

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 燃料噴射圧力と窒素酸化物排出特性の関係*

位田 晴良^{*1}, 川合 明日香^{*2}

Relationship between Fuel Injection Pressure and NO_x Exhaust Characteristics of Diesel Engines Using Bio Fuel

Haruyoshi IDA^{*1} and Asuka KAWAI

^{*1} Department of Mechanical Engineering

BDF (Bio Diesel Fuel) containing a lot of oxygen promotes the combustion of diesel engines, hence the improvement in thermal efficiency can be expected. Moreover, the NO_x (Nitrogen Oxides) density rises when the combustion of the diesel engine is promoted. However, the previous researches found out that the NO_x density of the diesel engine using BDF decreased compared with using gas oil. In this research, by using gas oil and BDF, the relationship between the fuel injection pressure and the NO_x exhaust characteristics was examined by testing the performance of the diesel engine with a common rail fuel injection system. As a result, it was clarified that the combustion characteristic of BDF was inferior to gas oil due to high kinematic viscosity, but the characteristic could be improved by injecting BDF with high pressure.

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

1. 緒 言

ディーゼルエンジンにおける熱効率および有害物質の発生は燃焼行程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が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する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_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^{(1),(2)}。

* 原稿受付 2015年2月27日

^{*1} 機械工学科

^{*2} 機械工学科学生

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

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。

これまでの研究^③より、運転条件が低負荷である場合、軽油使用時と比較するとBDF使用時のNO_x濃度は低減することがわかっている。また、燃焼状態を比較すると、軽油使用時よりもBDF使用時の着火時期が早くなり着火遅れ期間^④が短くなることが確認されている。これは、BDFは軽油と比較して酸素含有量が高く、着火遅れ期間における燃焼を促進するため、火炎伝播期間における急激な燃焼が抑えられることによりNO_x濃度が低減する可能性がある一方、軽油と比較するとBDFは発熱量が低く動粘度が高いため、良好な燃焼が行われず燃焼温度が上昇しない結果、NO_x濃度が低減する可能性もある。

そこで本研究では、EGR装置付加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、軽油を使用した場合の運転特性の比較を行う。とくに、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、NO_x排出特性を明らかにすることにより、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、着火性が改善される運転条件を検討する。

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、燃料噴射圧力の変更に対するNO_x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。これらの結果からBDFを用いた場合の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から構成される。軽油およびBDFを用いてエンジン回転数1000～2200min⁻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EGR率（吸気中に混入する排ガスの体積割合）を0%～50%、また、燃料噴射圧力を30～60MPaに変更する運転を行い、容積式流量検出器（小野測器 FP-2140HA）による燃料消費量、空燃比データロガ（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の着火特性およびBDFの使用が有効となる運転条件を検討する。

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。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^⑤。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濃度は高いことがわかる。

Table 1 Specification of diesel engine used in performance examination ^⑥

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 experimental fuel^{(7),(8)}

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困難であることが判明している。したがって、性能試験において、無負荷運転時は正確なクランク角度信号の記録が可能であるため、シリンダ圧力の変化より燃焼状態の把握を図るが、負荷運転時はシリンダ圧力を確認することができないため、これを除いたその他の運転特性より燃焼状態の検討を行う。

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 0.36MPa, EGR 率 0~30% 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率を Table 3, 各運転条件における正味熱効率の推移を Fig. 1 に示す。

Fig. 1 より、いずれの燃料を用いた場合も燃料噴射圧力の上昇に伴い、正味熱効率は向上することがわかる。これは、燃料噴霧の微細化に伴い燃焼状態が改善されるためである。同じ運転条件においては、BDF 使用時は軽油使用時と比較すると正味熱効率が低いことが分かる。これは、軽油と比較して動粘度が高く発熱量の低い BDF を用いると噴射期間が延長することに伴い、膨張時の燃焼期間が増大するためであり、すなわち、等圧膨張比が増大するため正味熱効率が低下したものと考えられる。

一方、Table 3 より、ほとんどの運転条件において、軽油使用時よりも BDF 使用時に燃料噴射圧力の変更に対する正味熱効率の変化率が大きいことがわかる。したがって、本研究では燃料噴射圧力の上限が 60MPa であったが、さらに燃料噴射圧力を上昇させた場合、BDF 使用時の正味熱効率は軽油使用時を上回ることが予想される。

Table 3 Comparison of change rate of brake thermal efficiency by using gas oil and BDF

Load (Brake mean effective pressure) [MPa]	Fuel	Change rate of brake thermal efficiency [% / MPa]			
		EGR rate 0%	EGR rate 10%	EGR rate 20%	EGR rate 30%
0.24	Gas oil	0.043	0.127	0.073	0.141
	BDF	0.087	0.079	0.096	0.153
0.36	Gas oil	0.087	0.208	0.356	0.388
	BDF	0.173	0.246	0.494	0.371

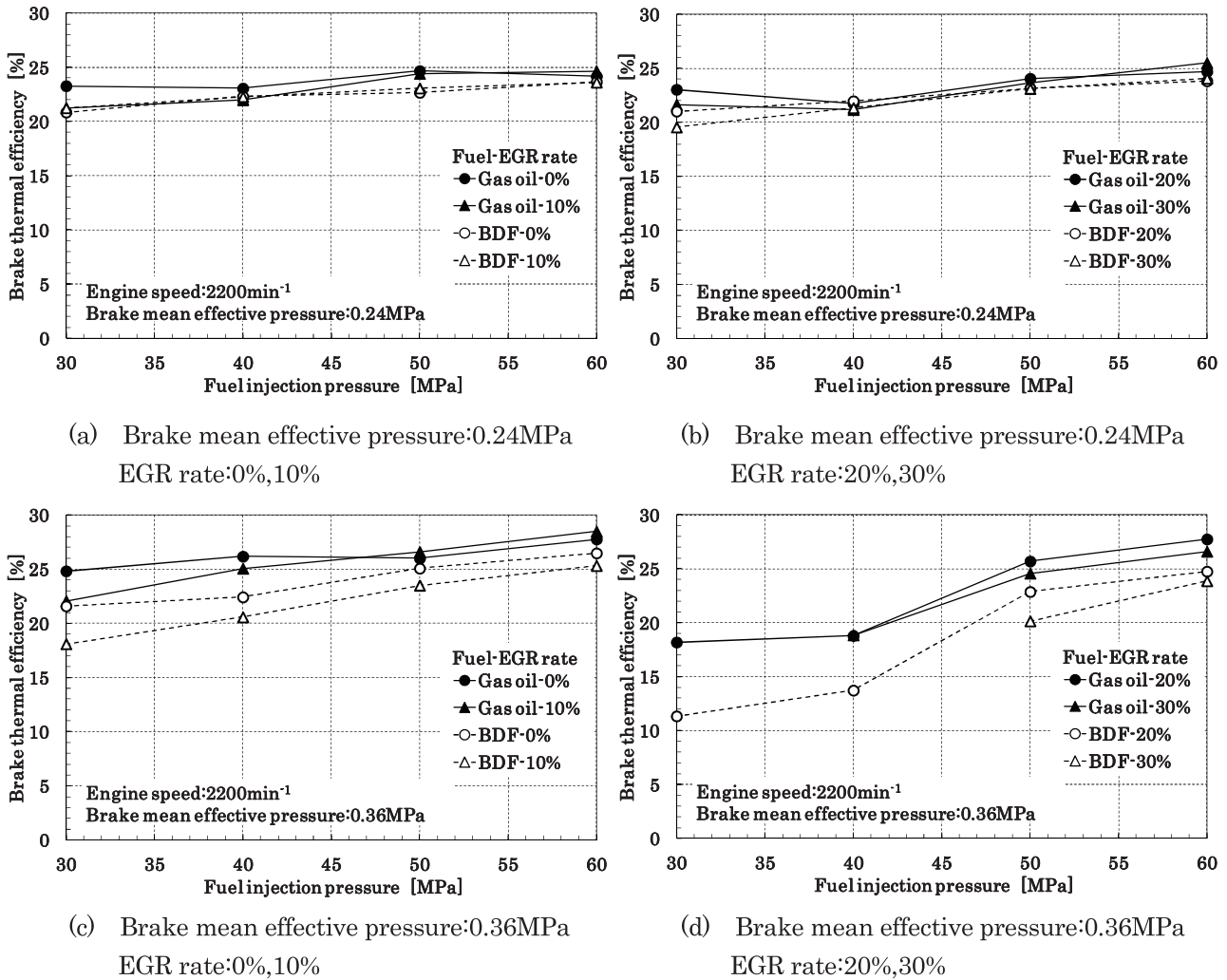


Fig.1 Variations of brake thermal efficiency with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF

3.2 燃料噴射圧力と空燃比

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

性能試験の結果より、エンジン回転数 2200 min⁻¹、正味平均有効圧 0.36 MPa、EGR 率 0~30%において軽油および BDF を用いて燃料噴射圧力を変更した場合の空燃比の推移を Fig. 2、燃料噴射圧力の変更に対する空燃比の変化率を Table 4 に示す。

Fig. 2 より、いずれの燃料を使用した場合も低負荷時 (Fig. 2 (a), (b)) と比較すると、高負荷時 (Fig. 2 (c), (d)) の空燃比は低いことが分かり、負荷とともに排ガス中の酸素濃度が変化することが確認できる。また、軽油使用時と BDF 使用時を比較すると、低負荷時は使用燃料による空燃比の差はほとんど見られない。しかし、高負荷時は軽油使用時と比較すると BDF 使用時の空燃比が低いことが分かる。軽油と比較して噴霧特性が劣る BDF を用いると、燃料消費量の増加とともに燃焼生成物が増加し、相対的に排ガス中の酸素濃度が低下するため BDF 使用時の空燃比が低下するものと考えられる。すなわち、軽油使用時と比較すると、同じ運転条件における BDF 使用時の空燃比が下回ることから、軽油よりも BDF の燃焼特性は劣ることが確認できる。これは、3.1 節の正味熱効率の変化の傾向と一致しており、BDF の性状を反映しているといえるが、Table 4 に示すように、やはり燃料噴射圧力の上昇に対する BDF 使用時の空燃比の変化率は軽油使用時よりも大きい。したがって、さらに燃料噴射圧力を上昇させて、BDF の噴霧の微細化が促進されると、含有酸素が有効に作用するようになり、BDF 使用時の空燃比は軽油使用時を上回ることが予想される。

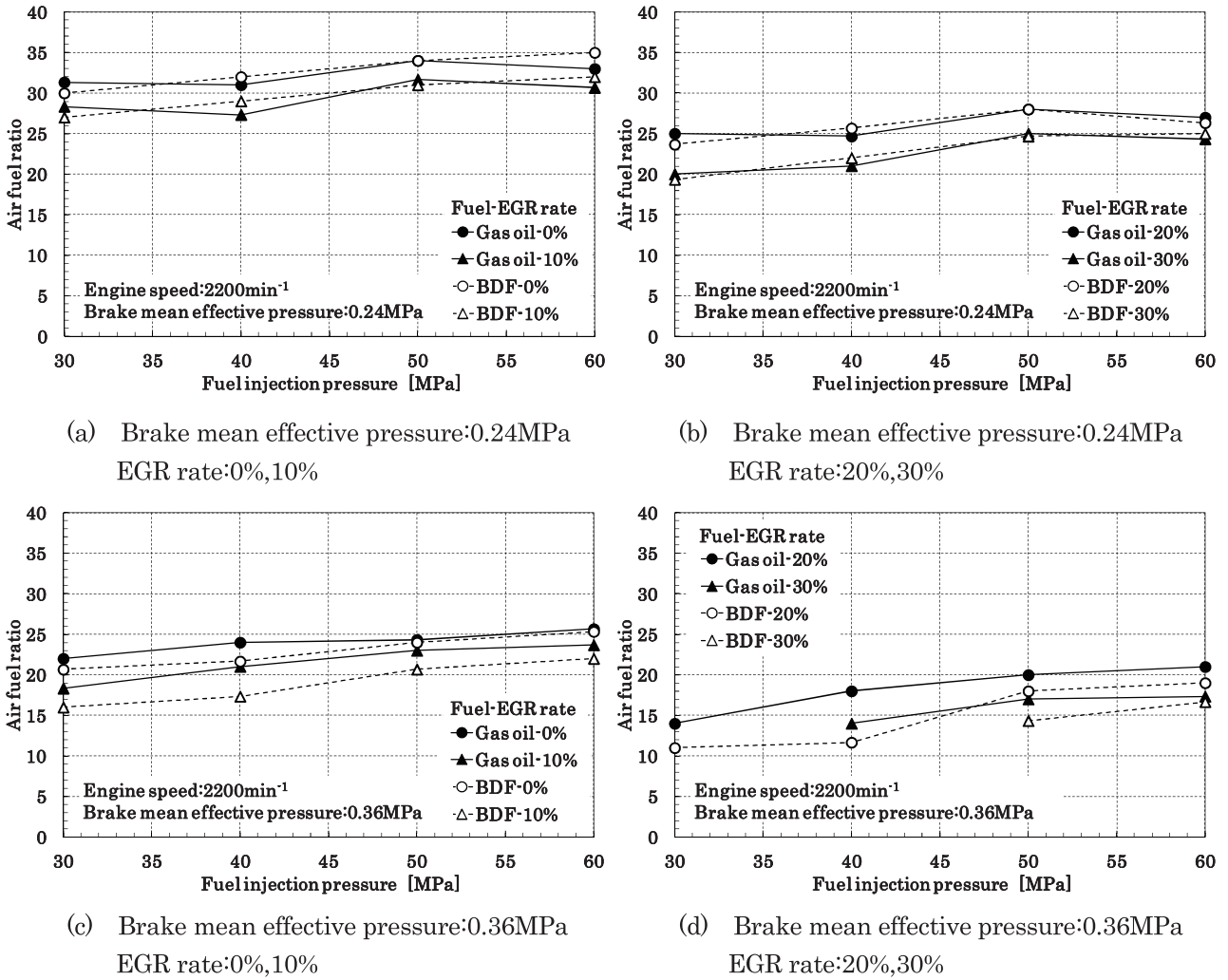


Fig. 2 Variations of air fuel ratio with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF

Table 4 Comparison of change rate of air fuel ratio by using gas oil and BDF

Load (Brake mean effective pressure) [MPa]	Fuel	Change rate of air fuel ratio [/ MPa]			
		EGR rate 0%	EGR rate 10%	EGR rate 20%	EGR rate 30%
0.24	Gas oil	0.080	0.113	0.093	0.170
	BDF	0.170	0.170	0.103	0.197
0.36	Gas oil	0.113	0.180	0.230	0.167
	BDF	0.163	0.213	0.303	0.233

3.3 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 0.36MPa、EGR 率 0～30%において軽油および BDF を用いて燃料噴射圧力を変更した場合の NO_x 濃度の推移を Fig. 3、燃料噴射圧力の変更に対する NO_x 濃度の変化率を Table 5 に示す。

Fig. 3 より、いずれの燃料と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ためであると考えられる。また、同じ運転条件において、BDF 使用時は軽油使用時と比較すると NO_x 濃度が低いことが分かる。この傾向は、運転条件が低負荷である場合と同じであるが⁹⁾、3.1、3.2 節に述べるように、BDF 使用時は軽油使用時

と比較すると正味熱効率および空燃比が低いことから、良好な燃焼状態ではないといえ、このため NO_x 濃度が低いものと考えられる。しかし、Table 5 に示すように、BDF 使用時は軽油使用時と比較すると、燃料噴射圧力の上昇に対する正味熱効率および空燃比の変化率は大きいものの NO_x 濃度の変化率は小さいことがわかる。すなわち、燃料噴射圧力が低い場合、BDF 使用時は燃焼状態が良好ではないため NO_x 濃度は軽油使用時を下回るが、燃料噴射圧力の上昇とともに BDF の含有酸素による燃焼促進効果が着火遅れ期間を短縮し、火炎伝播期間における急激な燃焼を抑制するため最高燃焼温度は低くなり、軽油使用時と比較すると NO_x 濃度の変化率が小さくなるものと考えられる。したがって、さらに BDF の燃料噴射圧力を上昇させることにより、熱効率を向上させながら NO_x 濃度の上昇を抑制できる可能性がある。

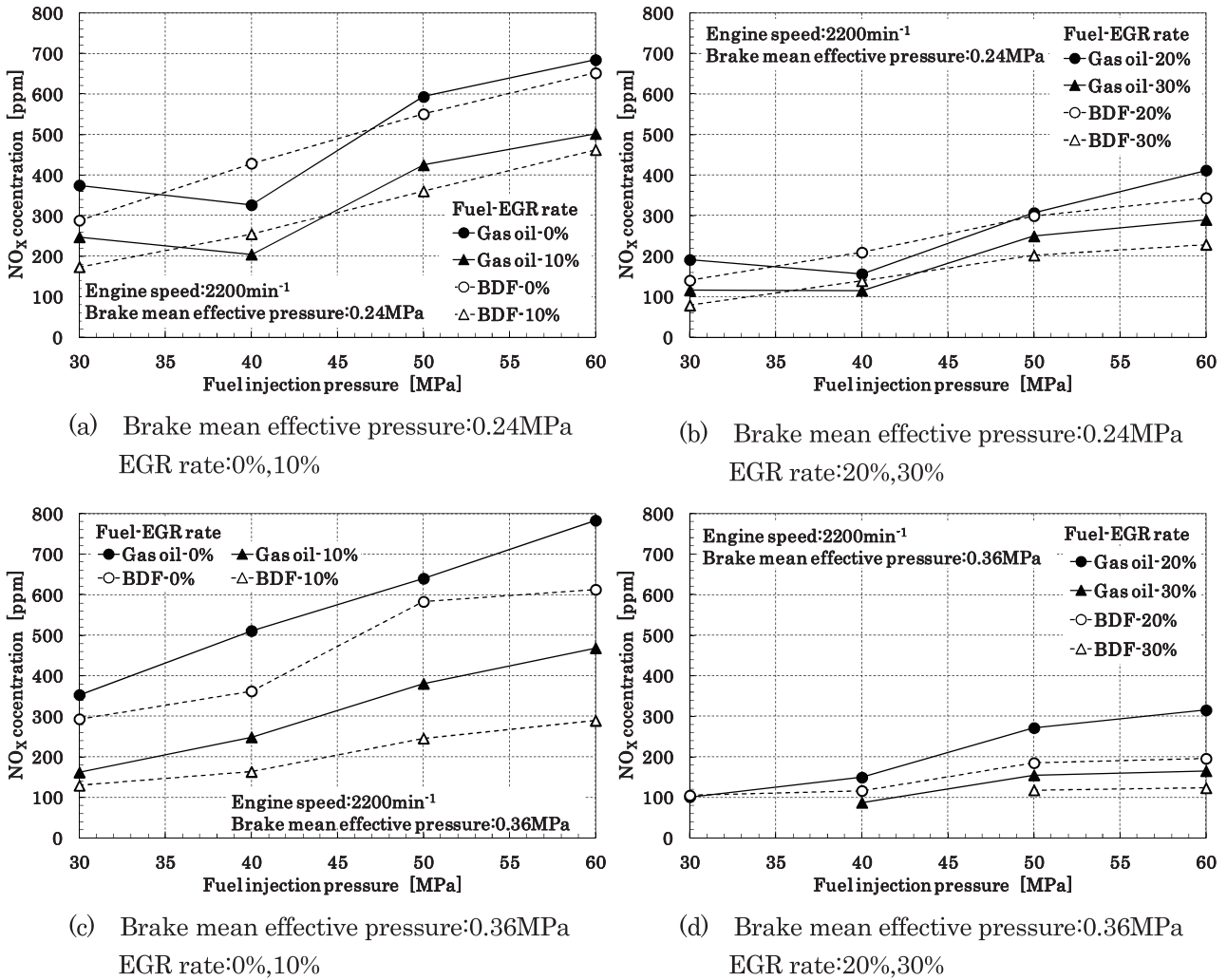


Fig. 3 Variations of NO_x concentration with fuel injection pressure measured by using gas oil and BDF

Table 5 Comparison of change rate of NO_x concentration by using gas oil and BDF

Load (Brake mean effective pressure) [MPa]	Fuel	Change rate of NO _x concentration [ppm / MPa]			
		EGR rate 0%	EGR rate 10%	EGR rate 20%	EGR rate 30%
0.24	Gas oil	12.0	9.86	8.13	6.55
	BDF	12.1	9.73	7.01	5.13
0.36	Gas oil	14.2	10.5	7.65	3.90
	BDF	11.8	5.62	3.41	0.50

3.4 EGR 率の影響

EGR 率の変更による正味熱効率および NO_x 排出特性を検討した。Fig. 1, Fig. 2 より、EGR 率を上昇させた場合、BDF 使用時は軽油使用時よりも正味熱効率および空燃比の低下率が大きいことがわかる。これは、BDF の噴霧の微細化が劣るため、EGR により吸入空気中の不活性ガス濃度が上昇すると、著しく燃焼状態が悪化するためであるといえるが、これらの傾向は燃料噴射圧力の上昇とともに改善されることがわかる。一方、Fig. 3 および Table 5 より、BDF 使用時に EGR 率を上昇させた場合の NO_x 濃度は、燃料噴射圧力を上昇させて燃焼状態が向上した場合も軽油使用時を下回り、NO_x 濃度の上昇抑制に効果がある。

3.5 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、EGR 率 0%において 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 30MPa および 60MPa に変更した場合のシリンダ圧力の変化を Fig. 4、また、燃料噴射圧力を一定として燃料噴射開始時期をクランク角度 -12°~ -42° (圧縮上死点前 12°~42°) に変更した場合のシリンダ圧力の変化を Fig. 5 に示す。

Fig. 4 より、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 (Fig. 5) と同じ傾向であるといえる。

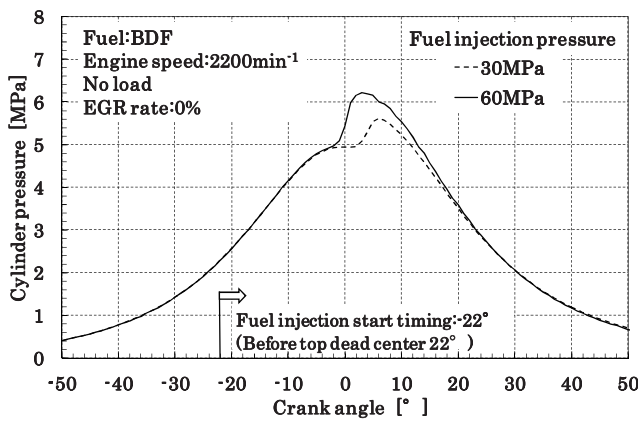


Fig.4 Variations of cylinder pressure with crank angle measured by changing fuel injection pressure

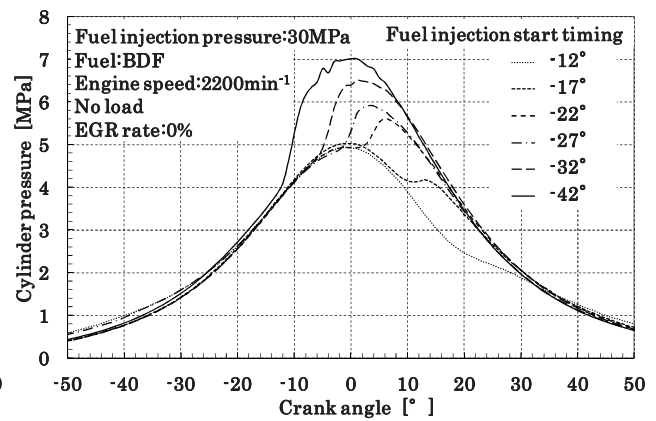


Fig.5 Variations of cylinder pressure with crank angle measured by changing fuel injection start timing

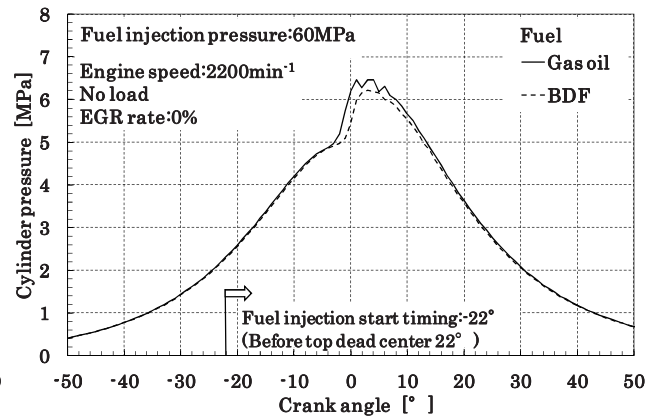
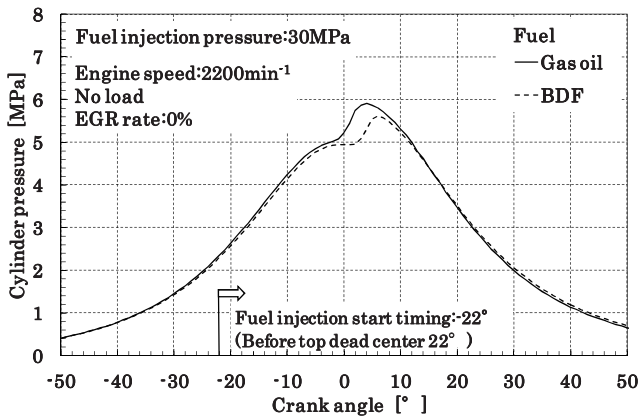


Fig. 6 Variations of cylinder pressure with crank angle measured by using gas oil and BDF for the fuel injection pressures 30MPa (left) and 60MPa (right)

そこで、燃料噴射圧力の変更に対する着火時期の変化を軽油使用時と BDF 使用時で比較する。エンジン回転数 2200min⁻¹、EGR 率 0%、燃料噴射開始時期一定として軽油および BDF を使用し、燃料噴射圧力を 30MPa および 60MPa に変更した場合のシリンダ圧力の変化を Fig. 6 示す。

Fig. 6 より、燃料噴射時期が同じであっても使用燃料により着火時期が異なることがわかる。また、燃料噴射圧力を 30MPa とした場合は、軽油使用時と比較すると BDF 使用時の着火遅れ期間が大きいことがわかる。しかし、燃料噴射圧力を 60MPa とした場合は、とくに BDF 使用時の着火遅れ期間が短縮し、軽油使用時の着火時期に近づくことが分かる。したがって、さらに燃料噴射圧力を上昇させることにより、BDF 使用時の燃焼状態は改善され、着火遅れ期間は軽油使用時より短縮される可能性がある。

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。軽油使用時と比較すると BDF 使用時の NO_x 濃度は低減することがわかっているが、これは、BDF の含有酸素が着火遅れ期間における速やかな燃焼を促進し、急激なシリンダ圧力および燃焼温度の上昇を抑制する場合が考えられる一方、軽油と比較すると BDF は発熱量が低く動粘度が高いため良好な燃焼が行われず、NO_x 濃度が低減する場合も考えられ、BDF 使用時の燃焼特性が不明であった。したがって、本研究では、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、NO_x 排出特性に着目しながら BDF の燃焼特性を確認するとともに軽油を使用した場合の運転特性と比較を行った。

本研究の性能試験より、燃料噴射圧力 30MPa～60MPa においては BDF の燃焼特性は軽油使用時に劣ることがわかった。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が高くなることがわかった。なお、現在普及しているコモンレール燃料噴射システムに適用されている燃料噴射圧力 (200MPa 程度) と比較して、大幅に低い本研究における燃料噴射圧力の上限では、BDF 使用時の正味熱効率は軽油使用時を下回ったものの、30MPa～60MPa の僅かな範囲内であっても燃料噴射圧力の変更による効果は軽油使用時よりも著しいことがわかった。また、BDF 使用時に EGR 率を上昇させた場合の NO_x 濃度は、燃料噴射圧力を上昇させて燃焼状態が向上した場合であっても軽油使用時を下回り、NO_x 濃度の上昇抑制に効果があるといえる。これらより、ディーゼルエンジンに BDF を用いる場合、EGR を適用しながら燃料噴射圧力を高く設定することにより、軽油使用時よりも顕著な運転特性の改善が望める。

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, 上嶋敏裕, 三好清隆, “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排出ガス特性の改善”, 日本機械学会 2014 年度年次大会 DVD 論文集(2014)
- (4) 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.
- (5) 辻村欣司, エンジンの辞典(1994), pp.558-559, 朝倉書店.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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 27 年 3 月 31 日受理)