

2. 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

環境研究領域

※佐藤 進

川野 大輔

石井 素

後藤 雄一

(財)運輸低公害車普及機構

齋藤 晃

高田 寛

1. はじめに

近年、CO₂排出量の削減、および資源リサイクルの観点から、BDF（Biodiesel Fuel）は地球環境保全に大きく貢献する燃料として注目され、世界各国で BDF を製造・利用する普及活動が活発に行われている。その一方で、最新の排出ガス規制に適合したディーゼル車においては、最新要素技術やその緻密な電子制御により、エンジン性能の向上、有害排出成分の低減が進められている。しかしこれらの技術は従来の軽油を燃料とする場合に最適化されている。そのため、このような車両に軽油と燃料性状が大きく異なる BDF を適用した場合、排出ガス特性が悪化する可能性がある。

ここで BDF は第一世代 BDF と第二世代 BDF に分類される。第一世代 BDF は、従来から利用される FAME（Fatty Acid Methyl Ester：脂肪酸メチルエステル）を主成分とする燃料である。第一世代 BDF の場合、酸化しやすいことから燃料性状が安定せず、前述したような排出ガス特性の悪化などの問題が存在する。そのため第一世代 BDF の普及は地域における CO₂ 排出量の削減、資源の再利用として極めて有効である反面、各都市圏内において大気環境に影響を与えることが懸念される。一方、第二世代 BDF は、第一世代 BDF と比較してより燃料性状が安定した燃料として開発が進められている。HVO（Hydro-treated Vegetable Oil）や BTL（Bio-to-Liquid）が第二世代 BDF の例として挙げられるが、これらの燃料は第一世代 BDF と比較して安定した性状を持ち、高セタン価といった特長も持つ。

このように多くの種類の BDF が存在するため最新排出ガス規制にも適合し得る BDF の性状規格を策定する必要があり、その基礎データとして最新の車両に BDF を適用した場合の、排出ガス実態について把握する必要がある。

このような背景の下、環境研究領域では 2009 年より IEA（International Energy Agency：国際エネルギー機関）における AMF（Advanced Motor Fuels：自動車用先進燃料）研究開発実施協定の国際的競争的資金を獲得し協定に参画し、BDF の適合性に関する研究を行ってきた。この研究は日本のディーゼル貨物自動車に対して、車両に改造を施さずに BDF を適用し、排出ガス・燃費性能を調査するものである。

本報では、この IEA-AMF 協定における自動車用先進燃料に関する研究動向について紹介する。次に環境研究領域が(財)運輸低公害車普及機構（本協定内で政府指定機関として参加）とともに行っている、BDF の適合性に関する国際共同研究の内容について紹介する。

2. IEA-AMF 実施協定について

2. 1. IEA-AMF 実施協定の位置付け

図1にIEAの機構図⁽¹⁾⁽²⁾を示す。IEA Governing Board（IEA 理事会）の下には、5つの常設作業部会・委員会が設置されている。その中で CERT（The Committee on Energy Research and Technology：エネルギー研究技術委員会）は石油依存度を低減するための省エネ技術、代替エネルギーの研究開発促進等を主な活動とし、以下の4つを目的としている。

- ・ エネルギー効率と技術信頼性の確立
- ・ 新エネルギー技術の性能評価
- ・ エネルギーセクター由来の環境インパクトの低減
- ・ IEA 非加盟国との協力

さらに CERT の下部組織として、4つの作業部会・委員会が設置されている。これらの組織は、国際的共同プロジェクトである Implementing Agreement（実施協定）の審議、評価、承認等を行っている。

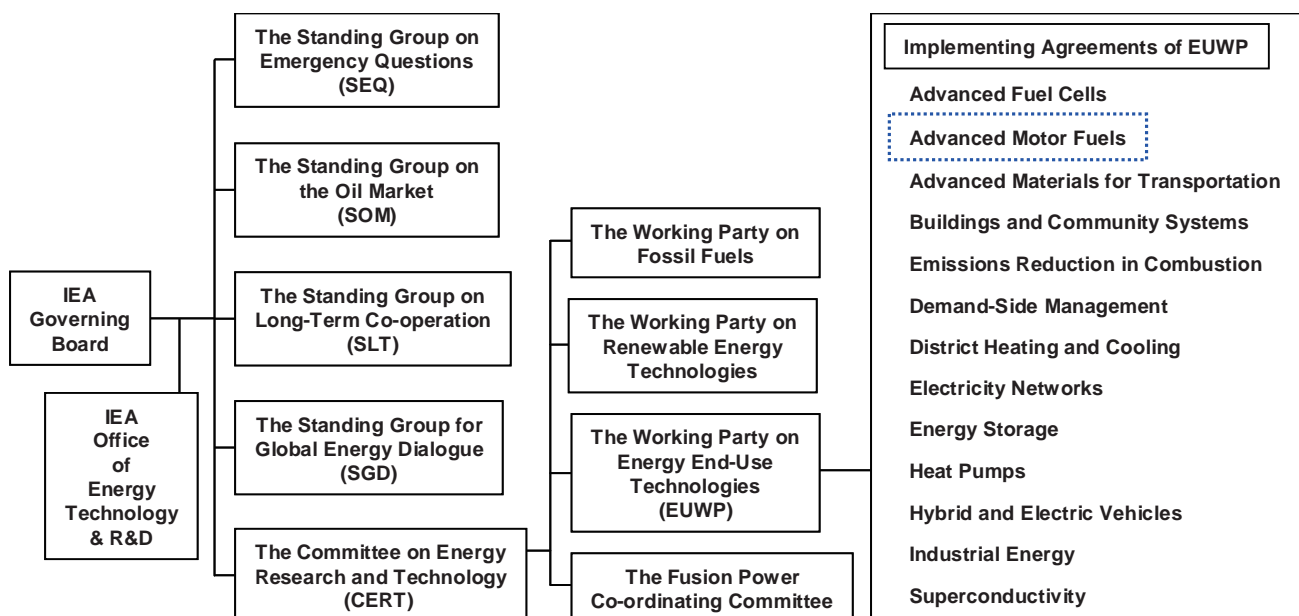


図1 IEAの機構図⁽¹⁾⁽²⁾

表1 IEA-AMF 実施協定における実行中の Annex リスト (2011年現在)⁽³⁾

Annex 番号	Annex タイトル	Annex 実行機関
Annex 28	Information Service & AMF Website	BIOENERGY 2020+ GmbH, オーストリア
Annex 34-2	Algae as Feedstock for Biofuels	Fuels, Engines, and Emission Consulting (FEEC), アメリカ
Annex 35-2	Particle Measurements: Ethanol and Butanol in DISI Engine	Technical University of Denmark (DTU), デンマーク
Annex 37	Fuel and Technology Alternatives for Buses	VTT Technical Research Centre of Finland, フィンランド
Annex 38	Evaluation of Environmental Impact of Biodiesel Vehicle in Real Traffic Conditions	交通安全環境研究所, 日本 運輸低公害車普及機構, 日本
Annex 39	Enhanced Emission Performance and Fuel Efficiency for HD Methane Engines	Swedish Transport Administration, スウェーデン
Annex 40	Life Cycle Analysis of Transportation Fuel Pathways	Reilly-Roe & Associates Ltd, カナダ
Annex 41	Alternative Fuels for Marine Applications - Future Marine Fuels Study	Fuels, Engines, and Emission Consulting (FEEC), アメリカ
Annex 42	Toxicity of Exhaust Gases and Particles from IC Engines - International Activities Survey	AFHB (Laboratory for IC-Engines & Exhaust Emissions Control, Bern, University of Applied Sciences), スイス
Annex 43	Performance Evaluation of Passenger Car Fuel and Powerplant Options	VTT Technical Research Centre of Finland, フィンランド

EUWP (The Working Party on Energy End-Use Technologies : エネルギー最終用途作業部会) には図に示す 13 の Implementing Agreement が属しており、その 1 つとして AMF 実施協定がある。この実施協定では自動車用に使用される代替燃料、先進燃料に関する研究が行われている。

2. 2. IEA-AMF 実施協定内での研究動向

現在, IEA-AMF にはオーストラリア, オーストリア, カナダ, 中国, デンマーク, フィンランド, フランス, ドイツ, イタリア, 日本, スペイン, スウェー

デン, スイス, タイ, アメリカの 15 カ国が正式に参加している⁽³⁾。基本的には各国から 1 つの機関が代表して参加するが, 日本は 2 つの機関が代表 (産業技術総合研究所, 運輸低公害車普及機構) となっている。またこれらの国以外にもオブザーバの国もある。2011 年現在, 協定の議長をカナダ, 副議長を日本 (産業技術総合研究所) およびフィンランドが務めている。

AMF 実施協定は 1984 年からスタートしており, これまで Alcohols as Motor Fuels (1984 年~1989 年), Alternative Motor Fuels (1990 年~1998 年), Advanced Motor Fuels (1999 年~現在) と名前が変遷してきた。

表2 試験燃料諸元

Fuel	Diesel (JIS No.2)	1st generation BDF: Waste cooking oil FAME	2nd generation BDF: HVO (NExBTL)
Density (15 deg.C) [g/cm ³]	0.8275	0.8849	0.7797
Kinematic viscosity [mm ² /s]	3.777 (@30 °C)	4.689 (@40 °C)	2.985 (@30 °C)
Flash point [°C]	66.0	115.0	88.0
Cetane number	57.2	52.6	88.2
Distillation temp. [°C]	IBP	170.0	284.0
	10%	212.0	345.0
	50%	282.5	354.0
	90%	332.0	359.0
CHO [wt. %]	C	85.9	76.7
	H	13.9	12.2
	O	0.2	11.1
Pour point [°C]	-22.5	-15.0	-15.0
Sulfur content [ppm]	4.8	3.3	-
Lower heating value [kJ/kg]	42850	37000	44070

表3 試験車両諸元

Vehicle type	Cargo truck
Max. pay-load [kg]	3000
GVW [kg]	6260
Length [mm]	6510
Width [mm]	2185
Height [mm]	3045
Engine type	N04C-UE
Displacement [L]	4.009
Max. power [kW/rpm]	100/2500
Max. torque [Nm/rpm]	392/1600
Transmission	6MT
EGR system	Cooled EGR
Aftertreatment system	DOC, DPF
Adapted regulation	2005 regulation

これらの名前からも分かる通り、過去にはアルコール系燃料や天然ガス、LPG、DMEといった代替燃料に関する研究を、現在は先進燃料に関する研究をその歴史の中で進めてきた。表1に現在、実行中のプロジェクト(Annexと呼び、発足の順に番号を付与している)のリストを示す。現在、協定内で実施されているAnnexのうちディーゼル車を研究としているものでは、FAMEのような第一世代BDFだけでなく、第二世代BDFの1つであるHVOも使用している。Annex 37, Annex 38がそれに該当する。また海藻バイオ燃料

に関する研究(Annex 34-2)、天然ガスエンジンに関する研究(Annex 39)が実施されている。

AMF実施協定では、先進的な石油系燃料だけでなく、以前より研究を進めてきた代替燃料、そして第二世代BDFといった燃料に関する研究開発と、燃料そのものの生成・供給プロセスを含めたライフサイクルに関する研究も行っていくことを今後の方針としている。

3. 実路走行条件におけるBDF車両の環境負荷評価

環境研究領域では前述したIEA-AMF実施協定内で、(財)運輸低公害車普及機構とともに共同研究提案を行い、国際的競争的資金を獲得した。2009年より“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)というAnnexタイトルで研究を実施している。

この研究は、冒頭で述べた背景の基、日本で市販されている最新ディーゼル貨物車に対して、車両に何の改造も施さずにBDFを供給し、排出ガス・燃費への影響を調査するものである。その際、シャシダイナモメータ試験だけでなく、実使用条件を考慮するために路上走行試験を実施しリアルワールドでの排出ガス・燃費についても評価した。

3. 1. 試験燃料および試験車両

表2に本研究で使用した燃料の諸元を示す。ベースの燃料として日本国内で販売されているJIS2号軽油を使用した。この軽油に対して混合するBDFとして、第一世代BDFと第二世代BDFを使用した。第一世代BDFとして日本国内で製造された廃食用油由来のFAMEを使用した。第二世代BDFとしてHVOを使用した。このHVOはフィンランドNeste Oil社の製造するNExBTL[®]である。今回、HVOを選択した理由は、第二世代BDFの中でもHVOの方が実用化が進んでおり、BTLと比較してより早く市場に出回る可能性が高いことを考慮したためである。

表3に本研究で使用した試験車両の諸元を示す。車両は最大積載量3tのディーゼル貨物車であり、日本の2005年規制(新長期規制)に適合した車両である。排気対策として、Cooled EGR, DOC, DPFを装着している。

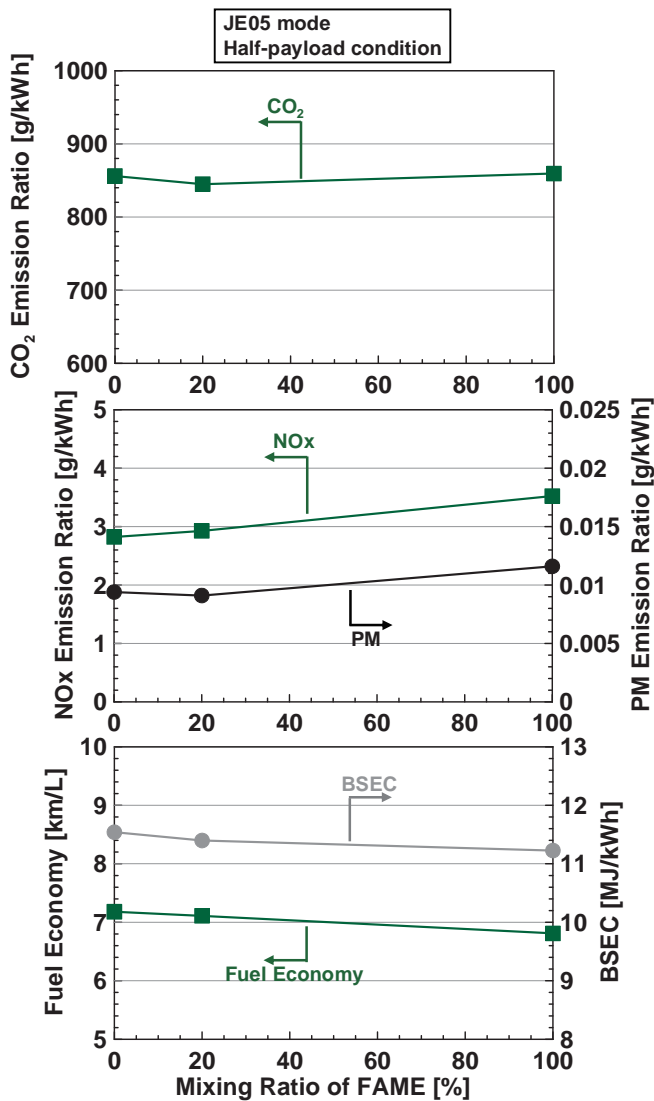


図2 軽油に対する廃食用油由来 FAME 混合割合を変化させた際の JE05 モード試験結果

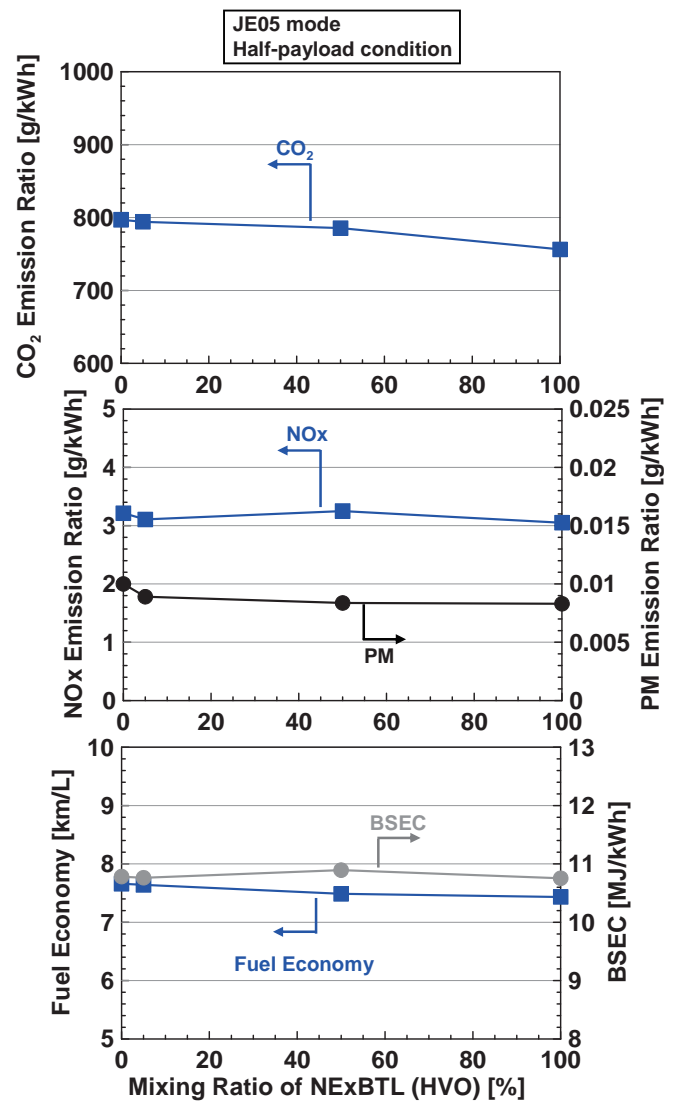


図3 軽油に対する HVO 混合割合を変化させた際の JE05 モード試験結果

3. 2. ショシダイナモメータ試験結果

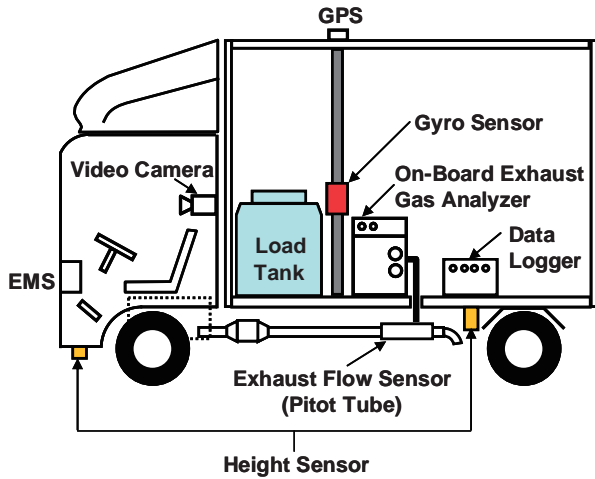
図2に軽油に対して廃食用油由来FAMEを混合させた場合の、ショシダイナモメータ上でJE05モードを走行させた結果を示す。図は上から単位仕事量当たりのCO₂排出量、NO_x排出量、PM排出率、燃費、BSEC (Brake Specific Energy Consumption: 正味エネルギー消費率)を示す。CO₂排出量はFAME混合割合を増加させても変化しないが、NO_x排出量、PM排出量は増大する。ただしPM排出量はDPF後の計測値であり、PM排出量は低い。燃費についてはFAME混合割合増加に伴い悪化するものの、BSECとしては改善していることが分かる。

図3に軽油に対して、HVOを混合させた場合の結果を示す。CO₂排出量はHVO混合割合の増加に伴い、減少していることが分かる。これは燃料のH/C比が軽

油と比較して高いためである。NO_x排出量は変化しておらず、HVO100%でも軽油と同等の値を示している。PM排出量は減少するが、DPF後の値であり全体としてPM排出量が低い。また燃費、BSECはいずれの混合割合でも同等であった。

3. 3. 路上走行試験結果

次に路上走行試験を行い、リアルワールドでの排出ガス、燃費性能の評価を行った。図4に路上走行試験で使用した車載型排出ガス計測システムを示す。試験車両の荷室内に、車載型排出ガス分析計を設置し、そこに排気管部分から車両の排出ガスをサンプリングして分析した。このサンプリング部分には排出ガス流量計を設置し、得られる排出ガス流量と分析計で計測される濃度から、各排出ガス成分の排出重量を求める



* EMS: Eco-driving Management System

図4 車載型排出ガス計測システム

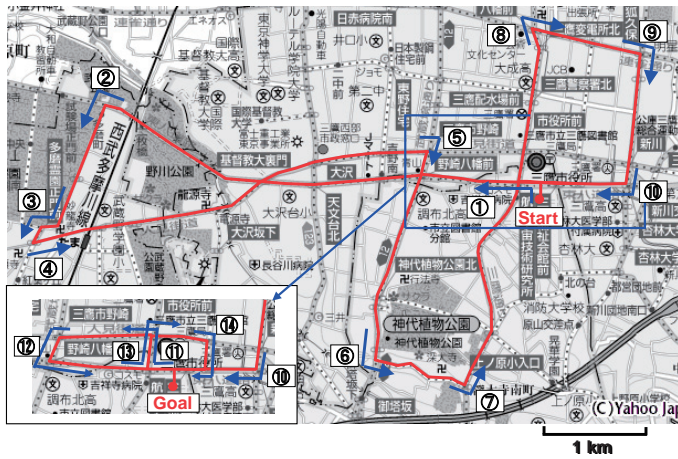


図5 市街地走行ルート

ことが可能である。対象とする成分は、CO、CO₂、NOx、THCである。またこの計測システムには、ジャイロセンサとハイトセンサを設置し、この2つのセンサの計測値から時々刻々の道路勾配を計測する⁽⁴⁾。この値から勾配抵抗を求め、さらに以下の式を用いて車両にかかる走行抵抗、エンジントルクを算出する⁽⁵⁾。このエンジントルクから仕事量も算出可能である。

$$T = \frac{r}{\eta_m \eta_f i_m i_f} (R_c + R_a + R_r + R_e) \quad (式1)$$

$$R_c = (W + W_r) \alpha \quad (式2)$$

$$R_a = \mu_a A v^2 \quad (式3)$$

$$R_r = \mu_r W \quad (式4)$$

$$R_e = W g \sin \theta_r \quad (式5)$$

ここで、 A ：前面投影面積[m²]、 g ：重力加速度[m/s²]、 i_f ：終減速機ギヤ比[-]、 i_m ：変速機ギヤ比[-]、 r ：タイヤ動的負荷半径[m]、 R_a ：空気抵抗[N]、 R_c ：加速抵抗[N]、 R_e ：勾配抵抗[N]、 R_r ：転がり抵抗[N]、 T ：エン

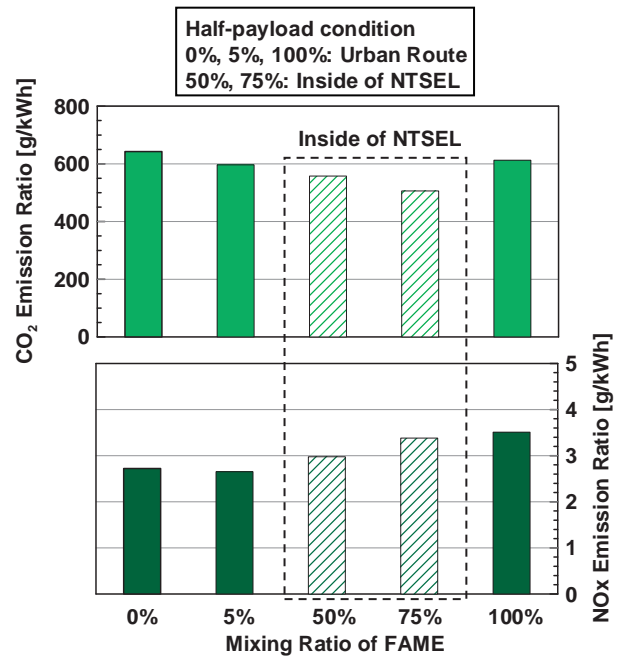


図6 軽油に対するBDF混合割合を変化させた際の路上走行試験結果

ジントルク[N・m]、 v ：車両速度[km/h]、 W ：車両重量[kg]、 W_r ：回転部分相当質量[kg]、 α ：車両加速度[m/s²]、 η_f ：終減速機伝達効率[-]、 η_m ：変速機伝達効率[-]、 μ_a ：空気抵抗係数[N/(m²・(km/h)²)]、 μ_r ：転がり抵抗係数[N/kg]、 θ_r ：道路勾配[deg]

荷室内には水入りのタンクを設置して車両重量を調整し、半積載状態とした。路上走行試験では、軽油に対して廃食用油由来FAME、HVOを0%（軽油のみ）、5%、50%、75%、100%混合し、交通研を発着点とする22kmの市街地ルートで試験を実施した。図5にこの市街地ルートの地図を示す。なお「揮発油等の品質の確保等に関する法律」の中で、公道で使用できるバイオ燃料の混合割合に制限がある関係上⁽⁶⁾、FAME混合割合50%、75%については公道走行ができないため、交通研の構内を走行した。HVOについては、その品質が日本の軽油規格に適合するため、50%、75%の混合割合でも公道走行が可能であった。

図6に軽油に対してFAMEを混合した場合の路上走行試験結果を示す。ここでは代表させて単位仕事量当たりのCO₂排出量、NOx排出量の結果を示した。なお図中0%、5%、100%は市街地ルートの結果、50%、75%は交通研構内の結果である。また図に示した結果は各条件において複数回走行した結果のうち、同一のドライバーによる運転（同一の運転方法）のものであり、またルート全体での平均車速がほぼ同等のものをピ

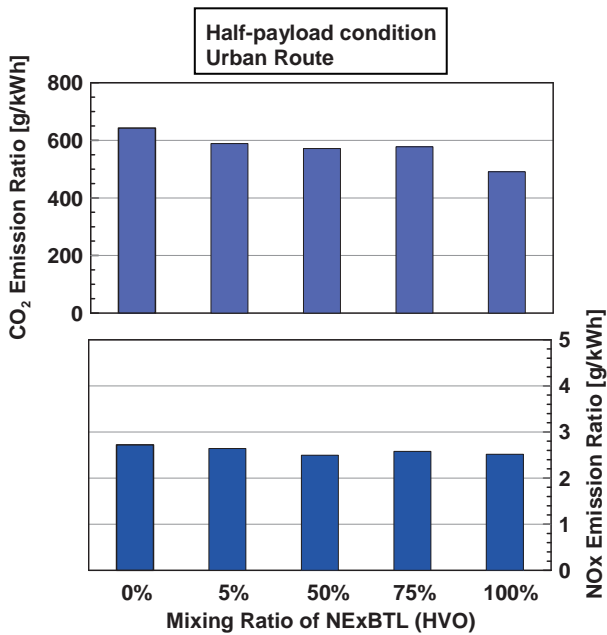


図7 軽油に対するHVO混合割合を変化させた際の路上走行試験結果

ックアップしたものである。ただし構内を走行した50%、75%の条件は交通研構内を走行した結果であるため、0%、5%、100%の結果と同じように評価することは難しい。この図から0%、5%、100%の3条件で比較すると、CO₂排出量は同等の値を示している。一方NO_x排出量はFAME混合割合の増加に伴い、増大していくことが分かる。このNO_x排出量の傾向はシャシダイナモメータ試験の結果と同じである。

図7に軽油に対してHVOを混合した場合の路上走行試験結果を示す。この図の結果は全て市街地ルートにおける結果である。この図の結果についても、各混合条件において複数回走行した結果から、同一のドライバーによる運転、ルート全体での平均車速がほぼ同等のものをピックアップしたものである。この図よりHVO割合の増加に伴いCO₂排出率は減少していくことが分かる。またNO_x排出率は、いずれのHVO混合割合においても同等の値を示しており、変化していないことが分かる。このCO₂排出率が減少し、NO_x排出率が変化しないという傾向は、シャシダイナモメータ試験の結果と同じである。

4. まとめ

交通研が参画しているIEA-AMF実施協定における自動車用先進燃料研究の動向について述べるとともに、CO₂低減にむけた新燃料（BDFおよびHVO）車

両の実路走行時の排出ガス・燃費について評価する交通研の取り組みの紹介を行った。

- (1) AMF実施協定では、交通研のAnnexをはじめとして、HVOのような第二世代BDFを用いた研究が実施されている。また天然ガス、海藻バイオ燃料に関するプロジェクトも進行中である。協定内では今後の研究の方向性として、石油系燃料に限らず、代替燃料、第二世代BDFといった燃料の車両への適合性に関する研究と、これらの燃料の生成・供給プロセスを含めたライフサイクルに関する研究を実施していくこととしている。
- (2) 新長期規制適合車両に廃食用油由来FAMEを適用した場合、シャシダイナモメータ試験、路上走行試験いずれの結果からも、軽油に対するFAME混合割合を増加させると、NO_x排出量が增大する結果となった。
- (3) 同車両にHVOを供給した場合には、軽油に対するHVO混合割合を増加させると、NO_x排出量を軽油同等に保ちながら、CO₂排出量を削減できることが明らかになった。
- (4) これらの実験結果から、今後普及が期待されるHVOを最新の車両に使用することで、NO_x排出量を増加させずにCO₂排出量を削減することが可能となり、地球温暖化ガスの削減に寄与できると考えられる。

5. 参考文献

- (1) IEA CERT Strategic Plan 2007-2011, http://www.iea.org/about/docs/CERT_Strategic_Plan.pdf
- (2) 運輸低公害車普及機構ホームページ, http://www.levo.or.jp/chosa/iea/about_amf.html
- (3) IEA-AMF ホームページ, <http://www.iea-amf.vtt.fi/>
- (4) 佐藤ら, 自動車技術会論文集, Vol.39, No.5, pp.163-168 (2008)
- (5) 佐藤ら, 自動車技術会論文集, Vol.41, No.6, pp.1397-1403 (2010)
- (6) 「高濃度バイオディーゼル燃料等の使用による車両不具合等防止のためのガイドライン」, http://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha10_hh_000025.html