



一橋大学イノベーション研究センター

東京都国立市中2-1
<http://www.iir.hit-u.ac.jp>

本ケースの著作権は、筆者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本ケースに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】一橋大学イノベーション研究センター研究支援室
TEL: 042-580-8423 e-mail: chosa@iir.hit-u.ac.jp

マツダにおけるディーゼル車の復活

Mazda's revival of diesel cars

竹田太樹 Futoki TAKEDA

(一橋大学イノベーション研究センターイノベーションマネジメント・政策プログラム)

木村めぐみ Megumi KIMURA

(一橋大学イノベーション研究センター特任講師)

延岡健太郎 Kentarou NOBEOKA

(大阪大学経済学研究科教授)

要旨

企業活動においては、将来性がないなどのため撤退を決める技術もでてくるだろう。企業リソースの投入がされなくなり復活はさらに難しくなる。しかしマツダのディーゼル技術は一旦研究から撤退したものの、技術革新をとげ復活を果たした。2012年から販売されたスカイアクティブのディーゼル車は、排出されるNOxを減らすために必要だった触媒を不要としながら、優れた走行性能を実現する技術革新をとげた。マツダの販売に大きく貢献し、国内ではほぼ消滅していたディーゼル乗用車市場も広がりつつある。

この復活は、産学連携研究への参加や、ガソリン車と一緒にあっての開発など経緯を経た。研究資金・ノウハウなどリソースを得てディーゼル技術を高め、技術革新へとつながった。国内市場においてディーゼル車をめぐっては排ガス規制強化の流れなど逆風下にあったが、マツダは技術革新でこの逆風を乗り越えユーザーなどの支持を得てディーゼルの復活に至った。このケース・スタディでは、マツダのディーゼル技術が復活に至った経緯について述べる。

1. はじめに

企業活動においては事業環境の変化などに応じて、新事業への進出・従来事業からの退出が求められる。また事業を続けるにおいても新たな技術が登場してくるなかで、必要に応じて用いる技術の変更も行われるだろう。このため撤退と判断される技術がでてくる。一旦撤退とされた技術の復活は難しいだろう。技術・市場など将来の発展可能性を踏まえて撤退と判断したのであろうし、また撤退判断でそれまで利用可能であった企業リソースの投入ができなくなる。しかしそのような技術であっても、革新をとげ復活することもあるように思われる。

ここでとりあげるマツダのディーゼル技術も、一旦撤退となったものの技術革新をとげ復活した事例である。マツダは 2001 年頃ディーゼルの研究から撤退した¹。先端的な技術研究がされず、マツダのディーゼル車はいずれ消えていく運命となった。しかし暫くして研究が復活し、その後技術革新をとげ蘇った。2011 年から販売された「スカイアクティブ」である²。

スカイアクティブはアテンザなど乗用車に対して展開されているが、スカイアクティブのディーゼル車はエンジン排出ガスをクリーンにして、NOx 排出量を規制値以下に減らすための触媒を不要にまでしてしまう技術革新を成し遂げた。このためコストパフォーマンスに優れた車づくりができる。一方でデザインにもこだわり、走行性能にも優れていた。本来ディーゼルエンジンは低回転域の力強さが得意であるが、これに加えて、出力が上がらない高回転域でも従来では考えられないようなスムーズな加速性能を実現した³。

市場投入されると人気を博した。スカイアクティブのディーゼル車は 2012 年の CX-5 からの市場投入だったが、この CX-5 が日本カー・オブ・ザ・イヤーを受賞する。国内では乗用車はガソリン車とのこれまでの認識を変えディーゼル乗用車という選択肢を提供するに至ったことは、この技術革新の社会的なインパクトの大きさを物語る。

図表 1 はマツダの売上・営業利益の推移である。1990 年代バブル崩壊に伴い売上高が低下、営業利益も赤字となり事業継続に赤信号が灯る。大株主であるフォードより 1994 年以降経営陣を受け入れ、1996 年には追加出資も受けた。経営再建のため工場閉鎖・再編、人員整理などリストラチャリングが進められた⁴。一方で「Zoom-Zoom」訴求などのブランドづくりやアテンザ・アクセラといった新車種投入などが行われ、2000 年代にバブル期を超える売上高、営業利益を達成した。しかし 2008 年のリーマン・ブラザーズ経営破綻など

¹ 志茂氏へのインタビューより。2017 年 3 月 3 日、マツダ株式会社にて。

² スカイアクティブはガソリン車の販売が先行し、ディーゼル車の販売は 2012 年から。

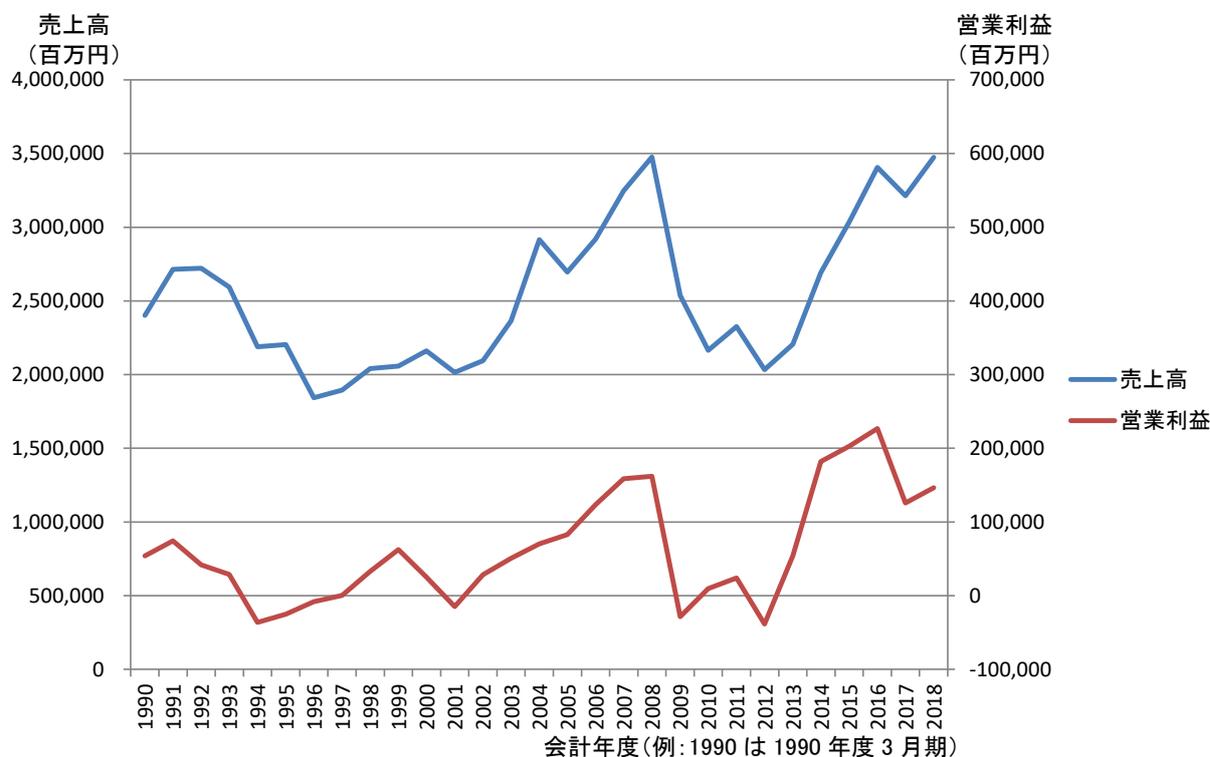
³ NEDO (2013) 「世界最高水準の燃費と環境性能を持つクリーンディーゼルエンジン」

<https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201301mazda/index.html>

⁴ マツダ「アニュアルレポート」2002 年 3 月期版など

<https://www.mazda.com/ja/investors/library/annual/backnumber/>

図表 1：マツダの売上高・営業利益の推移



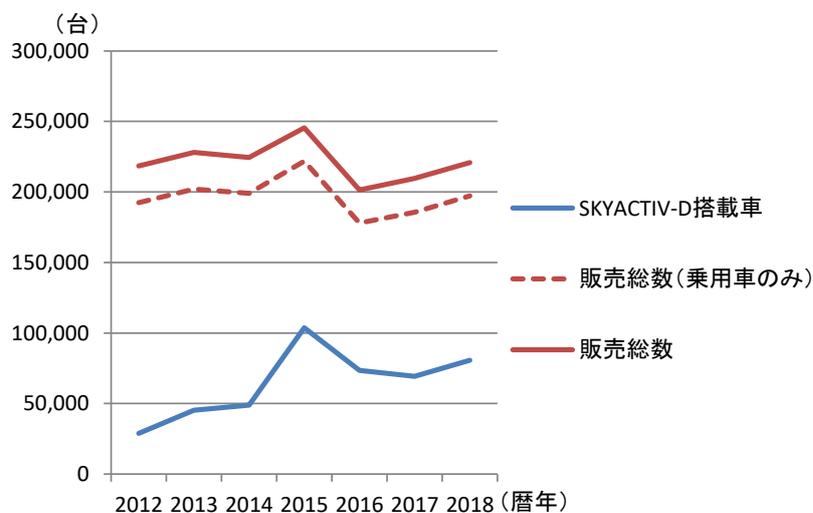
に至る金融危機以降、バブル崩壊後に近い水準まで売上高は低下し営業利益も赤字化した。この悪い状況のなかスカイアクティブが登場する。

スカイアクティブとは理想的な車づくりを行うという思想のもとに、エンジン（ガソリン・ディーゼル）、トランスミッション、シャシー、車体を見直した新たな商品群である。「魂動」と名付けられた新たなデザイン方針と共に順次多くの車種に広げられている。デミオ、CX-5などは日本カー・オブ・ザ・イヤー関連賞を受賞するなど注目を集めた。2013年3月期に31%であったマツダ車販売におけるスカイアクティブ車が占める割合は2015年3月期には74%まで順次拡大⁵、マツダの売上高・営業利益もリーマンショック前の最高額に近い水準まで回復した。スカイアクティブはマツダにとって、リーマンショックからの立ち直りの象徴といえる。

スカイアクティブの成功は各コンポーネントにおける技術革新やデザインなど多くの要素が複合的にもたらしたと考えられるが、このなかでディーゼルエンジン SKYACTIV-D の貢献も大きいだろう。マツダの国内販売について見てみると、ディーゼル車が占める割合が増加し約1/3を占めるまでに至っている（図表2）。国内ディーゼル乗用車市場において

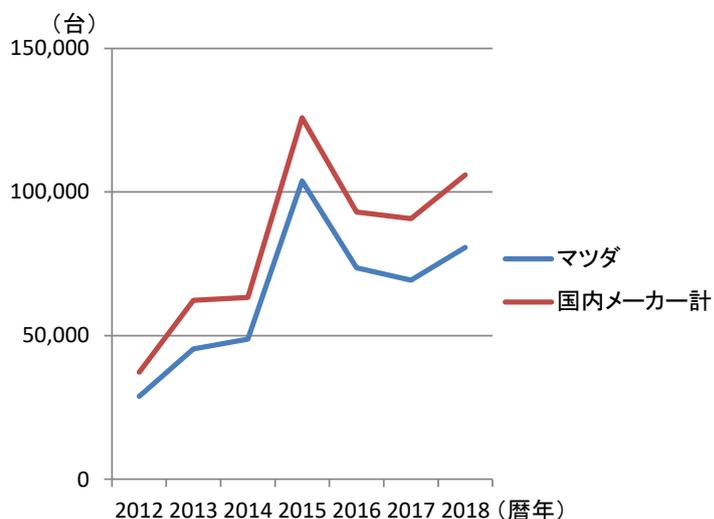
⁵ グローバル販売台数におけるスカイアクティブ搭載比率。マツダ「アニュアルレポート」2015年3月期版
<https://www.mazda.com/ja/investors/library/annual/backnumber/>

図表2 マツダの国内販売における SKYACTIV-D 搭載車の割合



(出所) SKYACTIV-D 搭載車台数はマツダニュースリリース⁶、販売総数は(一社)日本自動車工業会「自動車統計月報」⁷をもとに作成。

図表3 ディーゼル乗用車国内販売台数



(出所) マツダの販売台数はマツダニュースリリース⁶、国内メーカー計は(一社)日本自動車工業会「世界自動車統計年報」などをもとに推計。

⁶ マツダ「ニュースリリース」2019年11月27日「「SKYACTIV-D」搭載車、国内販売累計50万台達成」

<https://newsroom.mazda.com/ja/publicity/release/2019/201911/191127a.html>

⁷ (一社)日本自動車工業会「自動車統計月報」各月版

http://www.jama.or.jp/stats/m_report/index.html

は、他の国内メーカーはトヨタのランドクルーザープラド、日産のエクストレイル、三菱のパジェロ・デリカの4車種だけだが、マツダは1社でSUVからセダン・コンパクトカーまで6車種を販売している⁸。販売台数についてもマツダは多くのシェアを占めている（図表3）。ディーゼル乗用車は小さい市場ではあるものの、マツダはこの市場でのリーディングカンパニーとなった。かつて2001年頃研究から撤退し、また国内の乗用車販売も2004年のボンゴフレンディを最後になくなっていたディーゼル車のありようと比べれば雲泥の違いである。いまやマツダを支える立場となったディーゼルは、まさに技術革新による復活をとげたといえよう。

一旦撤退とされたディーゼル車がこのように復活するには、撤退をもたらした要因を覆す革新無しには難しかっただろう。しかし研究からの撤退で、その技術革新に必要なリソース投入が難しい逆境となった。マツダの技術革新はエンジン排気をクリーンにすることでNO_xの触媒による後処理を不要としたことが革新的だったが、エンジンシリンダー内部で燃料と空気の混合を促進させるブレイクスルーによってNO_xやススを発生させる局所的な高温や酸欠を防ぎ成し遂げられた。このブレイクスルーが、開発で同時に狙っていた燃費や走行性能の向上にも有利に働いた。厳しい研究開発環境のなかでどのように技術革新を成し遂げ技術の復活に至ったのか、マツダのディーゼル復活について報告したい。

2. ディーゼル車に対する研究からの撤退

ディーゼル車は燃料・空気の混合ガスを圧縮し、温度・圧力を高め自己着火・燃焼させてエネルギーを動力にする。燃料は自己着火性に優れた軽油を使用する。ガソリン車が引火性を活かし点火して燃焼させるのに対してディーゼル車は自己着火させることから、ディーゼル車はガソリン車に比べピストンシリンダー内で燃料・空気をより圧縮する。エネルギー効率が高く、また国内では軽油が安価に提供されており、コストの安さがメリットとなっている。

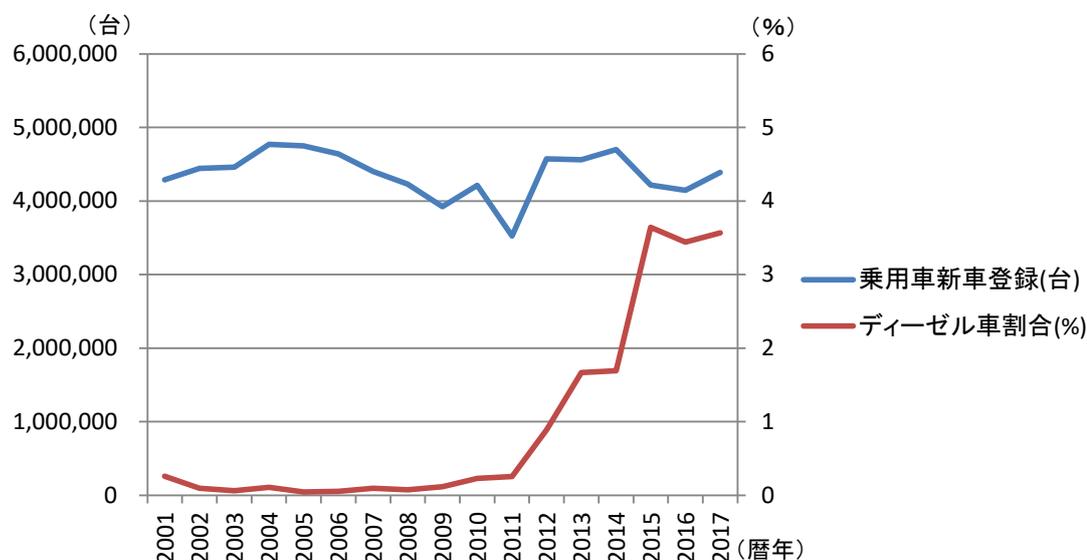
しかしディーゼル車は高圧縮であるため、空気中の窒素と酸素を結合させてNO_xが生成されやすい。また揮発し空気と混合しやすいガソリンと異なり軽油を使用するディーゼル車では、燃料の空気との混合が不十分となってススも生成されやすい。これらNO_xやススなどの有害物質に対しては排出規制が定められており、無害化するための後処理が求められる。化学変化させ無害化するためには高価な貴金属を用いた触媒が必要になる。またディーゼル車は高圧縮であることから、ガソリン車に比べて頑強にエンジンを作る必要がある。ピストンなどの各部品が重くなりエンジンの回転数を高めにくい。（ただしエネルギー効率は高く、低回転でも大きな力を出すことができる。）これらの特徴をもつディーゼル車は、商用車、特にトラックやバスなど大型車を中心に国内市場が形成されてきた。

しかし1990年代の税改正などで軽油の割安感が薄まり、国内におけるディーゼル車のメ

⁸ 2018年3月時点。国土交通省「自動車燃費一覧」2018年3月版
http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_mn10_000002.html

リットは薄らいだ。また 1999 年に東京都は「ディーゼル車 NO 作戦」を行った。「現在のディーゼル車は今までは東京での利用に適さない」との考えのもと、ディーゼル乗用車については都内では「乗らない、買わない、売らない」と政策提案を打ち出した⁹。ディーゼル車へのイメージが悪化したこともあってか、2000 年代には国内のディーゼル乗用車市場はほぼ消滅した（図表 4）。

図表 4 国内乗用車新車登録台数に占めるディーゼル車の割合



(出所) (一社) 日本自動車工業会「世界自動車統計年報」(各年版) をもとに作成

その頃マツダには経営余力がない状況だった。マツダは前述のとおりバブル崩壊の時期に経営が悪化し 1996 年にフォード傘下となった。リストラクチャリングなど経営再建が進行するなか研究開発も限られるようになる。2000 年秋から 1 年半の間、新車投入を全く行えなかったこともあった（図表 5）。カペラ、ファミリアの開発が十分できないとして開発計画を白紙に戻したためである¹⁰。

またフォード傘下となったことで、研究開発はフォードグループの中での共用が意図されるようになった。自動車メーカーでは長らく効率化の取り組みがなされていた。トヨタ「カンバン方式」で知られる生産工程の効率化以外にも、サプライヤとの製造分担の見直しや部品共用化などが進められていた。そのような中で例えばスカイアクティブの前世代エンジンである MZR エンジン（ガソリン・ディーゼル）も共用を前提にしたものであり、

⁹ 東京都環境局 (2018) 「ディーゼル車 NO 作戦とは」
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/vehicle/air_pollution/diesel/plan/details/no_operation_02.html

¹⁰ 宮本喜一 (2004) 「マツダはなぜ、よみがえったのか？」 (pp.162-166)

図表5 マツダのニューモデル・フルモデルチェンジの経緯

年(暦年)		1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
サルーン	センティア		○																								
セダン	ユーノス800/ミレーニア				○																						
	カベラ	○			○	(◎)																					
	カベラワゴン	◎			◎																						
	アテンザ									○						○					◎						
	アテンザスポーツ									○						○											
	アテンザ(スポーツ)ワゴン									○						○					◎						
	ファミリア			○																							
	ファミリアNEO	○																									
	ファミリアセダン	◎				◎																					
	ファミリア(ビジネス)ワゴン	◎					○																				
	ファミリアS-ワゴン					○																					
	ファミリアバン						◎								○											○	
	アクセラ											○						○							(◎)		
アクセラスポーツ											○						○										
クーペ	RX-8										○																
SUV	トリビュート							○																			
	CX-7													○													
	CX-5																				◎						
	CX-3																						◎				
コンパクトカー	デミオ			○						○					○								◎				
	ベリーサ											○															
スポーツカー	RX-7				○																						
	ロードスター					○							○											○			
	ロードスタークーペ										○																
	ロードスターRF																							○			
ミニバン	ボンゴフレンディ		◎																								
	MPV		(◎)							○																	
	プレマシー						○																				
	ピアンテ						○						○							○							
バン・トラック	ボンゴバン						◎																				
	ボンゴブローニバン						◎																				
	プロシードマービー			(◎)																							
	プロシードレバンテ		◎		○	(◎)																					
軽自動車	キャロル		○																								

ニューモデル導入またはフルモデルチェンジがあった年に○を付けた。ディーゼル車が含まれる場合は◎としている。なおマイナーチェンジや一部改良でディーゼル車追加があったときは(◎)。調査は通常モデルのみで、特別仕様車などは含まない。他社から供給のOEM車は除く。なお、キャロルは1998年以降スズキのOEMとなっている。ユーノス500・クロス・AZ-3・ユーノスフレック・MX-6・ランティス・ランティスクーペ・MS-8・ユーノスコスモ・レビュー・ボンゴトラック・ボンゴブローニトラック・プロシードについて、期間中マイナーチェンジまたは一部改良のみであるため記載していない。

(出所) ヤフー (株)・(株) カービュー「carview! マツダの自動車カタログ」をもとに作成¹¹⁾

フォードグループ内でマツダが開発を勝ち取ったものである¹²⁾。開発で用いる CAD システムも、フォードとの情報共有がなされるよう更新された¹³⁾。そこでマツダはディーゼル車販売について、ディーゼル車の割合が多い欧州市場での販売は継続するものの国内市場からは撤退することにした。またディーゼル車の研究からも撤退した。ノウハウをフォードグループの欧州拠点に移してそこで研究開発・製造を行った方が、フォードグループとしては効率的であるという判断があったと思われる。

「ディーゼル車 NO 作戦」は大都市圏を本拠とするディーゼル乗用車の使用制限などに

11 ヤフー (株)・(株) カービュー「carview! マツダの自動車カタログ」

<https://carview.yahoo.co.jp/ncar/catalog/mazda/all/#sa>

12 宮本喜一 (2004)「マツダはなぜ、よみがえったのか?」(pp.143-146)

13 岡田吉誼他 (2000)「MDI 支援システムの紹介」『マツダ技報』No.18, pp.8-15, 2000

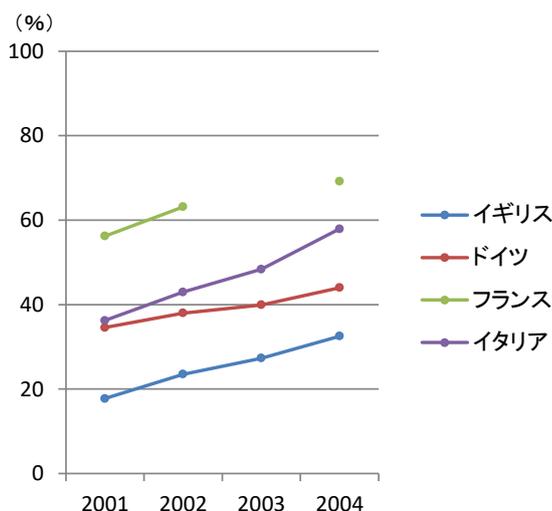
至っていく¹⁴。なお製品開発に関しても 2005 年の「新長期」や 2009 年の「ポスト新長期」規制が定められ、NOx・スス（PM）排出量に対する規制がさらに強化されていった。2009 年の「ポスト新長期」では、マツダのディーゼル撤退時に適用されていた 1997～8 年の「長期規制」と比べて、ディーゼル乗用車について PM で 94%減、NOx でも 80%減が求められた¹⁵。マツダ撤退後もディーゼル乗用車の逆風はさらに強まり、復活のハードルはさらに高まっていったのである。

3. ディーゼル技術の延命と復活

(1) 研究再開と NEDO プロジェクトとの出会い

ディーゼル車の研究からは撤退したものの、欧州市場でマツダのディーゼル車は一定の評価を得ていた¹⁶。欧州は当時ディーゼル車の割合が高い市場だった（図表 6）が、マツダでは売上の約 1～2 割を欧州市場が占めていた（図表 7）。そこでよい評価を得られているの

図表 6 欧州の乗用車新車登録におけるディーゼル車の割合



（出所）（一社）日本自動車工業会「世界自動車統計年報」（2006年版）をもとに作成

¹⁴ 自動車 NOx・PM 法によるもので、ディーゼルトラック・バスなども同様に制限している。大都市圏外に使用の本拠がある車の流入については対象外となっているため、東京都などは 1 都 3 県外からの流入についてもディーゼルトラック・バスなどを対象に条例で独自に規制している。

環境省（2005）「自動車 NOx・PM 法の車種規制について」

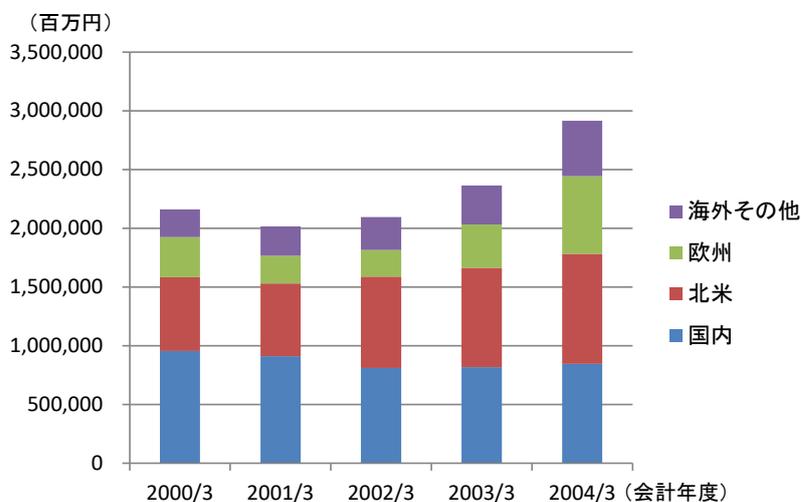
<http://www.env.go.jp/air/car/pamph/index.html>

¹⁵ 国土交通省「新車排出ガス規制の経緯（4） ディーゼル乗用車」

<http://www.mlit.go.jp/common/001185076.pdf>

¹⁶ 志茂氏へのインタビューより。2017 年 3 月 3 日、マツダ株式会社にて。

図表 7 マツダの海外売上高



(出所) マツダ「アニュアルレポート」(各年版)をもとに作成

に、研究を止めて競争に敗れ市場を明け渡すのはもったいない。この頃マツダは新規に投入したアテンザなどが好調であり経営も上向きであった。それもあってか 2002～3 年頃になるとディーゼル車の研究チームが復活することになった。ただし研究チームは 5 人ほどである¹⁷。経営再建下のなか資金投入も期待しにくく、後に技術革新を起し国内においてディーゼル乗用車のリーダーとなるのは想像がつかない厳しい状況だった。

このような中、NEDO が募集するプロジェクトの話が舞い込む。ディーゼル車の排気をクリーンにする産学連携の研究プロジェクトだった。2004～2008 年の「革新的次世代低公害車総合技術開発」プロジェクトであり、①「新燃焼方式の研究開発及び燃料の最適化」、②「GTL¹⁸ を用いたエンジン技術の開発」、③「革新的後処理システムの研究開発」、④「次世代自動車の総合評価技術開発」を対象としていた。都市環境問題に対して政策としてディーゼル車の環境面における懸念を払拭し、開発された技術を国内自動車産業に提供することで国際競争に資するためのプロジェクトである。ディーゼル車はエネルギー効率に優れるため炭酸ガス排出量削減の観点からディーゼル車へのシフトを図る意味合いも含まれ

¹⁷ 志茂氏へのインタビューより。2017 年 3 月 3 日、マツダ株式会社にて。なお製品開発については海外市場向けに別途継続されていた。

¹⁸ Gas to Liquid 原料ガスから液体燃料を合成する技術・またはその技術により合成された燃料。生産には、原料として天然ガスや石炭から生成されるガスが用いられる。通常の軽油より着火性が良く、硫黄分・芳香族分が少ない。石油依存からの脱却の可能性の面でも、現在の供給量は少ないものの将来の燃料として期待されている。

NEDO (2010)「平成 21 年度「革新的次世代低公害車総合技術開発」の事後評価報告書」など https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_houkoku_21h_jigo_11.html

た。¹⁹

このプロジェクトは特に物流の主流を占める貨物自動車についての技術開発を狙ったものだが、乗用車についても炭酸ガス削減の面からプロジェクトの対象に含まれた。プロジェクトでは排ガスの NO_x・PM 排出量の数値目標が設定され、それを満たす技術開発を各企業が受託する。マツダは、①「新燃焼方式の研究開発及び燃料の最適化」に参加することになった。①「新燃焼方式の研究開発及び燃料の最適化」では、混合圧縮着火燃焼方式などの新燃焼方式の開発、それに対応した燃料噴射の最適化、及び燃焼方式に対応した燃料の最適化の技術開発を行うこととされていた。マツダは、広島大・戸田工業・大分大とのチームで「超低エミッション高効率乗用ディーゼルエンジンの研究開発」に従事することとなった²⁰。

この NEDO プロジェクトは、プロジェクト期間後の実用化を意識したものであった。海外においても排気のクリーン化が求められており、プロジェクトで得た知見・ノウハウをマツダは製品づくりに応用することが目論まれた。2004～2008 年の 5 年間のこのプロジェクトにおいて、①新燃焼方式の研究開発及び燃料の最適化には約 16 億円の予算がつき、マツダはディーゼル技術のための研究資金を得ることができた²¹。

なお燃焼方式の技術開発におけるマツダのパートナーとなった広島大は、NEDO のプロジェクト以前からマツダが相談を持ち掛けたり計測を依頼する間柄であり²²、エンジンの燃料噴霧などの研究が行われていた。噴霧された燃料は液滴のままであったり気化して蒸気になるが、広島大は、波長の異なるレーザー光をあてて液滴密度や蒸気量を計測する測定法（LAS 法）などの技術を有していた²³。

¹⁹ NEDO (2010)「平成 21 年度「革新的次世代低公害車総合技術開発」の事後評価報告書」
https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_houkoku_21h_jigo_11.html

なお③「革新的後処理システムの研究開発」はエンジンから排出された NO_x や PM を減少させるための触媒関連などの研究開発。④「次世代自動車の総合評価技術開発」はこのプロジェクトで開発された技術の評価に関する技術開発。

²⁰ ①新燃焼方式の研究開発及び燃料の最適化について、マツダ・広島大で燃焼方式の研究開発を行った。一方、マツダ・戸田工業・大分大ではエンジンに設置する NO_x 触媒の研究開発を行った。

NEDO (2010)「平成 21 年度「革新的次世代低公害車総合技術開発」の事後評価報告書」
https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_houkoku_21h_jigo_11.html

²¹ ①新燃焼方式の研究開発及び燃料の最適化にはいはず・産業技術総合研究所のチームもあり、合算で約 16 億円である。

NEDO (2010)「平成 21 年度「革新的次世代低公害車総合技術開発」の事後評価報告書」
https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_houkoku_21h_jigo_11.html

²² 志茂氏へのインタビューより。2017 年 3 月 3 日、マツダ株式会社にて。

²³ レーザー光の波長により、液滴・蒸気にあたったときの減衰の仕方が異なることなどから液滴密度や蒸気量を計測する。

李鉄他 (2004)「直噴ガソリン噴霧の分割噴射特性 (第 1 報 混合気分布の LAS 測定)」『日本機械学会年次大会講演論文集』2004.3, pp.159-160

(2) NEDO プロジェクトにおける技術開発

NEDO プロジェクトにおいて燃焼の低温化・混合気の希薄化などの技術開発が行われた。ディーゼル車はエンジンシリンダー内部で燃料を噴霧し自然着火で燃料を燃焼させて動力を取り出すが、燃焼温度や噴霧された燃料の濃度には不均一性がある。排ガス中の NO_x は局所的に高温になることで、ススは局所的に酸素が不足し燃料が燃え残ることで発生する。これらの発生を抑制する温度・空気量を狙ってエンジン内で燃焼させることで、また燃料と空気の混合を促進しムラを減らすことで、NO_x やススを少なくすることができる。そのために、吸気に排気の一部を混合させ燃焼温度の低下を図る EGR の改善や群噴孔ノズルインジェクタによる燃料噴霧などに取り組んだ²⁴。

この技術開発における役割分担は、広島大が燃料・空気混合気の解析、マツダが新燃焼方式の開発や実車での検証などであった。マツダと広島大の研究チームの責任者はマツダ側が務めた²⁵。広島大ではポスドクを中心に研究が進められた。一方マツダでは、前述の 5 人のディーゼル研究者全員が NEDO プロジェクトを掛け持ちすることとなった²⁶。

NEDO プロジェクトは 2004～2008 年の 5 年間のプロジェクトである。この間、年 2 回の技術委員会と、3 年目の中間評価、プロジェクト終了後の事後評価が行われることとなっていた。技術委員会では各テーマにおける進捗報告が研究責任者から行われ、各委員からの意見が反映される²⁷。それ以外に 2 か月に 1 回の連絡委員会も設けられた²⁸。

技術開発の目標は NEDO が設定するが、そのハードルは高く専門家である各委員からの指導も強力で、研究チームのなかで協力を進めざるを得ないよう追い込まれたという²⁹。一

²⁴ EGR の改善は、EGR の 2 系統化や吸気温度のさらなる低下など。群噴孔ノズルインジェクタによる燃料噴霧は、楕円になる噴霧形状や噴霧の勢いを用いての燃焼の改善。志茂大輔 (2015) 「NEDO フォーラム —社会を変えた NEDO の技術— クリーンディーゼルエンジン MAZDA SKYACTIV-D の開発」

https://www.nedo.go.jp/nedoforum2015/program/pdf/ts2/daisuke_shimo.pdf

NEDO (2013) 「世界最高水準の燃費と環境性能を持つクリーンディーゼルエンジン」

<https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201301mazda/index.html>

なお EGR は、分子量が大きく温まりにくい排ガスを吸気に混ぜることで燃焼温度を下げる技術。群噴孔ノズルについては、燃料の蒸発速度向上を狙い燃料液滴を微細にするために噴孔を小径化すると噴霧の到達距離が短くなるが、その解決策として 2 つの噴孔を微小間隔で配置することで 2 つの噴孔からの噴霧が干渉して到達距離低下が抑制されることを狙う技術。

松本有平他 (2008) 「直噴ディーゼル機関用群噴孔ノズルの噴霧と混合気の特性」『自動車技術会論文集』 Vol.39, No.3, pp.177-182

²⁵ 志茂大輔 (2015) 「NEDO フォーラム —社会を変えた NEDO の技術— クリーンディーゼルエンジン MAZDA SKYACTIV-D の開発」

https://www.nedo.go.jp/nedoforum2015/program/pdf/ts2/daisuke_shimo.pdf

²⁶ 志茂氏へのインタビューより。2017 年 3 月 3 日、マツダ株式会社にて。

²⁷ NEDO (2010) 「平成 21 年度「革新的次世代低公害車総合技術開発」の事後評価報告書」

https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_houkoku_21h_jigo_11.html

²⁸ 志茂氏へのインタビューより。2017 年 3 月 3 日、マツダ株式会社にて。

²⁹ 志茂氏へのインタビューより。2017 年 3 月 3 日、マツダ株式会社にて。

般に産学の共同研究では参加者の関心領域が一致するとは限らない。学術的な研究が企業の事業に結びつくとは限らず、大学の研究者は論文にならない研究には関心が薄い。両方で情報共有も進むとも限らない。法的保護のない技術やノウハウを外部に出すことによって、将来利益を失うおそれがあるためである。しかしハードルの高さや各委員からの強い指導が研究チームを追いこみ、技術開発の効率が高まることとなった。

このプロジェクトの結果、2009年のポスト新長期規制を克服することができた。NEDOの事後評価では、「ITIC-PCI 燃焼³⁰に新規性あり。」「超低エミッションの実現に加え、高い燃費改善目標を達成しており、現時点で世界最高水準の成果が得られたと評価できる。」と革新を高く評価する一方で、「新規燃焼方式の稼働条件全域での性能確認が必要で、実用化になお時間を要する。」「低エミッション・高性能化のための優れた開発要素が幾つか組み込まれており、コスト面等でエンジンの実用化や事業化が必ずしも容易とは思えない。実用化等に向けて、特にコスト低減への努力が求められる。」と実用化に至るハードルも指摘している。そしてプロジェクト後について「本事業での成果を基盤にして、超低エミッション・高効率なエンジンの実用化等に向けた技術開発が何らかの形で更に進展することを期待する。」と述べている³¹。

(3)ディーゼル技術の革新へ

NEDO プロジェクトの後、製品開発へ進むことになる。NEDO プロジェクトでは NOx やススの排出を低減するエンジンを試作したが、実際に使われるときに起こりうる様々な状況への対応や事業化できるようコストを見合ったものにすることが必要である。プロジェクトでは NEDO から求められた目標達成のために取り組んだが、次はマツダの事業のために開発を行う。リソースを獲得すべくマツダが得た NEDO プロジェクトの研究成果を、マツダの開発のために活かす段階である。

NEDO プロジェクトがヤマ場を越えた頃、マツダではスカイアクティブの開発が進められていた。次世代商品であり、炭酸ガス排出量規制に対応すべく燃料消費量を低減させる車の開発である³²。前述のとおりエンジン、トランスミッション、シャシー、車体の開発が

³⁰ Intake Temperature and Injection Controlled-Premixed Compression Ignition 多量 EGR による酸素濃度低下を吸気冷却により防ぎ、ススの発生を抑制する燃焼コンセプト。この NEDO プロジェクトのもとで開発された。

藤本昌彦他 (2007) 「ディーゼル機関における多量 EGR と吸気冷却によるエミッション低減」『マツダ技報』 No.25, pp.146-151, 2007

³¹ NEDO (2010) 「平成 21 年度「革新的次世代低公害車総合技術開発」の事後評価報告書」
https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_houkoku_21h_jigo_11.html

³² この規制は、欧州で新車の CO₂ 平均排出量を 130g/km 以下にすることを求めるものだったが、マツダ車は当初 180~190g/km で規制の水準は厳しいものだった。

JETRO (2007) 「自動車の CO₂ 排出規制」『ユーロトレンド』 2007 年 4 月号 Report3
<https://www.jetro.go.jp/world/reports/2007/05001450.html>

山中浩之 (2018) 「金井会長が語るマツダ変革への挑戦」(VOL.4)『日経ビジネス』 2018 年 3 月 12 日号, pp.72-75

行われていた。ディーゼルエンジン開発は、ガソリンエンジンの開発部門と一緒に進められることとなった。ガソリンエンジンの開発で研究者たちは「理想」を追求した。通常の漸次的改善ではなく、理想形へ直接到達する革新を求めた。その結果、従来より大幅に圧縮比を高めエネルギー効率を良くすることで炭酸ガス排出量の低減へつなげた。ガソリンエンジン開発と一緒にになったことで、ディーゼル車開発についてもこの「理想」を迫る思考が取り入れられた³³。

そこにはエンジンの「理想」を追求するための「7つの因子」という概念があった。エンジン設計における各パラメータは相互に影響しあうが、エンジンの効率を向上させるために制御できるパラメータは圧縮比、比熱比、燃焼期間、燃焼タイミング、燃焼室や壁への熱伝達、吸排気の圧力差、機械損失の7つだけという考え方である³⁴。そして優先順位をつけて、それぞれの因子について最適化を図っていくというものである。

ディーゼル車の開発においてはNEDOプロジェクトで取り組んだ燃焼の低温化・混合気の希薄化などの方向で開発を進めることになる。NEDOプロジェクトで既に規制基準をクリアしており、そのまま実用化開発へ進めるということである。しかし群噴孔ノズルインジェクタを用いた燃料と空気の混合促進が思うようにいかず量産コストの面でも難しかった。吸気温度をさらに下げるEGRシステムの量産開発も難しく、方針転換を余儀なくされた。そこで考え出されたのが、「圧縮比」をあえて下げるという発想だった³⁵。

圧縮比とはエンジンのピストンシリンダー内に取り込まれた吸気をピストンで圧縮する度合いを示す。通常、圧縮比を高めた方がエネルギー効率がよいが、マツダはあえて圧縮比を下げる方向をとった。圧縮比を下げると燃料噴射から着火までの時間が長くなり燃料と空気を混ぜる時間を確保できるため、燃料と空気の混合・均質化を促進させることがで

³³ 志茂氏へのインタビューより。2017年3月3日、マツダ株式会社にて。なお「理想」の追求は、競争範囲を限りそのなかで世界一を目指す戦略のためのマツダの取り組みである。山中浩之 (2018)「金井会長が語るマツダ変革への挑戦」(VOL.4)『日経ビジネス』2018年3月12日号, pp.72-75

³⁴ 「7つの因子」は開発の狙いを定め集中して取り組もうと、SKYACTIV ガソリンエンジンの開発を推進した人見氏が考え出した。なおSKYACTIV ガソリンエンジンは人見氏の研究がもとになっている。

御堀直嗣 (2011)「エンジニアの仕事 すべてがSKYACTIVにつながっていた」『日経Automotive』2011年9月号, pp.125-128

山中浩之 (2018)「金井会長が語るマツダ変革への挑戦」(VOL.5)『日経ビジネス』2018年3月19日号, pp.80-83

ディーゼルエンジン開発も人見氏のもとで行われ、ガソリンエンジン開発における考え方が展開されるなど大きく影響があったものと思われる。

³⁵ NEDO (2013)「世界最高水準の燃費と環境性能を持つクリーンディーゼルエンジン」<https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201301mazda/index.html>

NEDO (2016)「実用化ドキュメント」『Focus NEDO』No.61, pp.18-19
https://www.nedo.go.jp/library/ZZ_focus_61_index.html

きる。また燃焼時の圧力が低くなり部品の軽量化・低剛性が可能であり、機械抵抗³⁶が減ることで全体としてむしろエネルギー効率が向上することが期待でき、車の加速もよりスムーズになる³⁷。EGR の低温化が目的とした燃焼温度の低下も圧縮比を下げることで同時に実現した。NO_x・PM 排出規制が強化されるなど設計の前提条件が変わるなかで、マツダの開発者たちは、何が理想的なのかを「7つの因子」の概念から改めて探索する取り組みを行ったのである。

一方で群噴孔ノズルインジェクタが目的とした燃料と空気の混合促進は、エッグシェイプ燃焼室の開発に軸足が移された。エッグシェイプ燃焼室は、エンジンシリンダーにおいて燃料・空気が圧縮され燃焼が起こるピストン先端部の燃焼室をタマゴ型にすることで、燃焼室壁面に沿って流れる気流が、燃料と空気が混合するのを促進させるものである³⁸。燃料を噴霧するノズルから噴霧される燃焼室の最適化にも視点を移し目的とした燃料と空気の混合促進を実現したのである。ノズルは多噴孔ノズルインジェクタとなった。多噴孔ノズルインジェクタは先端部に小さい穴が多数開いており、ピエゾ素子で開閉させることで1/500秒に4回間隔での燃料噴射が可能である。燃料噴射タイミングを緻密に制御することで、走行条件にあわせて着火タイミングを最適化できる³⁹。圧縮比を下げるとエンジンの始動が不安定になりやすいが、燃料噴射量・タイミング制御で対処するのである⁴⁰。

このようにマツダは圧縮比を下げることを考え、開発を成功させてディーゼルエンジンのブレークスルーに至る。エンジンから排出されるNO_xは触媒による後処理を不要とする水準まで削減されるに至り、また燃費や走行性能にも優れる車を生み出すことになったのである。

SKYACTIV-D エンジンが生み出されるにあたって、燃焼の低温化と混合気の希薄化が目指された。しかし群噴孔ノズルインジェクタやEGRの低温化はそのままでは実用化できなかった。圧縮比を下げるという新たな発想をもたらした「理想」の追求は、ブレークスルーに大きく貢献した。しかしNEDOプロジェクトでの経験の蓄積もブレークスルーに貢献している面があるだろう。マツダはディーゼル車の研究を復活させたものの、国内におけるディーゼル車の投入はスカイアクティブまで行われず（図表5）、製品開発から撤退したままだった。そのような中、炭酸ガス排出量削減が求められディーゼル車が見直されるようになる。しかし研究者が追い込まれながら取り組んだNEDOプロジェクトで経験の蓄積が進み開発の水準を高めていたからこそ、国内市場におけるディーゼル車再投入やそのた

³⁶ 摩擦抵抗など。

³⁷ NEDO (2016)「実用化ドキュメント」『Focus NEDO』No.61, pp.18-19

https://www.nedo.go.jp/library/ZZ_focus_61_index.html

³⁸ NEDO (2013)「世界最高水準の燃費と環境性能を持つクリーンディーゼルエンジン」

<https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201301mazda/index.html>

³⁹ NEDO (2013)「世界最高水準の燃費と環境性能を持つクリーンディーゼルエンジン」

<https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201301mazda/index.html>

⁴⁰ 高田憲一他 (2011)「特集 COVER STORY 設計力で限界を突破する高効率エンジン」

『日経ものづくり』2011年12月号, pp.36-40

めの製品開発を進める経営判断を促しその後の躍進につながったのではないだろうか⁴¹。

経験は人材に蓄積されるだけではない。燃焼室形状の最適化を行うためにシミュレーションが活用された。実機を試作しての開発では時間も費用もかかり形状最適化に限りがあるが、シミュレーションでは実機における挙動との乖離を小さくできないと有効に開発できない。ここで NEDO プロジェクトにおける取り組みが活きた。広島大で行った計測データがシミュレーションの精度向上に活用され、高められた精度を用いてエッグシェイプ燃焼室を生み出したのである⁴²。精度が高められたシミュレーションは、今後もマツダの開発に貢献していくだろう。

図表 8 マツダにおけるディーゼル乗用車の国内販売車種

	ディーゼル乗用車の販売車種
2004年3月	ボンゴフレندي
2005年3月	なし
2006年3月	なし
2007年3月	なし
2008年3月	なし
2009年3月	なし
2010年3月	なし
2011年3月	なし
2012年3月	なし
2013年3月	アテンザ、CX-5
2014年3月	アテンザ、アクセラ、CX-5
2015年3月	デミオ、アテンザ、アクセラ、CX-5
2016年3月	デミオ、CX-3、アテンザ、アクセラ、CX-5
2017年3月	デミオ、CX-3、アテンザ、アクセラ、CX-5
2018年3月	デミオ、CX-3、アテンザ、アクセラ、CX-5、CX-8

(出所) 国土交通省 自動車燃費一覧 (各年版) をもとに作成

2013年3月以降に掲載されている全車種に SKYACTIV-D エンジン搭載車の販売がある。

その後 SKYACTIV-D エンジンはマツダの多くの車種に搭載されていった (図表 8)。ディーゼル乗用車に他社より多くの車種を供給していることは前述のとおりであり、ディーゼル乗用車市場における販売台数の多くがマツダ車である (図表 3)。ディーゼル乗用車市場も、SKYACTIV-D が 2012 年に上市された後に急速に成長し、いまでは国内乗用車販売

⁴¹ マツダ「アニュアルレポート」では 2007 年 3 月期版になって今後のディーゼルエンジン開発では「北米、国内のエミッション規制にも適合させる」としており、この時点で国内市場へのディーゼル車再投入の考えがあったものと思われる。

⁴² NEDO (2013) 「世界最高水準の燃費と環境性能を持つクリーンディーゼルエンジン」
<https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201301mazda/index.html>

の3~4%にまで復活している(図表4)。SKYACTIV-D エンジンが最初に搭載されたCX-5は、

見た目でもアピールするスタイリッシュなデザインに、5ドア5人乗りのクロスオーバーという実用的なボディでありながら、クルマを操る喜びを味わえること。ディーゼルの長所であるトルク感や高効率はそのままに、短所である騒音・振動を抑えた革新的なエンジンを生み出したSKYACTIVテクノロジーの素晴らしさ。この日本でSKYACTIV-Dが絶大な支持を獲得して新しいディーゼル時代の突破口となった点を高く評価。

として、日本カー・オブ・ザ・イヤーを受賞する⁴³など評価を受けた。前提であるNOx・PM排出規制をクリアしたうえで、走り心地や燃費の良さなども認められ、ディーゼル乗用車市場を切り開き「新しいディーゼル時代」をもたらしたと評価された。ディーゼル車はマツダの自動車販売にも大きく貢献し(図表2)、いまやマツダのディーゼル技術は復活を成し遂げたのである。

4. まとめ

これまでマツダのディーゼル技術が復活した経緯を述べてきた。それはマツダのディーゼルからの撤退、かろうじて復活した研究へのリソース獲得、そして製品開発におけるブレークスルーである。

国内市場におけるディーゼルからの撤退は、マツダの外部・内部における事業環境の変化が影響した。外部の環境変化は、社会におけるディーゼル乗用車の位置づけの変化である。国内では税改正により燃料の安さが打ち消され、規制強化によりディーゼル車の大都市圏における使用や製品開発におけるNOx・PM排出量などの制約が厳しくなった。乗用車についてはガソリン車で代替できるため、ユーザーにおいてもメーカーにとってもディーゼル車の必要性は低下した。一方内部の環境変化は、マツダの経営における変化である。経営再建下となりリストラクチャリングを進めるなかで、リソースの節約が強く求められるようになった。また世界視点で効率化を考えるグローバル大企業の傘下となることで、国内需要が少ない事業の整理が考えられるようになるだろう。マツダは国内市場からのディーゼル車撤退を決め、研究からも手を引いた。

欧州市場でマツダのディーゼル車は一定の評価を得ていた。それまでの研究開発があっただろうが、2002~3年頃に研究チームが復活することとなった。しかし国内におけるディーゼル車の位置づけやマツダの経営に大きな変化はなく、研究のためのリソース獲得は望み薄である。そこでNEDOプロジェクトへ参加することとなる。このNEDOプロジェクトは都市環境問題に対してディーゼル車の環境性能向上を図るプロジェクトである。都

⁴³ 日本カー・オブ・ザ・イヤー実行委員会 「日本カー・オブ・ザ・イヤー記録」
<http://www.jcoty.org/record/coty2012/>

市環境問題のために政府が規制強化を図る一方で、このような研究プロジェクトも設けていた。なお研究のためにリソースを獲得しても、研究が実らなければ意味がない。NEDOプロジェクトの運営はこの点で有効に機能した。研究目標へのハードルの高さや委員からの強い指導である。参加者それぞれの強みを持ち寄る産学連携において、産・学の協力の程度を高め技術開発の効率を高めた。

研究の後、実用化のための開発を経て製品となる。様々な使用状況やコストへの対応が必要であるが、打開が難しく進まない場合もあるだろう。マツダにおいても方針転換が求められた。ここではガソリンエンジン研究者との交流が役立った。ガソリンエンジン研究者からもたらされた「7つの因子」の1つである圧縮比を下げるという発想が生まれ、エンジン性能のブレークスルーをもたらした。NO_x・PM 排出量を減少させ燃費を向上、スムーズな加速も実現した。このディーゼルエンジンは専門家やユーザーから支持され、自動車関連賞の受賞やマツダの自動車販売への貢献につながった。マツダより規模が大きい企業が複数あるなかで、ディーゼル乗用車においてはマツダがリーディングカンパニーとなっている。

このように、とりまく厳しい状況のなかマツダは、かろうじて復活したディーゼルの研究に NEDO プロジェクトへの参加でリソースを獲得し技術開発の水準を高めた。そしてガソリンエンジン研究者との交流を通じてアイデアを得て、ブレークスルーに至る。NO_x の後処理を不要にしたり低燃費で経済性に優れるなど、かつてディーゼルからの撤退をもたらした事業環境をブレークスルーで覆した。ユーザーなどから支持されマツダのディーゼルは復活した。国内市場から撤退した頃、このように復活するとはとても想像できなかっただろう。しかし復活はありえるのである。

【参考文献】

NEDO (2013) 「世界最高水準の燃費と環境性能を持つクリーンディーゼルエンジン」

<https://www.nedo.go.jp/hyokabu/articles/201301mazda/index.html>

マツダ「アニュアルレポート」

<https://www.mazda.com/ja/investors/library/annual/backnumber/>

マツダ「ニュースリリース」2019年11月27日「「SKYACTIV-D」搭載車、国内販売累計50万台達成」

<https://newsroom.mazda.com/ja/publicity/release/2019/201911/191127a.html>

(一社) 日本自動車工業会「自動車統計月報」

http://www.jama.or.jp/stats/m_report/index.html

(一社) 日本自動車工業会「世界自動車統計年報」(各年版)

日本自動車輸入組合「輸入車登録台数の推移」

<http://www.jaia-jp.org/stat/?c=stat3>

日本自動車輸入組合「輸入車のクリーンディーゼル車」

<http://www.jaia-jp.org/attractive/cleandiesel1410/>

桃田健史 (2019) 「輸入車 なぜ日本でディーゼル人気? 一方で欧州の販売数は急低下理由さぐる」

<https://carview.yahoo.co.jp/news/detail/df92da6496c20ceee6998fe4a9c22f60751bb976/>

国土交通省「自動車燃費一覧」

http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_mn10_000002.html

東京都環境局 (2018) 「ディーゼル車 NO 作戦とは」

https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/vehicle/air_pollution/diesel/plan/details/no_operation_02.html

宮本喜一 (2004) 「マツダはなぜ、よみがえったのか?」

ヤフー (株)・(株) カービュー「carview! マツダの自動車カタログ」

<https://carview.yahoo.co.jp/ncar/catalog/mazda/all/#sa>

岡田吉誼 岡村一徳 片村修一 (2000) 「MDI 支援システムの紹介」『マツダ技報』No.18, pp.8-15, 2000

環境省 (2005) 「自動車 NOx・PM 法の車種規制について」

<http://www.env.go.jp/air/car/pamph/index.html>

国土交通省「新車排出ガス規制の経緯 (4) ディーゼル乗用車」

<http://www.mlit.go.jp/common/001185076.pdf>

NEDO (2010) 「平成 21 年度「革新的次世代低公害車総合技術開発」の事後評価報告書」

https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_houkoku_21h_jigo_11.html

李鉄 張玉銀 西田恵哉 (2004) 「直噴ガソリン噴霧の分割噴射特性 (第 1 報 混合気分布の LAS 測定)」『日本機械学会年次大会講演論文集』2004.3, pp.159-160

- 志茂大輔 (2015) 「NEDO フォーラム ―社会を変えた NEDO の技術― クリーンディーゼルエンジン MAZDA SKYACTIV-D の開発」
https://www.nedo.go.jp/nedoforum2015/program/pdf/ts2/daisuke_shimo.pdf
- 松本有平 高剣 西田恵哉 (2008) 「直噴ディーゼル機関用群噴孔ノズルの噴霧と混合気の特
性」『自動車技術会論文集』 Vol.39, No.3, pp.177-182
- 藤本昌彦 志茂大輔 片岡一司 藤本英史 山本博之 (2007) 「ディーゼル機関における多量
EGR と吸気冷却によるエミッション低減」『マツダ技報』 No.25, pp.146-151, 2007
- JETRO (2007) 「自動車の CO₂ 排出規制」『ユーロトレンド』 2007 年 4 月号 Report3
<https://www.jetro.go.jp/world/reports/2007/05001450.html>
- 山中浩之 (2018) 「金井会長が語るマツダ変革への挑戦」(VOL.4)『日経ビジネス』 2018
年 3 月 12 日号, pp.72-75
- 御堀直嗣 (2011) 「エンジニアの仕事 すべてが SKYACTIV につながっていた」『日経 Auto
motive』 2011 年 9 月号, pp.125-128
- 山中浩之 (2018) 「金井会長が語るマツダ変革への挑戦」(VOL.5)『日経ビジネス』 2018
年 3 月 19 日号, pp.80-83
- NEDO (2016) 「実用化ドキュメント」『Focus NEDO』 No.61, pp.18-19
https://www.nedo.go.jp/library/ZZ_focus_61_index.html
- 高田憲一 近岡裕 (2011) 「特集 COVER STORY 設計力で限界を突破する高効率エンジン」
『日経ものづくり』 2011 年 12 月号, pp.36-40
- 日本カー・オブ・ザ・イヤー実行委員会 「日本カー・オブ・ザ・イヤー記録」
<http://www.jcoty.org/record/coty2012/>

【謝辞】

本ケース・スタディの作成にあたっては、インタビューをお願いした志茂大輔氏（マツダ株式会社）、米倉誠一郎名誉教授（一橋大学・法政大学（教授））、青島矢一イノベーション研究センター長（一橋大学）に、ご多忙にも関わらず様々なアドバイスを頂くなど大変ご助力頂いた。厚く感謝の意を表す。