

ディーゼル燃料としての 廃食油メチルエステルの燃焼特性

Choesnul JAQIN* 長野 健三** 平早水 和幸**
浜崎 和則*** 木下 英二*** 亀田 昭雄***

COMBUSTION CHARACTERISTICS OF WASTE VEGETABLE OIL METHYL ESTERS FOR DIESEL FUEL

Choesnul JAQIN, Kenzo NAGANO, Kazuyuki HIRASOHZU,
Kazunori HAMASAKI, Eiji KINOSHITA and Akio KAMEDA

Considerable amount (400~600 thousand tons) of waste vegetable oil in Japan are still discarded every year. Utilization of waste vegetable oil for diesel fuel leads to two advantages for environmental protection, to reduce CO₂ emission from engines and to avoid water pollution of rivers. In this study, combustion characteristics of waste vegetable oil methyl ester (WME) are investigated in detail by not only engine test run but also observation of burning flames in a visual engine. As results indicate, WME shows rather better combustion state in the visual engine and lower smoke emission from a high-speed DI test engine than gas oil. Moreover, by emulsifying WME with water, further improvement of combustion and more than 18 % reduction of NO_x emission is carried out.

Keywords: Diesel Engine, Alternative Energy, Waste Vegetable Oil, Methyl Ester, Emulsified Fuel

1. はじめに

現在、ディーゼルエンジンをはじめとして内燃機関用燃料の大部分を石油系燃料に依存している。その枯渇が議論されている中で、特定のエネルギー源への依存度を少しでも低くし燃料の多様化を図る必要がある。その1つとして再生可能な植物油をデ

ィーゼル燃料として利用するための研究^{1),2)}がある。粘度や排気エミッションなどの点から、植物油とメタノールとの反応によって作製される植物油メチルエステルはバイオディーゼルと言われ、燃焼過程においてはCO₂を発生するが植物油の光合成過程においてCO₂を吸収し、さらに硫黄分をほとんど含まないために酸性雨などによる環境負荷が小さい燃料であると考えられる。

また、植物油および動物油の使用済み廃食油は、それ自体燃焼していないので高い発熱量を持つ新

2001年8月31日受理

* 博士後期課程システム情報工学専攻

** 博士前期課程機械工学専攻

*** 機械工学科

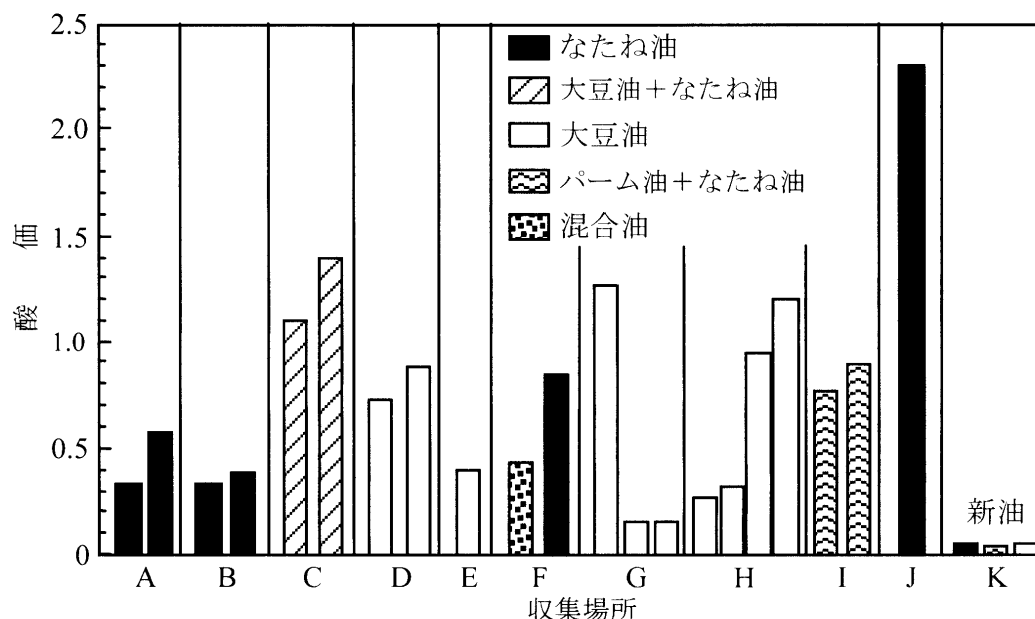


図-1 廃食油および新油の酸価

表-1 供試燃料の性状

	WME-A	WME-B	WME-D	軽油	RME
セタン価	49	49	49	56	51
低発熱量 (MJ/kg)	36.42	36.42	36.47	43.12	36.55
密度@288K (g/cm ³)	0.883	0.886	0.888	0.832	0.886
動粘度@293K (mm ² /s)	9.1	9.1	9.1	4.7	7.7
C (wt%)	75.2	76.1	77.3	87.3	77.6
H (wt%)	11.3	11.6	12.0	12.5	11.9
O (wt%)	11.4	10.9	11.6	0	10.5
S (wt%)	0.0005	0.0005	0.0007	0.05	0
水 (wt%)	0.05	0.06	0.10	—	0.03
廃食油のAV	0.58	0.33	0.90	—	—

油の場合と比較しても発熱量の低下はほとんどない。さらに、酸素を含有しているのでディーゼル燃料として再利用する価値は高い。国内の廃食油は大部分が植物油であると考えられる。日本植物油協会の資料³⁾によると、1999年度の国内植物油供給量は約245万トンであり、その中で主に廃食油となり得る家庭用と業務用は約111万トンである。この内、50%前後の40~60万トンが毎年廃棄されると考えられる。廃食油をディーゼル燃料として利用した場合、エンジンからのCO₂排出量の低減と河川の汚染を防ぐという2つの環境保護の利点が考えら

れる。ここでは、家庭排水の中で最大の環境汚染の原因と言われる廃食油をメチルエステル化し、ディーゼル燃料として再利用する場合、廃食油の劣化の程度と排ガ斯特性および燃焼特性の関係について報告する。

2. 供試燃料について

植物油を空気中に放置したり、熱を加えたりすると、酸化され様々な反応物が生ずるため劣化や栄養価の低下が起こる。劣化測定には種々の方法がある

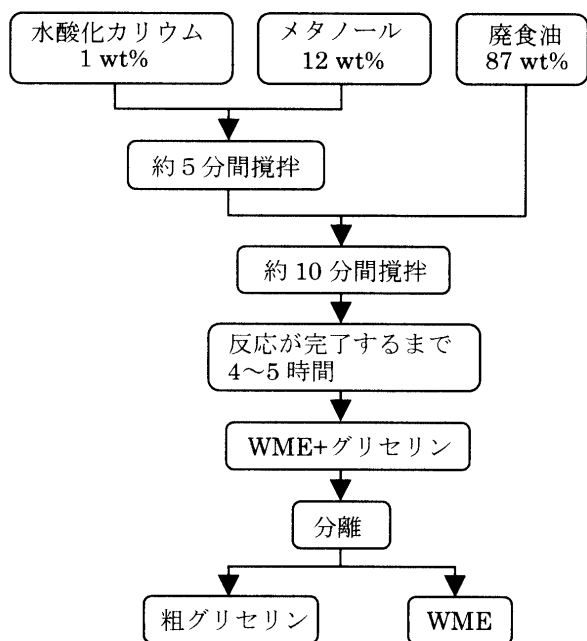


図-2 廃食油メチルエステル作製方法の例

が、植物油の酸化分解物中に生成される遊離酸を定量することによって酸価(AV)で表示する方法がある。酸価は主として熟劣化の指標として用いられるので、ここでは廃食油の劣化を酸価を用いて測定した。酸価は試料 1g を中和するのに必要な KOH の mg を表すと考えてよい。

図 1 に鹿児島県内で無作為に収集した廃食油の酸価の測定結果を示す。収集場所は、個人経営の食堂、ホテル、デパートの食堂、レストラン、鹿大生協食堂、一般家庭、惣菜屋、弁当屋、薩摩揚げ製造所、給食センターである。K は未使用の植物油であり、酸価は 0.05 程度である。廃食油としては酸価 2.5 以下のものが大部分を占めていると考えてよい。著者らは、リサイクルの観点から廃食油をディーゼル燃料として利用する取り組み^{4,5)}を始めた。廃食油はほとんど燃焼していないので、表 1 に示すように発熱量の低下は少なく、新油の場合の 0.3~0.4% 程度の低下にとどまる。廃食油メチルエステル(WME)を作製するためのフローチャートの例を図 2 に示す。基本的には新油での植物油メチルエステルの作製方法と同じである。

実験に使用した供試燃料として、廃食油 A、B、D および J を使って作製した廃食油メチルエステル WME-A、B、D、J と比較のために市販の JIS 2号軽油および新油のなたね油メチルエステル(RME)

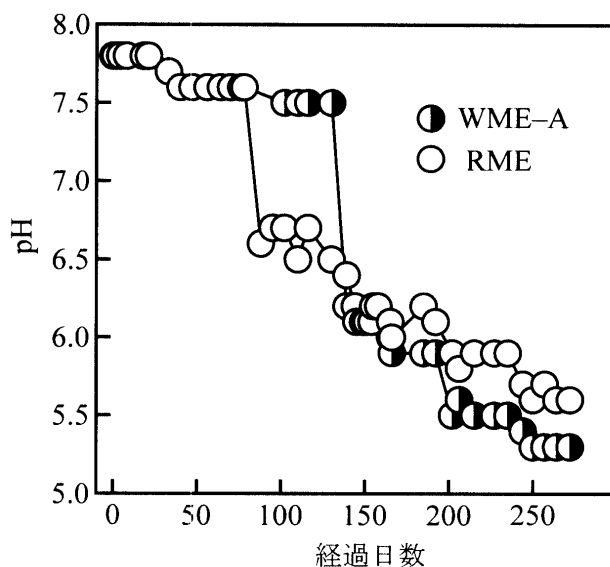


図-3 供試燃料の pH の変化

を使用した。また、WME の排ガス特性改善のために乳化廃食油メチルエステル(EWE)も作製し、実験に使用した。今回の実験では、廃食油メチルエステル WME-A に質量割合で水 15%、乳化剤 0.1%、0.5%、1.0%を加えて作製した EWE 0.1、EWE 0.5、EWE 1.0 の 3 種類を用いた。乳化剤としては、植物油メチルエステルを作製する際の副産物となる粗グリセリンを使用した。乳化燃料を使用する場合は別途乳化装置が必要であり、大型の船用エンジンやボイラでは使用実績もあり検討されているが、自動車用を使用する場合には、スペースの問題等から一考を要する。各供試燃料の性状・物性を表 1 に示す。ただし、WME-J については分析していないので表 1 に記載せず、また EWE 0.1、EWE 0.5、EWE 1.0 も WME-A の水乳化物であるので記載しなかった。WME-A、B の廃食油はなたね油、WME-D は大豆油である。WME-D の水分含有量が幾分多いが、廃食油メチルエステルは廃食油の酸価の違いによって、表 1 に示す性状に大きな違いは見られなかった。RME と WME-A の作製後の時間経過による pH 変化を図 3 に示す。作製直後、両者とも pH=7.8~7.5 で変化し、150 日前後経過した所で pH=6.5~6 の弱酸性になる。250 日を経過した所で RME は pH=5.6、WME は pH=5.3 でほぼ一定となる。RME、WME はともに弱アルカリ性から 250 日経過して弱酸性を示すが、市販の軽油が pH=5.5 程度であることから考えて、金属類を腐食することはないと思われる。

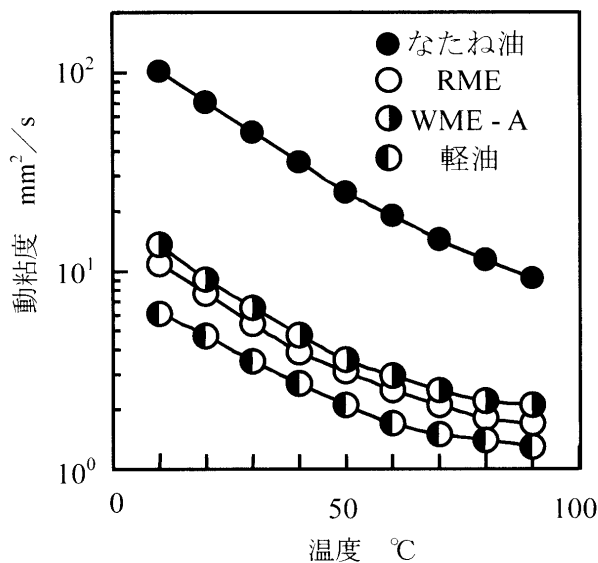


図-4 供試燃料の動粘度

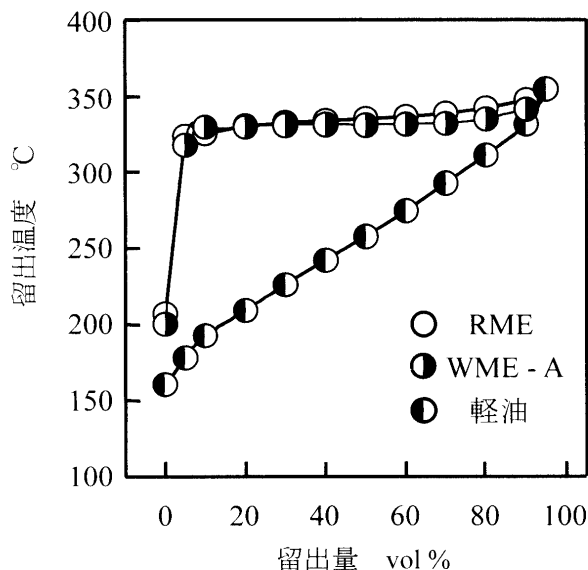


図-5 蒸留曲線

図 4 に供試燃料の温度に対する動粘度の変化を示す。RME および WME の低発熱量は軽油よりも 15%程度低いが、ディーゼル燃料の着火性を示すセタン価は 49~51 であり、米国の軽油よりも高く EU 諸国の軽油並みのセタン価を示しており、着火性に問題はない。また、前述したように植物系燃料には硫黄分がほとんど含まれていないうえに、酸素を 10~12%程度含有している。その分炭素の含有量が軽油より少なく、燃焼した場合には軽油よりもすすの発生は少ないことが予想される。RME、WME の動粘度はほぼ軽油に近く、使い易い燃料となっている。図 5 は供試燃料の蒸留曲線を示す。蒸留性状は、燃料の揮発性を示すもので、燃料噴射ノズルチップやエンジン燃焼室内の堆積物等の点からディーゼル燃料としては、90%留出温度が 300~350°C 程度以下であることが必要である。軽油は、160°C 付近から 360°C 程度の広い範囲の沸点成分で構成されているのに対し、植物油メチルエステル燃料の初留点は 200°C 前後であるが、ほとんどは 320°C~340°C 程度の高沸点成分で構成されている。

3. 実験装置および方法

供試機関は水冷横型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みで、実験は機関回転数 2,000rpm 一定のもとに負荷を変化させて行った。排ガス中の NOx 濃度は CLD、HC 濃度は FID、CO と CO₂ 濃度は NDIR、排気煙濃度はボッシュ式スモーク

表-2 供試機関の諸元

機関型式	水冷式直噴単気筒 四サイクルディーゼル機関
内径 × 行程	110 × 106 mm
行程容積	1007 cm ³
圧縮比	16.3
定格出力	11.77 kW / 2200 rpm
噴射圧力	19.6 MPa
噴射ノズル	φ0.33 mm × 4

クメータ、アクロレイン濃度はガスクロマトグラフ (島津 GC-14B) を使用して測定した。その他、燃料消費量、シリンダ圧力、ニードルリフト等を測定した。シリンダ内圧力波形は、50 サイクル分の平均化処理を行い、それをもとに熱発生率を算出した。

また、可視化機関は図 11 に示すように、シリンダ径 × 行程 = φ190 × 350mm の立型、単気筒ユニフロー掃気式二サイクル試験機関である。詳細は文献 2) に示している。

4. 実験結果および検討

4.1 廃食用油メチルエステルによる排ガス特性

図 6 に排気煙濃度および NOx 濃度を示す。廃食用油の酸価の違いによる WME の排気煙濃度および NOx 濃度に大きな違いはない。排気煙は、軽油の場合には負荷 25% まで、WME では負荷 50% まで検知されず、それ以上の負荷になるとほぼ直線的に増加している。WME はいずれの場合も軽油に比べ

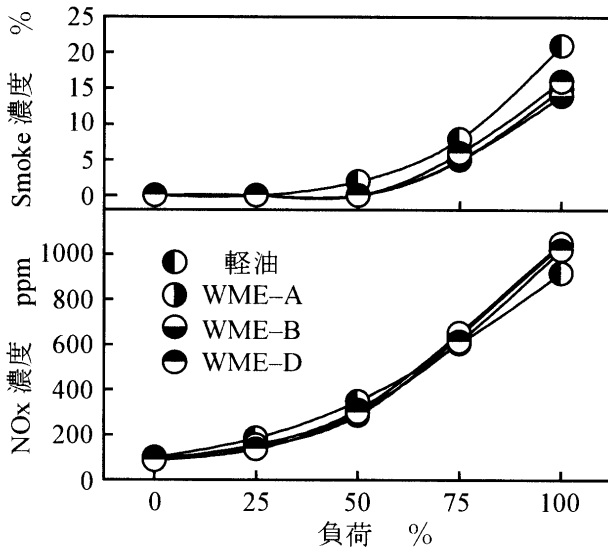


図-6 排気煙濃度およびNOx濃度

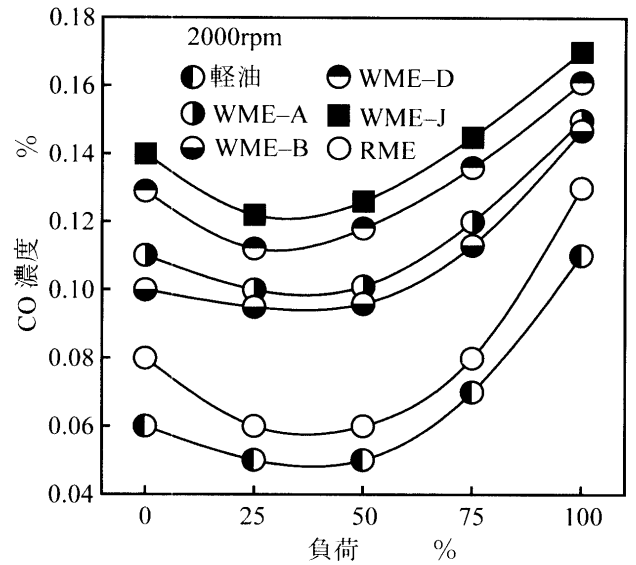


図-7 CO濃度

排気煙濃度は低く、100%負荷の場合で35%低減されている。ディーゼル機関から排出される粒子状物質(PM)のうち、40%強は黒煙であると言われているのでWMEは軽油に比べてPMは少ない燃料であると考えられる。一方、NOx濃度は低負荷では軽油の場合が高く、75%以上の高負荷ではWMEが高くなる。100%負荷で、WMEのNOx濃度は軽油の場合よりも約7%高濃度となる。

図7に負荷に対するCO濃度の変化を示す。燃料の違いにより明らかにCO濃度が異なり、WMEについては廃食油の酸価が大きいほどCO濃度は高くなる。WME-Jはなたね油メチルエステルで、廃食油の酸価は2.3である。CO濃度は軽油が最も低濃度で、各燃料とも25~50%負荷の付近で最低となり、それより低負荷でも高負荷でも高くなる。低負荷の場合は空気過剰率が大きく、燃焼の中間生成物が余分な空気によって冷やされたためCO濃度が高くなると考えられる。また、廃食油の劣化が進み、酸価が大きくなるに従って-OOHの形を持つヒドロペルオキシドが増加する⁶⁾ので、WMEを燃焼させた場合にはCOの主たる生成経路であるCHO、HCHOを作り出す化学反応は酸価が大きいほど活発となり、CO濃度が高くなったと思われる。また、WME系の燃料では酸価の違いによりHC濃度にはほとんど差異はなかった。蒸留試験、動粘度も酸価の違いによる差異は見られなかった。WMEでは酸価の違いにより燃焼状態にほとんど差のないことは図6の排気煙およびNOx濃度からも理解できる。したがって、燃料の一部が未燃あるいは分解された

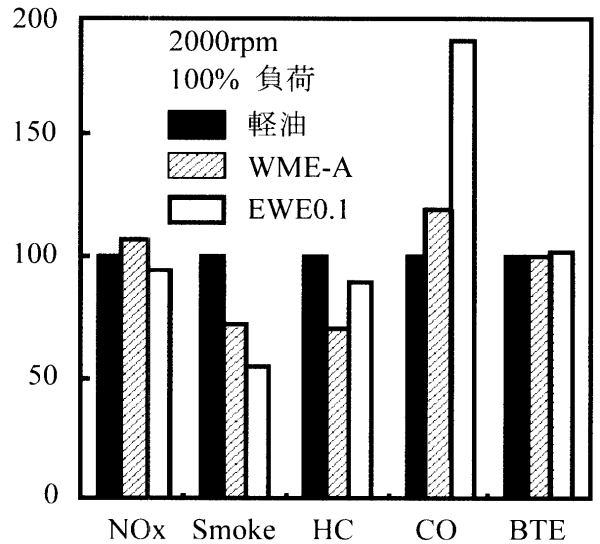


図-8 軽油の場合を100とした廃食油系燃料の機関性能

形で排出されるHC濃度にはほとんど違いは見られないと考えられる。

4.2 乳化廃食油メチルエステルによる燃焼特性

図8は100%負荷で、軽油を使用した場合の排ガス濃度と正味熱効率(BTE)を100として、WMEとEWE0.1の場合の比較を示す。WMEの場合はNOx濃度が軽油に比べ100%負荷では微増するが、75%以下の中・低負荷では低濃度であることは図6に示した。乳化燃料であるEWE0.1はNOx、排気煙、HC濃度ともに軽油よりも低濃度で、NOx、排気煙濃度は軽油の場合より、各々25%と45%低濃度と

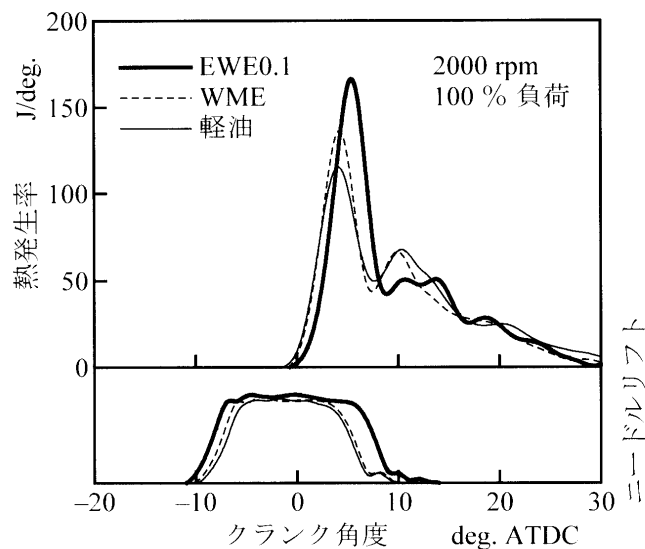


図-9 熱発生率線図および
ニードルリフト線図

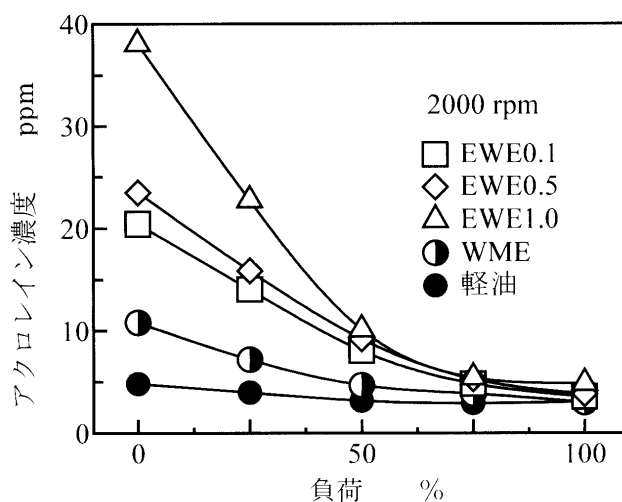


図-10 アクロレイン濃度

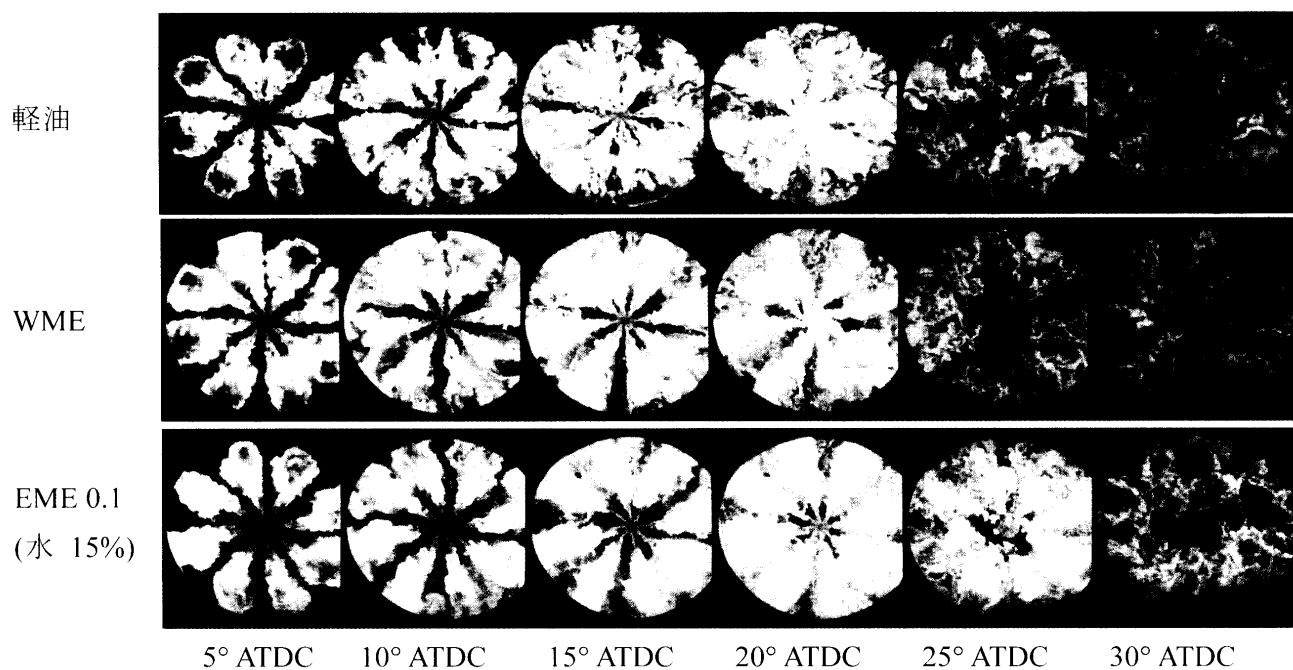
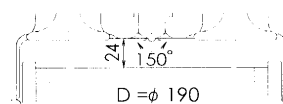


図-11 廃食用油系燃料および軽油の燃焼状態の変化

なる。CO 濃度は WME、EWE 0.1 とともに軽油の場合よりも高濃度であるが、ディーゼル機関ではガソリン機関に比べて、CO 濃度はかなり低く規制値を越えるような値ではない。供試機関での CO 濃度の絶対値は、EWE 0.1 の場合で 1000ppm 程度であり、道路運送車両法の保安基準ではガソリン機関のアイドリング時の CO 規制値は 10000ppm となっており、EWE 0.1 の CO 濃度でも問題ないと考えられる。EWE 0.1 は乳化剤として粗グリセリンを用いてお

り、燃焼室内でグリセリンの熱分解によってアクロレインが形成され、排出されると考えられる。

図 9 に EWE 0.1、WME、軽油の熱発生率線図とニードルリフト線図を示す。ニードルリフト線図より噴射開始時期は EWE 0.1 が最も早く、噴射終了時期は WME と軽油はほぼ同時で、EWE 0.1 が最も遅くなっている。燃料の噴射時期や期間は、使用燃料の発熱量および粘度の違いによって異なり、高粘度で発熱量の最も低い EWE 0.1 は WME や軽油より噴

射期間が長くなっている。したがって、EWE 0.1 では分散相である水を除いた場合の燃料噴射率は小さくなり、早い噴射時期での低噴射率が燃料消費率の低減すなわち図 8 に示す正味熱効率 BTE の向上に寄与していると思われる。また、熱発生率曲線より EWE 0.1 では水の蒸発のため熱を奪われ着火遅れが長くなり、この間に乳化剤の熱分解によってアクロレインの生成が予測される。しかし、EWE 0.1 は予混合燃焼期の熱発生率の増大が顕著であるにもかかわらず、燃焼の終了時は WME、軽油の場合より早いことから燃焼期間は短縮し燃焼改善が図られている。

図 10 に EWE 0.1、WME および軽油を使用した場合の排ガス中のアクロレイン濃度を示す。現時点でアクロレインは自動車排ガス規制対象外であるが、第一種指定化学物質に指定されているので、排ガス中のアクロレイン濃度を測定することは今後とも重要なことであると思われる。いずれの負荷においても粗グリセリンを乳化剤としている EWE 0.1 では、WME、軽油の場合よりもアクロレインは高濃度である。しかし、アクロレイン濃度は負荷の増加とともに低くなり、負荷 100%での EWE 0.1、EWE 0.5 は WME および軽油の場合と同程度の低濃度となる。前述したように、アクロレインは主に熱分解により生成されると考えられるが、高負荷になると乳化剤としての粗グリセリンの大部分が燃焼されるため、WME および軽油と同程度の濃度になったと思われる。

4.3 噴霧燃焼特性の可視化による検討

ディーゼル機関の噴霧燃焼特性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。図 11 は試験用単気筒直噴式ディーゼル機関を使用して軽油、WME、EWE 0.1 の高速度燃焼写真を示す。撮影はピストン頭部の燃焼室底部をアクリルにし、ピストンの下方から噴霧燃焼状態を撮影速度 5000fps で行った。燃料は噴口径 0.23mm、8 個の噴射ノズルから噴射され、噴射開始時期は上死点前 3° (3° BTDC) で、噴射圧力は 100MPa である。噴射継続期間は、軽油がクランク角度で 20°、WME が 21°、EWE 0.1 が 24°である。

上死点后 5~15° (5~15° ATDC) での WME の火炎を見ると、噴霧火炎が燃焼室に衝突した点ですすの発生は軽油より少ない。EWE 0.1 の火炎は WME の火炎よりも、さらにすすの生成は少ない。

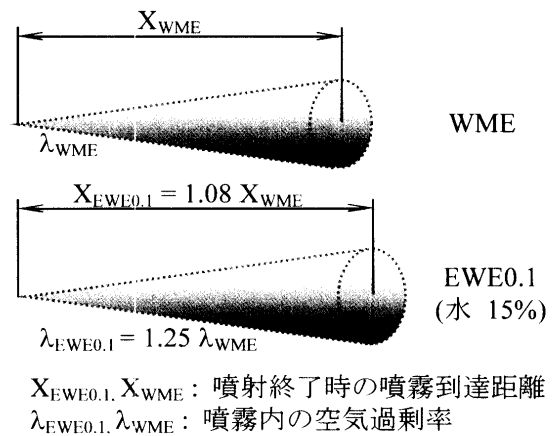


図-12 噴射終了時の噴霧形状

過濃な噴霧がピストンで冷却されたとき、すなわち噴霧の衝突箇所ですすは発生する。WME、EWE 0.1 は含酸素燃料であるため燃焼の改善が図られ、さらに EWE 0.1 は噴霧内の空燃比の増加すなわち空気との混合改善のためにすすの発生が少なくなったと考えられる。EWE 0.1 の場合、最も多くの燃料が噴射されるので、図 11 の 20° ATDC で軽油と WME はすでに噴射が終わっているのに対し、EWE 0.1 はまだ噴射されている。EWE 0.1 の噴射継続期間は長い、その燃焼は他の 2 つの燃料と同じく 30° ATDC でほとんど完了する。これは、EWE 0.1 の燃焼速度が他の燃料よりも速いということを意味する。燃焼改善への水の影響は、燃料噴霧の運動量理論⁷⁾によって説明することができる。図 12 に噴霧到達距離と噴射終了時の空気過剰率の計算結果を、WME と EWE 0.1 の場合について示す。噴霧形状は、噴霧の運動量によって生じる空気との混合によって形成されるので、EWE 0.1 は WME より大きな形になる。図より EWE 0.1 の噴霧形状は体積において WME より 25%大きく、そしてその事は質量で 25%多くの空気が噴霧に導入されていると考えられる。したがって、噴霧運動量の増加によって得られる噴霧中の高い空気過剰率により、EWE 0.1 の場合はすすの形成の減少と噴射終了後の燃焼速度の増大が起ると考えられる。

5. まとめ

廃棄物である廃食油をリサイクルの観点からディーゼル燃料として利用するために、廃食油メチルエステルと乳化廃食油メチルエステルに変換して高速ディーゼル機関と可視化ディーゼル機関に適

用して燃焼特性を検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 廃食用油メチルエステルおよび乳化廃食用油メチルエステルは軽油代替燃料として使用可能である。

(2) 廃食用油メチルエステルの排ガス中の排気煙および NOx 濃度は廃食用油の酸価の違いによってはほとんど変化しない。

(3) 乳化廃食用油メチルエステルは軽油、廃食用油メチルエステルの場合に比べて、より燃焼改善が図られ、排気煙、NOx 濃度の同時低減が可能である。

(4) 乳化廃食用油メチルエステルの乳化剤として粗グリセリンを用いる場合には、排ガス中のアクロレイン濃度の点から添加率は 0.5 %以下が望ましい。

参考文献

- 1) May, V.H., Hattingen, V., Theobald, J. und König, A., M TZ, 59-2, pp. 112-123(1998)
- 2) 浜崎和則, 大迫貴庸, 木下英二, 高崎講二, 日本機械学会論文集(B 編), 65-631, pp. 1146-1151(1999)
- 3) 日本植物油協会だより, 19 号, 日本植物油協会
- 4) 浜崎和則, 五反田健彦, 三ヶ島健次, 山本治郎, 日本機械学会講演論文集, No.998-1, pp. 151-152 (1999)
- 5) Hamasaki, K., Tajima, H., Takasaki, K. and Enomoto, M., SAE Paper No.2001-01-2021, pp. 1-6(2001)
- 6) 五十嵐脩, 島崎弘幸, 過酸化脂質・フリーラジカル実験方法, 学会出版センター, pp. 27-28(1995)
- 7) 和栗雄太郎, 藤井勝, 網谷竜夫, 恒屋礼二郎, 日本機械学会論文集(第 2 部), 25-156, pp. 820-826 (1959)