

直噴式ディーゼル機関でのなたね油乳化燃料の利用

浜崎 和則・高木 哲哉・小川 博
亀田 昭雄

(受理 平成6年5月31日)

Utilization of Emulsified Rapeseed Oil in a Direct Injection Diesel Engine

Kazunori HAMASAKI, Tetsuya TAKAKI, Hiroshi OGAWA
and Akio KAMEDA

Reproducible vegetable oils have many advantages as alternative fuels in order to supplement diesel fuels. Compared with common diesel fuel, however, the use of vegetable oils results in higher exhaust emissions and carbon deposits because of the high viscosity and low volatility. The work presented here describes experiences with stable water emulsified rapeseed oils in a small direct injection diesel engine. The purpose of this paper is to demonstrate an improvement in engine performance and a reduction in exhaust emissions by changing the injection nozzle diameter and the valve opening pressure. The results show that BSFC, HC, CO, and Smoke emissions decrease simultaneously with a decrease in the injection nozzle diameter as compared with that of gas oil. In the present experiment, the optimum nozzle diameter is 0.22mm as regards engine performance and exhaust emissions.

1. 緒 言

内燃機関燃料の多様化に対応するために種々の代替燃料の研究開発が進められている。そのなかで、ディーゼル燃料を補足するための代替燃料として再生産可能な植物油を利用することは、エネルギー資源の確保と有効利用の点からだけでなく、CO₂問題の点からも大きな利点を持っている。しかし、植物油は高粘度で低揮発性のため、機関性能、エミッションおよびカーボンデポジットなどの問題がある。これらの問題を解決するために、植物油と軽油やエタノールとの混合あるいはエステル化して利用する研究^{1)~4)}があるが、本質的な燃焼改善は得られていない。なかでも軽油との混合についてはカーボンデポジットの改善は見られるが、機関性能、排気ガス濃度については悪化することも報告¹⁾されている。

著者らは先に、なたね油乳化燃料を直噴式ディーゼル機関に使用し、水混合割合を変えた場合の機関性能

および排気ガス濃度に及ぼす影響を検討した。その結果、なたね油乳化燃料を使用することにより、なたね油だけの場合より燃焼改善が見られ、機関性能向上と排気煙およびNO_x濃度の低減が同時に得られる最適水混合割合が存在することを報告⁵⁾した。

そこで、本報告では直噴式小形ディーゼル機関に最適水混合割合のなたね油乳化燃料を使用し、ノズル噴口径および開弁圧を変更して機関性能向上および排気ガス濃度の低減策を検討した。同時に連続運転後の燃焼室内カーボン堆積状況についても調べ、なたね油乳化燃料を使用した場合、供試機関に対して機関性能および排気ガス濃度の点から、適切な噴口径が存在することを明らかにした。

2. 供試乳化燃料

実験には水混合割合20%のなたね油乳化燃料1種類を使用した。乳化燃料中の最適水混合割合を見出すためのこれまでの実験⁵⁾では3種類のなたね油乳化

燃料を作製した。その質量組成を表1に示す。乳化剤は、マーガリン、バターなど食品用の乳化剤として用いられているモノステアリン (HLB=3.8) を使用した。75~80℃に加熱したなたね油に乳化剤を入れ完全に溶かし、ほぼ同温度まで熱した水をなたね油に加え、よくかき混ぜながら室温と同程度まで冷却する。このようにして、できた粗乳化燃料をギヤポンプ、静止型管内混合器を用い、2ℓ当たり8min連続的に循環かくはんさせ、なたね油乳化燃料を作製した。つぎに、このなたね油乳化燃料の乳化状態を変えるため、超音波洗浄器を用いて超音波を照射した。洗浄器に水を張り、管内混合器と乳化燃料をプールする容器との間を結ぶチューブを洗浄器の水中に沈める。乳化燃料はチューブの中を通りながら超音波を照射され、超音波照射なたね油乳化燃料となる。超音波周波数と超音波照射時間は、実験検討を繰り返した結果、出力100W、28kHzで乳化燃料2ℓ当たり2minとした。以上のようにして作製した、なたね油乳化燃料と超音波照射なたね油乳化燃料を室温で放置した場合の作製直後からの時間経過による分離比を図1に示す。超音波を照射した場合は分離が大幅に減少し、供試乳化燃料では水混合割合が増加するほど安定した乳化燃料となる。水混合割合が増加すると、水粒子濃度が増し、なたね油に対する乳化剤の割合も増加するので、分散媒であるなたね油の粘度が高くなり水粒子は動きにくく、可動範囲は狭くなる。さらに、水混合割合が増加すると、個々の水粒子同士は吸着層を介して常に水粒子に接し、吸着層の重なりから生じる安定化⁶⁾のため、ほとんど動けなくなり固着したような状態となる。したがって、水混合割合が増加すると見掛け上、安定した乳化燃料になると考えられる。図2に乳化状態の顕微鏡写真の一例を示し、表2に写真より実測した乳化水粒子のザウタ平均粒径を示す。写真中に見られる大小の粒子は水粒子で、超音波を照射した場合は照射しない場合に比べ、粒径が小さく比較的均一に分布している。また、水混合割合が増加するほど粒径は大きくなる傾向がある。乳化剤として使用した、モノステアリンは構造的になたね油に類似し、なたね油はグリセリン1分子に脂肪酸3分子がエステル化したもので、モノステアリンはグリセリン1分子に脂肪酸1分子がエステル化したものである。なお、W30の場合で乳化剤はなたね油に対して質量割合で1.1%である。そこで、なたね油に質量割合で1.5%の乳化剤を混合した場合の正味燃料消費率、排気煙濃度、NO_x濃度、CO濃度はなたね

表1 なたね油乳化燃料の質量組成

Test Fuels	Rapeseed Oil	Water	Emulsifier
W 10	89.2%	10%	0.8%
W 20	79.2	20	0.8
W 30	69.2	30	0.8

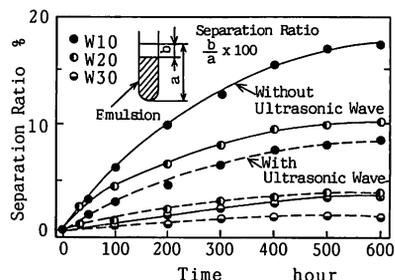


図1 なたね油乳化燃料の分離比

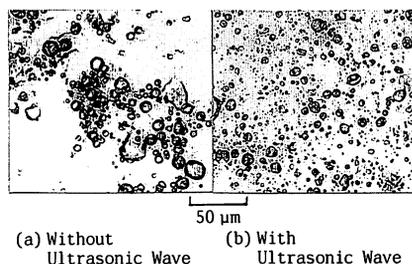


図2 供試乳化燃料 (W20) の顕微鏡写真

表2 乳化燃料中の水粒子ザウタ平均粒径

Test Fuels	Number of Droplets	Sauter Mean Diameter
W 10	100 (120)	13.5 (5.63) μm
W 20	140 (120)	15.2 (6.28)
W 30	140 (144)	19.4 (10.59)

(): With Ultrasonic Wave

油のみの場合と差異は見られず、本実験で使用した量の乳化剤は機関性能、排気ガス特性に影響を与えないことを確認した。

3. 実験装置および方法

図3に実験装置概略を示す。供試機関は水冷、横形、単気筒、直噴式四サイクルディーゼル機関で表3に主要諸元を示す。供試燃料として、なたね油に水を質量割合で20%加え、超音波照射しない水混合割合20%のなたね油乳化燃料を用いたが、参考のため一部はなたね油および軽油による実験も行った。表4には実験の

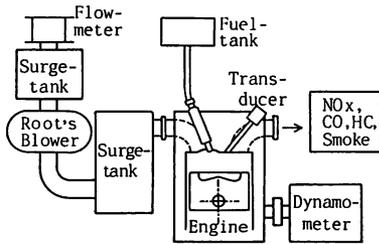


図3 実験装置概略

表3 供試機関諸元

Engine Type	1 Cylinder, 4 Stroke, Water Cooled
Combustion Chamber Type	D. I. Chamber
Bore × Stroke	88 × 90 mm
Stroke Volume	547 cm ³
Compression Ratio	18
Rated Power	7.35kW/2600rpm
Injection Pump	Bosch PFR. M
Injection Nozzle	Hole Nozzle
Nozzle Opening Pressure	22 MPa
Number of Nozzle Holes	4

表4 実験の種類

Symbol	Opening Pressure MPa	Nozzle Diameter mm
A	22	0.26/0.28(2+2 holes)
B	27	0.26/0.28(2+2 holes)
C	29	0.26/0.28(2+2 holes)
D	22	0.20 (4 holes)
E	22	0.22 (4 holes)
F	22	0.24 (4 holes)
G	22	0.30 (4 holes)
H	22	0.34 (4 holes)

種類を示し、Aは軽油使用の標準噴射系である。開弁圧はノズル内シム厚さを変えて調節し、軽油使用の標準開弁圧の場合で6通り変えて実験した。噴口径の設定に際して燃料噴射圧力、噴射量を一定と仮定して概算⁷⁾した。すなわち軽油による定格運転で、軽油密度 $\rho_f = 841 \text{ kg/m}^3$ 、噴射圧力差 $\Delta P = 21 \text{ MPa}$ 、噴射期間 $\alpha = 10^\circ \text{ CA}$ 、正味燃料消費率 $b_e = 0.24 \text{ kg/kW}\cdot\text{h}$ 、噴口係数 $C = 0.85$ と仮定すると噴口径は 0.27 mm と概算され、供試機関の噴口径にはほぼ一致する。なたね油使用の場合は、密度 $\rho_f = 916 \text{ kg/m}^3$ で噴口径は 0.26 mm となる。なたね油乳化燃料の見掛けの密度は、なたね油より大

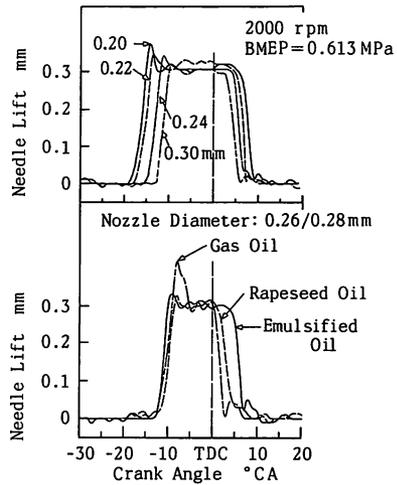


図4 ニードルリフト線図

きいので噴口径は小さくなり、本実験では表4のように噴口径を設定した。噴射時期は軽油使用の場合に設定された標準噴射時期を変更することなく実験を行ったが、噴口径を変更することによって、噴射時期および噴射期間は変化する。図4に噴口径を変更した場合と標準噴口径で3種類の燃料を使用した場合のニードルリフト線図を示す。噴口径を小さくすると、噴射時期は早くなり噴射期間は長くなる。また、なたね油乳化燃料は軽油、なたね油の場合に比べて噴射期間が長くなる。排気ガス中のCO濃度はNDIR、NO_x濃度はCLD、HC濃度はFID、排気煙濃度はポッシュ式スモークメータを使用して測定した。ニードルリフトはホール素子センサにより、シリンダ内圧力はひずみゲージ式指圧計で測定し熱発生率を算出した。また、燃焼室内カーボン堆積状況については4種類の実験を行った。すなわち、標準噴射系では軽油、なたね油、およびなたね油乳化燃料を用い、噴射系Eではなたね油乳化燃料を用いて、いずれも3/4負荷 (BMEP = 0.460 MPa) で20時間連続運転して調べた。機関回転数は2000rpm一定で実験し、冷却水温度は $70 \pm 2^\circ \text{ C}$ に調整した。

4. 実験結果および考察

4.1 乳化燃料による標準噴射系での機関性能

図5は既報⁵⁾で報告した、乳化燃料中の水混合割合を変えた場合のNO_x濃度、排気煙濃度および正味燃料消費率を示す。全負荷と3/4負荷に相当するBMEP = 0.613 MPa および 0.460 MPa で実験したもので、い

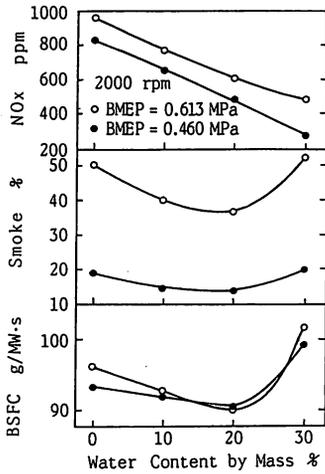


図5 機関性能に及ぼす水混合割合の影響

れの負荷においてもほぼ同一の傾向を示していると考えられる。NO_x濃度は水混合割合の増加にほぼ比例して低減し、排気煙濃度は水混合割合が20%までは減少する。正味燃料消費率についても水混合割合が20%で、低減効果大きい。水混合割合が30%になると、正味燃料消費率がなたね油の場合より悪化するのに伴い、排気煙濃度も大きく増加する。しかし、NO_x濃度は水混合割合が30%でもさらに低減され、NO_x濃度に与える水分の蒸発による燃焼温度降下の影響は大きいと考えられる。以上のことから供試機関の場合、機関性能、排気ガス濃度の点から最適水混合割合は20%である。また、超音波照射した水混合割合20%のなたね油乳化燃料で実験した結果、超音波照射しない乳化燃料の場合に比較して、NO_x、CO、排気煙濃度および正味燃料消費率については有意な差がないことを確認した。

4.2 噴口径の変化による機関性能への影響

図6に、標準開弁圧22MPaの場合の排気ガス濃度に与える噴口径の影響を示す。NO_xおよび排気煙濃度の図には標準噴口径の場合の軽油のデータを、HCおよびCO濃度の図には標準噴口径の場合のなたね油のデータを参考のために示した。負荷が変化しても排気ガス濃度に与える影響は傾向的には、ほとんど同じであると思われる。すなわちHC、CO、排気煙濃度は実験の範囲内では噴口径を小さくするにしがたい低減される。逆に噴口径を大きくすると、標準噴口径の0.26/0.28mmまではわずかながら増加するが、標準噴口径を境にして噴口径が大きくなると、増加の割合が

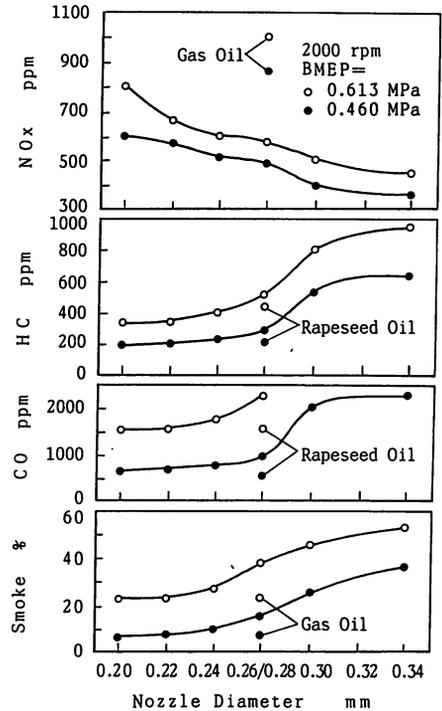


図6 排気ガス濃度に及ぼす噴口径の影響

大きくなる。これに対して、NO_x濃度は噴口径を大きくするにしたがって減少する。なおCO濃度はBMEP=0.613MPaの場合、噴口径が0.30mm以上になると、3000ppm以上となりオーバースケールであった。図6に示すように、乳化燃料では、なたね油の場合に比べてHC濃度は増加するが、噴口径を小さくすることによって噴霧は微粒化され、シリンダ壁を冷却する燃料の付着も減り、なたね油の場合のHC濃度以下に低減されたものと思われる。図7に熱発生率曲線の一例を示し、図8に着火遅れ、燃焼期間および空気過剰率と噴口径の関係を示す。噴口径を小さくするにしたがって、着火遅れが短くなり着火遅れ期間中に噴射された燃料が未燃HCとして排出される割合が減少するとともに、図4で示すように噴射期間が長くなることによる噴射率の低下もHC濃度の低減の一因⁸⁾である。CO濃度についても図6に示すように乳化燃料ではなたね油の場合よりも増加するが、噴口径を小さくすることによって低減されている。水蒸気によるガス希釈のため局所的な酸素不足によりCOは発生するが、噴口径を小さくすることにより噴霧の微粒化が促進され、空気の巻き込みが起こり燃焼が改善された

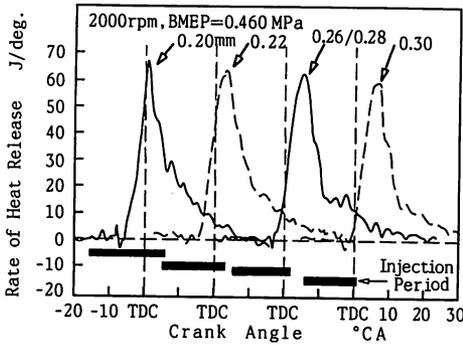


図7 熱発生率曲線の比較

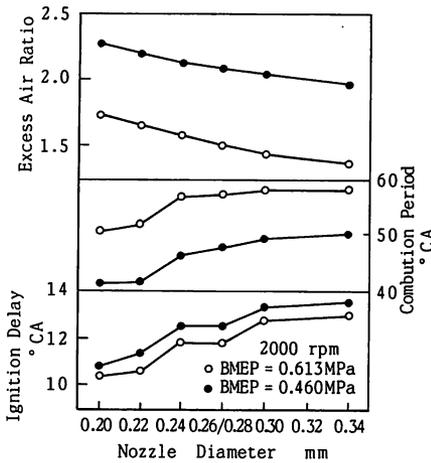


図8 燃焼状態に及ぼす噴口径の影響

と考えられる。このことは図8により噴口径を小さくすると、空気過剰率が増加していることから理解できる。排気煙およびNO_x濃度の同時低減は乳化燃料の大きな特徴^{9),10)}であるが、排気煙濃度については噴口径を小さくすることにより燃焼改善が図られ、噴口径0.22mm以下では軽油並みあるいは軽油以下の低減が得られる。標準噴口径の場合のNO_x濃度は軽油使用時に比べて約40%も低減されているが、噴口径を小さくすることによって、図7に示すように最大熱発生率が高くなり予混合燃焼期の燃焼温度の上昇を招き、NO_x濃度が増加したものと思われる。しかし、噴口径0.22mmの場合のNO_x濃度でも、軽油のNO_x濃度と比べて低い値を示している。図9に、正味平均有効圧力BMEPと正味燃料消費率BSFCの関係を示す。噴口径を小さくするにしたがって、全負荷域においてBSFCは減少するが、標準噴口径より大きくなると高負荷域において急激に悪化している。実験の範囲内

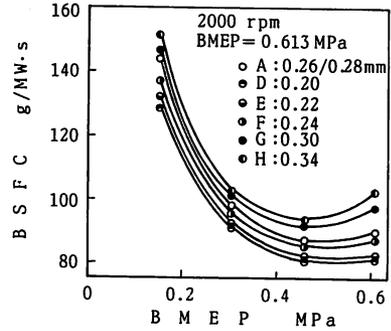


図9 正味燃料消費率と正味平均有効圧力

で噴口径を小さくしていくと、霧化作用が増進し噴霧内の空気過剰率が增大する。この結果、着火遅れが短くなり、噴射期間は長くなるにもかかわらず図8に示すように燃焼期間が短縮され、正味燃料消費率が改善されるものと考えられる。しかし噴口径を小さくし過ぎると、噴射圧力の増大を招き噴射ポンプへの負担が大きくなると同時に、噴口のつまりを起こす可能性もある。また、噴口径を0.22mmから0.20mmにしても、HC、COおよび排気煙濃度にほとんど変化はない。しかし、噴口径0.22mm以下ではBMEP=0.613MPaの場合、NO_x濃度が急激に増大する可能性がある。以上のことから供試機関の場合、機関性能および排気ガス濃度の点で最適噴口径は0.22mm付近であると考えられる。

4.3 開弁圧の変化による機関性能への影響

図10に排気ガス濃度に与える開弁圧の影響を示す。負荷が変化しても排気ガス濃度に与える影響は傾向的にはほとんど変わらないと思われる。開弁圧が高くなると、HC濃度は急激に増加し、NO_x濃度は減少して開弁圧29MPaのCの場合には大きく低減している。開弁圧が高くなると、燃焼室壁への燃料の付着量の増加と図11に示すニードルリフト線図から分かるように噴射ポンプの圧送力が一時的にノズルスプリングの力に負けて、ノズルが押し戻され、ノズルから後だれを生じているためHC濃度が増大し、NO_x濃度が低減されたと思われる。一方、排気煙濃度についても、開弁圧29MPaのCの場合には大きく低減されている。この理由としては次のようなことが考えられる。すなわち、開弁圧が高くなると噴射時の霧化と噴霧の貫通力増大による燃焼室壁への衝突によって起こる二次的霧化により微粒化が促進され、噴霧量が増加する。したがって、燃焼室壁への付着量が増加したにもかかわらず、不完全燃焼が減り排気煙濃度が低減したと考え

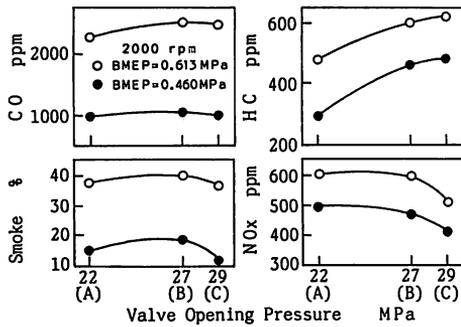


図10 排気ガス濃度に与える開弁圧の影響

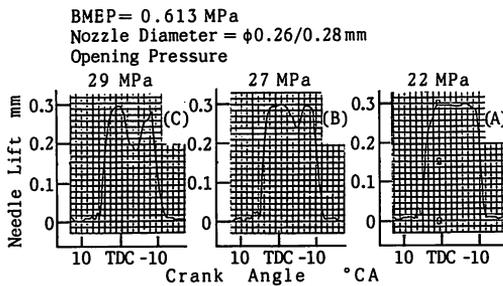


図11 開弁圧の違いによるニードルリフト線図

られる。噴射ノズル内シム厚さを変えて、開弁圧を変更した場合の排気ガス濃度の変化は、噴霧量、噴霧の微粒化の割合、燃焼室壁への付着量およびノズルからの後だれの増減割合の変化によるものと考えられる。

4.4 燃焼室内カーボンの堆積状況

BMEP=0.460MPaで20時間連続運転した後、燃焼室内に堆積したカーボン量を調べ、軽油およびなたね油で運転した場合と比較した結果を図12に示す。軽油およびなたね油は標準噴射系Aを使って運転し、なたね油乳化燃料については標準噴射系Aと、本研究の結果最適噴口径と考えられる0.22mmを使った噴射系Eで運転した。なたね油乳化燃料の場合、ヘッド側カーボン堆積量が多く、ピストン側ではなたね油の場合に比べて、大きく減少している。乳化燃料の場合、噴射された燃料噴霧がマイクロ爆発により分散されるため、ヘッド側の堆積量が多いと思われる。軽油の場合の堆積したカーボンは容易に取り除くことができるが、なたね油および標準噴射系Aで運転したなたね油乳化燃料の場合は、粘り気があり取り除きにくいカーボンであった。噴口径0.22mmを使った噴射系Eで運転したなたね油乳化燃料の場合、標準噴射系Aで運転した場合に比べて、約60%ものカーボン堆積量の減少が見られ、粘り気のないカーボンであった。このことか

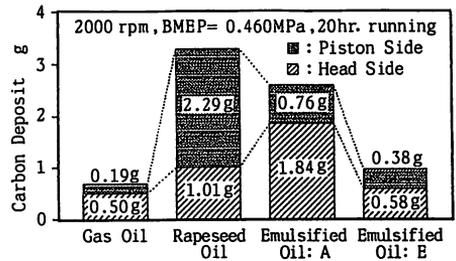


図12 燃焼室内カーボン堆積量の比較

らも、噴射系Eで運転した場合は燃焼状態が改善されていることが確かめられた。また、いずれの燃料でも排気弁付近は高温にさらされるため、カーボンが再燃焼し堆積量は少ないが、吸気弁付近ではカーボンの堆積量が多いことが観察された。

5. 結論

水混合割合20%のなたね油乳化燃料を直噴式小形ディーゼル機関に使用して、機関性能向上および排気ガス濃度の低減策を検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) なたね油乳化燃料を用いる場合、標準噴口径に比べ、噴口径を小さくすることによって、機関性能向上とHC、COおよび排気煙濃度の低減が同時に得られる。
- (2) 機関の燃焼状態および排気ガス濃度の点から供試機関の最適噴口径は0.22mm付近である。
- (3) 噴射ノズル内シム厚さを変えて開弁圧を高くすると、NO_x濃度は低減するが、HC濃度は増加する。
- (4) なたね油乳化燃料を用いた場合、ヘッド側カーボン堆積量が多く、ピストン側ではなたね油に比べて、大きく減少する。
- (5) 供試機関での最適噴口径と考えられる0.22mmを使って運転した場合、軽油使用の標準噴射系で運転した場合に比べ、燃焼室内カーボン堆積量は約60%低減可能である。

終わりに、本研究を実施するにあたり、ニードルリフトセンサおよび噴射ノズルは(株)ゼクセルより提供を受け、実験には学部生の松山淳君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) 村山・ほか5名, 内燃機関, 25-1 (1986), 9.
- 2) Tritthart, P. and Zelenka, P., SAE Paper, No.905112 (1990).
- 3) Perkins, L. A., ほか2名, SAE Paper, No.911764 (1991).
- 4) Ziejewski, M., ほか3名, SAE Paper, No.911765 (1991).
- 5) 浜崎・ほか2名, 機論, 59-548, B (1992), 1551.
- 6) 北原・吉澤, 分散・乳化系の科学, (1983), 202, 工学図書.
- 7) 喜多野, 内燃機関概論, 1974, 127, 日刊工業新聞社.
- 8) 松井・杉原, 自技論, No.34 (1987), 45.
- 9) Tsao, K. C. & Wang, C. L., SAE Paper, No.860304 (1986).
- 10) 塚原・ほか2名, 機論, 53-506, B (1988), 2955.