

# ヒマワリ油バイオディーゼルによる 直噴式ディーゼル機関の燃焼特性

池田 大樹\* 亀田 昭雄\*\* 市場 真一\* 笹川 裕樹\* 木下 英二\*\*\*

Combustion Characteristics of a Direct Injection Diesel Engine with Sunflower Oil Biodiesel

Hiroki IKEDA\*, Akio KAMEDA\*\*, Shinichi ICHIBA\*, Yuki SASAGAWA\* and Eiji KINOSHITA\*\*\*

Sunflower oil has different two types of the fatty acid composition, high oleic acid type and high linoleic acid type. In this study, to clarify which type is better as a biodiesel feedstock, the combustion characteristics of high oleic sunflower oil methyl ester (SfME-ho) and high linoleic sunflower oil methyl ester (SfME-hl) were investigated using a DI diesel engine. SfME-ho and SfME-hl have same thermal efficiency and similar exhaust emissions compared with rapeseed and soybean oil methyl esters. SfME-ho has lower pour point, shorter ignition delay and lower HC, CO and NOx emissions compared with SfME-hl. From the experimental results, it is concluded that SfME-ho is better alternative diesel fuel than SfME-hl.

**Keywords :** Diesel Engine, Alternative Energy, Liquid Fuel, Biodiesel, Methyl Ester, Sunflower Oil

## 1. まえがき

動・植物油を原料とす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、ディーゼル機関の排ガス中の HC、CO および PM を低減でき<sup>1)</sup>、また、カーボンニュートラルであるので燃料のライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出を削減でき<sup>2)</sup>、ディーゼル代替燃料として有望である。既に、欧州や米国ではナタネ油、大豆油、ヒマワリ油のバイオディーゼルが実用化されており、アジアでも生産量の多いパーム

油や酸素含有率の高いココナツ油などを原料としたバイオディーゼルの利用が進められている。

表-1 に示すように、植物油の中で、ヒマワリ油は世界第4位の生産量<sup>3)</sup>があり、生産性は約 800kg/ha (ナタネ油: 約 1000kg/ha、大豆油: 約 500kg/ha) である。日本ではヒマワリ油のほとんどが輸入であるが、ヒマワリは日本においても栽培が可能で、ヒマワリ種子からのヒマワリ油の搾油率も 20~30% と比較的高く、また、ヒマワリは景観形成にも効果的な植物である。したがって、日本における休耕地の利用として、ヒマワリの栽培・利用は、食用植物油の確保、ヒマワリ廃食油の燃料化、景観形成の3つの観点から、ナタネの栽培・利用と同様に比較的有望なものの一つと考えられる。

また、ヒマワリ油には、主にリノール酸の含有率が高い従来のハイリノールのものとおレイン酸の含有率を高めたハイオレインのものがある。バイ

2011年8月20日受理

\* 博士前期課程機械工学専攻

\*\* 技術部

\*\*\* 機械工学専攻

オディーゼルは脂肪酸メチル (FAME) の混合物で、その燃料性状やディーゼル燃焼特性は FAME 組成に強く影響される。

本研究では、脂肪酸組成の異なる 2 種類のヒマワリ油 (ハイオレイン、ハイリノール) からバイオディーゼルを製造し、燃料性状を測定するとともに、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、ナタネ油と大豆油のメチルエステル、JIS 2 号軽油と比較し、ヒマワリ油メチルエステルのハイオレインとハイリノールのどちらがディーゼル代替燃料として有効であるか検討した。

## 2. 供試燃料

供試燃料として、2 種類のヒマワリ油から製造したヒマワリ油メチルエステルハイオレイン (SfME-ho) およびヒマワリ油メチルエステルハイリノール (SfME-hl)、比較用としてナタネ油メチルエステル (RME)、大豆油メチルエステル (SME) および JIS 2 号軽油 (Gas Oil) を使用した。これらのエステル燃料は、KOH を用いたアルカリ触媒法により製造した。

表-2 に各供試燃料の燃料性状、表-3 にガスク

ロマトグラフで測定した各エステル燃料の FAME 組成、FAME 単体のセタン価と凝固点を示す。表-3 から、SfME-ho はオレイン酸メチル (不飽和度 1) を質量割合で約 80%、SfME-hl はリノール酸メチル (不飽和度 2) を約 53%、RME はオレイン酸メチルを約 64%、SME はリノール酸メチルを約 55%それぞれ多く含んでいることが分かり、SfME-ho は RME、SfME-hl は SME にそれぞれ FAME 組成が近い燃料だということが分かる。

表-1 植物油の生産量<sup>3)</sup>

植物油	2008	2009	2010 (予測)
パーム油	44,410	46,110	48,040
大豆油	36,034	38,839	41,866
ナタネ油	21,292	23,629	23,448
ヒマワリ油	12,830	12,501	12,107
パーム核油	5,120	5,279	5,493
綿実油	4,803	4,502	4,817
落花生油	4,225	4,001	4,109

(単位：千トン)

表-2 供試燃料の性状

Properties		SfME-ho	SfME-hl	RME	SME	Gas Oil (JIS No.2)
Cetane number		57	52	55 <sup>4)</sup>	50 <sup>4)</sup>	56
Net calorific value	MJ/kg	37.83	36.62	37.65	37.57	43.12
Density@288K	kg/m <sup>3</sup>	883	874	885	887	832
Viscosity@313K	mm <sup>2</sup> /s	4.28	3.57	4.60	3.81	2.50
Pour point	°C	-7.5	-2.5	-7.5	-2.5	-12.5
C	mass%	77.0	77.2	77.1	77.2	87.3
H	mass%	12.2	11.9	12.2	11.9	12.5
O	mass%	10.8	10.9	10.8	11.0	—
Triglyceride	mass%	0.01	0.04	0.01	0.10	—
K	mg/kg	5.07	3.66	2.00	5.40	—
Water	mg/kg	665	625	986	1042	—
50% distillation temp.	°C	339	339	340	338	266
Stoichiometric air-fuel ratio		12.5	12.5	12.6	12.5	14.3

表－3 供試燃料の FAME 組成、および FAME 単体のセタン価と凝固点

FAME	C:N <sup>a</sup>	SfME-ho	SfME-hl	RME	SME	Cetane number	Melting point
Methyl palmitate	16:0	3.54	6.55	4.30	10.69	74.5 <sup>b</sup>	30.5 <sup>d</sup>
Methyl stearate	18:0	0.87	1.07	0.10	3.14	86.9 <sup>b</sup>	39.1 <sup>d</sup>
Methyl oleate	18:1	80.00	38.34	64.00	23.12	56.0 <sup>c</sup>	-20 <sup>d</sup>
Methyl linoleate	18:2	15.00	53.35	19.30	54.75	41.7 <sup>c</sup>	-35 <sup>d</sup>
Methyl linolenate	18:3	0.51	0.43	10.00	7.77	45.9 <sup>c</sup>	-57 <sup>d</sup>
Others		0.08	0.26	2.30	0.53	—	—

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

b) Cetane number from Ref. 5

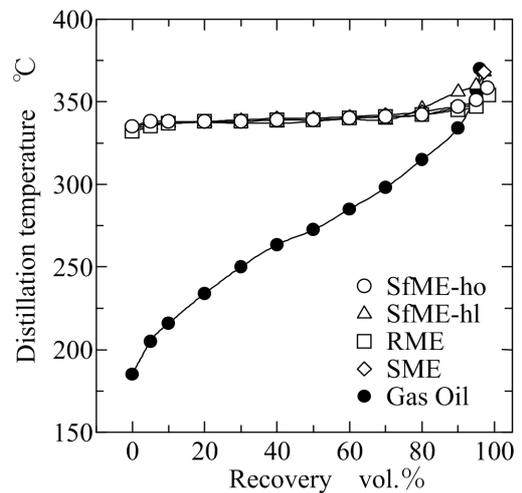
c) Cetane number from Ref. 4

d) Melting point from Ref. 6

表－2の各供試燃料の低発熱量、密度、動粘度、流動点、トリグリセライド（未反応油脂）濃度、カリウム濃度、水分、50%蒸留温度は測定値である。製造したエステル燃料は JIS 規格程度の高品質燃料である。表－2のエステル燃料の C、H、O は各々の FAME 組成より推算した。また、表－2の SfME-ho と SfME-hl のセタン価は表－3の FAME 組成、FAME 単体のセタン価を基に推算した。推算したセタン価は SfME-ho の方が SfME-hl より高く、高セタン価の FAME の含有率が高いためである。

表－2から、エステル燃料は軽油に比べて酸素を約 11%含有しており、そのため低発熱量が約 13%低い。エステル燃料は軽油より動粘度が幾分高く、また、エステル燃料間では SfME-hl と SME の動粘度が低く、不飽和度の高い FAME の含有率が高いほど動粘度が低くなっている。SfME-ho の流動点は -7.5℃で、SfME-hl の-2.5℃より 5℃低く、低温流動性に優れている。これは、表－3に示すように凝固点が高い FAME の含有率が高いためである。また、一般に不飽和度の高い FAME は酸化劣化し易いので、不飽和度の低い FAME で構成されている SfME-ho の方が SfME-hl より酸化劣化に対して優れた特性を示すと思われる。

図－1に供試燃料の蒸留性状を示す。エステル燃料は温度がほぼ一定の高沸点成分（330～350℃）で構成されていることが分かる。SfME-ho は他のエステル燃料とほぼ同じであるが、SfME-hl は 80%流出以降やや高い蒸留温度を示す。



図－1 蒸留性状

### 3. 実験装置および実験方法

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、NOx 濃度は CLD および Smoke 濃度 (Opacity) 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り測定した。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 BMEP は 0.67MPa）を変化させて行った。

表-4 供試機関の諸元

Engine Type	1 Cylinder, 4 Stroke, D.I., Water Cooled
Bore × Stroke	110×106 mm
Stroke Volume	1007 cm <sup>3</sup>
Compression Ratio	16.3
Rated Power	11.77 kW / 2200 rpm
Fuel Injection Pump	Jerk type
Nozzle Opening Pressure	19.6 MPa
Nozzle Holes	φ0.33 mm×4

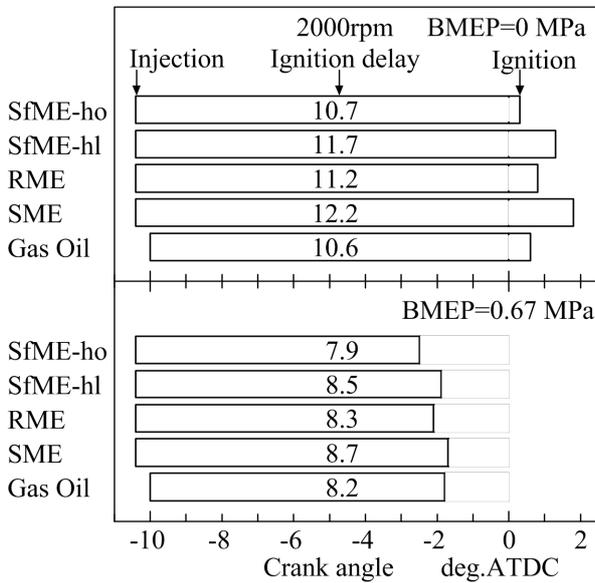
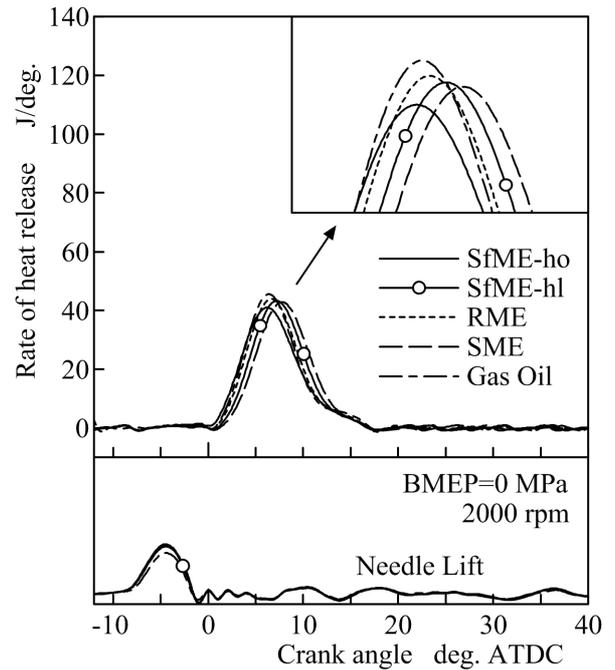


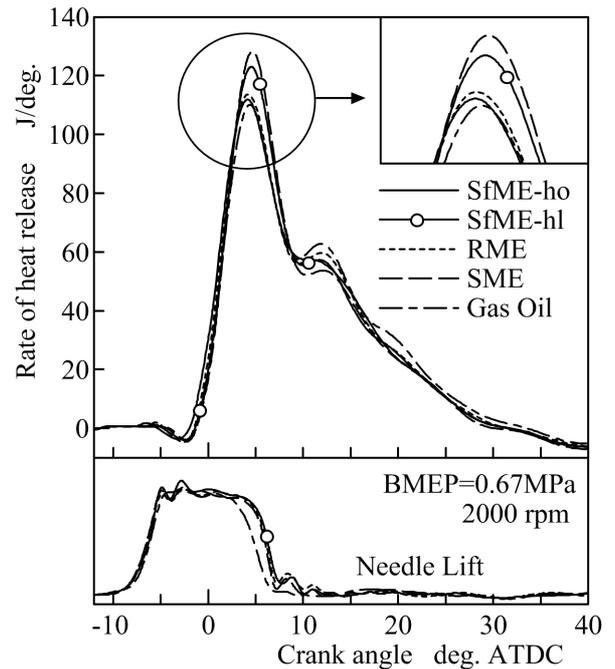
図-2 燃料噴射時期、着火時期、着火遅れ

#### 4. 実験結果および考察

図-2に、BMEP=0MPa（負荷0%）とBMEP=0.67MPa（負荷100%）における燃料噴射時期、着火時期および着火遅れを示す。これらはニードルリフトとシリンダ内圧力から求めた。エステル燃料の燃料噴射時期は軽油よりクランク角で約0.5度早い。これはエステル燃料の体積弾性率が軽油より高いからである<sup>7)</sup>。また、着火遅れは、SfME-hoが軽油より若干短く、次にRME、SfME-hl、SMEの順に長くなっており、表-2に示すセタン価が高い燃料ほど着火遅れが短くなっている。したがって、



(a) 負荷0% (BMEP=0 MPa)



(b) 負荷100% (BMEP=0.67MPa)

図-3 熱発生率とニードルリフト

表2の推算したSfME-hoとSfME-hlのセタン価は妥当な値であると考えられる。

図-3(a)と図-3(b)に、それぞれBMEP=0MPa

(負荷 0%) と BMEP=0.67MPa (負荷 100%) の場合について、熱発生率線図および噴射ノズルのニードルリフトを示す。図-3(a)と図-3(b)ともに、ニードルリフトは各エステル燃料でほぼ同じである。図-3(b)のニードルリフトから、燃料噴射期間は、低発熱量が低いエステル燃料の方が軽油より長くなっている。これは低発熱量が低い燃料ほど同じ熱量を得るのに多くの燃料を必要とするからである。一方、図-3(a)では、燃料噴射期間は殆ど変わらず、エステル燃料のニードルリフトのリフト量が軽油より幾分高くなっており、低発熱量に起因する燃料噴射量の増加を示している。

図-2と図-3(a)から、着火遅れが長い燃料ほど、熱発生率はピークをほとんど変えずに右へ移動しており、燃焼が幾分遅延していることが分かる。一方、図-3(b)では、着火遅れが長い燃料ほど(図-2)、着火後の最大熱発生率が高くなっている。これは、着火遅れが長いほど、着火遅れ期間に形成される可燃予混合気量が増加し、この可燃予混合気が着火後急激に燃焼したため、最大熱発生率が高くなったと考えられる。エステル燃料間では、不飽和度の高い FAME の含有率が高くなるにつれ、着火遅れが増大し、そのために、負荷 0%では燃焼が遅延し、負荷 100%では最大熱発生率が増加している。また、図-3(b)では、燃焼終了時期は全ての供試燃料でほぼ同じクランク角 40 度 ATDC である。

図-4に負荷に対する正味燃料消費率 BSFC お

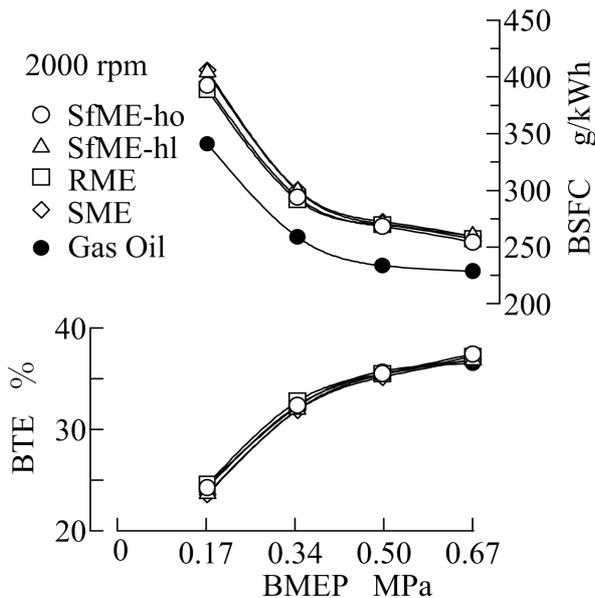


図-4 正味燃料消費率 BSFC と正味熱効率 BTE

よび正味熱効率 BTE を示す。エステル燃料の BSFC は軽油に比べて高い値を示している。これは、表-2に示すように、エステル燃料の低発熱量が軽油に比べ低く、同じ出力を得るには余計に燃料が必要なたためである。しかし、エステル燃料の BTE は軽油とほぼ同じ値を示している。

図-5に負荷に対する排ガス特性を示す。エステル燃料の HC 濃度は軽油より低いことが分かる。エステル燃料は酸素を燃料中に含んでいるため、軽油より燃焼が良好となり、HC 濃度が低下したと考えられる。エステル燃料間では、SfME-ho の HC 濃度が最も低く、SfME-hl が高くなっており、不飽和度の高い FAME の含有率が高くなるにつれて HC 濃度が高くなる傾向にある。これは、不飽和度の高い FAME の含有率が高くなるほど、着火性が悪くなり、その結果、燃焼が悪化したためと考える。CO 濃度

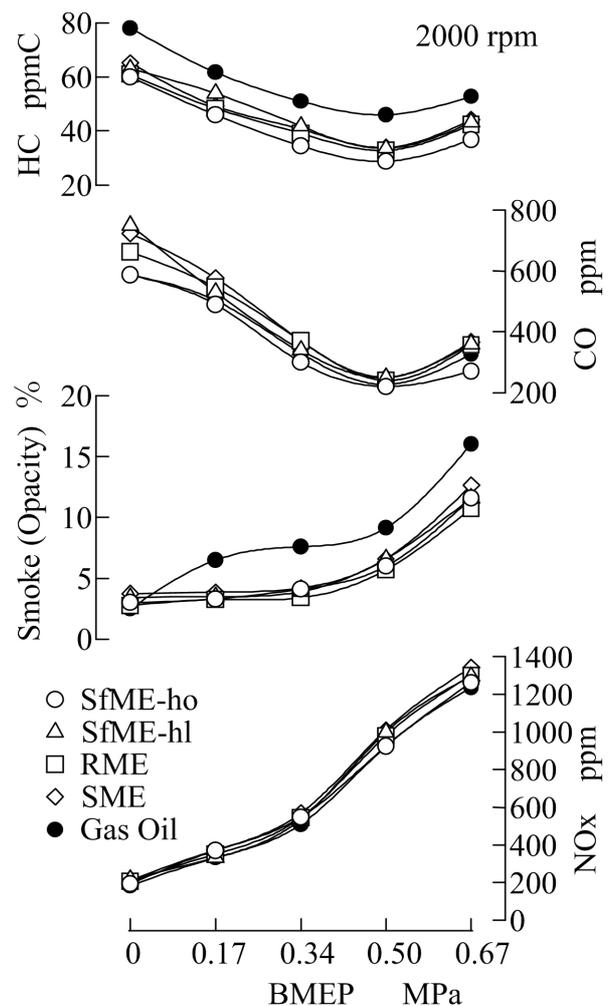


図-5 排ガス特性

は SfME-ho が軽油よりも若干低く (BMEP=0 では SfME-ho の CO 濃度は軽油と同じ値)、他のエステル燃料は軽油よりも幾分高い値を示し、特に低負荷で顕著である。エステル燃料を比較すると、不飽和度の高い FAME の含有率が高いほど CO 濃度が高くなる傾向を示す。これは、HC 濃度と同様に、不飽和度の高い FAME の含有率が高いほど着火遅れが長くなり、燃焼が悪化したと考えられる。

図-5 の Smoke 濃度は、BMEP=0MPa (負荷 0%) では、エステル燃料は軽油とほぼ同じ値を示しているが、BMEP=0.17MPa 以上ではエステル燃料が軽油より低くなっている。これは、エステル燃料が酸素を約 11% 含んでいるので、ディーゼル噴霧の燃料過濃部分で酸素不足が補われたために、Smoke 濃度が低減したと考えられる。また、エステル燃料間ではほぼ同じような値を示し、特に、SfME-ho の Smoke 濃度は SfME-hl とほぼ同じであった。これは各エステル燃料の酸素含有率がほぼ同じであるため、大きな違いが表れなかったと思われる。

図-5 の NOx 濃度は低負荷域において全ての供試燃料において大きな違いは見られない。これは、図-3 (a) の熱発生率線図に示すように、エステル燃料の最大熱発生率が軽油とほぼ同じであり、燃焼温度が同じであったためと考えられる。一方、高負荷の場合、エステル燃料の NOx 濃度は軽油より高い値を示す。これは、図-3 (b) に示すように、エステル燃料の最大熱発生率が軽油より高くなっており、最大熱発生率が高いほど燃焼温度が高くなったためと考えられる。また、高負荷において、SfME-ho の NOx 濃度は SfME-hl より低い。この場合も、SfME-ho の最大熱発生率が SfME-hl より低いためである (図-3 (b))。

以上の実験結果より、SfME-ho と SfME-hl は共にディーゼル代替燃料として使用可能と考えられるが、燃料性状、着火性、熱効率、排ガス特性を総合的に考慮すると、SfME-ho の方が SfME-hl よりディーゼル代替燃料として有効であると思われる。

## 5. まとめ

脂肪酸組成の異なる 2 種類のヒマワリ油 (ハイオレイン、ハイリノール) からバイオディーゼルを製造し、燃料性状を測定するとともに、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、ナタネ油と大豆油のメチルエステル、JIS 2 号軽油と比較し、ヒマワリ油メチルエステルのハイオレイ

ンとハイリノールのどちらがディーゼル代替燃料として有効であるか検討した。その結果、以下の結論を得た。

(1) SfME-ho の流動点は  $-7.5^{\circ}\text{C}$  で、SfME-hl より  $5^{\circ}\text{C}$  低い。また、SfME-ho のセタン価は SfME-hl より高く、軽油程度と推測される。不飽和度の高い FAME の含有率が高いエステル燃料ほど動粘度が低く、すなわち SfME-hl の方が SfME-ho より低い。

(2) 不飽和度の低い FAME の含有率が高いエステル燃料ほど、着火遅れは短くなり、低負荷における排ガス中の HC および CO 濃度、高負荷における NOx 濃度が低減する。すなわち、SfME-ho は SfME-hl より着火遅れが短く、排ガスが低減する。

(3) 燃料性状、着火性、熱効率、排ガス特性を総合的に考慮すると、SfME-ho の方が SfME-hl よりディーゼル代替燃料として有効である。

なお、本研究は燃料性状、燃焼・排ガス特性に主眼をおいたものであり、ヒマワリ油バイオディーゼルが及ぼす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。

## 参考文献

- 1) U.S. Department of Energy, 2006 Biodiesel Handling and Use Guidelines (Third Edition), DOE/GO-102006-2358, p.1-69 (2006).
- 2) J. Sheehan, V. Camobreco, J. Duffield, M. Graboski and H. Shapouri, An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles, NREL/TP-580-24772, p.1-47 (1998).
- 3) 日本植物油協会、<http://www.oil.or.jp/>
- 4) M.S. Graboski, R.L. McCormick, T.L. Alleman, A.M. Herring, The Effect of Biodiesel Composition on Engine Emissions from a DDC Series 60 Diesel Engine, NREL/SR-501-31461, p.1-81 (2003).
- 5) W.E. Klopfenstein, Effect of Molecular Weights of Fatty Acid Esters on Cetane Number as Diesel Fuels, JAOCS, Vol.62, No.6, pp.1029-1031(1985).
- 6) G. Knothe, Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters, Fuel Processing Technology, Vol.86, pp.1059-1070 (2005).
- 7) M.E. Tat, J.H. Van Gerpen, Measurement of Biodiesel Speed of Sound and Its Impact on Injection Timing, NREL/SR-510-31462, p.1-114 (2003).