

バイオマス燃料対応ディーゼルエンジンの研究開発(第1報)

- バイオマス燃料が既存のディーゼル機関の排出ガス特性に与える影響 -

環境研究領域 川野 大輔 石井 素 後藤 雄一 野田 明
(株)新エィシーイー 青柳 友三

1. まえがき

2005年2月に発効した「京都議定書」により、日本に対しては、2008～2012年までにCO₂を代表とする温室効果ガスの排出量を、1990年比で6%削減する目標が設定されることとなった。しかしながら、日本のCO₂排出量は年々増加の一途を辿っており、中でも運輸部門におけるCO₂排出の増加率が大きいものの一つであることから、自動車から排出されるCO₂低減が重要な課題となっている。

バイオマス燃料は「カーボンニュートラル」の性質を有するため、CO₂排出抑制の効果が期待されており、そのディーゼル機関への適用はCO₂排出の抑制手段の一つと考えられている。また、バイオマス燃料の利用により地球温暖化防止を効率的に進めるための方法としては、100%(ニート)あるいはそれに準ずる高い濃度で利用することが挙げられる。

一方、排出ガスに関しては、新長期規制が2005年10月から実施されることに加えて、2009年に実施予定のポスト新長期規制¹⁾についても答申が出され、バイオマス燃料を使用した場合においても、より一層の排出ガス改善が求められることとなる。

これらの背景から本研究では、既存のディーゼル機関を低公害のバイオディーゼルに改良し、バイオマス燃料普及のための技術指針を明確にすることを目的としている。本報では、既存のディーゼル機関にバイオマス燃料を適用し、燃焼・排出ガス特性の相違点を従来の軽油と比較することにより、今後既存のエンジンシステムを改良するための方向性を明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

本研究では、低公害のバイオディーゼルを開発するため、現行で最も排出ガス特性が優れたエンジンシステムをベース機関として採用した。本実験で用いたエンジンシステムの概略図、および諸元を表1、図1に

示す。供試エンジンは直列4気筒インタークーラターボディーゼルエンジンである。排出ガス低減技術としてクールドEGRや可変ノズルターボを有し、加えてDPNR(Diesel Particulate-NO_x Reduction)システム²⁾を搭載しているため、新長期規制値レベルの排出ガスを達成している。

エンジンアウトおよび触媒後の排出ガス(CO, CO₂, O₂, THC, NO_x)の測定には、排出ガス測定装置

Table. 1 Specifications of test engine

| | |
|-------------------|--|
| Type | 4-cylinder Intercooler-turbo diesel engine |
| Fuel | Low S (S<10ppm) |
| Injection system | Common-rail |
| Devices | Cooled EGR, DPNR |
| Bore x stroke | 104 x 118mm |
| Displacement | 4,009cc |
| Compression ratio | 18.0 |
| Max. power | 110kW (150PS) / 3,000rpm |
| Max. torque | 392Nm (40.0kgm) / 1,600rpm |

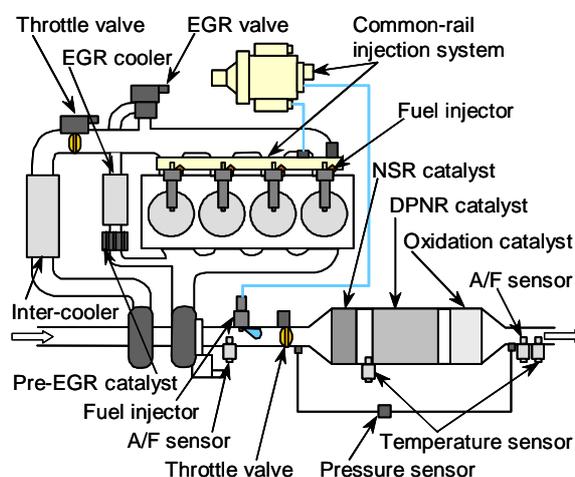


Fig. 1 Schematic diagram of engine system²⁾

Table. 2 Fuel properties

| Properties | | Diesel fuel | RME |
|-------------------------------|----------------------|-----------------|--------|
| Density (15deg.C) | [g/cm ³] | 0.8217 | 0.8835 |
| Kinematic viscosity (40deg.C) | [mm ² /s] | 3.355 (30deg.C) | 4.310 |
| Flash point | [deg.C] | 64.0 | 174.0 |
| Cetane number | [-] | 58.3 | 52.8 |
| Distillation point | IBP | 165.0 | 336.5 |
| | 10% | 204.5 | 339.5 |
| | 50% | 282.5 | 341.5 |
| | 90% | 332.5 | 345.0 |
| | EP | 353.0 | 408.0 |
| CHO | C | 86.1 | 77.0 |
| | H | 13.8 | 12.0 |
| | O | <0.1 | 10.2 |
| Low heating value | [kJ/kg] | 43,092 | 36,980 |
| Pour point | [deg.C] | -27.5 | -10.0 |
| Cloud point | [deg.C] | -5.0 | -5.0 |
| CFPP | [deg.C] | -9.0 | -5.0 |
| Sulfur content | [ppm] | 3.0 | 2.0 |

(HORIBA: MEXA 7100EGR) を用いた。PM については、後処理装置からの排出ガスを部分希釈トンネルで希釈した後、テフロンフィルタにて捕集した。また、エンジンアウトにおける PM 排出特性を把握するため、排気ガスを触媒前から直接サンプリングし、希釈装置にて 64 倍で希釈した後、EEPS (Engine Exhaust Particle Sizer, TSI: Model 3090) を用いて PM の粒径分布を測定した。さらに定常運転の際には筒内圧とノズル針弁リフトのデータを採取し、100 サイクル平均の筒内圧データから熱発生率を算出した。

3. 実験条件

世界中で様々なバイオマス燃料が使用されているが、本研究では欧州のバイオディーゼル燃料の性状規格 (EN14214) に適合した菜種油メチルエステル (Rapeseed oil Methyl Ester, RME) を使用した。RME と軽油の燃料性状を比較したものを表 2 に示す。RME は密度、動粘度、蒸留点ともに軽油と比べて高く、燃料の微粒化・蒸発特性の悪化が懸念される。しかし、RME は約 10 wt.% の酸素が含まれる含酸素燃料であ

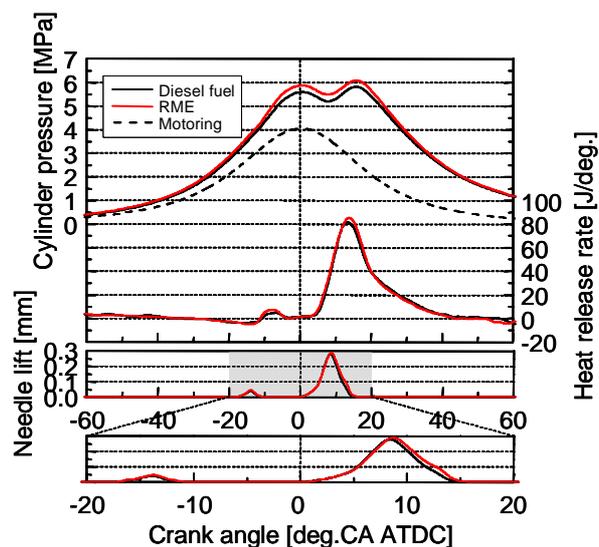


Fig. 2 Cylinder pressure and heat release rate (Engine speed : 1600 rpm, BMEP : 0.64 MPa)

り、すすの排出を大幅に低減できる可能性を有する。なお、本実験を行った範囲では、バイオマス燃料使用時に生じる、燃料噴射系等の不具合³⁾は生じなかったことを追記しておく。

排出ガス測定の際は、1200 ~ 3200 rpm の定常運転に加え、JE05 モードによる過渡運転の試験も行った。JE05 モード試験では変速ポイントを専用の変換アルゴリズムで計算する必要があるが、その際に必要な車両諸元データとして、供試エンジンが搭載されている車両のデータを用いた。

4. 実験結果および考察

4.1. 定常試験

1600 rpm における筒内圧、熱発生履歴、およびノズル針弁リフトを図 2 に示す。負荷を変化させてもほぼ同様の傾向であったため、本図では代表例として BMEP 0.64 MPa の場合のみを示している。針弁リフトの結果から、両燃料ともに上死点前 18 度にパイロット噴射、続いて上死点でメイン噴射が行われているが、軽油よりも RME の方で開弁時間が増加している。これは、RME の単位体積あたりの発熱量が軽油と比べて約 8 % 低く、RME 使用時に軽油と同じ BMEP を得るには、その分軽油以上の燃料噴射量を必要とするためである。また、他の研究において、RME は軽油に比べて体積弾性率が高いため、ジャーク式燃料噴射ポンプを用いた場合には噴射時期が進角する⁴⁾ことが報告されているが、本エンジンはコモンレール式噴射システムを採用しているため、本実験でその現象は見

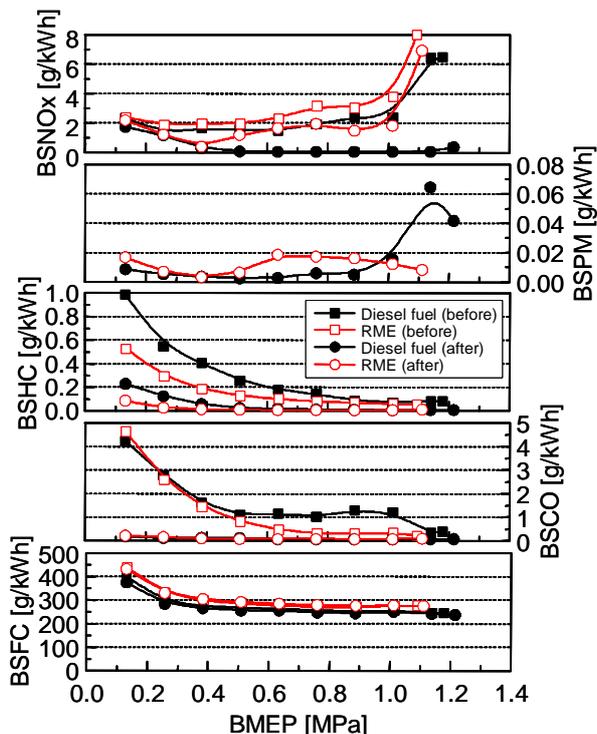


Fig. 3 Exhaust emissions before and after catalyst
(Engine speed : 1600 rpm)

られなかった．着火遅れは両者で相違はないが，1 段目と 2 段目ともに RME の方が軽油と比べて熱発生率のピーク値が高く，拡散燃焼時の燃え切りは RME の方が早くなっている．これらの熱発生の傾向は，軽油に比べて RME の燃焼率が高いことを示している．

1600 rpm における触媒前後の排出ガス特性を図 3 に示す．また，図 3 のデータから求めた触媒による各成分の浄化率を図 4 に示す．触媒前の NO_x 排出量は，軽油よりも RME の方で高くなっている．この傾向は，他のバイオディーゼルに関する研究⁵⁻⁶⁾においても報告されているが，その詳細な原因に関しては未だ明らかになっていない．本実験で得た熱発生履歴から判断すると，燃料噴射量の多い RME では，筒内温度の高温保持時間が増加し，それに伴い NO_x の生成が活性化することが考えられるが，詳細に関しては再度検討する予定である．図 4 でもわかるように，RME の場合では触媒による NO_x 浄化率は，BMEP 0.5 MPa 以上で 50 % 未満とかなり低く，その結果高負荷側では触媒後の NO_x 排出量は軽油と比べて極端に増加する．上述のように RME は含酸素燃料であるため，軽油で適合されているリッチスパイク量では噴射量が不足していることが考えられる．また，図 4 の排気温度のデータ中に各燃料の蒸留範囲を追記した．軽油の場合は低負荷であっても蒸発が可能であるが，RME が排

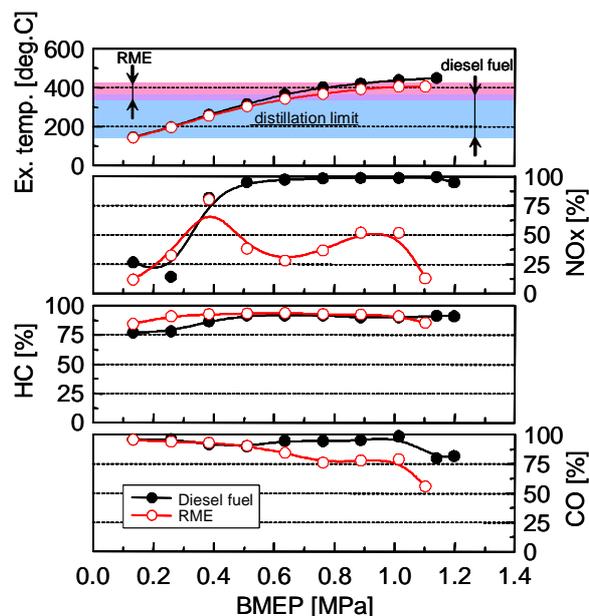


Fig. 4 Reduction rate of exhaust emissions
(Engine speed : 1600 rpm)

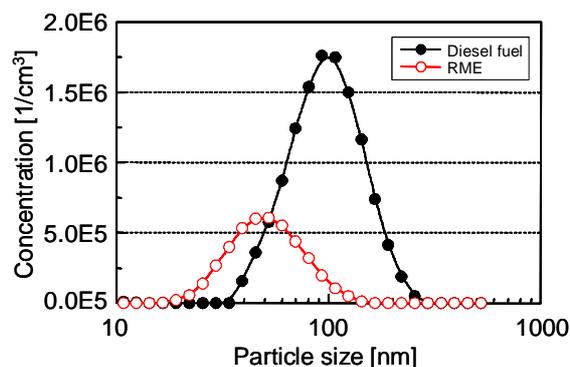


Fig. 5 Particle size distribution before catalyst
(Engine speed : 1600 rpm, BMEP : 0.64 MPa)

気管中で蒸発するのは高負荷域に限られる．すなわち，RME では微粒化特性が悪いことに加え，排気管中の温度程度では極めて蒸発しにくいいため，触媒内で還元剤として機能しにくいことも考えられる．したがって，RME 使用時に NO_x の高い浄化率を得るためには，リッチスパイクの与え方を工夫する必要がある．

PM に関しては，装置上触媒後のみのデータを示すが，高負荷域を除いて，RME では軽油に比べて PM の排出量が上回っている．この原因を明らかにするため，EEPS を用いて触媒前の PM の粒径分布測定を行った．その結果を図 5 に示す．なお，触媒後における PM の粒径分布測定も試みたが，PM 排出濃度が EEPS の測定下限を下回っていたため，排出傾向を正確に得ることはできなかった．両燃料とも 1 つ山の粒径分布を形成するが，RME では軽油に比べて PM の粒径分

布が小粒径側に移行し、その粒子数のピーク値は低い。したがって、RME ではすす生成が抑制されるため、触媒前では極めて低いPM 排出量を示すことが類推できるが、触媒後のPM 排出傾向とは逆になっている。これは、NO_x 吸蔵還元触媒のためのリッチスパイクが未反応のまま排出され、SOF (Soluble Organic Fraction) の排出量が増加したためと考えられる。

触媒前におけるHC とCO に関しては、図2のデータでも示したようにRME が燃え切り性に富むため、いずれの成分もRMEの方が低い値を示している。さらに図4からも明らかなように、触媒による浄化率はいずれの負荷でも高く、触媒後のHC、CO は低く抑えられる。したがってHC、CO に対しては、特にRME 使用時の対策を施す必要はないものと思われる。

RME の燃費率は、図3のようにすべての負荷で軽油と比べて約10%悪化する。RME は発熱量が低いことに起因して燃料噴射量が増加するためである。少しでも改善するためには、噴射時期の最適化等の処置が

必要であろう。

4.2. JE05 モード試験

JE05 モード走行時における排出ガス成分の時系列変化を図6に示す。HC、CO に関しては定常試験の結果と同様に、両燃料ともに後半の高速・高負荷部分以外では極めて低い値であり、高速・高負荷部では軽油の場合のみでHC、CO 排出量が増加する傾向が見られ、RME では顕著な増加は見られない。

NO_x に関しては、いずれの時間においてもRMEの方がNO_x 濃度は高く、特に加速時に増加していることがわかる。このNO_x 排出量の相違は、排気温度の低下から生じることも考えられるが、排気温度は高速部分で若干RMEの方が低い箇所が見受けられるものの、両燃料でほぼ同様の排気温度履歴である。したがって、定常試験の結果からも見られるように、RMEでは触媒のNO_x 浄化率が低いのに加え、エンジンアウトでNO_x の排出が増加するため、触媒がそれに対応しきれなかったものと考えられる。

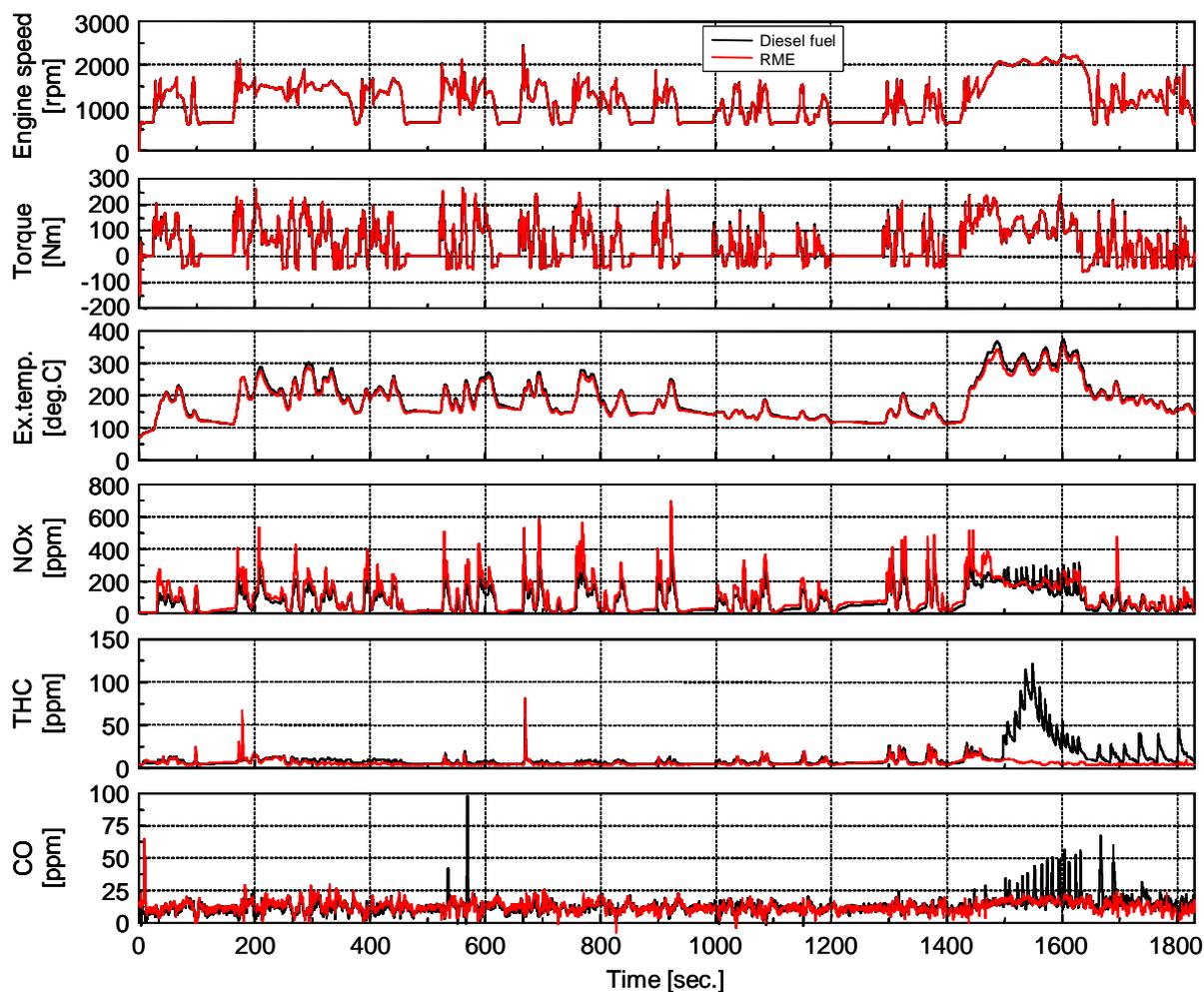


Fig. 6 Temporal change in exhaust emissions in JE05 mode test

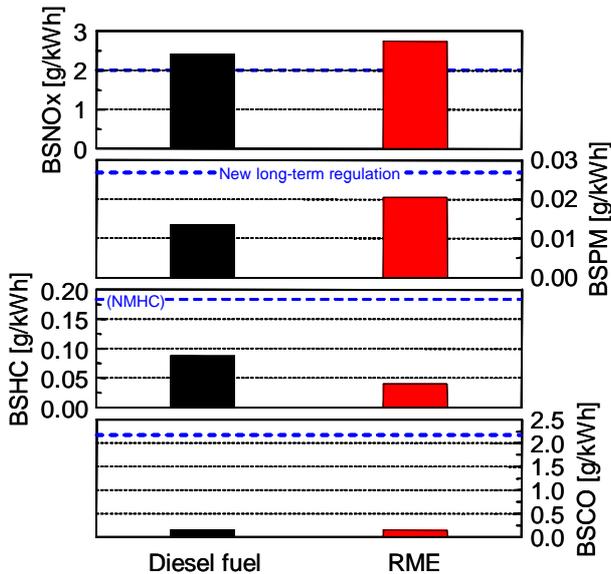


Fig. 7 Exhaust emissions in JE05 mode test

図7にJE05モード試験による排出ガス測定結果を示す。本図には新長期規制値（HCに関しては非メタン系炭化水素 NMHCの規制値）を併記している。HC、COに関しては、定常試験やJE05試験の時系列データからも明らかなようにRMEの方が軽油よりも低減されており、その排出レベルは新長期規制値を大きく下回っている。

NO_xに関しては、軽油、RMEともに新長期規制値よりも高く、特にRMEでは軽油よりも多く排出している。しかし、定常試験の結果からRMEの場合では大幅なNO_x排出量の増加が予想されるが、実際は定常試験で見られた程度の急激な増加には至っていない。JE05モードはトランジェントモードであり、一概に定常試験におけるNO_x排出量と一致するとは考えにくい。JE05試験における排出量を理解する上で一つの指針になるものと考え、定常試験から求めた各燃料におけるNO_x排出量マップと、JE05モード走行の運転ポイントの関係を調べた。その結果を図8に示す。NO_x排出量マップでは、軽油では高回転・高負荷域、RMEでは加えて低回転・高負荷域でも高いNO_x排出量が認められるが、JE05運転領域ではこれらの高NO_x排出領域が少なく、比較的低NO_xの領域に分布している。したがって、RMEのNO_x排出量の増加が著しくないのは、JE05モードの運転領域が比較的低回転・低負荷に限られるためであると推測できる。ただし、いずれにしてもNO_x排出量は新長期規制値をも超えているため、新たな対策を講じる必要がある。

PM排出量は、両燃料とも新長期規制値はクリアしており、特に軽油では規制値の約1/2に抑えられてい

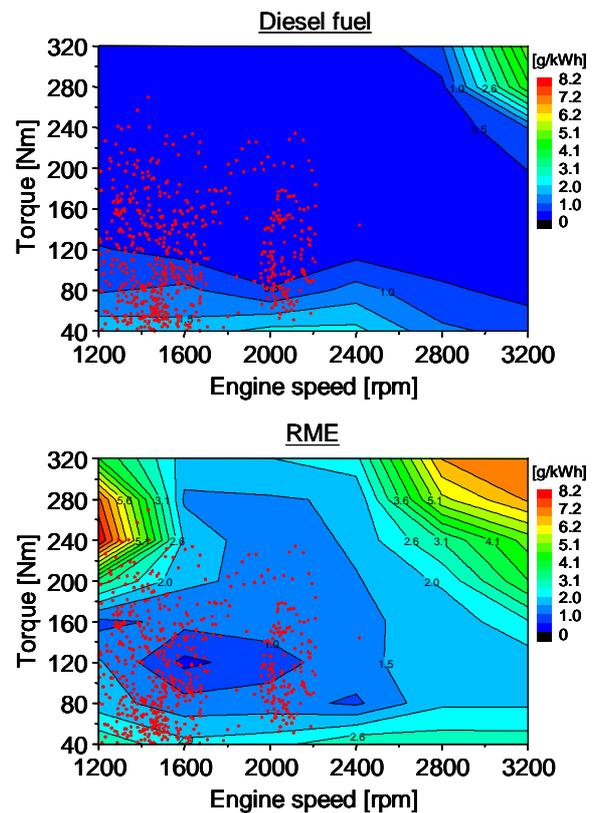


Fig. 8 NO_x emission map

る。しかし、RME使用時は軽油よりも1.5倍程度高い排出量を示している。含酸素燃料によりすす生成が低減できるメリットがこの測定結果からは見られず、これに関してもNO_xと同様に、定常試験における触媒後の排出ガス測定結果の傾向と一致している。したがって、トランジェント試験においてもリッチスパイクに起因するSOFが、多量に排出されているものと考えられる。

4.3. バイオマス燃料に対応するための具体的方策

以上のように、定常およびトランジェント試験を行い、触媒後のNO_x、PM排出ガス特性は軽油の触媒前後の排出ガス変化と比べて悪化する傾向を示した。これらの改善策として考えられる方法を以下に示す。

(1) NO_x

NO_x排出量は軽油を用いた場合でも新長期規制値より高いため、RMEを用いてNO_xを大幅に低減するには、リッチスパイクの適正化による触媒の浄化率改善のみならず、エンジンアウトのNO_xをも低減する必要がある。具体的には、バイオマス燃料はすす生成が抑制される燃料であるため、軽油と比べてEGR率を高く設定することができることから、高EGR率化によりPMの増加を抑制した上で、エンジンアウトのNO_xを低減するのが最も有効な手段と考えられる。

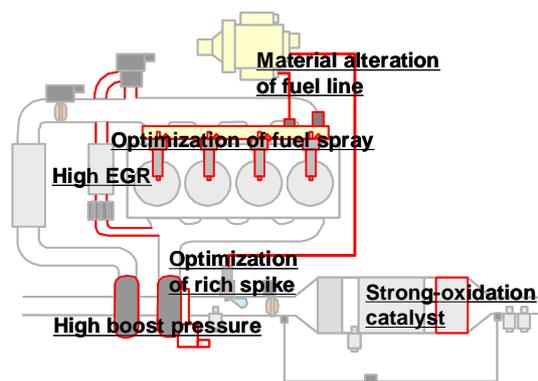


Fig. 9 Engine modifications for low emission biodiesel

(2) PM

NO_x 対策として、極端に EGR 率を高めると PM が増加する可能性があるため、これに高過給を追加することにより空気量を確保することで、PM の増加を抑えることができる⁷⁾。また、バイオマス燃料使用時に排出される PM 中の主成分は SOF であると考えられ、この低減には後段の酸化触媒として強酸化触媒を採用するのが最も効果的である。

(3) 燃料噴射系

RME の燃料性状から類推すると、微粒化・蒸発特性が悪いことが予想されるため、高噴射圧等の採用により改善することが望ましい。加えて、100%バイオマス燃料で長距離走行を行うことを考慮すると、燃料配管からの燃料漏れや配管腐食への対策として、配管の材質変更等の処置が必要である。

5. まとめ

既存の最新型ディーゼルエンジンにバイオマス燃料 (RME) を適用し、燃焼・排出ガス特性を従来の軽油の場合と比較した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 軽油, RME 双方の着火遅れに相違はないが、筒内圧および熱発生率のピーク値は RME の方が軽油に比べて若干増加する。
- (2) 定常試験における RME の NO_x 排出量は、触媒前で軽油と比べて増加することに加え RME を用いた場合には触媒による浄化率が低下する。PM 排出量に関しては、触媒前では RME の方が軽油と比べて排出量が少ないのに対して、触媒後では逆に増加する。HC および CO 排出量は触媒の効果によりどちらの燃料も十分に低い値を示す。
- (3) JE05 モード試験では、HC, CO 排出量は両燃料ともに極めて低いが、RME での NO_x, PM 排出量は

軽油と比べて増加し、特に NO_x に関しては新長期規制値をも上回った。なお、この JE05 モード試験の結果は、定常試験の排出ガス試験結果と傾向が概ね一致する。

- (4) NO_x 低減には、含酸素燃料のすす生成抑制効果を利用した高 EGR 化、およびリッチスパイクの工夫が必要である。高 EGR 化に加え高過給を行うことにより、PM を抑制することが期待できる。さらに、バイオマス燃料使用時に排出される PM 中の主成分である SOF は、強酸化触媒により除去可能である。

6. 謝辞

本研究は、国土交通省受託「バイオマス燃料対応自動車開発促進事業」の一環として行われた。また、当研究所 増永勝幸氏の多大なるご協力があったことをここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 環境省 中央環境審議会：今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について (第八次答申), (2005).
- 2) Nakatani, K. et al. : Simultaneous PM and NO_x Reduction System for Diesel Engines, SAE Paper 2002-01-0957, (2002).
- 3) 星野 崇, 塩谷 仁 : バイオディーゼルフューエル規格化の現状と今後の展開, 自動車技術会 ディーゼル機関部門・燃料潤滑油部門合同委員会資料, (2005).
- 4) Szybist, J. P. et al. : Behavior of a Diesel Injection System with Biodiesel Fuel, SAE Paper 2003-01-1039, (2003).
- 5) Graboski, M. S. et al. : Combustion of Fat and Vegetable Oil Derived Fuels in Diesel Engines, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.24, No.2, pp.125-164, (1998).
- 6) United States Environment Protection Agency : A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions Draft Technical Report, EPA420-P-02-001, (2002).
- 7) 青柳 友三ほか : 単気筒エンジンによる超高過給ディーゼル燃焼の研究 (第 1 報) 過給圧力を変化させた場合の燃焼特性, 自動車技術会論文集, Vol.35, No.3, pp.35-40, (2004).