

## 生物資源由来燃料を用いたディーゼルエンジンにおいて 排ガス再循環が運転特性に及ぼす影響\*

位田 晴良<sup>\*1</sup>, キリワン カマラサック<sup>\*2</sup>, 丸 涼二<sup>\*2</sup>, 劉 彬<sup>\*2</sup>, 上嶋 敏裕<sup>\*3</sup>

### Effects on Operation Characteristics of Exhaust Gas Recirculation of Diesel Engines Using Bio Fuel

Haruyoshi IDA<sup>\*1</sup>, Kamalask KHIRIWAN, Ryoji MARU, Bin LIU and Toshihiro UEJIMA

<sup>\*1</sup> Department of Mechanical Engineering

Bio Diesel Fuel (BDF) contains a lot of oxygen, but the ignitability is inferior because of its high viscosity compared with gas oil. Previous research has shown that the combustion status of BDF has been improved through increased net thermal efficiency with a larger fuel supply. However, the NO<sub>x</sub> density in the exhaust gas increased in that case as well with the rise of combustion temperature. In this study, effective EGR for NO<sub>x</sub> decrease is applied and the effect on operation characteristics of the engine is investigated. In particular, the expected increase in PM emissions due to the lower excess air factor is compared with that when using gas oil. The results make it clear that superior operating characteristics during BDF use can be obtained in comparison to the use of gas oil, in operating conditions with a decreased excess air factor.

**Key Words** : Diesel Engine, Bio Diesel Fuel, Exhaust Gas Recirculation, Operation Characteristics

## 1. 緒 言

多くのガソリンエンジンは燃料と空気を予め混合させてからシリンダ内に吸入するため、比較的安定した燃焼行程となるが、ディーゼルエンジンは燃焼室内で空気を圧縮し、ピストンが上死点付近にある僅かな期間において燃料を霧状に噴射し、燃料と空気の混合および気化をほぼ同時に行いながら燃焼するため、均一な燃焼が困難である。したがって、燃料の完全燃焼が実現されない場合、熱効率は低下するとともに粒子状物質 (PM) が発生する。一方、吸入空気量に余裕を持たせてあるため、燃焼室内は空気過剰になり、窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) が発生する。このようなディーゼルエンジンの運転特性に対して、様々な燃焼状態の最適化技術により、熱効率の向上および PM 排出量の低減は可能であるが、燃焼温度が上昇し NO<sub>x</sub> 排出量は増加する。そのため多くのディーゼルエンジンに排ガス再循環 (EGR) 装置が導入されている。EGR は排ガスの一部を吸気系へ導入し、吸気中の酸素濃度および最高燃焼温度を低下させることにより、NO<sub>x</sub> 排出量の低減を図る。一般に PM と NO<sub>x</sub> の排出量はトレードオフの関係にあるため、両者の同時低減が課題となっている。

一方、バイオディーゼル燃料 (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 CO<sub>2</sub> 濃度増加を抑制する。BDF 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り、植物油を構成する脂肪酸グリセライトにエステル交換反応を施すことによって得られる脂肪酸メチルエステルである。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、燃焼改善による熱効率向上、PM 排出量の低減が期待できる<sup>(1),(2)</sup>。

\* 原稿受付 2017年2月28日

<sup>\*1</sup> 工学部 機械工学科

<sup>\*2</sup> 工学部 機械工学科4年

<sup>\*3</sup> センター管理課

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

これまでに実施された、コモンレール燃料噴射システムを導入したディーゼルエンジンによる性能試験より、比較的燃料噴射圧力および負荷が低い場合、BDF 使用時の PM 排出量は、軽油使用時よりも高いことがわかった<sup>④</sup>。これは、BDF は引火点および動粘度が高いため着火性に劣ることに加えて、低負荷運転時は供給燃料が少なく燃焼温度の上昇が抑制されるため、PM として排出される未燃焼燃料が増加するものと考えられる。一方、高負荷運転に伴う燃焼温度の上昇および燃料噴射圧力の高圧化により BDF の燃焼状態が改善されると、BDF 使用時の PM 排出量は軽油使用時を下回ることがわかった。しかし、BDF が良好な燃焼状態の場合に NO<sub>x</sub> を低減する EGR を適用させると、軽油使用時と比較して運転特性がどのような傾向を示すのかはわかっていない。BDF を用いながら EGR を適用することにより、吸気中の酸素濃度が低下して NO<sub>x</sub> 濃度を低減する一方、燃焼に必要な酸素を BDF が補給して PM 排出量の増加を抑制することも期待できるため、運転条件によっては、NO<sub>x</sub>、PM を同時に低減する可能性がある。

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 EGR 率を変更する性能試験を行い、EGR 率（吸気に対して混入する排ガスの体積割合）によって変動する熱効率、NO<sub>x</sub> 濃度および PM 排出量に着目しながら運転特性を調査することにより、EGR が運転特性に及ぼす影響を明らかにする。

## 2. 小型ディーゼルエンジンによる性能試験

軽油および BDF を用いた小型ディーゼルエンジンにおいて、EGR 率の変更に対する運転特性の比較を行うため、以下の性能試験を行う。

実験装置は、コモンレール式燃料噴射装置を導入したディーゼルエンジン（ヤンマー NFD170）および排ガス計測装置から構成される。軽油および BDF を用いてエンジン回転数 2200min<sup>-1</sup>、負荷（正味平均有効圧）0～0.47MPa、燃料噴射圧力 60MPa とし、それぞれの運転条件において EGR 率を 0～50%に変更する性能試験を行う。エンジンからの排ガス中に含まれる 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する。採取された 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る。また、容積式流量検出器（小野測器 FP-2140HA）による燃料消費量および直挿形 NO<sub>x</sub> 分析計（堀場製作所 MEXA-120NO<sub>x</sub>）による NO<sub>x</sub> 濃度の計測を行い、これらの結果から燃焼状態を確認することにより、EGR がディーゼルエンジンの運転特性に与える影響を検討する。

Table 1 Specification of diesel engine used in performance examination<sup>(4)</sup>

Engine type	Horizontal, water cooled, 4 stroke	
Combustion chamber	Direct injection (troydal type)	
Cylinder / Bore and stroke [mm]	Single / 102 × 105	
Displacement [cm <sup>3</sup> ]	857	
Maximum power [kW] {PS} / Engine speed [min <sup>-1</sup> ]	12.5 {17.0} / 2400	
Compression ratio	17.8	
Air charging	Naturally aspirated	

Table 2 Specification of gas oil and BDF used as experimental fuel<sup>(5)</sup>

Item	Gas oil	BDF
Specific gravity [kg/m <sup>3</sup> ]	0.82	0.88
Kinematic viscosity (303K) [m <sup>2</sup> /s]	3.95×10 <sup>-6</sup>	6.52×10 <sup>-6</sup>
Ignition point [K]	507	522
Oxygen content [wt%]	0.10	10.7
Gross calorific value [kJ/kg]	45.6×10 <sup>3</sup>	39.5×10 <sup>3</sup>

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 857cm<sup>3</sup>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. 燃料として用いる 2 号軽油 (ジャパンエナジー製) および BDF (油藤商事製) の主な性質を Table 2 に示す. Table 2 より, BDF は軽油と比較すると, 動粘度および着火点は高く, また, 総発熱量は低く酸素含有率は高いことがわかる.

### 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, エンジン回転数 2200min<sup>-1</sup>, 正味平均有効圧 0.24MPa および 0.47MPa において軽油および BDF を用いて EGR 率を変更した場合の正味熱効率の変化を Fig. 1 に示す. なお, 正味平均有効圧 0.47MPa の場合, 軽油使用時は EGR 率 10%, BDF 使用時は EGR 率 20%を超えるとエンジン回転数を一定に維持することができない. これは, 負荷とともに燃料供給量が増加したことに加えて, EGR 率の増加により吸気中に混入される不活性ガスが増加するため, 燃焼に必要な酸素濃度が低下して燃焼状態が悪化し, 負荷に対してエンジンの発生出力が不足する結果といえる.

Fig. 1 より, 比較的負荷の低い正味平均有効圧 0.24MPa の場合は, いずれの使用燃料においても EGR 率の変更に対する正味熱効率の変化は僅かであり, 比較的負荷の高い正味平均有効圧 0.47MPa の場合は EGR 率の上昇とともに正味熱効率は低下することがわかる. これは, 高負荷運転時は酸素濃度が低下するため EGR による不活性ガス増加の影響が顕著になるが, 低負荷で燃料供給量が少ない場合は, 酸素濃度に余裕があり, EGR による燃焼状態への影響が少ないといえる. また, 高負荷運転時は, BDF 使用時の熱効率が軽油使用時を上回り, さらに BDF 使用時は, 軽油使用時より高い EGR 率 (BDF 使用時: 20%, 軽油使用時: 10%) において運転が可能であることがわかる. これは, BDF は組成中に酸素を多く含むため, 負荷増加および EGR 適用により酸素濃度が低下した場合であっても含有酸素が燃焼を促進するものと考えられる. これより, 着火性の劣る BDF であっても負荷増加に伴う燃焼温度の上昇により, 燃焼が促進され含有酸素が有効に作用するといえる.

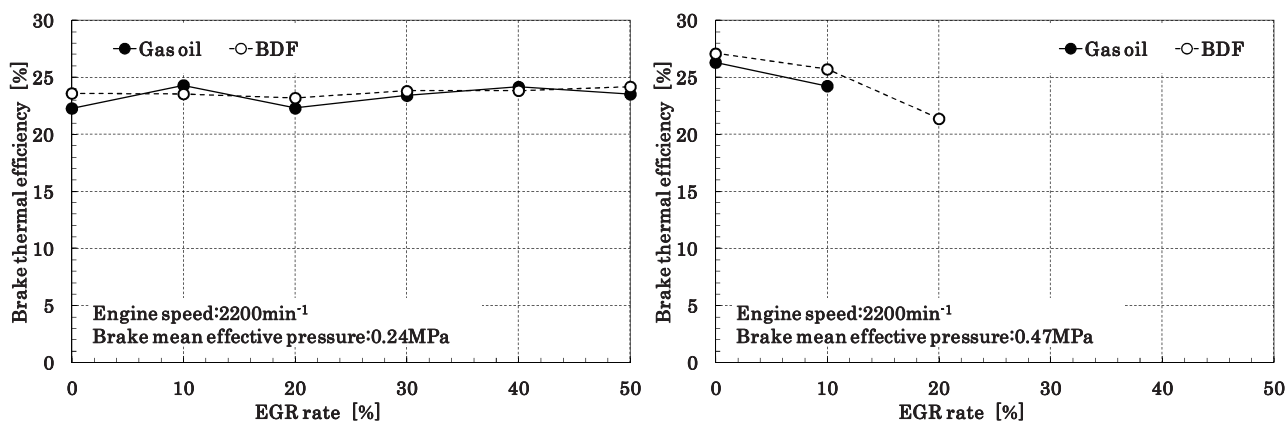


Fig. 1 Variations of brake thermal efficiency with EGR rate by using gas oil and BDF for the brake mean effective pressures 0.24MPa (left) and 0.47MPa (right)

#### 3.2 NO<sub>x</sub>濃度

性能試験の結果より, エンジン回転数 2200min<sup>-1</sup>, 正味平均有効圧 0.24MPa および 0.47MPa において軽油および BDF を用いて EGR 率を変更した場合の NO<sub>x</sub> 濃度の変化を Fig. 2 に示す.

Fig. 2 より, いずれの負荷, いずれの使用燃料の場合も EGR 率の上昇とともに NO<sub>x</sub> 濃度は低減することが確認できるが, 使用燃料による NO<sub>x</sub> 濃度の差はほとんどないことがわかる. 一般に最高燃焼温度が上昇すると NO<sub>x</sub> 生成は促進されるが, Fig 2 における傾向は, 使用燃料が異なっても両者の燃焼温度に差はなく, NO<sub>x</sub> 濃度に反映されたものと考えられる.

これまでに実施された燃料噴射圧力 60MPa 未満, EGR 未適用の性能試験においては, 軽油使用時と比較すると BDF 使用時は含有酸素が作用し, NO<sub>x</sub>濃度が増加する運転条件も確認されたが<sup>(3)</sup>, 本研究の性能試験より, 燃料噴射圧力を 60MPa とし, EGR を適用した場合, BDF 使用時の NO<sub>x</sub>濃度は, 軽油使用時の NO<sub>x</sub>濃度と同程度まで低減することができるといえる。

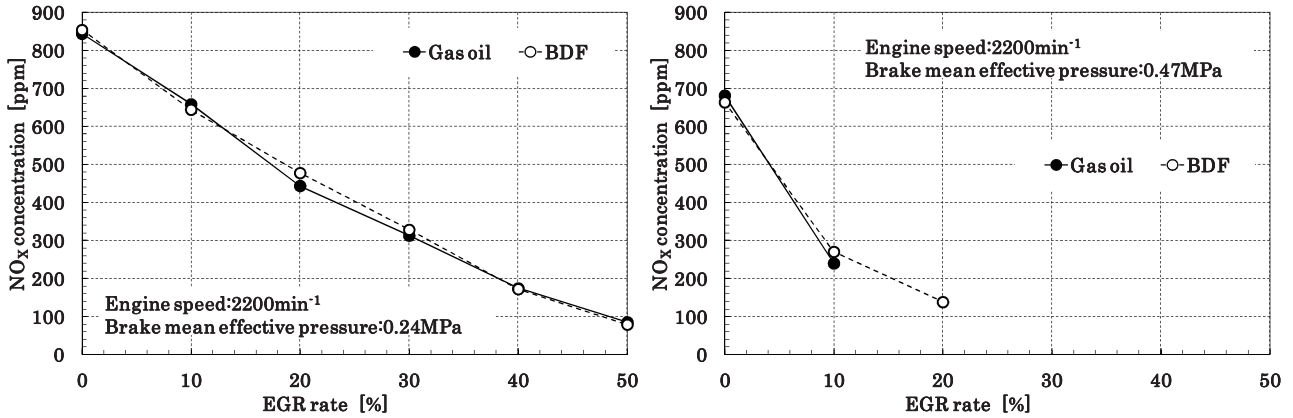


Fig. 2 Variations of NO<sub>x</sub> concentration with EGR rate measured by using gas oil and BDF for the brake mean effective pressures 0.24MPa (left) and 0.47MPa (right)

### 3.3 排気温度

性能試験の結果より, エンジン回転数 2200min<sup>-1</sup>, 正味平均有効圧 0.24MPa および 0.47MPa において軽油および BDF を用いて EGR 率を変更した場合の排気温度の変化を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 より, いずれの負荷, いずれの使用燃料の場合も EGR 率の変更に対する排気温度の変化は僅かであることがわかる。また, 使用燃料による差もほとんどないことがわかる。これは, 前述 (3.2 節) したとおり, 使用燃料が異なっても両者の燃焼温度に差はないことを示しており, とくに最高燃焼温度に達し, 主に出力を発生する期間 (予混合燃焼期間および拡散燃焼期間) の燃焼状況は同等であると考えられる。

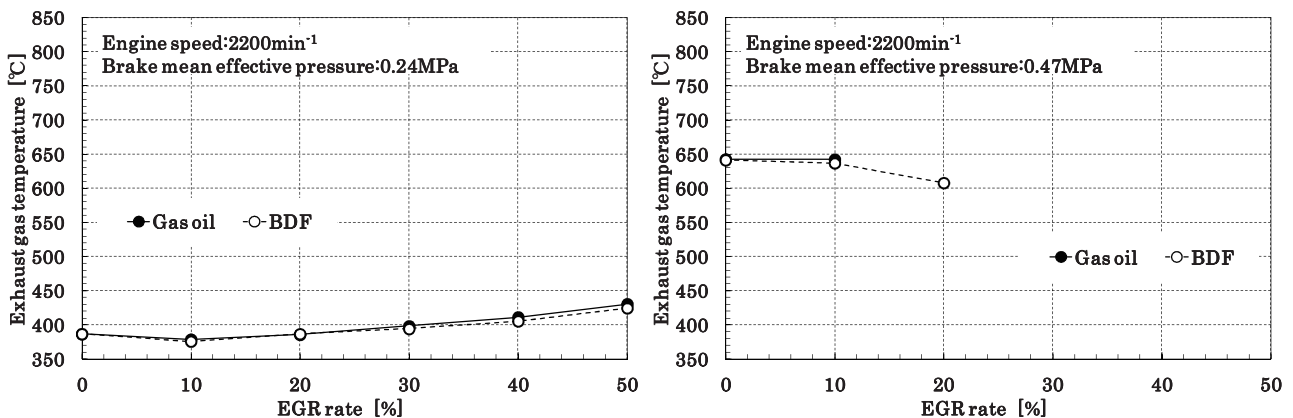


Fig. 3 Variations of exhaust gas temperature with EGR rate measured by using gas oil and BDF for the brake mean effective pressures 0.24MPa (left) and 0.47MPa (right)

### 3.4 PM 排出量

性能試験の結果より, エンジン回転数 2200min<sup>-1</sup>, 正味平均有効圧 0.24MPa および 0.47MPa において軽油および BDF を用いて EGR 率を変更した場合の PM 排出量の変化を Fig. 4, この運転条件において排出された PM に含まれる成分を使用燃料別に Fig. 5 に示す。

Fig. 4 より、正味平均有効圧 0.24MPa の場合は、いずれの使用燃料においても EGR 率の変更に対する PM 排出量の変化は微小であるが、BDF 使用時と比較すると、若干軽油使用時の PM 排出量が上回る。また、負荷の高い正味平均有効圧 0.47MPa の場合は、いずれの使用燃料においても EGR 率の上昇とともに PM 排出量は上

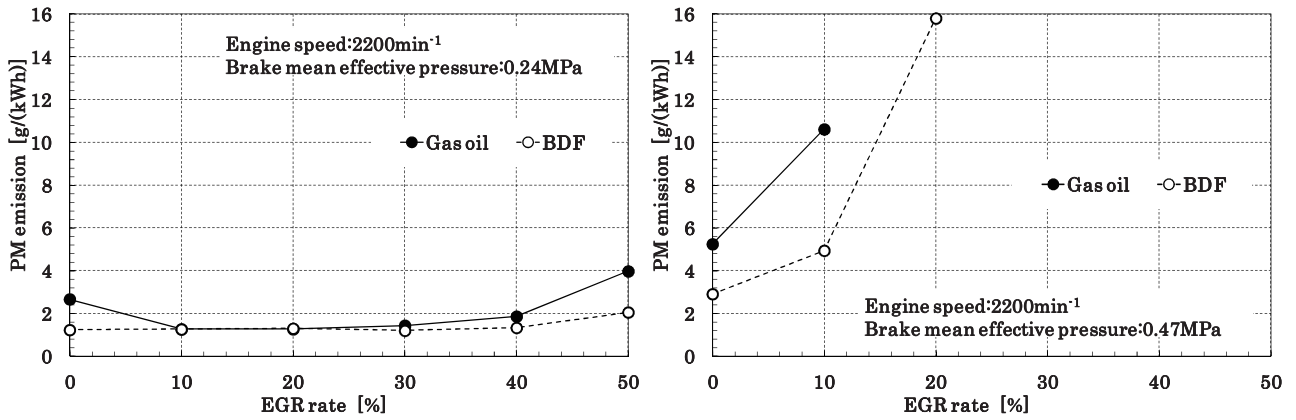


Fig. 4 Variations of PM emission with EGR rate measured by using gas oil and BDF for the brake mean effective pressures 0.24MPa (left) and 0.36MPa (right)

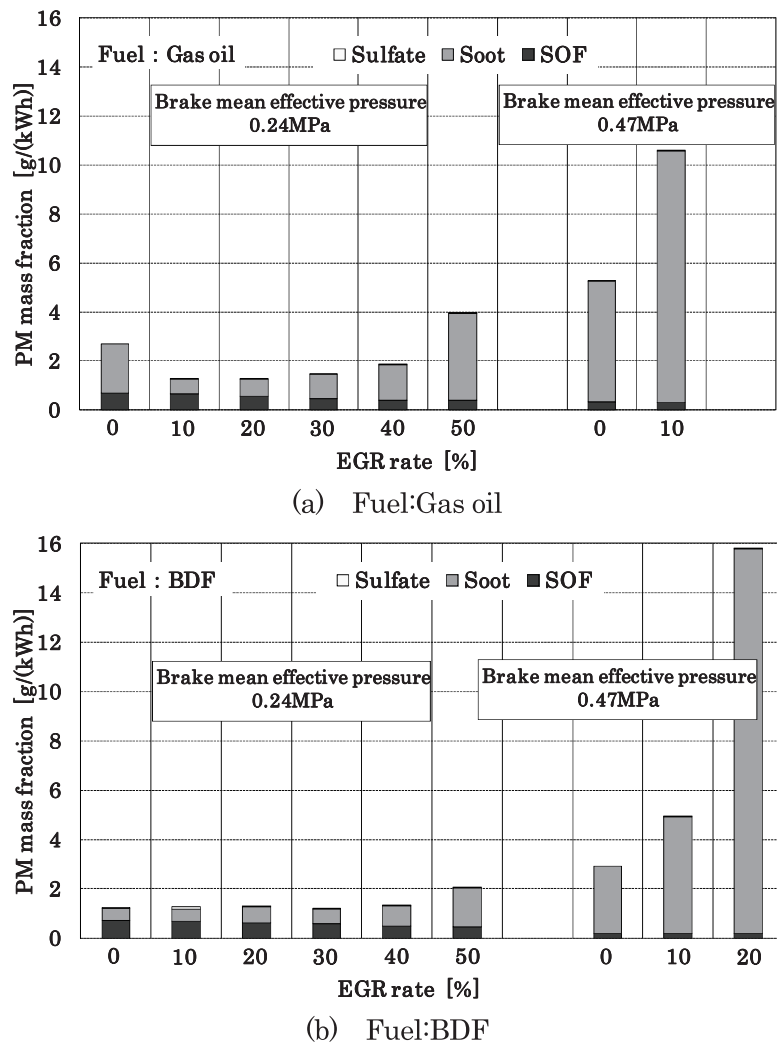


Fig. 5 Variations of mass fraction of the sulfate, soot and SOF contained in PM with EGR rate measured by using gas oil (a) and BDF (b) for the engine speed 2200min<sup>-1</sup>



昇するが、低負荷運転時よりも使用燃料による PM 排出量の差は拡大し、軽油使用時の PM 排出量が上回る。これは、前述 (3.1 節) したとおり、BDF は組成中に酸素を多く含むため、負荷増加および EGR 適用により酸素濃度が低下した場合であっても含有酸素が燃焼を促進し、軽油使用時と比較すると PM 排出量の増加が抑制されるものと考えられる。また、PM は燃料の不完全燃焼により発生するため、PM 排出量の増加は熱効率の低下を招き、本節の PM 排出量の傾向は、3.1 節における正味熱効率の傾向に反映されているといえる。

一方、前節 (3.2 節) において、高負荷運転時に使用燃料が異なる場合でも NO<sub>x</sub> 濃度の差はほとんどないことを示している。つまり、軽油使用時に排出量が上回る PM は、NO<sub>x</sub> 生成および出力発生に寄与しない期間の燃焼に由来することが考えられ、BDF 使用時は、とくに燃焼圧力および燃焼温度が低下する燃焼後期の燃焼状態が良好であることが考えられる。

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。Fig. 5 より、いずれの燃料を使用した場合も EGR 率の上昇とともに Soot が増加し、Soot の量が PM 排出量を支配することがわかる。さらに同じ運転条件において使用燃料による比較をすると、全ての運転条件において BDF 使用時の Soot の量が軽油使用時を下回っている。つまり、負荷または EGR 率が上昇し燃焼時の酸素濃度が低下する条件となっても、BDF 使用時は含有酸素の作用により Soot の生成が抑制されるため、PM 排出量は軽油使用時を下回るといえる。

これまでに実施された燃料噴射圧力 60MPa 未満、EGR 未適用の性能試験において、BDF 使用時の PM 排出量は、負荷の増加に伴い低下するものの、燃焼状態が改善される高負荷運転時を除けば軽油使用時の PM 排出量を上回ることが確認されたが<sup>9)</sup>、本研究の性能試験より、燃料噴射圧力を 60MPa とし、EGR を適用した場合、負荷に関わらず、BDF 使用時の PM 排出量は軽油使用時の PM 排出量を下回ることがわかった。

#### 4. 結 言

本研究では、EGR が BDF を用いたディーゼルエンジンの運転特性に及ぼす影響を明らかにするため、EGR 率を変更する性能試験を実施した。その結果、低負荷運転時は、使用燃料による熱効率の差は見られないものの、高負荷運転時は、BDF 使用時の熱効率は軽油使用時を上回り、さらに BDF 使用時は、軽油使用時より高い EGR 率において運転が可能であることがわかった。また、BDF を用いながら EGR を適用することによって、NO<sub>x</sub> 濃度は軽油使用時と同程度まで低減し、PM 排出量は軽油使用時を下回ることがわかった。

したがって、空気過剰率が低下する高負荷および EGR 適用運転時に BDF を用いた場合、燃焼状況の悪化を抑制することにより、軽油使用時と比較して運転特性を向上できるといえる。

#### 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) 位田晴良, 梶山恭輔, 磯松弥司, “生物資源由来燃料を用いたディーゼルエンジンの運転条件が排出ガス特性に及ぼす影響”, 日本機械学会 2016 年度年次大会 DVD 論文集(2016)
- (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) 日本エネルギー学会分析室, 報告書, 分試第 27-020~21(2016).

(平成 29 年 3 月 31 日受理)