

排気ガス再循環システム付ディーゼルエンジンにおける 生物資源由来燃料の燃焼特性

位田晴良*・上嶋敏裕**・三好清隆**

Combustion Characteristic of Bio Fuel by Using Diesel Engine with Exhaust Gas Recirculation

Haruyoshi Ida, Toshihiro Uejima and Kiyotaka Miyoshi

The combustion process of diesel engines influences the generation of poisonous substances such as PM and NO_x. On the other hand, BDF (Bio Diesel Fuel) which has attracted attention as an alternative fuel containing a lot of oxygen promotes the combustion of diesel engines, hence the improvement of thermal efficiency and the decrease in the amount of PM exhaust can be expected. In this research, the combustion states were observed in the performance tests of the diesel engines with EGR (Exhaust Gas Recirculation) by using light oil and BDF. And the relation between the exhaust gas characteristics and the combustion characteristics was examined. As a result, the operating condition in which the combustion promotion by BDF was effective was clarified.

Keywords: Diesel Engine, Bio Diesel Fuel, Exhaust Gas Characteristic, Combustion Process

1. 緒言

ディーゼルエンジンの燃焼過程は、予混合燃焼、拡散燃焼、後燃えの順に経過し、熱効率向上、有害物質低減に大きく影響する。予混合燃焼においては、噴射された燃料が高温の空気と接触し、可燃混合気形成された箇所から自己着火するため、シリンダ内の圧力と温度は上昇し始めるが、燃料が噴射されてから燃焼が開始するまでに遅れが存在し、この着火遅れは排気ガスに含まれる有害物質の生成を左右する。燃料と空気の混合状況によっては着火遅れ期間が増大し、予混合燃焼における温度および圧力が急激に上昇する。NO_x（窒素酸化物）は燃焼温度が 1800K を超えるとその生成量が急増する。したがって、着火遅れに起因して予混合燃焼における燃焼温度が上昇することにより NO_x 排出量が増加することになる。拡散燃焼においては、予混合燃焼期間に継続して噴射される燃料が予混合燃焼で形成された高温雰囲気中で気化および空気との混合をほぼ同時に行いながら燃焼する。そのため、均一な燃焼が難しく PM（粒子状物質）が発生し易くなる。PM は、燃料が酸素不足により不完全燃焼を起こすと生成され、予混合燃焼において局所的に酸素不足となっても発生するが、拡散燃焼期間や、大半の燃料が燃焼した後に酸素濃度が低下する後燃え期間において多く発生する。

* 機械工学科 ** センター管理課

NO_xおよびPM排出量低減のためには、燃料と空気の混合が重要である。燃料と空気の混合を促進させるために噴射系を改善するなど、燃焼状態の最適化によりPM排出量の低減ができる。これと同時に予混合燃焼期間中の局所的な燃焼温度上昇に伴うNO_x生成も抑制できる⁽³⁾。しかし、良好な燃焼により燃焼温度は上昇し、やはりNO_x排出量は増加することになる。そのため、多くのディーゼルエンジンにはEGR（排ガス再循環）システムが導入されている。EGRは排ガスの一部を吸気系へ導入することにより、吸気中の酸素濃度を低減するとともに最高燃焼温度を低下させNO_xの低減を図るものである。しかし、一般にPMとNO_xの排出量はトレードオフの関係にあるため両方の同時低減が課題になっている。

一方、近年石油代替燃料として注目されているBDF（バイオディーゼル燃料）は、菜種油等の植物油および廃食用油を原料として製造されたディーゼル燃料である。植物油は軽油に比べて粘度が高く、潤滑や燃料噴射に適した粘度に下げることが必要である。その方法の一つがエステル交換反応である。これは、植物油の主成分である脂肪酸グリセリドにメタノールを反応させ、脂肪酸とグリセリンのエステル結合を脂肪酸とメタノールのエステル結合に転換させる方法である。この反応によって得られる脂肪酸メチルエステルがBDFである。BDFは生物資源由来の燃料であるためカーボンニュートラルであって、化石燃料に代替して使用することにより大気中のCO₂濃度低下に寄与する。また、BDFはその組成中に酸素を多く含むため、ディーゼルエンジンにおける燃焼過程に酸素との混合が促進され、燃焼改善によるPM排出量の低減とともに熱効率向上によるCO₂排出量の低減が期待できる^{(1),(2)}。

本研究では、排ガス中の有害成分低減および熱効率向上を目的とし、EGR付加ディーゼルエンジンにおいて軽油およびBDFを用いた性能試験を行い、有害物質の排出特性およびシリンダ圧力の変化から燃焼状態を把握することにより、BDFの燃焼特性およびBDFの使用が有効となる運転条件を明らかにする。

2. 小型ディーゼルエンジンによる性能試験

2.1 実験方法

実験装置は4サイクル単気筒ディーゼルエンジン（ヤンマー NFD170）および排ガス計測装置

Table 1 Specification of the diesel engine used in this work⁽⁴⁾

Engine type	Horizontal, water cooled, 4 stroke
Combustion chamber	Direct injection
Cylinder / Bore and stroke [mm]	Single / 102 × 105
Displacement [l]	0.857
Maximum power [kW] {PS} / Engine speed [min ⁻¹]	12.5 {17.0} / 2400
Compression ratio	17.8
Air charging	Naturally aspirated

(堀場製作所 MDLT-1300T) から構成される．軽油および BDF を用いてエンジン回転数を 1000 min^{-1} , 1400 min^{-1} , 1800 min^{-1} , 2200 min^{-1} とし，それぞれの回転条件において EGR 率(吸気中に混入する排ガスの体積割合)を $0\% \sim 50\%$

Table 2 Specification of light oil and BDF used as fuel^{(5),(6)}

Item	Light oil	BDF
Density (288K) [kg/m ³]	818	886
Kinematic viscosity(323K) [m ² /s]	1.80×10^{-6}	3.79×10^{-6}
Flash point [K]	325	428
Oxygen content [wt%]	0.26	11.24
Gross calorific value [kJ/kg]	46.0×10^3	39.9×10^3

に変更して行い，超微量 PM 分析装置 (堀場製作所 MEXA-1370PM) による PM 排出量の計測を行う．また，容積式流量検出器 (小野測器 FP-2140HA) による燃料消費量の計測および直挿形 NO_x 分析計による NO_x 濃度の計測を行い，これらの結果とシリンダ圧力ならびに熱発生率から燃焼状態を検討することにより，BDF の着火特性および BDF の使用が有効となる運転条件を明らかにする．

実験に用いたディーゼルエンジンの諸元，ジャパンエナジー製 2 号軽油および油籐商事製 BDF の主な性質をそれぞれ表 1, 表 2 に示す．表 2 より，BDF は軽油と比較すると，引火点は高く (着火点も高いと推測)，動粘度は大きく，総発熱量は小さく，酸素濃度が大きいことがわかる．

2.2 シリンダ圧力の計測

本研究では，燃料の着火時期および火炎伝播の状況を把握するために，圧力センサ (キスラー 6052C) によるシリンダ圧力の計測と，クランク角度検出システム (小野測器 PP-932, PA-500A) によるクランク角度の記録を行う必要がある．また，性能試験において使用を予定していた負荷装置はモータを用いる電気式であるが，予備実験を行った結果，通電時のインバータノイズの除去が非常に困難であった．したがって，クランク角度信号の正確な記録を優先して負荷装置を用いず，ほぼ無負荷での性能試験を行うことにした．運転時のエンジンは機械摩擦に相当する仕事をする事になり，検討に用いる出力は，シリンダ圧力を基に算出した図示出力である．この運転条件により，本研究の性能試験では負荷試験と比較すると燃料消費量が少ないため燃焼温度が低いことが予想される．この運転条件を考慮して着火特性の検討を行った．

3. 実験結果および考察

3.1 燃料消費率

性能試験の結果から，エンジン回転数が低い場合と高い場合の燃料消費率を図 1 に示す．これは，エンジン回転数 1000 min^{-1} , 2200 min^{-1} において軽油および BDF を使用した場合の EGR 率に対する燃料消費率の比較である．なお，表 2 に示すように，BDF は，軽油に比べて発熱量が低いいため，同じ運転条件を満たす熱量を発生する燃料の消費量が多くなる．そこで，燃費について軽油および BDF の発熱量の相違を考慮しながら，発熱量以外の性状が燃焼性に与える影響を比較するために，BDF の消費量に発熱量の比を乗じることにより，その差異を補正し，燃料消費率

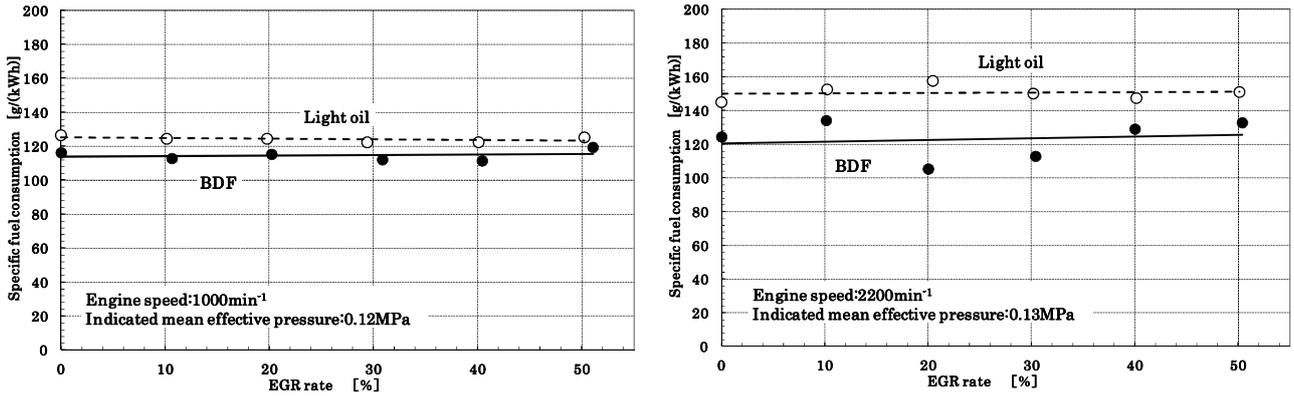


Fig.1 Variations of specific fuel consumption with EGR rate measured by using light oil and BDF for the engine speeds 1000min⁻¹ and 2200min⁻¹

の変化を求めた。これにより、熱効率の比較と同等の検討ができる。また、以下に示す図は、軽油使用時の傾向(破線)と BDF 使用時の傾向(実線)を併せて示し、それらと比較する。

図 1 より、回転数にかかわらず BDF 使用時の燃料消費率は軽油使用時の燃料消費率より低くなっており熱効率が高いといえ、含有酸素が燃焼を促進させた結果であると考えられる。また、EGR 率の変更に対しては、燃料消費率の若干の変動はあるものの、いずれの燃料を使用した場合においても大幅な燃費悪化は見られない。これは、供給燃料が少量である場合、排気ガスを還流しても不活性ガス濃度が低いため、燃費に大きく影響しないものと考えられる。

3.2 NO_x 濃度

エンジン回転数 1000min⁻¹、2200min⁻¹において軽油および BDF を使用した場合の EGR 率に対する NO_x 濃度の比較を図 2 に示す。これより、いずれの燃料においても EGR 率の上昇とともに NO_x 濃度は低下し、エンジン回転数の上昇によっても NO_x 濃度は低下することがわかる。これらは、不活性ガス導入量の増加および燃焼室における燃焼ガス滞留時間の短縮によるものである。また、BDF 使用時の NO_x 濃度は、軽油使用時より低くなっている。これは、BDF 中の含有酸素により着火遅れ期間が短縮し、予混合燃焼における急激な温度上昇が抑えられたことも考え

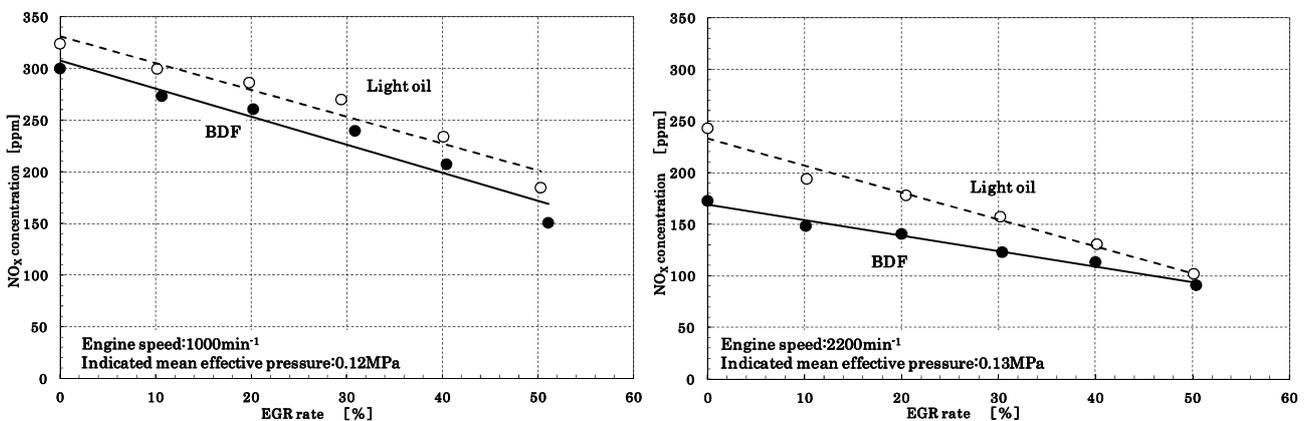


Fig.2 Variations of NO_x concentration with EGR rate measured by using light oil and BDF for the engine speeds 1000min⁻¹ and 2200min⁻¹

られるが、これまでの研究より、ある程度の負荷をかけた運転条件では BDF を用いると、含有酸素によって NO_x 濃度が軽油使用時よりも高くなることがわかっている（なお、負荷をかけても高 EGR 率で運転することにより軽油使用時と同程度まで NO_x 排出量は低減する）(7)。つまり運転条件が低負荷であることから燃焼温度が上昇せず良好な燃焼が行われていない可能性がある。

3.3 PM 排出量

エンジン回転数 1000min⁻¹、2200min⁻¹において軽油および BDF を使用した場合の EGR 率に対する PM 排出量の比較を図 3、PM に含まれる成分の比較を図 4 に示す。

図 3 より、1000min⁻¹においては、いずれの燃料使用時も EGR 率の上昇に対して、PM 排出量はある程度の増減はするものの顕著な増加は見られない。また、BDF 使用時は軽油使用時に比べて PM 排出量が高いことがわかる。これは、図 2 において BDF 使用時の NO_x 濃度が低い傾向にあることから良好な燃焼をしていないことが推測される。一方、2200min⁻¹における PM 排出量は、BDF 使用時はエンジン回転数 1000min⁻¹と比べて減少し、軽油使用時は EGR 率の上昇とともに増加することがわかる。これらについては次のように考察される。

エンジン回転数が上昇すると、燃料噴射から燃焼までの時間が短縮されるため、完全燃焼に不利な条件となる。そこに EGR によって不活性ガスが導入されると、軽油使用時のように EGR 率

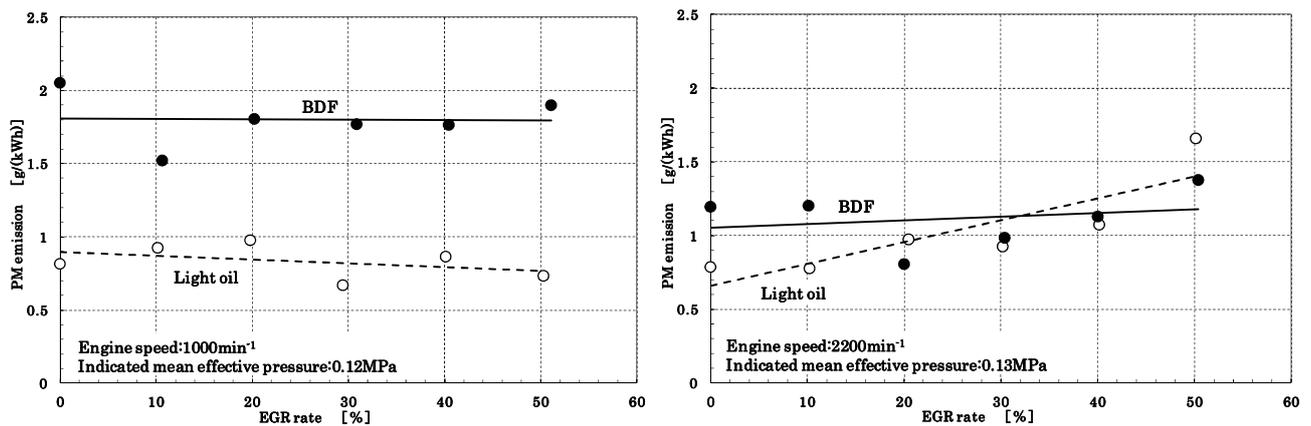


Fig.3 Variations of PM emission with EGR rate measured by using light oil and BDF for the engine speeds 1000min⁻¹ and 2200min⁻¹

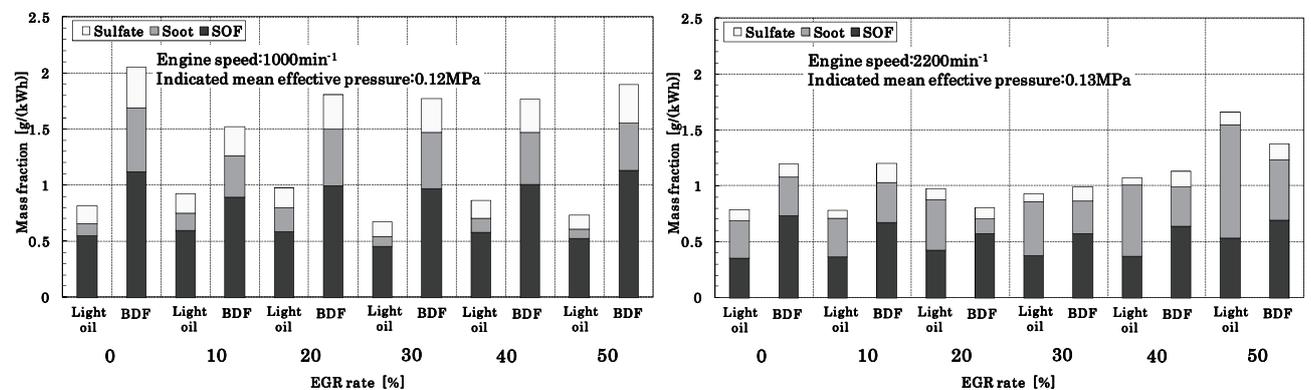


Fig.4 Variations of mass fraction of the sulfate, soot and SOF contained in PM with EGR rate measured by using light oil and BDF for the engine speeds 1000min⁻¹ and 2200min⁻¹

の上昇とともに PM 排出量が増加する。しかし、BDF 使用時は含有酸素が不完全燃焼を抑制するため PM 排出量の増加が見られないものと考えられる。

また、PM に含まれる成分は、硫黄酸化物 (Sulfate)、部分的に気化不十分となった燃料粒が火炎に曝され分離した炭素である煤 (Soot)、未燃焼の燃料やオイルなど有機溶剤可溶成分 (SOF : Soluble Organic Fraction) に大別される。一般に Soot が PM の大半を占め、PM 排出量に大きく影響するが、図 4 より、低負荷の運転条件であるため、いずれの燃料を使用した場合も SOF が多いことがわかる。しかし、BDF を使用した場合、エンジン回転数が 1000min^{-1} から 2200min^{-1} に上昇した場合に PM 排出量が低下する。これは PM に含まれる SOF が著しく減少するためであり、未着火の BDF が減少し燃焼状態が向上しているといえる。つまり、エンジン回転数が高い場合、動粘度の高い BDF を用いると短時間における微細な燃料噴霧の形成および拡散が困難であることが予想されるが、エンジン回転数の上昇に伴い吸気過流の攪拌効果が高くなり、燃料噴霧が微細化されるため、BDF の含有酸素が有効に働き、軽油使用時と同程度まで PM 排出量が減少することが考えられる。

3.4 シリンダ圧力

軽油および BDF の燃焼状態を確認するためにシリンダ圧力を測定した。EGR 率を 30% として、エンジン回転数 1000min^{-1} 、 2200min^{-1} において測定されたクランク角度に対するシリンダ圧力および熱発生率の関係を図 5 に示す。これより、いずれの運転条件においても BDF 使用時は軽油使用時よりもシリンダ圧力および熱発生率が低下することがわかる。これは軽油よりも BDF の発熱量が低いことが原因であると考えられるが、エンジン回転数が上昇するとその差が顕著になるのは、BDF の動粘度が高いため、熱発生時期が燃焼後期に移行した結果であると考えられる。

低負荷時は、軽油使用時と比較すると BDF 使用時の NO_x 濃度が低く PM 排出量が高いことから、未着火および不完全燃焼が発生していることが推測されたが、図 5 の低回転時の結果より、BDF は軽油よりも着火遅れが短いことが確認できる。これにより、急激な燃焼が抑制されて NO_x 濃度が低減していることも考えられる。また、軽油と比較して引火点が高いことから着火点も高

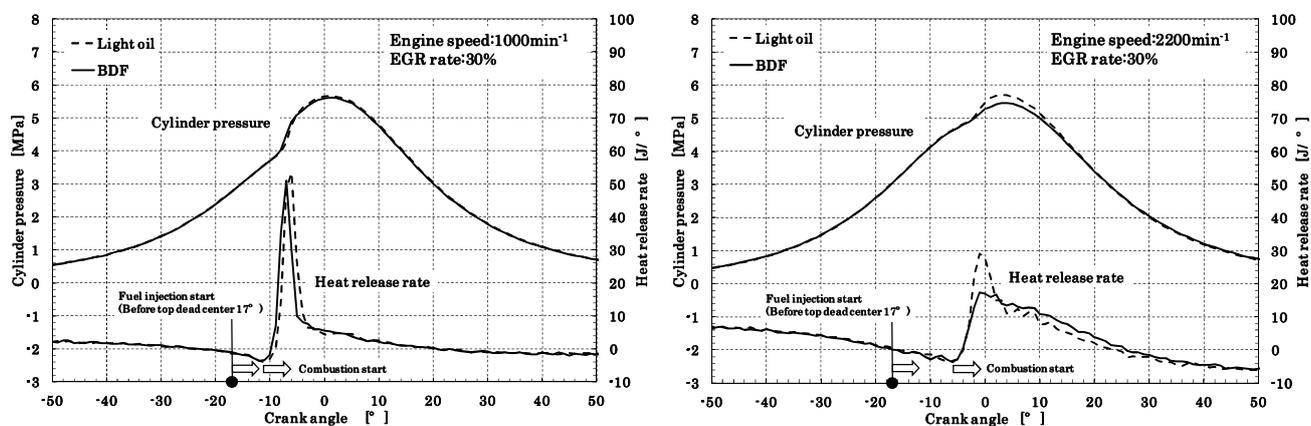


Fig.5 Variations of cylinder pressure and heat release rate with crank angle measured by using light oil and BDF for the engine speeds 1000min^{-1} and 2200min^{-1}

いと思われる BDF が先に着火することから、いずれの燃料も着火の温度条件は満たされていることがわかり、燃料と酸素の混合状態が着火特性を左右することが考えられる。さらにエンジン回転数が上昇した運転条件においても、BDF 使用時は良好な燃焼をしているといえないが、PM 生成に大きく影響するといわれる後燃え期間に熱発生率が高いことがわかる。一般に後燃え期間の熱発生率が上昇すると燃費が悪化する傾向にあるものの、酸素濃度が低下するこの期間に BDF が酸素を供給することによって PM 生成を抑制していることが考えられる。

3.5 ポリトロープ指数

BDF の使用および EGR の適用による断熱行程への影響を確認するために燃焼室容積に対するシリンダ圧力を図 6 に示す。図 6 では一つの例として、エンジン回転数 1000min^{-1} 、EGR 非適用時の実験結果を示している。また、図中で矢印が指す 2 箇所の直線とみなせる部分がそれぞれ断熱圧縮および断熱膨張に近いポリトロープ変化であり、この直線部分の傾きからポリトロープ指数を求めた。エンジン回転数 1000min^{-1} 、 2200min^{-1} において軽油および BDF を使用した場合の EGR 率に対するポリトロープ指数の関係を図 7 に示す。

ポリトロープ指数の検討においては、作動流体を空気（比熱比 $\kappa = 1.4$ ）と仮定した。圧縮行程および膨張行程のポリトロープ指数をそれぞれ n_c 、 n_e とするとき、 $n_c < \kappa$ 、 $n_e > \kappa$ ならば放熱、 $n_c > \kappa$ 、 $n_e < \kappa$ ならば吸熱を表す。図 7 より、エンジン回転数が低い場合は EGR 率の変更に対してポリトロープ指数の変化はほとんど見られず、燃料の違いによる差も僅かであることがわかる。

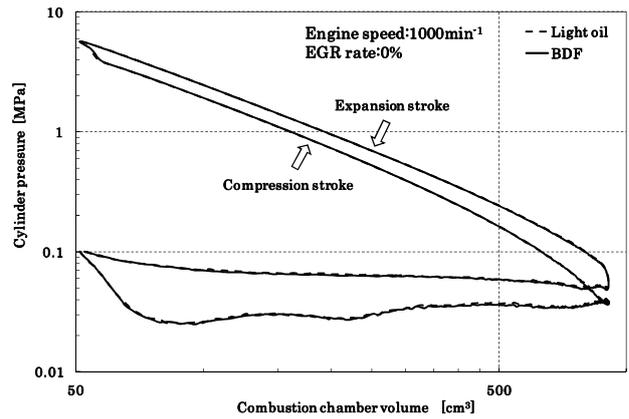


Fig.6 Variations of cylinder pressure with combustion chamber volume measured by using light oil and BDF for the engine speed 1000min^{-1}

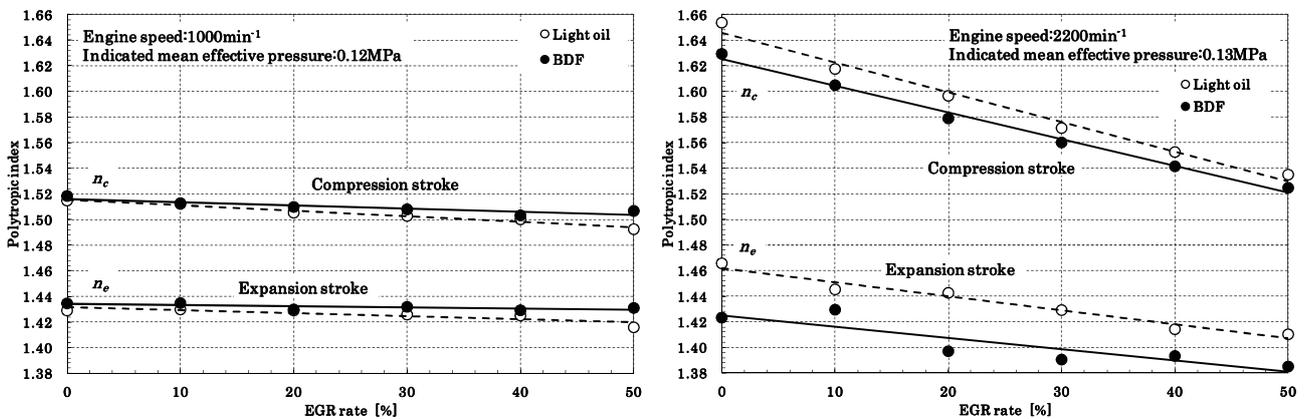


Fig.7 Variations of polytropic index with EGR rate measured by using light oil and BDF for the engine speeds 1000min^{-1} and 2200min^{-1}

低回転時と比較すると高回転時は、いずれの燃料を使用した場合も圧縮時にピストンやシリンダ壁等、エンジン部品からの熱伝達量が増加することがわかる。また、EGR率の上昇とともに予め吸気温度が上昇するためエンジン部品からの吸熱量が減少することが確認できる。軽油使用時よりもBDF使用時に圧縮時の吸熱量が減少するのは、BDFが良好な燃焼状態にないためエンジン部品の温度が上昇しないことが考えられる。さらに、軽油使用時よりもBDF使用した場合に膨張時の吸熱量が増加することから、膨張行程における温度低下が緩慢であることがわかる。これは図5にも示すように、BDF使用時は後燃え期間が増大することが影響しているといえる。

4. 結言

燃料に酸素を含むBDFに着目し、EGR付加ディーゼルエンジンにおいて軽油およびBDFを用いた性能試験を行った。この性能試験の負荷は極めて低く、高負荷運転時と比較すると供給熱量が小さく燃焼室温度が上昇しない。したがって、軽油よりも動粘度および引火点の高いBDFは良好な燃焼が期待できない。この条件において軽油使用時と比較し、BDFの燃焼特性およびBDFの使用が有効となる運転条件を検討した。その結果、低負荷条件におけるBDFの燃焼特性および排出ガス特性を把握し、BDF中の含有酸素による燃焼促進効果が、有害物質低減に有効となるエンジンの運転条件は、燃焼温度の上昇する高負荷運転ならびにBDFと空気の混合が促進される高回転運転であることが確認できた。また、BDFを用いた場合、軽油使用時よりも着火遅れ期間が短縮することや後燃え期間中の熱発生率が上昇することがわかり、軽油と違う燃焼特性を持つことが確認できた。これより、BDFの燃焼特性に適した噴射時期および噴射回数の適用により、BDFが有する燃焼促進効果および有害物質低減効果がさらに有効になる可能性がある。

参考文献

- (1) 池上詢, バイオディーゼル・ハンドブック(2006), p.7, 日報出版.
- (2) 小山成, “次世代バイオディーゼル燃料の開発”, 自動車技術, vol.61, No.11(2007), p.22.
- (3) 牧野茂雄, “ディーゼルエンジン第2章—基礎と最新技術—”, モータファン・イラストレーテッド, Vol.78(2013), pp.32-35.
- (4) ヤンマー株式会社編, ヤンマーディーゼルエンジンNF形シリーズ(2003), p.9, ヤンマー株式会社
- (5) 野田明, “バイオ液体燃料の内燃機関への適用における研究開発”, バイオ液体燃料(2007), p.482, NTS.
- (6) 島津テクノロジー, 測定分析結果報告書, 発行番号 KC-24895(2005).
- (7) 位田晴良, 上嶋敏裕, “生物資源由来ディーゼル燃料を用いた場合の排気ガス再循環システム付ディーゼルエンジンの特性”, 福井工業大学研究紀要, No.40(2010), pp.132-139.

(平成25年3月31日受理)