

# 目次

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 / ノッキングとプリイ 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 / プリイグニッ 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 / プリイグニッション抑制制御 / 次世代 i-stop のバッテリー・マネジメント / 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	

## ■ 読者の皆様へ ■

本書は、2013年刊行の『マツダ スカイアクティブエンジンの開発』の内容に、スカイアクティブエンジンのその後の展開を追加収録した増補新訂版です。したがって、本文中に登場する名称や肩書等については、今回の追加収録分であるSKYACTIV-D 1.5(第9章に追加収録)と、SKYACTIV-G 2.5T(第11章を新設)に関する部分は、増補新訂版刊行時の2016年現在であり、その他の部分については、初版刊行時の2013年現在の取材により執筆されたものです。

三樹書房 編集部



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

バッテリーマネージメントシステム

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・スモージーの採用

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 / クールド 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 ..... 199

あとがき ..... 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(CO<sub>2</sub>)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出すと、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(CO<sub>2</sub>)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



まで厳しさを増す予定だ。

こうして、エコカーといえば、ハイブリッド車をさすといって過言ではない状況が生まれた。

そこに、エンジン技術で、ハイブリッド車並みのリッター30km (10・15モード値) という燃費を実現して登場したのが、SKYACTIV エンジンであった。驚きとともに、人々の注目が集まったのは当然であった。

SKYACTIV 発表の日、山内孝代表取締役会長 社長兼 CEO (現会長) の挨拶、続いて金井誠太取締役 専務執行役員 研究開発・プログラム開発推進担当 (現副会長) の説明のあとを受け、記者団からの質疑応答で登壇したのが、開発責任者である人見光夫 (現執行役員 パワートレイン開発本部長) であった。

これまで、ガソリンエンジンでは不可能と考えられてきた高圧縮比を実現しようとした SKYACTIV-G (ガソリン)、そして、ディーゼルエンジンでは考えられなかった低圧縮比の SKYACTIV-D (ディーゼル) に対する、記者団の疑問や疑念に対し、人見光夫は胸を張り、堂々と受けて立ち、答えた。それでもなお、会場内の空気は、「信じられない……」との思いに溢れていた。

しかし、その晩のテレビニュースは、SKYACTIV で持ちきりとなった。さながら、不可能を可能にしたマツダに対する、賞賛の嵐といえた。

SKYACTIV エンジンの開発において、人見光夫という一人の技術者の信念と執念が核となる。開発に至る彼の背景を知れば、SKYACTIV の意義はさらに深まっていはずだ。

そのうえで、SKYACTIV エンジン技術の真髄に、この本は迫る。

理論を打ち立て、それをコンピュータシミュレーションと、実験で確かめ、さらに実用可能な技術へ昇華させ、生産へと持ち込む過程で、多くのマツダの技術者の英知と努力が積み重ねられていった。

マツダの SKYACTIV 登場の刺激を受け、他の自動車メーカーからも、エンジン技術を進化させることで、飛躍的に燃費を向上させた新車が、相次いで登場してくるようになった。

ある、マツダの技術者は、こう回想する。

「SKYACTIV の発表によって、エンジン技術者が再び働く場を社内で得ることができました。ありがとう」という電話が、他の自動車メーカーの技術者から掛か

ってきた、というのである。ハイブリッド車の普及や、電気自動車への注目度が増すなか、もはやエンジンの出る幕はないのではないかと憂い、日陰の存在と化していたエンジン技術者たちに、再び脚光が集まったのであった。

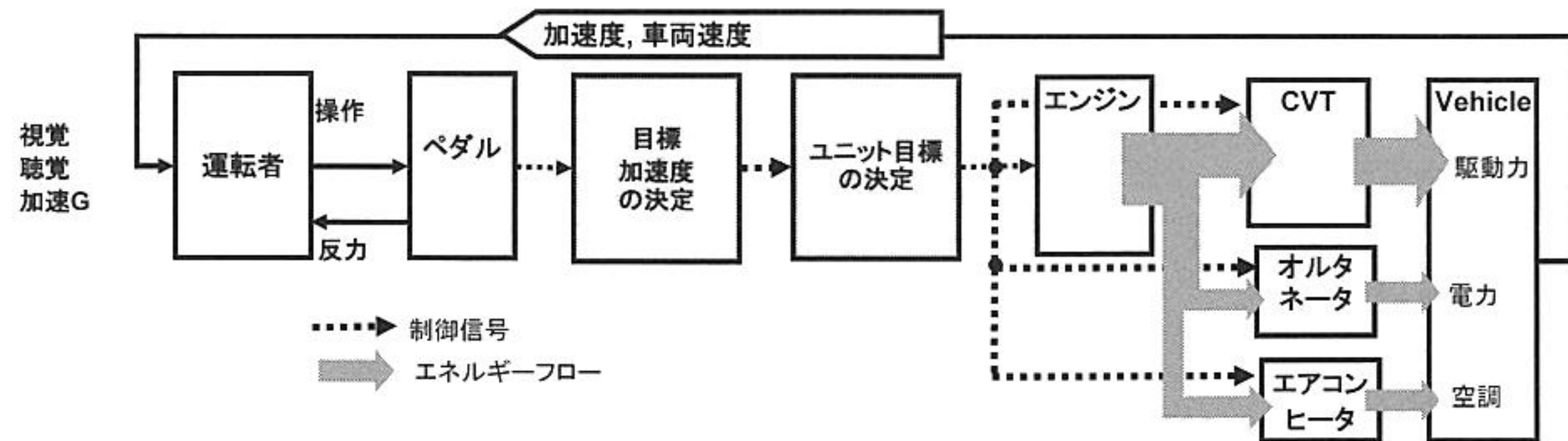
同時にまた、ハイブリッド車で先行する自動車メーカーの技術者は、こう述べた。

「SKYACTIV の登場は、大いに歓迎すべきことです。それに負けまいと、ハイブリッド車の開発も頑張ります。そもそも、ハイブリッド車といえどもエンジンは搭載しており、そのエンジンの燃費がよくなるなら、ハイブリッド車は、さらに上の燃費を目指すことができるからです」と、SKYACTIV を称賛したのであった。

SKYACTIV の価値は、単に一つのエンジンの効率向上に止まらず、クルマのパワーユニット全体に広く影響を及ぼしている。

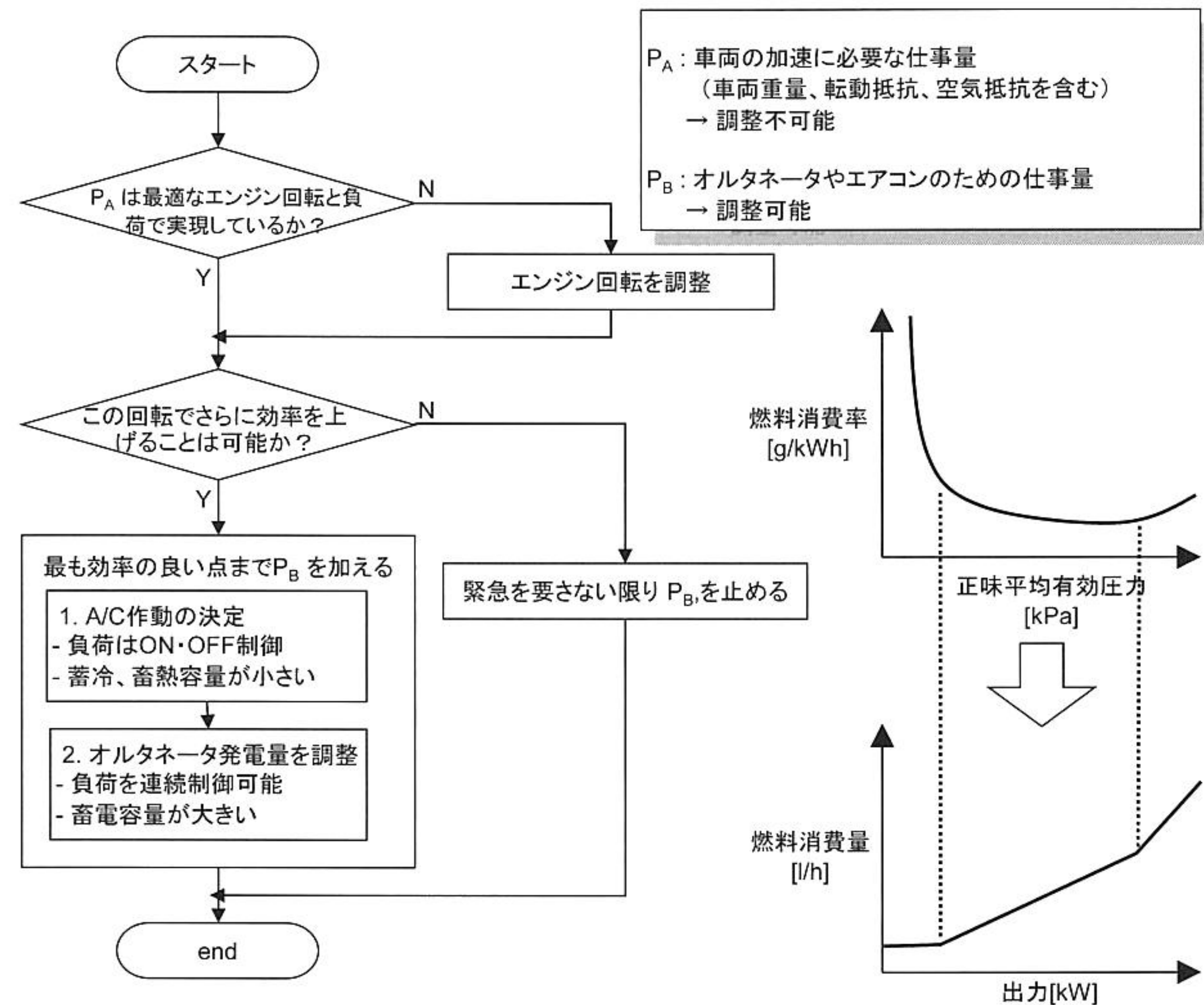
さあ、SKYACTIV の話に入ろう。まずは、人見光夫の言葉を通じて繙く、SKYACTIV 総論である。





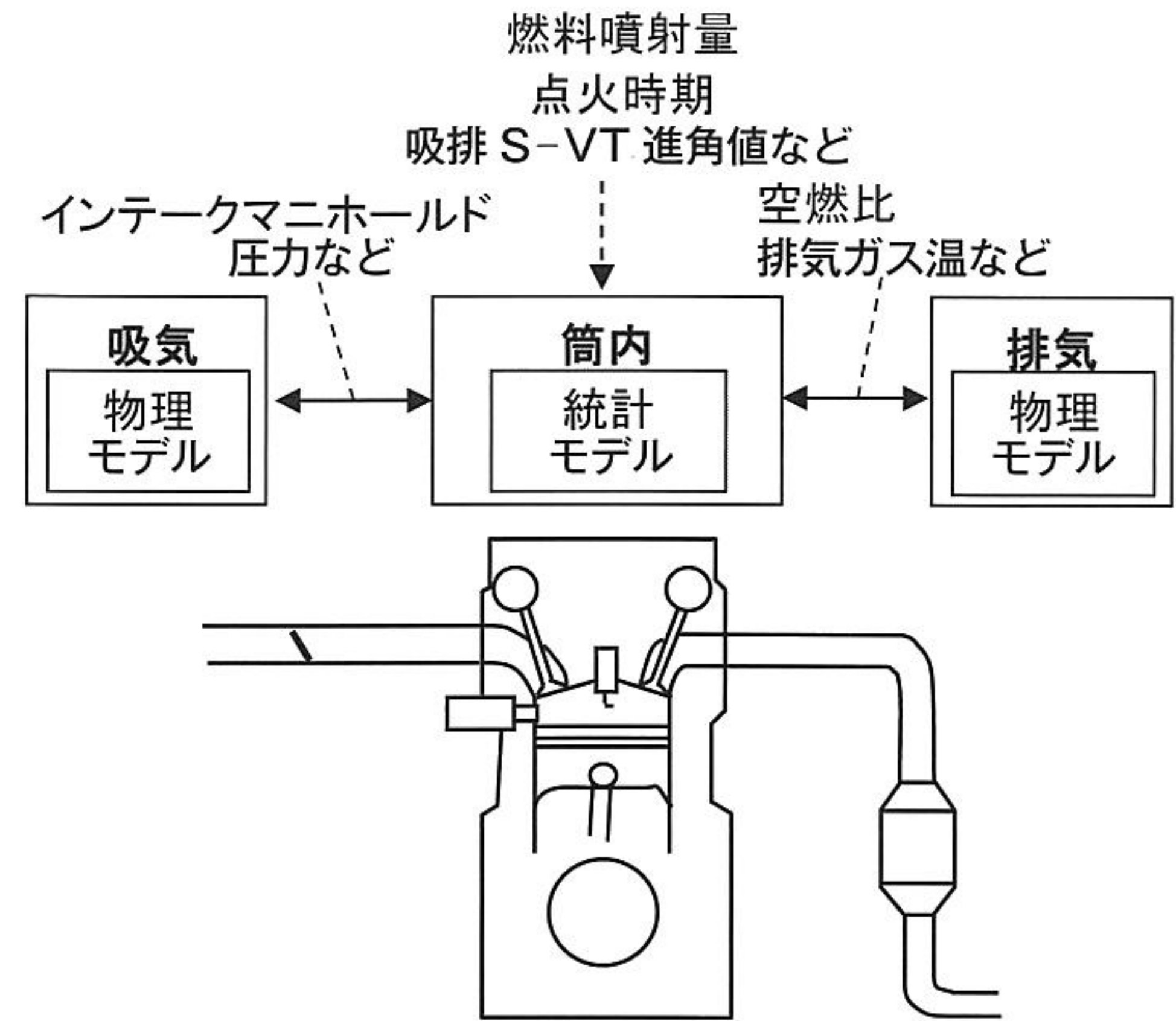
**駆動力制御**

マツダのサステイナブル Zoom-Zoom を実践する SKYACTIV-G (ガソリンエンジン) は、燃料消費の抑制と、ドライバーが期待する駆動力の実現を両立するため、一連の制御ループのなかで、目標とする加速度の決定部と、ユニットの目標決定部をわけて配置している。



**駆動力制御のユニット決定部フローチャート**

駆動力制御のユニットの目標決定部では、目標とする加速度を、もっとも少ないガソリン消費で実現するため、エアコンディショナーの作動、オルタネータの発電量などを加味しながら、CVT のギア比や、エンジントルクを決定している。



**制御対象のモデル開発**

エンジン内部の挙動は、シリンダー内の近似モデルであるモデル・ベースド・キャリブレーションを行なう統計モデルを用い、それ以外については、物理現象を数式として表現した物理モデルにより、それぞれ使い分けることによって、精度が高く、また開発者が扱いやすい制御機能の検証を行なった。

**■制御対象モデル開発の実際**

制御機能を検証するため、エンジン、センサー (検出機能) / アクチュエータ (作動装置)、補機 (ポンプ、オルタネーター、コンプレッサーなど)、トランスミッション、クルマの走行抵抗などを、モデル化した。

このうち、エンジンのシリンダー内の挙動については、MBC (モデル・ベース・キャリブレーション) を行なう統計モデルを用いている。

MBC (モデル・ベース・キャリブレーション) を行なう統計モデルとは、エンジン回転速度、吸気管圧力、燃料噴射時期、点火時期、吸排気バルブ時期を入力し、トルク、燃料消費量、空燃比、充填効率を出力とする、エンジンシリンダー内の近似モデルである。

エンジンのシリンダー内の挙動以外については、物理モデル (物理現象を数式として表現したモデル) と組み合わせた混合構造とした。こうすることで、扱いやすさと、精度の両立をはかっている。

物理モデルとは、物理現象を数式として表現し、たとえば、吸排気の場合でいえ



以上により、SKYACTIV-G (ガソリン) では、高圧縮比を実現する上での、シリンダー内の混合気 (空気とガソリンが混ざった気体) の挙動を、より正確に把握することができたのであった。

## ■予測計算の応用例

噴霧予測制御システムを仕上げた成果を基に、ピストンとインジェクターの設計が具体化していくことになる。

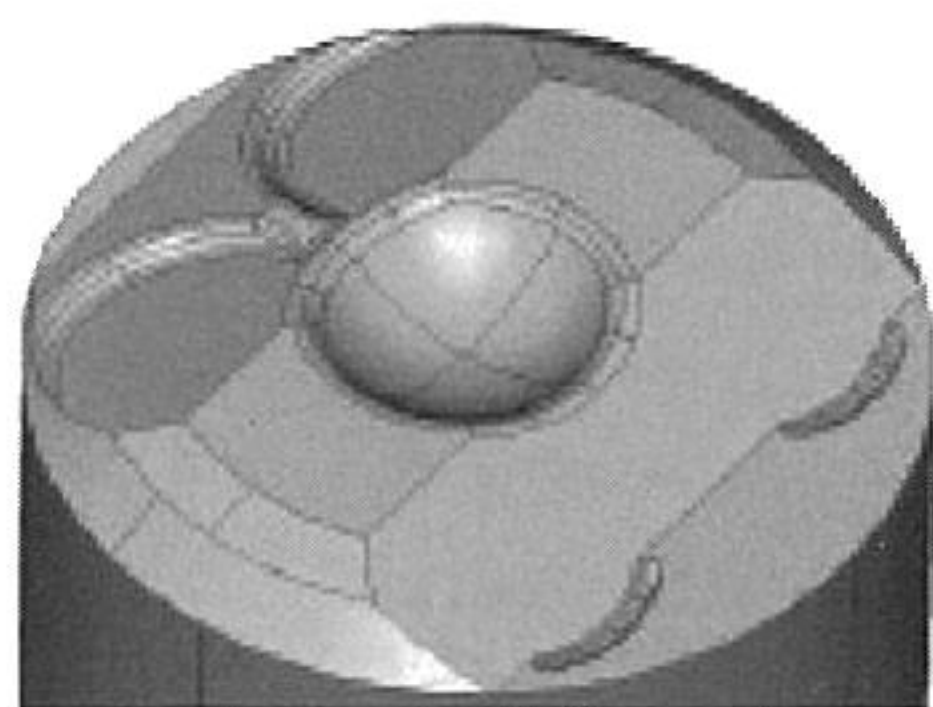
予測計算の応用例を、以下の3つの事例で紹介する。

- ・エンジン回転数 1200 回転/分における触媒暖気の領域
- ・エンジン回転数 1500 回転/分における全負荷の領域
- ・エンジン回転数 1500 回転/分におけるオイル希釈の領域

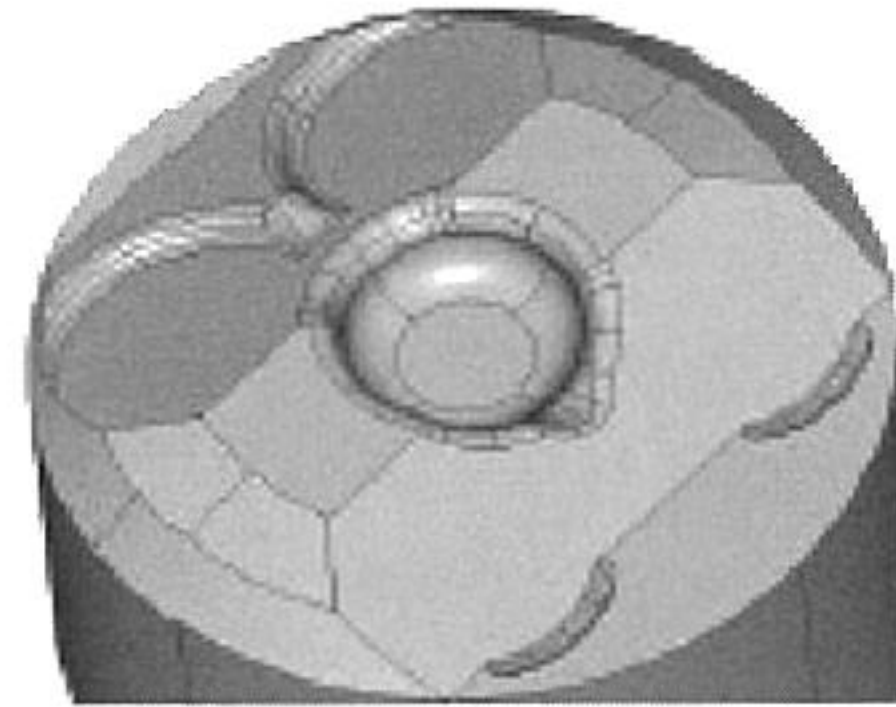
### 応用例 1：触媒暖気の領域

SKYACTIV-G (ガソリン) は、世界各国の厳しい排出ガス規制を達成するため、エンジン始動時に触媒を素早く活性化させ、排出ガスの浄化率を高めようと、点火時期を遅らせ、排出ガス温度をあげる制御を採用している。ただし、燃費を悪化させるわけにはいかないので、燃えやすい混合気を点火プラグ周辺に集め、的確に燃焼させる弱成層燃焼 (混合気の濃度を層に分けて燃焼させる) を行なわせなければならない。それを成立させるピストン頭頂部の形状が重要になる。

成層化とは、ガソリンと空気の混合を均一にはせず、燃焼室内の一部にガソリンが濃い部分をつくり、燃えやすくすることである。



(a) レンズ型ピストン



(b) バスタブ型ピストン

#### ピストン頭頂部のキャビティ形状

図の左側 (a) レンズ型キャビティのピストン頭頂部に比べ、右側の (b) バスタブ型キャビティのほうが、点火プラグ周辺に混合気が集まっていることを、コンピュータシミュレーションにより確認したうえで、さらに実験により確かめられた。

空気とガソリンの混合気を、弱成層化する (混合気の濃度を層に分ける) には、ガソリンの噴霧を、ピストン頭頂部のキャビティ (凹み) でとらえ、そのうえで、噴霧を点火プラグの方向へ巻きあげる必要がある。

SKYACTIV-G (ガソリン) では、ピストン頭頂部の凹み、すなわちキャビティについて、バスタブ型とレンズ型の二つを比較した。そしてピストンが上死点に来たときの噴霧の予測を試みた。

キャビティ (凹み) の形状を決めるためには、エンジンが暖まっているときだけでなく、冷えた状態 (始動時や極冷間時) でも、あるいは、低回転の低負荷や、高回転での高負荷においても、いろいろな条件を考えなければならない。加えて、噴霧や流動のバラツキも考慮すると、非常に幅広い条件を検討する必要がある。したがって、数千におよぶ膨大な CAE (コンピュータを活用した設計による事前検討) の計算を行ない、絞り込みを行なったうえで、実物のエンジンで確かめ、キャビティ (凹み) の形状を決めていくという作業を行なった。

すると、上死点后 35 度のクランク角で、レンズ型は排気バルブ (弁) 側に噴霧が流れてしまっているのに対し、より凹みの深いバスタブ型では、点火プラグの方向へ噴霧を巻きあげているのがわかった。

また、点火プラグ周辺の断面で混合気の分布も見てみると、やはりバスタブ型のキャビティ (凹み) は、点火プラグ周辺に混合気 (空気とガソリンが混ざった気体) が集まっていることがわかった。

さらに、点火プラグ周辺の混合気 (空気とガソリンが混ざった気体) の空燃比 (空気とガソリンの比率) を調べた。すると、バスタブ型では点火プラグ周辺にガソリンの噴霧が集まり、燃えやすい状況になっていることがわかった。

開発担当者は、この成果を得るまでの苦労を、次のように回想している。

「SKYACTIV の開発初期には、予測精度が非常に悪く、実用に使える水準ではありませんでした。過去 15 年以上も予測技術を開発してきて、誰もが期待し、その都度、裏切られてきた過去がありました。

しかし、SKYACTIV の開発では、CAE (コンピュータを活用した設計による事前検討) がしっかりしないと前へ進めないという周りの期待があり、それが後押しになり、設計や実験の部署の多大な協力と、CPU (中央処理装置) の強化や、解析人員の増強により、良い方向へ動いていったのです。

SKYACTIV の開発の途中から、工夫すれば使えるという水準に高まり、最終的には解析がないと決められないという水準まで来ました」



を停車中に止める従来他社の方法ではなく、エンジン再始動の確実性を含め、安心して、快適にアイドリングストップの効用を実感できる機構として打ち出した。テレビでの宣伝も積極的に打った。

いまや、アイドリングストップは世界的にも標準装備に相当する機能となっている。

## ■ i-stop の作動手順

i-stop の作動は、次のとおりである。

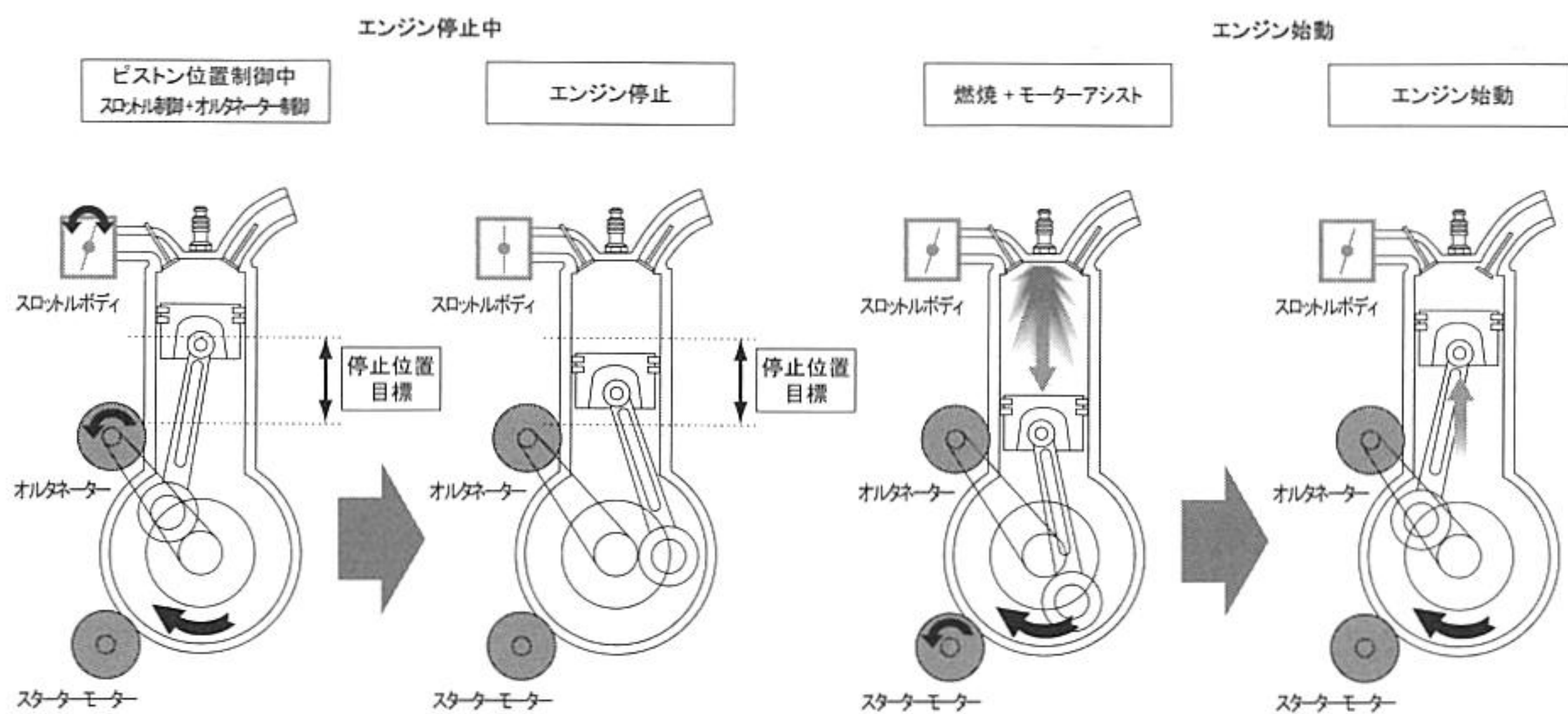
エンジン停止は、AT (オートマチックトランスミッション) 車の場合、確実にクルマが停止してからエンジンを止める。

エンジン停止の際には、再始動へ向け、2つの準備が行なわれる。

- ・ シリンダー内から余分な排出ガスを掃気する (排気を促す)
- ・ 一つのシリンダーでは、再始動のため、ピストンを膨張行程の位置に調節する

まず、シリンダー内から余分な排出ガスを掃気する (排気を促す) ことより、エンジン再始動の際の膨張行程にあるシリンダー内に、新しい空気だけが入った状態を作り、そこへ、直接ガソリンを噴射し、点火プラグで着火すれば、着実に燃焼はじまり、エンジンの再始動が実現する。

それから、ある一つの気筒のピストンが、再始動にちょうどよい膨張行程にある



### 直噴を活かした i-stop の作動

i-stop は、エンジンの再始動の時間を早めるため、エンジンを停止する際に、再始動しやすいよう、1つの気筒のピストンが膨張行程で停止するよう、オルタネーターを使ってピストン停止位置を調整する。そのうえで、エンジン再始動では、直噴の特長を活かし、ガソリンを直接シリンダー内へ噴射することにより、着実に燃焼を開始し、エンジンを素早く再始動させる。

よう、エンジンを停止する直前に、発電に使うオルタネーターを利用して、ピストンの停止位置を調節する。

これは、一時的にオルタネーター (発電機) の発電量を増やすという負荷を与えることにより、エンジンの回転にブレーキを掛ける仕組みで行なっている。

エンジン停止の際の、調度よいピストンの停止位置とは、次のエンジン再始動に向けて、ピストンの上死点 (もっとも上の位置: 0度) から、クランクシャフトの回転で、30~120度の間であると、マツダはいう。

i-stop の利点は、直噴エンジンの特徴 (シリンダーの中へ直接ガソリンを噴射できること) と、スターターモーターを組み合わせることにより、エンジン再始動までの時間が短いことだ。再始動時間は、0.35秒である。この0.35秒という時間は、従来のスターターモーターのみでアイドリングストップを実現していた場合に比べ、約半分の時間短縮となっている。

0.35秒がどれほどの時間感覚かという点、AT (オートマチックトランスミッション) 車の場合、ブレーキペダルから足を離して、アクセルペダルを踏み込むまでの間に、エンジンは再始動を終えている。

現在は、新車開発のプログラム開発推進本部主査の職にある猿渡健一郎が、i-stop の発売へ向け開発していたときの責任者であった。当時を振り返り、猿渡健一郎は、

「ユーザーがさまざまな条件で使用しても、違和感を覚えないことが開発の一番の目標でした」

と語っている。

それが、このエンジン再始動までの時間短縮に、成果となって現れている。

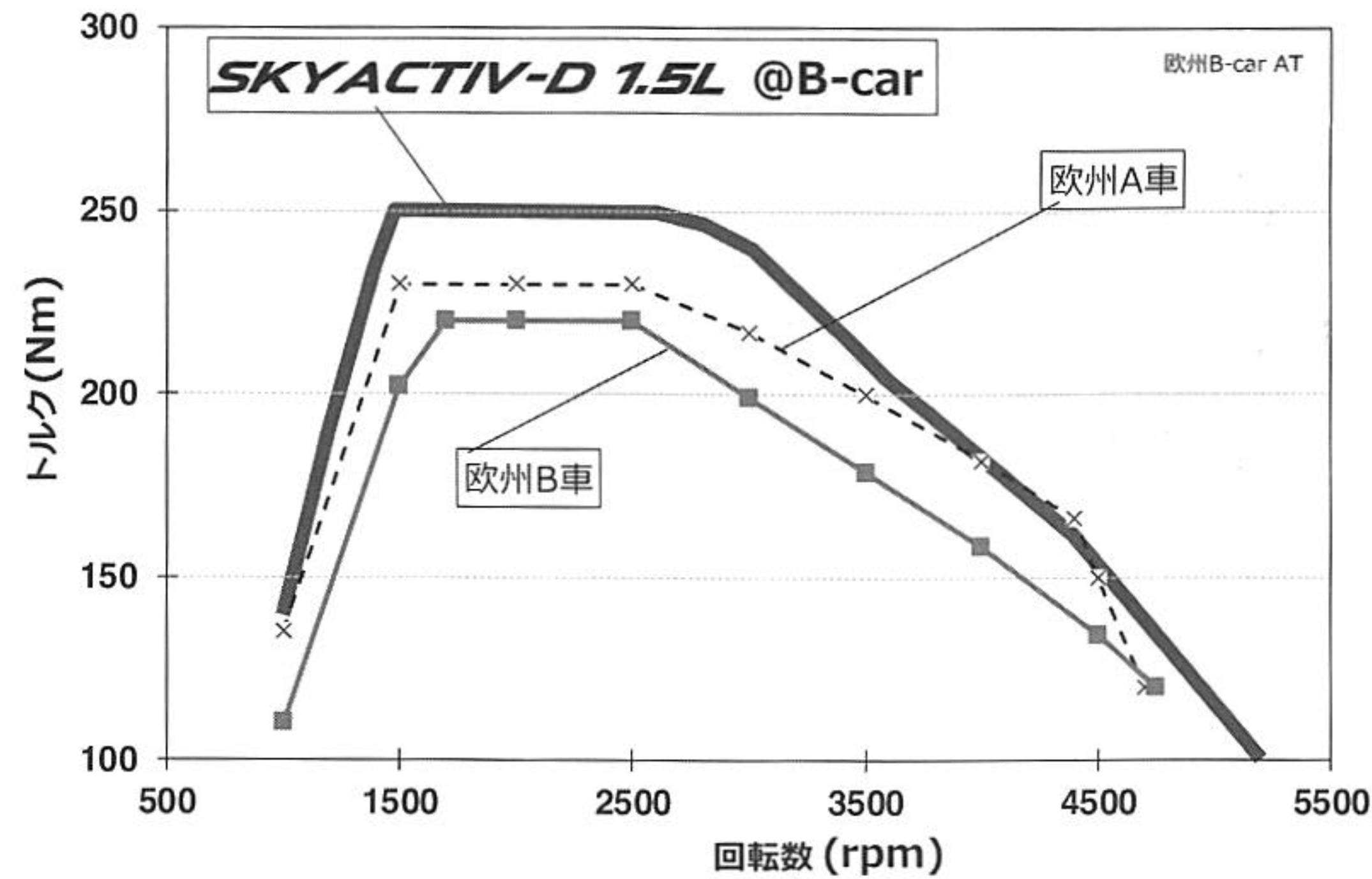
また、当初の i-stop は、専用の鉛バッテリーを追加搭載していたが、この点について、猿渡健一郎は次のように述べている。

「国内にアイドリングストップを普及させようと取り組んだ開発でしたから、バッテリーあがりを感じて、アイドリングストップをしなかったりしたのでは、燃費向上の効果が十分ではありません」

使う上での安心と、採用した成果を確実に燃費向上に結び付け、アイドリングストップの普及に本気で取り組むことを求めた商品化であった。

猿渡健一郎が開発担当となったのは2007年1月であったが、それから2年5か月で実用化にこぎつけた。





#### SKYACTIV-D 1.5のトルク特性

D 2.2の14.0に比べ14.8に高められた圧縮比や、可変ジオメトリーターボの採用などにより、低回転域からのトルクの立ち上がりが早く、また、より高いトルク値を実現している。

これらの技術を投入することにより、排気量2.5リッターガソリンエンジンと同等のトルクと、毎分5200回転まで軽快に回るエンジン特性としている。

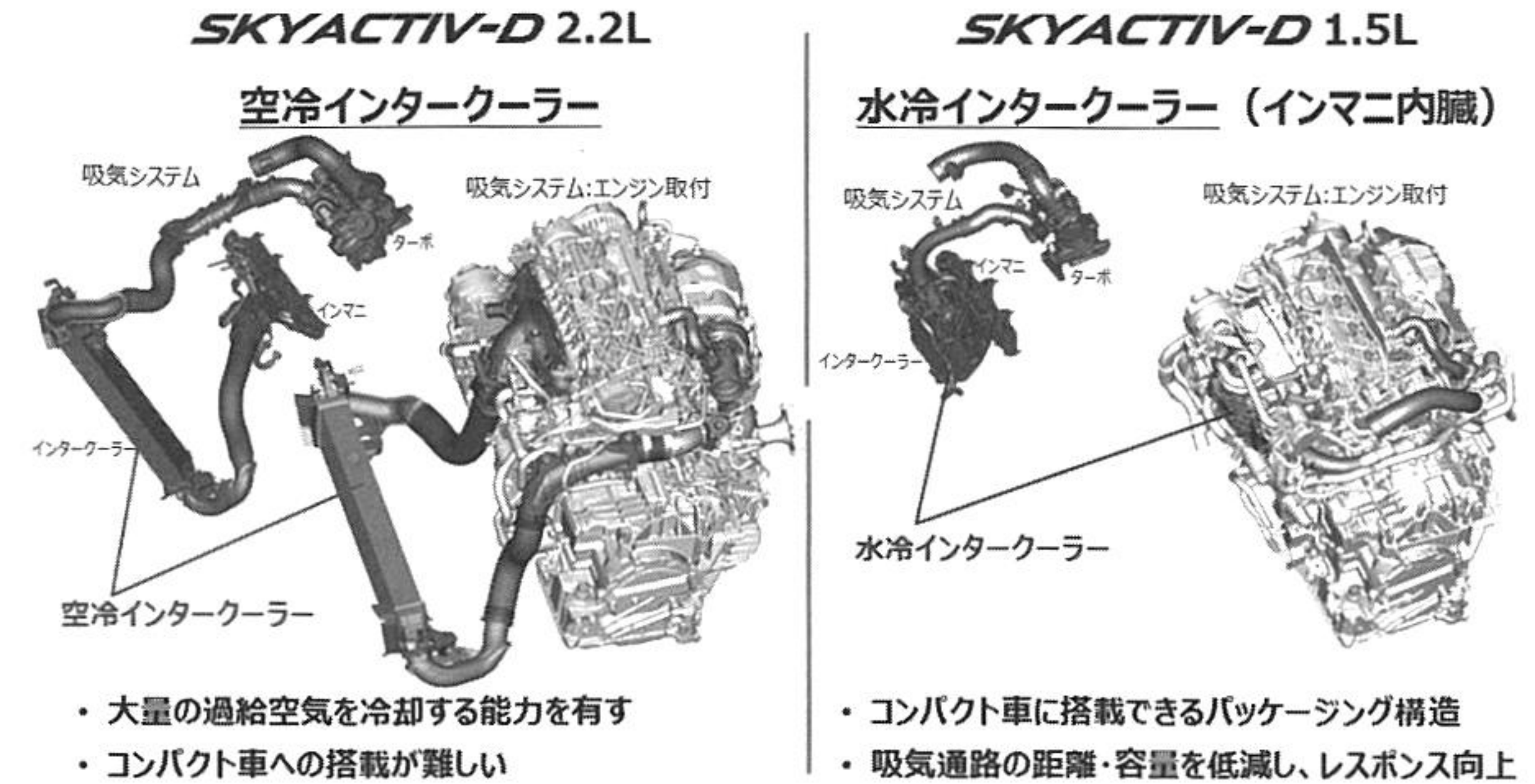
実際にSKYACTIV-D 1.5を搭載した新型デミオを試乗して伝わる感触は、低回転から粘り強く力を発揮するディーゼルエンジンの柔軟性を備える、というものである。6速マニュアルトランスミッション車で走行してみると、時速25kmという低速から、通常であれば2速へシフトダウンして加速する場面であろうところにおいて、3速ギアのままアクセルペダルを踏み込んでいてもノッキングすることなく、滑らかに加速していく。低回転域からきちんと燃焼が行われ、トルクを生み出している様子を感じることができた。ちなみに、250Nmの最大トルクは、毎分1500回転から発生させている。

次に、負荷を高めた強い加速を求めた際には、ターボチャージャーの威力が存分に発揮され、高回転域まで勢い込むように回転を上げていった。そして、ぐんと速度を増す様子は、排気量が1.5リッターであるとは思わせぬ力強さと感じた。

#### ■ SKYACTIV-D 1.5の技術的具体策

では、SKYACTIV-D 1.5の技術詳細を解説していこう。

まず、低圧縮比を特徴とするSKYACTIV-Dでありながら、D 1.5では圧縮比



#### 空冷と水冷インタークーラーの違い

SKYACTIV-D 1.5では、小排気量となった分の熱容量が少なくなるため、水冷式でも十分な吸気の冷却効果が得られるうえ、コストに厳しいコンパクトカー用ディーゼルエンジンとして部品点数の削減にもつながっている。

を高めた点について、開発担当の新畑耕一は、次のように説明する。

「エンジンを小型化すると、シリンダー壁面からの熱逃げが多くなるので、自己着火能力を確保するために圧縮比を少し高めて圧縮空気の温度を高めました」

こうして、SKYACTIVの理想的な燃焼を維持するわけである。これは、仕様を揃えるのではなく、性能や特性を揃えるため行われる燃焼特性としてのコモンアーキテクチャー化に通じる。

ターボチャージャーは、可変ジオメトリのシングルターボを採用している。

小排気量エンジンの低回転域は排出ガスの容量が少ないため、可変ノズルを絞り、排出ガスの流速を高めることで低回転域からでも十分な過給を実現する。

こうしてコンパクトカーに求められる出力性能を、一個のターボチャージャーでまかないながら、D 2.2と同じように幅広いエンジン回転で高い過給能力を確保した。

また、可変ノズルを、一般的な使用域よりさらに絞り込む制御を行うことにより、燃焼を終えたばかりの高温の排出ガスが行き場を失うかっこうでシリンダー内へ戻されることを利用し、内部EGR（排気再循環）を実現させている。これにより、素早く燃焼室温度を上げることができ、冷間時の失火を抑制及びエンジンの暖機を早め、冷間時のアイドル回転を安定させた。

この機能を、D 2.2では、切り替え式排気二度開きシステム（可変バルブリフト）で行っているが、D 1.5は機能統合をはかったことになる。コンパクトカーのエン



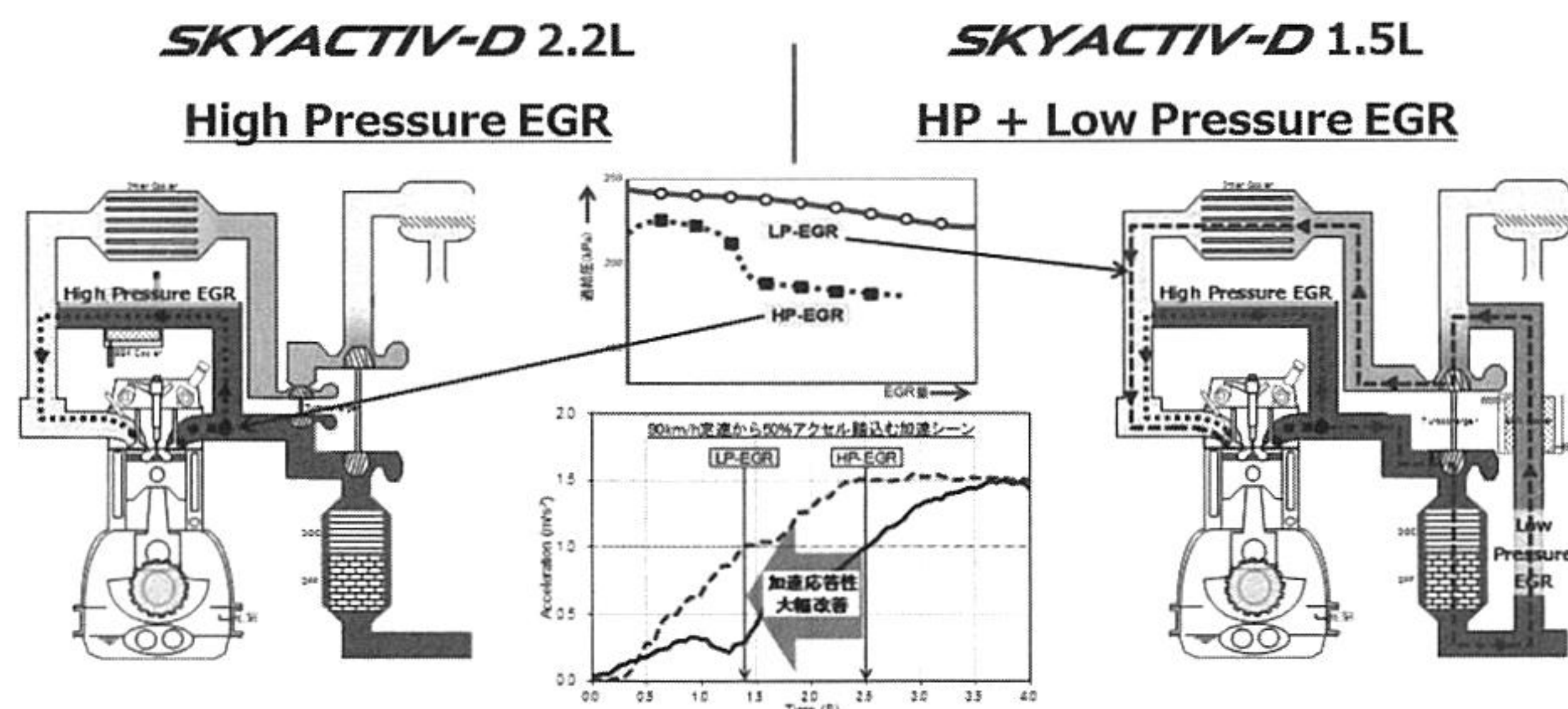
がD 2.2 と比べ少なくなるので、水冷で十分に吸気の冷却効果が得られるという読みもあるはずだ。また、コンパクトカーに搭載する1.5リッターエンジンとして、システム全体の小型化は重要課題だ。部品点数の削減は、価格対応で見のがすことはできない。

## ■ SKYACTIV-D 1.5 の進化

デミオから搭載がはじまったSKYACTIV-D 1.5は、わずか5か月後の2015年2月に発売となったCX-3で、早くも進化を見せた。「次世代のスタンダードを創造する」クロスオーバーとして企画されたCX-3にふさわしい、より洗練されたディーゼルエンジンを目指し、デミオ発売後も引き続き開発され続けていたのである。たとえば、ディーゼルエンジン特有のノック音を抑える、ナチュラル・サウンド・スムーザーという世界初の新しい技術が投入されている。

それだけではない。

ターボチャージャーの過給圧や燃料噴射量などを再調整することにより、最高出力は105PS (77kW) とデミオと変わらないものの、最大トルクについては270N・mに高められた。これは、デミオのマニュアルトランスミッション車の220N・mに対して50N・m、オートマチックトランスミッション車に対しては20N・mのトル



- 大量EGR下で過給能力が優れる2ステージターボとの組合せで大トルク・クリーン燃焼を実現
- EGR ON/OFFレスポンスが優れる
- HP-EGRと 過給能力を奪わないLP-EGRを併用、シングルターボで大量EGR供給を実現
- HP/LP最適制御で加速レスポンス向上

### ハイプレッシャーEGR (排気再循環)

D 2.2 では、排気バルブ後に EGR を吸気側へ分岐する経路を設けているが、D 1.5 では DPF 後の排出ガスをターボチャージャーのコンプレッサーへ導き、空気と排気を共に過給し、燃焼室へ供給する経路としている。

ク値の向上となる。

たとえば2WDのマニュアルシフト車同士の比較において、CX-3の車両重量はデミオに比べて60kg増えている。それにもかかわらず、CX-3の加速はデミオと比べてむしろスムーズになっている。これは上記の最大トルクの増大に加えて、加速時の空気とEGRおよび燃料噴射量変化の連続性をより高めたターボチャージャー制御技術の最適化による。

実際、CX-3を運転して実感するのは、どの運転領域でもターボラグを意識させない運転性能の向上であった。それでいて、フルスロットルにした際のエンジン回転は、高回転域まで実に滑らかで、勢いに溢れるものであった。

ガソリンエンジンでさえ、毎分5000回転以上はめったに使うことはなく、毎分5200回転からレッドゾーンのはじまるSKYACTIV-D 1.5は、CX-3ではいっそう全領域で躍動感ある出力特性を実現した。

## ■世界初、ナチュラル・サウンド・スムーザーの採用

CX-3のSKYACTIV-D 1.5は、新たな技術が設定された。それが、ナチュラル・サウンド・スムーザーである。

これは、ディーゼルエンジンで気掛かりな、ガラガラとか、カラカラといったディーゼルノック音と呼ばれる騒音を低減する機能である。ピストンとコネクティングロッドをつなぐピストンピンの穴に、ダイナミックダンパーを圧入する仕組みだ。

開発者たちは、まず騒音の原因を探ることからはじめた。

ピストン、コネクティングロッド、クランクシャフト、ベアリング、シリンダーブロックなどに振動センサーを取り付け、実際にエンジンを運転して騒音源を探した。その結果、ディーゼルエンジンにおける燃焼によるピストンへの強い加振力によって、ピストンとコネクティングロッドが一体となって伸縮し、その振動が騒音を増幅させていることを掴んだのである。

この振動を抑える対策として、ピストンとコネクティングロッドの伸縮と同じ周波数を持ち、逆位相に振動する錘を使うことで、振動を相殺できるのではないかと考えた。そして、錘をどこに取り付けるか、最適な場所を探すうち、ピストンピンには穴が開いており、そこが何も使われていない空間であることに気付いたのであった。

ナチュラル・サウンド・スムーザーは、金属製の長い鼓のような形をしている。その中央部を、ピストンピン内に圧入し、両脇の径の細い部分から先が、錘となっている。そして、ピストンに燃焼加振力が加わった際に、その錘が振動することで、ディーゼルノック音で不快に感じやすい3500Hz付近の周波数の騒音を相殺す



# 第11章

## SKYACTIV-G 過給エンジン

### ダウンサイジング SKY 登場

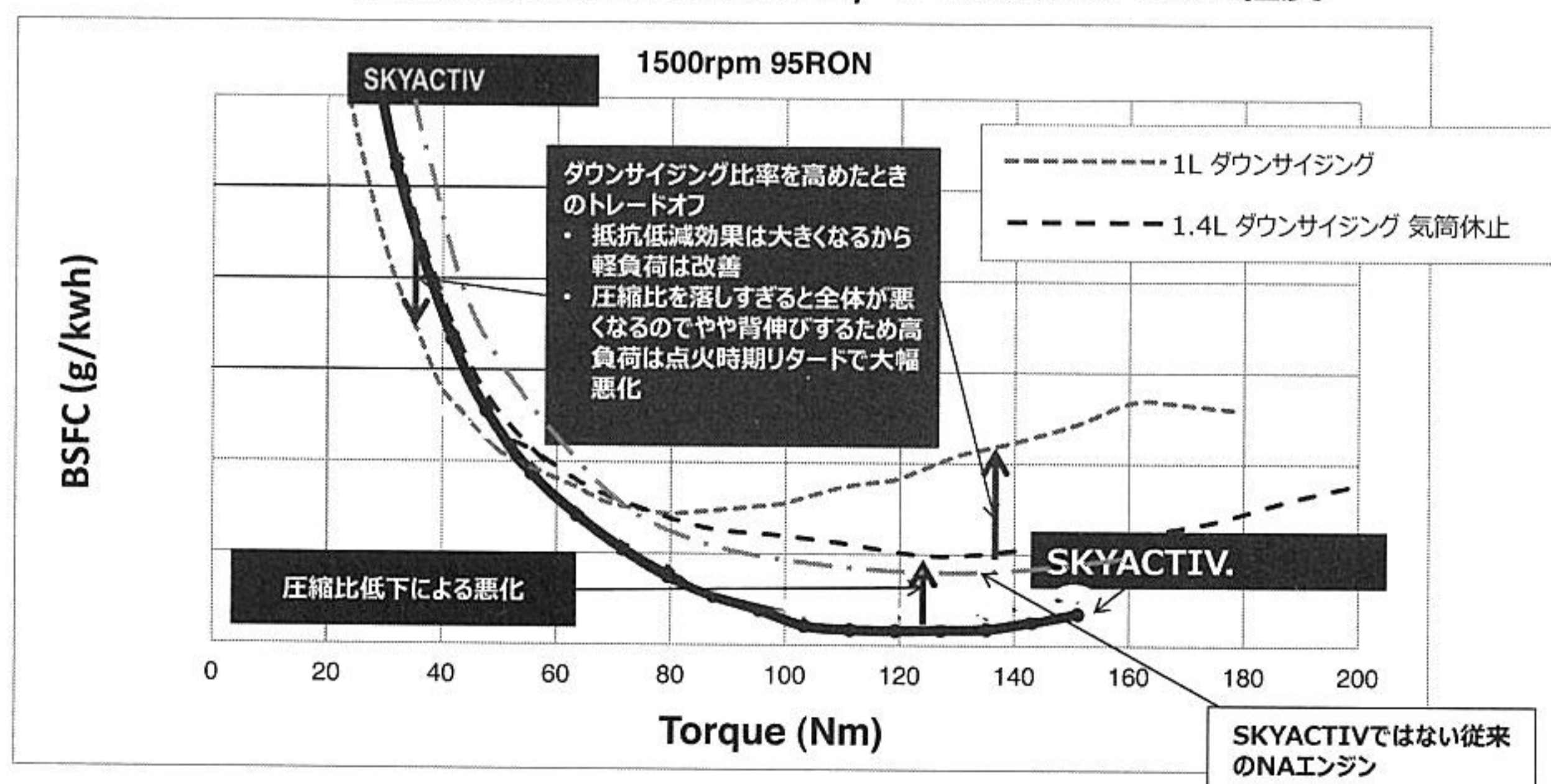
#### ■ガソリン過給エンジン化への「なぜ？」にSKYACTIVで答える

2015年12月、SKYACTIVエンジンの立役者である人見光夫から、新エンジンの技術解説が行われた。それはなんと、これまで自然吸気エンジンで構築してきたSKYACTIVガソリンエンジンに対し、過給ダウンサイジングガソリンエンジンを開発したという話なのである。

これまでと話が違うのではないかというのが、第一報に対する感想だ。これについて、

#### SKYACTIVと過給ダウンサイジングとの対比

圧縮比はSKYACTIVの13, 14に対し10-10.5程度



過給ダウンサイジングエンジンは、抵抗低減の効果は大きくなるため軽負荷では燃費改善効果があるが、一方で、排気量を小さくしすぎたり、圧縮比が小さくなったりすることにより高負荷ではかえって燃費が悪化する。

て、人見は次のように説明した。

「ヨーロッパで先行したような、大幅な排気量減によるダウンサイジングターボは、モード燃費においては効果が出ているように見えますが、中～高負荷が加わる実用運転域ではモード燃費のような成果を上げていません。一方で、SKYACTIVは従来と同様の排気量の自然吸気エンジンで高圧縮比とすることによって、低～高負荷の全域で効率を高められます。ですから、安易なダウンサイジングターボには否定的であり、他社に見るようなダウンサイジングターボに変わる高効率エンジンとして、SKYACTIV-Gを開発・実用化してきたのです」

続けて、マツダでは過去、さまざまな過給エンジンの開発をしてきた経緯を踏まえ、ここに改めて開発したSKYACTIVとしてのダウンサイジングガソリンターボエンジンの意義を、人見は語る。

「過給エンジンの課題は、ノッキングにあります。したがって、過給しながらノッキングを起こさせないために、圧縮比を下げざるを得なかったというのが、これまでの過給エンジンでした。

過給エンジンで、なぜ、ノッキングが起こるのか。

ノッキングは、温度と圧力が高くなると起きやすくなります。まず過給することで、大量の空気が圧縮されるため圧力が大きく上昇します。また過給されると、温度も上昇します。インタークーラーで冷やしても、大気温度並みには冷えません。だから温度も圧力も上がります。

さらに、排出ガスを利用するターボチャージャーの場合、エキゾーストマニホールド直後にターボチャージャーのタービンがあるため、燃焼室から高温の残留ガスを掃気するのが難しく、燃焼室内に掃気しきれない残留ガスがあることによって、外気からの新気が入っても燃焼室内の温度が高くなってしまいます。たとえば750℃に達するような残留ガスが、燃焼室内に8%ほど残ったとすると、外気が25℃とした場合に、圧縮後の温度は75℃ほど上昇してしまいます。これによって、ノッキングを起こしやすくなる。

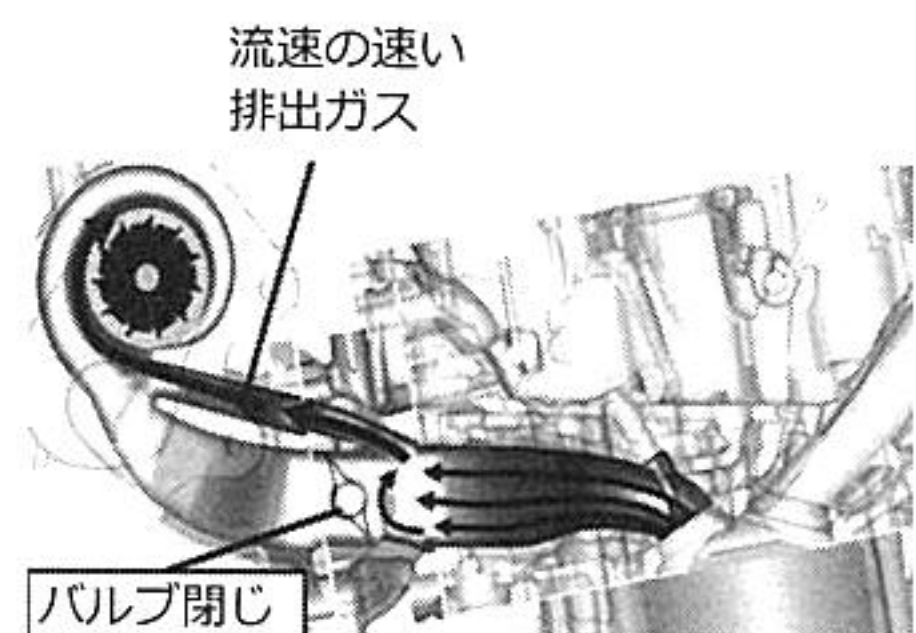
この残留ガスをもし半減させ、4%ほどに抑えることができれば、過給エンジンでも圧縮比を3くらい高められるのです。

過去、私はそれを実現するため、ターボチャージャーではなく機械式のスーパーチャージャーで過給し、エキゾーストマニホールド直後にタービンがないため排出ガスを滑らかに燃焼室から掃気し、なおかつ過給により圧縮された新気を燃焼室へ導くことで、燃焼室温度を下げる設計をしました。これで、圧縮比を大きく下げずに済む。



Flow control valve  
improves response from  
very low RPM

…basically like this:



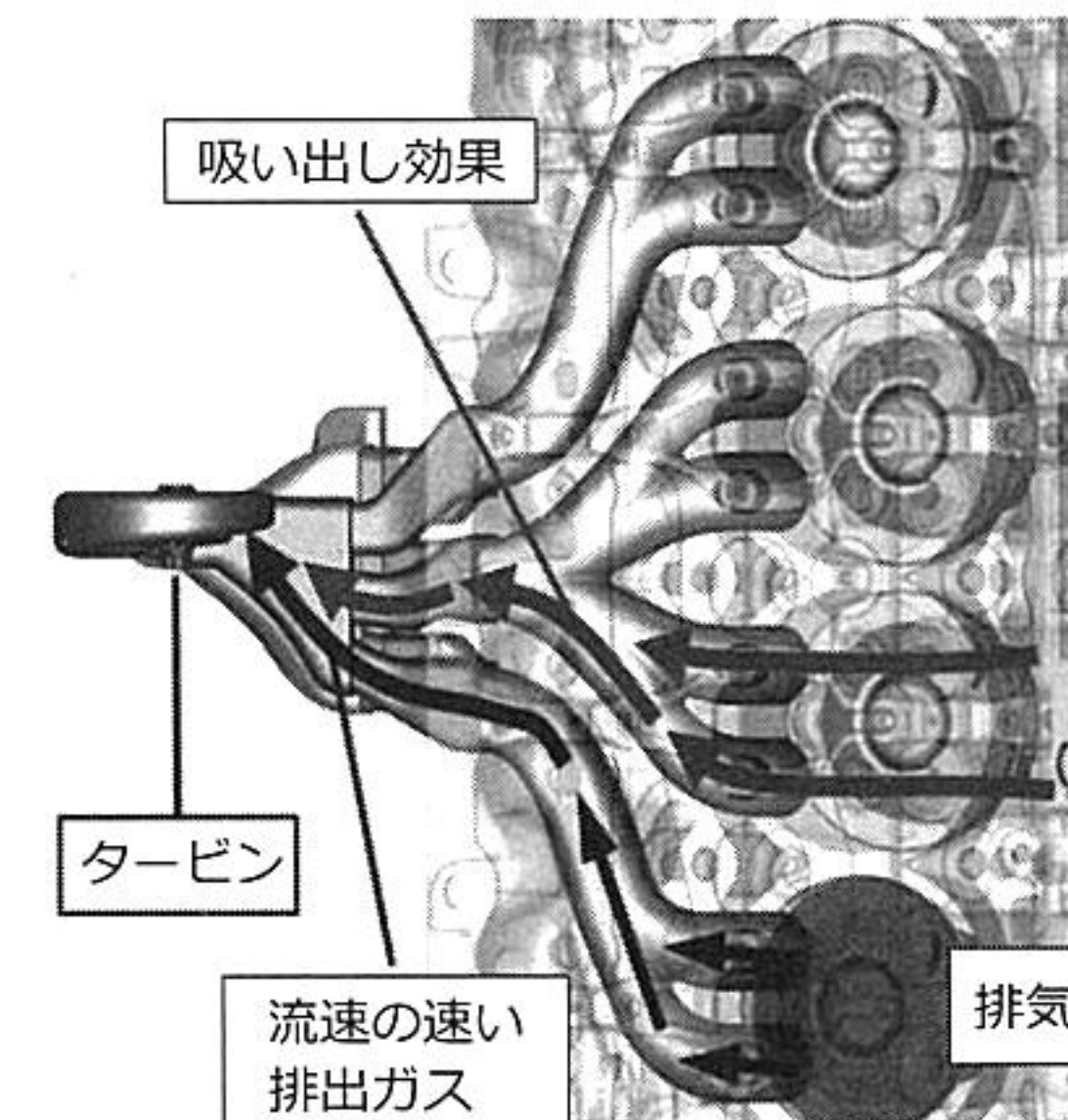
ターボチャージャーのタービンに至る排気マニホールド内に、経路の細いバイパスへ排出ガスを導くバルブを備える。これにより、低負荷ではバルブが閉じられることでバイパス側へ排出ガスが流れ、タービンを勢いよく回して過給圧を素早く高めることができる。その原理は、ホースで水を撒く際に、ホースの先を指でつまみ遠くへ水を飛ばそうとするのと同じ発想。

ール部に、可変弁を設けたり、スクロールの口を二つ設けたツインスクロールにしたりするなど、低負荷時のタービンの回転を高める技術が各社のターボエンジン車で導入されたことがあった。

発想の原点はそれらと同様だが、ダイナミック・プレッシャー・ターボシステムは、タービンへの排出ガス導入の制御を、ターボチャージャー本体ではなく排気マニホールド部で行うことにより、専用ターボチャージャーという特別な部品を用意する必要のない点が新しい。

排気マニホールドのバイパスを通過して勢いをつけられた排出ガスがターボチャージャーのタービンに至る途中においては、次に排気行程を迎える気筒の排気バルブが開き、いまタービンを回しているバイパスを通過中の速い流れの排出ガスの勢いに引っ張られるようにして、排出ガスの掃気が促される。それによって燃焼室の残留ガスの掃気効果を高める働きも同時に得られる。この次に吸気行程に入る気筒の残留ガスの掃気を促す効果が得られる点も新しい。

気体は、流速が速くなると負圧を生じ、そこへ周りの気体が引き寄せられる性質を利用したものである。たとえば、高速の空気を噴出することで、タンクの塗料を吸い出し噴出させるエアブラシは、この吸出し効果を使った塗装用具だ。そのほ



排出ガスの流速を高くできることにより、次の排気行程の気筒から排出されるガスの掃気効果も得られ、燃焼室内へ新気を導入しやすくする効果も得られる。

掃気効果による高温残留ガス排除

高速噴流による吸出し効果



次の排気行程の気筒で掃気効果が得られる原理は、エアブラシが流速の速い空気の流れに塗料が吸い出されるのを活用している効果と同様である。

か、気体の流速という点では、翼断面効果も、翼の上下で空気の流速が異なることで、速い流速側が負圧となり、揚力を生じたり、ダウンフォースを生じたりする。

さて、この項の冒頭で人見が述べているように、ダイナミック・プレッシャー・ターボシステムは、汎用のターボチャージャーを利用できるため、部品コストの必





2.5L 直噴ガソリンターボエンジン、SKYACTIV-G 2.5T を搭載し、2016 年春より北米から順次販売を開始した CX-9。



2016 年 7 月に大幅改良を受け、SKYACTIV-D 1.5 を搭載したモデルが登場したアクセラ。

## 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言えよう。

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々が認識している。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

## 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「@CARS」にてインプレッションや、YOMIURI ONLINEの深読みチャンネルを担当、読売新聞夕刊では、読者からの質問の回答者も務める。現在、日本カー・オブ・ザ・イヤー選考委員。日本EVクラブ副代表。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)、『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 小林謙一

発行所 三樹書房

URL <http://www.mikipress.com>

〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-30

TEL 03(3295)5398 FAX 03(3291)4418

印刷・製本 シナノ パブリッシング プレス

©Naotsugu Mihori/MIKI PRESS 三樹書房 Printed in Japan

※本書の全部、または一部あるいは写真などを無断で複写・複製(コピー)することは、法律で認められた場合を除き、著作者及び出版社の権利の侵害になります。個人使用以外の商業印刷、映像などに使用する場合はあらかじめ小社の版權管理部に許諾を求めて下さい。落丁・乱丁本は、お取り替え致します。