

# ⑰ ポスト新長期排出ガス規制適合ディーゼル重量車の 実路走行排出ガス評価 —軽油、FAME、およびHVOの排出ガス特性—

環境研究領域 ※水嶋 教文 川野 大輔 石井 素 後藤 雄一  
(一財)環境優良車普及機構 高田 寛

## 1. はじめに

IEA (International Energy Agency : 国際エネルギー機関)によると 2009 年の FAME(Fatty Acid Methyl Ester : 脂肪酸メチルエステル)世界年間生産量は石油換算で 1 290 万 t であり、2005 年の 291 万 t に対して 4 年間で 4 倍以上も生産量が增大している。つまり、ここ数年で、欧米を中心に世界各国でバイオ燃料に対する関心が著しく高まっている。

交通安全環境研究所においてもこれまで、FAME を中心としたバイオ燃料を重量車あるいはディーゼルエンジンに適用した際の環境性能の評価および排出ガス低減技術の検討を、継続的に実施してきた<sup>(1)</sup>。また、排出ガスの評価については、エンジン台上試験およびシャシダイナモ試験のみならず、車載式排出ガス計測システム(以下 PEMS: Portable Emission Measurement System)を用いた実路走行試験によるリアルワールドでの評価技術を開発してきた。

この評価技術を国際的なバイオ燃料研究に活用することを一つの目的とし、交通安全環境研究所は 2009 年から IEA における AMF (Advanced Motor Fuels : 自動車用先進燃料) 研究開発実施協定に参画し、国際共同研究 “Evaluation of Environmental Impact of Biodiesel Vehicle in Real Traffic Conditions” (実路走行条件における BDF 車両の環境負荷評価) を実施してきた。この研究では、エンジン台上試験やシャシダイナモ試験で示されたバイオ燃料の排出ガス特性<sup>(1)</sup>とリアルワールドにおける排出ガス特性との差異を明らかにし、ディーゼル重量車に適用可能なバイオ燃料の方向性を検討すること、また、得られた知見を国際的に共有することを目的としている。

本プロジェクトはフェーズ 1 (2009~2011 年)とフェーズ 2 (2012~2014 年)に分れている。Phase 1 では新長期排出ガス規制適合のディーゼル重量車を用いて FAME および HVO (Hydrotreated Vegetable Oil : 水素化バイオ軽油)の実路走行排出ガス評価を実施するこ

と、Phase 2 ではポスト新長期排出ガス規制適合のディーゼル重量車を用いて FAME および HVO に加えて BTL(Biomass to Liquid)についても実路走行排出ガス評価を実施することが主な内容である。なお、現在はフェーズ 2 の実施期間中であり、フェーズ 1 の主な成果については前報<sup>(2)</sup>にて既に報告した。

本報では、フェーズ 2 で評価している、ポスト新長期排出ガス規制適合のディーゼル重量車における FAME および HVO の実路走行排出ガス特性を、軽油運転時と比較した結果について報告する。

## 2. 実路走行排出ガス試験の方法

### 2. 1. 試験車両および車載式排出ガス計測システム

本研究で使用した試験車両の諸元を表 1 に示す。本車両は最大積載量 3 t の貨物重量車であり、排気量 3 L のディーゼルエンジンを改造せずに搭載している。後処理装置には酸化触媒とディーゼルパーティキュレートフィルタを備えている。

実路走行時における排出ガスの計測を実施するため、本試験車両の荷室内に PEMS を搭載した。システムの概略を図 1 に示す。PEMS には堀場製作所製 OBS-2200 を使用し、CO、CO<sub>2</sub>、THC、NO<sub>x</sub> を計測可

表 1 試験車両の諸元

車両タイプ	カーゴトラック
車両重量	3 530 kg
最大積載量	3 000 kg
車両総重量	6 585 kg
全長×全幅×全高	6 600 mm ×2 220 mm ×2 450 mm
変速機	6MT
エンジンタイプ	直列 4 気筒ターボディーゼルエンジン
排気量	3 L
最高出力	110 kW / 2 800 rpm
最大トルク	375 Nm / 1 400~2 800 rpm
後処理装置	酸化触媒、DPF
排出ガス規制適合	ポスト新長期排出ガス規制適合

能とした。排出ガス流量は排気管に取り付けたピトー管により計測した。排出ガスをシャシダイナモ試験時やエンジン台上試験時と同様に[g/kWh]の単位で評価するためには、エンジンの単位仕事量あたりの排出ガス重量を把握する必要があり、これには車両の走行抵抗を算出し、エンジントルクおよび仕事量を見積もらなければならない。このため、ECUからの車速、エンジン回転数信号をデータロガーに取り込んでいる。さらに、勾配抵抗を見積もるため、ジャイロセンサとハイトセンサにより道路勾配を計測した。

## 2. 2. 供試燃料

試験に使用した軽油、FAME、HVOの性状を表2に示す。本研究で使用したFAMEは廃食用油を原料として製造したものである。HVOは動植物油を原料として水素化、脱酸素、異性化处理により得られる炭化水素燃料であり、密度が軽油と比べてわずかに低いものの、セタン価が十分に高く、軽油の代替となり得る燃料である。

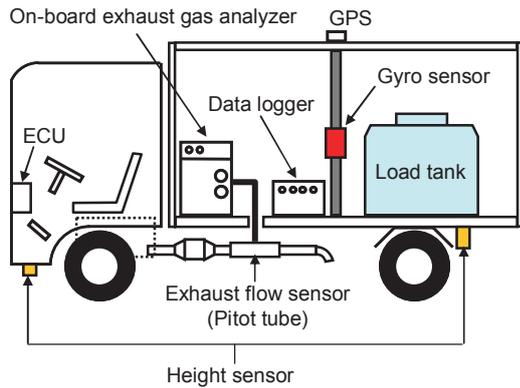


図1 実験装置の概略

表2 供試燃料の性状

燃料種	軽油	FAME	HVO	
密度@15℃ [g/cm <sup>3</sup> ]	0.8295	0.8853	0.7798	
動粘度 [mm <sup>2</sup> /S]	3.655 (30℃)	4.605 (40℃)	3.708 (30℃)	
引火点 [℃]	68.0	176.0	91.0	
硫黄分 [massppm]	8	2	<1	
セタン価	54.6	55.3	85.8	
流動点 [℃]	-22.5	-2.5	-15.0	
蒸留性状 [℃]	初留点	168.0	207.0	153.5
	10%留点	210.0	353.0	267.5
	50%留点	279.5	353.0	281.5
	90%留点	337.5	358.0	294.0
	終点	358.5	486.0	303.5
CHO分析 [mass%]	炭素分	86.3	77.1	84.8
	水素分	13.7	12.1	15.1
	酸素分	<0.1	10.8	<0.1
低位発熱量 [kJ/kg]	43 170	37 340	44 110	

## 2. 3. 試験走行ルートおよび試験方法

図2に試験走行ルートを示す。本ルートは交通安全環境研究所を発着点とする約22kmのルートであり、片側2車線以上の幹線路、中央線のない狭路、勾配路等の様々な道路を含んでいる。

試験は軽油、FAME、HVO、軽油とFAMEの混合燃料(FAME 5%)、軽油とHVOの混合燃料(HVO 5%、7%、20%、50%)について実施した。期間は主に8月~12月の日中における様々な気温、湿度環境下にて実施し、運転操作は、エコドライブ(ふんわりアクセル、早めのシフトアップによるエンジン回転数2000rpm以下の維持)を意識した場合と意識しない場合の様々な加速条件下にて行った。

## 2. 4. エンジントルクの算出方法

エンジントルク  $T_e$  は、車両にかかる走行抵抗を計測し、以下の式を用いて見積もった。

$$T_e = \frac{r}{\eta_m \cdot \eta_f \cdot i_m \cdot i_f} (R_r + R_l + R_s + R_a) \quad (1)$$

$$R_r = \mu_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta \quad (2)$$

$$R_l = \mu_a \cdot A \cdot V^2 \quad (3)$$

$$R_s = m \cdot g \cdot \sin \theta \quad (4)$$

$$R_a = (m + \Delta m) \cdot \alpha \quad (5)$$

ここで、 $A$ : 前面投影面積[m<sup>2</sup>]、 $g$ : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $i_f$ : 終減速機ギア比[-]、 $i_m$ : 変速機ギア比、 $r$ : タイヤ動的負荷半径[m]、 $m$ : 車両重量[kg]、 $R_a$ : 加速抵抗[N]、 $R_l$ : 空気抵抗[N]、 $R_r$ : 転がり抵抗[N]、 $R_s$ : 登坂抵抗[N]、 $T_e$ : エンジントルク[N·m]、 $V$ : 車両速度[m/s]、 $\alpha$ : 車両加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $\Delta m$ : 回転部分相当重量[kg]、 $\eta_f$ : 終減速機伝達効率[-]、 $\eta_m$ : 変速機伝達効率[-]、 $\mu_a$ : 空気抵抗係数[N/(m<sup>2</sup>·(m/s)<sup>2</sup>)]、 $\mu_r$ : 転がり抵抗係数[N/kg]、 $\theta$ : 道路勾配[deg.]



図2 試験走行ルート

### 3. 実路走行排出ガス試験結果および考察

#### 3. 1. 実路走行排出ガス特性の把握

実路走行においては、試験日および試験場所により気象条件が様々となる。また、道路の混雑状況および信号によって、加減速のタイミングおよびその大小、車速等が試験毎に異なってしまふ。したがって、得られた排出ガス計測結果は毎回条件が変化するため、評価が困難である。そこで、燃料間での排出ガス特性を比較する前に、軽油運転時における実路走行での排出ガス特性のばらつきを把握した。なお、本報においては各種排出ガス成分のうち、NOx のみに着目した。

図3に、軽油運転時における全NOx 排出量の計測結果を示す。同図より、試験日や運転操作によって、得られるNOx 排出量のばらつきが大きいことがわかる。このような試験日や運転操作の違いによるNOx 排出量への影響を把握し、適切に実路走行排出ガス試験結果を評価するため、NOx に影響を及ぼす代表的な因子を用いて重回帰分析を実施した。

まず、NOx 排出量に影響を及ぼすと思われる代表的な説明変数を検討する。車両の走行に係る主な説明変数として、車速、加速度、アクセル開度、エンジン回転数、エンジントルク、気象条件に係る主な説明変数として大気圧、大気温度、および湿度等が候補に挙げられる。重回帰分析を実施する際に説明変数同士に高い相関があると多重共線性が生じてしまうため、以上の候補から最も重量な説明変数のみを使用しなければならない。ここでは、排出ガス特性はエンジンの挙動のみで概ね説明できることを考え、車両の走行に係る変数のうちエンジン回転数  $N_e$ [rpm]およびエンジントルク  $T_e$ [N·m]を使用した。また、NOx 排出量は湿度の影響を大きく受けることが知られているため、環境条件に係る変数については湿度のみを使用した。ただし、湿度については水蒸気分圧  $P_w$ [kPa]の平均値  $\overline{P_w}$ とし、 $N_e$ および  $T_e$ については加速時のみの平均値  $\overline{N_e}$ 、 $\overline{T_e}$ を使用した。また、各説明変数による影響は必ずし

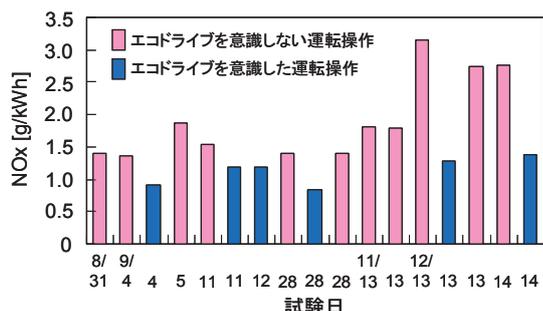


図3 軽油運転時における全NOx 排出量計測結果

も線形関係ではないことが予想されるため、各変数の2乗項も説明変数に加えた。

このように選定した変数を用いて、NOx 排出量の結果を重回帰分析すると、以下の式(6)が得られる。

$$\begin{aligned}
 NOx[g/kWh] = & -6.826 \times 10^{-6} \cdot \overline{N_e}^2 + 2.225 \times 10^{-2} \cdot \overline{N_e} \\
 & + 4.816 \times 10^{-4} \cdot \overline{T_e}^2 - 1.034 \times 10^{-1} \cdot \overline{T_e} \\
 & + 2.614 \times 10^{-1} \cdot \overline{P_w}^2 - 1.106 \times 10^0 \cdot \overline{P_w} \\
 & - 1.014 \times 10^1
 \end{aligned} \quad (6)$$

図4に、上記式から得られるNOx 排出量の予測値と試験で得られた実測値との関係を示す。参考までに説明変数に2乗項を含める場合と含めない場合の両方で重回帰分析をした結果についても示した。同図より、説明変数に2乗項を含めた場合において精度の高い重回帰分析結果が得られていることがわかる。

以上より、実路走行におけるNOx 排出量の変化は、エンジン回転数、エンジントルク、および水蒸気分圧といった因子の変化により概ね説明できることが示された。以降、実路走行におけるNOx 排出特性については、エンジン回転数、エンジントルク、および水蒸気分圧の試験毎の違いがNOx 排出量に及ぼす影響を重回帰分析により把握した上で評価する。

#### 3. 2. FAME および HVO の排出ガス特性

FAME および HVO で実路走行排出ガス試験を実施した際のNOx 排出量の計測結果について、前節と同様に重回帰分析を実施した。ただし、ここでは燃料種の違いによるNOx 排出量への影響を評価する必要があるため、前節で使用した説明変数に加えて、燃料性状に係る説明変数を使用した。既報<sup>(1)</sup>より、NOx 排出特性に影響を与える軽油代替燃料の性状因子として、単位体積当たりの低位発熱量  $H_f$ [kJ/L]および燃料中のH/C比が挙げられる。したがって、ここではこれらを

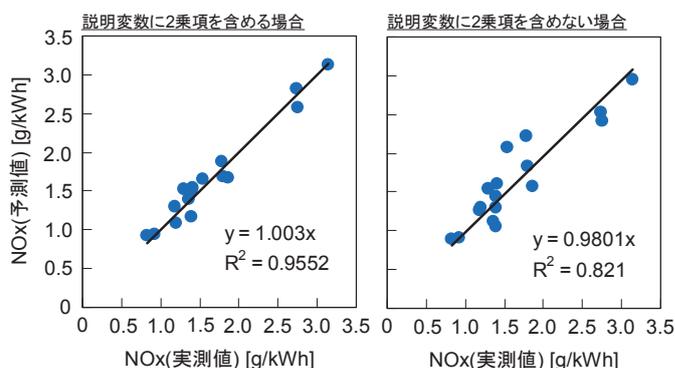


図4 軽油運転時のNOx 予測値と実測値の関係

説明変数に加えた。

軽油、FAME、HVO での実路走行における全 80 データの NOx 排出量の結果を、以上に挙げた説明変数を用いて重回帰分析を実施した。これにより得られた予測式を式(7)に示す。

$$\begin{aligned}
 NOx[g/kWh] = & -5.709 \times 10^{-8} \cdot \overline{N_e}^2 + 2.216 \times 10^{-3} \cdot \overline{N_e} \\
 & + 5.236 \times 10^{-4} \cdot \overline{T_e}^2 - 1.227 \times 10^{-1} \cdot \overline{T_e} \\
 & + 1.660 \times 10^{-1} \cdot \overline{P_w}^2 - 7.399 \times 10^{-1} \cdot \overline{P_w} \\
 & - 2.220 \times 10^{-4} \cdot H_f - 1.071 \times 10^0 \cdot H/C \\
 & + 1.587 \times 10^1
 \end{aligned} \tag{7}$$

また、図 5 に上記式から得られる NOx 排出量の予測値と試験で得られた実測値との関係を示す。図 4 に示した軽油のみを燃料とした場合の結果と比較して決定係数  $R^2$  は低いですが、それでもなお式(7)は精度よく NOx 排出量を予測できている。したがって、重回帰分析により得られた式(7)は実路走行時における NOx 排出傾向を十分に捉えられていると判断できる。

式(7)を用いて、実路走行の代表的な条件として以下の A~D を想定し、完全に同一の条件下を仮定して各種燃料における NOx 排出量レベルを予測した。

- A. 夏期、エコドライブを意識しない運転操作  
( $\overline{P_w} = 2.5$  kPa,  $\overline{N_e} = 1\ 650$  rpm,  $\overline{T_e} = 150$  Nm)
- B. 夏期、エコドライブを意識した運転操作  
( $\overline{P_w} = 2.5$  kPa,  $\overline{N_e} = 1\ 350$  rpm,  $\overline{T_e} = 130$  Nm)
- C. 冬期、エコドライブを意識しない運転操作  
( $\overline{P_w} = 0.5$  kPa,  $\overline{N_e} = 1\ 650$  rpm,  $\overline{T_e} = 150$  Nm)
- D. 冬期、エコドライブを意識した運転操作  
( $\overline{P_w} = 0.5$  kPa,  $\overline{N_e} = 1\ 350$  rpm,  $\overline{T_e} = 130$  Nm)

ただし、条件 A~D の  $\overline{P_w}$ 、 $\overline{N_e}$ 、および  $\overline{T_e}$  の値は、各条件で図 2 に示す試験走行ルートを実際に走行した際の平均的な値である。

図 6 に、条件 A~D において各種燃料で予測した NOx 排出レベルを示す。この結果、FAME 100% においては軽油運転時と比較して明らかな NOx 排出量の増加が、HVO 100% においては軽油運転時とほぼ同等の結果が示された。また、湿度の低い冬期の運転、あるいはエコドライブを意識しない運転において、ポスト新長期排出ガス規制値上限値 0.9 g/kWh を大幅に超える NOx 排出レベルとなった。燃料間における NOx 排出量の差異については前報<sup>(1)</sup>で述べた要因が考えられ、燃料の体積あたりの発熱量の差異、理論空燃比の差異、H/C 比の差異等によるものと考えられる。

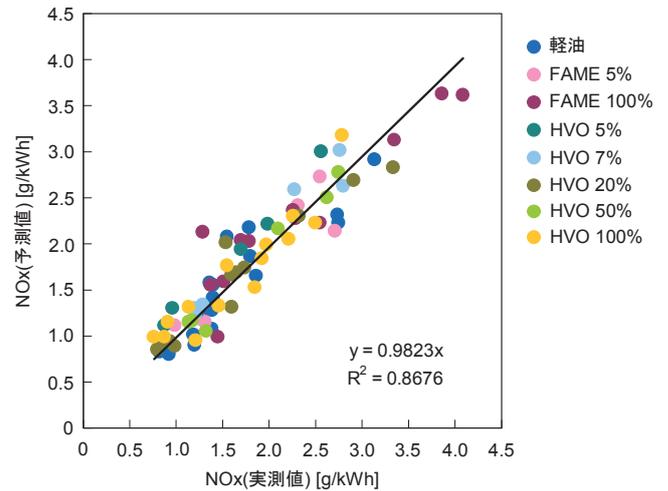


図 5 軽油、FAME、HVO 運転時の NOx 予測値と実測値の関係

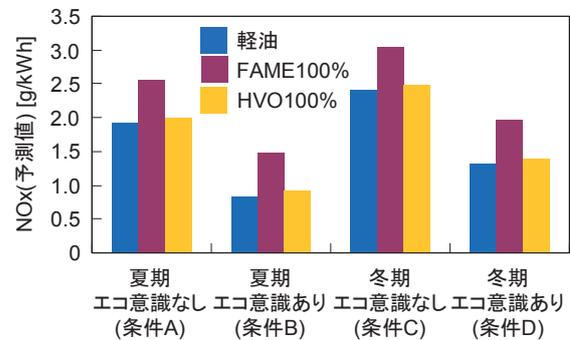


図 6 各代表条件における NOx 排出レベルの予測

#### 4. おわりに

以上、実路走行排出ガス試験における NOx 排出特性の評価手法を述べた上で、様々な気象条件および運転操作において、軽油、FAME、および HVO を燃料として実路走行を実施した際の NOx 排出特性の実態を評価した。今後は、これらの燃料に加えて BTL についても同様に評価を実施する。

#### 謝 辞

本研究の実施に際して、IEA-AMF 研究開発実施協定に参画しているアメリカ合衆国、ドイツ、スウェーデン、フィンランドの多大なる支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- (1)石井ほか、“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”、交通研フォーラム 2012, pp.19-24
- (2)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動向と交通研の取り組み”、交通研フォーラム 2011, pp.7-12