

論文・解説

18

# SKYACTIV-D 3.3 において 次世代バイオディーゼル燃料 HVO を利用可能にする取り組み Development of Technology to Enable the Use of Next-Generation Biodiesel Fuel HVO in Skyactiv-D 3.3

福田 大介 <sup>*1</sup> Daisuke Fukuda	松尾 建 <sup>*2</sup> Takeru Matsuo	西岡 勇介 <sup>*3</sup> Yusuke Nishioka	金 尚奎 <sup>*4</sup> Sangkyu Kim	神崎 淳 <sup>*5</sup> Jun Kanzaki
白橋 尚俊 <sup>*6</sup> Naotoshi Shirahashi	神田 智行 <sup>*7</sup> Tomoyuki Kanda	山本 彩斗 <sup>*8</sup> Ayato Yamamoto	高木 健太郎 <sup>*9</sup> Kentaro Takaki	志茂 大輔 <sup>*10</sup> Daisuke Shimo

## 要 約

マツダはカーボンニュートラル社会実現に向けて Well-to-Wheel 及びライフサイクル視点で現実的かつ効果的な CO<sub>2</sub> 低減策を検討している。その取り組みの一つとして世界各地のエネルギー源・発電形態などを踏まえてパワートレインを提供するマルチソリューション戦略を採用している。現在、欧州市場では Well-to-Wheel CO<sub>2</sub> を削減可能な次世代バイオディーゼル燃料 Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) を配備した給油所が急速に増加している。本論文では SKYACTIV-D 3.3 において HVO を利用可能にする取り組みについて紹介する。

## Abstract

In order to realize a carbon-neutral society, Mazda aims to realistically and effectively reduce CO<sub>2</sub> emissions from the perspectives of Well-to-Wheel and Life Cycle Assessment. To this end, Mazda has adopted a multi-solution strategy that provides powertrains based on energy sources and power generation methods available in different regions around the world. Currently, in the European market, the number of refueling stations equipped with Hydrotreated Vegetable Oil (HVO), a next-generation biodiesel fuel capable of reducing Well-to-Wheel CO<sub>2</sub> emissions, is increasing. In this paper, we report on the investigation of the effect of HVO on the performance of Skyactiv-D 3.3 engine.

**Key words :** Heat engine, Compression ignition engine, Performance, Emissions gas, HVO

## 1. はじめに

マツダはカーボンニュートラルの実現に向けて Fig. 1 に示すマルチソリューション戦略に取り組んでいる。再生可能エネルギーによる発電が普及している地域にはバッテリー式電気自動車 (Battery Electric Vehicle: BEV) やプラグインハイブリッド車両 (Plug-in Hybrid Electric Vehicle: PHEV) を優先的に導入する。一方、火力発電がまだ主流な地域には内燃機関 (Internal Combustion Engine: ICE) の熱効率向上と電動化技術によるエネルギー回生技術の活用によってエネルギーの使用量を低減する。更に ICE でカーボンニュートラル燃料 (Carbon Neutral Fuel: CNF) を利用可能として Well-to-Wheel CO<sub>2</sub> を現実的かつ有効に低減する。

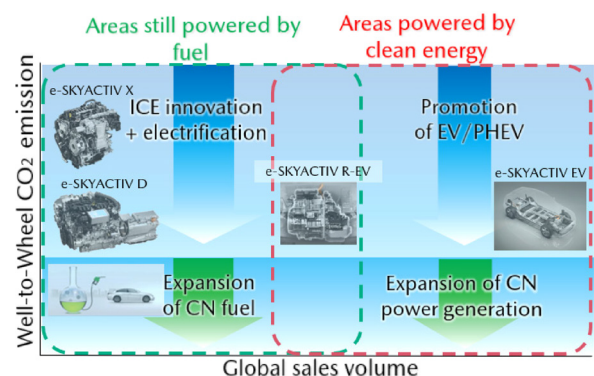


Fig. 1 Image of Mazda's Multi-Solution Strategy

## 2. 次世代バイオディーゼル燃料 HVO への対応

マツダは前述のマルチソリューション戦略の一環として、SKYACTIV-D 3.3 で CNF の一つである水素化植物油

\*1~6,8~10 エンジン性能開発部  
Engine Performance Development Dept.

\*7 エンジン設計部  
Engine Design Engineering Dept.

(Hydrotreated Vegetable Oil: HVO) を利用可能にする取り組みを行っている。本章では HVO が燃焼及び燃費・排気ガス成分、燃焼騒音へ与える影響について紹介する。

## 2.1 HVO について

HVO は廃食油や生物由来の油脂を水素化処理した燃料である。欧州の燃料メーカーは HVO の生産能力を増やし、販売を拡大している。2024 年 11 月においてヨーロッパ全体で HVO は 4750 か所の給油所で給油が可能となり、この 2 年で 4 倍以上に増えている。ドイツを含む欧州の各国で HVO 販売価格は 10 セント (約 5%) 程度軽油よりも高いが、イタリアでは優遇税制により軽油よりも安い価格で販売されている。このように HVO はお客様にとって手軽に使用可能な CNF として普及し始めている。

車両がライフサイクルで排出する CO<sub>2</sub> を試算した結果を Fig. 2 に示す。このライフサイクル CO<sub>2</sub> は火力発電の割合が高い欧州の 2021 年の電源構成を前提として算出した。

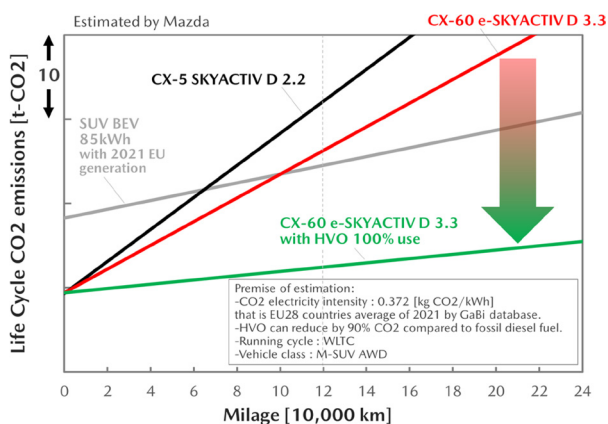


Fig. 2 Comparison of Life Cycle CO<sub>2</sub> Emissions

BEV は C-SUV クラスで航続距離が約 500km となる 85kWh のバッテリーを搭載した車両を想定した。BEV は ICE を搭載した同クラス車両よりも製造時のライフサイクル CO<sub>2</sub> が大きいですが、単位走行距離あたりの CO<sub>2</sub> 排出量が少ないので、約 10 万 km 以上走行するとライフサイクル CO<sub>2</sub> は ICE 車両よりも小さくなる。次に HVO を給油した CX-60 e-SKYACTIV D と BEV のライフサイクル CO<sub>2</sub> を比較する。HVO を給油すると Well-to-Wheel CO<sub>2</sub> が減るので、製造時の CO<sub>2</sub> 排出量が少ない CX-60 e-SKYACTIV D では走行距離によらず BEV よりもライフサイクル CO<sub>2</sub> が小さくなる。上記より、CX-60 e-SKYACTIV D に搭載されている SKYACTIV-D 3.3 で HVO を利用可能とすることはライフサイクル CO<sub>2</sub> 低減に有効な取り組みとなる。

Table 1 に欧州の統一規格であるパラフィン系ディーゼル燃料規格 EN15940 に準拠した HVO と国内 JIS 規格 2 号軽油 (以下、軽油) の代表的な燃料性状を示す。

HVO の主成分はパラフィン系の炭化水素であるので、軽油に比べてセタン価が高く、密度や粘度が小さい性状となる。セタン価は着火性を示す指標で高いほど着火しやすくなる。

Table 1 Typical Fuel Properties of Diesel and HVO

	Diesel Fuel	Biofuel
Type	JIS #2 Diesel	100% of Hydro-treated Vegetable Oil
Cetane number	55.7 (Cetane index)	75.1
Density	0.83 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.78 [g/cm <sup>3</sup> ]
Viscosity	3.66 [mm <sup>2</sup> /s]	3.0 [mm <sup>2</sup> /s]

## 2.2 HVO 使用による燃焼コンセプトへの影響

マツダではお客様に安心して HVO を使用していただくため、軽油と HVO を使用した場合に同等の性能・信頼性となることを目指して SKYACTIV-D 3.3<sup>(1)</sup> を開発した。その基本諸元を Table 2 に示す。

Table 2 Engine Specifications

Engine Type	In-Line 6
Bore/Stroke [mm]	86/94
Displacement	3283 [cm <sup>3</sup> ]
Compression ratio	15.2
Fuel injection system	Common Rail/ Piezo injector
Injector nozzle dimension	φ0.106mm×10hole
Piston material	Steel
Piston bowl shape	Dual Zone Egg-shaped
EGR System	HP & LP-EGR

SKYACTIV-D3.3 では燃費、排気ガス成分改善のために新たな燃焼コンセプトとして空間制御予混合燃焼 (Distribution Controlled partially Premixed Compression Ignition: DCPCI)<sup>(2)</sup> を採用している。

燃料を筒内へ直接噴射、燃焼させる直噴ディーゼルエンジンでは燃料を多段で噴射することが一般的であるが、効率改善のためには、上死点 (Top Dead Center: TDC) 付近において短時間で燃料噴射と燃焼を行うことが重要である。しかし、従来モデルでは、TDC 付近で短時間に多くの燃料を噴射すると空気との混合悪化により SMOKE が増加するため、燃焼期間短縮と SMOKE 低減の両立が課題であった。そこで、TDC 付近で短時間に燃料噴射を行いながらも空気との混合を促進するために、Fig. 3 に示すようにピストンリップ部の噴霧衝突点を起点に燃料噴霧を燃焼室の上下空間に配分する燃焼室形状を考案した。

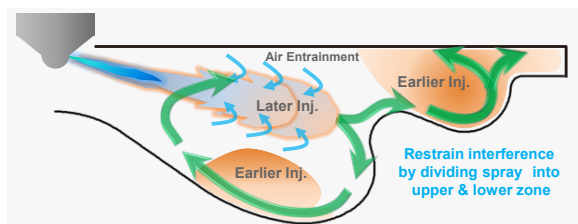


Fig. 3 Combustion Concept of Skyactiv-D 3.3

この燃焼室を用いることで、先に噴射された噴霧混合気を燃焼室の上下空間へ配分して燃焼させることで、後から噴射された噴霧が空気を取り込んで成長する空間を確保でき、高効率でクリーンな燃焼を実現できる。

先に述べたようにHVOは燃料性状が軽油と異なるため、新燃焼コンセプトではHVOを適用した際の燃焼及び排気ガス成分への影響を検証する必要がある。そこで、DCPCIコンセプトが軽油とHVOのいずれの燃料でも燃焼コンセプトが成立することを実機エンジン台上性能試験及び数値流体シミュレーション(Computational Fluid Dynamics: CFD)を用いて検証した。CFD計算には市販コードのCONVERGEを用いた。Table 3に示すように燃料の密度は各々の物性値を指定して、セタン価はn-セタンとiso-セタンの割合を変更して再現した。芳香族の有無などは考慮しておらず、噴霧の空間分布の把握を目的に解析した。

Table 3 Fuel Properties for Calculation

		Diesel	HVO
Density [kg/m <sup>3</sup> ]		830	780
Cetane Number		54	75
Fuel Species	Gas phase	n-C16H34 47vol.%	n-C16H34 71vol.%
		i-C16H34 53 vol.%	i-C16H34 29 vol.%
Liquid phase		n-C16H34:100vol.%	

エンジン回転数 1500rpm, 正味平均有効圧力 (Brake Mean Effective Pressure: BMEP) 600kPa の条件で軽油とHVOを比較した結果を Fig. 4 に示す。実機エンジン台上試験結果の筒内圧力履歴、熱発生率、NO<sub>x</sub> 及び SMOKE, CFD 計算結果の当量比  $\phi$  と温度 T の分布について、軽油とHVOを比較している。

熱発生率を比較するとセタン価が高いHVOは軽油よりも着火が早くなっていることが分かる。

次に筒内の噴霧混合気分布を比較すると、HVOでは高温部の出現とその広がりが軽油よりも早く、前段噴霧と後段噴霧との干渉が若干増えているものの、前段噴霧は燃焼室の上下空間へ配分され、空いた空間に後段噴霧が噴射されており、軽油と近い混合気形成となっている。

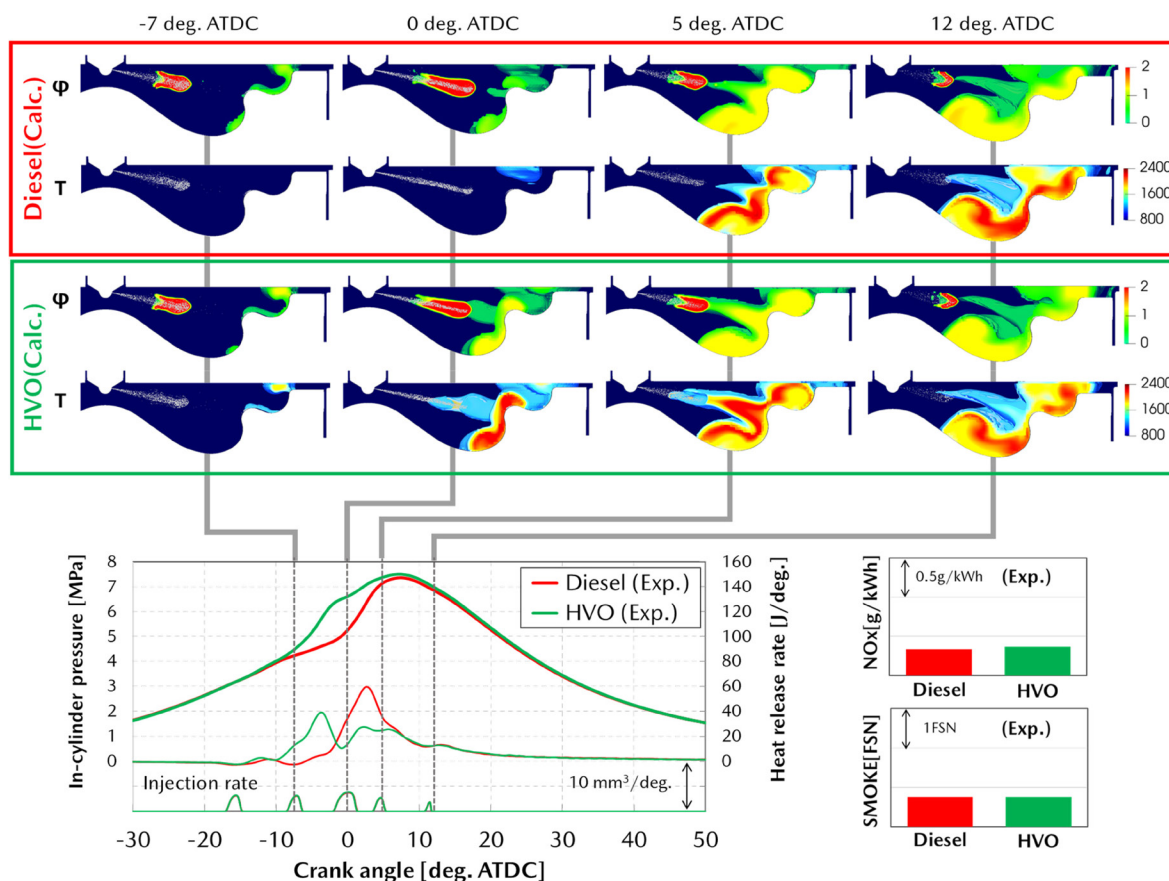


Fig. 4 Comparison of Diesel and HVO Combustion

また、HVO を使用した場合の実機エンジン台上性能試験における NOx 及び SMOKE はいずれも軽油と同等となっている。

以上の実機エンジン台上性能試験及び CFD 計算により軽油と HVO のいずれの燃料でも燃焼コンセプトが成立することを確認した。

これらの結果は代表点における燃焼コンセプトの検証である。次節ではエンジンが市場で使用される広い運転領域で軽油と HVO の性能差を確認した結果を紹介する。

### 2.3 HVO 使用時の性能

Table 2 に示したエンジンを用いて、運転領域を拡大して HVO の影響を検証した結果を紹介する。本節では軽油で開発したエンジン制御のままで HVO の性能影響を確認した結果を紹介する。この結果によってお客様が HVO を給油した際の性能影響を把握する。

#### (1) 部分負荷性能

Fig. 5 に軽負荷、中負荷、高負荷における熱発生率及び筒内圧、燃料噴射パターンを軽油と HVO を使用した場合で示す。

HVO を使用した場合、着火までの時間が短くなるので軽負荷・中負荷において熱発生率に変化がみられる。ただし、高負荷では最初の着火は早くなるが、燃焼後半にかけて影響はほぼ見られなくなる。これは高負荷の筒内環境が着火しやすい状態であるので、燃料のセタン価による影響が小さくなるためである。

Fig. 6 にエンジン性能比較を示す。代表的な排気ガス成分である NOx, SMOKE, 一酸化炭素 (CO) 及び炭化水素 (THC) の排出量を比較した。燃騒騒音の指標は Cylinder Pressure Level Filter (CPLF) を用いた。CPLF は燃焼圧力を高速フーリエ変換によって周波数成分に分解し、フィルタ処理した値であり、燃焼騒音の指標として用いている。

NOx は HVO と軽油と等価な排出量となっている。SMOKE は等価もしくは改善傾向がみられる。運転領域を拡大しても、NOx 及び SMOKE の悪化はなく、燃焼コンセプトへの悪影響はないことを確認した。THC, CO は軽油に比べて HVO が 30~50%程度減少している。HVO はセタン価が高く着火性がよいので軽油では未燃成分として排出されていた THC や CO が燃焼するためである。ただし、CPLF は軽中負荷域において、早期着火により 3~5dB 程度増加した。

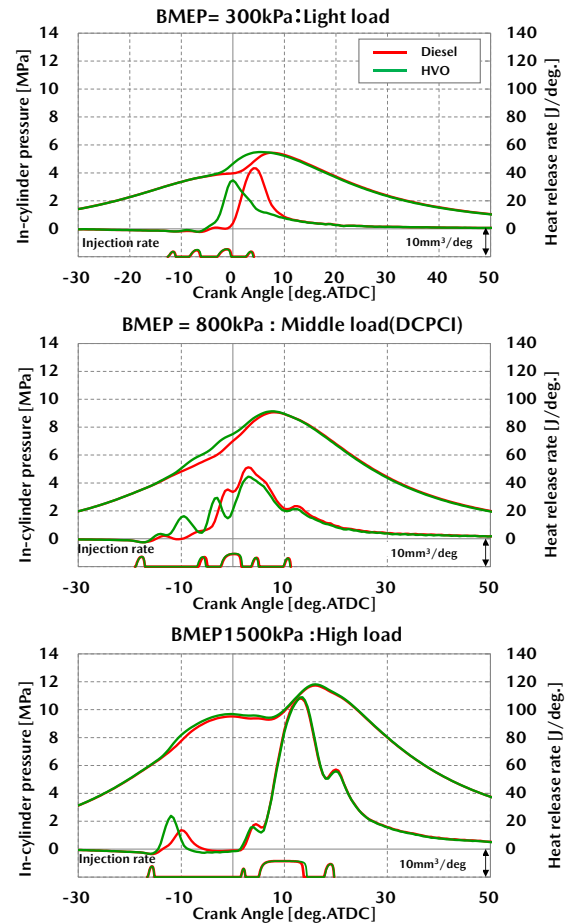


Fig. 5 Comparison of Combustion Performance

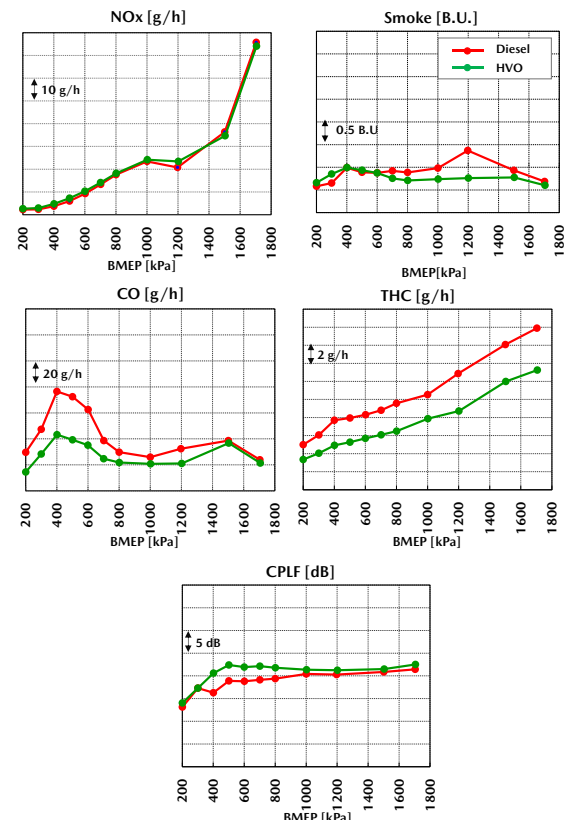


Fig. 6 Comparison of Exhaust Emissions and Noise

CPLFが増加した影響を検証するために同一車両で各燃料の騒音性能を計測した結果を Fig. 7 に示す。車両評価での評価指標には音圧 (Sound Pressure Level: SPL) を用いた。音圧は同じ周波数であれば、音圧が大きいほど大きな音として認識される指標である。

車両状態で計測した SPL は軽油と HVO で同じ波形となっている。軽油と HVO で車両の騒音性能差は無かった。

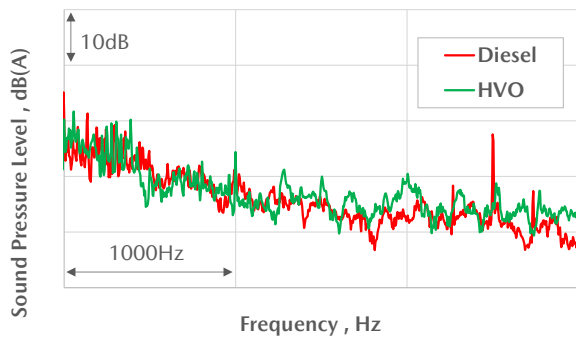


Fig. 7 Comparison of Sound Pressure Level in Vehicles

(2) 全負荷性能

全負荷においても HVO 使用時の影響確認を行った。

Fig. 8 に軽油と HVO を使用した際のエンジン全負荷時の燃焼を示す。全負荷では高負荷以上に筒内が着火しやすい環境になるため高負荷で見られた初期の着火の違いもなく、等価な燃焼となった。

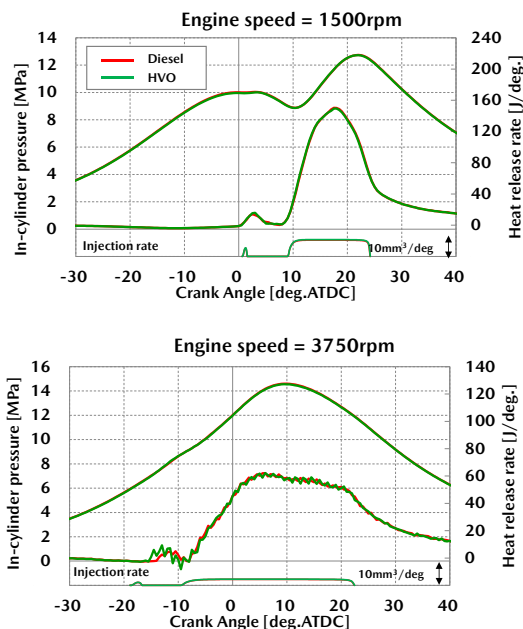


Fig. 8 Comparison of Combustion Performance at Full Load

Fig. 9 に全負荷トルクの計測結果を示す。Fig. 8 で示したように HVO は軽油と等価な燃焼になるので、全負荷トルク性能は等価になる。全負荷トルク性能においても HVO による変化がないことを確認できた。

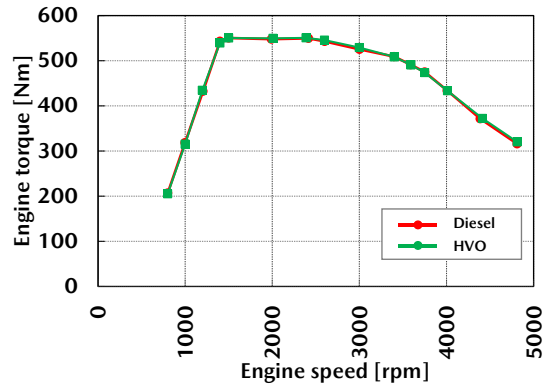


Fig. 9 Comparison of Maximum Engine Torque

3. 実証試験

HVO と軽油が等価な性能であることが確認できたので、長期的な耐久性、部品信頼性検証のために、実際の使用環境において実証試験を行った。実証試験は欧州市場での耐久テスト並びにスーパー耐久シリーズへの参戦で実施した。本章ではこれらの内容について紹介する。

3.1 欧州市場での耐久テスト

長期的に HVO を使用しても市場燃料と同等の機能を保持できていることを検証するために Frankfurt 近郊の実路において耐久テストを実施した。耐久走行したコースを Fig. 10 に示す。

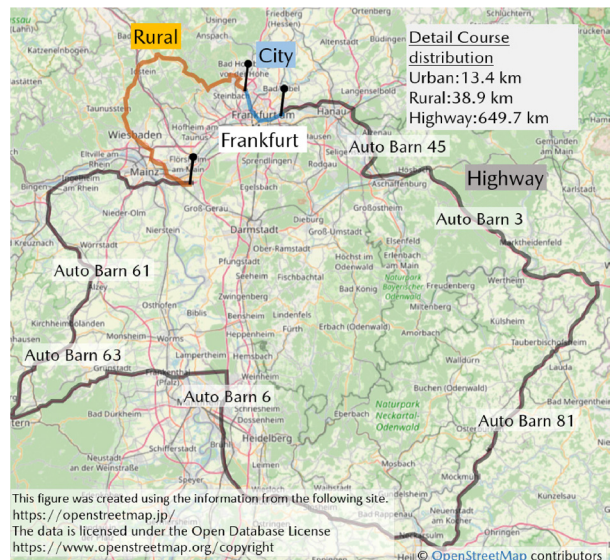


Fig. 10 The Durability Test Course

Fig. 11 は耐久走行時の車速頻度分布である。ドイツの無制限速度区間がある高速道路 Autobahn を活用して、時速 140km 以上の高車速走行の時間を増やし、エンジンに高い負荷を与えた。

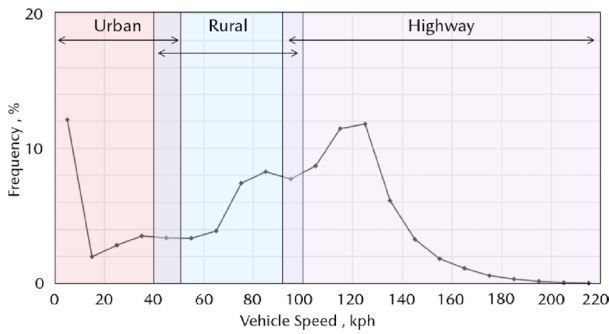


Fig. 11 The Frequency of Vehicle Speed in Durability Test

テスト車両には2台のCX-60 e-SKYACTIV Dを用意した。2台の車両の1台にはHVO, もう1台には市場軽油を給油し, 同じコースを約80000km 走行した。市場軽油は軽油に脂肪酸メチルエステル (Fatty Acid Methyl Ester: FAME) を7%混合した燃料であり, 図中ではB7 Diesel と表記している。

耐久初期1000kmと耐久後80000kmの時に欧州認証モードであるWLTCの排気ガス成分を計測し, 耐久前後の排気ガス成分への影響を検証した。THC及びCOへの影響をFig. 12に示す耐久前後のいずれにおいても, CO, THC排出量は市場軽油よりもHVOが少ない。

NOx及びPMへの影響をFig. 13に示す。耐久後のNOx, PM排出量はHVOが市場軽油よりもわずかに多くなっている。ただし, 耐久走行前後の全ての排気ガス成分は規制値の半分以下となっており, 問題のない水準である。今後は異なる燃料で耐久走行した車両2台の部品を調査し, 燃料によって摩耗や劣化に違いがないかを分析する必要がある。

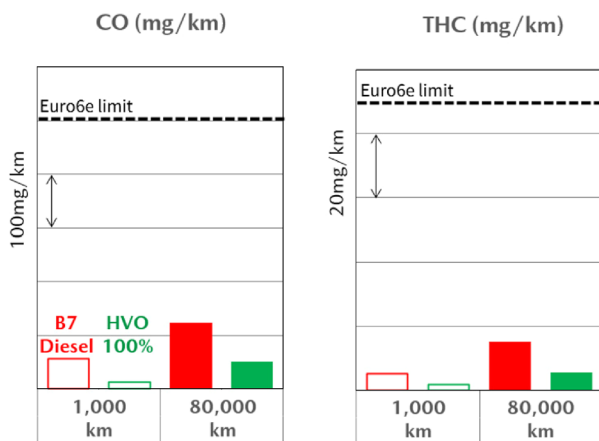


Fig. 12 The Effect of Durability Test for CO and THC

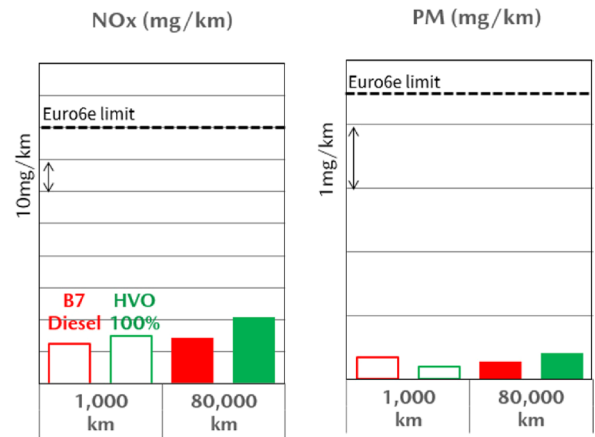


Fig. 13 The Effect of Durability Test for NOx and PM

### 3.2 スーパー耐久シリーズ参戦による検証

マツダは将来技術を検証するためにスーパー耐久シリーズの開発車両クラスであるST-Qクラスに2台の車両で参戦している。参戦車両の1台であるFig. 14のMAZDA SPIRIT RACING MAZDA3 Bio conceptはレース仕様で改造したSKYACTIV-D 2.2を搭載している車両である。走行にはHVOを使用してエンジンへの影響を検証しつつ, レース活動のカーボンニュートラルに貢献している<sup>(3)</sup>。最大トルクを長時間使用する過酷な耐久レースの環境において, 使用するHVOの水素化処理ベース材料や製造メーカーを変えて燃料のばらつきに対する耐久性も検証している。



Fig. 14 MAZDA SPIRIT RACING MAZDA3 Bio concept

## 4. おわりに

カーボンニュートラルへ向けたマルチソリューション戦略の一つとしてSKYACTIV-D 3.3におけるHVO適用性の調査結果を紹介した。レースや市場での耐久走行によって長期的に厳しい環境でHVOを利用してエンジン性能が維持できることを確認した。今後は耐久後の部品調査等を行い, 品質が保証できるかを検討し, HVOが利用可能なことを検証する段階へ移行する。これらの検証を迅速に完了させて, 地球温暖化対策に貢献するカー

ボンニュートラルな選択肢を一つでも多く、お客様へ提供することに注力していく。

### 参考文献

- (1) 志茂ほか：SKYACTIV-D 3.3 の開発—大排気量・直列 6 気筒と燃焼の理想追求による提供価値の向上—, [マツダ技報, No.39, pp.21-27 \(2022\)](#)
- (2) 金ほか：第 2 世代 SKYACTIV-D の燃焼技術, [マツダ技報, No.39, pp.14-20 \(2022\)](#)
- (3) 山内ほか：MAZDA SPIRIT RACING MAZDA3 Bio concept エンジンの紹介, [マツダ技報, No.41, pp.119-125 \(2025\)](#)

### ■著者■



福田 大介



松尾 建



西岡 勇介



金 尚奎



神崎 淳



白橋 尚俊



神田 智行



山本 彩斗



高木 健太郎



志茂 大輔