

# 生物資源由来ディーゼル燃料を用いた場合の 排気ガス再循環システム付ディーゼルエンジンの特性

位田晴良\*・上嶋敏裕\*

## Change in Characteristic of Diesel Engine with Exhaust Gas Recirculation by Using Bio Diesel Fuel

Haruyoshi Ida and Toshihiro Uejima

BDF (Bio Diesel Fuel) contributes to reducing the concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere because it is a carbon neutral fuel. It can also reduce exhaust gas emissions, improving the thermal efficiency of diesel engines. Though the generation of PM (Particulate Matters) is controlled by oxygen contained in the BDF, NO<sub>x</sub> emissions are increased. In general, EGR (Exhaust Gas Recirculation) is used to reduce NO<sub>x</sub> emissions. In this paper, the BDF and EGR are applied to a diesel engine for the test, and the characteristic is examined.

Keywords: Diesel Engine, Bio Diesel Fuel, Exhaust Gas Recirculation, Emission

### 1. 緒言

石油資源の有効利用と自然環境保全の観点から、輸送機械用原動機における熱効率の向上および排出ガスの低減が急務である。とくに石油資源からエネルギーを取り出す際に発生するCO<sub>2</sub>の増加は、地球温暖化による環境変化の主な原因であると考えられており<sup>1)</sup>、脱石油資源が求められている。

一般に普及している輸送機械用原動機の中でディーゼルエンジンは最も熱効率が高く(Fig.1<sup>2)</sup>)、CO<sub>2</sub>排出量が少ないことを特長としている。さらに軽油以外の燃料も使用可能であり、種々の燃料に対する適合性

に優れているという利点も併せ持つ。これらの理由から、環境保全への取り組みに懸命な欧州においては、乗用車用エンジンにおけるディーゼルエンジンのシェアは約50%に達している。ディーゼルエンジンにおける黒煙の排出や騒音などのマイナス・イメージは完全には払拭されていな

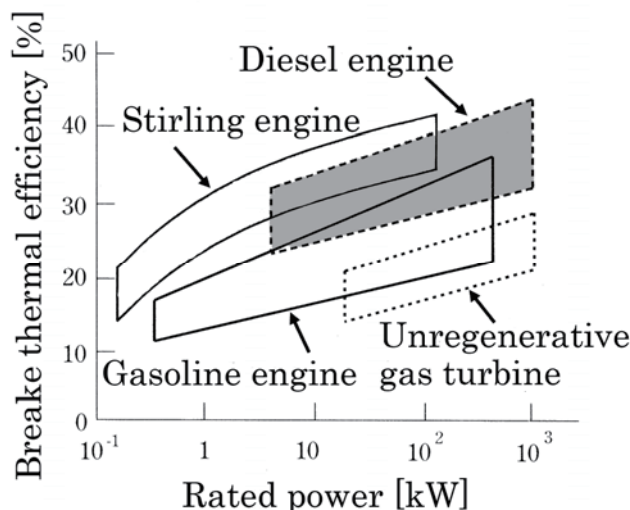


Fig.1 Thermal efficiency of various engines

\* 機械工学科

いが、最近では日本においても環境対策の点からディーゼルエンジンは将来的に有望であるとされている。しかし、ディーゼルエンジンから排出される粒子状物質(PM : Particulate Matters)や、酸素過剰雰囲気下で発生する窒素酸化物( $\text{NO}_x$  : Nitrogen Oxides)の低減処理など解決すべき課題は多い。ディーゼルエンジンの熱効率の向上を図ると同時に、排出ガスのクリーン化を図ることは、環境改善に大きく寄与する。

ディーゼルエンジンの熱効率向上のためには、燃料と酸素の混合促進による均一な燃焼が重要であると考えられ、とくに燃料噴射系についての研究<sup>3)</sup>が行われており、燃焼状態の最適化によって熱効率の向上とPM排出量の低減が可能となるが、燃焼温度が上昇して $\text{NO}_x$ 排出量の増加を引き起こすことが明らかになっている。一般に、PMと $\text{NO}_x$ 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である。

排気ガス再循環システム(EGR : Exhaust Gas Recirculation)は多くの市販エンジンにおいて $\text{NO}_x$ 生成の抑制を目的として用いられており、酸素濃度および燃焼温度を低下させるために、吸気中に不活性ガスとして排気ガスが導入されている。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ディーゼル燃料(BDF : Bio Diesel Fuel)は、その組成に酸素を含むので、燃焼過程中に酸素との混合が促進され、燃焼改善による熱効率の向上およびPM排出量の低減が期待できる。また、熱効率向上によって $\text{CO}_2$ 排出量が低減されるとともに、BDFは生物資源由来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 $\text{CO}_2$ 濃度低下に寄与する<sup>4,5)</sup>。

本研究では、排出ガス浄化技術を組み合わせた総合的なディーゼルエンジン排出ガスのクリーン化システム構築の一環<sup>6)</sup>として、EGRを付加したディーゼルエンジンにおいてBDFを使用した場合の特性について検討する。

## 2. 小型ディーゼルエンジンによる性能試験

### 2.1 実験方法

実験装置は小型ディーゼルエンジン、負荷装置および排ガス計測装置から構成される(Fig.2)。この装置においてエンジン回転数、負荷およびEGR率(吸気中に混入する排ガスの体積割合)を安定運転不能となるまで変化させた場合の排出ガスを分析して、軽油とBDFを使用した場合におけるエンジン性能(燃費、排気温度、シリンダ圧力)ならびに $\text{NO}_x$ とPMの濃度を比較検討した。

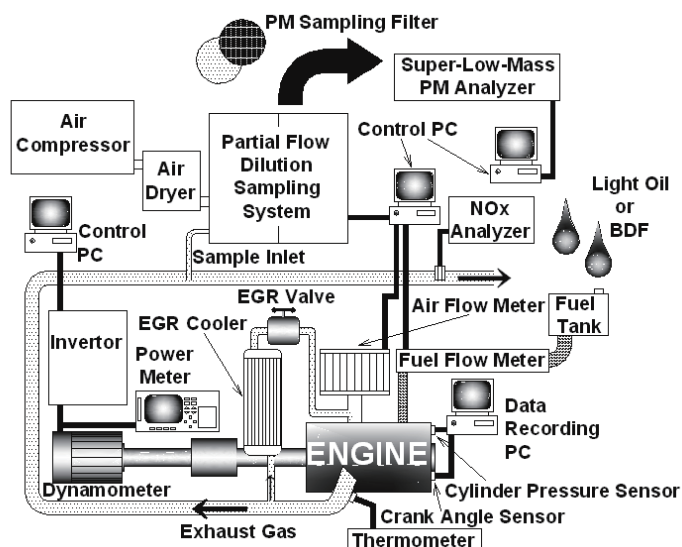


Fig.2 Analyzing system of exhaust gas

## 2.2 供試エンジン

実験に用いたディーゼルエンジンの諸元をTable 1 に示す<sup>7)</sup>.

Table 1 Specification of the diesel engine used in this work

Engine type	Horizontal, water cooled, 4 stroke
Combustion chamber	Direct injection
Cylinder / Bore and stroke [mm]	Single / 102 × 105
Displacement [l]	0.857
Maximum power [kW] {PS} / Engine speed [min <sup>-1</sup> ]	12.5 {17.0} / 2400
Compression ratio	17.8
Air charging	Naturally aspirated

## 2.3 供試燃料

燃料にはジャパンエナジー社製の2号軽油および油籐商事社製のBDFを用いた. この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る. 植物油は軽油に比べて粘度が高く, 潤滑や

Table 2 Specification of light oil and BDF used as fuel

Item	Light oil	BDF
Density (288K) [kg/m <sup>3</sup> ]	818	886
Kinematic viscosity(323K) [m <sup>2</sup> /s]	$1.80 \times 10^{-6}$	$3.79 \times 10^{-6}$
Flash point [K]	325	428
Oxygen content [wt%]	0.26	11.24
Gross calorific value [kJ/kg]	$46.0 \times 10^3$	$39.9 \times 10^3$

燃料噴射に適した粘度に下げるため, 植物油の主成分である脂肪酸グリセライドを低分子化するエステル交換反応によって得られる脂肪酸メチルエステルがBDFの主成分である. 本試験で用いたBDFは脂肪酸メチルエステルの含有率が90%以上であった. それら2種類の燃料の主な性質をTable 2 に示す<sup>8,9)</sup>. BDFは軽油と比較すると, 引火点は高く, 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.

## 3. 実験結果および考察

供試エンジンの常用回転数において, エンジン回転を安定させるために最低限の負荷をかけた条件 1(回転数 1800min<sup>-1</sup>, 正味平均有効圧 0.12MPa)と, これよりエンジンが安定運転できる上限まで回転数と負荷を上昇させた条件 2(回転数 2200min<sup>-1</sup>, 正味平均有効圧 0.43MPa)における実験結果を次に記述する. なお, 条件 1 から条件 2 のようにエンジン回転数が上昇した場合には, 燃焼に費やすことのできる時間は短くなり, 負荷が上昇した場合は供給燃料の増加により空気過剰率が低下する. EGR率の上昇によっても空気過剰率が低下する. また, 以下に示す図においては軽油使用時の結果(破線)とBDF使用時の結果(実線)を併せて示し, それらを比較する.

### 3.1 正味燃料消費率

正味燃料消費率と EGR 率の関係 Fig.3 に示す. 条件 1 においては, BDF を使用すると軽油使用時よりも燃料消費率が増加していることがわかる. また, 条件 1 よりも高回転・高負荷条件である条件 2 では, 両者の差は小さくなることがわかる. これは, BDF の発熱量が軽油よりも低いために燃料の消費量が多くなることを示唆する. したがって燃費について, 軽油および BDF の発熱量の相違を考慮して燃焼性の検討を行うために, BDF の消費量に発熱量の比を乗じることにし, その差異を補正することにした. このようにして補正した正味燃料消費率と EGR 率の関係を Fig.4 に示す.

BDF の使用によって燃料消費率が減少することがわかる. また, エンジン回転数, 負荷および EGR 率の増加によって, BDF 使用時と軽油使用時の燃費の差が大きくなることがわかる. EGR によって, シリンダ内の空気の一部が排気ガス中の比熱の大きな  $\text{CO}_2$  や  $\text{H}_2\text{O}$  などと置換されることにより気体の熱容量が増大し, 燃焼ガスに対する冷却効果が増大する. また, 酸素濃度が減少して燃焼が抑制されるので, 正味燃料消費率が增大する. しかし, BDF 使用時は, 燃焼時間が

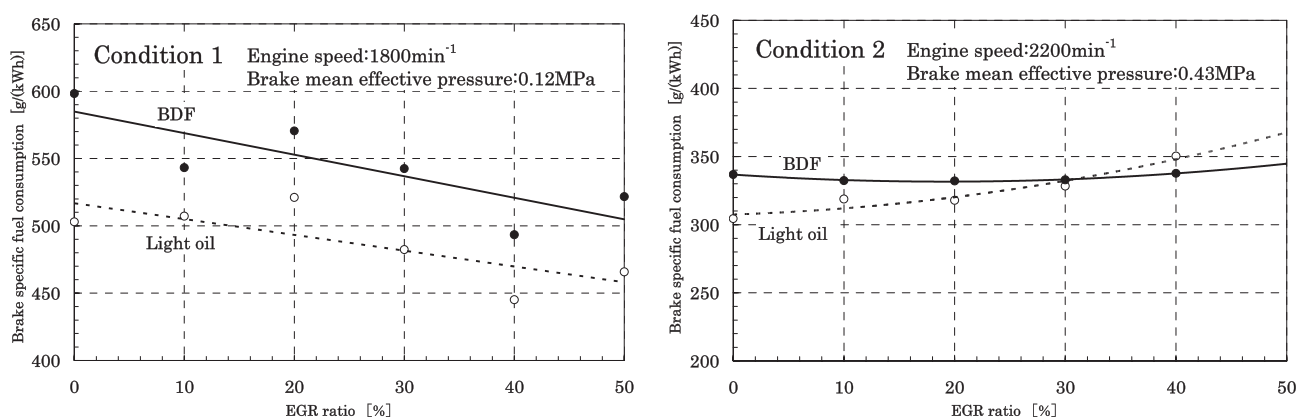


Fig.3 Variations of break specific fuel consumption with EGR ratio, measured for the conditions 1 and 2 by using light oil and BDF

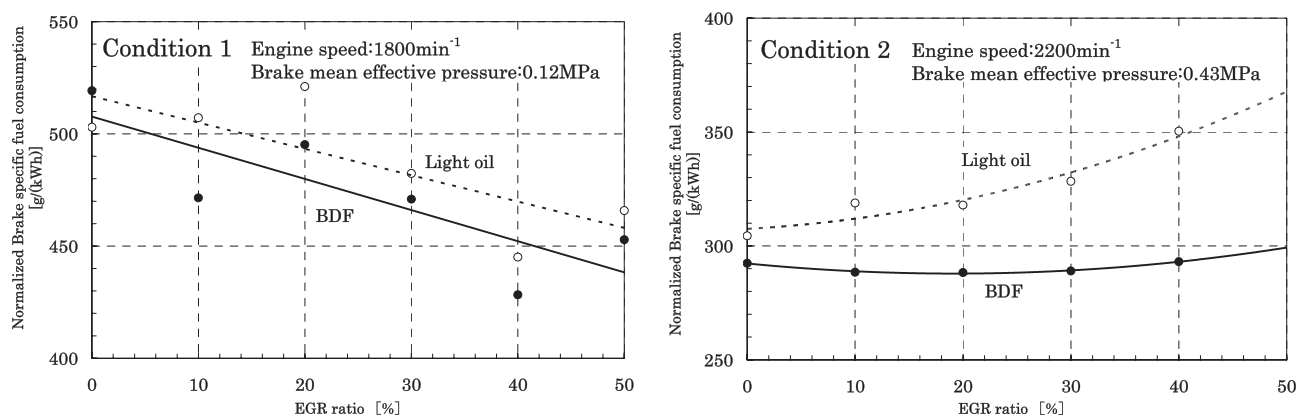


Fig.4 Normalized break specific fuel consumption calculated from Fig.3

短くなったり、EGR 率が大きくなって空気過剰率が小さくなるなど、燃料が燃焼しにくくなっても BDF に含まれる酸素によって燃焼が促進されるので燃費の低下が抑制される。

### 3.2 排気温度

排気温度と EGR 率の関係を示す Fig.5 に示す。条件 1 においては、EGR 率にかかわらず排気温度はあまり変化しない。一方、条件 2 では、EGR 率の増加によって排気温度が上昇する。EGR 率の増加は給気に混入する高温の排気ガスの増加を意味する。つまり、燃焼室内の温度が上昇するため燃料の着火性が向上する。さらに条件 2 は負荷が大きく供給燃料が増加する。これらの相乗効果により発熱量が増加するので排気温度の上昇が顕著になる。条件 1 では BDF を用いた場合の方が排気温度は低温になるが、運転条件が軽油を使用した場合と同じになるための熱量は等しいことから、排気温度の差は、熱量が効率的に作用しない後期燃焼期間(燃焼行程の中で、未着火燃料が遅れて燃焼する期間)に発生する熱量の差である。BDF を使用した場合の排気温度は軽油を使用した場合を下回るため、無効な熱量が小さく熱効率が高い。これは燃費の結果(Fig.4)にも表れており、BDF に含まれる酸素により燃焼が促進され未着火燃料が減少するためである。また、条件 2 では軽油と BDF で排気温度はほぼ同じになる。高回転、高負荷になると後期燃焼期間に燃焼する燃料が増加する。このため、BDF を用いると含有酸素が後期燃焼期間においても燃焼を促進するので排気温度が上昇し、軽油を使用した場合との差が小さくなったものと考えられる。

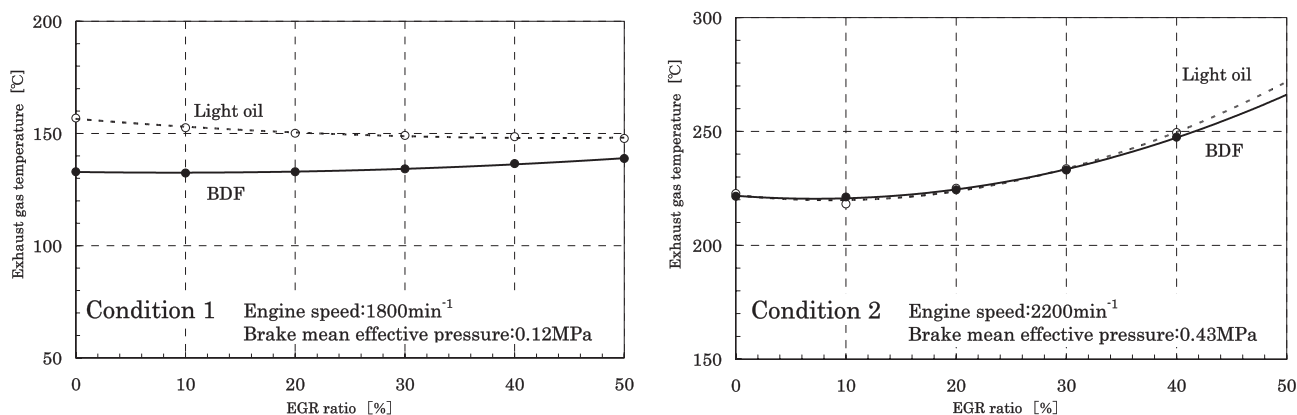


Fig.5 Variations of exhaust gas temperature with EGR ratio, measured for the conditions 1 and 2 by using light oil and BDF

燃焼状態に及ぼす BDF 中の含有酸素の影響を調べるために、シリンダ圧力を測定した。軽油使用時と BDF 使用時の相違が顕著に表れる条件、つまり、供給燃料が多量となる条件 2 において、EGR を無効として測定されたシリンダ圧力とクランク角度の関係を Fig.6 に示す。BDF 使用時は軽油使用時よりも着火遅れ期間が短く、燃焼による圧力上昇開始時期が早いことがわかる。さらに有効な出力に大きく関係する上死点付近の圧力も高い。後期燃焼期間では、BDF を使用した場合のシリンダ圧力が速やかに降下することがわかる。



### 3.3 NO<sub>x</sub>排出量

NO<sub>x</sub>排出量とEGR率の関係をFig.7に示す. 条件2においては条件1よりもNO<sub>x</sub>排出量が少ないことがわかる. 条件2では負荷の増加により供給熱量が増加するので空気過剰率が低下するためである. また, 最高燃焼温度は上昇するが, エンジン回転数が高いので燃焼室が高温に保持される時間は短くなり, 条件1よりもNO<sub>x</sub>排出量が減少する. 運転条件にかかわらずBDFを用いた方がNO<sub>x</sub>排出量は軽油使用時よりも高いことがわかる. NO<sub>x</sub>排出量は, 酸素過剰雰囲気下で最高

燃焼温度が高い場合に増加する傾向にある. Fig.5より, 排気温度は軽油使用時に高いことから, 温度条件よりもBDFに含まれる酸素の影響が大きい. つまり, BDFに含まれる酸素が吸入空気中の窒素と結合し, NO<sub>x</sub>を生成するため排出量が増加する. とくにEGR率の低い条件においては, 燃料中の酸素含有量の相違による影響がNO<sub>x</sub>排出量に表れている. EGR率が増加するとNO<sub>x</sub>排出量は使用する燃料にかかわらず減少し, BDF使用時と軽油使用時の差は極めて小さくなる.

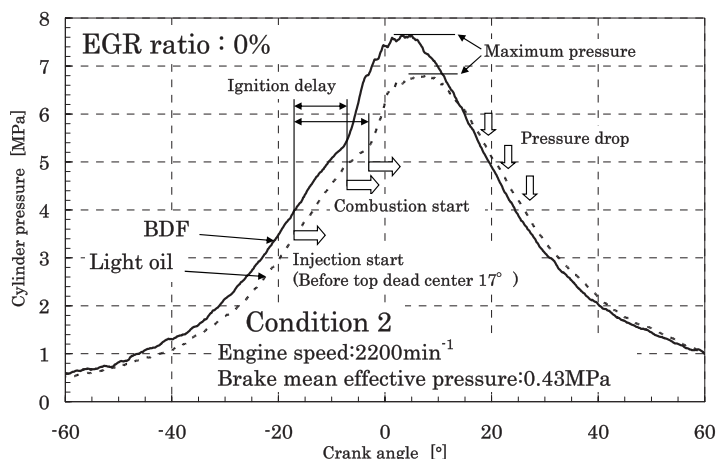


Fig.6 Variations of cylinder pressure with the crank angle, measured for the condition 2 by using light oil and BDF

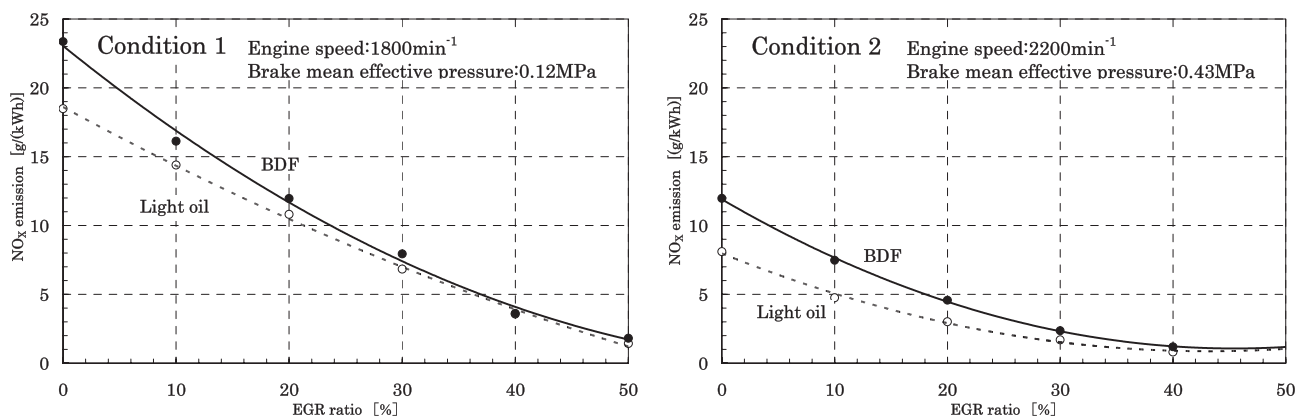


Fig.7 Variations of NO<sub>x</sub> emission with EGR ratio, measured for the conditions 1 and 2 by using light oil and BDF

### 3.4 PM 排出量

PM 排出量と EGR 率の関係を Fig.8 に示す. 条件 1 においては, EGR 率にかかわらず PM 排出量はあまり変化しない. 条件 2 では, EGR 率の増加によって軽油使用時の PM 排出量が著しく増加する. 条件 1 では, 条件 2 よりも供給燃料が少ないために燃焼温度が上昇しにくい. これらの燃焼温度の差は, 排気温度の結果(Fig.5 左側)からも確認できる. 燃焼温度が上昇しないと

燃料の着火が活性化しないため、不完全燃焼により PM 排出量が増加する。しかし、EGR 率が低く空気過剰率が高い場合は、燃焼に必要な酸素を十分に確保できる雰囲気が形成される。EGR 率が増加すると、空気過剰率が低下するために起こる不完全燃焼によって PM 排出量が増加する。同時に、吸気に混入される温度の高い排気ガスによって吸入空気温度が上昇し、燃料の着火性が向上する。これらの燃焼を促進または抑制する効果が相殺することによって PM 排出量が大きく変化しないものと考えられる。条件 2 においては、EGR 率が増加するほど、軽油使用時の PM 排出量は急激に増加し、BDF 使用時は軽油の PM 排出量を下回り、その差は大きくなる。先述のとおり、後期燃焼期間は燃料噴射が終わっても、シリンダ内に残った燃料が燃焼する期間である。残った燃料の燃焼は酸素と出会う速さに支配される。この期間は、シリンダ内に燃焼生成物が多量に存在し、酸素濃度が低くなっているため、残った燃料は酸素と十分な混合ができずに PM となって排出される割合が増加する。したがって、後期燃焼期間では、燃料に含まれる酸素の量が燃焼の進行を左右する。酸素を含む BDF を使用した場合、未着火で後期燃焼期間に燃焼する燃料の増加や空気過剰率が低下する燃焼条件に変化しても、燃焼が促進されるために PM 排出量の増加が抑制されたものと考えられる。

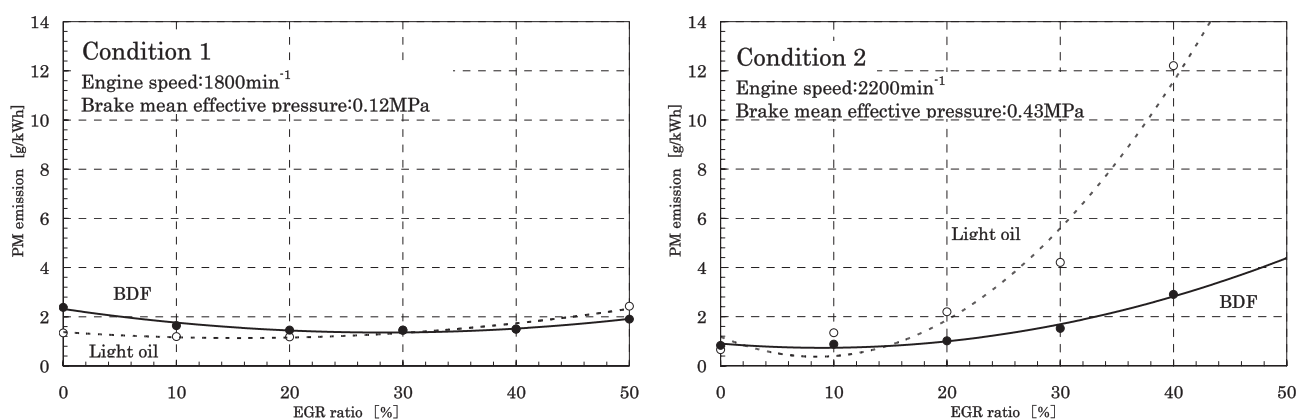


Fig.8 Variations of PM emission with EGR ratio, measured for the conditions 1 and 2 by using light oil and BDF

### 3.5 PM に含まれる成分

燃焼状態に及ぼす BDF 中の含有酸素の影響を調べるために、PM の成分を分析した。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。軽油使用時と BDF 使用時の相違が顕著に表れる条件、つまり、供給燃料が多量となる条件 2 において分析された PM に含まれる成分と EGR 率の関係を Fig.9 に示す。EGR 率の増加によって、とくに軽油使用時の Soot が増加する。これは、EGR により空気過剰率が低下するためである。しかし、BDF 使用時は、含有酸素により Soot の発生が抑制される。また、PM 成分の大半を占める Soot が PM 排出量に大きく影響することがわかる。Sulfate の量に

大きな変化は見られない。Sulfate は燃料に含まれる硫黄分に由来するため、燃焼状態はその量にあまり影響しない。EGR 率が小さい条件では、BDF 使用時の SOF が軽油使用時よりも増加する。BDF は粘度および引火点が軽油よりも高いため、排気ガスの再循環量が少なく吸入空気温度が低いと燃料粒の気化および着火が抑制され易い。このために未着火燃料が SOF として排出される量が増加するものと考えられる。

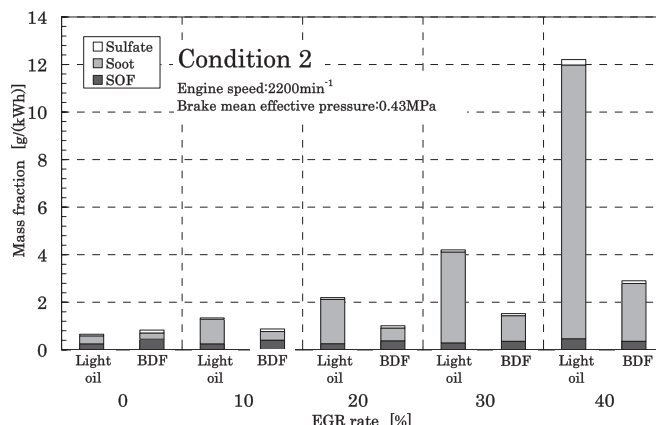


Fig.9 Effect of BDF on the mass fraction of the sulfate, soot and SOF contained in PM

#### 4. 結言

総合的なディーゼルエンジン排出ガスのクリーン化システム構築を目的として、生物資源由来ディーゼル燃料を用いた場合の排気ガス再循環システム付ディーゼルエンジンの特性について検討した。

EGRによるNO<sub>x</sub>排出量の減少に加えて、とくに高回転、高負荷および高EGR率の運転条件では、BDFに含まれる酸素によってPM排出量が軽油使用時よりも減少することがわかった。つまり、BDFを用いたEGR付加ディーゼルエンジンは、空気過剰率が低下する運転条件においてNO<sub>x</sub>およびPMの排出を同時に抑制することができ、排出ガスのクリーン化に有効であるといえる。

#### 参考文献

- 1) 小林茂樹, 地球温暖化に対する IPCC の活動と自動車の果たすべき役割, 自動車技術, 62-11(2008), 24.
- 2) 山下巖, 濱口和洋, 香川澄, 平田宏一, 百瀬豊, スターリングエンジンの理論と設計, 山海堂(1999), 14.
- 3) 石山拓二, 各種エンジンの熱効率向上技術, 平成 17 年度 FUT ORC 研究報告集(2006), 5-8.
- 4) 池上詢, バイオディーゼル・ハンドブック, 日報出版(2006), 7.
- 5) 小山成, 次世代バイオディーゼル燃料の開発, 自動車技術, 61-11(2007), 22.
- 6) 水島一祐, ディーゼルエンジンの排出ガスクリーン化に関する研究, 自動車技術, 62-3(2008), 11.
- 7) ヤンマーディーゼルエンジン NF 形シリーズ取扱説明書, ヤンマー(2003), 9.
- 8) 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, NTS(2007), 482.
- 9) 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 22 年 3 月 31 日受理)