

生物資源由来燃料およびエマルジョン燃料を用いた ディーゼルエンジンの排出ガス特性

位田晴良*・上嶋敏裕*

Exhaust Gas Characteristic of Diesel Engine by Using Bio Fuel and Emulsified Fuel

Haruyoshi Ida and Toshihiro Uejima

BDF (Bio Diesel Fuel) contributes to reducing the concentration of CO₂ in the atmosphere because it is a carbon neutral fuel. However, the use of BDF increases NO_x emission from diesel engines, though the generation of PM (Particulate Matters) is controlled by the oxygen content in the BDF. On the other hand, emulsified fuel, emulsion of water in light oil, has been expected to have an effect on the simultaneous reduction of those emission gases, but its use has not spread. In this paper, the BDF and emulsified fuel are applied to a diesel engine for the purpose of reducing emissions by the fuel which is usable without remodeling the engine, and the exhaust gas characteristic has been examined. As a result, it is clarified that these fuels are effective for the exhaust gas purification.

Keywords: Diesel Engine, Bio Diesel Fuel, Emulsified Fuel, Exhaust Gas

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 CO₂ 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いる¹⁾。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、CO₂ 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。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)や窒素酸化物(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。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である。

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 CO₂ 排出量が低減されると

* 機械工学科

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 CO_2 濃度低下に寄与する ^{2,3)}。

一方、燃料油に水を混合させたエマルジョン燃料は、石油資源の有効利用や排出ガス中の有害物質低減に効果があるとして、ボイラー用の燃料などに使用される場合がある。エマルジョン燃料が燃焼する場合、燃料中に分散している水粒子が高温火炎に曝されると急激に膨張し、水粒子を取り囲む燃料油を微粒化する。このため燃焼が促進され熱効率の向上と PM 排出量の低減が可能となる。また、燃料に含まれる水分により燃焼温度の上昇が抑制されるため NO_x 排出量の低減も期待できる ⁴⁾。しかし、エマルジョン燃料は保存する際に時間の経過とともに油分と水分が二層に分離してしまうため品質の安定性に問題があるとともに、この燃料を使用した場合の有効性が不明確であり広く普及するには至っていないのが現状である。

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 ⁵⁾として、異種燃料を用いることによりディーゼルエンジンから排出される有害物質を低減することを目的とし、軽油を使用した場合と比較して、BDF およびエマルジョン燃料を用いたディーゼルエンジンの排出ガス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。この装置においてエンジン回転数および負荷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、軽油を使用した場合と比較して、BDF およびエマルジョン燃料を使用した場合のエンジン性能（燃費、排気温度、シリンダ圧力）ならびに NO_x 濃度と PM 排出量を検討した。なお、燃費、排気温度、シリンダ圧力は、それぞれ容積式流量検出器、熱電対、クォーツセンサにより計測した。また、 NO_x 濃度は直挿型ジルコニアセラミックセンサによるリアルタイム計測、PM 排出量は排出ガスのサンプリングおよび PM のガス化による計測で求めた。

2.2 測定用エンジン

実験に用いたディーゼルエンジンの諸元を Table 1 に示す ⁶⁾。

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^{-1}]	12.5 {17.0} / 2400
Compression ratio	17.8
Air charging	Naturally aspirated

2.3 供試燃料

比較基準とする燃料にはジャパンエナジー社製の2号軽油を用いた。

BDFは油籐商事社製であり、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、潤滑や燃料噴射に適した粘度に下げするため、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。

これら2種類の燃料の主な性質をTable 2に示す^{7,8)}。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。

エマルジョン燃料は主成分の軽油に水が混合されており、ウッドテック社製の試作燃料である。先述したように、エマルジョン燃料は性状が不安定であることから、通常、油分と水分の分離を抑制するために両方に親和性のある界面活性剤が少量添加されている。本研究で使用するエマルジョン燃料においても軽油と水以外に添加物が含まれている。この添加物はメーカーが試行錯誤的に配合し燃料性状の安定性を確保している。その詳細は不明であるが、公開されている燃料成分の配合割合(Table 3)によると、体積比で軽油は82%、水分は6%含まれている。また、目視でBDFよりも粘度が高いことを確認した。

Table 2 Specification of light oil and BDF used as fuel

Item	Light 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

Table 3 Volume ratio of elements contained in experimental emulsified fuel

Element	Volume ratio [%]
Light oil	82
Solvent	8
Water	6
Glycerin	4

3. 実験結果および考察

測定用エンジンの常用回転数付近(1400~2200min⁻¹)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(正味平均有効圧 0.1MPa)と、これよりエンジンが安定運転できる上限まで負荷を上昇させた条件2(正味平均有効圧 0.5MPa)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。また、以下に示す図においては軽油使用時の結果(実線)、BDF使用時の結果(破線)およびエマルジョン燃料使用時の結果(点線)を併せて示し、それらを比較する。

3.1 正味燃料消費率および正味熱効率

正味燃料消費率とエンジン回転数の関係をFig.1に示す。条件1においては、BDFまたはエマルジョン燃料を使用すると回転数の上昇とともに軽油使用時の消費率を下回るようになるものの、

低中速域では軽油使用時よりも燃料消費率が增加する．また，条件 1 よりも高負荷条件である条件 2 でも同様の傾向がみられる．軽油使用時よりも燃料消費率が增加するのは BDF およびエマルジョン燃料の発熱量が軽油よりも低いことが大きな原因であると考えられる．したがって燃費について，軽油，BDF およびエマルジョン燃料の発熱量の相違を考慮して燃焼性の検討を行うために，正味熱効率により比較を行う．正味熱効率とエンジン回転数の関係を Fig.2 に示す．なお，エマルジョン燃料の正味熱効率については，軽油以外の成分の発熱量が不明であるため，燃料に含まれる軽油の発熱量のみを用いて算出した．条件 1 では，軽油使用時と比較すると，回転数の上昇とともに BDF およびエマルジョン燃料を用いた場合の正味熱効率が高くなる．これは BDF に含まれる酸素または，エマルジョン燃料に含まれる水分の影響で燃焼が促進されているものと思われる．また，条件 2 ではエマルジョン燃料の正味熱効率が最も高くなる．これは燃焼室温度の供給熱量の増加とともにエマルジョン燃料に含まれる水分の沸騰が活発になり燃料の微粒化が進んだことが考えられる．しかし，軽油以外の可燃性物質の燃焼熱が付加されている可能性があるため，実質の正味熱効率はこの結果より低いと思われる．

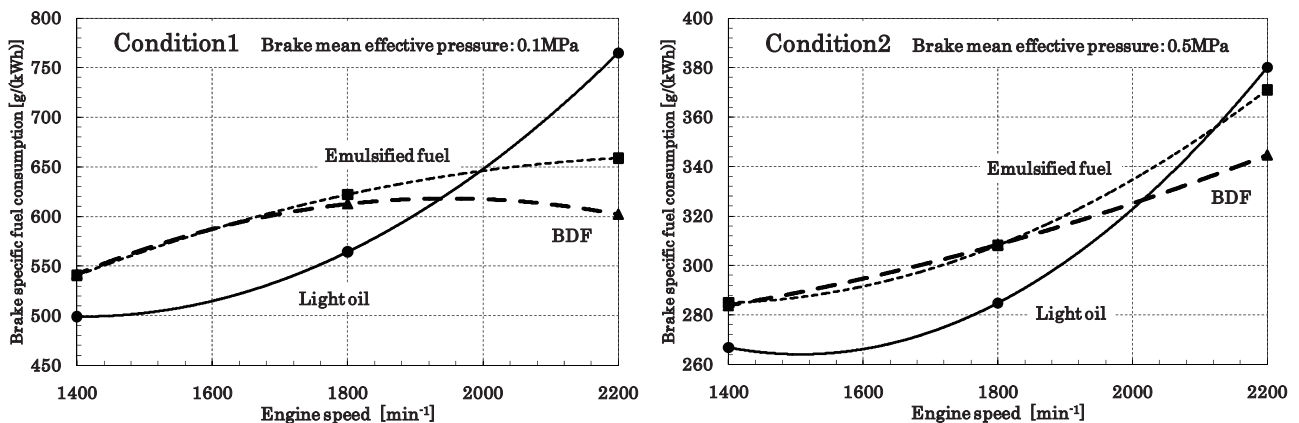


Fig.1 Variations of brake specific fuel consumption with engine speed, measured for the conditions 1 and 2 by using light oil , BDF and emulsified fuel

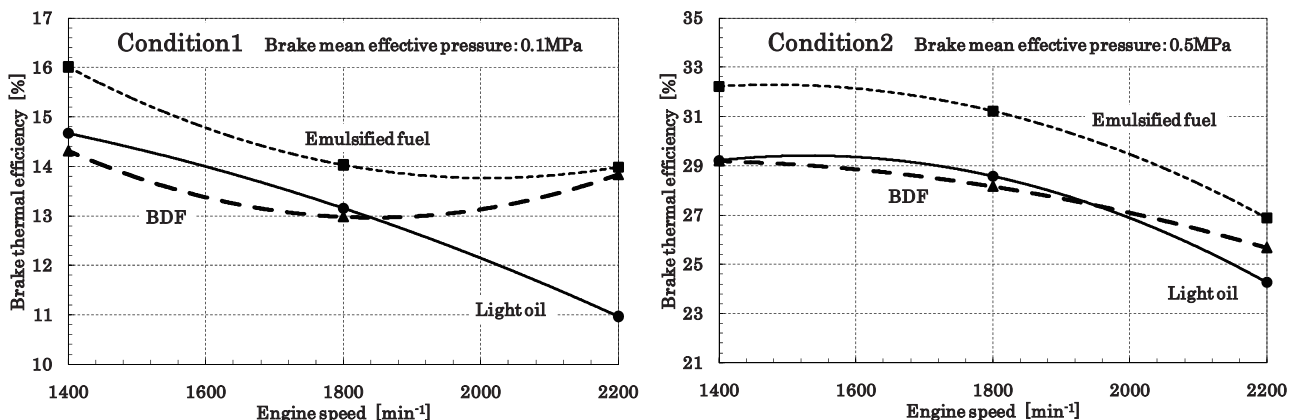


Fig.2 Variations of brake thermal efficiency with engine speed, measured for the conditions 1 and 2 by using light oil , BDF and emulsified fuel

3.2 排気温度

排気温度とエンジン回転数の関係を示す Fig.3 に示す. 条件 1, 条件 2 とともにエンジン回転数, すなわち出力の上昇とともに排気温度は上昇するが燃料の違いによる差は小さい. いずれの燃料を用いても運転条件が同じになるために必要な熱量は等しいことから, 発熱量の低い BDF または軽油含有率の低いエマルジョン燃料を使用した場合の排気温度が軽油を使用した場合と同程度でありながら正味熱効率(Fig.2)が悪化しないということは, 直接燃焼期間(燃焼行程の中で, 噴射された燃料が直ちに燃焼し出力が発生する期間)において燃焼が促進されているといえる.

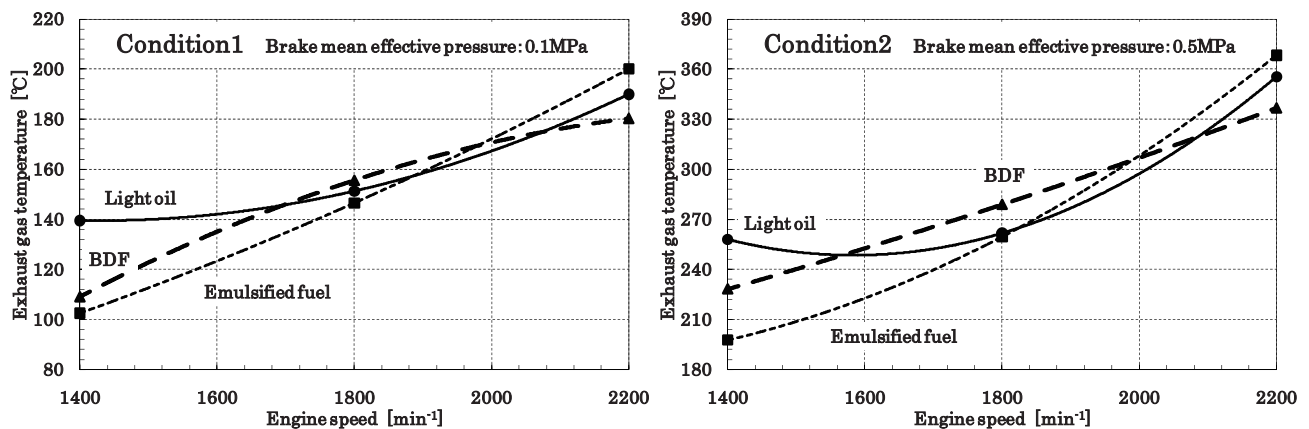


Fig.3 Variations of exhaust gas temperature with engine speed, measured for the conditions 1 and 2 by using light oil, BDF and emulsified fuel

3.3 シリンダ圧力

燃焼状態に及ぼす BDF 中の含有酸素およびエマルジョン燃料中の水分の影響を比較するために, シリンダ圧力を測定した. これら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(エンジン回転速度: 1800, 2200min⁻¹)において, 測定されたシリンダ圧力とクランク角度の関係を示す Fig.4 に示す. 軽油使用時と比較すると, BDF 使用時は含有酸素の影響により着火遅

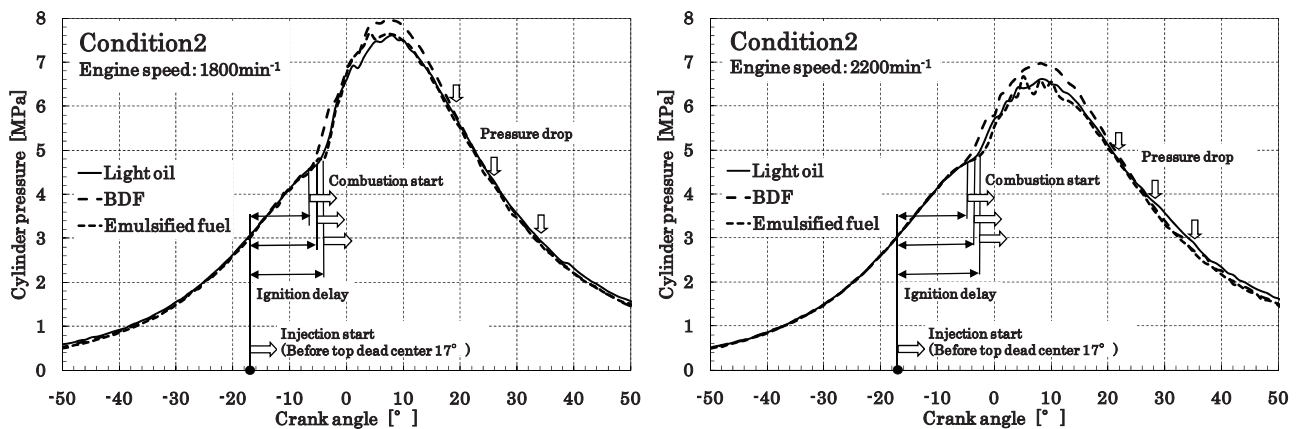


Fig.4 Variations of cylinder pressure with the crank angle, measured for the condition 2 (engine speed: 1800, 2200min⁻¹) by using light oil, BDF and emulsified fuel

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。エマルジョン燃料使用時は着火遅れ期間は長いが、最高燃焼圧力は軽油使用時と同程度まで上昇する。これは含有水分または粘度の高さが着火性を低くしているが、直接燃焼期間では良好な燃焼をしているといえる。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)では、BDF またはエマルジョン燃料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。BDF に含まれる酸素、またはエマルジョン燃料に含まれる水分により燃焼が促進されて未着火燃料は減少するため、後期燃焼期間に燃焼する無効な燃料が減少し、熱効率を向上させているといえる。

3.4 NO_x 排出量

NO_x 排出量とエンジン回転数の関係を Fig.5 に示す。条件 2 においては条件 1 よりも NO_x 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。エンジン回転数が上昇すると燃焼室が高温に保持される時間は短くなり、NO_x 排出量は減少する。また、酸素を多く含む BDF を用いると NO_x 排出量は増加することがわかる。エマルジョン燃料使用時は NO_x 排出量は減少する傾向にある。エマルジョン燃料に含まれる水分が燃焼ガスから気化熱を奪うことにより NO_x の生成が抑制されたものと考えられる。Fig.4 より、直接燃焼期間におけるエマルジョン燃料使用時のシリンダ圧力は軽油使用時と同程度であることから、燃料の発熱量から気化熱分が減じられながらも軽油使用時と同等の圧力上昇を可能にする燃焼が行われているといえる。

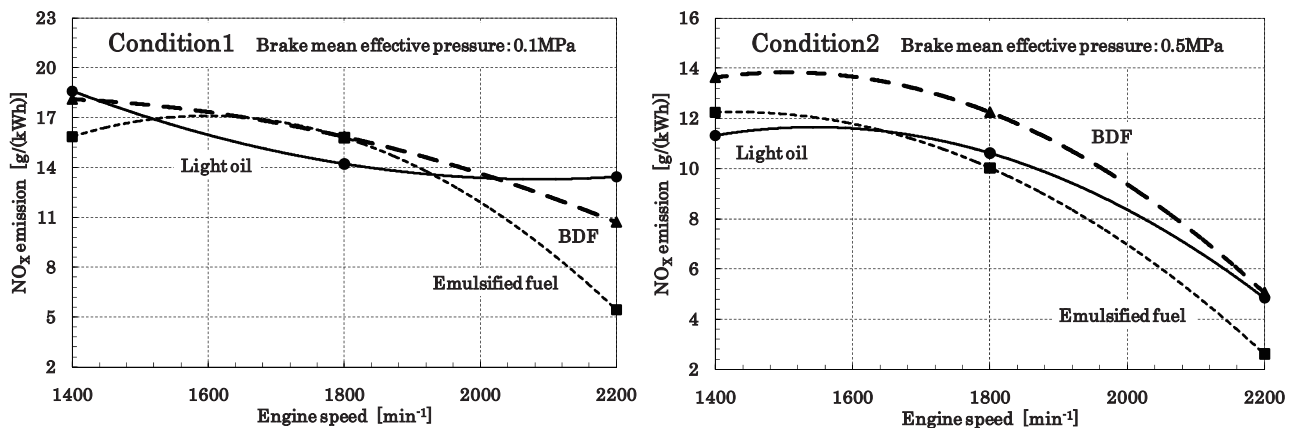


Fig.5 Variations of NO_x emission with engine speed, measured for the conditions 1 and 2 by using light oil , BDF and emulsified fuel

3.5 PM 排出量

PM 排出量とエンジン回転数の関係を Fig.6 に示す。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、排気温度の変化(Fig.3)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、軽油使用時と比較すると、粘度の高い BDF 使用時の PM 排出量が増加する。同様にエマルジョン燃料使用時の PM 排出量

も高い推移を示す．条件 2 においては，エンジン回転数が増加するほど，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．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，酸素を含む BDF を使用した場合，PM 排出量の増加が抑制されたものと考えられる．また，エマルジョン燃料使用時は軽油使用時の PM 排出量を上回る．未燃焼のエマルジョン燃料に含まれる水分が後期燃焼期間においても気化するため燃焼温度を低下させていることも考えられるが，排気温度は他の燃料と大差がないため，燃焼ガス中で増加した水蒸気が残った燃料と酸素が接触する確率を低下させている可能性がある．

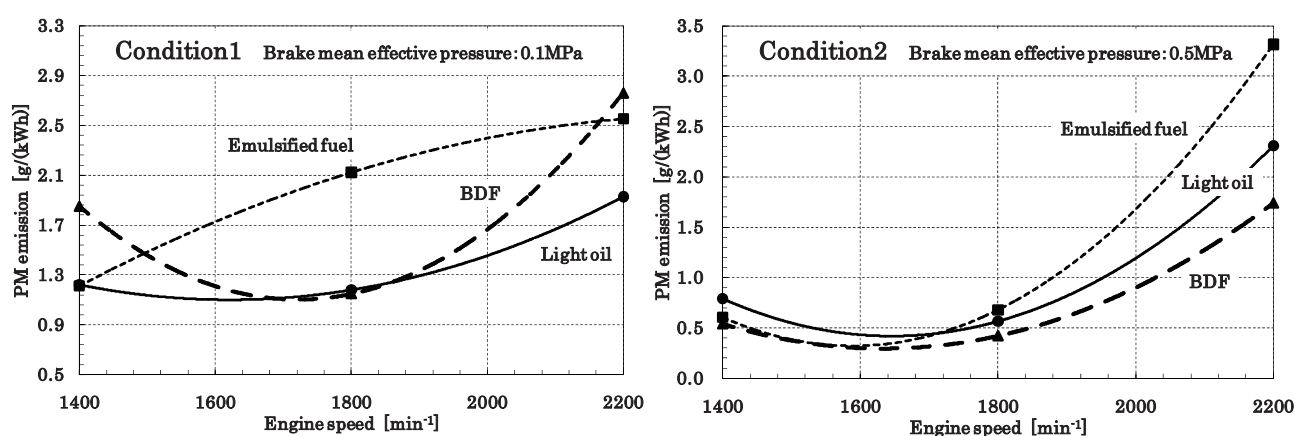


Fig.6 Variations of PM emission with engine speed, measured for the conditions 1 and 2 by using light oil , BDF and emulsified fuel

3.6 PM に含まれる成分

燃料の違いが燃焼状態に及ぼす影響を比較するために，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．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．使用燃料

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 に含まれる成分とエンジン回転数の関係を Fig.7 に示す．いずれの燃料使用時もエンジン回転数の上昇によって Soot が増加する．これは，燃料の完全燃焼に必要な時間があまり変化しないことに

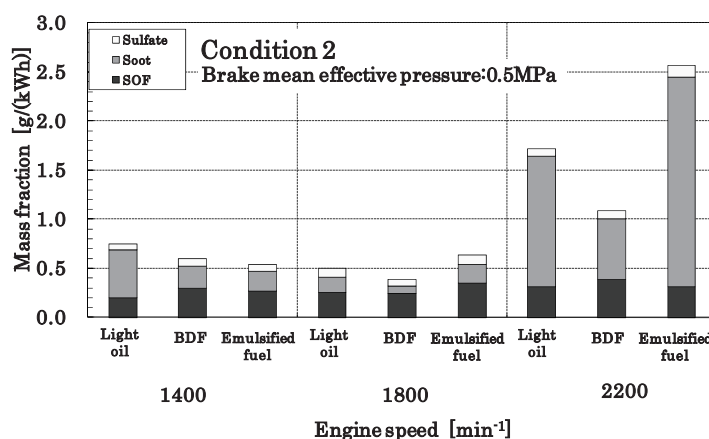


Fig.7 Comparison of mass fraction of the sulfate, soot and SOF contained in PM

対し、エンジン回転数の上昇とともに、後期燃焼期間が短縮し、排気行程が開始されるからである。しかし、BDF 使用時は含有酸素により燃焼が促進され Soot の発生が抑制される。一方、エマルジョン燃料使用時は、未着火燃料に由来する SOF の量は他の燃料を使用した場合と変わらないが Soot は増加する。排気温度(Fig.5)から後期燃焼期間の温度条件がほぼ同じであるとする、エマルジョン燃料の粘度の高さ、または水蒸気が未着火燃料と酸素の結合を妨げて燃料粒の完全燃焼を阻害し、Soot を増加させているものと考えられる。

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、軽油、BDF およびエマルジョン燃料を用いたディーゼルエンジンの排出ガス特性を比較検討した。

軽油と比較すると、BDF およびエマルジョン燃料の粘度は高く速やかな燃焼には不利であるが、BDF の含有酸素は燃焼中の酸素供給に、エマルジョン燃料の水分は燃料の微粒化に有効であることを確認した。

エマルジョン燃料を用いると、軽油のみを用いる場合よりも軽油の消費量が低減する。しかし、軽油以外の可燃性物質の燃焼も無視できない。したがって、実質の熱効率を論ずるためには軽油と水以外の成分を明らかにして検討する必要がある。

NO_x 排出量は、とくに高回転、高負荷の運転条件でエマルジョン燃料を用いた場合に減少する。PM 排出量は、BDF を用いると減少し、エマルジョン燃料を用いると増大する。エマルジョン燃料に含まれる水分は NO_x 低減に有効であるが、PM を増加させている可能性がある。しかし、燃料の粘度を低下させると PM 排出量が減少すると思われる。

エマルジョン燃料の性状の安定性を確保しながら粘度を適正に調整し、酸素含有物質の配合ができれば排出ガス低減効果が拡充する可能性がある。

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) 池上詢, バイオディーゼル・ハンドブック, 日報出版(2006), 7.
- 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, 61-11(2007), 22.
- 4) エマルジョン燃料協会, <http://www.emulsion-fa.com/about.html>
- 5) 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.
- 6) 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.
- 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, NTS(2007), 482.
- 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 23 年 3 月 31 日受理)