

生物資源由来燃料を用いたディーゼルエンジンにおける 運転条件と排出ガス特性の関係*

位田 晴良^{*1}, 三好 清隆^{*2}, 上嶋 敏裕^{*3}, 帰山 恭輔^{*4}

Relationship between Operating Conditions and Exhaust Gas Characteristics of Diesel Engines Using Bio Fuel

Haruyoshi IDA^{*1}, Kiyotaka MIYOSHI^{*2}, Toshihiro UEJIMA^{*3} and Kyosuke KIYAMA^{*4}

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

Bio Diesel Fuel (BDF) has attracted attention as a fuel alternative to petroleum. BDF contains a lot of oxygen, but the ignitability is inferior because the viscosity is high compared with gas oil. However, the previous researches found out that while gas oil and BDF are different fuel properties, the operating conditions to lose the remarkable difference of the thermal efficiency and the exhaust gas characteristic when using these with Diesel engines. That is, the effects that BDF has on the state of combustion and the exhaust gas characteristic of diesel engines are not clear. In this research, operation characteristics were examined while paying attention to the PM exhaust characteristic that changed by the combustion state by the performance examination of the diesel engine using BDF. As a result, it was clarified that more excellent operating characteristics during BDF use than when gas oil used can be obtained in the operating conditions with much supply fuel.

Key Words : Diesel Engine, Bio Diesel Fuel, Combustion State, Exhaust Gas Characteristic

1. 緒 言

一般にガソリンエンジンと比較すると、ディーゼルエンジンは熱効率が高く、二酸化炭素（CO₂）排出量が少ないことから地球温暖化対策に有効であるとされている。また、経済性が高いことからトラックの動力として多く用いられてきた。トラックによる国内の貨物輸送量は、輸送重量では9割、輸送重量に輸送距離を乗じた仕事量では5割を超えている⁽¹⁾。最近ではトラックの動力としてディーゼルエンジンとモータを併載するハイブリッド化も進んでいるが、現時点において、大半のトラックはディーゼルエンジンのみを搭載している。さらには、その熱効率の高さが見直され、新たな技術が導入された乗用車用のディーゼルエンジンも開発が進められており、徐々に普及している。これらのことから、貨物の輸送手段および人の移動手段である自動車の動力源としてディーゼルエンジンは重要であるといえる。運転中はほぼ一定の回転速度および負荷で用いられる発電機、または船舶や鉄道などに用いられるディーゼルエンジンと比較すると、自動車用として用いられるディーゼルエンジンは、運転中に回転数や負荷などの運転条件が著しく変化する。この運転条件の変化は、エンジンの燃焼状態を変化させることを意味し、熱効率および有害物質の発生は燃焼状態に大きく影響を受ける。

多くのガソリンエンジンでは燃料と空気を予め混合気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で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するため、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拡散燃焼とな

* 原稿受付 2016年2月29日

^{*1} 工学部 機械工学科

^{*2} 附属福井高等学校

^{*3} センター管理課

^{*4} 工学部 機械工学科4年

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

る。したがって、均一な燃焼が困難であり、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_x）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_x 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出ガス再循環（EGR）装置が導入されている。EGR は排出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_x 排出量の低減を図るものである。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者の同時低減が課題となっている。

一方、近年石油代替燃料としてバイオディーゼル燃料（BDF）が注目されている。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。BDF は菜種油等の植物油及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ので、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^{(2),(3)}。

BDF は軽油に比べて酸素含有量が高く燃焼を促進するが、動粘度が高く微細な噴霧が形成され難いため、軽油に比べ燃焼効率が悪化することが考えられる。この点を改善する方法として、軽油を燃料とする自動車用ディーゼルエンジンにおいて普及しているコモンレール燃料噴射システムの導入が挙げられる。これは、高圧化した燃料をコモンレールに蓄えてから各インジェクタへ供給するシステムであり、燃料の噴射時期、噴射期間を電子制御することにより、燃焼状態の最適化を図ることができる。

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、BDF の燃焼特性は軽油使用時に劣ることがわかっている⁽⁴⁾。しかし、燃料噴射圧力を上昇させることにより、BDF の着火性は改善され、正味熱効率は上昇することがわかった。また、燃料噴射圧力の変更による運転特性への影響は軽油使用時よりも著しいことがわかっている。これらの結果は軽油と BDF の性状が異なるためといえるが、これらを用いた場合の熱効率および排出ガ斯特性に著しい差異がなくなる運転条件も存在する。すなわち、BDF の性状が燃焼状態および排出ガ斯特性に与える影響は明確であるとはいえない。

そこで本研究では、ディーゼルエンジンにおいて BDF を燃料とする性能試験を行い、運転条件および燃焼状態によって排出量変動する PM 排出特性に着目しながら軽油を使用した場合の運転特性と比較を行うことにより、BDF の性状がディーゼルエンジンの排出ガ斯特性に与える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

2.1 比較方法

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、運転条件の変更に対する PM 排出特性をはじめとする運転特性の比較を行うため、以下の性能試験を行う。

2.2 性能試験

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）および排出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⁻¹、負荷（正味平均有効圧）0.24～0.47MPa とし、それぞれの運転条件において燃料噴射圧力を 30～60MPa に変更する性能試験を行う。エンジンからの排出ガス中に含まれる PM はマイクロダイリューショントンネル（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、空燃比データログ（INOVATE MORTORS LM-2）による空燃比、および直挿形 NO_x 分析計（堀場製作所 MEXA-120NO_x）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から燃焼状態を確認することにより、BDF の性状がディーゼルエンジンの排出ガ斯特性に与える影響を検討する。

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

(油籐商事製)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、動粘度および引火点は高く（着火点も高いと推測）、また、総発熱量は低く酸素含有率は高いことがわかる。

Table 1 Specification of diesel engine used in performance examination⁽⁵⁾

Engine type	Horizontal, water cooled, 4 stroke
Combustion chamber	Direct injection (troydal type)
Cylinder / Bore and stroke [mm]	Single / 102 × 105
Displacement [cm ³]	857
Maximum power [kW] {PS} / Engine speed [min ⁻¹]	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^{(6),(7)}

Item	Gas 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

2.3 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から燃焼状態を把握するために、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。

3. 実験結果および考察

3.1 燃料噴射圧力と正味熱効率

性能試験の結果より、エンジン回転数 2200min⁻¹、正味平均有効圧 0.24MPa および 0.47MPa において軽油および BDF を用いて燃料噴射圧力の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、燃料噴射圧力 30MPa であると、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、燃料の噴霧状態および燃焼状態が劣り、負荷に対してエンジンの発生出力が満たないためであると考えられる。

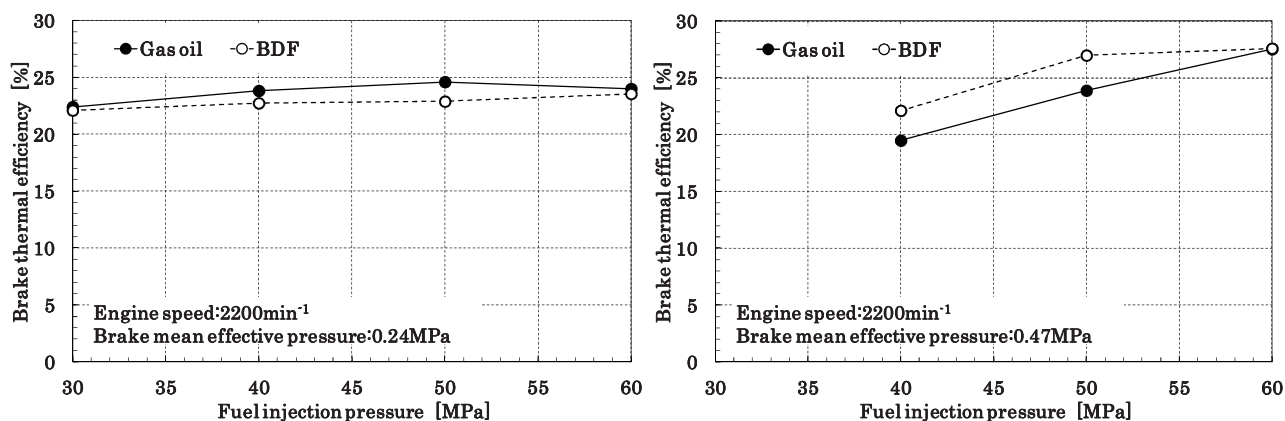


Fig. 1 Variations of brake thermal efficiency with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF for the brake mean effective pressures 0.24MPa (left) and 0.47MPa (right)

Fig. 1 より，軽油使用時，BDF 使用時ともに，比較的負荷の低い正味平均有効圧 0.24MPa の場合は燃料噴射圧力を変更しても正味熱効率の変化は僅かであることがわかる．また，比較的負荷の高い正味平均有効圧 0.47MPa の場合は燃料噴射圧力の上昇とともに正味熱効率が上昇することがわかる．これは負荷の増加による燃焼温度の上昇とともに，燃料噴射圧力の上昇により燃料噴霧が微細化され，良好な燃焼状態が得られているといえる．とくに負荷が低い場合，軽油使用時と比較すると BDF の正味熱効率はやや下回っていたものの，負荷を上昇させると BDF 使用時の熱効率が軽油使用時を上回ることがわかる．これより，燃焼温度の上昇により，着火性の劣る BDF であっても燃焼が促進されているものと考えられる．

3.2 燃料噴射圧力と着火遅れ

性能試験の結果より，エンジン回転数 2200min^{-1} ，正味平均有効圧 0.24MPa および 0.47MPa において軽油および BDF を使用し，燃料噴射開始時期を一定として燃料噴射圧力を変更した場合のシリンダ圧力の変化を Fig. 2 に示す．

Fig. 2 より，いずれの運転条件においても燃料噴射圧力を上昇させると最大シリンダ圧力が上昇するとともに着火時期が早くなり，燃料噴射開始から燃焼圧力上昇までの期間（着火遅れ期間）が短縮されることがわかる．これは燃料噴射圧力上昇に伴う着火の促進によるものであると考えられるが，この燃料噴射圧力の上昇によるシリンダ圧力の変化は，燃料噴射時期を進角させた場合と同じ傾向であるといえる．

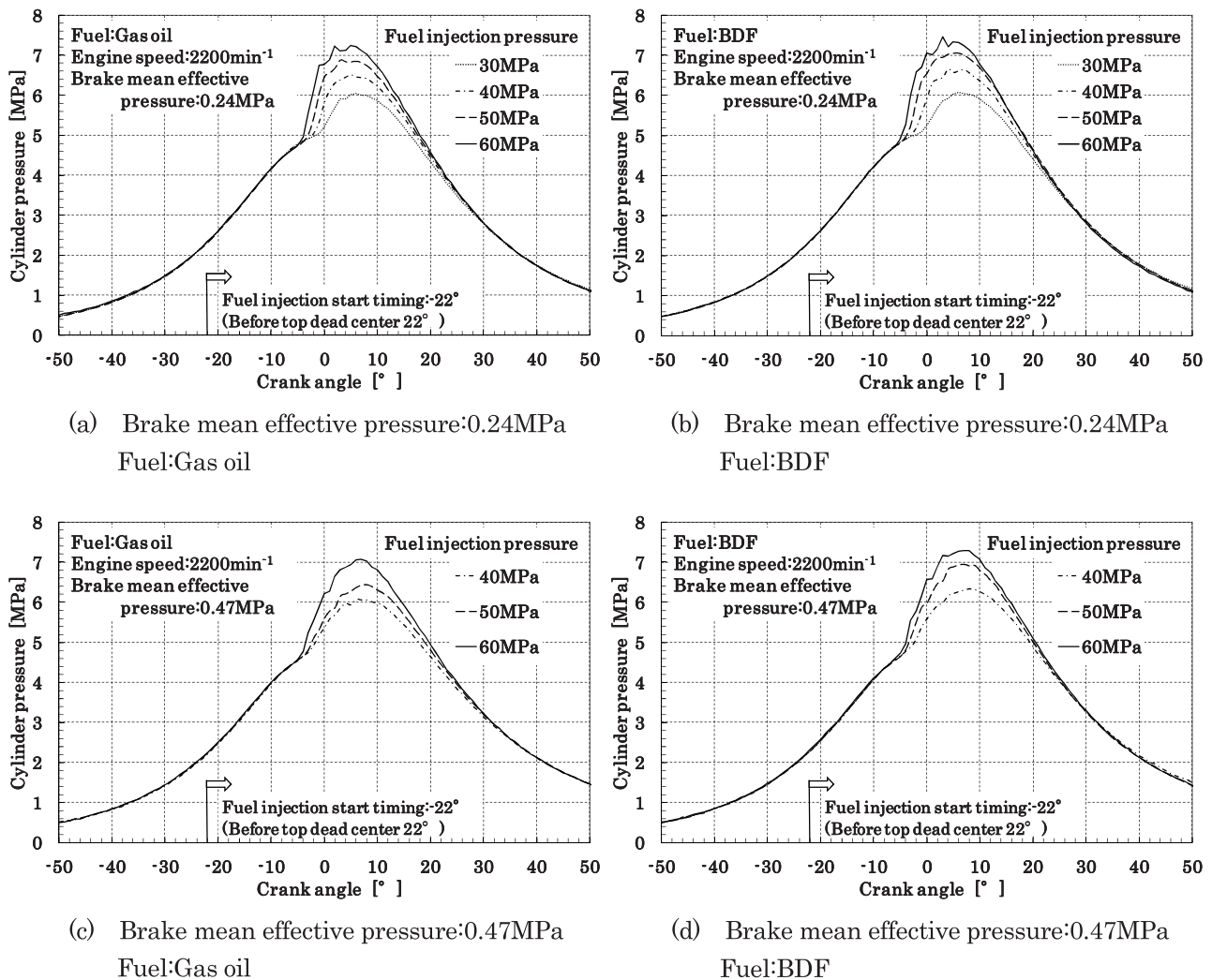


Fig. 2 Variations of cylinder pressure with crank angle measured by changing fuel injection pressure

また、運転条件が同じであっても使用燃料により着火時期および最高燃焼圧力が異なることがわかる。とくに BDF 使用時の最高燃焼圧力は軽油使用時を上回り、この差は負荷が上昇するほど増大することがわかる。この傾向からも燃焼温度の上昇とともに BDF の燃焼状態が改善されているものと考えられる。

3.3 燃料噴射圧力と排気温度

性能試験の結果より、エンジン回転数 2200min^{-1} 、正味平均有効圧 0.24MPa および 0.47MPa において軽油および BDF を用いて燃料噴射圧力の変更した場合の排気温度の変化を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 より、軽油使用時、BDF 使用時ともに、負荷の増大に伴い排気温度が上昇していることがわかる。これは供給燃料が増加し、燃焼による発熱量が増加していることを示す。また、燃料噴射圧力の上昇とともに排気温度は低下することがわかる。これは、噴霧の微細化により着火時期が早くなるとともに燃焼が短期間に完了するためであると考えられる。

軽油使用時と BDF 使用時を比較すると、高負荷運転において、比較的燃料噴射圧力が低い 40MPa の場合はほとんど差がないものの、BDF 使用時の排気温度が軽油使用時を下回っていることが分かる。これは燃焼温度の上昇に伴い、とくに BDF の着火性が改善されるため速やかに燃焼が完了していることを示す。

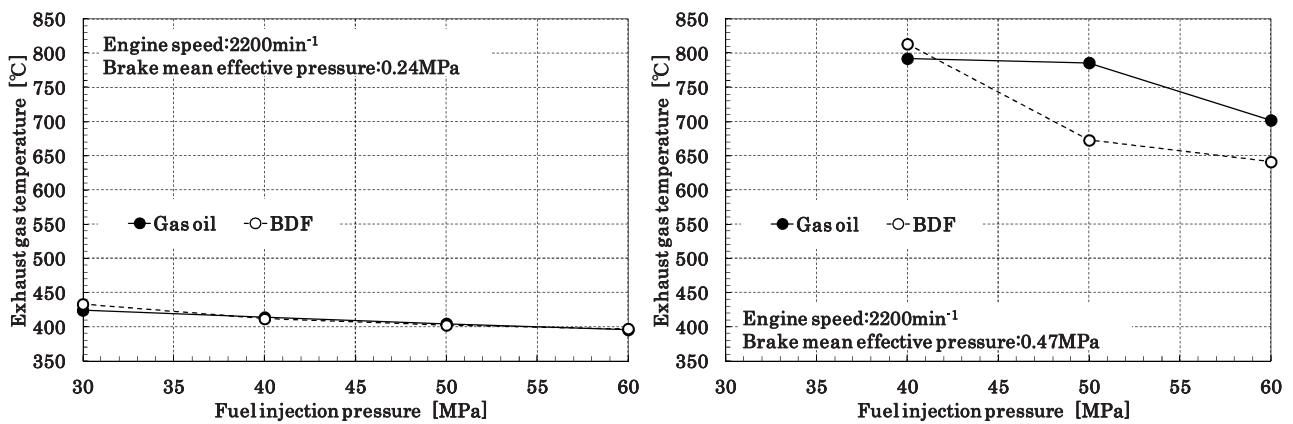


Fig. 3 Variations of exhaust gas temperature with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF for the brake mean effective pressures 0.24MPa (left) and 0.47MPa (right)

3.4 燃料噴射圧力と空燃比

性能試験の結果より、エンジン回転数 2200min^{-1} 、正味平均有効圧 0.24MPa および 0.47MPa において軽油および BDF を用いて燃料噴射圧力の変更した場合の空燃比の変化を Fig. 4 に示す。

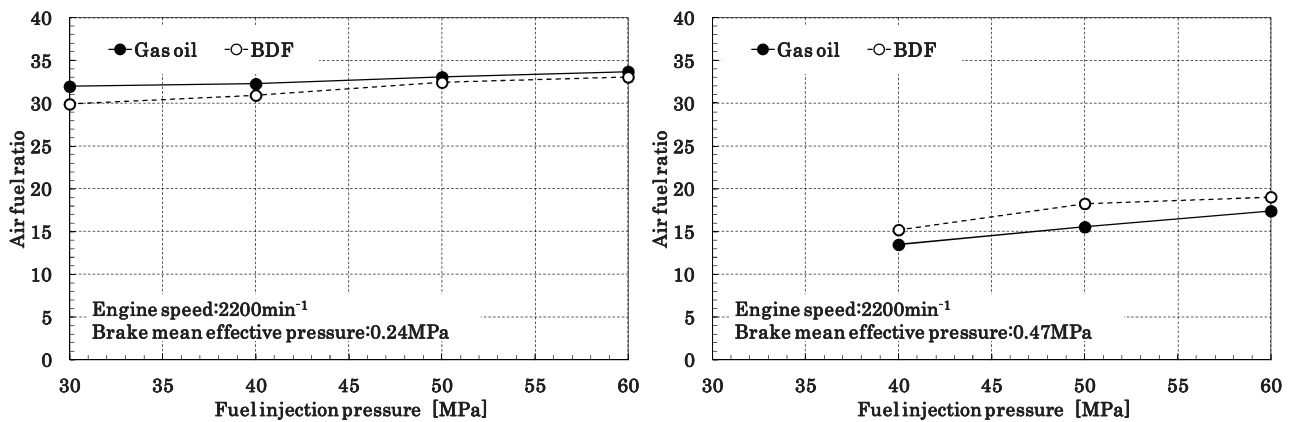


Fig. 4 Variations of air fuel ratio with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF for the brake mean effective pressures 0.24MPa (left) and 0.47MPa (right)

空燃比は吸入空気に対する燃料の質量比であり、供給燃料の増減を示す。空燃比は排出ガス中の残存酸素濃度より計測される。

Fig. 4 より、いずれの燃料を使用した場合も低負荷時と比較すると、高負荷時の空燃比は低いことが分かり、負荷とともに排出ガス中の酸素濃度が変化することが確認できる。また、低負荷時は、軽油使用時と比較すると BDF 使用時の空燃比がやや下回るもののその差は小さい。高負荷時は、供給燃料の増加に伴い排出ガス中の酸素は減少するが、軽油使用時と比較すると BDF 使用時の空燃比がやや上回っており、BDF の含有酸素による影響であるといえる。すなわち、負荷の上昇に伴う燃焼温度の上昇により着火性の劣る BDF の燃焼状態が改善され、含有酸素が有効に作用するものといえる。

3.5 燃料噴射圧力と NO_x 濃度

性能試験の結果より、エンジン回転数 2200min⁻¹、正味平均有効圧 0.24MPa および 0.47MPa において軽油および BDF を用いて燃料噴射圧力の変更した場合の NO_x 濃度の変化を Fig. 5 に示す。

Fig. 5 より、いずれの燃料を使用した場合も燃料噴射圧力が上昇するとともに NO_x 濃度は上昇する。これは、燃料噴射圧力の上昇により燃料の噴霧が微細化し、着火が活性化することにより良好な燃焼が行われることを示す。低負荷時は、使用燃料による NO_x 濃度の差は小さいことが分かる。また、高負荷時は、NO_x 濃度は低下することがわかる。一般に燃焼温度が上昇すると NO_x 生成は促進されるが、NO_x 濃度の低下は、供給燃料の増加に伴う酸素濃度低下の影響が大きいことを示している。

一方、高負荷時に NO_x 濃度は低下する傾向にあるものの、BDF 使用時の NO_x 濃度は軽油使用時を上回り、NO_x 濃度低下の程度は大きくない。この傾向からも燃焼温度の上昇により BDF の燃焼状態が改善されることがわかり、供給燃料の増加に伴い吸入空気中の酸素が多く消費される条件であっても BDF の含有酸素が供給されるものと考えられる。

燃焼温度が上昇する運転条件にあつては、軽油使用時と比較して BDF 使用時の燃焼状態は良好であるが、NO_x 濃度は高くなるため EGR などの NO_x 低減装置の併用が必要である。

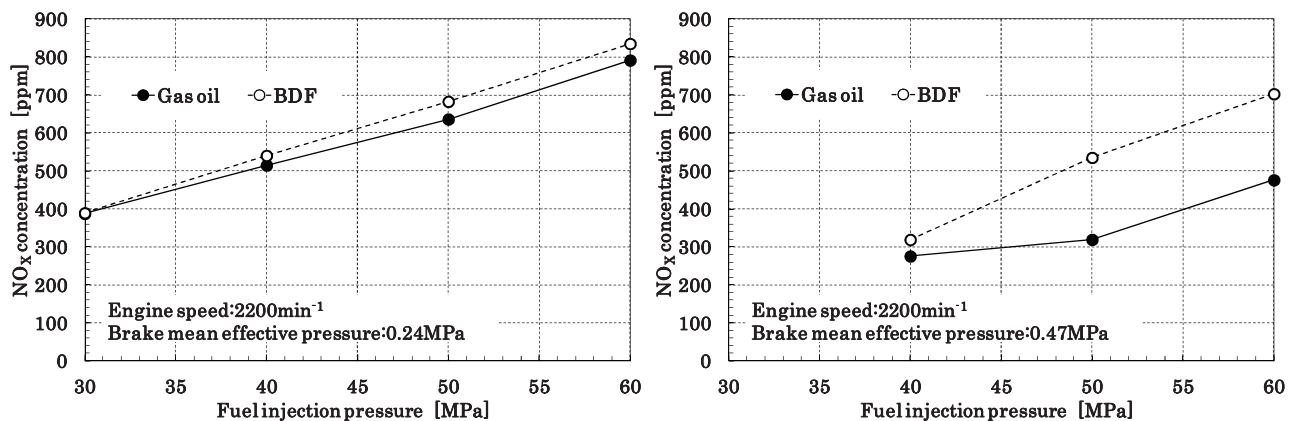


Fig. 5 Variations of NO_x concentration with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF for the brake mean effective pressures 0.24MPa (left) and 0.47MPa (right)

3.6 燃料噴射圧力と PM 排出量

性能試験の結果より、エンジン回転数 2200min⁻¹、正味平均有効圧 0.24MPa および 0.36MPa において軽油および BDF を用いて燃料噴射圧力の変更した場合の PM 排出量の変化を Fig. 6、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. 7 に示す。

Fig. 6 より、正味平均有効圧 0.24MPa の場合、BDF 使用時の PM 排出量は軽油使用時を上回っていることがわかる。しかし、燃料噴射圧力の上昇とともに BDF 使用時の PM 排出量は著しく低減する。また、負荷が上昇した正味平均有効圧 0.36MPa の場合、使用燃料による PM 排出量の差はほとんどなくなる。これらの燃料噴射

圧力および負荷の上昇に伴う BDF 使用時の PM 排出量の変化からも、軽油と比較して着火性が劣る BDF であっても燃焼状態が改善されているといえる。

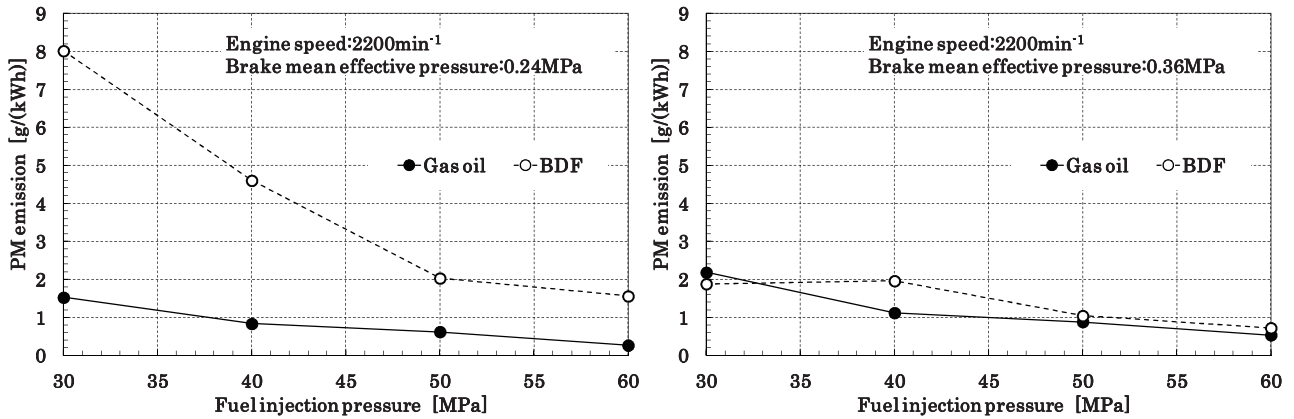


Fig. 6 Variations of PM emission with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF for the brake mean effective pressures 0.24MPa (left) and 0.36MPa (right)

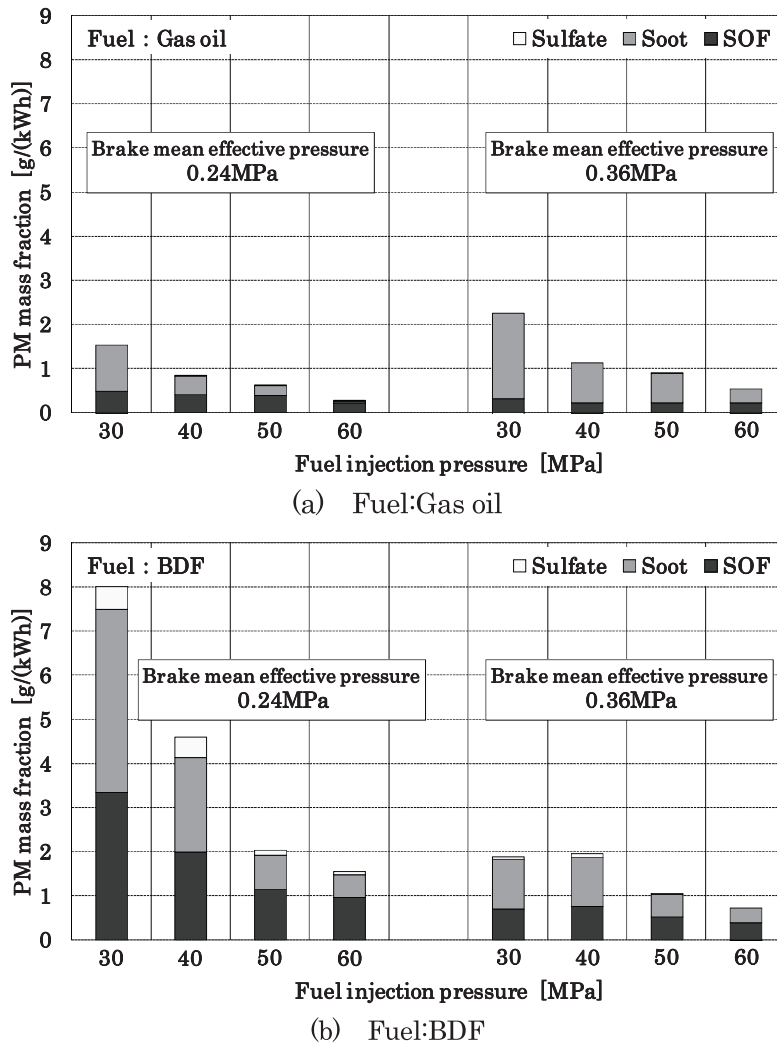


Fig. 7 Variations of mass fraction of the sulfate, soot and SOF contained in PM with fuel injection pressure measured by using gas oil (a) and BDF (b) for the engine speed 2200min⁻¹

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. 7 より、いずれの燃料を使用した場合も燃料噴射圧力が上昇するとともに、とくに Soot が低減することがわかる。軽油使用時に負荷が増加した場合、PM 中の SOF は低減するものの、Soot は増加することがわかる。これに対し、BDF 使用時は低負荷の場合、SOF および Soot とともにその量は軽油使用時を上回るが、負荷が増加すると、SOF および Soot は低減し、とくに Soot は軽油使用時と同等の量となる。すなわち、負荷の増加に伴い燃焼温度が上昇するため、いずれの燃料も未燃焼として排出される SOF は低減するといえる。また、負荷が増加し燃焼時の酸素濃度が低下する条件となっても、BDF 使用時は燃焼温度の上昇による着火性の改善により含有酸素が有効に作用し、Soot の生成を抑制していることが考えられる。

4. 結 言

BDF を用いたディーゼルエンジンの排出ガス特性を明らかにするため、コモンレール燃料噴射システムを用いて燃料噴射圧力を変更し、PM 排出特性に着目しながら運転条件と排出ガス特性の関係を検討した。その結果、低負荷運転時は、軽油使用時と比較して BDF 使用時の排出ガス特性は劣ることを確認した。BDF は引火点および動粘度が高く着火性に劣るため、供給燃料が少なく燃焼温度が上昇し難い運転条件においては、良好な燃焼を行えず、未燃焼燃料の増加に伴い PM 排出量は増加する。しかし、BDF 使用時の燃料噴射圧力を上昇させることにより、燃焼状態は改善され、とくに高負荷運転においては、BDF 使用時の PM 排出量は軽油と同程度に低減し、熱効率および NO_x 濃度は軽油使用時を上回ることがわかった。すなわち、高負荷運転時は燃焼温度が上昇するため、着火性の劣る BDF であっても含有酸素が燃焼を促進し、良好な燃焼を実現することができる。

また、BDF を用いながら EGR 装置を導入した場合、給気中の酸素濃度が低下して NO_x 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_x、PM を同時に低減する可能性がある。

文 献

- (1) 矢澤滋夫, “大型車用ディーゼルエンジンの排出ガス低減技術について”, Motor Ring, No.35(2012), pp.1-8, 自動車技術会.
- (2) 池上詢, バイオディーゼル・ハンドブック(2006), p.7, 日報出版.
- (3) 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.
- (4) 位田晴良, 川合明日香, 高山博貴, 永田卓也, “生物資源由来燃料を用いたディーゼルエンジンにおける燃料噴射圧力と運転特性の関係”, 日本機械学会 2015 年度年次大会 DVD 論文集(2015)
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 島津テクノリサーチ, 測定分析結果報告書, 発行番号 KC-24895(2005).

(平成 28 年 3 月 31 日受理)