

BDF を用いたエンジンの燃料噴射圧力が排ガス特性に及ぼす影響*

位田 晴良^{*1}, 宮下 蔵太^{*2}

Effects of Fuel Injection Pressure on Exhaust Gas Characteristics of Engines Using BDF

Haruyoshi IDA^{*1} and Kurata MIYASHITA^{*1} Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering

Bio diesel fuel (BDF) used in diesel engines has a higher oxygen content than gas oil. In previous studies, performance tests using BDF in small diesel engines showed that that increased PM emissions are suppressed under conditions of reduced oxygen concentration. Elsewhere, the kinematic viscosity of BDF is higher than that of gas oil, which is considered to be disadvantageous for rendering the fuel spray finer. This study compared the effects on thermal efficiency and exhaust gas of changing the fuel injection pressure, which affects finer fuel spray, in a diesel engine using gas oil and BDF. The study found that the difference in operating characteristics depending on the fuel used is reduced when the fuel injection pressure is increased to 200 MPa. However, at lower fuel injection pressures, the exhaust gas component deterioration is suppressed when using BDF.

Key Words : Bio Diesel Fuel, Diesel Engine, Fuel Injection Pressure, Exhaust Gas 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 CO₂ 増加を抑制する石油代替燃料として有望視されている。この BDF が広く利用されるためには、軽油を燃料とした場合と比較して熱効率が低下しないことや PM 等の有害物質の排出量が増加しないことが必要である。BDF の特徴として、動粘度が大きく微細な噴霧が形成され難いという欠点があるものの、10%程度の酸素原子を含んでおり、ディーゼルエンジンにおける燃焼過程でその含有酸素が燃焼促進に寄与することになる。これまでの研究より、小型ディーゼルエンジンにおいて BDF を用い、燃料噴射圧力を 60MPa として性能試験を行った結果、酸素濃度が低下する燃焼条件 (高負荷時, EGR 適用時) において軽油使用時よりも PM 排出量の増加は抑制されることがわかった⁽¹⁾。

一方、BDF を使用すると燃料系統において閉塞や摺動部の固着、樹脂部品の劣化等の不具合が生じる可能性があるとして留意が必要であり⁽²⁾、とくに緻密な制御が求められるコモンレール式燃料噴射装置において BDF の使用が普及しているとはいえない。しかし、200MPa 以上の高圧燃料噴射が可能なコモンレール式燃料噴射装置を用いることにより、BDF においても噴霧の微細化を促進することができ、含有酸素による燃焼促進との相乗効果も期待できる。そこで本研究では、BDF を用いたディーゼルエンジンにおいて、燃料噴霧の微細化を左右する燃料噴射圧力の変更が排ガス特性に及ぼす影響の把握を目的として性能試験を実施する。

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。

* 原稿受付 2021 年 4 月 27 日

^{*1} 工学部 機械工学科

^{*2} 小野谷機工株式会社 (〒915-0801 福井県越前市家久町 63-1)

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

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の横型水冷 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, 負荷 (正味平均有効圧力) 0.36MPa とし, 燃料噴射圧力を 60MPa, 100MPa, 150MPa, 200MPa に設定し, 軽油および BDF を使用した場合の熱効率および排ガス特性を比較する。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 (油藤商事製) 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量は高く, 総発熱量は低いことがわかる。

また, 燃料噴射圧力の変更に伴い, 最適な燃料噴射開始時期は変化することが考えられるため, 燃料噴射開始時期の変更も実施し熱効率および排ガス特性の変化を調査する。燃料噴射開始時期は, 上記エンジン回転数および負荷を維持し, かつ最高燃焼圧力が 10MPa を超えない範囲とし, 概ね上死点前 17° ~42° (BTDC17° ~42°, 圧縮上死点を 0° とするクランク角度) に変更する。

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-120NO_x) により計測する。さらに CO 濃度および 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。また, 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。これらの結果を各燃料使用時において比較することにより, BDF を使用した場合の燃料噴射圧力の影響を把握する。

Table 1 Specifications of diesel engine used in performance examination⁽³⁾

Engine type	Horizontal, water cooled, 4 stroke-cycle	
Combustion chamber	Direct injection (trotydal 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 [°]	150

Table 2 Specifications of gas oil and BDF used as experimental fuel⁽⁴⁾

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, 各燃料を用いて燃料噴射圧力および燃料噴射開始時期を変更した場合に, 設定したエンジン回転数を維持でき, かつ最高燃焼圧力が過剰に高くならなかつた運転条件における正味熱効率の変化を Fig. 1

に示す。Fig. 1 より、軽油使用時と比較すると発熱量の低い BDF 使用時の正味燃熱効率が低いことがわかる。これは BDF の含有酸素が燃焼を促進させた結果であると考えられるが、燃料噴射圧力の変更に対しては、いずれの燃料使用時も正味熱効率は大きく変化しないことがわかる。

また、本研究の運転条件においては、燃料噴射圧力を 100MPa 以上に上昇させても正味熱効率への影響はほとんどないといえるが、燃料噴射開始時期が BTDC22° の場合、燃料噴射圧力を 60MPa とすると、いずれの燃料使用時においても正味熱効率は低下することが分かる。これは、燃料噴射圧力の低下に伴う燃料粒径の拡大および燃焼時期の遅角により、出力に寄与する燃焼期間での熱発生量が減少し後期燃焼期間が増大するためであると考えられる。したがって、燃料噴射開始時期 BTDC22° の場合、燃料噴射圧力を低下させると正味熱効率が大きく低下することから正常な運転状況ではないといえ、本研究において最も正味熱効率が高くなる運転条件は、燃料噴射開始時期 BTDC27°~32° 付近であると判断し、以降はこれらの燃料噴射開始時期とした場合の結果を示す。

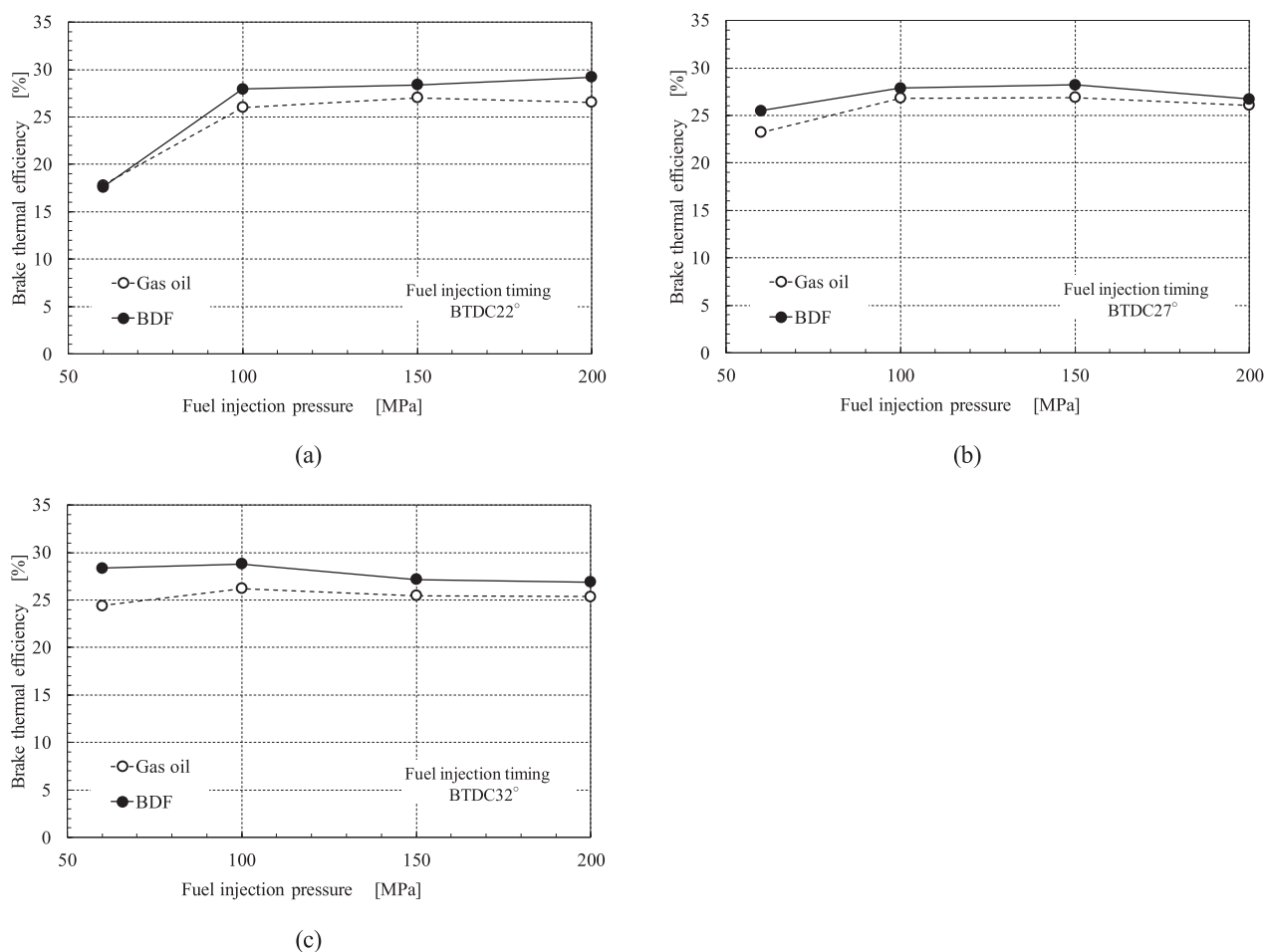


Fig.1 Variations of brake thermal efficiency with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF at fuel injection timing BTDC22° (a), BTDC27° (b) and BTDC32° (c)

3.2 NO_x濃度

各燃料を用いて燃料噴射圧力を変更した場合の排ガス中の NO_x 濃度の変化を Fig. 2 に示す。Fig. 2 より、燃料噴射圧力を上昇させると、いずれの燃料使用時も NO_x 濃度は上昇することがわかり、燃料噴射圧力の上昇に伴う燃料噴霧の微細化により燃焼が促進されているといえる。また、燃料噴射圧力を上昇させると、いずれの燃料噴射開始時期とした場合も軽油使用時と BDF 使用時の NO_x 濃度に差が出る事が分かる。これは、動粘度が高く燃料噴霧の微細化に不利な BDF であっても、燃焼が促進される条件において含有酸素の効果が顕著になるものと考えられる。

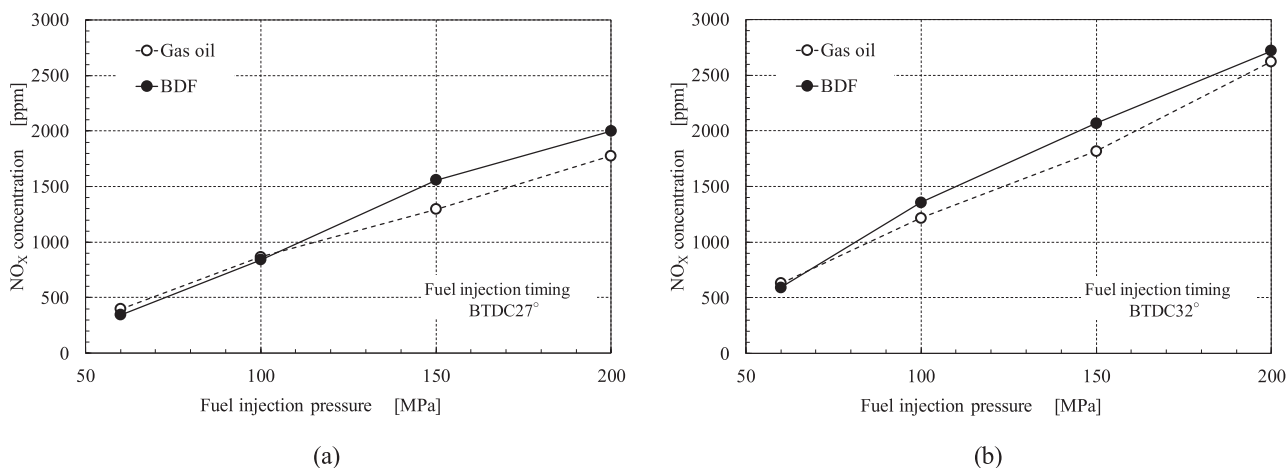


Fig.2 Variations of NO_x concentration with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF at fuel injection timing BTDC27° (a) and BTDC32° (b)

3.3 CO 濃度

各燃料を用いて燃料噴射圧力を変更した場合の排ガス中の CO 濃度の変化を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、燃料噴射圧力を 100MPa 以上に上昇させると、いずれの燃料噴射開始時期とした場合も CO 濃度は低下し使用燃料の違いによる差は僅かであることがわかる。これは、燃料噴射圧力の上昇に伴い良好な混合気形成されているといえる。また、燃料噴射圧力が低下すると、CO 濃度は上昇するが、BDF 使用時の CO 濃度は軽油使用時を下回ることがわかる。これは、燃料噴霧が微細化されにくく混合気形成は困難になるものの、BDF 使用時は燃料中の含有酸素により不完全燃焼が抑制されるものと考えられる。

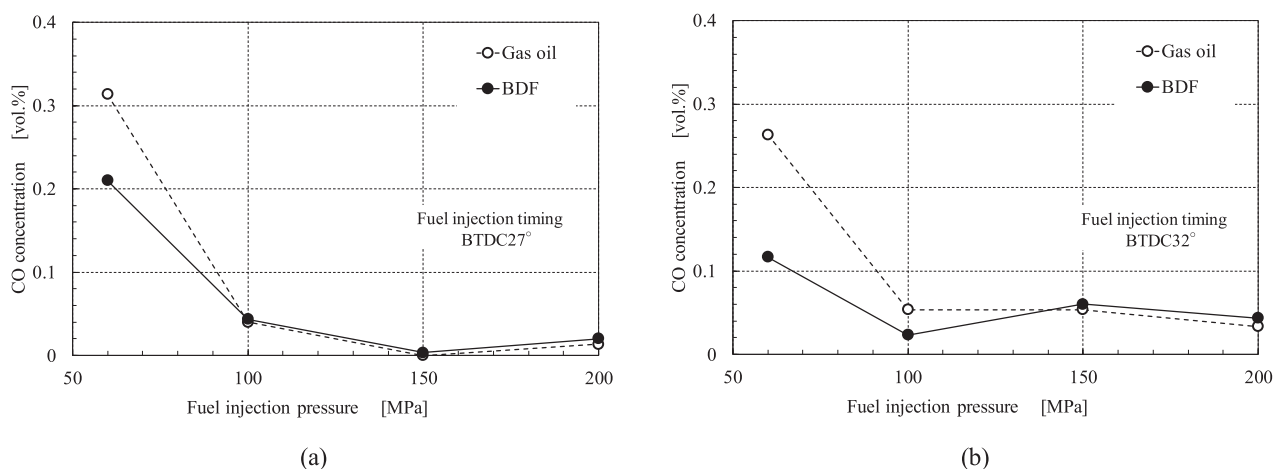


Fig.3 Variations of CO concentration with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF at fuel injection timing BTDC27° (a) and BTDC32° (b)

3.4 HC 濃度

各燃料を用いて燃料噴射圧力を変更した場合の排ガス中の HC 濃度の変化を Fig. 4 に示す。Fig. 4 より、いずれの燃料噴射開始時期とした場合も軽油使用時に燃料噴射圧力を 60MPa から上昇させると 100MPa, 150MPa において HC 濃度が上昇することがわかる。これは燃料噴射圧力の上昇に伴いピストン等に付着し未燃焼となる燃料が増加するためであると考えられ、供試エンジンに対してインジェクタが適合していないといえる。ただし、燃料噴射圧力を 200MPa に上昇させると HC 濃度は低下し、この場合、軽油噴霧の微細化により未燃焼燃料が低減したのと考えられる。一方、軽油使用時と比較すると BDF 使用時の HC 濃度は低く、圧力の変更に対してもその変化は小さいことがわかる。これは、BDF 使用時は噴霧粒径の拡大やエンジン部材への燃料の付着等があっても含有酸素が燃料の未燃焼を抑制するものと考えられる。すなわち、燃料噴射圧力を変更した場合、軽油使用時は

燃料噴射圧力を 200MPa に上昇させると動粘度の低さから噴霧の微細化が促進され燃料の未燃焼を抑制しており、BDF 使用時は含有酸素が燃料の未燃焼を抑制するといえるが、BDF 使用時は燃料噴射圧力の影響が小さいことから、HC 濃度の低減において含有酸素と噴射圧力の高圧化による相乗効果は確認できないといえる。

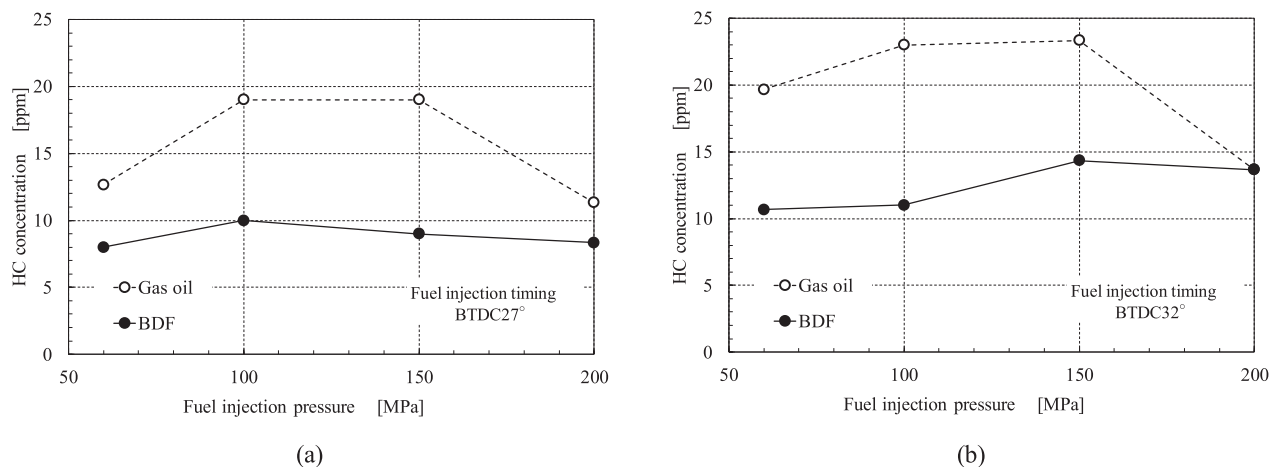


Fig.4 Variations of HC concentration with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF at fuel injection timing BTDC27° (a) and BTDC32° (b)

3.5 PM 排出量

各燃料を用いて燃料噴射圧力を変更した場合の排ガス中の PM 排出量の変化を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、燃料噴射圧力を 100MPa 以上に上昇させると、いずれの燃料噴射開始時期とした場合も PM 排出量は低下し使用燃料の違いによる差は僅かであることがわかる。また、燃料噴射圧力が低下すると、PM 排出量は上昇するが、BDF 使用時の PM 排出量は軽油使用時を下回ることがわかる。これは、前述 (3.3 節) のとおり、BDF 使用時は燃料中の含有酸素により不完全燃焼が抑制されるものと考えられる。

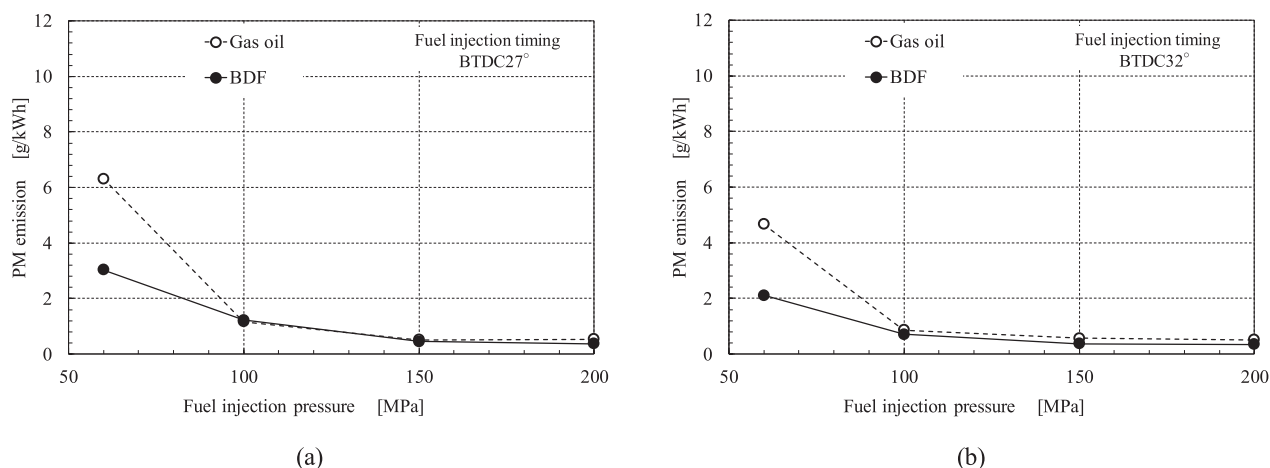


Fig.5 Variations of PM emission with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF at fuel injection timing BTDC27° (a) and BTDC32° (b)

3.6 シリンダ圧力

3.3 節および 3.5 節より、燃料噴射圧力を 200MPa とすると、CO 濃度および PM 排出量において使用燃料による差は僅かであるが、燃料噴射圧力を 60MPa とすると使用燃料によってこれらの差は大きくなる。そこで、各燃料を用いて燃料噴射圧力を 60MPa および 200MPa した場合のシリンダ圧力を計測した。燃料噴射時期を BTDC32° とした場合のシリンダ圧力および熱発生率を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、燃料噴射圧力を 200MPa とした場合、軽油使用時よりも BDF 使用時の着火時期は若干早い、いずれの燃料噴射圧力においても使用燃料によるシリンダ

圧力の推移に差はほとんどないことがわかる。とくに燃料噴射圧力を 60MPa とすると BDF 使用時の CO 濃度および PM 排出量は軽油使用時を下回るがシリンダ圧力に差はなく、この場合、BDF の含有酸素による燃焼促進が推測されるが、燃焼圧力に影響するには至らないといえる。したがって、BDF の含有酸素はエンジン出力に影響しないが、CO、PM および HC の生成を抑制することにより、軽油使用時よりも正味熱効率を向上させているといえる。

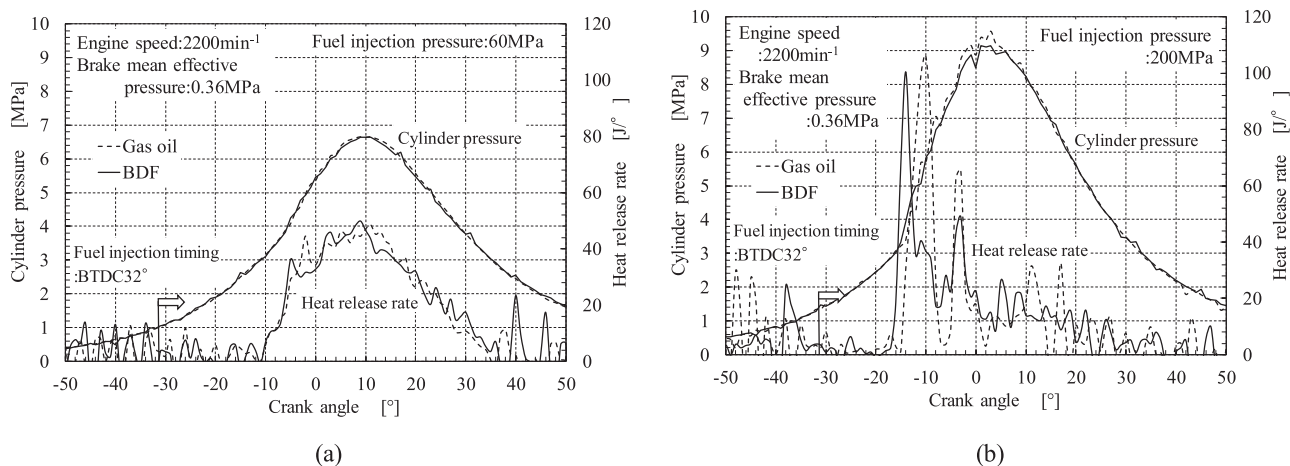


Fig.6 Variations of cylinder pressure and heat release rate with crank angle measured by using gas oil and BDF at fuel injection pressure 60MPa (a) and 200MPa (b)

4. 結 言

BDF を用いたディーゼルエンジンにおいて燃料噴射圧力が排ガス特性に及ぼす影響の把握を目的として、軽油および BDF を用いてディーゼルエンジンによる性能試験を実施し、燃料噴射圧力を変更した場合の排ガス特性を比較した。

その結果、BDF 使用時の正味熱効率は軽油使用時を上回ることが確認でき、BDF の含有酸素が燃焼を促進させた結果であると考えられるが、燃料噴射圧力の変更に対して正味熱効率は大きく変化しないことがわかった。

BDF 使用時に燃料噴射圧力を上昇させると NO_x 濃度は軽油使用時を上回ることから噴霧の微細化に伴う BDF の含有酸素による燃焼促進を確認した。一方、BDF 使用時の CO 濃度および PM 排出量は、燃料噴射圧力を上昇させた場合は軽油使用時との差は僅かであるが、燃料噴射圧力が低い場合は軽油使用時を下回ることがわかった。BDF 使用時の HC 濃度は、燃料噴射圧力の変更に対して大きく変化しないが、燃料噴射圧力が 200MPa よりも低い場合は軽油使用時を下回ることがわかった。また、燃料噴射圧力を変更した場合、使用燃料による排ガス成分の差が顕著になる条件であってもシリンダ圧力に差はなく、BDF の含有酸素は燃焼圧力に影響しないといえるが、燃焼を促進することにより CO、PM および HC の生成を抑制するため軽油使用時よりも正味熱効率は向上するものと考えられる。

これらより、BDF を用い、正常運転が維持できる範囲で燃料噴射圧力を変更した場合、正味熱効率および排ガス特性において燃料噴射圧力上昇による顕著な効果は確認できないが、燃料噴射圧力に関係なく正味熱効率は軽油使用時を上回り、とくに燃料噴射圧力が低い場合、軽油使用時よりも CO および PM の生成を抑制するといえる。

文 献

- (1) 位田晴良, 大橋遼平, 千秋慎太郎 “生物資源由来燃料の含有酸素が排ガス再循環付加ディーゼルエンジンの排ガス特性に及ぼす影響”, 日本機械学会 2020 年度年次大会講演論文集(2020).
- (2) 国土交通省, 高濃度バイオディーゼル燃料等の使用による車両不具合等防止のためのガイドライン (指導要領), (2009), pp. 5-6.
- (3) 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.
- (4) 日本エネルギー学会分析室, 報告書, 分試第 27-020~21(2016).

(2021 年 9 月 13 日受理)