

## 4. 重量車用バイオマス燃料導入に向けた交通研の取り組み

環境研究領域 ※石井 素 水嶋 教文 川野 大輔 佐藤 由雄 阪本 高志 後藤 雄一

### 1. はじめに

温室効果ガス排出量の削減およびエネルギーの確保を狙いとして、バイオディーゼル燃料、特に脂肪酸メチルエステル(Fatty Acid Methyl Ester、以下 FAME)の利用が世界的に加速しつつある。IEA によると 2009 年の FAME 世界年間生産量は石油換算で 1290 万 t であり、2005 年の 291 万 t に対して 4 年間で 4 倍以上も生産量が増大している。例えば欧米諸国では、広大な農地を利用して菜種、大豆等を栽培し、搾取したバージンオイルから FAME を大量に生産している。

日本国内においては、地方自治体や事業者により回収された廃食用油が FAME に転換され、利用されている。(株)富士経済の調査<sup>(1)</sup>によると、国内の FAME 製造事業者は 400~500 社あり、2009 年における年間総生産量は約 14000 kL である。国内の年間軽油消費量約 4000 万 kL と比べるとその普及量はわずかである。一方、国内の廃食用油の発生量は推計で年間約 40~50 万 kL 程度といわれており、その約半分は既に工業用や飼料用に再利用されている。このため、FAME に利用可能な廃食用油の潜在量は約 20 万 kL 程度である。利用可能な廃食用油 20 万 kL 全てを FAME として利用した場合、軽油の年間消費量に対してわずか 0.5% を代替することになる。

以上のように、国内の FAME は生産量が少ないものの多くの事業者が参入しているため、環境負荷の観点から適正な使用を推進する必要がある。交通安全環境研究所では、環境省公害防止等試験研究費による委託事業「ディーゼル車の環境性能に与えるバイオマス燃料の影響実態把握とその評価に関する研究」(平成 20 年度~平成 23 年度)を中心として、FAME をディーゼル重量車に適用した際の排出ガス性能、およびバイオディーゼル燃料の今後の可能性について、調査、検討を実施したのでその成果を報告する。

### 2. 国内における FAME 使用実態の調査

平成 21 年 2 月に施行された改正揮発油品質法によると、軽油に FAME を混合する場合、軽油への FAME 混合割合が 5 mass%以下に規制されている。一方、軽

油に混合せずに FAME100%(ニート)として走行することも可能である。交通安全環境研究所では自動車検査証備考欄に「廃食用油燃料併用」等が記載された車両の使用者(4651 件)に対し、アンケート調査票を郵送し、FAME 使用実態を調査した。この結果、図 1 に示すとおり軽油と混合せず FAME100%で使用しているケースがほとんどであり、軽油と混合している例は極めて少なかった。

### 3. FAME 使用時の排出ガス性能の実態

#### 3. 1. シャシダイナモ試験概要

新短期排出ガス規制、新長期排出ガス規制、ポスト新長期排出ガス規制に適合した各種重量車に廃食用油から製造した FAME を使用した際の排出ガス性能への影響を、シャシダイナモ試験により評価した。試験条件は JE05 排出ガス試験モードである。

試験車両の諸元を表 1 に示す。車両 A および B は後処理装置に酸化触媒(DOC)のみを搭載した新短期規制適合車である。また、車両 C、D および E は後処理装置に DOC とディーゼルパーティキュレートフィルタ(DPF)を搭載した新長期規制適合車であり、車両 F は同じく新長期規制適合であるが、DPF を搭載せずに尿素 SCR システムを搭載している。車両 F は後処理装置に DOC と DPF を搭載し、NOx 低減対策として二段過給との併用による大量排気再循環(EGR)を導入したポスト新長期規制適合車である。

#### 3. 2. シャシダイナモ試験結果

新短期規制適合車における NOx および PM の排出量を図 2 に、新長期およびポスト新長期規制適合車にお

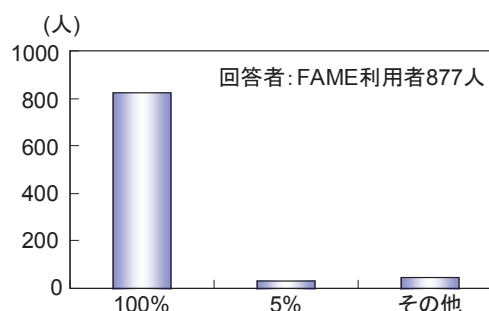









図 1 軽油への FAME 混合割合のアンケート調査結果

表2 試験車両諸元

車両	A	B	C	D	E	F	G
	塵芥車	バス	塵芥車	バス	トラック	バス	トラック
車両タイプ							
最大積載量 or 乗車定員	2000 kg	78人	2000 kg	74人	3000 kg	75人	3000 kg
車両総重量	6365 kg	14360 kg	6445 kg	14410 kg	6260 kg	15545 kg	6585 kg
全長	5340 mm	10920 mm	4310 mm	10290 mm	6510 mm	10990 mm	6600 mm
全幅	1850 mm	2500 mm	1840 mm	2490 mm	2185 mm	2490 mm	2220 mm
全高	2290 mm	2930 mm	2310 mm	3180 mm	3045 mm	2990 mm	2450 mm
エンジン タイプ	直噴ターボ ディーゼル	直噴ターボ ディーゼル	直噴ターボ ディーゼル	直噴ターボ ディーゼル	直噴ターボ ディーゼル	直噴ターボ ディーゼル	直噴ターボ ディーゼル
総排気量	4.89 L	7.79 L	4.89 L	7.79 L	4.01 L	9.20 L	3.00 L
最大出力	103 kW / 2700 rpm	191 kW / 2700 rpm	110 kW / 2700 rpm	191 kW / 2400 rpm	100 kW / 2500 rpm	220 kW / 2200 rpm	110 kW / 2800 rpm
最大トルク	412 Nm / 1600 rpm	745 Nm / 1400 rpm	441 Nm / 1600 rpm	761 Nm / 1450-2200 rpm	392 Nm / 1600 rpm	1324 Nm / 1400 rpm	375 Nm / 1400-2800 rpm
変速機	4速AT	5速AT	4速AT	5速AT	6速MT	5速AT	6速MT
後処理装置	DOC	DOC	DOC, DPF	DOC, DPF	DOC, DPF	DOC, 尿素SCR	DOC, DPF
排出ガス規 制	新短期規制 (平成15年)	新短期規制 (平成16年)	新長期規制 (平成17年)	新長期規制 (平成17年)	新長期規制 (平成17年)	新長期規制 (平成17年)	ポスト新長期規制 (平成22年)

ける NOx および PM の排出量を図 3 に示す。いずれの図とも、FAME 混合割合とは軽油に対する FAME の質量混合割合を示し、0%は軽油を、100%は FAME である。

新短期規制適合車においては、NOx 排出量が 2 台とも規制値以上となった。本来、新短期規制においてはエンジンダイナモで D13 モードといわれる定常試験を実施する。本試験では、シャシダイナモにおいて過渡条件である JE05 モード試験を実施したため、NOx 排出量が増大した。また、車両 B においては FAME 混合割合の増加に伴い NOx 排出量が増大する傾向を示した。PM については規制値よりも十分に低く、かつ FAME 混合割合の増加に伴っていずれの車両においても減少した。これは、含酸素および芳香族非含有といった FAME の特性によるものである。

新長期およびポスト新長期規制適合車においては、いずれの車両とも FAME 混合割合の増加に伴い NOx が増大した。軽油(FAME 混合割合 0%)に対する増加率は新短期規制適合車の場合よりも高い。特に、尿素 SCR システムを搭載した車両 F では増加率が著しく高い結果を示した。PM については、DPF を搭載している車両の場合は FAME 混合割合に対して概ね一定であり、規制値に対して十分に低い値を示した。DPF を搭載していない車両 F については、新短期規制適合車と同様に、FAME 混合割合の増加に伴い減少した。

次章以降において、本結果の要因を各種実験結果により解析するとともに、排出ガス悪化を抑制可能なバイオディーゼル燃料の方向性について検討した。

JE05モード(新短期排出ガス規制適合車)

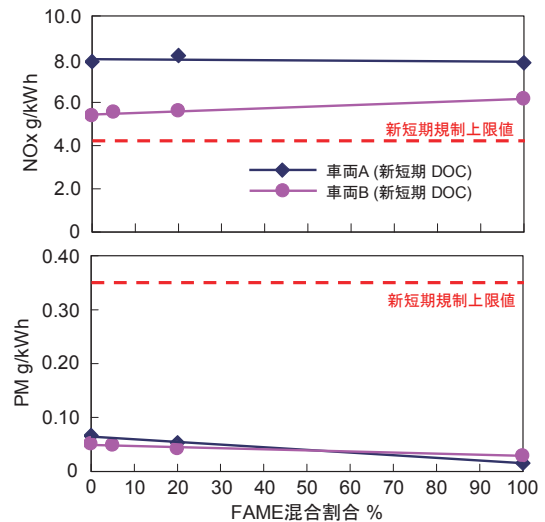


図2 新短期規制適合車における JE05 モード NOx および PM 排出量

JE05モード(新長期、ポスト新長期排出ガス規制適合車)

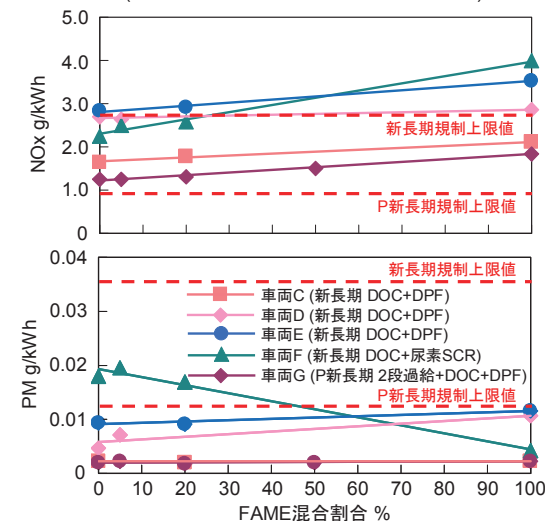


図3 新長期・ポスト新長期規制適合車における JE05 モード NOx および PM 排出量

## 4. FAMEにおけるNO<sub>x</sub>増大要因

### 4. 1. 尿素SCR搭載車におけるNO<sub>x</sub>増大要因

前章で確認された尿素 SCR システム搭載車における NO<sub>x</sub> 増大の要因を詳細に把握するため、図 4 に示す尿素 SCR システムを搭載したエンジン台上試験装置により実験を実施した<sup>(2)</sup>。エンジンは連続再生式 DPF を装着した重量車用ターボインタークーラー付き直列 4 気筒ディーゼルエンジンであり、総排気量 4009 cm<sup>3</sup> である。これに対して、交通安全環境研究所において尿素 SCR システムを後付している。

本試験装置による JE05 モード排出ガス試験を実施し、軽油に対する FAME 混合割合の違いが JE05 排出ガス試験モードにおける NO<sub>x</sub> 排出量への影響を評価した。その結果を図 5 に示す。同図には、尿素 SCR 触媒入口における NO<sub>x</sub> 排出量とテールパイプにおける NO<sub>x</sub> 排出量とから算出される尿素 SCR 触媒における NO<sub>x</sub> 浄化率も同時に示している。本結果より、FAME 混合割合の増加に伴い、NO<sub>x</sub> 浄化率が悪化していることが確認できる。

この要因を解析した結果、FAME 混合割合の増加に伴う SCR 触媒入口の NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比の低下があげられた。SCR 触媒における反応を総括反応式で表現すると以下に示す式(1)で表され、NO と NO<sub>2</sub> の比率が 1 : 1、

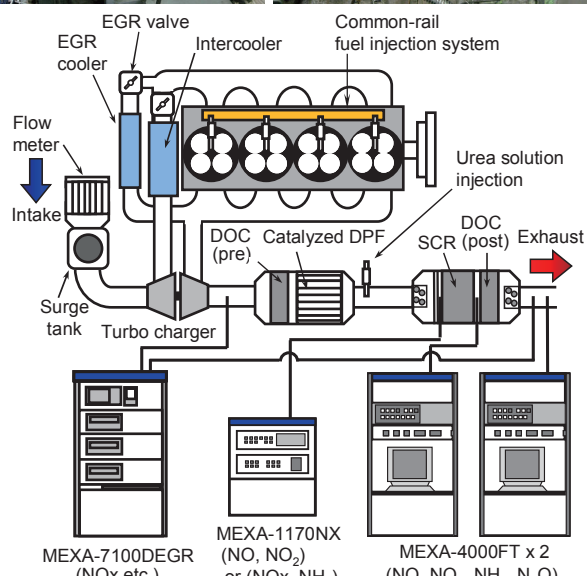
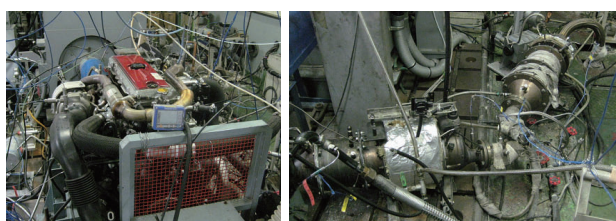


図 4 尿素 SCR システムを搭載したエンジン試験装置 (左写真: エンジン、右写真: 後処理システム)

つまり NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比が 0.5 となることで、高い NO<sub>x</sub> 浄化率が得られることが知られている。



図 6 に、軽油運転時において、異なる酸化力の DOC および DPF を搭載することで JE05 モード平均の SCR 入口 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比を変化させた際の NO<sub>x</sub> 浄化率の関係を示す。同時に、本試験における FAME 運転時の結果も重ねている。本結果より、FAME 混合割合の増加に伴い、SCR 入口 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比が低下し、NO<sub>x</sub> 浄化率が悪化していることが確認できた。

FAME 混合割合の増加に伴い SCR 入口 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比が低下する要因については、SCR 入口(エンジンアウト)NO<sub>x</sub> が増加すること、排気温度低下による DOC の酸化力低下により SCR 入口 NO<sub>2</sub> が低下すること、FAME 使用時に増加する排気中の有機性可溶成分(SOF)により DOC および DPF が被毒すること、など様々な要因が考えられる。

以上より、尿素 SCR 触媒搭載車における NO<sub>x</sub> 排出量の大幅な増大は、他の車両と同様にエンジンアウトでの NO<sub>x</sub> 増加に加えて、SCR 触媒における NO<sub>x</sub> 浄化率の悪化が主要因であることを明らかにした。

### 4. 2. NO<sub>x</sub>触媒非搭載車におけるNO<sub>x</sub>増大要因

尿素 SCR 触媒搭載車のみならず、その他の新長期・ポスト新長期規制適合車においても FAME 混合割合の増加に伴い NO<sub>x</sub> 排出量が増大したため、その要因について述べる。

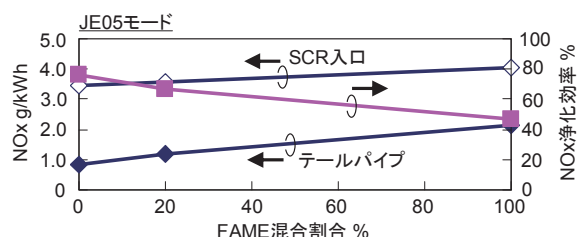


図 5 SCR 入口、テールパイプにおける NO<sub>x</sub> 排出量と SCR 触媒の NO<sub>x</sub> 浄化率

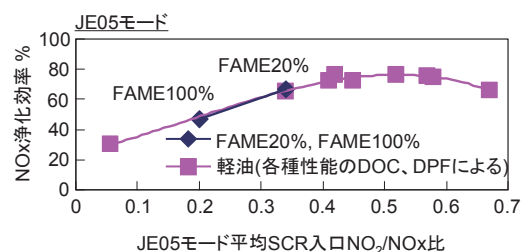


図 6 JE05 モード平均の SCR 入口 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比と SCR 触媒の NO<sub>x</sub> 浄化率の関係

FAME 使用時におけるエンジンからの NOx 排出量が増大する要因は、大きく二つが考えられる。一つは燃料噴霧中における局所空気過剰率(実空燃比/理論空燃比)の変化、もう一つは EGR 率、燃料噴射圧力等のエンジン燃焼制御状態の変化である。両者とも、FAME が含酸素燃料であることに起因して生じる現象である。

図7および図8に、燃料噴霧中における空気過剰率を推計するために実施した<sup>(3)</sup>噴霧観察実験の装置および観察結果を示す。さらに、これらの結果に基づいて推計した燃料噴霧中における局所空気過剰率の結果を図9に示す。図9より、FAME においては噴霧中における空気過剰率が全般的に高く、軽油の場合と比べ

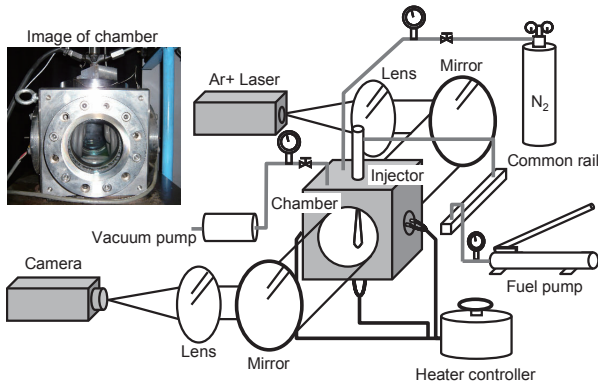


図7 噴霧観察実験装置

ノズル噴孔径 0.20 mm 燃料噴射圧力 80 MPa  
霧囲気圧力 3.2 MPa 定容容器壁温 350 deg.C

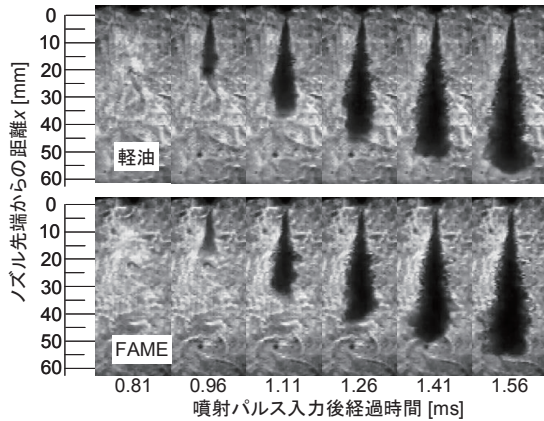


図8 軽油およびBDF(FAME)の噴霧観察画像

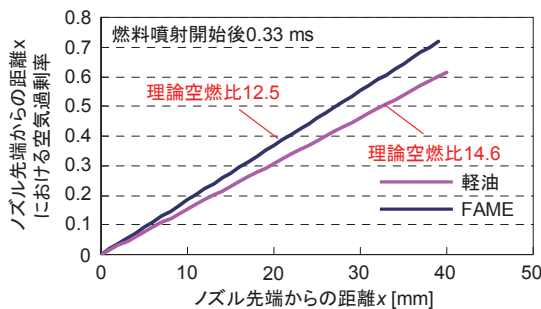


図9 噴霧中における空気過剰率の推計結果

て両論混合比(空気過剰率 1)に近い値となっていることが確認できた。これは、FAME が含酸素燃料であるため、理論空燃比が軽油の場合と比較して低いことが原因である。このような空気過剰率の変化は、一般的に NOx 増大を招く混合条件への変化であるため、FAME 使用時の NOx 増大要因の一つと考えられる。

もう一つの要因である、エンジン燃料制御状態の変化を確認するためにエンジン台上実験を実施した<sup>(4)</sup>。図10に使用した量産エンジンの外観を示す。エンジンは、総排気量 4009 cm<sup>3</sup>の重量車用ターボインタークーラー付き直列4気筒ディーゼルエンジンである。本エンジンに対して FAME を使用した際のエンジン燃焼制御状態の変化を図11に示す。なお、比較のため、同図には軽油およびパラフィン系炭化水素燃料を使用した際の結果についても示した。FAME は前述した

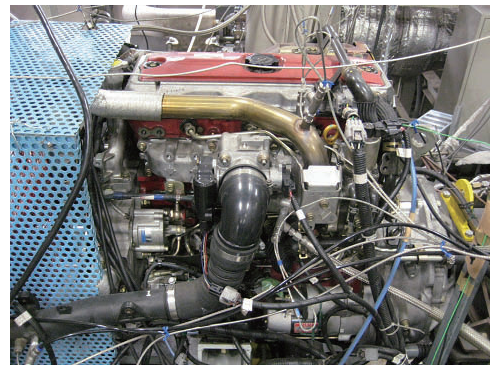


図10 エンジン台上実験装置

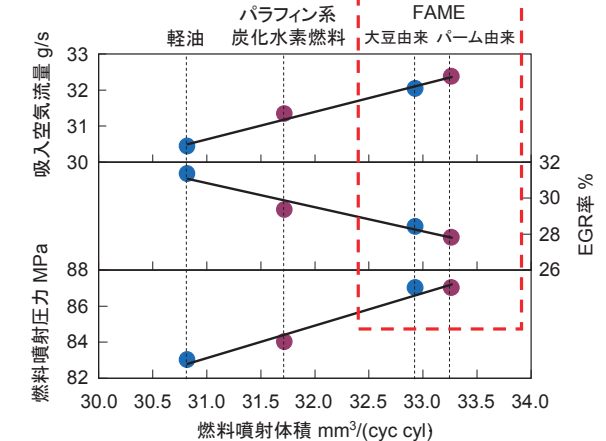
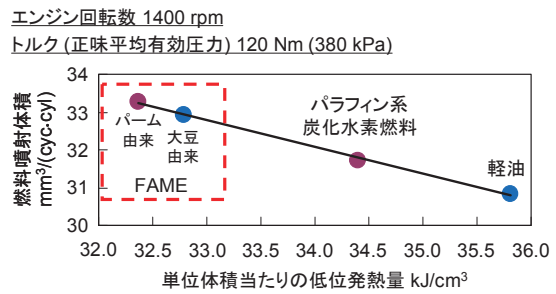


図11 燃料の違いによるエンジン燃焼制御状態の変化

とおり含酸素燃料であるため、軽油や一般的な炭化水素燃料と比較して低位発熱量[kJ/kg]が低い。これに起因して単位体積当たりの低位発熱量[kJ/cm<sup>3</sup>]も低くなるため、トルク一定運転条件の下では同図上段に示すように燃料噴射体積が増大する。一般的なディーゼルエンジンは、燃料噴射体積に応じて燃焼制御状態を定めているため、燃料噴射体積が増大すると同図下段に示すように EGR 率や燃料噴射圧力が変化する。FAME の場合はトルク一定条件下において燃料噴射体積が増大することから、低 EGR 率および高燃料噴射圧力となる。これは、NO<sub>x</sub> がより生成されやすい燃焼制御状態であることが知られており、FAME 使用時における NO<sub>x</sub> 増大のもう一つの要因である。

### 5. NO<sub>x</sub> 増大を抑制可能なバイオディーゼル燃料

FAME 使用時における NO<sub>x</sub> 増大を抑制するためには二通りの方法が考えられる。一つは、燃料側で対策することで、エンジンの設計変更や改造を伴わずに NO<sub>x</sub> 増大を抑制する方法、もう一つは FAME の性状に適したエンジンの設計や燃焼制御を導入することで NO<sub>x</sub> 増大を抑制する方法である。しかしながら、前述したとおり日本国内における FAME の市場は極めて小さいため、軽油との併用が想定される。このため、後者は適切な方法とは言い難く、前者の燃料側での対策が重要となる。

前章で述べたとおり、FAME 使用時におけるエンジンからの NO<sub>x</sub> 排出量が増大する要因は、FAME が含酸素燃料であることに起因している。したがって、非含酸素燃料とすることで、NO<sub>x</sub> 排出量が増大するといった問題を避けられるものと推測される。

昨今、非含酸素燃料のバイオディーゼル燃料としては以下の二つが将来的に有望視されている。動植物油を原料として水素化、脱酸素、異性化処理により得られる水素化バイオ軽油(Hydrotreated Vegetable Oil、以下 HVO)と、あらゆるバイオマス資源からガス化・FT 合成により得られる Biomass to Liquid (以下 BTL)である。いずれも、非含酸素のパラフィン系炭化水素燃料であり、高セタン価、優れた低温流動性といった特徴を有している。HVO については、過去に交通安全環境研究所が中核的研究機関として行った国土交通省の次世代低公害車開発・実用化促進事業において、トヨタ自動車他と東京都環境局および交通局の協力の下で実証運行試験を実施し<sup>(6)</sup>、現在は IEA-AMF 協定

の枠組みで実路走行条件における排出ガスの評価を実施している<sup>(6)</sup>。

### 5. 1. HVOの排出ガス特性

図 10 で示したエンジン台上実験装置において、FAME、HVO、および軽油を使用して JE05 モード排出ガス試験を実施し、エンジン出口において NO<sub>x</sub> 排出量を計測した。結果を図 12 に示す。FAME については大豆油由来のものとパーム油由来のものをを用いた。両者は着火性および燃料中の H/C 比の異なる燃料である。軽油と HVO については同じ炭化水素燃料ではあるが、HVO はパラフィンを主成分としているため着火性が高く、燃料中の H/C 比も軽油と比べて高い。同図は、FAME および炭化水素燃料それぞれにおいて、着火性および H/C 比の違いによる影響を明確化するため、大豆油由来の FAME にはパーム油由来の FAME と同等の着火性となるよう、また、軽油には HVO と同等の着火性となるよう、着火性向上剤 Di-tert-butyl Peroxide (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>O<sub>2</sub>)を 0.8 vol.%添加した結果も示している。この結果、HVO について、以下の NO<sub>x</sub> 排出特性を明らかにした。

- 1) 非含酸素燃料であるため、FAME のような NO<sub>x</sub> 排出量の増大は確認されず、軽油運転時と同等の NO<sub>x</sub> 排出量が得られる。
- 2) HVO と同等の着火性にした軽油においては、従来の軽油と比較して若干の NO<sub>x</sub> 排出量の増加が確認されたにもかかわらず、HVO では NO<sub>x</sub> 排出量増大を抑制できる。
- 3) 2)の要因としては HVO が高 H/C 比であることが考えられる。高 H/C 比の場合、燃焼生成ガス中における水分の割合が高くなるために火炎温度が

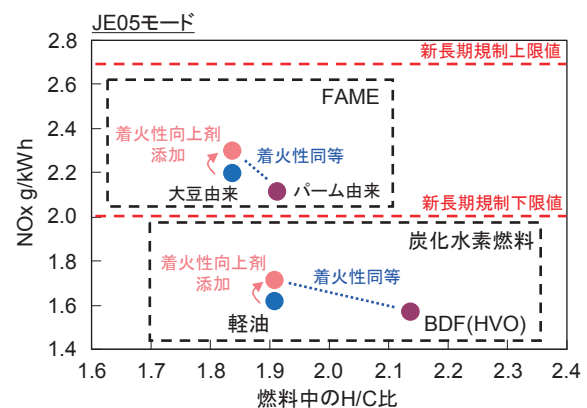


図 12 BDF(FAME)、軽油との比較による BDF(HVO)の NO<sub>x</sub> 排出特性

低下する。これによって、NOx 増大が抑制できたものと推察される。

以上の特性は HVO のみならず、同じパラフィン系炭化水素燃料である BTL に対しても同様に得られるものと予測される。

## 5. 2. 最新車両へのHVOの適用性

以上で明らかとなった排出ガス特性を、実車両でも確認するべく、HVO を用いたシャシダイナモによる JE05 モード排出ガス試験を実施した。使用した車両は表 2 に記載の車両 E および G である。図 13 に NOx および PM 排出量の結果を示す。軽油に対する HVO の混合割合を増加させても、FAME の場合のような NOx 排出量の増大は確認されず、軽油(HVO 混合割合 0%)の場合と同等の NOx 排出レベルとなっていることがわかる。これは新長期規制適合の車両 E およびポスト新長期規制適合の車両 G の両者とも確認できる結果である。(いずれの車両とも NOx 排出量が規制値をわずかに超えているが、これは試験方法および条件が認証試験時と異なるためである。) PM 排出量については、DPF を搭載しているために BDF 混合割合によらず十分に低い値を示している。

本結果より、HVO に関しては最新車両に適用しても軽油の場合と同等の排出ガス性能が得られることを確認した。

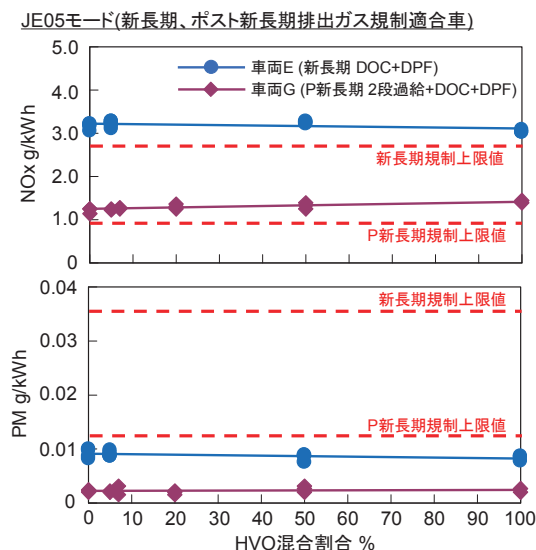


図 13 最新車両に BDF(HVO)を使用した際の JE05 モード NOx および PM 排出量

## 6. おわりに

現在国内で使用されている FAME の排出ガス性能の実態を把握すると共に、FAME 使用時に NOx 排出量が増大する要因について、体系的に実験、解析し、明らかにした。また、NOx 排出量増大の抑制に資するバイオディーゼル燃料の可能性についても述べた。今後は、最新の排出ガス規制に適合した車両に対して、軽油と同様に利用可能な HVO がバイオディーゼル燃料として普及することに期待したい。さらに、動植物油のみならずあらゆるバイオマス資源を有効に利用するという観点から、BTL についても今後の技術開発の動向を把握し、HVO と同様に最新車両への適用性を評価する必要がある。

一方で、これらのバイオマス燃料には温室効果ガスの削減効果が求められる。このため、交通安全環境研究所においては、最新車両への適用性を評価するのみならず、ライフサイクルでの温室効果ガス削減効果を評価し、普及を推進すべきバイオマス燃料を適正に見極める予定である。

## 参考文献

- (1)「化石燃料市場とその代替新燃料市場の調査結果」、(株)富士経済ホームページ、2010 年 2 月、<https://www.fuji-keizai.co.jp/market/10016.html>
- (2)水嶋ほか、“バイオディーゼル燃料が尿素 SCR システムの NOx 浄化特性に及ぼす影響”、自動車技術会論文集、Vol.41、No.2、pp.333-338、2010 年 3 月
- (3)石井ほか、“バイオディーゼル機関の NOx 排出抑制に関する研究—燃料噴射特性が噴霧中の空気導入量に与える影響—”、自動車技術会 第 22 回内燃機関シンポジウム 講演論文集、講演 No.41、pp.237-242、2011 年 11 月
- (4)水嶋ほか、“バイオマス由来ディーゼル代替燃料使用時の NOx 排出特性に関する一考察”、自動車技術会論文集、Vol.43、No.4、pp.849-854、2012 年 7 月
- (5)石井、“次世代合成燃料自動車開発・実用化プロジェクト”、自動車技術、Vol.65、No.11、pp.49-55、2011 年 11 月
- (6)佐藤ほか、“国際エネルギー機関(IEA)における自動車用先進燃料研究の同行と交通研の取り組み”、交通安全環境研究所フォーラム 2011 講演概要、pp.7-12、2011 年 11 月