

BDF を用いた小型ディーゼルエンジンにおいて 燃料噴射時期が運転特性に及ぼす影響*

位田 晴良^{*1}, イスラム ナイム アル^{*1}, グエン ゴック アン^{*1}, ネットペン スピサラ^{*1}

Effects of Fuel Injection Timing on Operation Characteristics of Small Diesel Engines with EGR Using BDF

Haruyoshi IDA^{*1}, ISLAM NAIM AL^{*1}, NGUYEN NGOC AN^{*1}, and Suphissara NETPHENG^{*1}

^{*1} Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering

The biofuel used in diesel engines (BDF) has a higher kinematic viscosity and ignition point than gas oil. Therefore, it is considered to be disadvantageous for fuel injection systems. The purpose of the study we conducted was to understand the effects of oxygen in fuel in the combustion process of diesel engines. To this end, engine performance testing using BDF and gas oil was performed. As a result, although there was a difference in the exhaust gas characteristics between using gas oil and using BDF, the brake thermal efficiencies of both were the same. Therefore, there is a possibility that the differences in combustion conditions during the combustion period do not significantly affect the engine output generation. This study conducted a performance test of changing the fuel injection timing using gas oil and BDF in a small diesel engine, confirming the effects of fuel ignitability on the ignition delay.

Key Words : Diesel Engine, Bio Diesel Fuel, Fuel injection timing, Operating Characteristics

1. 緒 言

生物資源由来のディーゼル燃料 (Bio Diesel Fuel, 以下 BDF) は, 軽油と比較すると酸素含有率が高い. しかし, 動粘度および着火点は高いため, エンジンにおいて微細な噴霧の形成および速やかな着火が求められる燃料噴射には不利であるといえる. これまでの研究では, BDF の含有酸素がディーゼルエンジンの運転特性に及ぼす影響を把握するため, 軽油と BDF を用いて排ガス再循環 (Exhaust Gas Recirculation, 以下 EGR) を適用したディーゼルエンジンによる性能試験を行った. その結果, 正常運転が可能な空気過剰率である場合, BDF は排ガスの酸素含有率を上昇させ, これに伴い EGR 適用時の吸気の酸素含有率も上昇させることから NO_x 濃度および PM 排出量に影響するが, 軽油使用時の正味熱効率との差は小さいことからエンジンの出力発生に著しく影響しない燃焼過程において酸素が作用しているものと推測した⁽¹⁾. そこで本研究では, 使用燃料の含有酸素が着火遅れに与える影響を確認することを目的として, 小型ディーゼルエンジンにおいて軽油および BDF を用い, 着火条件を変化させるために燃料噴射開始時期を変更する性能試験を実施した.

2. 実験方法

実験装置は, コモンレール式燃料噴射装置 (FC デザイン製) を導入したディーゼルエンジン (ヤンマー製 NFD170) および排ガス計測装置から構成される.

性能試験に用いるディーゼルエンジンの諸元を Table 1 示す. Table 1 に示すように排気量 857cm³ の水冷 4 サイクル単気筒ディーゼルエンジンを用いる. エンジン回転数 2200min⁻¹, 燃料噴射圧力を 200MPa に設定し, 燃料噴

* 原稿受付 2023 年 4 月 28 日

^{*1} 工学部 機械工学科

E-mail: h-ida@fukui-ut.ac.jp

射開始時期を圧縮上死点前 $37^{\circ} \sim 22^{\circ}$ (圧縮上死点を 0° とするクランク角度で $-37^{\circ} \sim -22^{\circ}$, 以下 BTDC $37^{\circ} \sim 22^{\circ}$) の範囲で 5° 毎に変更し、軽油および BDF を使用した場合の運転特性を比較する。また、吸気中の酸素濃度が着火遅れに及ぼす影響を把握するため EGR 率 (吸気中に混合する排ガスの体積比率) を定常運転が可能な範囲内 (概ね $0 \sim 50\text{vol}\%$) で変更する。なお、燃料噴射開始時期および EGR 率を変更した場合においても定常運転を可能とするため、正味平均有効圧力 0.24MPa となる負荷 (定格出力の 30%) に設定する。

性能試験においては、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を行い、正味熱効率を求める。エンジンの排ガスに含まれる NO_x 濃度は直挿形 NO_x 分析計 (堀場製作所 MEXA-120 NO_x) により計測する。HC 濃度は自動車排気ガス複合測定器 (安全自動車 ZKE) により計測を行う。PM はマイクロダイリユーシオントンネル (堀場製作所 MDLT-1302T) によりフィルタに採取し、採取した PM は超微量 PM 分析装置 (堀場製作所 MEXA-1370PM) により、主成分である SOF, Soot, Sulfate の重量が分離測定され、PM 排出量が求められる。これらの結果より使用燃料の含有酸素が着火遅れに及ぼす影響を把握する。

本研究において用いた軽油 (ジャパンエナジー製 JIS2 号軽油) および BDF (油籐商事製) の主な性状を Table 2 に示す。Table 2 より、BDF は軽油と比較すると比重、動粘度、発火点および酸素含有率は高く、総発熱量は低いことがわかる。

Table 1 Specifications of diesel engine used in performance examination⁽²⁾

| | | |
|---|--|------|
| Engine type | Horizontal, water cooled, 4 stroke-cycle | |
| Combustion chamber | Direct injection (troydal type) | |
| Cylinder / Bore and stroke [mm] | Single / 102×105 | |
| Displacement [cm^3] | 857 | |
| Maximum power [kW] / Engine speed [min^{-1}] | $12.5 / 2400$ | |
| Compression ratio | 17.8 | |
| Air charging | Naturally aspirated | |
| Injection nozzle (According to a survey by FC Design Co. Ltd.) | Hole number | 5 |
| | Hole diameter [mm] | 0.12 |
| | Cone angle between holes [$^{\circ}$] | 150 |

Table 2 Specifications of gas oil and BDF used as experimental fuel⁽³⁾

| Item | Gas oil | BDF |
|--|-----------------------|-----------------------|
| Density (288K) [g/cm^3] | 0.82 | 0.88 |
| Kinematic viscosity (303K) [m^2/s] | 3.95×10^{-6} | 6.52×10^{-6} |
| Ignition point [K] | 507 | 522 |
| Oxygen content [wt%] | 0.10 | 10.7 |
| Gross calorific value [kJ/kg] | 45.6×10^3 | 39.5×10^3 |

3. 実験結果および考察

3.1 正味熱効率

性能試験の結果より、EGR 率 0% , 20% において軽油および BDF を用いて燃料噴射開始時期を変更した場合の正味熱効率を Fig. 1, 同様に EGR 率 40% , 50% における結果を Fig. 2 に示す。Fig. 1, Fig. 2 より、EGR 率が高くなると正味熱効率の上昇が見られ、吸気温度の上昇による着火促進であると考えられる。また、燃料噴射開始時期を変更した場合、同じ運転条件における軽油使用時と BDF 使用時の正味熱効率の差は僅かであることが確認

できるが、BDF 使用時は BTDC27° において最も正味熱効率が高くなる。これは BDF の有する性状に対してピストンの位置および燃焼室形状の作用が最適となる燃料噴射開始時期が BTDC27°であるといえ、EGR 適用による着火促進に伴い正味熱効率の上昇が顕著になったものと考えられる。さらに BDF 使用時の燃料噴射開始時期を遅角すると正味熱効率は低下するが、貫通力の高い BDF の燃料粒がピストン頂部に衝突する量が増加するためであると考えられる。一方、軽油使用時は燃料噴射開始時期を遅角するほど正味熱効率は上昇し、本実験条件において最も遅角した BTDC22° よりもさらに遅角した燃料噴射開始時期において最も正味熱効率が高くなるものと推察される。BDF と比較すると軽油は密度および動粘度が小さく、燃料噴霧の微細化および拡散性に優れているが燃料粒を燃焼室最遠部まで到達させるための貫通力は低いといえる。したがってピストン位置すなわち燃焼室形状による渦流の作用が最適となるのは、燃料噴射開始時期を BDF 使用時よりも遅角した場合であり、すなわちインジェクタとピストンが更に近づくクランク角度であるといえる。これより、使用燃料毎に正味熱効率が最高となる燃料噴射開始時期は異なるため、同じ運転条件であっても各々最適な燃料噴射開始時期に設定する必要があるといえる。

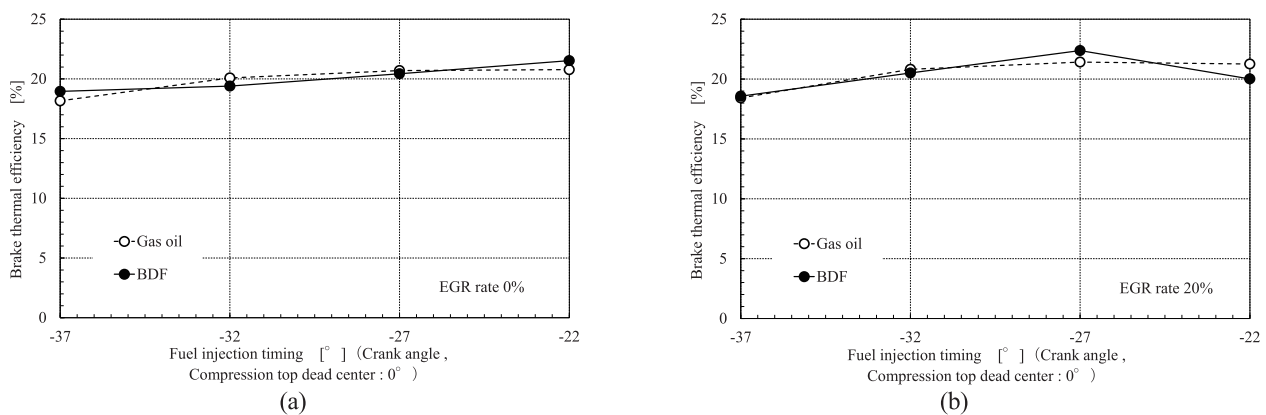


Fig.1 Variations of brake thermal efficiency with fuel injection timing measured by using gas oil and BDF at EGR rate 0% (a) and 20% (b)

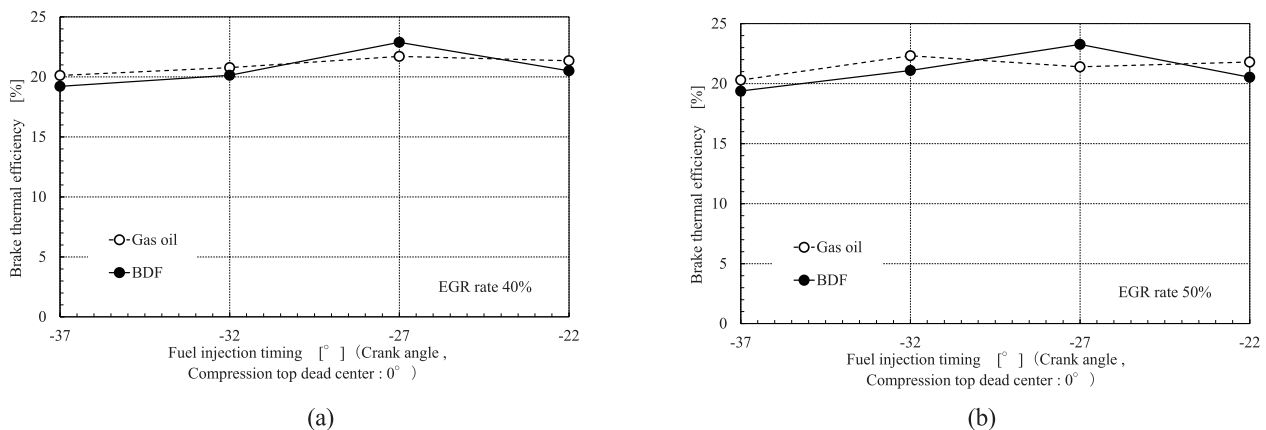


Fig.2 Variations of brake thermal efficiency with fuel injection timing measured by using gas oil and BDF at EGR rate 40% (a) and 50% (b)

3.2 NO_x 濃度

性能試験の結果より、EGR 率 0%、20%において軽油および BDF を用いて燃料噴射開始時期を変更した場合の NO_x 濃度を Fig. 3、同様に EGR 率 40%、50%における結果を Fig. 4 に示す。Fig. 3、Fig 4 より、いずれの燃料使用時も EGR 率の上昇に伴う吸気中の酸素濃度低下により NO_x 濃度は低減することが確認できる。また、燃料噴射開始時期の遅角とともに燃焼が緩慢になり NO_x 濃度は低減することが確認できる。一方、軽油使用時と比較す

ると BDF 使用時の NO_x 濃度は燃料噴射開始時期に関係なく若干上回り、BDF の含有酸素による作用であると考えられるが、BTDC22° においては軽油使用時の NO_x 濃度が上回る。これは前述 (3.1 節) のとおり、BDF よりも密度および動粘度が小さい軽油使用時の燃料噴霧に対して、燃焼室形状による渦流の作用が最適となるピストン位置に近づく結果であると考えられる。

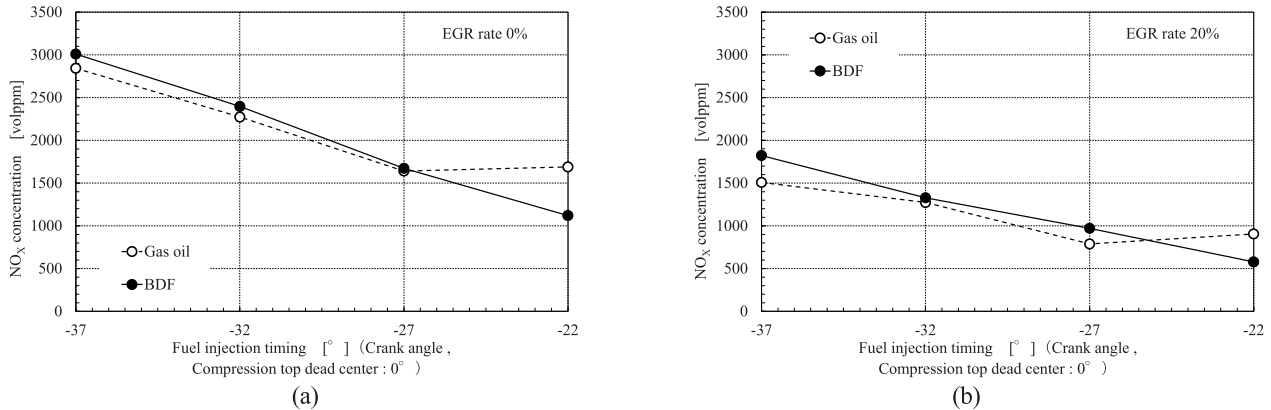


Fig.3 Variations of NO_x concentration in exhaust gas with fuel injection timing measured by using gas oil and BDF at EGR rate 0% (a) and 20% (b)

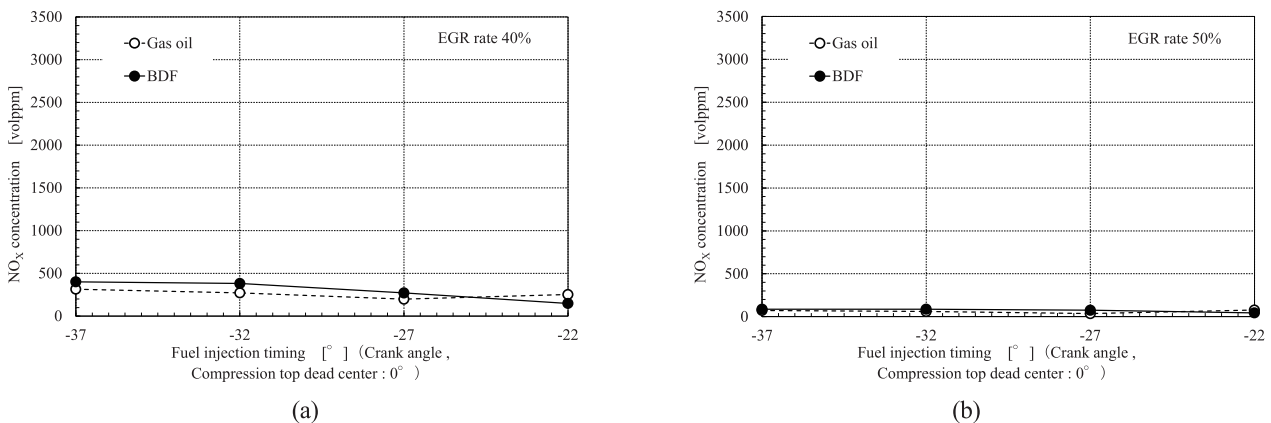


Fig.4 Variations of NO_x concentration in exhaust gas with fuel injection timing measured by using gas oil and BDF at EGR rate 40% (a) and 50% (b)

3.3 PM 排出量

性能試験の結果より、軽油を用いて EGR 率 0%および 40%において燃料噴射開始時期を変更した場合の PM に含まれる SOF, Soot, Sulfate の質量を Fig. 5, 同様に BDF を用いた場合の結果を Fig. 6 に示す。なお、EGR 率 50% においては PM 排出量の増加により採取用フィルタが破れることから正確な計測ができなかった。Fig. 5, Fig 6 より、いずれの燃料使用時も EGR 率の上昇に伴う吸気中の酸素濃度低下により PM 排出量は増加することが確認できる。さらに同じ運転条件の多くの場合において軽油使用時よりも BDF 使用時の PM 排出量は少なく、とくに吸気中の酸素濃度が低下する EGR 率 40%においては Soot の低減が見られ、BDF の含有酸素の効果であると考えられる。また、いずれの燃料使用時も Sulfate はほぼ検出されず、燃料噴射開始時期の変更によって SOF および Soot の量は増減するが、燃料噴射開始時期と PM 排出量に明確な相関は確認できない。しかし、排ガス流量が多い EGR 率 40%において、軽油使用時は燃料噴射開始時期が BTDC22° の場合に PM 排出量の低減が見られる。また、BDF 使用時は燃料噴射開始時期が BTDC27°の場合に PM 排出量の低減が見られ、他の燃料噴射開始時期と比較すると SOF が減少していることがわかる。これらの傾向は前述 (3.1 節) のとおり、使用燃料の性状によってピストン位置が最適となる燃料噴射開始時期は異なることが影響しているものと考えられ、EGR により吸気

温度が上昇したため顕著になった可能性がある。とくに BDF は密度および動粘度が大きく燃料粒の貫通力は高いため、燃料噴射開始時期によっては燃料粒がピストン頂部に衝突することにより、SOF は増加することが考えられるが、燃料噴射開始時期 BTDC37° や BTDC32° の場合よりも燃料噴射時のインジェクションノズルとピストンとの距離が小さい BTDC27°において SOF は減少することから、燃焼室形状の作用であると考えられ、やはり使用燃料毎に最適な燃料噴射開始時期に設定する必要があるといえる。

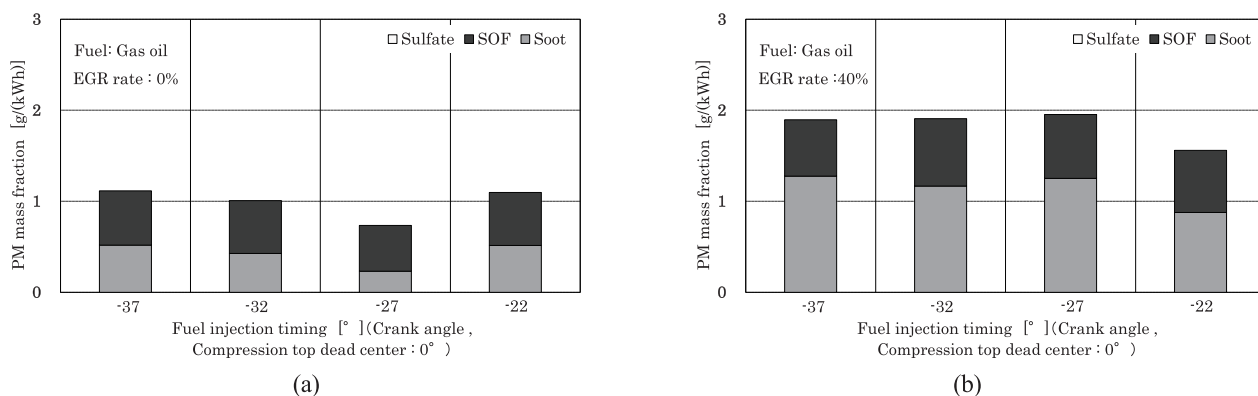


Fig.5 Variations of PM emission in exhaust gas with fuel injection timing measured by using gas oil at EGR rate 0% (a) and 40% (b)

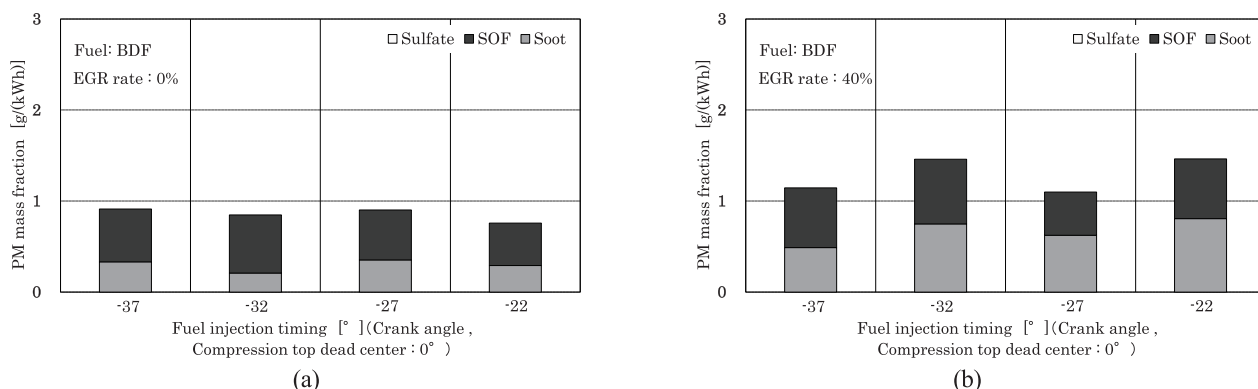


Fig.6 Variations of PM emission in exhaust gas with fuel injection timing measured by using BDF at EGR rate 0% (a) and 40% (b)

3.4 熱発生率

性能試験の結果より、EGR 率 0%において軽油および BDF を用いて燃料噴射開始時期を BTDC37°および BTDC22°とした場合の熱発生率の変化を Fig. 7, 同様に EGR 率 50%の場合の結果を Fig. 8 に示す。なお、熱発生率の算出に用いたシリンダ圧力は実験条件との整合性が不十分であり誤差が大きいと判断したため、着火時期についてのみ考察する。Fig. 7 より、EGR 率 0%において燃料噴射開始時期を BTDC37°とした場合、軽油使用時と比較すると BDF 使用時の着火遅れは小さいが、BTDC22°とした場合軽油使用時の着火遅れが小さくなる。これも前述 (3.1 節) のとおり、使用燃料毎に最適な燃料噴射開始時期が異なるためであるといえる。また、Fig. 8 より、EGR 率 50%において、いずれの燃料使用時も燃料噴射開始時期を遅角させると着火遅れが小さくなるが、その変化は BDF 使用時の方が小さい (15°の遅角に対し軽油使用時は約 11°, BDF 使用時は約 6°の短縮)。この傾向は Fig. 7 より、EGR 率 0%においても見られ (15°の遅角に対し軽油使用時は約 9°, BDF 使用時は約 6°の短縮)、BDF の含有酸素が着火遅れの増大を抑制すること、あるいは BDF 使用時の燃料噴霧に対する燃焼室内の渦流の作用が小さいことが考えられ、これらの影響により燃料噴射開始時期の変更に対する着火遅れの変化が小さくなっている可能性がある。ただし、着火遅れの変化と正味熱効率、NO_x濃度および PM 排出量の変化に明確な相関は確認できなかった。

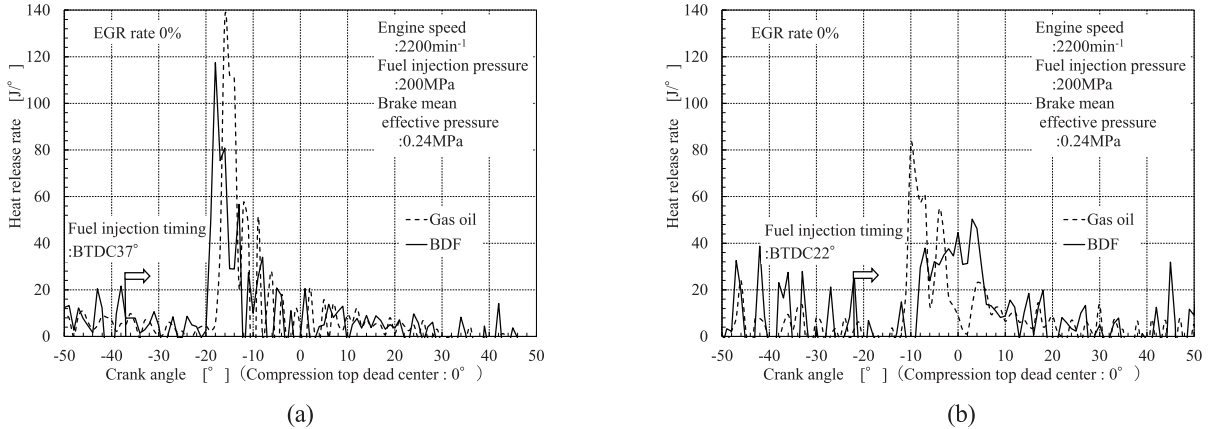


Fig.7 Variations of heat release rate with crank angle measured by using gas oil and BDF with EGR rate set to 0% at fuel injection timing BTDC37° (a) and BTDC22° (b)

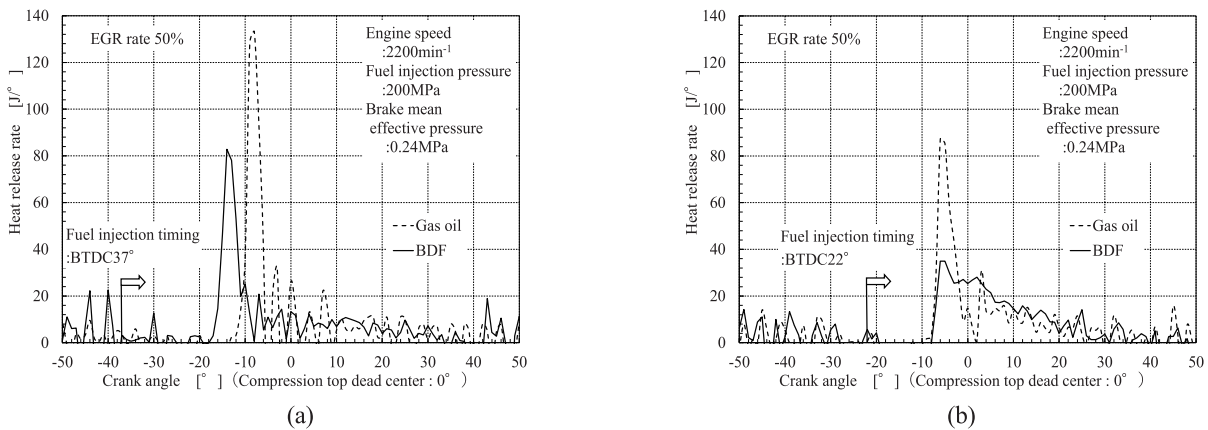


Fig.8 Variations of heat release rate with crank angle measured by using gas oil and BDF with EGR rate set to 50% at fuel injection timing BTDC37° (a) and BTDC22° (b)

4. 結 論

使用燃料の含有酸素が着火遅れに与える影響を確認するために小型ディーゼルエンジンにおいて軽油およびBDFを用いて燃料噴射開始時期を変更する性能試験を実施した. その結果, 正味熱効率の推移より, 燃料性状の差異が燃焼状況に影響を及ぼすことを確認したが, 密度および動粘度の影響である可能性があり, 燃料噴射開始時期を変更しても軽油使用時とBDF使用時の正味熱効率は概ね同等であることからBDFの含有酸素による作用は確認できなかった. 一方, NO_x濃度, PM排出量および熱発生率の推移より, やはり燃料の密度および動粘度の影響と考えられる傾向が確認されたが, BDFの含有酸素による作用であると考えられる変化も見られた. これらの結果より, 使用燃料毎に最適な燃料噴射開始時期に設定する必要があるといえるが, 正味熱効率, NO_x濃度およびPM排出量の変化と着火遅れの変化に相関は見られず, 使用燃料の含有酸素が着火に与える影響を明らかにするには至らなかった.

文 献

- (1) 位田晴良, グエンアインダオ, “ディーゼルエンジンにおける吸気の含有酸素および燃料の含有酸素が運転特性に及ぼす影響”, 福井工業大学研究紀要第52号 (2022), pp.1-6.
- (2) 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.
- (3) 日本エネルギー学会分析室, 報告書, 分試第27-020~21(2016).

(2023年8月3日受理)