

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の変更*

位田 晴良^{*1}, 上嶋 敏裕^{*2}, 三好 清隆^{*2}

Change in Fuel Injection Pressure of Diesel Engine by Using Bio Fuel

Haruyoshi IDA^{*1}, Toshihiro UEJIMA and Kiyotaka MIYOSHI

^{*1} Department of Mechanical Engineering

BDF (Bio Diesel Fuel) which has drawn attention as an alternative fuel containing a lot of oxygen promotes the combustion of diesel engines, hence the improvement in thermal efficiency can be expected. However, the atomization characteristics in the case of BDF are worse than gas oil because the kinetic viscosity is high, and the PM emission tends to increase compared to using gas oil. In this research, the relation between the exhaust gas characteristics and the combustion characteristics were examined respectively in the performance tests by the diesel engines with the common rail fuel injection system that can change fuel injection pressure by using gas oil and BDF. As a result, it was clarified that the operating characteristics were improved by injecting BDF with high pressure.

Key Words : Diesel Engine, Bio Diesel Fuel, Fuel Injection Pressure, Exhaust Gas Characteristic

1. 緒 言

ディーゼルエンジンの改良は、高出力など動力性能面の向上は当然のことながら、それに加えて自動車から排出される有害物質の低減技術向上が求められている。多くのディーゼルエンジンには NO_x 排出量の低減を目的とした EGR (排ガス再循環) 装置が導入されているが、一般に NO_x (窒素酸化物) および PM (粒子状物質) 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になっている。

一方、近年石油代替燃料として BDF (バイオディーゼル燃料) 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^{(1),(2)}。

BDF は軽油に比べて酸素含有量が高く燃焼を促進するが、NO_x の排出量は高くなる傾向にある。また、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、軽油を燃料とするディーゼル車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、理想的な燃焼を図ることができる。

ディーゼルエンジンの排ガスに含まれる煤は、燃料の粒子が空気と十分混合できず、部分的に不完全燃焼を起こすことで発生する。これに対し、コモンレール燃料噴射システムを用いて高圧で燃料噴射することにより、微細な噴霧の形成が可能となるため空気との混合が進み完全燃焼に近づく。すなわち、煤の排出量を低減するとともに熱効率が向上することになる。

* 原稿受付 2014年2月28日

^{*1} 機械工学科

^{*2} センター管理課

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

本研究では、BDFを用いたディーゼルエンジンにおいて性能試験を行い、軽油を使用した場合の運転特性と比較を行う。また、動粘度が高く微細な噴霧が形成され難いというBDFの欠点に対して、コモンレール燃料噴射システムを用いて燃料の噴射時期ならびに噴射圧力を変更することにより、運転特性が改善される運転条件を明らかにすることを目的としている。

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ける燃焼状態の比較検討を行うため、以下の性能試験を行う。これらの結果から軽油およびBDFを用いた場合の比較することによりBDFに最適な運転条件を検討する。

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）および排ガス計測装置（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燃料噴射時期をBTDC（上死点前）7°～32°に変更し、燃費が最も良くなる燃料噴射時期を確認する。さらに、燃費が最も良い燃料噴射時期において燃料噴射圧力を30～60MPaに変更した場合の運転を行い、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。吸排気弁はそれぞれ1個であり、燃焼室はトロイダル形であることから主に吸気過流はスキッシュおよびスワールが強いものと考えられる^③。また、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、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。

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

| | |
|---|------------------------------------|
| Engine type | Horizontal, water cooled, 4 stroke |
| Combustion chamber | Direct injection (trotydal 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 fuel^{(5),(6)}

| 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ることになり、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 燃料噴射時期と図示熱効率

エンジン回転数 1000min^{-1} , 1400min^{-1} において、軽油を用いて燃料噴射時期を変更した場合の図示熱効率の変化を Fig.1 に示す。また、各回転数において最も図示熱効率が高くなる燃料噴射時期を最適燃料噴射時期として Table 3 に示す。

Fig.1, Table 3 より、エンジン回転数を上昇させるほど最適燃料噴射時期は進角することがわかる。

なお、 2200min^{-1} の最適燃料噴射時期は 1800min^{-1} の場合よりも遅くなるが、今回導入したインジェクタとエンジンとのマッチングが影響し、エンジン回転数に対する最適燃料噴射時期の傾向が逆転したものと考えられる。次節以降においては、最適燃料噴射時期を適用した場合に得られた実験結果を示す。

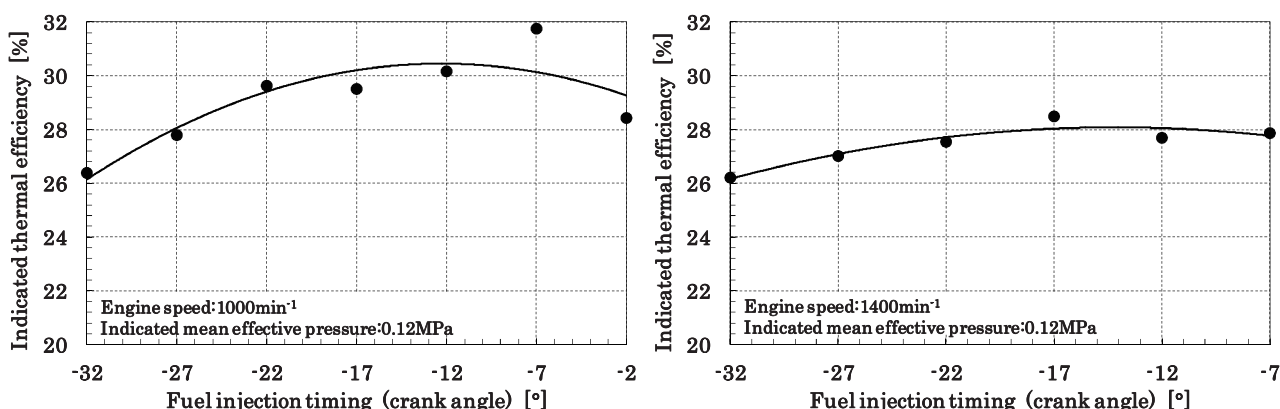


Fig.1 Variations of indicated thermal efficiency with fuel injection timing measured by using gas oil for the engine speeds 1000min^{-1} and 1400min^{-1}

Table 3 Relationship between engine speed and best fuel injection timing

| Engine speed | Best fuel injection timing (crank angle) |
|-----------------------|--|
| 1000min^{-1} | -7° |
| 1400min^{-1} | -17° |
| 1800min^{-1} | -27° |
| 2200min^{-1} | -22° |

3.2 燃料噴射圧力とシリンダ圧力

燃料噴射圧力を変更した場合の燃焼状態を確認するためにシリンダ圧力を測定した。実験結果の例として、軽油および BDF を用いてエンジン回転数を 2200min^{-1} とし、燃料噴射圧力を 30MPa および 60MPa とした場合の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 Fig.2 に示す。また、以降に示す図は、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、それらを比較する。

Fig.2 より、いずれの燃料噴射圧力においても 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。

着火時期に着目すると、燃料噴射圧力の上昇に伴い着火による圧力上昇の開始が早くなっており、着火遅れ期間の短くなっていることが分かる。これは、燃料噴射圧力を上昇させることにより燃焼状態が改善されることが考えられ、着火時期は進角することになるためシリンダ圧力の最大値は上昇する。また、BDF 使用時は、燃料噴射圧力 30MPa において軽油使用時よりも着火時期は遅くなるが、燃料噴射圧力 60MPa においては、軽油使用時よりも着火時期は早くなる。これは、動粘度の高い BDF を用いた場合に燃料噴射圧力を上昇させることにより、噴霧が微細化されるとともに含有酸素が有効に作用し燃焼が促進されたものと考えられる。

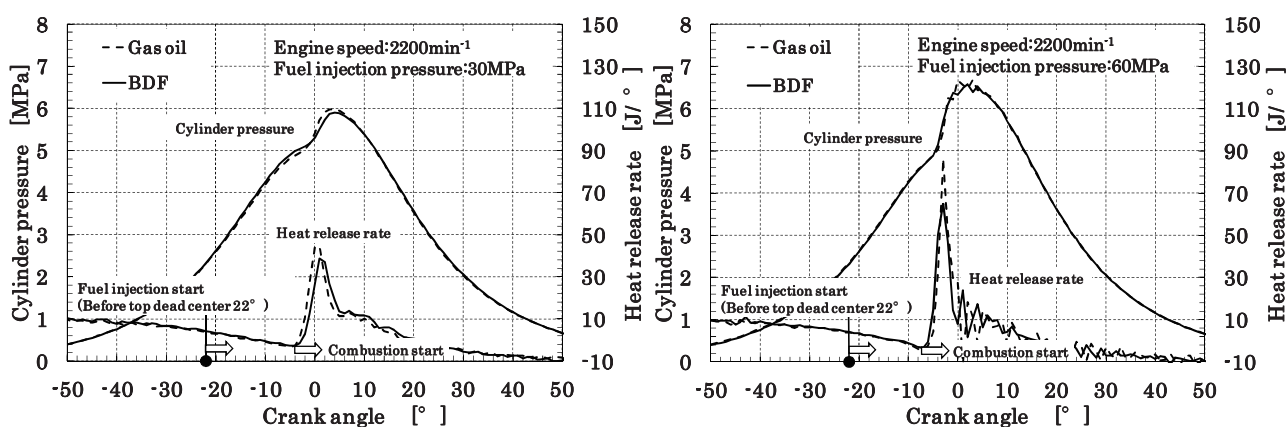


Fig.2 Variations of cylinder pressure and heat release rate with crank angle measured by using gas oil and BDF for the fuel injection pressures 30MPa and 60MPa

3.3 燃料噴射圧力と図示熱効率

性能試験の結果から、軽油および BDF を用いてエンジン回転数を 1000min^{-1} および 2200min^{-1} とし、燃料噴射圧力を変更した場合の図示熱効率の変化を Fig.3 に示す。

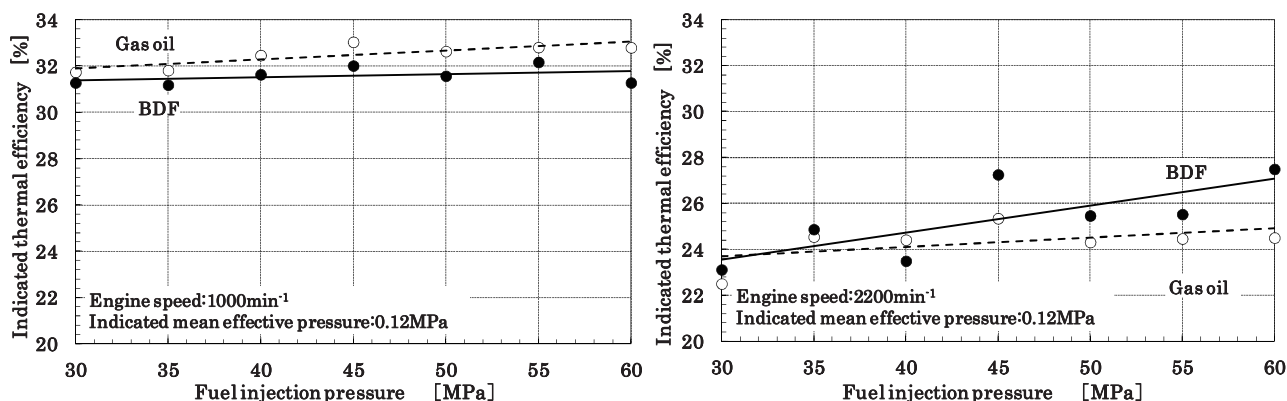


Fig.3 Variations of indicated thermal efficiency with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF for the engine speeds 1000min^{-1} and 2200min^{-1}

Fig.3より,いずれの燃料を用いた場合もエンジン回転数の上昇とともに図示熱効率は低下することがわかる.これは,エンジン回転数の上昇に伴い,クランク角度に対して燃焼期間が長くなるため膨張時の燃焼期間が増大する.すなわち,理論サイクルにおける等圧膨張比が大きくなるため熱効率が低下し当然の傾向である.

また,1000min⁻¹においてBDF使用時の図示熱効率は軽油使用時の場合を下回っている.しかし,エンジン回転数を2000min⁻¹に上昇させた場合,BDF使用時の図示熱効率は軽油使用時の場合を上回り,燃料噴射圧力の上昇に伴い図示熱効率の向上は著しくなる.これは,BDFは軽油と比較すると動粘度が高いため,吸気過流が弱い場合,空気との混合に対しては不利であるが,エンジン回転数の上昇とともに吸気過流が強くなると着火が促進され,図示熱効率が高くなるものと考えられる.

3.4 燃料噴射圧力とNO_x濃度

性能試験の結果から,軽油およびBDFを用いてエンジン回転数を1000min⁻¹および2200min⁻¹とし,燃料噴射圧力を変更した場合のNO_x濃度の変化をFig.4に示す.

Fig.4より,いずれの燃料を用いた場合も1000min⁻¹の場合と比較すると2200min⁻¹の場合には,燃料噴射圧力の上昇とともにNO_x濃度は上昇することがわかる.これは,エンジン回転数が高い場合は低回転時よりも吸気過流が強いため,燃料噴射圧力を上げることにより良好な燃焼が行われNO_x濃度が増加するものと考えられる.

また,BDFは軽油に比べて酸素含有量が多いため,軽油使用時よりもNO_x濃度が高くなることが予想されたが,本研究における無負荷運転では,BDF使用時は軽油使用時よりもNO_x濃度が低くなっていることがわかる.前述のとおり,1000min⁻¹においては吸気過流が弱いため,とくに動粘度の高いBDF使用時に燃料噴霧と空気の混合が促進されずNO_x濃度は低くなるが,2000min⁻¹においては,BDFを用いた場合に着火遅れ期間が短くなり火炎伝播期間の急激な燃焼が抑えられるため,軽油使用時よりもNO_x濃度は低くなるものと考えられる.

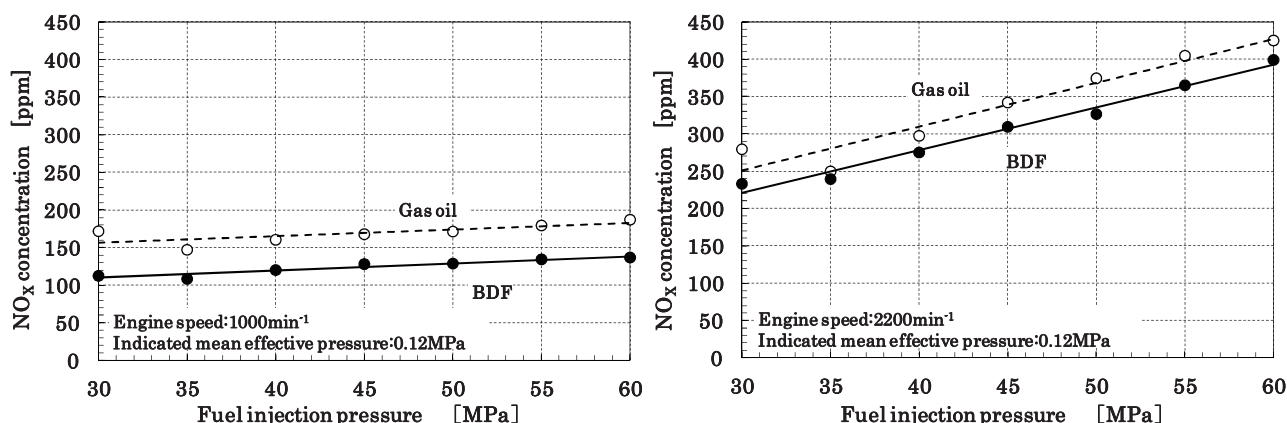


Fig.4 Variations of NO_x concentration with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF for the engine speeds 1000min⁻¹ and 2200min⁻¹

3.5 燃料噴射圧力とPM排出量

性能試験の結果から,軽油およびBDFを用いてエンジン回転数を1000min⁻¹および2200min⁻¹とし,燃料噴射圧力を変更した場合のPM排出量の変化をFig.5,2000min⁻¹において排出されたPMに含まれる成分の比較をFig.6に示す.

Fig.5より,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,BDFの動粘度は軽油に比べて高いことが影響しPM排出量は増加することが考えられる.このようなPM排出特性は,本研究のようにBDFを無負荷運転時に使用した場合,燃焼室温度が上昇しないために顕著になるが,高負荷で燃焼温度が上昇する運転条件では,PM生成が抑制されるものと考えられる.また,1000min⁻¹の場合と比較すると2200min⁻¹の場合には,燃料噴射圧力の上昇とともにPM排出量は低下することがわかる.

PMに含まれる成分は、硫酸化物 (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、Fig.6 より、本研究においては、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、エンジン回転数 2200min^{-1} において BDF を使用した場合、燃料噴射圧力の上昇に伴い PM 排出量が低下する。これは PM に含まれる SOF が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。すなわち、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となり、SOF は増加す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ると燃料噴霧と空気の混合が促進されるため、BDF の含有酸素が有効に働き、SOF とともに PM 排出量が減少することが考えられる。とくに BDF 使用時の SOF の低減率が大きいことから、燃料噴射圧力の高圧化は BDF の噴霧微細化に有効であるといえる。

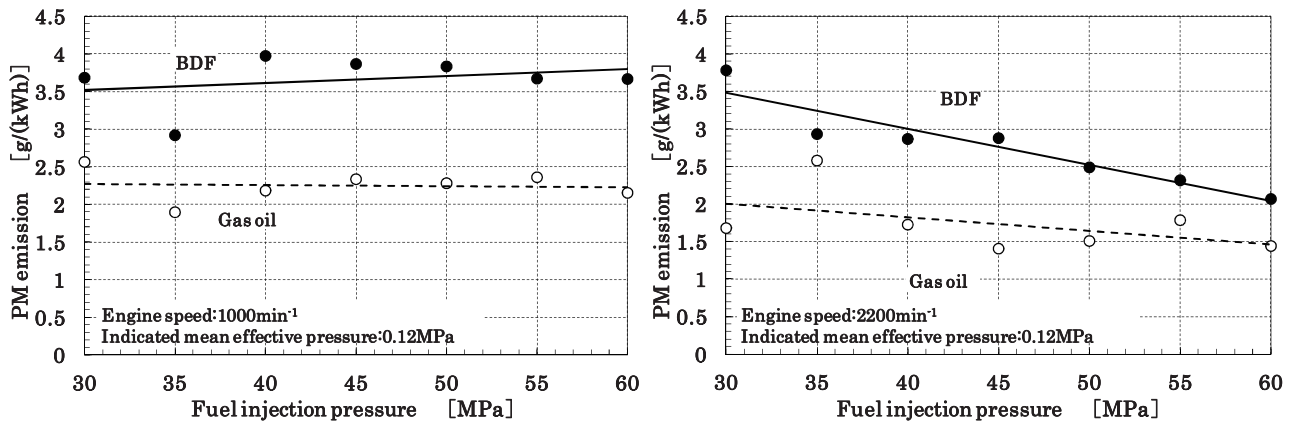


Fig.5 Variations of PM emission with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF for the engine speeds 1000min^{-1} and 2200min^{-1}

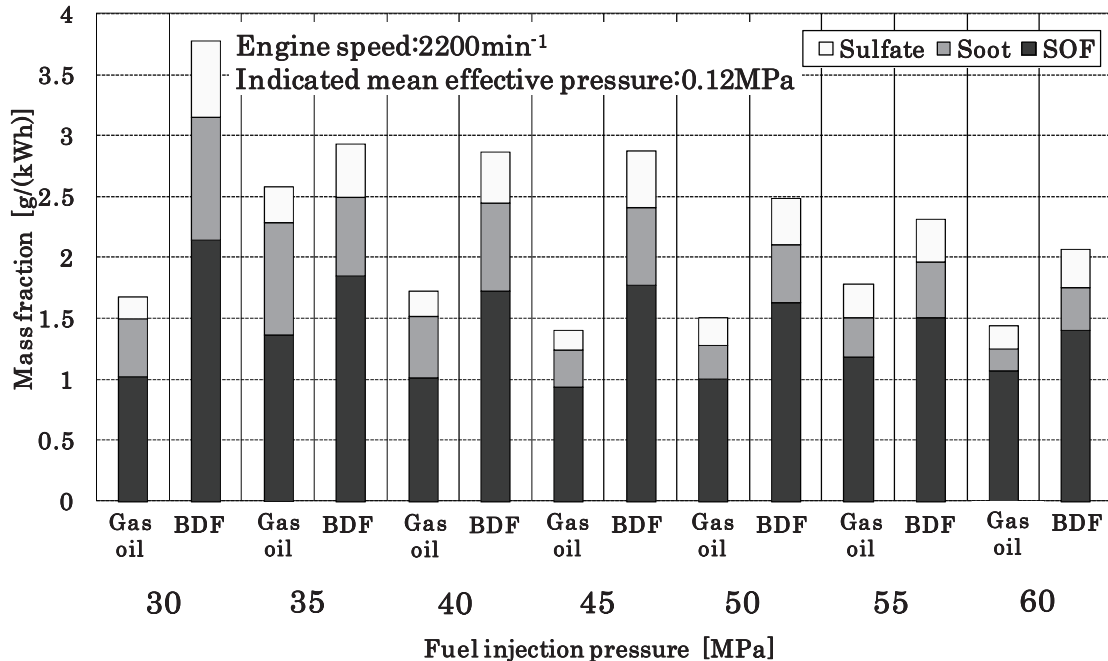


Fig.6 Variations of mass fraction of the sulfate, soot and SOF contained in PM with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF for the engine speeds 1000min^{-1} and 2200min^{-1}

3.6 ポリトロープ指数

BDF 使用および燃料噴射圧力変更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の変化を Fig.7 に示す. Fig.7 は実験結果の例として, エンジン回転数 1000min^{-1} 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 を使用した場合の燃料噴射圧力に対するポリトロープ指数の関係を Fig.8 に示す.

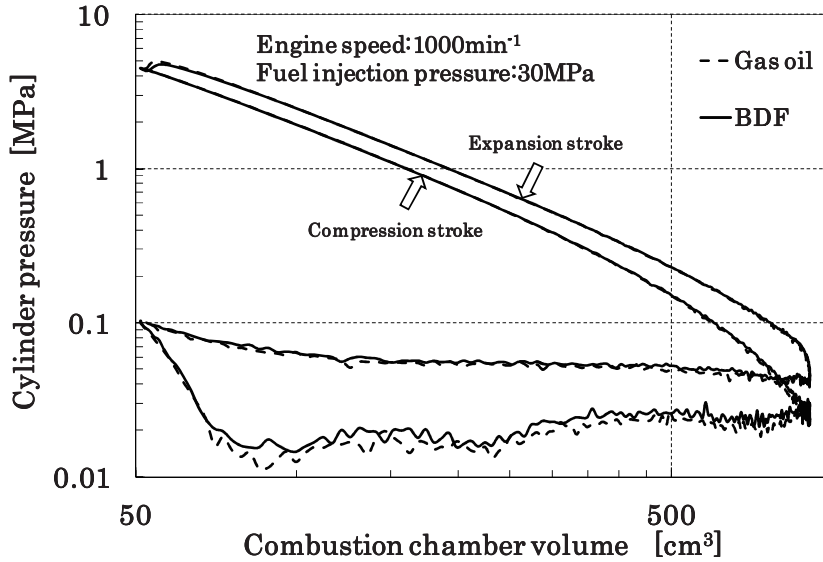


Fig.7 Variations of cylinder pressure with combustion chamber volume measured by using gas oil and BDF for the engine speed 1000min^{-1}

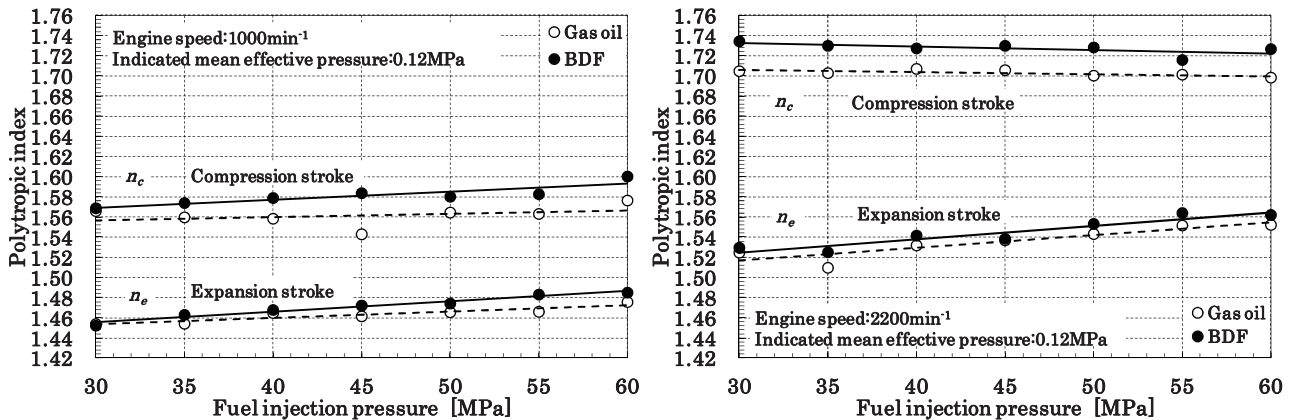


Fig.8 Variations of polytropic index with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF for the engine speeds 1000min^{-1} and 2200min^{-1}

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.

Fig.8 より、いずれのエンジン回転数においても燃料噴射圧力の変更に対してポリトロープ指数の変化は大きくないものの、 1000min^{-1} 時と比較すると 2200min^{-1} 時は、いずれの燃料を使用した場合も残留ガスまたは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僅かながら増加することがわかる。これは、エンジン回転数の上昇に伴いガス交換が不完全になり、圧縮行程における残留ガス量からの吸熱量が増加することが考えられる。また、膨張行程においては、供試エンジンに対するインジェクションノズルのマッチングまたは燃料噴射時期が最適ではなく、燃料噴射圧力を上昇させるほど噴射された燃料がピストンやシリンダ壁に直接衝突し、これらの部品の冷却および未燃焼燃料による熱輸送のため放熱量が増加することが考えられる。

また、いずれの運転条件においても軽油使用時と比較すると BDF 使用時に圧縮時の吸熱量および膨張時の放熱量が増加することがわかる。膨張行程および圧縮行程における熱伝達は前述の原因が考えられるが、BDF は動粘度が高いため熱輸送量が大きくなることが考えられる。これは Fig.6 において、軽油使用時と比較すると BDF 使用時の PM に含まれる SOF が多いことから熱輸送量の増大を推測できる。

これらより、BDF を用いる場合、エンジンとインジェクションノズルのマッチングはとくに重要な因子であるといえる。

4. 結 言

ディーゼルエンジンにおいて BDF を用いる場合、動粘度が高く微細な噴霧が形成され難いという欠点がある。これに対して本研究では、運転特性が改善される運転条件を明らかにすることを目的として、コモンレール燃料噴射システムを用いて燃料の噴射時期ならびに噴射圧力を変更する性能試験を行った。また、本研究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。つまり BDF を用いる場合、軽油使用時よりも不利な燃焼条件となる。この条件において軽油使用時と比較し、BDF の使用が有効となる運転条件を検討した。

燃料噴射圧力を上昇させることにより、BDF を用いた場合は図示熱効率が向上することを確認し、この効果は、BDF と空気の混合が促進されるエンジン回転数が高い場合に著しいことがわかった。さらに PM 排出量は低減し、この低減率は軽油使用時よりも大きいことから、燃料噴射圧力の高圧化は BDF の噴霧微細化に有効であるといえる。しかし、動粘度の高い BDF を用いる場合、エンジンに最適なインジェクションノズルを選定することがとくに重要であることがわかった。

また、BDF 使用時の NO_x 濃度は軽油使用時の場合を下回り、BDF 使用時と軽油使用時の燃焼状態を比較すると、BDF 使用時の着火時期が早くなり着火遅れ期間が短くなることを確認した。これにより、前述の熱効率向上および PM 排出量低減に有利に作用するとともに火炎伝播期間における急激な燃焼が抑えられ、 NO_x 濃度も低減されるものと考えられる。さらにこれより、BDF の燃焼特性に適した燃料噴射時期は軽油使用時とは異なることが推測できる。

これらのことから、燃料噴射圧力の高圧化は BDF を用いた場合の運転特性の改善に有効であり、BDF に最適な噴射時期を導入することにより、この効果は拡大する可能性がある。

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) 辻村欣司, エンジンの辞典(1994), pp.558-559, 朝倉書店.
- (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) 島津テクノリサーチ, 測定分析結果報告書, 発行番号 KC-24895(2005).
- (7) 小林清志, 荒木伸幸, 牧野敦, 機械工学基礎講座 燃焼工学 -基礎と応用-(1988), p.166, 理工学社.

(平成 26 年 3 月 31 日受理)