バイオディーゼル油を燃料とする機関の性能* (水乳化の効果)

吉本 康文^{*1}, 小野寺 正幸^{*2}, 玉木 恕乎^{*1}

Performance of a Diesel Engine Using Transesterified Fuel from Vegetable Oil (Effects of Water Emulsification)

Yasufumi YOSHIMOTO^{*3}, Masayuki ONODERA and Hiroya TAMAKI

^{*3} Niigata Institute of Technology, Dept. of Mechanical and Control Engineering,
Fujihashi 1719, Kashiwazaki, Niigata, 945-1195 Japan

This paper investigates engine performance with an emulsified fuel including used frying oil composed of vegetable oils discarded from restaurants and households. A single cylinder DI diesel engine was operated with transesterified fuel from used frying oil, the so called "biodiesel". Compared with gas oil, the BSEC of neat biodiesel improved at high loads and retarded injection timings, while the smoke density was reduced at all operating conditions. The engine performance with fairly stable emulsions of biodiesel and water was also examined, and emulsified biodiesel with 30% (vol.) water showed a significant reduction in NO_x (1 100 to 400 ppm) while maintaining the minimum BSEC value achieved with gas oil. It was also found that using biodiesel emulsion at a rated output, the trade-off relation NO_x vs. BSEC and NO_x vs. smoke improved slightly over the gas oil emulsion.

Key Words: Diesel Engine, Combustion, Alternative Energy, Emulsified Fuel, Biodiesel, Vegetable Oil, Used Frying Oil, Engine Performance, Emission

1. ま え が き

ディーゼル機関から排出される NO_x および微粒子の同時低減に加えて、地球環境保全という立場から二酸化炭素排出量の削減ならびに燃料消費率の改善が強く要請されている。本論文は植物性油脂からなる廃食用油(てんぷら廃油)をエステル交換して得られる油、ならびにこれと水とのエマルジョンを用いてディーゼル機関性能を調べたものである。

植物油は再生可能な資源であり、生産から消費に至る過程での二酸化炭素排出量の削減効果を期待しうるなど、在来の石油燃料に比べ優位な側面をもっている。このため、ディーゼル機関の代替燃料として適用する研究がこれまでに数多く試みられてきた^{(1)~(21)}。これらを燃料の利用形態で分類してみると、植物油を直接もしくは軽質油にブレンドして利用した研究^{(1)~(3) (6)~(9) (13) (19) (21)}、およびエステル化燃料の適用^{(1)~(5) (10)~(12) (14)~(21)}に大別することができる。後者は“バイオディーゼル燃料”とも呼ばれており、なたね油や大豆油^{(1) (5) (10)}

~(12) (14)~(18) (20) (21)、あるいは使用済みの調理用油^{(5) (12) (19)}

などからアルコールによるエステル化反応を経て精製され、利用されている。いずれも軽油に近い性状をもつため、植物油の高粘度に起因して生じる燃焼障害を回避することが可能になると考えられる。近年、欧米においてはバイオディーゼル油を軽油にブレンドし、自動車用燃料として実用化しようとするフリーテストなども実施されている^{(15) (18)}。

従来の研究によれば、バイオディーゼル油は軽油に比べて PM や HC の低減が得られる一方、NO_x 排出濃度は変わらないか、逆に増大するとの報告が多い。したがって実用化にあたっては NO_x 低減対策を強化する必要があると思われる。

先に著者らの一人は、直接噴射式ディーゼル機関に乳化燃料を適用した結果、黒煙濃度の悪化なしに NO_x を大幅に低減できること、さらに適切な条件のもとでは正味熱消費率の改善も同時に得られることを報告した^{(23)~(29)}。本研究では、廃食用油から精製されたバイオディーゼル油を低 NO_x・低吐煙、高効率燃焼させることをねらいとして乳化燃焼法の適用を試みた。実験の結果、乳化バイオディーゼル油を用いて定格出力で運転することによって、正味熱消費率を悪化することなく NO_x および黒煙濃度を大幅に低減しうることがわかった。

* 原稿受付 2000年2月21日。

^{*1} 正員, 新潟工科大学(〒945-1195 柏崎市藤橋1719)。

^{*2} 新潟工科大学。

E-mail: yoshimoto@mce.niit.ac.jp

植物油と水⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹³⁾⁽²¹⁾, または植物油とアルコール⁽³⁾⁽⁹⁾との乳化燃料をディーゼル機関に適用した例はすでにいくつか報告がなされている。しかしながら, バイオディーゼル油をベースとした水乳化燃料に関しては報告がほとんどみられない。著者らが調査した範囲では, わずかに, 水添加率 10% のパーム油エマルジョンによる実施例⁽¹⁴⁾が報告されている程度である。

以下, 実験の詳細について述べる。

2. 実験装置, および方法

2.1 供試機関, および燃料噴射系統 実験に使用した機関は, たて形・水冷・単シリンダ, 無過給のピストンに球形の燃焼室を有する BIP タイプ, 四サイクル直接噴射式ディーゼル機関であり, 機関および燃料噴射系統の諸元を表 1 に示す。

機関の運転は冷却水出口温度 $82 \pm 2^\circ\text{C}$, 潤滑油温度 $54 \pm 2^\circ\text{C}$ に調整し, 機関回転速度 1200rpm 一定のもとで実施した。また, 動力の吸収には交流電気動力計を使用した。

2.2 供試燃料 廃食用油のエステル化燃料 (バイオディーゼル油), 市販の自動車用軽油, およびこれらをベース燃料として水乳化燃料を作製し, 実験に用いた。表 2 に供試燃料の性状を示す。

乳化軽油の作製方法に関しては文献⁽²²⁾ の手順にしたがった。すなわち, ベース燃料に対して 1% mass の乳化剤 (イオネット S-2, HLB=6) を加え, 静止形管内混合器を用いて混合することによって油中水滴形のエマルジョンを作製した。バイオディーゼル油の乳化に対してもこれと同様の手順を採用したが, 植物油に適した乳化剤として SY グリスター CRS-75 (阪本薬品工業 (株) 製) を選定して用いた。この乳化剤は食品用に使用されているもので, ポリグリセリン脂肪酸エステル的一种である。水添加率 β は, ベース燃料に対する水の容積比率で定義した。

2.3 測定装置 インジケータ線図の測定にはひずみゲージ式の指圧計を使用し, 噴射弁リフトおよびクランク角度はそれぞれ電磁式変位計, およびフォトインタラプタにより検出して, これらを 4 現象シンクロスコープに入力して観測・記録した。熱発生率は 100 サイクル分のシリンダ内圧力履歴を収録し, その平均値から求めた。なお, 発熱の等容度 η_{glh} , および冷却損失 ϕ_w は, 式(1)に示すシリンダ内ガスエネルギー平衡式を仮定することによって, 式(2)および式(3)から求めた。

$$dQ = dQ_E - dQ_C = \frac{1}{\kappa - 1} (\kappa P dV + V dP) \quad (1)$$

$$\eta_{glh} = \frac{1}{Q} \int \frac{1 - \frac{1}{\varepsilon_\theta^{\kappa-1}}}{1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}} \frac{dQ}{d\theta} d\theta \quad (2)$$

$$\phi_w = \frac{\int dQ_C}{\int dQ_E} = 1 - \frac{\int dQ}{\int dQ_E} \quad (3)$$

ただし,

Q_E : 供給燃料の燃焼熱量

Q_C : シリンダ壁への冷却熱量

Q : 発生熱量

V : シリンダ内のガス容積

P : ガス圧力

κ : ガスの比熱比

ε : 圧縮比

θ : クランク角度

ε_θ : 任意のクランク角度 θ に対応する圧縮比

Table 1 Engine specifications

Engine Model	4 Cycle Water Cooled Single Cylinder
Bore × Stroke	110 mm × 150 mm
Stroke Volume	1425 cc
Compression Ratio	17.4
Combustion Chamber	Direct Injection (BIP Type)
Rated Output	7.35 kW/1200 rpm (BMEP = 0.52 MPa)
Injection Pump	Bosch A (Plunger = 8 mm)
Injection Nozzle	DN4SD24 : Throttle
Opening Pressure	19.6 MPa

Table 2 Properties of tested fuels

	Fuel	Biodiesel	Gas oil
Density [15°C]	(g/cm ³)	0.884	0.830
Viscosity [30°C]	(mm ² /s)	6.2	3.0
Net calorific value	(MJ/kg)	37.59	42.96
Cetane index		64	52
Carbon	(mass %)	76.7	86.0
Hydrogen	(mass %)	12.1	13.6
Oxygen	(mass %)	10.8	—
Sulfur	(mass %)	0.0013	0.11
Water	(mass %)	0.13	0.0027

Fig. 1 Kinematic viscosity of fuels at different water addition rates

排気ガス中の NO_x の測定には CLA, HC については FIA, CO の測定は NDIR, 黒煙濃度はボッシュ式スモークメータを用いてそれぞれ測定した。

3. 実験結果, および考察

3.1 乳化燃料の粘度および安定性 機関実験に先立ち, 作製したエマルジョンの粘度および安定性を調べた。図 1 は, ニートのバイオディーゼル油, および軽油をそれぞれ水乳化した場合における動粘度の変化を, 水添加率 β に対して示したものである。図 1 に示されるように, 乳化燃料の動粘度はベース燃料の種類によらず, いずれも水添加率に対して指数関数的に増加する。

図 2 には, 試験管における分離率の測定を行うことにより乳化安定性を評価した結果を示す。 $\beta=10\sim40\%$ のエマルジョンを作製し, 上部に燃料相が分離する割合を作製後の経過時間に対して示した。図 2 にみられるように, バイオディーゼル油エマルジョンの安定性は乳化軽油⁽²²⁾に比べると劣るものの, 比較的安定な乳化燃料が作製できた。

3.2 燃料噴射時期が機関諸性能に及ぼす影響 図 3 は, 燃料としてバイオディーゼル油と軽油, ならびに

水添加率 $\beta=30\%$ の乳化バイオディーゼル油と乳化軽油とを用い, $\text{BMEP}=0.52\text{MPa}$ (定格出力) 一定のもとで運転した場合における機関性能値, および排出物を燃料噴射時期に対して比較したものである。図 3(a) にみられるように, バイオディーゼル油 (水添加なし) の正味熱消費率 (BSEC) は軽油と同等であり, 遅延噴射時期においてはむしろ改善される傾向を示している。また, 黒煙濃度も噴射時期の全範囲にわたって軽油に比べて低減が得られており, CO 濃度も低い。バイオディーゼル油の HC 濃度は低減するとの報告が多い

Fig. 2 Stability of emulsions with different water addition rates

Fig. 3 Engine performance with gas oil, biodiesel, and their water emulsions at different fuel injection timings

が、本実験では軽油とほとんど変わらない結果となった。なお、着火遅れはバイオディーゼル油のほうが 1.5°CA 程度短い。

NO_x 濃度については、噴射時期が早いときには軽油とほぼ同等であるが、遅れた位置では軽油よりも高く、この関係は、燃料種の違いによる BSEC の変化と良い対応を示している。バイオディーゼル油は含酸素燃料であり、理論空気量および低発熱量が小さいなど、 NO_x 生成に対して軽油とは異なった燃料特性を有するものと考えられる。しかし、本実験において軽油とほぼ同等の NO_x 排出濃度を示したことから、結果としてここでの燃料種の違いは NO_x 生成にはほとんど影響しないと判断される。

以上のように、エステル化燃料の燃焼性は軽油に比べて遜色のないレベルにある。したがって廃食用油の適正な処理あるいは資源の有効利用という観点から、バイオディーゼル油として活用することは適当であると考えられる。なお、バイオディーゼル油がとくに噴射時期遅延時における燃焼性を顕著に改善しうることに関しては、燃料中に含まれている酸素が燃焼過程で有効に作用しているためと思われる。

$\beta=30\%$ の水添加を行った場合には、図 3(b) に示されるように、乳化軽油および乳化バイオディーゼル油のいずれも軽油に比べて NO_x と黒煙濃度、ならびに BSEC の同時低減が得られている。また、この場合に

における BSEC と黒煙濃度の改善は噴射時期遅延時においてより顕著である。乳化軽油使用により BSEC が改善される要因として、噴霧の運動量増大にともなう噴霧束内への空気導入や冷却損失低減などの効果、あるいはマイクロ爆発による噴霧の二次的微粒化などの効果が考えられることを前報で述べた⁽²⁷⁾。燃料噴射時期に対する BSEC の変化は乳化バイオディーゼル油を用いても同様であることから、この場合についても上記効果が燃焼改善に寄与しているものと思われる。

なお、乳化軽油使用時の NO_x 低減に対しては、水の蒸発ならびに噴霧束内ガスの熱容量増大にともなう燃焼ガス温度の低下が主因として考えられる⁽²⁹⁾。これに対して、乳化バイオディーゼル油を用いても乳化軽油とほぼ同等の排出濃度を示すことから、両者の NO_x 低減機構は基本的に同じであろう。また、吐煙低減に対しては、上述したような燃料と空気との混合が改善される物理的效果に加えて、水性ガス反応などの寄与も考えられる⁽²²⁾。

3.3 水添加率が機関諸性能に及ぼす影響 乳化バイオディーゼル油における水添加率が機関諸性能に及ぼす影響について検討を行った。図 4 は、ベース燃料として軽油およびバイオディーゼル油を用い、 $\text{BMEP}=0.52 \text{ MPa}$ 一定のもとで運転を行った場合の機関性能、排出物、および燃焼特性値を水添加率 β に対してプロットしたものである。 NO_x 排出量を抑制する視

Fig. 4 Engine performance and combustion characteristics with gas oil and biodiesel at different water addition rates

点から、ここでの燃料噴射時期は、やや遅れた位置である 17.5° CA.BTDC を選定し比較を行った。図 5 には、この場合におけるインジケータ線図の一例を示す。

図 4 にみられるように、いずれの燃料も水添加率 β の増加とともに NO_x 濃度は低減する。黒煙濃度も同様に水添加により低減するが、この効果は軽油においてより顕著である。バイオディーゼル油は燃料中に 11% 近くの酸素を含んでおり、このため水を添加しない場合であっても軽油に比べて低吐煙燃焼ができたと考えられる。CO は水添加により変わらないか、またはやや低減が得られる一方、HC は逆に増大する。ここで NO_x を除く排出物は、いずれも乳化バイオディーゼル油のほうが乳化軽油に比べて低い値を示していることがわかる。なお、着火遅れはいずれの場合も β の増加とともに増大する。

つぎに正味熱消費率について比較すると、いずれの燃料も水添加を行うことによって BSEC は低減するが、水添加率 β が及ぼす影響については燃料ごとに異なっている。すなわち、ベース燃料が軽油の場合には、実験の全範囲にわたり水添加時の BSEC は水なしの場合に比べて低減する。一方、乳化バイオディーゼル油では β の小さいところでは乳化軽油と同様に水添加による BSEC 低減が得られるのに対して、 β が 40% を超えると逆に増大する。これについては燃焼解析を行い検討した。

一般に正味熱効率 η_e と等容度 η_{gh} 、冷却損失 ϕ_w および機械効率 η_m との間には、つぎの関係が成立する。

$$\eta_e = \eta_{th} \cdot \eta_{gh} \cdot \eta_u (1 - \phi_w) \eta_m \quad (4)$$

燃焼効率 η_u と理論熱効率 η_{th} を一定と仮定すると次式を得る。

$$\eta_e = C \cdot \eta_{gh} (1 - \phi_w) \eta_m \quad (5)$$

式(5)に示すように、正味熱効率または正味燃料消費率は、等容度、冷却損失および機械効率によって影響を受けるものである。燃焼解析の結果、図 4 の右に示すように、 β の小さいところでは乳化バイオディーゼル油の等容度 η_{gh} は乳化軽油に比べて高く、一方、冷却損失 ϕ_w は小さい。この関係は BSEC の増減と良く一致しており、したがって発熱の等容度および燃焼期間における冷却損失の二つの因子が水添加時の BSEC に対して影響を及ぼしたのと考えられる。なお、いずれの燃料も BSEC が最小となる最適水添加率が存在し、その値は軽油で $\beta=40\%$ 程度、バイオディーゼル油では 30% 程度である。

以上のように、乳化バイオディーゼル油においては、BSEC を改善しうる水添加率 β の範囲が乳化軽油に比べ狭くなることがわかった。この理由に関しては、バ

イオディーゼル油の発熱量が軽油に比べて低く、その結果、水添加時における熱供給率の低下が原因となった可能性が考えられる。そこで、W. Bosch の方法を用いてこの場合における噴射率を調べてみた。図 6 はその一例であり、軽油と $\beta=45\%$ の乳化軽油、ならびにバイオディーゼル油と $\beta=30\%$ の乳化バイオディーゼル油についての結果を示す。なお、ここでは一回当たりの噴射量 (熱供給量 Q_p) を 2.3kJ 一定にそろえて測定した。図 6 に示されるように、乳化燃料は水の含有分だけ噴射量が増大し、噴射期間は長くなる。

図 7 は実測した噴射率をもとに、主噴射期間中の平均的な熱供給率 B_m を求め、これを水添加率 β に対して示したものである。すなわち、供給燃料の燃焼熱量 Q_E を主噴射期間 θ_i で除した値を B_m として定めた。なお、供試機関ではスロットルノズルが標準装備されているが、ここでは噴射初期の絞り過程を無視したものを主噴射期間とみなす。図 7 に示されるように、 B_m はベース燃料の違いによらず、いずれも β の増加とともに直線的に低下する。また、乳化バイオディーゼル油では乳化軽油に比べ B_m が 6~10% 程度小さい値を示す。ここで、乳化バイオディーゼル油における BSEC が増加に転じる位置を、図 7 中に斜線で表示した。図 7 から

Fig. 5 Indicator diagrams with gas oil, biodiesel, and their water emulsions

明らかなように、主噴射期間中の平均的な熱供給率 B_m で比較を行うと、 $\beta=60\%$ の乳化軽油と $\beta=35\%$ の乳化バイオディーゼル油はほぼ同等の熱供給率 ($B_m \approx 150 \text{ J}^\circ\text{CA}$) である。したがって、 B_m がこの値以下に低下した場合に燃焼が緩慢となって等容度 η_{eth} が低下する一方、冷却損失 ϕ_w が増大し、水添加によるBSEC改善効果が失われていくものと考えられる。

図5の熱発生率を比較すると、乳化燃料における予混合燃焼のピーク値はベース燃料のみの場合に比べて高く、さらに燃焼期間の短縮が得られている。そこで、ここでは宮本ら⁽³⁰⁾の手法を用いて、ベース燃料の種別および水添加率が熱発生パターンに及ぼす影響を調べた。すなわち、図8に示すように熱発生率を予混合燃焼と拡散燃焼とに分離し、これを式(6)に示すような六つのパラメータ ($Q_p, M_p, \theta_p, Q_d, M_d, \theta_d$) をもつ二つのWiebe関数で近似した。

$$\frac{dQ}{d\theta} = 6.9 \frac{Q_p}{\theta_p} (M_p + 1) \left(\frac{\theta}{\theta_p} \right)^{M_p} \exp \left[-6.9 \left(\frac{\theta}{\theta_p} \right)^{M_p+1} \right] + 6.9 \frac{Q_d}{\theta_d} (M_d + 1) \left(\frac{\theta}{\theta_d} \right)^{M_d} \exp \left[-6.9 \left(\frac{\theta}{\theta_d} \right)^{M_d+1} \right] \quad (6)$$

ここで、添字 p および d はそれぞれ予混合燃焼、お

よび拡散燃焼部分を表しており、 Q はそれらの発生熱量を、また θ はそれらの燃焼期間を表す。なお、 M は熱発生率の形状を表す特性値であって、たとえば $M < 2$ では熱発生率のピークは燃焼期間の前半に、 $M > 2$ では後半に現れる⁽³⁰⁾。

図9に、最小二乗法を用いて計算した結果を示す。予混合燃焼期間 θ_p に関しては燃料種別および β による影響がほとんどみられない。予混合部分における発生熱量 Q_p は、いずれの燃料も β の増加とともに増大する。これは着火遅れが増すためである。拡散燃焼期間 θ_d に

Fig. 8 Expression of heat release rate using two Wiebe's functions⁽³⁰⁾

Fig. 6 Comparison of measured injection rate

Fig. 7 Relation between B_m and β

Fig. 9 Change in six parameters of Wiebe's functions with different water addition rates

については、高い水添加率をもつ乳化軽油 ($\beta=30\sim60\%$) の場合に短縮効果が顕著である。これに対してバイオディーゼル油では、 $\beta=40\%$ 以下のところでは軽油よりも短い値を示すが、50%に至るとこの関係は逆転し水添加による燃焼促進作用はほとんどみられない。以上のことから、乳化バイオディーゼル燃料における熱発生パターンの特徴として、水添加率が適正範囲内にあれば（噴射期間中の熱供給率が適正な値であれば）拡散燃焼が促進し、拡散燃焼期間 θ_d が短縮する。その結果、等容度 η_{vol} の増大ならびに冷却損失 ϕ_w の低減が得られ、乳化軽油使用時と同様に、水添加によるBSEC改善が得られるものと考えられる。

3.4 BMEPが機関諸性能に及ぼす影響 図10には噴射時期を 21°CA BTDC 一定として機関負荷を変えた場合のBSEC, NO_x , および黒煙濃度を水添加の有無をパラメータとして燃料ごとに比較して示す。図10(a)に示されるように、バイオディーゼル油は軽油に比べて黒煙濃度の顕著な低減が得られる反面、 NO_x 濃度は増大する。BSECは中～高負荷領域で改善が得られる。

$\beta=30\%$ の水添加を行った場合には図10(b)にみられるように、バイオディーゼル油のBSEC改善効果は高負荷領域に限定される。すなわち、BSECに対しては乳化バイオディーゼル油のほうが乳化軽油よりも負荷の影響を受けやすいといえる。なお、この原因に関しては現在のところよくわかっていない。一方、バイ

オディーゼル油の黒煙濃度は水添加なしにおいてすでにかなり低く、このため乳化による低減効果が軽油に比べて小さくなったと考えられる。

3.5 トレードオフ改善に対する効果 バイオディーゼル油は含酸素燃料であり、理論空燃比は軽油よりも小さい。吐煙生成に対しては空気過剰率の影響が大きいことから、これについて検討を行った。図11は $\text{BMEP}=0.52\text{MPa}$ 一定において、燃料として軽油およびバイオディーゼル油を用いた場合の黒煙濃度を、水添加の有無をパラメータとして空気過剰率に対して整理し直したものである。図11に示されるように、ニートバイオディーゼル燃料の黒煙濃度は相対的に低い値を示すが、空気過剰率に対してプロットすると軽油とほぼ同一の直線上（図中のA線）に位置する。したがって、バイオディーゼル油使用による黒煙濃度低減は燃料中に酸素を含むことによる空気過剰率増大の効果として理解できる。これに対して $\beta=30\%$ の乳化燃料では、B線が得られ、空気過剰率に対する直線の傾きが水添加を行わない場合に比べて小さい。この両直線の傾きにおける差は、乳化燃料の混合改善効果などによって生じたものと考えられる。

図12には、 $\text{BMEP}=0.52\text{MPa}$ （定格出力）一定におけるBSECと NO_x 濃度、ならびに黒煙濃度と NO_x 濃度との関係を燃料別に比較して示す。図12から明らかに、乳化燃料を用いることによってこれらトレードオフの関係を顕著に改善することが可能である。たとえば、水添加率30%の乳化バイオディーゼル燃料は、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しに、 NO_x 濃度を1100から400ppmまで低減することが可能である。なお、燃料種が異なっても乳化による黒煙濃度ならびに NO_x の低減効果はさほど変わらないといえる。このことは水乳化時の燃焼に対して、燃料と空気との混合改善、あるいは水の蒸発や噴霧束内ガスの熱容量増大など、物理的效果

Fig. 10 Influence of BMEP on engine performance

Fig. 11 Relation between smoke density and excess air ratio

が支配的であることを示唆するものと考えられる。

4. 結 論

廃食用油のエステル化燃料（バイオディーゼル油）と水とのエマルジョンを作製し、ディーゼル機関性能を調べた。これを乳化軽油運転時と比較・検討した研究の結果を要約すると、おおむねつぎのとおりである。

(1) 適切な乳化剤を選定することによって、比較的安定なバイオディーゼル油エマルジョンを作製することができた。

(2) 30%(vol.)の水を添加して作製した乳化バイオディーゼル油は、定格出力において、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、NO_x濃度を1100から400ppmまで低減することができた。

(3) ベース燃料の違いを問わず、BSECが最小となる最適水添加率が存在する。その値は乳化バイオディーゼル油で30%、乳化軽油で40%程度である。

(4) 乳化バイオディーゼル油では乳化軽油に比べ、BSECを改善しうる水添加率の範囲が狭い。この原因としては、ベース燃料の発熱量低下にもとづく燃料噴射期間中における熱供給率の低下が考えられる。

(5) バイオディーゼル油は含酸素燃料であるために、空気過剰率が增大して低吐煙燃焼が得られる。これを水乳化した場合には黒煙濃度のさらなる改善が可能である。

(6) 乳化バイオディーゼル油使用により、定格出力運転時のNO_xと黒煙濃度、あるいはNO_xと正味熱消費率とのトレードオフが、わずかではあるが乳化軽油よりも改善される傾向を得た。

おわりに、本研究で使用したバイオディーゼル燃料、ならびに植物油用乳化剤の選定に際しては、それぞれ吉田興産株式会社ならびに阪本薬品工業株式会社から貴重なご助言とご配慮をいただいた。また、当時学生であった杉本友和、布施雅幸、真下孝博の諸氏から実験の協力を得たことを付記して、深く謝意を表する。

文 献

- (1) Murayama, T., ほか5名, SAE Paper No.841161 (1984).
- (2) Geyer, S. M., ほか2名, Trans. of the ASAE, (1984), 375-384.
- (3) Ziejewski, M., ほか2名, SAE Paper No.860301 (1986).
- (4) Ishii, Y., and Takeuchi, R., Trans. of the ASAE, 30-3(1987), 605-609.
- (5) Mittelbach, M., and Tritthart, P., JAOCS, 65-7(1988), 1185-1187.

Fig. 12 NO_x vs. BSEC and NO_x vs. Smoke density using gas oil, biodiesel, and their water emulsions

- (6) Hemmerlein, N., ほか2名, SAE Paper No.910848 (1991).
- (7) Crookes, R. J., ほか2名, SAE Paper 922230, 1992.
- (8) 浜崎・ほか2名, 機論, 59-548, B(1992), 1551-1556.
- (9) 林・ほか3名, 農業機械学会誌, 54-2(1992), 11-21.
- (10) Last, R. J., ほか2名, SAE Paper No. 950054, 1995.
- (11) McDonald, J. F., ほか3名, SAE Paper No.950400(1995).
- (12) Hohl, G. H., SAE Paper No.952755(1995).
- (13) Crookes, R. J., ほか2名, J. of the Inst. of Energy, 68(1995), 142-151.
- (14) Masjuki, H., ほか2名, SAE Paper No.961083 (1996).
- (15) Montagne, X., SAE Paper No.962065(1996).
- (16) Choi, C. Y., ほか2名, SAE Paper No.970218(1997).
- (17) Akasaka, Y., ほか2名, SAE Paper No.972998(1997).
- (18) Ferrone, C. W., SAE Paper No.973201(1997).
- (19) 森棟, 機論, No.97-2(1997), 249-252.
- (20) Chang, D. Y., and Van Gerpen, J. H., SAE Paper No.982527 (1998).
- (21) 浜崎・ほか3名, 機論, 65-631, B(1999), 1146-1151.
- (22) Murayama, T., ほか3名, SAE Paper No.780224; SAE Trans. 87(1979), 946-958.
- (23) Tsukahara, M., ほか2名, Bull. of the JSME, 25-202(1982), 612-619.
- (24) 塚原・ほか3名, 機論, 48-426, B(1982), 381-387.
- (25) Tsukahara, M., ほか2名, SAE Paper No.890449; SAE Trans. 98(1990), 777-783.
- (26) Tsukahara, M., ほか2名, SAE Paper No.891841; SAE Trans. 98(1990), 1795-1804.
- (27) 塚原・ほか2名, 機論, 61-590, B(1995), 3561-3566.
- (28) 吉本・ほか3名, 日本船用機関学会誌, 32-6(1997), 433-440.
- (29) Yoshimoto, Y., ほか3名, SAE Paper No.982490(1998).
- (30) 宮本・ほか4名, 機論, 52-476, B(1986), 1565-1572.