

■ 読者の皆様へ ■

グランプリ出版は、創立30周年を迎えた2010年から出版事業をより強化するために、三樹書房と協業体制を固めることになり、三樹書房は歴史関係書、グランプリ出版はメカニズムに関する書籍を中心に出版企画を展開してきました。2025年に三樹書房は創立50周年、グランプリ出版は創立45周年を迎えたのを機に、より両社のブランドの明確化を図ることになりました。

本書『マツダ スカイアクティブエンジンの開発』は、2013年12月に三樹書房から初版が刊行され、その後、追加投入されたSKYACTIV-D 1.5のエンジン等に関する内容をあらたに収録して、初版刊行から3年後の2016年8月に増補新訂版として刊行しています。

その後、この増補新訂版は完売していましたが、このたび上記の理由により、エンジン関係書を数多く手掛けているグランプリ出版から書名や内容等は一部図版の追加以外は変更することなく、刊行することになりました。また、このグランプリ出版刊行版については、マツダ広報の辻本宏治氏にご理解、ご協力を賜りました。

グランプリ出版 編集部

従来の常識を超えて開発されたSKYACTIVエンジン

本書はSKYACTIVエンジンがいかにして誕生したかがまとめられている。その真髄は序章で述べられているとおり、エコカーの代表がハイブリッド車であるといっても過言ではない状況において、エンジンそのものの高効率化を図り、それに陽を当てたことである。

これは自動車メーカーのエンジン技術者が、再び社内で地位を確保したことをも意味している。この高効率エンジン技術SKYACTIVを率いたのが、エンジン技術者でマツダの常務執行役員を務められた人見光夫氏である。その内容は人見氏の技術論としての深みを感じられる。

そもそもマツダはベース技術として3段階のステップを考えていた。ステップ1がアイドリングストップ、ステップ2が減速エネルギー回生、ステップ3がモーター駆動技術、である。これを骨子としながらも人見氏はSKYACTIVには次の7つの因子を掲げてエンジン効率アップを図った。

- ・ 圧縮比
- ・ 比熱比
- ・ 燃焼期間
- ・ 燃焼時期
- ・ 壁面熱伝達
- ・ 吸排気行程圧力差
- ・ 機械抵抗

これらの因子を追求し、達成することがまさにSKYACTIV技術である。なお吸排気行程圧力差というのはいわゆるポンピングロスのことである。これら因子の追求のきっかけになったのが、理想の燃焼とされるHCCI（予混合圧縮着火）である。ガソリンエンジンをディーゼルエンジンのように点火プラグを使わずに圧縮着火させるものだが、全負荷域、全回転域でこれを成し遂げることは、未だ誰も達成できていない。

しかしそれを追求することによってエンジン技術は進化してきた。そのひとつが1：15という超高圧縮比化への挑戦であった。圧縮比のアップはそのまま出力のアップにつながる。しかしノッキングやブレイグニッションといった異常燃焼が上限にあるので、圧縮比アップにも限度がある。それを克服してできるだけ圧縮比を高めるのが技術である。

なお、SKYACTIVの技術はエンジン本体だけのものではなく、コンピューターを使った開発や生産工程にまで及ぶ。

また、SKYACTIVはディーゼルエンジンにも適用されている。ディーゼルエンジンでは燃料の違いにより燃焼の仕方も異なることから、逆に圧縮比を下げている。ガソリンエンジンとディーゼルエンジンの圧縮比が同等の数値になるという特異な結果になり、業界の話題ともなった。

終章では人見氏が、技術者が取り組む姿勢について述べるとともに、今後の開発では「モデルベース開発（CAE）」がより重要になるとしているが、締めくりにふさわしい内容である。現役開発者をはじめ、技術者をめざす学生の方々には必読の書といえ、また、広くエンジンに興味をもつ皆さんにもお読みいただきたい。

一般社団法人 日本陸用内燃機関協会『LEMA』編集長
NPO法人 日本自動車研究者ジャーナリスト会議（RJC）会長

飯塚 昭三

目次

従来の常識を超えて開発されたSKYACTIVエンジン

一般社団法人 日本陸用内燃機関協会「LEMA」編集長

NPO法人 日本自動車研究者ジャーナリスト会議（RJC）会長 飯塚昭三／3

序章 はじめに	7
SKYACTIV 登場	

第1章 SKYACTIV 総論（人見光夫の言葉）	10
--------------------------------	----

「効率の追求」と「7つの因子」

SKYACTIV 前史／人見光夫の経歴と、時代背景／ハイブリッド車の登場
／マツダの方向性を定める／キーワードは「7つの因子」

第2章 SKYACTIV への手掛かり	21
---------------------------	----

ダウンサイジングとは異なる道

ダウンサイジングの潮流／マツダが選んだ、ダウンサイジングとは別の道
／HCCI（予混合圧縮着火）がきっかけ／実験は、思い切って大きく振る
／答えは必ずある／コモンアーキテクチャーの思想とは

第3章 SKYACTIV-G ①	29
------------------------	----

ガソリンエンジン技術

SKYACTIV 車の登場／フル SKYACTIV への課題／ノッキングとブレイグニッション／ノッキング対策／4-2-1 排気の利点／4-2-1 排気の排出ガス浄化法／排気脈動の活用／排気抵抗の低減／そのほかのノッキング回避方法／SKYACTIV-G 1.3 エンジンでの取り組み／ブレイグニッションの対策／機械損失の改善／往復・回転系の対策／動弁系の対策／チェーン系の対策／冷却系の対策／補機の駆動系の対策／潤滑系の対策／ポンプ損失の対策／4-2-1 排気を車載するための工夫

第4章 SKYACTIV-G ②	59
------------------------	----

制御技術

コンピュータ制御を根本から見直す／SKYACTIV-G での制御見直し／制御構造について／アプリケーション層／プラットフォーム層／エンジン制御の、基本からの見直しについて／吸排気制御と吸気量推定／燃料噴射制御／異常燃焼の検出／ブレイグニッション抑制制御／次世代 i-stop のバッテリー・マネージメント／駆動力制御／制御モデル開発の実際／制御対象モデル開発の実際／支援ツールについて

第5章 SKYACTIV-G ③ 75

開発プロセスと生産の変革

Mazda モノ造り革新とは／開発の仕方にも革新が持ち込まれる／コモンアーキテクチャーの導入／燃焼特性のコモンアーキテクチャー化／機能開発と品質検証の新しい取り組み／市場における検証／モデル・ベース・キャリブレーション／エンジン特性掌握のためのモデル化／エンジン特性最適となる最適化工程／生産現場のモノ造り革新

第6章 SKYACTIV-G ④ 97

CAE の活用

CAE が不可欠となった背景／吸気の流動解析技術／PT-ECS（パワー・トレイン・イージー CFD システム）の独自開発／シリンダー内の燃料噴射解析技術／大学との共同研究の成果／ガソリンの噴霧の挙動のモデル化／噴霧予測制御システムの開発／予測計算の応用例／構造物の解析／マツダ・デジタル・イノベーション

第7章 アイドリングストップ技術 i-stop 111

バッテリーマネジメントシステム

マツダのアイドリングストップ i-stop／i-stop の作動手順／SKYACTIV の i-stop／優れた環境性能の実現／鉛バッテリー開発と制御／回生ブレーキ制御／アイドリングストップの頻度の向上／小型・軽量化／高い信頼性の確保／アイドリングストップの必要性

第8章 減速エネルギー回生システム i-ELOOP 125

キャパシターで実現

マツダの減速エネルギー回生システム i-ELOOP／i-ELOOP のシステム概要／可変電圧式減速エネルギー回生用オルタネーターの開発／低抵抗・大容量の電気二重層キャパシターの開発／原材料は、廃棄物の再利用／i-ELOOP の効果／日米欧で実走行し、検証／エネルギーメーターを開発／将来展望

第9章 SKYACTIV-D ① 135

エンジン技術

ディーゼルエンジンの概況／排出ガス浄化に不可欠な後処理装置／SKYACTIV-Dの概要／世界一の低圧縮比の実現をめざして／思い切って大きく振ってみる／実際の開発作業内容／2ステージターボチャージャー／ミニサックスノズル／マルチホールピエゾインジェクター／エッグシェイプ型燃焼室／切り替え式排気二度開きシステム／燃焼時期／軽量化と機械抵抗の低減／補機の駆動系の損失低減／SKYACTIV-Dの出力特性／排出ガス浄化性能と燃費／SKYACTIV-Dの課題と対応技術／燃料の未燃焼成分の低減技術／極冷間の耐始動半失火性能について／後処理システムの小型化と低コスト化／DPF再生時の燃料噴射制御の改良／SKYACTIV-D 1.5／SKYACTIV-D 1.5の技術的具体策／SKYACTIV-D 1.5の進化／世界初、ナチュラル・サウンド・スーマーの採用

第10章 SKYACTIV-D ② 175

電子制御システム

SKYACTIV-Dにとっての制御とは／SKYACTIV-Dの燃料噴射制御／吸気排気制御／2ステージターボチャージャーの制御／ディーゼルに再び光を与えたSKYACTIV-D

第11章 SKYACTIV-G 過給エンジン 182

ダウンサイジング SKY 登場

ガソリン過給エンジン化への「なぜ？」にSKYACTIVで答える／ダイナミック・プレッシャー・ターボシステム／タールド EGR／機械抵抗低減とコスト対応／ダウンサイジング過給エンジンが指し示す未来

終章 人見光夫の言葉 195

マツダ技報巻頭言抜粋

参考文献等 198

あとがき 199

本書刊行までの経緯 200

序章

はじめに

SKYACTIV 登場

その日、ひんやりとした秋の雨が、東京を覆いつくしていた。本降りの雨が傘を叩き、濡れた爪先から寒さが忍び寄った。

この悪天候にもかかわらず、文京区にある東京ドームのプリズムホールには、数百人が詰めかけたのではないかという報道陣の熱気であふれかえっていた。2010年10月20日のことである。

マツダが、次世代技術『SKYACTIV (スカイアクティブ)』を発表した。

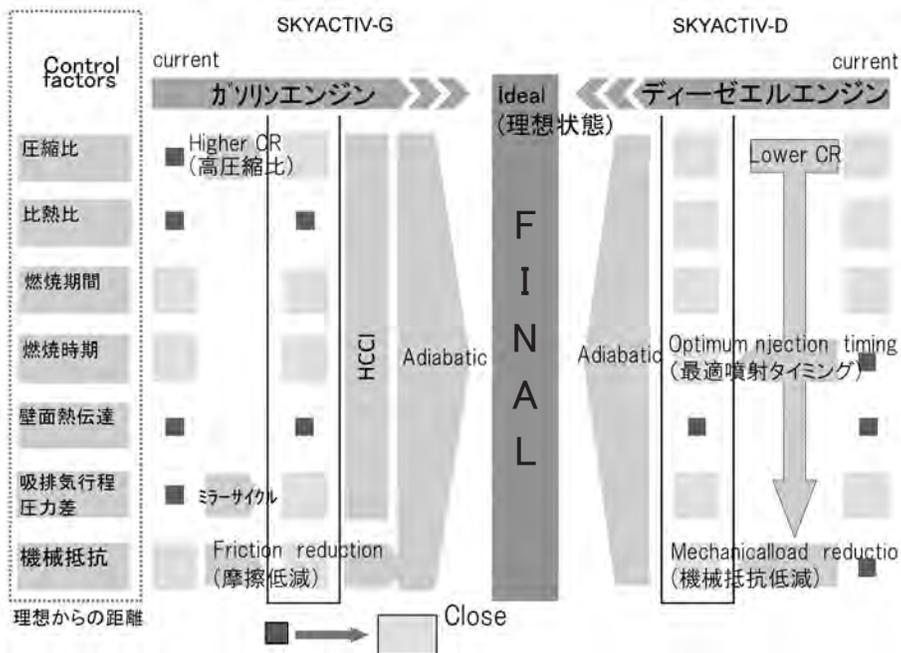
そして、ここから、世界が大きく動いた。

1997年に、トヨタが量産市販ハイブリッド車のプリウスを発売した。開発の狙いは、「従来の小型車の2倍の燃費性能を目指す」ことにあった。すなわち、燃料の使用量を半分に減らすクルマが誕生した瞬間であった。

しかし、普及は思ったほど順調ではなかった。二酸化炭素(CO₂)の排出量の増加によって、地球の気候が変動するという言葉は広く知られていたが、そのことを生活のなかで実感する人はまだ少なかったからだ。

およそ10年の歳月を経て、グリーン家電普及促進事業(一般にエコポイント制度)などの政策が実行に移され、クルマにも、2009年のエコカー減税やエコカー補助金などの後押しが動きだすと、プリウスが一気に普及しだした。

それまで、ハイブリッド車に対し非常に懐疑的であったドイツの自動車メーカー各社も、ハイブリッド車の発売へ動きはじめた。ヨーロッパでは、2012年から、二酸化炭素(CO₂)の排出量を、1キロメートル走行あたり120グラムに抑える規制が合意され、ディーゼルエンジン車の普及を含む、エンジンの高効率化だけでは達成不可能との見方が強まったためだ。この規制はさらに、2020年には95グラム



内燃機関を進化させるための7つの因子

ガソリンとディーゼル、それぞれの内燃機関（エンジン）の効率を高める要素は、図の左の7項目の因子によって決定づけられる。7つの因子を、図の中央の理想的な状態（FINAL）へ持っていくための開発が、SKYACTIVである。

退路を断って、腹を括るしか、前へ進むべき道はないと、覚悟を決めるのである。人見光夫が言う、7つの因子とは、次のとおりである。

- ・ 圧縮比
- ・ 比熱比
- ・ 燃焼期間
- ・ 燃焼時期
- ・ 壁面熱伝達
- ・ 吸排気行程圧力差
- ・ 機械抵抗

「実は、これらはエンジン技術者なら誰でも知っている項目です。そこに、本格的にメスを入れたのが、SKYACTIV エンジンなのです」

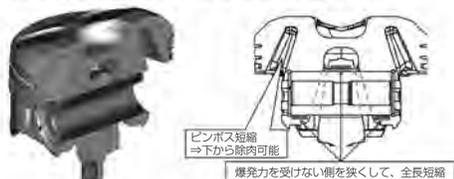
と、いうことは、これまで、当たり前のことを明確に意識し、真正面からやっていたいかなかったともいえる。しかし、そこを自覚することが、飛躍の突破口となった。

クランクシャフトの軸を細くすると、軸を支える回転部分の接触面積を減らすことができ、接触面の摺動速度と、回転中心からの腕の長さも同時に減らすことができるため、摩擦抵抗トルクを効果的に減らすことができる。

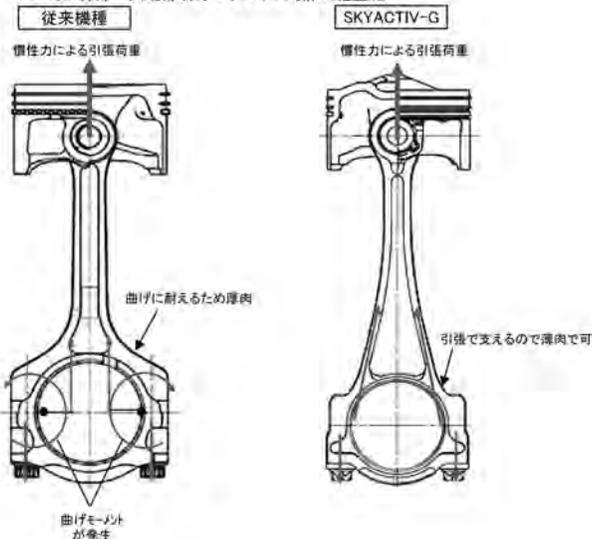
ただし、単純に軸を細くしたのでは、逆に強度不足を起こしかねない。コモンアーキテクチャー（基本骨格の共通化）の考え方が根本にあればこそ、排気量の違いや出力の違いに対して、適切なクランクシャフト軸の太さを導き出すことができることになる。

ピストンは、シリンダー内を上下に往復運動する際、コネクティングロッド（コンロッド）に留めているピストン・ピンを中心に首を振るような挙動を起こす。とくにピストンスカート（ピストン下側の裾の方）とシリンダーの隙間が大きくなる、エンジンの冷えているときは、ピストンの首振り現象によってシリンダーを叩く音

・ピストン内部、コンロッド小端（先端）部の軽量化



・コンロッド幹部～大端部（クランクシャフト側）の軽量化

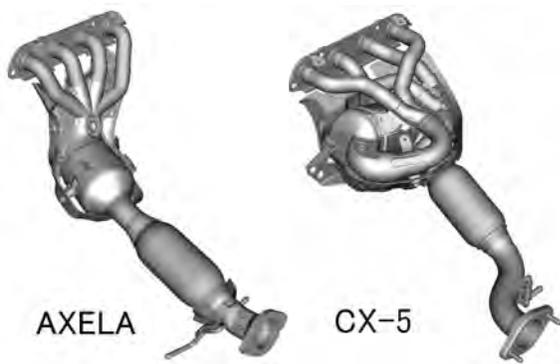


機械損失の低減

ピストンの軽量化（図上）のほか、ピストンをコネクティングロッド（コンロッド）に留めるピンのオフセットを最適化することにより、機械損失が減り、シリンダー内のピストンの往復運動を滑らかにできる。それによってコンロッドを薄肉構造とするだけでなく、クランクシャフトも径を細くすることができ、軽量化しながら耐久性を確保することができる。

4-2-1 排気と 4-1 排気の外観の違い

フル SKYACTIV となる、4-2-1 排気を採用した右側の CX-5 のエンジンと、従来からの 4-1 排気を採用している左側のアクセラのエンジンを外観から比較してみる。最適な排気脈動を活かす 4-2-1 排気を実現するための工夫のあとが、見た目の違いによって確認できる。



隙もなく設計されていく。そうしたなかで、エンジンを搭載する空間にも余裕があるわけではない。当初は、4-2-1 のループ型排気に反対であった車両開発部門に、丁寧な説明を行なうことで、SKYACTIV-G (ガソリン) は搭載可能となったのであった。

また、サイレンサー (消音器) についても、デザイン部門と協議しながら、サイレンサー表面の放射音抑制のビード形状を採用するなどに際して、見栄えという要素も加味している。

ループ型 4-2-1 排気は、また、量産製造上の工夫も盛り込まれている。SKYACTIV-G (ガソリン) には、フル SKYACTIV の CX-5 や、アテンザだけでなく、マイナーチェンジで SKYACTIV-G (ガソリン) を搭載したデミオやアクセラ用もあり、排気管の製造においては、4-2-1 排気と、4-1 排気を、生産工場 で混流生産することにより、生産ラインの稼働率の変動を抑えている。

物づくりとは、単に狙った性能を目標通り実現するだけでなく、量産できなければ意味がない。

混流生産を実現するには、部品点数の増える 4-2-1 排気の製造の仕方に工夫が必要になる。簡単にいえば、部品点数が少ない 4-1 排気と同等の、少ない工程で製造できるようにすることだ。

たとえば排気管の溶接では、一つの工程で、すべての溶接個所に溶接ロボットのトーチ (溶接器具) が届き、溶接できるよう、トーチの動く軌跡を考えただけで、排気管の経路や形を検討するという設計・開発を行なっている。

あるいは、従来の部品に比べ工程数を 30% 減らし、今後登場してくる新しい車種へも対応できる柔軟性を備えた、より効率の良い製造ラインを、この機会に成り

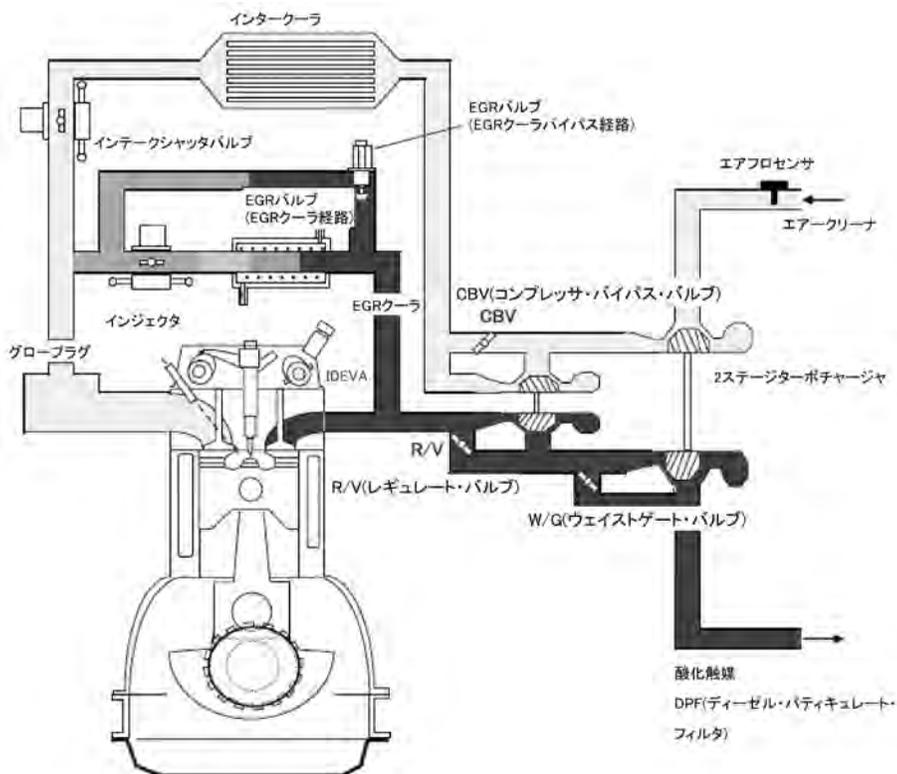
■吸気排気制御

吸排気制御のうち、まず排出ガスを吸気側へ導入する、EGR（排気再循環）について。

EGR（排気再循環）は、排出ガス中の酸素濃度を指標に制御する、排出ガスの λ （ラムダ：酸素濃度）制御が一般的に行なわれている。

しかし、SKYACTIV-D（ディーゼル）では、シリンダー内の酸素濃度による制御を採用している。理由は、排出ガス中の窒素酸化物（ NO_x ）の排出量と、シリンダー内の酸素濃度に、深い相関関係があるからだ。

シリンダー内の酸素濃度は、また、予混合燃焼において燃焼開始（着火）の遅れ



SKYACTIV-Dのシステム構成

第9章のシステム構成図と同じであるが、制御の理解のため再度掲載している。SKYACTIV-Dでは、過給を行なうターボチャージャーを2つ使う、2ステージターボチャージャーとし、また、EGR（排気再循環）クーラーを装備しているなど、新たな取り組みと、その機能する様子が、システム全体像からうかがえる。

終章

人見光夫の言葉

マツダ技報巻頭言抜粋

SKYACTIV のエンジン開発を指揮してきた執行役員の人見光夫は、マツダ技報 No.30 (2012 年) の巻頭で挨拶をのべている。

それはマツダ社内へ向けた言葉とはいえ、意義深い話が語られており、この本の最後に、その言葉を一部抜粋し、以下により伝えたい。

SKYACTIV の技術は、クルマそのものに真正面から取り組み、大きな進化を果たしたもので、マツダの今後の生きざまを示したものと見えよう。

世の中は、ハイブリッド、電気自動車というシナリオが常識化しつつある中で、内燃機関の改善の余地はまだ十分残っていることを示し、少なくとも、業界にはかなりの影響を与えたものと思う。

今後、新興国等、自動車の台数は飛躍的に伸びていくが、その大半はまだ内燃機関にしかかなりえないという現実を考えれば、少なくとも正しい方向への影響をあたえることができたものと思っている。

「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言」を、技術的に支えるビルディングブロック戦略は、環境面では、まず、ベースとして動力源の効率をあげ、効率の悪いところは使わないようにし、クルマを駆動するために必要なエネルギーを極力減らすべく、軽量化や抵抗低減を進めている。

次に、クルマを駆動しないときにはエネルギーを使わないようにし、さらに、捨てているエネルギーを回収して、エンジンの仕事を減らすという順番に取り組んでいこうというものである。

あとがき

いま、世界は情報に満ち溢れている。そのなかから、真実を見つけ出すのは至難の業だ。

しかし、真の価値を持たない物は、必ず淘汰されていく。自動車技術も、年代別に過去を振り返ってみると、そういえばそんな物もあったねえと、ある種の懐かしさと、同時に、失笑のもれるものがある。

かつて、そういうことができたのも、バブル経済があり、エネルギーが無限であるという錯覚を人々が信じたからであり、そうした幻想の中で生まれた一時の迷いであったといえるだろう。人間は、そういう極楽を夢見たがる生き物である。

しかし、いまは違う。

世界的に経済は低調傾向であり、不安定だ。環境保全は当然の命題で、エネルギーも限りがあることを多くの人が認識している。なにより、19世紀末には16億人であった世界人口が、いまや4.3倍の70億人に膨張し、さらに増大を続けていることが、あらゆる課題をもたらしている。人類が、かつて経験したことのない危機をはらんだ環境の時代を我々は生きているのである。

そうしたなか、新車開発において、原理原則を改めて見直し、真摯に立ち向かい、解決の糸口を見出し、それに邁進した、マツダのSKYACTIVは、潔く心地よい技術である。そこに、人見光夫の人格が刻まれていることが、さらにSKYACTIV技術に温もりを与えている。だから、人は共感するのだ。

しかも、サステイナブルZoom-Zoomのブランドメッセージが示す通り、マツダのSKYACTIV技術には、生活に潤いを与える喜びが込められている。

70億人の人間が、ただ息を潜ませ命を永らえるための環境技術ではなく、人が人らしく生き生きと暮らせる、まさに現代の技術である。

最後に、この本を執筆するにあたり、マツダの全面的な協力を得られたことに感謝します。また、この本を執筆する機会を与えてくださった三樹書房にも感謝します。そして、この本を読んでくださった読者の皆様に、御礼申し上げます。

以上は、初版刊行時のあとがきである。SKYACTIVエンジンは、日々進化を遂げている。初版上梓のあと、小排気量のディーゼルエンジンが加わり、さらにはガソリンエンジンに、ダウンサイジングターボが追加となった。

SKYACTIVエンジン開発に際し、人見光夫は、ダウンサイジングガソリンターボエンジンの不条理を説いていたが、いったい何がその後起きたのか？

しかし、SKYACTIVの過給ガソリンエンジンは、SKYACTIVエンジン開発の7つの因子を外れることなく、適切な排気量に対する過給により、優れた熱効率を追求した諸元となっていた。

SKYACTIVエンジンは、なお成長し進化している。そのSKYACTIV-D 1.5とG 2.5Tの様子を加筆したのが、この増補新訂版である。

御堀直嗣

本書刊行までの経緯

『マツダ スカイアクティブエンジンの開発』(2013年収録)

最後に本書が刊行されるまでの経過を書いておきたい。

2011年 11月に、スカイアクティブテクノロジーに関する記事をまとめるため、マツダ国内広報部の春木健部長のご手配によって、私は一人マツダ広島本社で取材をした。対応してくれたのは、生産部門の責任者を務める専務執行役員の小飼雅道氏(現・マツダ株式会社代表取締役社長兼 CEO)であった。約1時間に及んだ取材時間内に小飼氏から、スカイアクティブテクノロジーの開発に合わせてすすめるマツダの「モノ造り革新」について、その概要を聞くことができた。ジャーナリスト組織に所属している私は、日本内外の新車情報はもとより、技術情報等も手に入れやすい立場にあるため、近年の欧州メーカーの新技術には目を見張るものが多いと強く感じていた。

戦後、急速に成長した日本の自動車産業は、現在ではエコロジー技術においても世界をリードしている。なかでも、モーターを併用するハイブリッド技術などに関しては、その代名詞と言っても過言ではない。しかし、スカイアクティブエンジンは、従来の内燃機関を根底から見直し、さらに進化させようとするものである。その考え方は、エンジンのみならず、ボディやサスペンションなど各部の最良設計を追求し、加えて生産効率の向上などを狙って生産工場も刷新して、クルマ作り全体を見直すという壮大な計画なのである。

小飼氏からお聞きした「モノ造り革新」の考え方、さらにクルマの組み立てに関して、「日本の工場での製造にこだわる」という姿勢に、深く感銘を受けた。私は早速、国内広報部に相談し、日本独自の発想ともいえるこのスカイアクティブテクノロジーについて、その開発史をまとめておきたいと伝え、同意を得て、この企画はスタートすることになったのである。

当初執筆に関しては、開発に携わる技術者の方々にお問い合わせするつもりであったが、職務に従事されている現役のエンジニアにお問い合わせすることは難しく、ちょうどその頃スカイアクティブエンジンに関する記事を手がけ、取材を続けていたモータージャーナリストの御堀直嗣氏に相談をしたところ、執筆をしていただけることになった。またスカイアクティブエンジンの総指揮を執っている人見光夫氏に監修を引き受けていただけることになり、このように書籍としてまとめられ、刊行するに至ったのである。

本書に収録したほとんどの図版や写真類や内部資料などは、国内広報部の協力をいただいた。また開発経過に関しては、人見氏からその概要をお聞きすることができた。

人見氏によれば、欧州において小排気量のターボエンジンに対するスカイアクティブエンジンの優位性を発表した際に、ターボエンジンを主力として新型車を展開している欧州の自動車メーカーからは、「マツダから挑戦状を突きつけられた」と言われたという。

テクノロジーの世界で、各々が競い合い“闘い”とも呼べる技術革新が繰り返されていることは喜ばしいことであると思うし、スカイアクティブ技術によって従来のエンジンが大きく革新され、より高効率と低燃費化が図られることを期待したい。

〈著者紹介〉

御堀直嗣 (みほり・なおつぐ)

1955年東京生まれ。玉川大学工学部機械工学科（流体工学研究室）卒業。1978年から1979年にかけてFL500レースに参戦。1980年からのFJ1600レースでは、1981年に優勝経験がある。1984年よりフリーランスライターとなる。自動車の技術を分かりやすく解説することに定評があり、読売新聞夕刊「@ CARS Q&A」では、読者からの質問の回答者も務める。著書に『メルセデスの魂』『アウディの矜持』『ミニの至福』（いずれも河出書房新社）、『電気自動車の“なぜ”を科学する』（アーク出版）、『クルマはなぜ走るのか』『ハイブリッドカーはなぜ走るのか』（ともに日経BP社）、『スバル デザイン』（三樹書房）、『軽自動車における低燃費技術の開発』（グランプリ出版）など多数。

マツダ スカイアクティブエンジンの開発

高効率と低燃費を目指して

監修 人見光夫

著者 御堀直嗣

発行者 山田国光

発行所 株式会社**グランプリ**出版

〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-32

電話 03-3295-0005(代) FAX 03-3291-4418

振替 00160-2-14691

印刷・製本 モリモト印刷株式会社