

■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以外について—

Applied Technology of Vegetable Oils for Diesel Engines
— Use of Various Fuels expect for Biodiesel Fuel —木下 英二^{1*}・吉本 康文²KINOSHITA, Eiji^{1*} and YOSHIMOTO, Yasufumi²¹ 鹿児島大学工学部 〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40
Kagoshima University, 1-21-40 Korimoto, Kagoshima-shi, Kagoshima 890-0065, Japan² 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, Japan

2009年3月27日受付; 2009年5月11日受理/Received 27 March, 2009; Accepted 11 May, 2009

Abstract : A survey of published papers was carried out to evaluate the technology applied to vegetable oils expect biodiesel fuel (BDF) in diesel engines. The paper describes the findings and the development of this research field. The analysis of 40 papers in Japanese and English established the following points as important with many related studies: (1) the differences in the fuel properties and the combustion characteristics of neat vegetable oils and ordinary diesel fuel, (2) the spray characteristics and the mechanisms of the spray combustion, (3) improvements of combustion by mixing with volatile fuels, (4) improvements of combustion by fuel heating, (5) improvements of combustion by water emulsification, (6) engine modifications, (7) vegetable oil hydrogenating process. For the future, the following research themes can be suggested: development of modification engine fueled with neat vegetable oils, and development of vegetable oil hydrogenating process.

Key Words : Vegetable Oil, Paper Survey, Research Trend, Diesel Engine, Combustion Characteristic, Fuel Property, Engine Performance, Emission, Hydrogenation

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(バイオディーゼル燃料(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、副生物である粗製グリセリンの処理をとまなうこと、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。

前稿[3]では、BDFのエンジン適用技術に関する内外の研究論文47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。本稿ではBDF以外の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。なお、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、1980～2007年を対象に国内外の主要な文献(日本機械学会論文

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

Table 1 Classification of the test fuels and the diesel engine types on references in present paper

Oil and fat	DI		IDI	
	Jerk pump	Common rail	Pre-chamber	Swirl chamber
Rapeseed oil	2, 9, 11, 12, 20, 24, 25, 28, 30, 31, 34, 35, 36		9, 13, 14, 16, 24	9, 32, 33
Sunflower oil	7, 8, 21		4, 5, 6	
Soybean oil	26, 34			
Palm oil	2			
Used cooking oil	22, 23, 27, 29, 38		37 (Heat Insulated)	
Animal fat	10, 29			
Hydrogenated palm oil		40		

Number in table: Reference

Table 2 Properties of vegetable oil fuels [2]

Properties	Diesel fuel	Rapeseed oil	Palm oil	Rapeseed oil Methyl Ester
Flash point	90-120	320-330		
Net calorific value (kJ/kg)	43126	36887	36553	37055
(A/F) _{st}	14.37	12.53	12.42	12.48
Cloud point(°C)	-4.0	5.0	27.0	-4.0
Density @ 15°C (kg/m ³)	820	921	904 (30°C)	885
Carbon (wt%)	87.5	78.2	76.49	77.06
Hydrogen (wt%)	12.5	11.71	12.11	11.91
Oxygen (wt%)	0.0	10.09	11.40	11.03
Kinematic viscosity @ 15°C, mm ² /s	4.8	51.7 (30°C)	63.6 (30°C)	6.37
Average molecular weight (g/mol)	226.0	951.4	842.1	290.1

集, 自動車技術会論文集, SAE paper 等, 詳細は文献[1]を参照されたい)を調査研究した成果[1]をまとめたものである。また, 本稿をまとめるのに用いたキーワードは, ディーゼルエンジン, 植物油, バイオディーゼル燃料以外, とした。

2. BDF以外の植物油燃料のエンジン適用技術に関する研究の分類

BDF 以外の植物油燃料のエンジン適用技術に関する研究を調査した結果, 以下に示す 6 つのカテゴリーに分類することが可能であった。

- (1) ニート利用時の特性と問題点究明を目的とした研究
- (2) 軽質燃料・低沸点燃料との混合による燃料特性改善
- (3) 燃料加熱による燃料特性の改善

(4) 乳化による燃焼特性の改善

(5) エンジン改造による対応

(6) 植物油の水素化処理による改質等

表 1 は, 調査した文献において用いられているディーゼル機関の仕様と供試燃料との組み合わせを文献番号により示したものである。なお, 供試燃料は原料のみの分類であり, 混合や乳化等の分類は示していないので, 詳細は後章を参照されたい。

各カテゴリーの研究成果を概説する前に, 1984 年の SAE Paper に公表された村山らの研究[2]を紹介しておきたい。この論文は菜種油およびパーム油を燃料として, 今日でも十分に通用している改質技術を駆使しながら総合的に検討を加えたものであって, その後になされた世界規模での植物油利用ディーゼル燃焼に関する研究をリードしたものである。表 2 に研究に用いられた供試燃料の燃料性状を示し, 図 1 に単気筒ジャーク式の直噴式ディーゼル機関を用いた実験結果を示す。表 2 より, 菜種油やパーム油は軽油に比べ 10 倍以上の高動粘度であり, 菜種油メチルエステル (菜種油 BDF) の動粘度は軽油の 1.3 倍程度と軽油に近い値である。植物系燃料は酸素を 10~11 % 含んでおり, そのため低発熱量が軽油に比べて約 15 % 低く, 理論空燃比 (A/F)_{st} が低い。図 1 より, 菜種油およびパーム油の機関性能・排ガス特性は軽油と比較して特に問題になるような結果ではなく, むしろ NO_x やスモークが少なく, 騒音も小さいことが分かる。研究の結果として, 短時間の運転に対してはニートで利用しても機関性能, 排ガス特性に問題はないが, 長時間運転した場合にはカーボン・デポジットの増大およびピストンリングのスティックが生じることを明らかにした。そして, この問題を克服するための実用的な解決策として, ①燃料温度を 200 °C 以上に高めること, ② 25 vol.% の軽油または 20 vol.% のエタノールを混合すること, ③植物油をメチルエステルに改質すること, などであることを見いだしている。

ここで, 原料油である植物油について言及すると, 植物油燃料として考えられているものはパーム油, 大豆油, 菜種油, ひまわり油, ココナッツ油, 米油が主なものであるが, 昨今, バイオ燃料と食料の競合が問題視されてきている中, ヤトロファ (南洋アブラギリ) 油等の非食用油の利用にも注目が集まっている。これらの油はそれぞれ特有の脂肪酸組成を持ち, そのため燃料性状が幾分異なり, 酸化安定性も異なる。例えば, 菜種油はパーム油に比べて不飽和脂肪酸含有率が高く, そのため酸化安定性が低く, また, 表 2 に示すように, 曇り点はパーム油に比べて低い。植物油の生産量, 油分量, ヨウ素価, 脂肪酸組成等は前稿[3]を参照されたい。

3. ニート利用時の特性, 問題点究明を目的とした研究

比較的初期の研究として, ニートのひまわり油を燃料とする予燃焼室式エンジンの低温始動性が解析されている

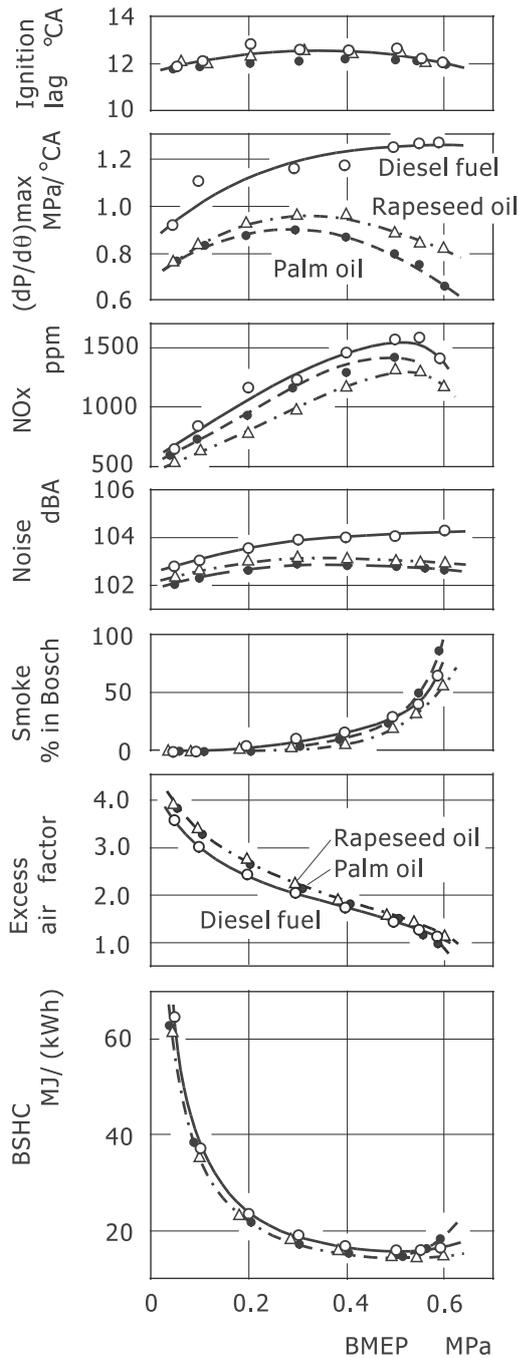


Fig.1 Engine performance for rapeseed oil, palm oil, and diesel fuel [2]

[4-6]. 始動性向上のための二段噴射方式を考案し, その効果をエンジン試験により確認した結果, 通常噴射系で始動不可能となる温度が 10°C であったものが -1°C まで改善できたとしている. 直接噴射式エンジンにひまわり油をニート使用した研究によれば, 軽油に比べ着火遅れが短く PM (粒子状物質) 中の SOF (可溶性有機成分) は増大する[7]ものの, PAH (多環芳香族炭化水素) は顕著に低減することが報告されている[7,8].

6 種類の最新ディーゼルエンジンにニート菜種油を適用した研究[9]では, 直噴式を用いた場合に排ガス特性の点で

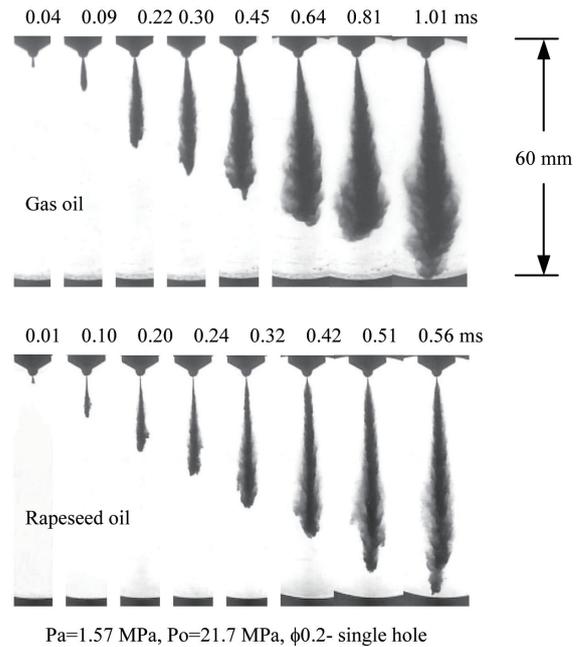


Fig.2 Comparison of spray with gas oil and rapeseed oil [12]

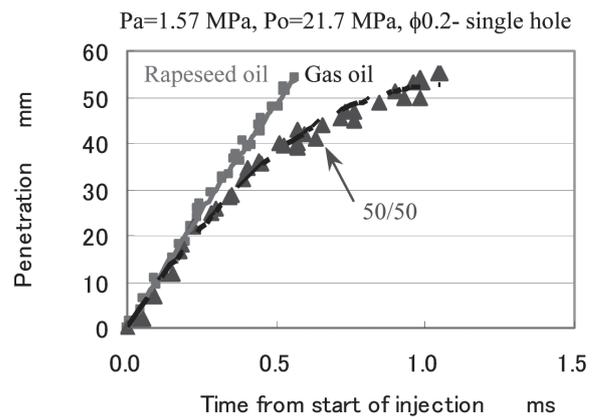


Fig.3 Comparison of spray penetration [12]

軽油よりも良好であること, 副室式や大きなシリンダを有するエンジンは耐久性の点でも問題のないことが報告されている. 一方, 廃食用油の適正な処分方法を模索するという観点から, 外食産業より排出された大豆油や動物油脂をニート利用した報告[10]がある. 低負荷域での $\text{CO} \cdot \text{THC}$ 増大を除くと, とくに大きな問題なしに運転ができています.

ニート植物油のディーゼル噴霧特性の研究も行われている[2,11-12]. 一例として, 常温高圧の定容器内での菜種油の噴霧性状をシャドウグラフ法により観察した結果[12]を図 2 に示す. これは, 容器内圧力 $P_a = 1.57 \text{ MPa}$, 噴射開始圧 $P_o = 21.7 \text{ MPa}$ で, 噴射ノズルは噴孔径 0.2 mm の単孔ホール形である. 図 2 から, 菜種油は軽油に比べ噴霧の広がり角が小さいことが分かる. また, 噴射開始からの遅延時間を変えながら測定された噴霧画像から求めた噴霧到達距離の測定結果を図 3 に示す (図 3 中には菜種油と軽油の

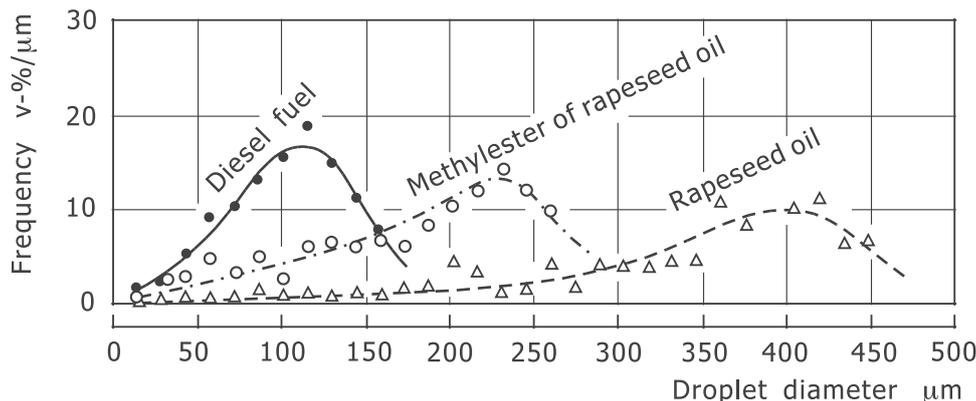


Fig.4 Droplet diameter distribution curves [2]

50% 混合燃料の到達距離が記号のみで、ニート軽油が破線で示されている)[12]. 図 3 より、噴射開始直後は菜種油の噴霧到達距離は軽油と同じであるが、噴霧開始後 0.2 ms を過ぎると軽油に比べて徐々に増大していき 0.5 ms では 30% 近くもの差が生じていることが分かる. ニート菜種油の到達距離が軽油に比べて増加する理由として、菜種油の高粘度特性が微粒化の悪化をもたらし、その結果、噴霧束内への空気導入が抑えられ、到達距離が増大すると述べられている. また、大気圧下のシリコン油上に噴霧して捕集した菜種油と軽油の噴霧液滴径の測定結果を図 4 に示す[2]. 図 4 には菜種油メチルエステルの測定結果も示されている. 図 4 に示されるように、菜種油は動粘度が高いために、噴霧の微粒化が悪く、軽油に比べて噴霧粒径が大きくなっている.

精製工程途中の 4 種類の菜種粗製油による一連の研究結果が公表されている[13-17]. 脱酸油 (遊離脂肪酸を除去したもの)、脱ガム油、水和脱ガム油の順に熱効率は良好であったが、原油は大きく劣るなど、精製工程により影響を受けるとしている. また、長時間運転に対しても同様であって、脱酸油の場合に 200 時間の安定した運転が可能であり、液浸法により測定した噴霧の平均粒径は原油などと比べて相対的に小さいことが報告されている. さらに噴霧粒径に関して、噴射ノズルタイプ[18]や噴射圧力[19]の影響などについても検討がなされている. 菜種油の精製工程が機関性能、排出物特性に及ぼす影響について、近年の研究ではほとんど影響を受けないとの報告がなされており、精製工程を省略できる可能性が指摘されている[20].

4. 軽質燃料・低沸点燃料との混合による燃料特性改善

この方法によれば粘度の低下と蒸発特性の改善が得られるので、ニート利用に比べてシステムの信頼性や耐久性の向上が期待できる. 植物油の種類と改質剤 (改質燃料) との組合せは多様であり、混合比率なども変えながら燃料特性、エンジン性能、排出物特性等が調べられている. たとえば、ひまわり油と軽油[8,21]、廃食用油と軽油[22-23]、菜種油

と軽油[11-12,24-25]、大豆油と灯油[26]、廃食用油と灯油[27]、菜種油と含酸素化合物[28]など、多くの研究が実施されている.

上記特性のほかにも植物油混合燃料の壁面蒸発特性[11]、噴霧性状[11-12]、噴霧到達距離・噴霧角[11-12]、燃料噴射率[12]などへの影響についても調査がなされている. ディーゼル燃焼と大きく条件は異なるが、単一油滴の懸垂燃焼実験なども行われている[25]. その結果によれば、ニート菜種油では油滴の着火遅れが非常に長くなるのに対して、菜種油と軽油との等量混合油では軽油とほぼ等しい着火遅れが得られること、軽油油滴では燃焼中に多量のスートが生成するのに対して、菜種油混合燃料ではスート生成が顕著に抑制されるなど、植物油燃料の油滴燃焼特性が明らかにされている.

5. 燃料加熱による燃料特性の改善

この方法は植物油を加熱することによって動粘度を低下させ、噴霧の微粒化特性を改善して速やかな混合気形成を得ようとするものである. 前述の村山らによる研究[2]は、加熱温度範囲が広く ($\sim 200^\circ\text{C}$) 示唆に富んだ知見が得られている. 廃食用油と灯油との混合燃料に対して、燃料温度を室温から 60°C まで上昇させた場合であっても熱効率が若干の改善が得られるとの報告がある[26]. なお、この研究では、ASTM 方式による着火性も調べられており、灯油が着火剤の働きをなすために廃食用油混合率 60% までは灯油と遜色のない着火性を示すことが報告されている. さらに、常温固体状の動物油脂を排ガスのもつ熱を利用して液体状にする、燃料加熱装置搭載型ディーゼル発電システムが提案されている[29]. この場合、動物油脂は着火遅れが短く、大豆油に比べて機関性能や排ガスの環境特性は良好であることが示されている.

6. 乳化による燃焼特性の改善

油中水滴型乳化燃料は微粒子状態の水を石油燃料中に分

散混合したものであり, NO_x とスモークを同時に低減しうる燃焼法として研究が行われてきた. ディーゼル燃焼が改善される主たる要因は, 水の含有量に応じて噴霧の運動量が増大するので噴霧束内への空気導入が増大し, 混合気形成が改善されるためであると考えられている. また, 着火遅れが長くなって予混合燃焼量が増大する効果, さらに水性ガス反応などの効果も加わり, スモークの低減が可能となる. この技術が植物油の燃焼改善に応用されたものであり, 直噴式エンジン[30,31], ならびに渦流室式エンジン[32,33]に水乳化菜種油を適用した際の燃焼改善効果が報告されている. また, 菜種油と大豆油との等量混合油[34], 廃食用油と軽油との等量混合油[22]をベース燃料とした水エマルジョンなども研究されている. これら植物油を含有するエマルジョンの最適水混合比率は 15~30% である. 水乳化燃料では分散している水粒子の安定性が問題となる場合が多い. 一般的には水粒子の凝集・合体を防ぐための乳化剤が必要であり, 取扱いが煩雑になる. このほか, 菜種油とエタノールとのマイクロエマルジョンをエンジンに適用した研究なども報告されている[35].

7. エンジン改造による対応

植物油燃焼に適合するように, エンジンそのものを改造する研究開発も試みられている. 多種燃料直噴式高速ディーゼル[36]は, 菜種油で運転ができるような対策を施したエンジンである. すなわち, オイルによる高温冷却, 軽油用と菜種油用の独立した燃料供給・噴射系, 菜種油予熱の経路, 噴霧の壁面付着を抑制する燃焼室形状と空気流動, 高い燃焼室壁温を維持する断熱設計, などの配慮がなされている. これに対して副室式遮熱ディーゼル[37]は, 廃食用油専焼をコンセプトに研究開発されたセラミックエンジンである. 性能試験の結果, 熱効率は軽油とほぼ同等であり, NO_x の低減, さらにスモーク濃度が半減するという優れた成果が得られている. このほか, 廃植物油を A 重油と混焼させる目的で開発した 500 kW 級コージェネ用ディーゼルが, 客先にて問題なく稼動しているとの報告[38]もあった.

8. 植物油の水素化処理による改質等

最近, FAME (脂肪酸メチルエステル) に変わるバイオディーゼル燃料として植物油の水素化処理技術が注目されている. これは, 水素化により植物油の不飽和結合を飽和化し, 酸素を脱酸するとともに, トリグリセライド (植物油) が分解されることで, 軽油の沸点に近い飽和炭化水素の液体燃料を製造する技術であり, 第二世代 BDF として期待されている[39].

小山らにより植物油の水素化処理技術の開発が行われている[39-40]. 図 5 はその反応スキーム (水素化脱酸素反応) であり, 高温高圧雰囲気中の触媒の下で植物油 (トリグ

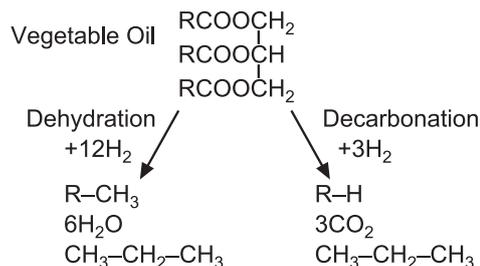


Fig.5 Scheme of hydrodeoxygenation reaction [40]

Table 3 Properties of Hydrogenated Palm Oil [40]

	Palm Oil	Hydrogenated Palm Oil	Palm Oil FAME	Diesel Fuel No. 2
Density (15°C) kg/m ³	915.9	785.2	876.1	821.6
Viscosity (30°C) mm ² /s	-	4.15	5.65	3.32
Higher Calorific Value MJ/kg	39.5	47.28	39.9	45.9
Cetane Number	-	101	62	61
Carbon mass%	77.0	84.8	76.6	86.1
Hydrogen mass%	11.5	15.1	12.2	13.8
Oxygen mass%	11.4	-	11.1	-
Sulfur mass%	< 1.0	< 1.0	< 1.0	4
Pour Point (°C)	25.0	20.0	12.5	-6
Cloud point(°C)	-	20.0	15.0	-30
CFPP (°C)	-	22.0	11.0	-9.0
Distillation (°C)	T10	-	284.5	333
	T50	-	291.0	354
	T90	-	301.0	359
Acid Value (before test) mgKOH/g	-	0.00	0.26	0.00
Acid Value (after test) mgKOH/g	-	0.03	10.4	0.07

リセライド) と水素から, 水素化反応 (脱水: Dehydration) と脱炭酸反応 (Decarbonation) によりパラフィン系炭化水素, 水, プロパンが生成する. 小山らは触媒として水素化脱硫触媒, 植物油原料として精製パーム油を用いた実験を行い, その結果, 反応圧力 6 MPa, 反応温度 260 °C 以上において, パーム油は完全に分解され, 85% 程度の軽油留分 (水素化処理パーム油), 10% 程度の水, 5% 程度のガス (CO_2 , CH_4 , C_3H_8) が生成することを報告している. 表 3 に水素化処理パーム油の燃料性状を示す. 表 3 には酸化安定性試験 (115 °C, 16 時間の酸素バブリング試験) の酸価 (Acid Value) 測定の結果も示している. 水素化処理パーム油は C_{15} ~ C_{18} の直鎖状炭化水素で構成され, 軽油に近い性

状を持ち、パーム油 FAME より高セタン価で酸化安定性に優れているが、低温流動性は劣ることが分かる。また、コモンレール直噴式ディーゼル機関による EC モード試験も行われており、水素化処理パーム油 B20 (水素化処理パーム油 20 mass%, 軽油 80 mass%) は軽油に比べて、THC, CO および PM はそれぞれ 22%, 15% および 11% 低減し、NO_x は約 5% 増加することが報告されている[40]。また、小山らは燃料の LCA 評価も行っており、水素化処理パーム油の Well-to-Wheel CO₂ はパーム油 FAME と同じで、軽油に比べて 60% 低減する。総合エネルギー効率は、水素化処理パーム油で約 75%, パーム油 FAME で約 61%, 軽油で約 92% であることが報告されている。

このほか、木質バイオマスから油化された熱分解油 (木タール油) によるエンジン性能なども検討されている[41]。BDF への 60% 混合までは熱効率の悪化は抑えられるが、SOF やアルデヒド類の増大が問題であること、木タール油のニート利用では噴射系の磨耗や燃焼室内へのデポジットが発生し長時間運転が困難であったとされている。

9. 結言

バイオディーゼル燃料 (BDF) 以外のエンジン適用技術に関する内外の研究論文 40 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。全体を通していえることは、ごく短時間の運転であれば既存の小型高速ディーゼルでも植物油のニート燃焼に対応できるだけの多種燃料適性を有しているという事実が確認できたことである。植物油燃料ではスモークの低減が得られるなど、むしろ石油燃料をしのぐ一面もみられた。問題は、時間経過にもなう燃料系統、噴射系統、燃焼室系統、潤滑系統などの不具合や故障をいかに回避しうるかにかかっている。この方式の実用化にはエンジンの改造も含め、システムの耐久性や信頼性を確保するための適切な対策をとっていく必要がある。また、植物油の水素化処理やバイオマス資源をガス化して FT 合成する方法 (BTL: Biomass to Liquid) も開発されており、これらは BDF (FAME) よりも燃料品質を一定にすることが容易であり、次世代のバイオマス液体燃料の実用化も遠い将来のことではないと思われる。

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. (17 researchers), 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., Oh, Y., Miyamoto, N., Chikahisa, T., Takagi, N., Itow, K., 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. Yoshimoto, Y., Kinoshita, E., Applied Technology of Vegetable Oils for Diesel Engines - Use of Biodiesel Fuel - (in Japanese), *Journal of the Combustion Society of Japan*, submitted.

4. Araya, K., Yoshida, T., Analysis of Ignitability of Diesel Engines under Low Temperatures Condition Using Sunflower Oil as a Renewable Fuel (Part 1) - Behavior of Spray Injected into Combustion Chamber - (in Japanese), *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 47-2 (1985) 210-215.

5. Araya, K., Yoshida, T., Analysis of Ignitability of Diesel Engines under Low Temperatures Condition Using Sunflower Oil as a Renewable Fuel (Part 2) - Ignition lag of Injected Fuel Particles - (in Japanese), *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 47-3 (1985) 273-277.

6. Araya, K., Yoshida, T., Analysis of Ignitability of Diesel Engines under Low Temperatures Condition Using Sunflower Oil as a Renewable Fuel (Part 3) - New Injection System (Double Injection System) - (in Japanese), *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 47-4 (1985) 429-434.

7. Abbass, M. K., Bartle, K. D., Davies, I. L., Andrews, G. E., Williams, P. T., Lalah, J. O., The Composition of the Organic Fraction of Particulate Emissions of a Diesel Engine Operated on Vegetable Oil, *SAE paper*, No. 901563 (1990) 1-13.

8. Ziejewski, M., Goettler, H. J., Cook, L. W., Flicker, J., Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emissions from Plant Oil Based Alternative Fuels, *SAE paper*, No. 911765 (1991) 1-8.

9. Hemmerlein, N., Korte, V., Richter, H., Performance, Exhaust Emissions and Durability of Modern Diesel Engines Running on Rapeseed Oil, *SAE paper*, No. 910848 (1991) 1-16.

10. Morino, T., Morimune, T., Diesel Engine Operation and Exhaust Emissions When Fueled with Animal Fats, *SAE Paper*, No. 2005-01-3673 (2005) 1-6.

11. Yoshimoto, Y., Tamaki, H., Performance and Emission Characteristics of Diesel Engines Fueled by Rapeseed Oil-Gas Oil Blends (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 68-675 (2002) 3191-3198.

12. Yoshimoto, Y., Application Study of Rapeseed Oil and Light Fuel Oil Mixture in DI Diesel Engine (in Japanese), *Journal of The Japan Institute of Marine Engineering*, 38-12 (2003)

- 829-836.
13. Togashi, C., Kamide, J., Operation of a Small Diesel Engine Using Unrefined Rapeseed Oil as Fuel (Part 1): Load Performance Tests (in Japanese), *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 57-6 (1995) 87-95.
 14. Togashi, C., Kamide, J., Operation of a Small Diesel Engine Using Unrefined Rapeseed Oil as Fuel (Part 2): Long Term Operating and Starting Tests (in Japanese), *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 58-2 (1996) 75-82.
 15. Togashi, C., Kamide, J., Particle Size of Injected Deacidified Rapeseed Oil Spray (in Japanese), *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 59-2 (1997) 89-99.
 16. Togashi, C., Kamide, J., Operation of a Small Diesel Engine Using Unrefined Rapeseed Oil as Fuel (Part 3): Deposit in Combustion Chamber at No-Load Continuous Operation (in Japanese), *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 59-3 (1997) 57-64.
 17. Togashi, C., Matsumori, K., Kamide, J., Effect of Viscosity on the Size of Droplets of Vegetable Oil (in Japanese), *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 60-5 (1998) 83- 89.
 18. Togashi, C., Matsumori, K., Kamide, J., Atomization of Injected Vegetable Oil Spray and Injection Nozzle Types of Diesel Engines (in Japanese), *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 63-6 (2001) 102-106.
 19. Togashi, C., Matsumori, K., Atomization of Injected Vegetable Oil Spray and Injection Pressure (in Japanese), *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 65-2 (2003) 120-125.
 20. Nishi, K., Korematsu, K., Tanaka, J., Potential of Rapeseed Oil as Diesel Engine Fuel, *SAE Paper*, No. 2004-01-1858 (2004)1-8.
 21. Ziejewski, M., Goettler, H. J., Comparative Analysis of the Exhaust Emissions for Vegetable Oil Based Alternative Fuels, *SAE paper*, No. 920195 (1992) 65-73.
 22. Morimune, T., Yamaguchi, H., Konishi, K., Exhaust Emission and Performance of Diesel Engine Operating on Waste Food-Oil (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 66-641 (2000) 294-299.
 23. Yoshimoto, Y., Onodera, M., Tamaki, H., Reduction of NOx, Smoke, and BSFC in a Diesel Engine Fueled by Biodiesel Emulsion with Used Frying Oil, *SAE Paper*, No. 1999-01-3598 (1991) 1-8.
 24. Reece, D., Peterson, C. L., Progress Report Idaho on-Road Test with Vegetable Oil as a Diesel Fuel, *NREL-CP-200-5768*, vol.2, (1993) 891-901.
 25. Yoshimoto, Y., Koido, M., Performance and Emissions of Diesel Fuels Containing Rapeseed Oil and the Characteristics of Evaporation and Combustion of Single Droplets, *SAE Paper*, 2003-01-3201 (2003) 1-9.
 26. Takeda, H., Moriya, S., Yaginuma, F., Application of Blended Fuel with Soybean Oil and Kerosene to Diesel Engines (in Japanese), *Journal of The Japan Institute of Marine Engineering*, 36-1 (2001) 49-56.
 27. Takeda, H., Moriya, S., Tanasawa, I., An Attempt to Use Waste Edible Oil - Kerosene Mixture in Diesel Engine (Change of Characteristics by Heating) (in Japanese), *Journal of The Japan Institute of Marine Engineering*, 38-3 (2003) 176-184.
 28. Yoshimoto, Y., Onodera, M., Performance of a Diesel Engine Fueled by Rapeseed Oil Blended with Oxygenated Organic Compounds, *SAE Paper*, No. 2002-01-2854 (2002) 1-9.
 29. Morino, T., Morimune, T., Exhaust Emissions and Performance of Diesel Engine Operating on Vegetable Oil and Animal Fat (in Japanese), *Journal of The Japan Institute of Energy*, 85-11 (2006) 882-887.
 30. Hamasaki, K., Tanaka, Y., Kurogi, F., Performance and Emission Characteristics of a Small Diesel Engine with Emulsified Rapeseed Oil Fuels (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 59-548 (1992) 1551-1556.
 31. Hamasaki, K., Tanaka, Y., Nakamura, T., Takaki, T., Effects of Injection System on Performance of a Direct-Injection Diesel Engine with Emulsified Rapeseed Oil Fuels (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 61-581 (1995) 339-343.
 32. Hamasaki, K., Takaki, T., Kinoshita, E., Tanaka, Y., Performance and Emission Characteristics of a Swirl-Chamber Diesel Engine with Emulsified Rapeseed Oil Fuels (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 63-612 (1997) 2897-2901.
 33. Hamasaki, K., Ohsako, T., Kinoshita, E., Takasaki, K., Effects of Rapeseed Oil Fuel Properties on Exhaust Emissions of a Swirl-Chamber Diesel Engine (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Ser. B, 65-631 (1999) 1146-1151.
 34. Crookes, R. J., Kiannejad, F., Nazha, M. A. A., Seed-Oil Bio-Fuel of Low Cetane Number: the Effect of Water Emulsification on Diesel-Engine Operation and Emissions, *Journal of the Institute of Energy*, 68 (1995) 142-151.
 35. Yamane, K., Kawasaki K., Aoki, T., Iwamoto, S., Nabetani, H., Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine Fueled with Rapeseed Oil-Ethanol Micro-Emulsion (in Japanese), *Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan*, 36-6 (2005) 105-110.
 36. Sun, P., Okada, H., Characteristics and Performances of High Speed Direct Injection Diesel Engine Running on Vegetable Oil (in Japanese), *Journal of the Marine Engineering Society in Japan*, 33-12 (1998) 864-867.

37. Sasaki, H., Sekiyama, S., Nakashima, K., Combustion and Performance of a Heat Insulate Engine Fueled with Waste Cooking Oil (in Japanese), *Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan*, 34-2 (2003) 33-38.
38. Ishii, A., Okeya, T., Diesel Engine Performance on Spent Vegetable Fuel Oil (in Japanese), *Journal of the Marine Engineering Society in Japan*, 35-3 (2000) 222-226.
39. Koyama, A., Development of Bio-diesel Fuel for Next Generation (in Japanese), *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*, 61-11 (2007) 22-26.
40. Koyama, A., Iki, H., Iguchi, Y., Tsurutani, K., Hayashi, H., Misawa, S., Vegetable Oil Hydrogenating Process for Automotive Fuel, *SAE Paper*, No. 2007-01-2030 (2007) 1-6.
41. Yamane, K., Yuuki, R., Shimamoto, Y., Combustion and Exhaust Emission Characteristics of Diesel Engines Fueled with Wood-Derived Pyrolysis Tar Oil (in Japanese), *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, 35-1 (2004) 83-88.