燃焼が観察されたことが報告されている.

以上のほかにも, BDF を着火燃料として通常の燃料噴射を行い, 吸気管からガス燃料を供給して燃焼を行う, いわゆる二元燃料方式のディーゼル燃焼に関する研究も試みられている [46-47]. 研究の結果, BDF は二元燃料ディーゼル機関の着火燃料として利用可能であることが報告されている. これらの研究はガス燃料を高熱効率のディーゼル機関で利用したいことに加え, メタン発酵や木質熱分解ガス等のバイオガスの供給が不安定であるので, 一定出力を確保するには液体燃料と併用したいことに研究の動機がある.

11. 結言

バイオディーゼル燃料 (BDF) のエンジン適用技術に関する内外の研究論文 44 編を調査し, この分野における研究動向について考察した. その結果, 新油から製造した EU 規格適合の植物油 BDF を既存のジャーク式ディーゼルエンジンに適用する場合には, 主たる研究はおおむね終了しているように思われた. 研究開発上の残された課題として, 次の事項をあげることができる.

- ① 廃食油 BDF に関する研究
- ② パーム油 BDF の低温流動性の改善
- ③ コモンレール式ディーゼルエンジンの BDF 適合性
- ④ BDF の噴霧燃焼特性とモデリング
- ⑤ BDF 専用エンジンの開発
- ⑥ 未利用原料, 特に非食用油脂の BDF 利用

上記の①は廃食油 BDF の精製レベルを上げて, 新油 BDF 以上にすれば, 問題はほぼクリアできると思われるが, 精製レベルを上げるほど製造コストが上がるのが問題である. ⑤の BDF 専用エンジンは化石燃料である軽油に比べて植物の原料が非常に少ないので, 費用対効果が少なく難しいと考えられるが, BDF をこれまで以上に有効に利用するには必要な研究であると思われる.

謝 辞

本稿は, 日本燃焼学会「バイオ燃料の燃焼研究動向に関する調査研究委員会」において実施した調査研究の成果をとりまとめたものである. 本調査研究を実施するにあたり, 日本燃焼学会関係者各位から多大なご配慮をいただいた. ここに記して深く感謝の意を表す.

References

1. Morimune, T., et al., Final Technical Report of the Committee of Investigation and Research on Biofuel Combustion (in Japanese), *Combustion Society of Japan* (2008) J1-J128, E1-E86.
2. Murayama, T., et al., Low Carbon Buildup, Low Smoke, and Efficient Diesel Operation with Vegetable Oils by Conversion to Mono-Esters and Blending with Diesel Oil or Alcohols, *SAE Paper*, No. 841161 (1984) 1-11.
3. Nakamura, K., Ikegami, M., The Characteristics of Waste Cooking Oils Discharged in Kyoto City and Biodiesel Fuel Characteristics (in Japanese), *Journal of the Japan Society of Waste Management Experts*, 17-3 (2006) 193-202.
4. Japan Oilseed Processors Association, (in Japanese) <http://www.oil.or.jp/seisan/>
5. Hashimoto, N., Nishida, H., Ozawa, Y., The Diversification of Liquid Fuels for Electric-Generating Gas Turbines (in Japanese), *Journal of the Combustion Society of Japan*, 50-153 (2008) 215-224.
6. Goto, S., Shiotani, H., Trend of Automotive Biofuel (in Japanese), *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*, 60-11 (2006) 94-99.
7. Yamane, K., Biodiesel Fuel (in Japanese), *Journal of the Heat Transfer Society of Japan*, 47-198 (2008) 16-21.
8. Kurosaki, T., Yagi, K., Yushikagaku-nyumon (in Japanese), *Sangyo-tosyo* (1995) 8-9.
9. Babu, A. K., Devaradjane, G., Vegetable Oils and Their Derivatives as Fuels for CI Engines: An Overview, *SAE paper*, No. 2003-01-0767 (2003) 1-14.
10. U.S. Dept. of Energy, Biodiesel Handling and Use Guidelines, *DOE/GO-102006-2358*, Third Edition (2006) 1-69.
11. U.S. EPA, A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions, *EPA420-P-02-001* (2002) 1-118.
12. Murayama, T., et al., Technical Report on Promoting and Planning Wide Use of Waste Edible Oil (in Japanese), *Zaidan-hojin Seisakukagaku-kenkyusyo* (1999) 1-174.
13. Yamane, K., Ueta, A., Shimamoto, Y., Influence of physical and chemical properties of biodiesel fuels on injection, combustion and exhaust emission characteristics in a direct injection compression ignition engine, *International Journal of Engine Research*, 2-4 (2001) 249-261.
14. Hamasaki, K., Kinoshita, E., et al., Utilization of Palm Oil for Diesel Fuel (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 68-667 (2002) 322-327.
15. Kono, N., Fukumoto, J., Iizuka, M., Takeda, H., Influence of FAME Blends in Diesel Fuel on Driveability Performance of Diesel Vehicles at Low Temperatures, *SAE paper*, No. 2006-01-3306 (2006) 1-9.
16. Graboski, M.S., McCormick, R.L. et al., The Effect of Biodiesel Composition on Engine Emissions from a DDC Series 60 Diesel Engine, U.S. *NREL/SR-510-31461* (2003) 1-81.
17. Kinoshita, E., Hamasaki, K., et al., Effects of Fatty Acid Methyl Ester Compositions on Biodiesel Combustion (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 70-690 (2004) 244-247.
18. Takeda, H., Moriya, S., Characteristics of Methyl-Ester Application to Diesel Engine -Comparison between Methyl-Ester from Cooking Oil Waste and Unused Oil (in Japanese), *Journal of The Japan Institute of Marine Engineering*, 42-3 (2007) 127- 131.
19. Okui, N., Suzuki, T., Senda, J., Research on DI Diesel Engine Use of Biodiesel Fuel -2nd Report: Basic Analysis of Spray and Combustion Characteristics- (in Japanese), *Journal of The Japan Institute of Marine Engineering*, 40-6 (2005) 63-69.
20. Suzuki, T., Haibara, T., et al., Ibid, -3rd Report: Basic Analysis of Combustion and Soot Formation Process- (in Japanese), *Journal of The Japan Institute of Marine Engineering*, 40-6 (2005) 70-77.
21. Desantes, J.M., Arregle, J., et al., Characterization of the Injection-Combustion Process in a D.I. Diesel Engine Running with Rape Oil Methyl Ester, *SAE paper*, No. 1999-01-1497 (1999) 984-991.
22. Jimenez, J.E., Mendez, C., et al., Experimental Comparison Between Conventional and Bio-Derived Fuel Sprays, *SAE paper*, No. 2001-01-1072 (2001) 1-5.
23. Hamasaki, K., Tajima, H., et al., Utilization of Waste Vegetable Oil Methyl Ester for Diesel Fuel, *SAE paper*, No. 2001-01-2021 (2001) 1-6.
24. Yamane, K., Kawasaki, K., et al., A Fundamental Study for the Prevention of Biodiesel Fuel Oxidation Deterioration (First Report) -Unsaturated Fatty Acid Methyl Esters and Thermal Oxidation Characteristics- (in Japanese), *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, 37-2 (2006) 61-66.
25. Yamane, K., Kawasaki, K., et al., Ibid, (Second Report) -Methyl Ester Composition in Biodiesel and Storage Stability- (in Japanese), *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, 38-4 (2007) 109-113.
26. Yamane, K., Kawasaki, K., et al., Ibid, (Third Report) -Relationship between Factors Affecting Oxidation and Characteristics of Oxidation- (in Japanese), *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, 38-4 (2007) 115-120.
27. Shiotani, H., Goto, S., Hoshino, T., Applicability Investigation of Biodiesel Fuel for Automotive fuel (in Japanese), *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*, 60-1 (2006) 94-99.

28. Yamane, K., Kawasaki, K., et al., Oxidation stability of biodiesel and its effects on diesel combustion and emission characteristics, *International Journal of Engine Research*, 8-3 (2007) 307-319.
29. Kinoshita, E., et al., Diesel Combustion of Palm Oil Methyl Ester Blend Fuels with Various Gas Oils (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 73-729 (2007) 1250-1255.
30. Shudo, T., Fujibe, A., et al., Improvement of Cold Flow Performance and Exhaust Emissions of PME by Ethanol Addition (in Japanese), *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, 37-5 (2006) 89-94.
31. Nakasato, T., Okamoto, T., Konno, M., Combustion Characteristics and Fuel Properties of a DI Diesel Engine Fueled with Palm Oil Methyl Ester/DME Composite Fuel, (in Japanese), *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, 36-5 (2005) 69-74
32. Kinoshita, E., Myo, T., et al., Diesel Combustion Characteristics of Palm Oil Ethyl Ester (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 73-728 (2007) 1135-1141.
33. Ueta, Y., Kinoshita, E., et al., Diesel Combustion Characteristics of Palm Oil Butyl Ester (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 74-742 (2008) 1451-1457.
34. Kawano, D., Ishii, H., et al., Research and Development of Diesel Engine Fuelled with Biodiesel (First Report) -Effect of Biofuel on Emission Characteristics of diesel Engine- (in Japanese), *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, 37-4 (2006) 167-172.
35. McCormick, R.L., Christopher J., et al., Regulated Emissions From Biodiesel Tested in Heavy-Duty Engines Meeting 2004 Emission Standards, *SAE paper* No. 2005-01-2200 (2005) 1-12.
36. Shimada, K., Osada, H., et al., Diesel Combustion and Emission Study using Bio-mass Fuel in a Highly Boosted Single Cylinder Engine (First report) -The Comparison between RME and Diesel Fuel- (in Japanese), *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, 37-4 (2006) 161-166.
37. Williams, A., McCormick, R.L., et al., Effect of Biodiesel Blends on Diesel Particulate Filter Performance, *SAE paper* No. 2006-01-3280 (2006) 1-11.
38. Yamane, K., Asakawa, T., et al., Characteristics of DPF in using Biodiesel Fuel (First report) -Results of DPF by Road and Rig Tests- (in Japanese), *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, 35-3 (2004) 59-64.
39. Haibara, T., Ikeda, T., Senda, J., Reformulation of Biodiesel Fuel to Lighter Quality by Mixing Low Boiling Point Fuel (First report) -Fundamental Analysis of Combustion Characteristics- (in Japanese), *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, 38-2 (2007) 101-106.
40. Yoshimoto, Y., Onodera, M., Tamaki, H., Performance of a Diesel Engine Using Transesterified Fuel from Vegetable Oil (Effects of Water Emulsification), (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 67-653 (2001) 264-271.
41. Yoshimoto, Y., Tamaki, H., Reduction of NOx and Smoke Emissions in a Diesel Engine Fueled by Biodiesel Emulsion Combined with EGR, *SAE paper*, No. 2001- 01-0649(2001) 1-9.
42. Hamasaki, K., Hirotsu, A., et al., Utilization of Emulsified Vegetable Oil Methyl Esters for Diesel Fuel (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 67-663 (2001) 2898-2904.
43. Jaqin, C., Hamasaki, K., et al., Diesel Combustion with Emulsified Biodiesel without Adding Emulsifier (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 70-695 (2004) 1878-1883.
44. Hamasaki, K., Kinoshita, E., et al., Effects of Water Droplet Size and Crude Glycerin Content as an Emulsifier on Diesel Combustion with Emulsified Biodiesel (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 70-699 (2004) 2907-2913.
45. Kinoshita, E., Hamasaki, K., et al., Diesel Combustion Characteristics of Emulsified Palm Oil Methyl Ester (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 73-733 (2007) 1965-1971.
46. Kawasaki, K., Yamane, K., Engine Performance and Emission Characteristics of Dual-Fuel Diesel Engines with Biodiesel and Low-Calorie Gas Fuels (in Japanese), *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, 38-4 (2007) 121-126.
47. Hamasaki, K., Kinoshita, E., et al., Combustion Characteristics of Dual fuel Diesel Engines with Biodiesel as an Ignition fuel (1st Report, Investigation for CNG Used a Main Fuel), (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 73-732 (2007) 1731-1736.