

## 生物資源由来燃料と軽油の混合燃料が ディーゼルエンジンの運転特性に及ぼす影響\*

位田 晴良\*<sup>1</sup>, 三輪 峻史\*<sup>2</sup>, 山本 晋平\*<sup>2</sup>, 宗京 芳輝\*<sup>2</sup>, キリワン カマラサック\*<sup>3</sup>

### Effects on Diesel Engine Operation Characteristics of Mixed Fuel of Bio Fuel and Gas Oil

Haruyoshi IDA\*<sup>1</sup>, Toshifumi MIWA, Shinpei YAMAMOTO, Yoshiki MUNEKYO

and Kamalask KHIRIWAN

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

BDF (Bio Diesel Fuel) is a diesel fuel made from vegetable oil and waste edible oil as raw materials. BDF containing a lot of oxygen promotes the combustion of diesel engines: hence, improvements in thermal efficiency can be expected. In other words, an increase in NO<sub>x</sub> concentration in the exhaust gas is also expected. However, previous research has found that while gas oil and BDF have different fuel properties, use of these under operating conditions with diesel engines eliminates the drastic differences in thermal efficiency and exhaust gas characteristics. Therefore, the purpose of this study is to grasp the effects of oxygen in fuel in the combustion process of diesel engines. To this end, engine performance testing using mixed fuels of BDF and gas oil with different oxygen content rates was performed. The results clarified that using fuel with a moderate mix of BDF and gas oil improves the operation characteristics of the diesel engine compared to using BDF alone.

**Key Words** : Diesel Engine, Bio Diesel Fuel, Fuel Mixing, Oxygen Content Rate, Operation Characteristics

## 1. 緒 言

多くのディーゼルエンジンにNO<sub>x</sub> (窒素酸化物) 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<sub>x</sub>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、石油代替燃料として有望視されている生物資源由来のディーゼル燃料 (BDF : Bio Diesel Fuel) は、資源枯渇に対して有効であるだけでなく、化石燃料とは異なる特性を有していることから、軽油を使用する場合よりも優れた効果が期待できる。

### 1.1 BDF

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リド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。すなわち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>。

本研究において調査した軽油 (ジャパンエナジー製2号軽油) およびBDF (油籐商事製) の主な性状を Table 1

\* 原稿受付 2018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> 大学院 応用理工学専攻

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

示す。Table 1 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。

Table 1 Specification of gas oil and BDF used as experimental fuel<sup>(3)</sup>

Item	Gas oil	BDF
Specific gravity	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>

## 1.2 研究の目的

前述 (1.1 節) のように、BDF は酸素を多く含む性質により、エンジンに用いると燃焼改善に伴う燃焼温度の上昇を招くことになる。すなわち排ガス中の NO<sub>x</sub> 濃度上昇が予想される。しかし、これまでの研究より、ディーゼルエンジンにおいて軽油と BDF を用いた場合、それぞれの排気中の NO<sub>x</sub> 濃度に大きな差が生じない運転条件がみられた<sup>(4)</sup>。すなわち燃焼過程における BDF 中の酸素の影響が不明である。

軽油と BDF を用いた場合とで排ガス中の NO<sub>x</sub> 濃度に差異が見られない原因の一つとして、BDF の燃焼状態が最適となる運転条件は軽油使用時と異なる可能性が考えられる。

これまで行われた実験においては、軽油使用時の熱効率が最大となる運転条件を確認し、いずれの使用燃料においてもその運転条件を適用し、運転特性の比較検討を行った。しかし、BDF の性状は軽油と異なることから、等しい燃料噴射条件下ではそれぞれの使用燃料における着火遅れ期間も異なる可能性が考えられる。すなわち使用燃料によって燃料噴射開始から最高燃焼圧力に至るまでの時間が異なることから BDF 使用時の燃料噴射時期が最適ではなく、良好な燃焼状態が実現されないことに伴い、BDF の含有酸素による NO<sub>x</sub> 生成への影響がみられない可能性がある。

そこで本研究では、ディーゼルエンジンの燃焼行程における燃料の含有酸素の影響を把握することを目的として、酸素含有率の異なる燃料を用いたエンジンの性能試験を行う。また、含有酸素が着火遅れおよび運転特性に影響することを確認するために燃料噴射時期の変更を伴う運転を行う。

## 2. 実験方法

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）0.36MPa とし、BDF に対する軽油の混合率を 0~100%（体積比で 25%毎）とした混合燃料を用いる（以下 BDF 混合率の高い燃料から B100, B75, B50, B25, 軽油と呼称する）。混合燃料の酸素含有率は、BDF の混合率とともに増減することになる。また、使用燃料の着火特性を比較するため、運転可能な範囲において燃料噴射時期をクランク角度 5° 毎に変更して性能試験を行う。性能試験に用いるディーゼルエンジンの諸元を Table 2 示す。Table 2 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。

性能試験においては、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、これらの結果を各燃料使用時および各噴射時期適用時において比較することにより、燃料の含有酸素の影響を把握するとともに、排ガス中に含まれる有害物質低減に最適な運転条件を検討する。

Table 2 Specification of diesel engine used in performance examination<sup>(5)</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

### 3. 実験結果および考察

軽油およびBDFの混合率が異なる燃料を用いて性能試験を実施し、燃料噴射時期をBTDC17° ~42°（クランク角度で上死点前17° ~42°）に変更して得られた結果を以下に示す。

#### 3.1 正味熱効率

各燃料を用いて燃料噴射時期を変更した場合の正味熱効率の変化を Fig. 1 に示す。Fig. 1 より、B100 を用いた場合の熱効率が低いことがわかる。しかし、BDF を含まない軽油を用いた場合よりも B75 を用いた場合に熱効率は高いことがわかる。BDF は粘度が高く燃料噴霧の微細化に不利といえるが、軽油を適度に混合することにより粘度が低下するとともに含有酸素が燃焼を促進することが考えられる。B75 はこれらの作用が熱効率向上において最も有効になったものと考えられる。また、噴射時期の変更に対する熱効率の変化について、燃料の混合率または酸素含有量による明確な相関は見られないが、B100 を用いた場合、最適といえる噴射時期から変更すると著しく熱効率は低下することがわかる。BDF は粘度が高いことから、とくに最適な時期における噴射が必要であるといえる。

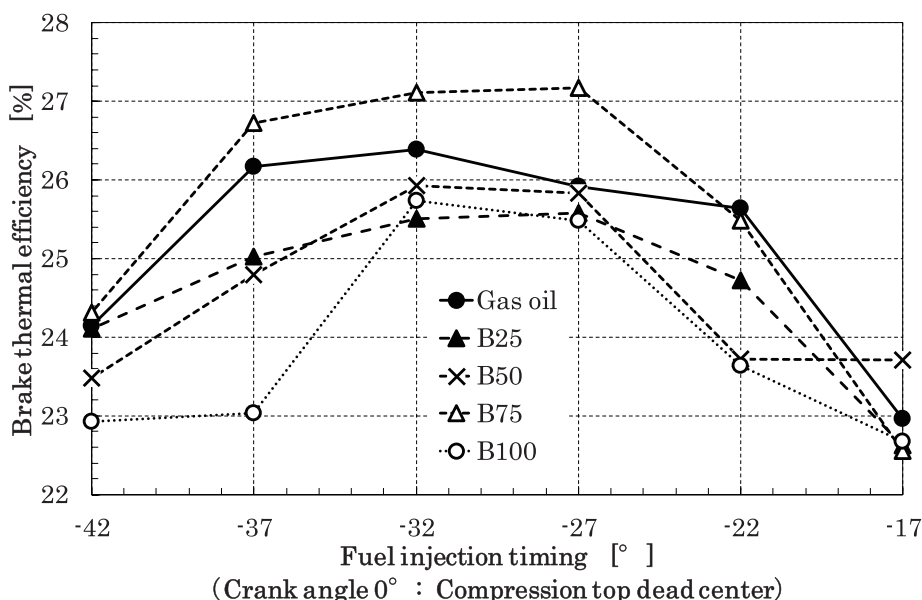


Fig.1 Variations of brake thermal efficiency with fuel injection timing measured by using mixed Fuels of gas oil and BDF

#### 3.2 NO<sub>x</sub>濃度

各燃料を用いて燃料噴射時期を変更した場合のNO<sub>x</sub>濃度の変化を Fig. 2 に示す。Fig. 2 より、燃料噴射時期BTDC17° ~22°においては、燃料の混合率によるNO<sub>x</sub>濃度の差異は見られず、前述（1.2節）したとおりであ

る。しかし、この噴射時期よりも進角した場合の $\text{NO}_x$ 濃度はB100使用時に最も高くなる。B100は最も酸素含有率が高い燃料であるため、燃焼状態の改善による $\text{NO}_x$ 濃度の上昇も考えられるが、前述(3.1節)したとおり、B100使用時の熱効率は低いことから燃焼状態が良好であるとはいえない。すなわちB100は着火性が劣ることから、噴射時間を進角した場合の着火遅れ期間も長いことが推測される。したがって、多量の燃料が一斉に着火することになるため、急激な燃焼温度の上昇により $\text{NO}_x$ 濃度は上昇し、また、この際に燃料の含有酸素が $\text{NO}_x$ 生成に寄与しているものと考えられる。

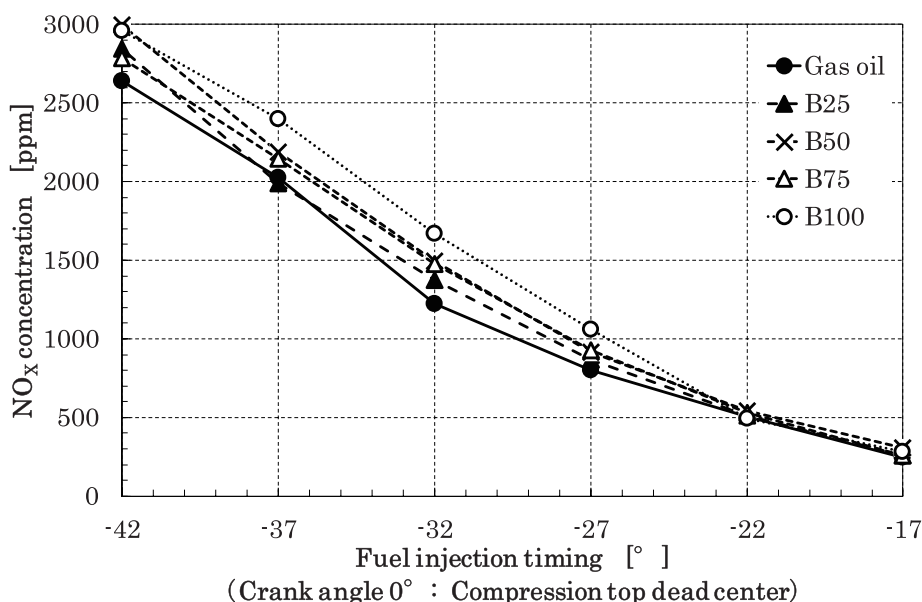


Fig.2 Variations of  $\text{NO}_x$  concentration with fuel injection timing measured by using mixed Fuels of gas oil and BDF

### 3.3 PM 排出量

各燃料を用いて燃料噴射時期を変更した場合のPM排出量の変化をFig. 3に示す。Fig. 3より、燃料噴射時期BTDC27°~42°においては、やや軽油使用時のPM排出量が高いものの他の燃料使用時との差は小さいことがわかる。しかし、BTDC27°より噴射時期を遅角した場合、軽油およびBDF使用時のPM排出量は著しく増加

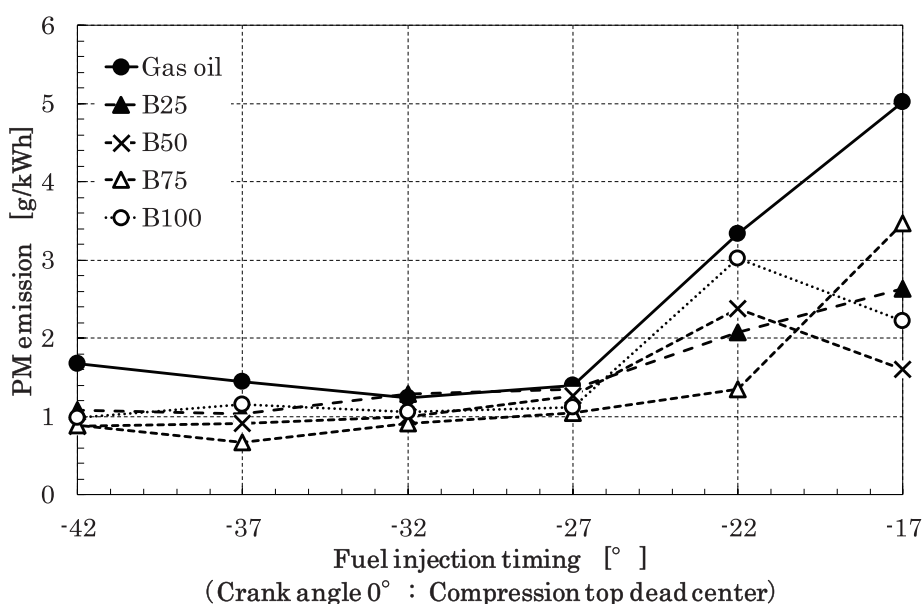
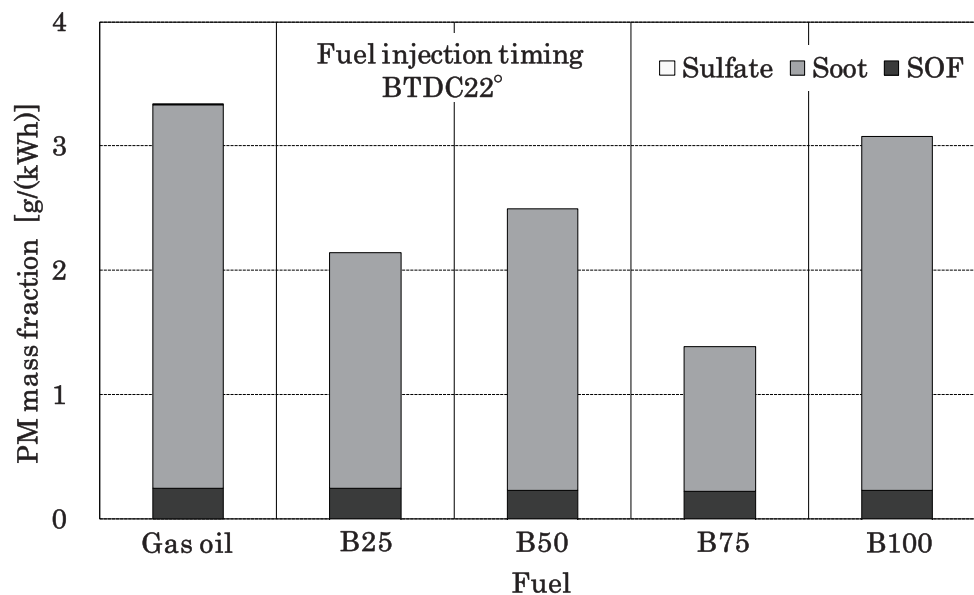


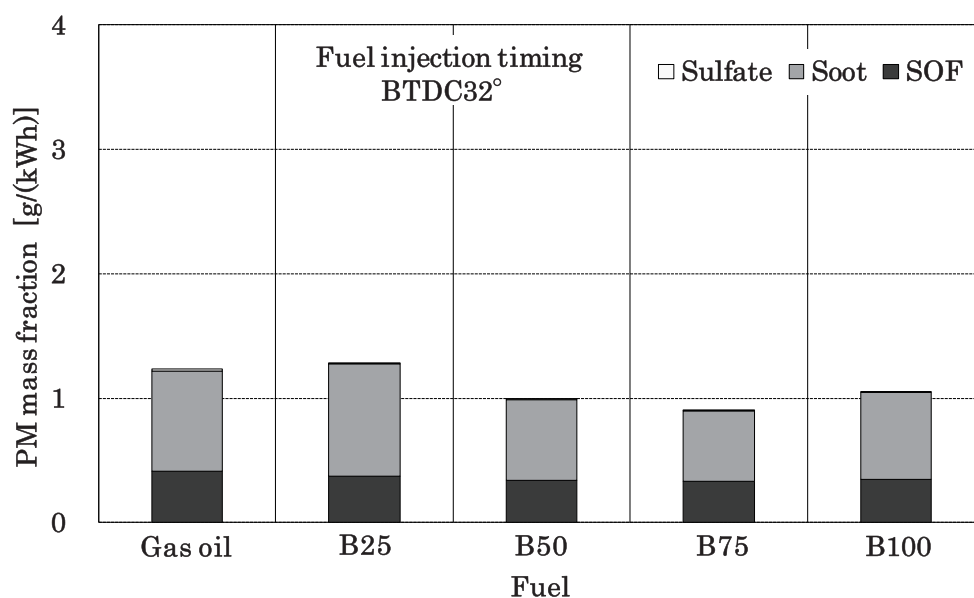
Fig.3 Variations of PM emission with fuel injection timing measured by using mixed Fuels of gas oil and BDF

する。一般に噴射時期を遅角させると後期燃焼期間は延長することになり、後期燃焼期間の延長はPM排出量の増加を招く。軽油使用時はこの期間に燃料自体から酸素の供給がほとんどないため、また、BDF使用時は粘度が高く微細化に不利であるためPMが多く生成されたものと考えられる。酸素を含んでいながら粘度がBDFよりも低い混合燃料使用時は、燃焼の促進によりPMの生成が抑制されたものと考えられる。一方、正味熱効率が高いことから最適な混合率であるいえるB75使用時は、噴射時期を過度に遅角させたBTDC17°の場合を除くとPM排出量は最も低く、燃焼状態は良好であることが確認できる。

使用燃料による顕著なNO<sub>x</sub>濃度の差異が見られない燃料噴射時期BTDC22° および比較的全ての燃料を用いた場合に正味熱効率が高くなる燃料噴射時期BTDC32° 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. 4に示す。



(a) Fuel injection timing : BTDC22°



(b) Fuel injection timing : BTDC32°

Fig. 4 Variations of mass fraction of the sulfate, soot and SOF contained in PM with mixed fuels measured at fuel injection timing BTDC22° (a) and BTDC32° (b)

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. 4 より、いずれの燃料を使用した場合も燃料噴射時期を BTDC22° から BTDC32° に進角させると Soot は減少し、SOF の量は変化が小さく、Sulfate はほとんど検出されないことがわかる。やはり後期燃焼期間の短縮が影響するとともに、Soot の量が PM 排出量を支配しているといえる。しかし、燃料噴射時期を進角させると Soot は減少するものの SOF は若干増加することがわかる。この SOF の増加は、燃料噴射時期進角に伴う着火遅れ期間の増大により、燃料過多の状態では着火および燃焼するため未燃焼燃料の排出量が増加するものと考えられる。

また、燃料噴射時期 BTDC22° においては軽油および BDF を単独で用いるよりも混合燃料使用時の Soot は少なく PM 低減に有利であることがわかる。燃料噴射時期 BTDC32° においては使用燃料による Soot 量の差は小さくなるが、この場合においても B75 使用時の Soot は最も少ないことがわかる。

#### 4. 結 言

ディーゼルエンジンの燃焼過程における燃料の含有酸素の影響を把握することを目的として、酸素含有率の異なる燃料を用いるとともに燃料噴射時期を変更する性能試験を行った。

その結果、酸素を多く含む BDF と粘度の低い軽油を適度な比率で混合した燃料(本研究では体積比で BDF75%、軽油 25%の混合燃料) は軽油および BDF を単独で用いるよりも熱効率が高くなることがわかった。

また、噴射時期を進角させて BDF を単独で用いる場合、BDF は酸素を多く含むことに加えて、粘度が高ことから着火遅れ期間が増大するため、NO<sub>x</sub>濃度を増加させることが考えられる。一方、噴射時期を遅角させた場合、混合燃料使用時の PM 排出量の増加は抑制されることから、混合燃料は酸素を含んでいながら粘度は BDF よりも低いため、後期燃焼期間において燃焼を促進させることが考えられる。

したがって、BDF に軽油を適度に混合させて用いることにより、BDF を単独で用いるよりも含有酸素が効率的に作用し、熱効率および排ガス特性は向上するといえる。

#### 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) 日本エネルギー学会分析室, 報告書, 分試第 27-020~21(2016).
- (4) キリワンカマラサック, 位田晴良, 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において EGR が排ガス特性に及ぼす影響”, 日本機械学会 2017 年度年次大会 DVD 論文集(2017)
- (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.

(平成 30 年 3 月 31 日受理)