

ディーゼル機関のためのなたね油燃料性状

浜崎 和 則*・木 下 英 二*・中 村 卓 也**・
亀 田 昭 雄*・小 山 隆 行*

Rapeseed Oil Fuel Properties for Diesel Engines

Kazunori HAMASAKI, Eiji KINOSHITA, Takuya NAKAMURA,
Akio KAMEDA and Takayuki OYAMA

Due to the increasing interest in the CO₂ problem, the request for alternative fuels from regenerated vegetable energy sources is increasing. The present work describes the results of experiments using rapeseed oil, emulsified rapeseed oil, rapeseed methyl ester, and gas oil in a swirl-chamber diesel engine. The results show that the viscosity of rapeseed methyl ester is a little higher than that of gas oil and that the smoke concentration of rapeseed methyl ester is about 50% lower than that of gas oil. Furthermore, NO_x and smoke concentrations of emulsified rapeseed oil are lower than those of gas oil and energy consumption is similar to that in the case of operation with gas oil and rapeseed methyl ester.

1. 緒 言

内燃機関の燃料は化石燃料に頼っており、有限である。将来とも燃料需要を満たすために、再生産可能な植物油を代替燃料として利用することは大きな利点がある。その中で、なたね油をディーゼル機関燃料とする研究がある。地球上のCO₂を増やし続けている化石燃料と異なり、なたね油は光合成によって生産されるため地球上のCO₂を増やすことはない。さらに、なたねは比較的栽培が容易で我が国のどの地域でも栽培が可能であり、搾油率が高く油の生産が他の植物油に比較して効率的である¹⁾。

過去にはエネルギー源の確保と節約のために、なたね油を利用するという考えがあったが、今日では可能な限り高い熱効率で使用し、排気エミッションをも改善してディーゼル機関の代替燃料として有効に利用することにある。また、なたね油燃料の使用形態としては、そのままの状態で使用する²⁾、軽油やアルコールと混合して使う³⁾、乳化して使う⁴⁾、メチルエステル化して使う^{5), 6)}研究などが見られる。

本研究では、なたね油をどのような燃料形態でディーゼル機関燃料として用いるかを検討するために渦流室式

ディーゼル機関になたね油、なたね油乳化燃料、なたね油メチルエステルおよび比較のために軽油を適用し、排出ガス特性と機関性能に与える燃料性状の影響について比較実験した。その結果、なたね油乳化燃料およびなたね油メチルエステルは軽油代替燃料として十分使用でき、軽油に比較して優位な点もあることを明らかにした。

2. 供試燃料

供試燃料として、なたね油、なたね油乳化燃料、なたね油メチルエステルおよび比較のために市販の自動車用

表1 供試燃料の性状・物性

	Rapeseed Oil	Emulsified Rapeseed Oil	Rapeseed Methyl Ester	Gas Oil
Cetane number	42	40	54	57
Net calorific value (MJ/kg)	36.84	29.47	36.20	43.12
Density@15℃ (g/cm ³)	0.920	0.938	0.886	0.832
Viscosity@20℃ (mm ² /s)	76	248	7.7	4.7
C (wt%)	77.5	61.9	76.8	87.3
H (wt%)	11.6	9.3	12.0	12.5
O (wt%)	10.4	8.4	10.8	0
Sulfur (wt%)	0.001	0.001	0.001	0.16
Water (wt%)	0.07	20.07	0.04	—

平成9年5月31日受理

*機械工学科

**博士前期課程機械工学専攻

軽油を用いた。燃料の性状・物性を表1に示す。なたね油は日本農林規格に基づいた市販のもので、実験中は同一製造者のものを使用した。なたね油乳化燃料(W20と称す)としてはこれまでの研究⁹⁾により機関性能、排出ガス濃度の点から、最適水混合割合は質量割合で20%、乳化剤としてモノステアリン0.8%で、残りがなたね油である。なたね油メチルエステル(RMEと称す)はアルカリ触媒であるKOHが存在するもとの、メタノール

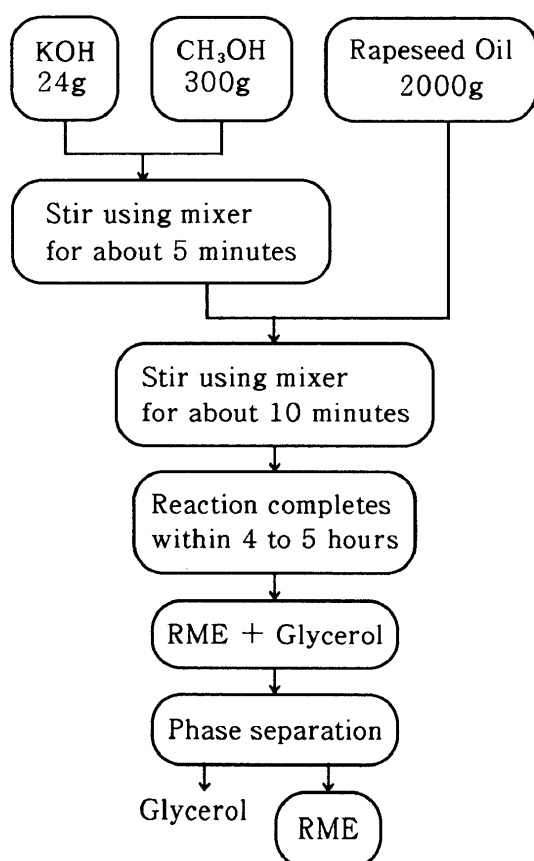


図1 なたね油メチルエステルの作製方法

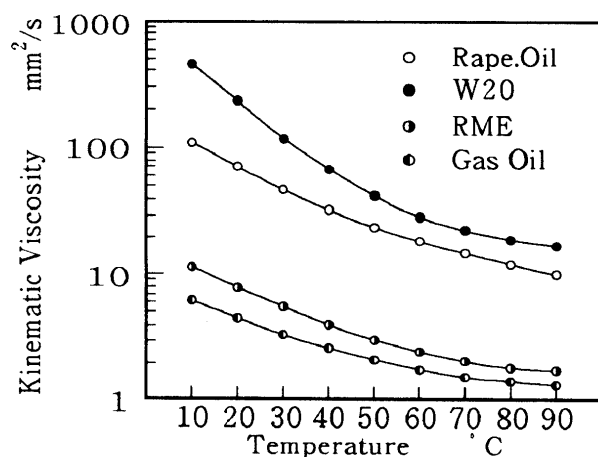


図2 供試燃料の動粘度

となたね油を室温で反応させて作製した。実験に用いたなたね油メチルエステルの1回分の作製方法の概略を図1に示す。KOHが多いとセッケンを生じ、不足するとエステルの純度が下がる。また、メタノールの量が適切でないと反応速度とエステルの純度に影響を与える。メタノールの量が多い場合は負荷の増大とともに、噴射ポンプに入った燃料から気泡の発生が見られ、機関回転数が安定せず実験が不可能であった。本実験でのエステル転換率は95%以上であった。軽油と比較した場合のなたね油系燃料の特徴は酸素を10%前後含有していることと、硫黄をほとんど含有していないことである。図2に供試燃料の動粘度を示す。なたね油、なたね油メチルエステルおよび軽油はレッドウッド粘度計を用いて測定し、なたね油乳化燃料はレッドウッド粘度計と回転式粘度計を併用して測定した。なたね油乳化燃料はなたね油に比べ3倍程度粘度が高くなるが、なたね油メチルエステルは軽油の1.5～2倍程度の低粘度である。

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、横型、渦流室式四サイクルディーゼル機関で、表2に主要諸元を示す。噴射系は軽油使用時の標準噴射系のままで、機関回転数は2000rpm一定のもとに負荷を変化させて実

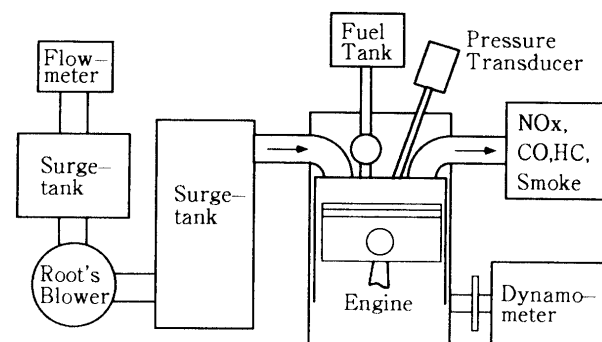


図3 実験装置概略

表2 供試機関の諸元

Engine Type	1 Cylinder, 4 Stroke Water Cooled
Combustion Chamber	Swirl Chamber
Bore × Stroke	85 × 87 mm
Stroke Volume	493cm ³
Compression Ratio	23.1
Rated Power	5.88kW/2400rpm
Injection Type	Pintle
Nozzle Opening Pressure	15.7 MPa
Injection Timing	11.5 ° CA .BTDC

験した。排出ガス中のCO濃度はNDIR, NO_x濃度はCLD, HC濃度はFID, 排気煙濃度はボッシュ式スモークメータを使用して測定した。供試機関では主燃焼室と渦流室の両室の圧力を同時に測定し, 熱発生率は別々に求めて合計しなければならない。しかし, 渦流室への指圧計の取り付けが困難であったために指圧計は主燃焼室のみに取り付け, 主燃焼室と渦流室を一つの容積と仮定して圧力測定を行った。燃焼室の圧力波形は50サイクル分の平均化処理を行い, 熱発生率を算出した。

4. 実験結果および考察

4.1 可視化による軽油となたね油の噴霧燃焼特性

なたね油系燃料の噴霧燃焼状態を実際の機関で直接観察することは, 排気煙濃度, 燃料消費率で代表される燃焼特性を把握するうえで, 貴重な知見が得られる。しかし, 本実験に用いた渦流室式機関ではシリンダ径が小さく, 直接撮影は困難である。そこで表3に示す試験用大

表3 高速度撮影用機関の諸元

Engine Type	1 Cylinder, Cross-Head Typed, Uni-Flow Scavenging 2 Stroke D.I. Diesel Engine
Bore × Stroke	190 × 350 mm
Max. Rating	81 kW/510 rpm
Max. P _{me}	0.98 MPa

形単気筒直噴式ディーゼル機関を使用して直接撮影⁷⁾を行った。撮影はピストン頭部の燃焼室底面をアクリルにし, ピストンの下方からなたね油および軽油の噴霧燃焼状態を撮影速度5000 fpsで高速度撮影した。図4に燃焼室の説明図を示し, 撮影した燃焼状態の変化の写真を図5に示す。噴口数8の噴射ノズルを使用し, 燃焼室はスワールのない状態で, 撮影時の機関回転数は430~440 rpmである。

写真を観察すると, なたね油に比べて軽油の場合は明らかにすすの発生が多く, 着火直後から火炎全般にわた

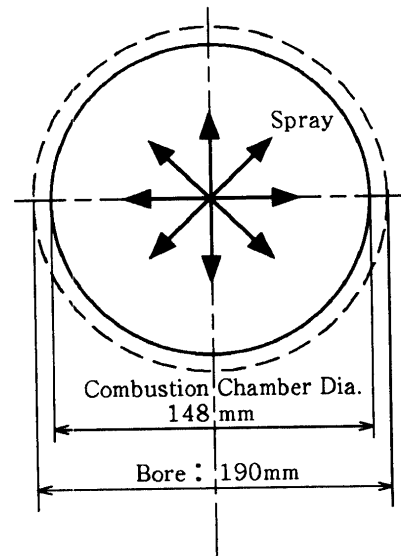


図4 高速度撮影の燃焼室説明図

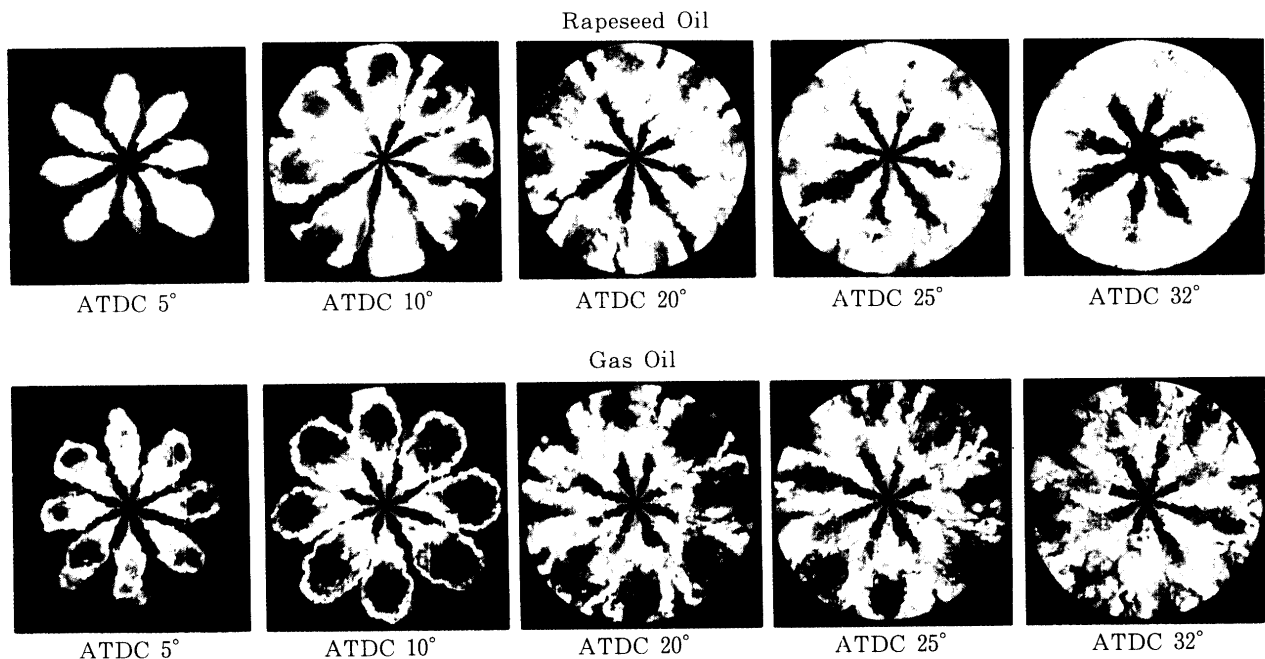


図5 なたね油と軽油の燃焼状態の変化

りすすの発生が見られる。しかし、なたね油の場合は噴霧が燃焼室壁に衝突した過濃部で、すすの発生が見られ、それは ATDC10° 以降である。両燃料の ATDC5° の火炎の発達状態から判断して、軽油の場合が着火遅れ期間が短く、粘度の高いなたね油が着火遅れ期間が長いことが観察される。ATDC 25° までの写真から判断して、なたね油の場合は噴霧間に未利用空間が幾分多く、高粘度による噴霧分散の悪さを示している。しかし、図2に見られるようになたね油は軽油に比べて、かなりの高粘度にもかかわらず、その火炎は軽油の火炎に劣るものではなく、十分に発達した火炎であると観察される。また、ATDC 32° での両火炎を比較すると軽油の火炎は最盛期であるが、なたね油の場合は最盛期を過ぎて消炎に向かっていることから、なたね油の燃焼は軽油に比べて早い時期に終了していると思われる。これはなたね油に酸素が含まれていることもあるが、それ以上になたね油の動粘度が高いことが影響していると考えられる。すなわち、なたね油は噴霧特性が悪く、着火遅れ期間が長くなるために空気導入がすすみ、予混合燃焼量が増え、全噴射量が増えるにもかかわらず燃焼は早く終了しているものと考えられる。

4.2 排出ガス特性の比較

4種類の燃料を使って運転した場合の負荷に対する NOx および排気煙濃度を図6に示す。排気煙濃度は各燃料とも負荷25%以上では、ほぼ直線的に増加する。なたね油系燃料の排気煙濃度は軽油の場合より低く、特に RME は最も低濃度であり、負荷の増大による排気煙濃度の増加割合がほかの燃料と異なり小さくなっている。RME の場合の最大排気煙濃度は軽油の場合の最大排気煙濃度に比べて約50%も低減されている。なたね油の排気煙濃度が軽油の場合より低濃度であることは、図5の燃焼写真の観察と一致している。NOx 濃度は各燃料と

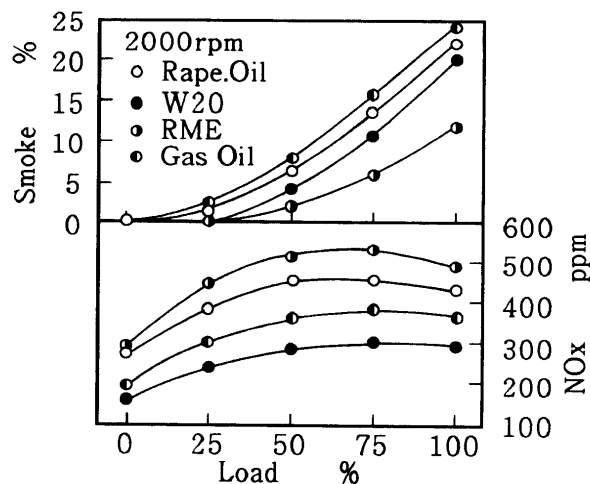


図6 排気煙濃度と NOx 濃度

も負荷50%~75%付近で最大となり、それ以上の高負荷側ではわずかながら減少する。この原因として、供試機関では燃料の全量が渦流室に供給され、負荷100% (BMEP=0.537MPa) においては渦流室内の燃料占有率が高くなるために燃料過濃の状態となり、予混合燃焼が負荷50%~75%の場合より低い温度で行われたことと、空気不足による NOx 生成反応の停止が見られたためであると考えられる。RME の NOx 濃度はなたね油よりも高く、その最大 NOx 濃度は軽油の場合の40%増である。図7は各燃料の空燃比の実測値を示す。なたね油系燃料はいずれも全負荷域にわたって、軽油より空燃比が小さくなたね油が最も小さい。空燃比の結果から考えると、燃焼のために多く空気を必要とする軽油は NOx 濃度が最も高く、なたね油系の燃料では軽油の場合より NOx 濃度は低いと予想される。しかし、なたね油と RME は軽油より全負荷域にわたって NOx 濃度が高い。なたね油、RME は分子構造中に酸素を含有しているため、渦流室内で形成された過濃混合域での局所的な酸素不足が解消されることにより、軽油以上の NOx 生成反応が促進されたと思われる。特に RME の場合には、なたね油よりも分子構造中に含まれる予混合酸素量は幾分多く、その上に粘度の低下によって微粒化がよくなったために予混合燃焼領域での燃焼温度が高くなり、NOx 濃度が高く、排気煙濃度は低くなったものと考えられる。

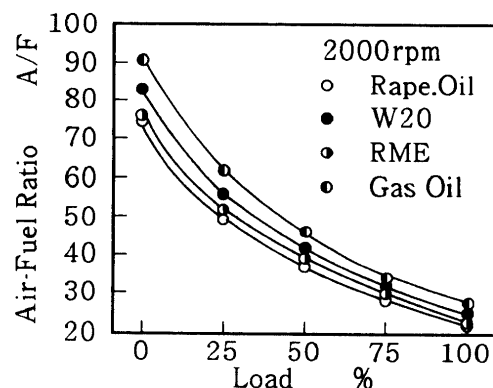


図7 負荷に対する空燃比変化

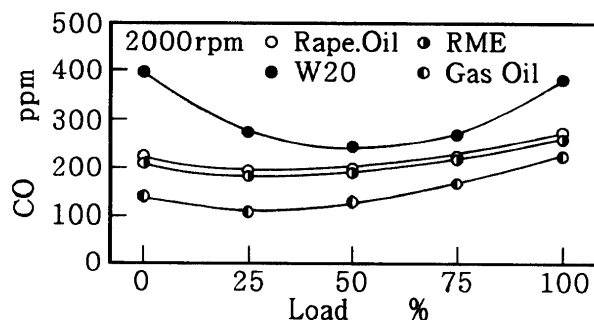


図8 負荷に対する CO 濃度

一方、W20の場合には噴霧の運動量増大による空気導入率の増大、水の蒸発潜熱による燃焼温度の抑制と高温での燃焼ガスの滞留時間の短縮によって、NO_x濃度は最も低くなっている。W20以外の燃料ではNO_xと排気煙濃度はトレードオフの関係にあるが、W20はNO_xと排気煙濃度の同時低減が可能で、他の燃料とは同一に論じられない。図8に負荷に対するCO濃度を示す。軽油、なたね油、RMEの場合のCO濃度は負荷25%付近で最低となり、それ以上の負荷では負荷とともに高くなる。軽油の場合が最も低濃度で、なたね油とRMEはほとんど同濃度である。W20の場合はほかの燃料に比べて全負荷域でCO濃度が高く、負荷50%付近で最低値を示し、それ以外の負荷では増加する。最高濃度は無負荷時で、ほかの3種類の燃料とは異なるCO濃度特性を示している。W20の場合は水の蒸発潜熱により燃焼温度が抑制されるとともに水性ガス反応により水分が遊離炭素と反応し、CO濃度が増加したと考えられる⁸⁾。なお、HC濃度も測定したが、いずれの燃料でも20ppm以下の低濃度であり、渦流室式機関では問題にならないと思われる。

4.3 機関性能と燃焼特性

軽油に比較して、なたね油系燃料は全負荷域にわたって排気煙濃度が低いことは図6より明らかである。図9になたね油系燃料のシリンダ内圧力および熱発生率の比較を示す。排気煙濃度の最も低いRMEは着火遅れ期間が短く、燃焼期間も短くなっており、燃焼状態がなたね油、W20に比べて良好なことを示している。W20はなたね油の場合よりも着火遅れが長く、予混合燃焼量が増大するにもかかわらず、燃焼期間がいくらか短縮されて、なたね油の場合よりも排気煙濃度の低減に寄与している。また、後燃え期間の長期化は排気煙濃度の増大のみならず、排気温度の上昇となる。図10に排気口出口より16mm

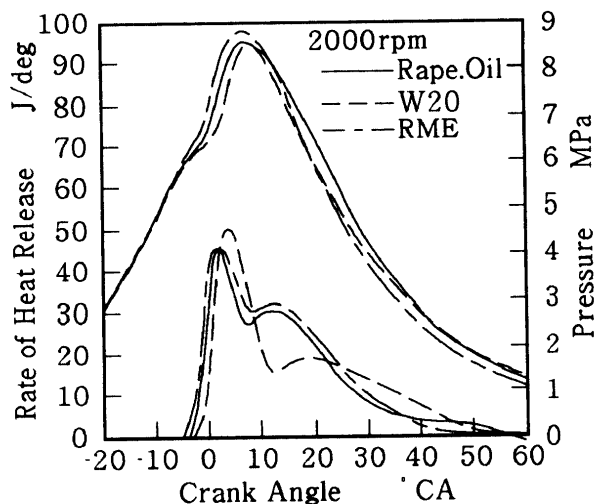


図9 シリンダ内圧力と熱発生率

の排気管中心位置で測定した排気温度を示す。排気温度は燃焼終了の最も早いRMEの場合が最低で、以下W20、なたね油の順に高温となる。軽油はなたね油よりいくらか高い。図11になたね油系燃料と軽油を使用した場合の正味燃料消費率BSFCとエネルギー消費量を示す。BSFCは真発熱量の低い燃料ほど大きくなり、W20が最も大きい。ただし、W20は水分を含んだBSFCであり、水分を除いた場合にはなたね油よりも小さく、軽油に比べて17.5%の増大となる。なたね油の真発熱量は軽油に比べて14.6%低い、BSFCは軽油の場合より約20%も増大する。これに対して、RMEの真発熱量は軽油よりも16%低い、粘度が軽油に近いことから、燃料中に予混合酸素を含んでいることから、RMEの場合のBSFCは軽油に比べて15.5%の増大にとどまっている。また、エネルギー消費量を比較すると、W20、RMEはほぼ軽油と同一であり、なたね油は軽油より2%程度大きい。

以上のことより、渦流室式ディーゼル機関になたね油

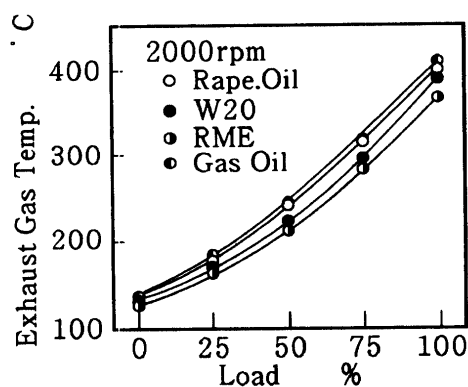


図10 負荷に対する排気温度の変化

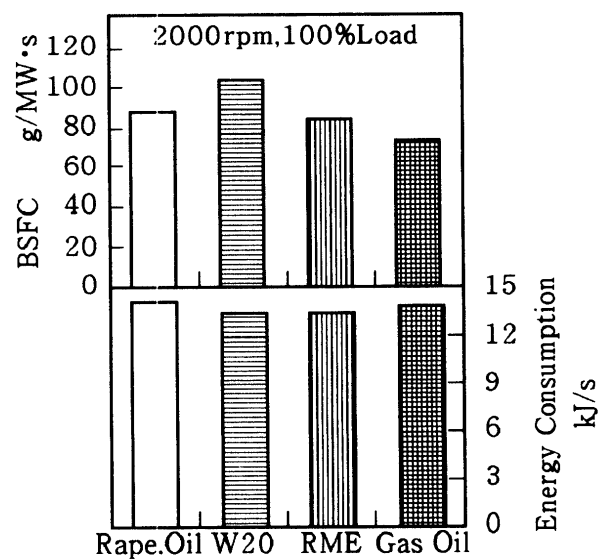


図11 燃料の違いによる機関性能

系燃料を用いる場合、NO_x、排気煙濃度とエネルギー消費量の点から考えるとW20が、機関性能および排気煙濃度の点からはRMEが適していると考えられる。

5. 結 論

渦流室式ディーゼル機関を用いて、排出ガス特性と機関性能に与えるなたね油燃料性状の影響について実験した結果、以下の結論を得た。

- (1) なたね油は高粘度にもかかわらず、軽油に劣らない十分な火炎の発達が見られ、すすの発生は軽油の場合に比べ全般的に少ない。
- (2) なたね油メチルエステルは軽油に近い低粘度で、排気煙濃度は軽油に比べて50%程度低減される。
- (3) なたね油メチルエステルの最大NO_x濃度は軽油の場合より40%高くなり、ディーゼル燃料としての問題はNO_x濃度低減である。
- (4) なたね油乳化燃料はNO_x、排気煙濃度の同時低減が可能で、エネルギー消費量は軽油やなたね油メチルエステルと同程度である。

終わりに、高速度撮影は九州大学工学部機械エネルギー工学科の高崎講二助教授、安部重信文部技官の御指導・御協力を頂いた。また、供試機関はヤンマーディーゼル(株)より提供頂いた。ここに記して感謝致します。

文 献

- 1) 飯本, 農業機械学会誌, 38-4(1976), 483.
- 2) Hemmerlein, N., ほか3名, SAE Paper, No. 910848 (1991).
- 3) 村山・ほか5名, 内燃機関, 25-1(1986), 9.
- 4) 浜崎・ほか3名, 機論, 61-581, B(1995), 339-343.
- 5) Parkins, L. A., ほか3名, SAE Paper, No. 911764(1991).
- 6) Fiedler, H., Proc. 21st CIMAC Paper, No. D 72(1995).
- 7) 和栗・ほか4名, 機論, 55-509, B(1989), 246-252.
- 8) 中川・立石, 機誌, 81-720(1978), 1201.