

特集：新型CX-9

3 新型ガソリンターボエンジン「SKYACTIV-G 2.5T」の開発 Newly Developed Gasoline Engine "SKYACTIV-G 2.5T"

室谷 満幸*¹ 末國 栄之介*² 藤山 智彰*³
Mitsuyuki Murotani Einosuke Suekuni Tomoaki Fujiyama
山形 直之*⁴ 岩井 浩平*⁵ 沖田 齡次*⁶
Naoyuki Yamagata Kouhei Iwai Reiji Okita

要 約

マツダの技術開発の長期ビジョン「サステイナブル”Zoom-Zoom”宣言」に基づき、走る歓びと環境性能を高次元で両立することを目指して新シリーズガソリンエンジン「SKYACTIV-G」を開発した。このエンジンを更に進化させ新たに2.5Lターボチャージャーエンジンを開発し、新型CX-9に搭載した。新型エンジンは、従来のダウンサイジングターボとは一線を画し、ターボエンジンの弱点であるターボラグを克服して、大排気量NA並の過渡レスポンスとトルクコントロール性を実現し、意のままの走りと実用領域の分厚い低中速トルクによる余裕の走りを提供するとともに、エンジンの低燃費率領域を拡大することでクラストップレベルの低燃費性能を達成している。本稿では、このエンジンのコンセプトと導入した新技術について紹介する。

Summary

Based on Mazda's long term technology development strategy (Sustainable Zoom-Zoom), a new series of SKYACTIV-G gasoline engines were developed to realize both fun-to-drive and environmental performance at high level. As a further evolved form of SKYACTIV-G, new 2.5L turbocharged engine was developed to be mounted on the All-New Mazda CX-9. In the process of developing the new engine, as a fresh departure from the current downsizing engine, turbo-lag, which is the weak point of a turbocharged engine, was overcome, and transient response and torque controllability equivalent to a large-displacement natural aspiration engine were realized. As a result, lively driving and more torqueing-full performance were brought into reality and class-top fuel economy was achieved with an expanded low specific fuel consumption area. This article introduces the concept and the technologies applied to this engine.

1. はじめに

SKYACTIV-Gは、優れた環境性能と走行性能を高次元でバランスさせ「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言」を具現化した商品をお客様に提供してきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

この優れた基本性能をベースに更なる進化を織り込み、新型CX-9のためのパワーソースとして新たに2.5Lターボチャージャーエンジンを開発した (Fig. 1)。この開発では、世界のベンチマークとなるユニットになるよう以下の3つの特筆した性能を目指した。①自然吸気4L並みの圧倒的なトルク、②ターボラグを感じさせない加速レスポンス、③SKYACTIV-Gの高圧縮比と低抵抗構造コンセプトを継承して卓越した燃費・環境性能の達成。本稿では、この新

型エンジンの開発コンセプトと、その実現のために導入した新技術を紹介する。



Fig. 1 SKYACTIV-G 2.5T

*1, 2 エンジン設計部

Engine Design Engineering Dept.

*4 パワートレイン技術開発部

Powertrain Technology Development Dept.

*3 エンジン開発部

Engine Performance Development Dept.

*5 パワートレイン企画部

Powertrain Planning Dept.

*6 パワートレイン開発本部

Powertrain Development Div.

2. エンジン開発コンセプト

新型CX-9に搭載するエンジンとして、Mazdaブランド戦略である「走る歓び」と「優れた環境安全性能」を実現させる理想のパワートレインを目標に掲げ、以下のコンセプトで開発した。

- ・ 競合V6同等以上の実用域トルクと加速レスポンス
- ・ カタログ燃費及び高負荷実用燃費の大幅改善
- ・ 軽量コンパクト
- ・ 現行プラットフォームへの搭載性確保

既存のダウンサイジングターボチャージャーエンジンでは、加速初期の過給遅れ（ターボラグ）がありマツダの目指す“意のままの走り”を阻害する要因になっていた。そこで、加速初期のレスポンスと加速後半から最大加速にスムーズにつながる必要トルクを得るために、新型CX-9の大きさ・重量を考慮して、最適な排気量“ライトサイジング”と最適な構造“ライトアーキテクチャ”を選択した。それが2.5Lの排気量とマツダ独自の新技术であるダイナミック・プレッシャー・ターボ（Dynamic Pressure Turbo）システムの組み合わせである。また、新型エンジンは、カタログ燃費値だけでなく実用領域の燃費を改善するため、中高負荷領域にCooled EGRを導入することで空燃比リッチゾーン縮小と高負荷時のノックリタードを抑制し、幅広い低燃費領域を実現した。このCooled EGRシステムは、高回転高負荷領域の燃焼温度を低下させる効果もあり燃焼室周辺の熱負荷を低減させることで、クロスドリル加工等の冷却対応を不要としボアピッチを拡大せずにターボ化に対応することができた。その結果、既存SKYACTIV-Gの基本構造を維持するとともに軽量コンパクトと既存プラットフォームへの搭載性を確保し、更に加工や組立設備の多くを流用して生産設備の変更を最小限に抑えることができた。

3. エンジン諸元とシステム

マツダでは、究極の内燃機関を目指し、Fig. 2に示した7つの制御因子を理想状態に近づける取り組みを進めている。

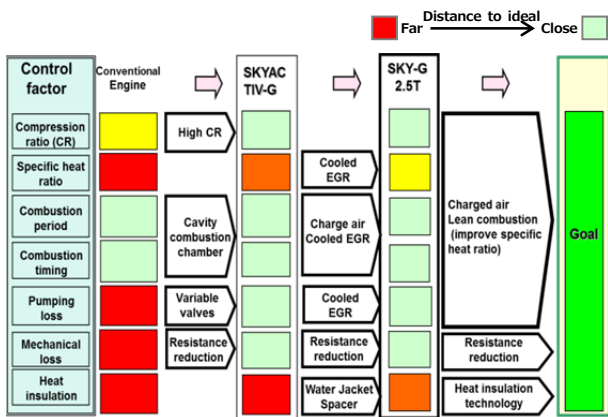


Fig. 2 Vision for Evolution of Internal Combustion Engine

新型2.5Lターボチャージャーエンジンでは、高過給とCooled EGRの採用でポンプ損失の更なる低減と比熱比の改善を進化させ理想に近づけている。

Table 1に主要諸元を示す。ベースとなるSKYACTIV-G 2.5L NAエンジンとボア、ストローク、ボアピッチなどの基本諸元およびインジェクターや燃料ポンプなどの燃料系部品を共通化してSKYACTIV-Gの高効率燃焼ポテンシャルを踏襲しながらダイナミック・プレッシャー・ターボシステムとCooled EGRシステムを新規導入した。また、圧縮比は、高過給時の圧縮上死点における圧縮圧力と混合気状態が2.5L NAの圧縮比13と同等になるよう圧縮比10.5に調整しており、89mmボアサイズかつレギュラー燃料使用の過給エンジンではベストインクラスの高圧縮比を達成した。

Table 1 Dimension and Specifications

Engine	SKYACTIV-G 2.5	NEW SKYACTIV-G 2.5T
Engine Type	In-Line4	←
Displacement	2488cm ³	←
BorexStroke	89mmx100mm	←
Compression ratio	13	10.5
Combustion chamber	Small Cavity Piston	Large Cavity Piston
Fuel Injection	DI (6Hole Injector)	←
Intake-Valve	Open(BTDC)	-32~42
Timing	Close(ABDC)	110~36
Exhaust-	Open(BBDC)	58~13
Valve Timing	Close(ATDC)	6~51
Int.S-VT	Electric	←
Ex.S-VT	Hydraulic	←
Valve train	HLA+Roller follower	←
Crank main/pin journal dia	φ50mmxφ50mm	←
Chain type: valve train	Roller	←
:Oil	Silent	←
Oil Pump	Electric control (2stage)	Electric control (Variable)
Water Jacket spacer	w/o	Plastic spacer
EGR System	w/o	HP-Cooled EGR
Turbocharger System	w/o	Dynamic pressure turbo System
Max.Power	138kW(188PS) ^{*1} /5700rpm 142kW(192PS) ^{*2} /5700rpm	169kW(230PS) ^{*1} /5000rpm 186kW(253PS) ^{*2} /5000rpm
Max Torque	250Nm ^{*2} /3250rpm 256Nm ^{*1} /3250rpm	420Nm/2000rpm

*1: Regular Gasoline
*2: Premium Gasoline

4. パフォーマンス

4.1 出力性能

新型CX-9の過渡レスポンスには、ターボラグを感じさせない加速感をねらいとして、Fig. 3に示した時間ごとの加速度目標を設定した。このねらいの加速度を可能にし、かつ実用領域で主に使用される低中速領域での余裕の走りを確保するためにFig. 4のトルクカーブを実現した。レギュラーガソリン使用で1250rpmという低回転にて350Nmを発揮し、最大トルクは420Nm/2000rpm、最高出力は169kW(230PS)/5000rpm（プレミアムガソリン使用時は186kW(253PS)）を達成した。その結果、発進時の力強さと実用域でのリニアで軽快な反応、そして高回転までの伸びやかな加速を実現している。

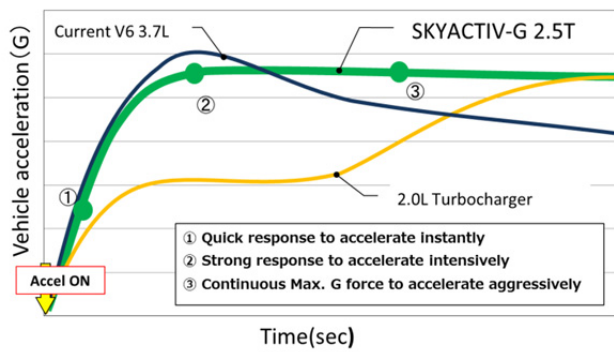


Fig. 3 Vehicle Transient Acceleration

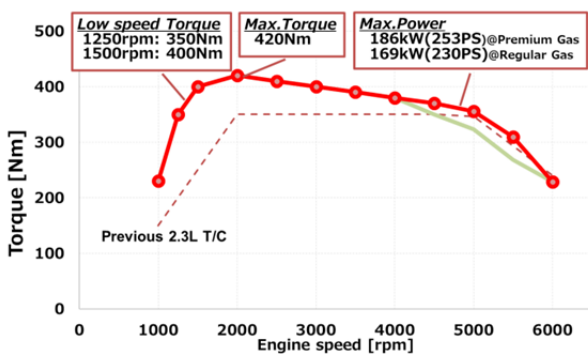


Fig. 4 Engine Performance

4.2 燃費性能

ユーザー使用頻度の少ない5000rpm以上の高出力領域を169kW（プレミアムガソリン使用時は186kW）に抑え、かつCooled EGR導入による熱負荷低減効果により2.5L SKYACTIV-Gの高効率低抵抗構造を踏襲した結果、NA同等のエンジン機械抵抗と重量を実現した。また、高負荷領域においてもSKYACTIV-Gの高効率燃焼とCooled EGRによるノック発生回避によりエンジンの低燃費領域を広くしている（Fig. 5）。

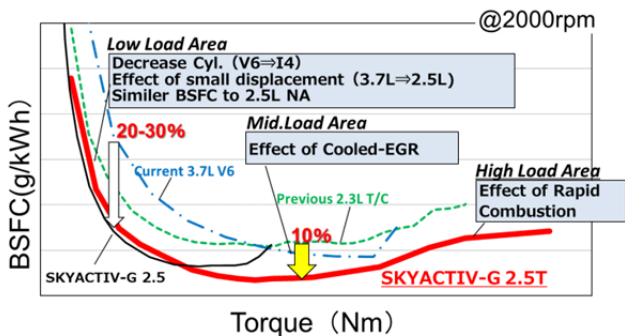


Fig. 5 Fuel Consumption Characteristics

その結果、低回転高負荷の加速領域から190km/hの高速度領域まで理論空燃比（ $\lambda=1$ ）でのエンジン運転が可能となり（Fig. 6），従来のダウンサイジングターボエンジンの弱点であったカタログ燃費と実用燃費の差を少なくすることができた。

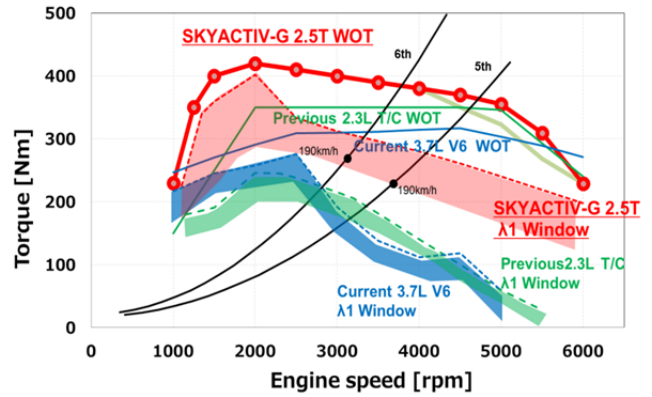


Fig. 6 $\lambda=1$ Area of Engine Operation

5. ブレークスルー技術

5.1 ダイナミック・プレッシャー・ターボ システム

ダウンサイジングエンジンとは一線を画す、大排気量NA並の加速レスポンスを実現するブレークスルー技術が、ダイナミック・プレッシャー・ターボシステムである。このシステムは、排気の脈動状態を運転条件に合わせて変化させる機能をもつ。低回転域では排気圧力脈動の振幅を強調させることでシリンダー掃気効果と高いタービン駆動力が同時に得られ、高回転域では脈動振幅を低減してタービンの高効率率を維持できる。排気干渉低減の効果をねらったツインスクロールターボやタービンに流れ込む排気ガス流速や方向を調整する可変ジオメトリターボとは異なり排気脈動の制御に着目したマツダ独自の新技术である（Fig.7）。

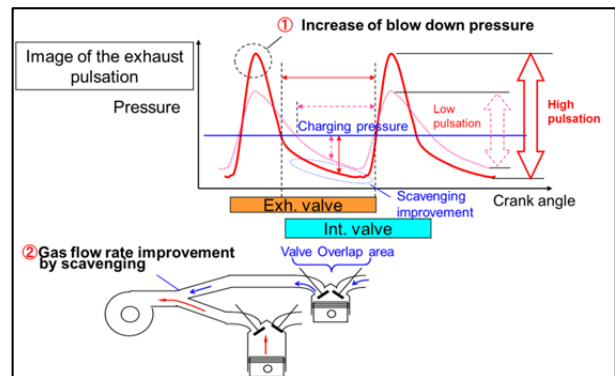


Fig. 7 Theory of Dynamic Pressure Turbo

ターボチャージャーは、排気ガスを回転力に変換する装置である。そのタービンの駆動エネルギーQは下記の式で表され、エンジンから排出される排気ガス圧力を拡散膨張させずに高圧力かつ高流速の状態ですタービン入口に導きPiを大きくすることで、高いタービン駆動力を得ることができる。

$$Q = Cp \cdot G \cdot Ti \cdot \eta_t \cdot \left(1 - \left(\frac{Po}{Pi}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)$$

Q:タービン駆動エネルギー Cp:定圧比熱

Ti:タービン入口温度 ηt:タービン効率

Pi :タービン入口圧力 Po :タービン出口圧力

κ :比熱比

この原理から導き出した、排気ポートを含む通路容積が最小かつ等容積で排気干渉を抑制した新開発の排気マニフォールドをターボチャージャー前に搭載している。

1620rpm以下では排気マニフォールドの可変バルブをコンピュータ信号で作動する負圧アクチュエータにより閉状態にして排気気筒の排気ガスが他の気筒へ拡散することを防止し、シリンダーヘッドからの高圧排気ガス脈動流を直接ターボチャージャーに導く。加えて、排気ガスの拡散防止効果は他気筒に低い排気圧状態を発生させ、掃気効果によってシリンダー内の残留ガスが低減し充填効率が向上する。これら2つの効果で15%のトルクアップを可能にしている (Fig. 8)。

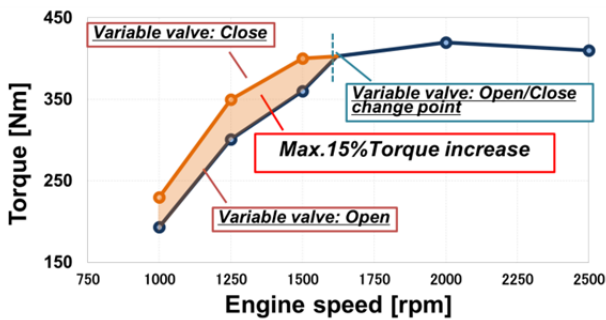


Fig. 8 Effect of Dynamic Pressure Turbo System

1620rpm以上では、排気マニフォールドの可変バルブを開にして以下の二つの効果を得ている。①排気脈動を他気筒通路に拡散させることで排気抵抗を低減させる効果、②必要な排気ガス通路径が確保され大きなA/R（通路面積Areaとタービン半径Radiusの比率、この値が大きいと高回転タイプのターボチャージャーになる）をもつターボチャージャーと等価な過給効果。これに電子制御のエアバイパスバルブとウェイストゲートを採用したことにより、過渡の過給圧コントロール性の向上および低回転から高回転の広い範囲でトルクとレスポンスの向上を実現した。

このダイナミック・プレッシャー・ターボシステムは従来のシングルスクロールターボやツインスクロールのター

ボに比べ、20~25%の低速トルク向上効果が得られている。

次に、ダイナミック・プレッシャー・ターボシステムの構成を説明する。シリンダーヘッドは排気干渉のない4-3排気ポートとし、ウォータージャケットを配したヘッド一体の水冷排気マニフォールド構造を採用している (Fig. 9)。これにFig. 10の上を示す排気通路ごとに絞りノズル形状にした低速ポート、Fig. 10の下に示す可変バルブをもつ高速ポートを備えた排気マニフォールド、低速ポートと高速ポートに仕切られたFig. 13の2段A/Rのツインフローターボチャージャーを組み合わせている。

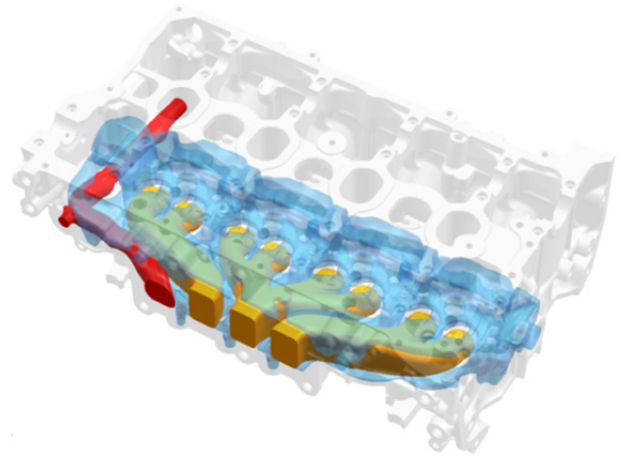


Fig. 9 Cylinder Head Exh. Port and Water Jacket

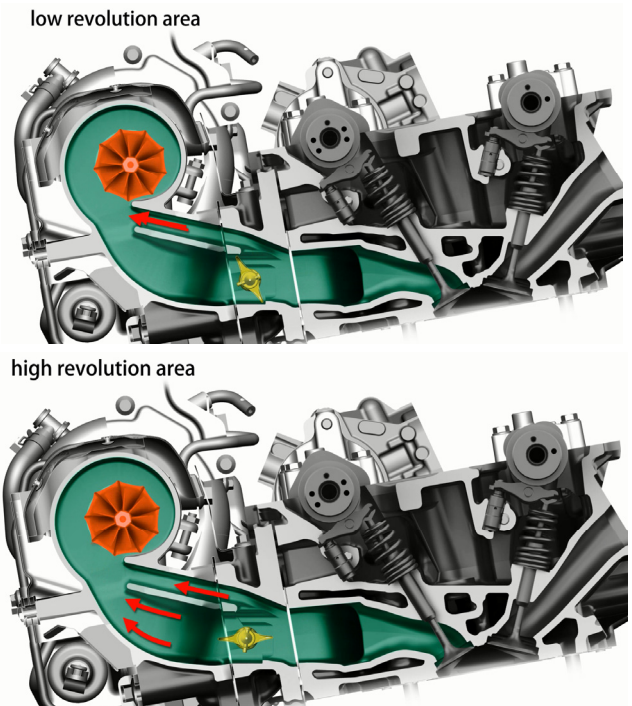


Fig. 10 Dynamic Pressure Turbo System

一方で、900℃を超える排気ガス雰囲気でのバルブ作動と耐久性を確保するために排気マニフォールドの可変バルブに高耐熱材料を採用した。また、排気マニフォールドとターボチャージャーは複雑な排気ガス通路形状となっているが、CAE熱応力解析を駆使した肉厚や形状の最適化により高温での熱応力を低減するとともに、高温強度の高いオーステナイト系鋳鋼を用いることで、信頼性を確保している。

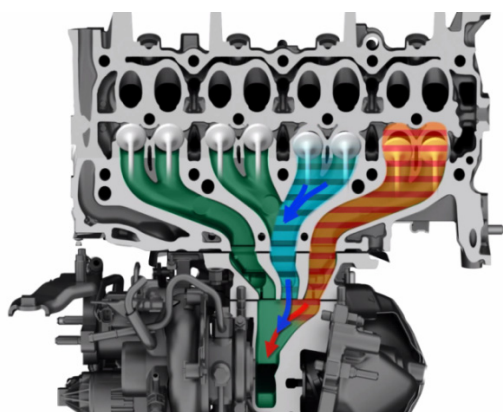


Fig. 11 Dynamic Pressure Turbo System

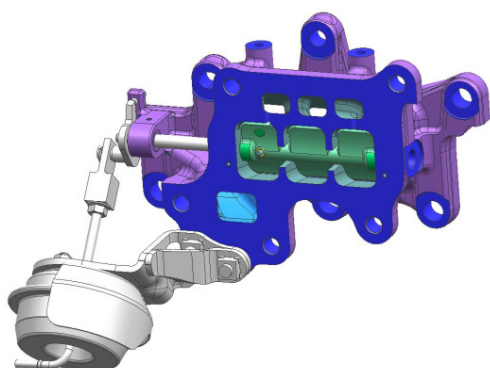


Fig. 12 Exhaust Manifold with Variable Valve

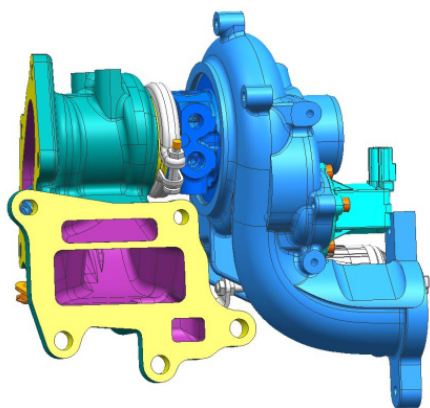


Fig. 13 Twin Flow Turbocharger

5.2 Cooled EGR システム

このエンジンのもう一つのブレークスルー技術がHigh-pressure Cooled EGRシステムである (Fig. 14)。

既存のダウンサイジングターボエンジンは、高負荷領域でのノッキング防止のための燃料増量と点火タイミングのリタードを採用せざるを得ず熱効率が悪化し、低負荷走行の多いカタログ燃費と高負荷走行の多い実用燃費との差が大きい。この課題を解決するため、新型エンジンでは、Fig. 15に示すように高回転全開領域を含む中高負荷領域にEGR Cooler後の低温不活性ガスを導入して燃焼温度を低減させノッキング発生を防止し、理論空燃比領域の拡大と点火タイミングのリタード量を抑制した。この結果、広い低燃費率領域と実用燃費の改善を可能にしている。

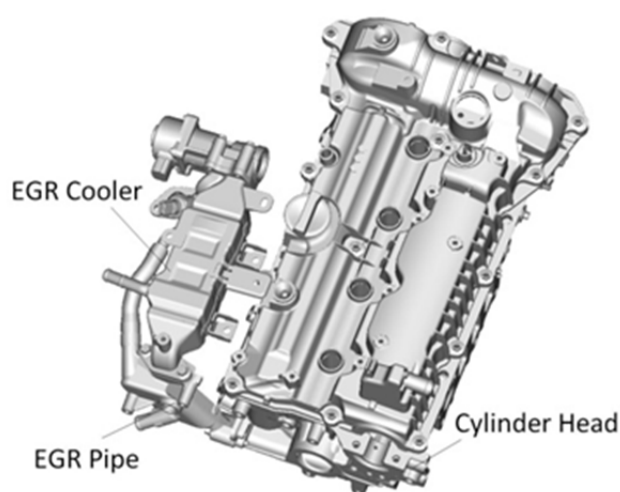


Fig. 14 Cooled EGR System

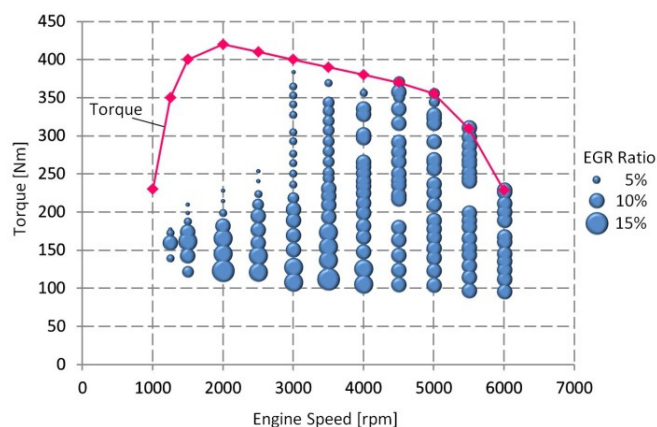


Fig. 15 EGR MAP

また、全開領域を含む高温の排気ガスを効率的に冷却するため、EGRガスは、排気マニフォールドの可変バルブ下流からシリンダーヘッド内部を通りウォータジャケットをもつアルミ製のEGRパイプを通過する壁面冷却とEGR Coolerの冷却で2段階に温度低下させる。この多段階冷却

システムを採用することで、コンパクトかつ低圧損なEGR経路としながら排気ガス温度を950℃から150℃以下まで冷却した。このCooled EGRシステムは、全開領域でのボア間温度を約10℃低下させる効果があり、クロスドリルなどの冷却構造を不要としてNAエンジンと同じボアピッチでターボ化を実現させることに貢献している。

6. エンジン本体, NVH, エミッション対応

新型2.5Lターボチャージャーエンジンは、過給エンジンでありながらも基本諸元や燃料システムはSKYACTIV-G 2.5を踏襲している (Table 1)。一方で、ターボ化による高出力対応や更なる燃費改善の進化も織り込んでいる。

6.1 ピストンと高タンブル吸気ポート

新型エンジンは、SKYACTIV-Gの高効率燃焼を踏襲するためピストンを相似形状のCavity Pistonとし、クラウン形状で圧縮比を10.5に調整している (Fig.16)。また、高過給時の燃焼室内流動を2.5L NAエンジンと同等にするためシリンダーヘッド吸気ポート上側のデッドボリューム低減で吸気流動の指向性を強化し、ポート下部にエッジ加工を施した2段加工の高タンブルポートによりタンブル比を12%強化した (Fig.17)。

SKYACTIV-G 2.5 NA $\epsilon=13$ SKYACTIV-G 2.5T $\epsilon=10.5$



Fig. 16 Large Cavity Piston

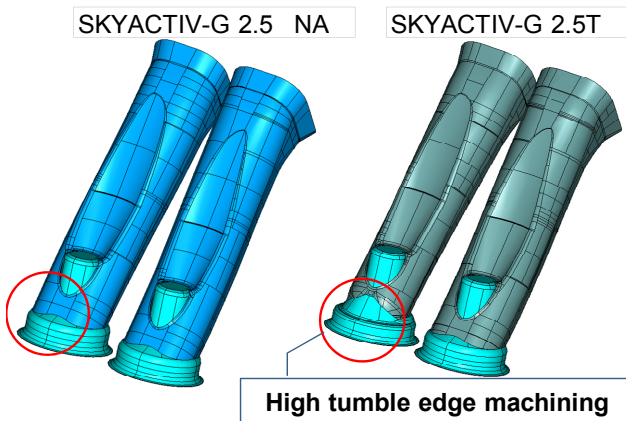


Fig. 17 High Tumble Port

6.2 連続可変容量オイルポンプ

新型エンジンでは、ターボ化によるターボチャージャーへのオイル供給やピストン冷却オイルジェット流量増などでオイルポンプの最大吐出量の増加が必要になった。一方で、低燃費を維持するため不必要な領域でのオイル供給量を減らし機械抵抗を低減することが求められた。この相反する要求を両立させるためベーンタイプの連続可変容量オイルポンプを開発した (Fig.18)。コンピュータがエンジン回転と負荷に応じて最適なオイル供給量を算出し、油圧センサーでモニターしながらソレノイドをリニア制御することでオイルポンプの吐出室容積を無段階に変化させることができる。

このオイルポンプでエンジンオイル供給量を最適化し、従来のトロコイドタイプ2段可変オイルポンプに比べて最大吐出量を従来比75%増加させながらモード領域のオイルポンプ抵抗は2.5L NA同等を実現している。

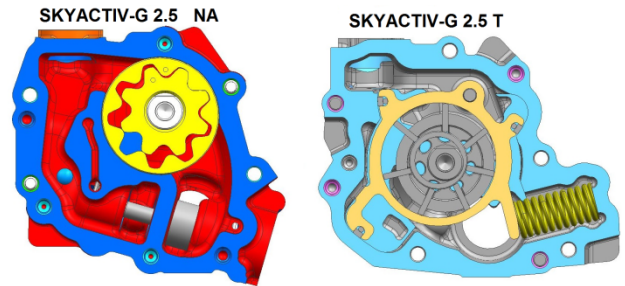


Fig. 18 Comparison of Oil Pump

6.3 ウォータジャケットスペーサー

新型エンジンは、ボア間冷却性を高めるためシリンダーブロックのウォータジャケットに樹脂性のスペーサーを挿入した (Fig.19)。併せてシリンダーライナー周辺の冷却水量と流速を制御して、シリンダーライナー上部に高流速の冷却水を集中させることでシリンダーライナー温度上昇を抑制し、熱負荷増加に対する信頼性を向上させた。

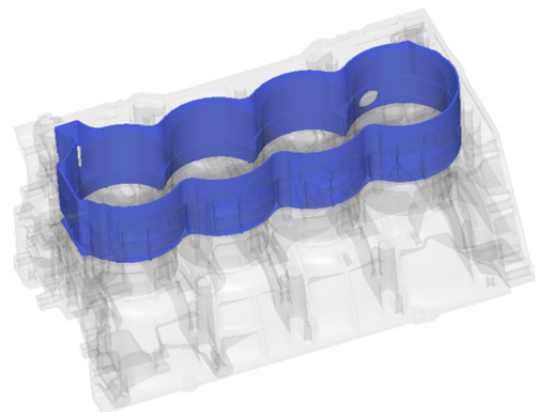


Fig. 19 Water Jacket Spacer

このウォータージャケットスペーサーは、ボアピッチを拡大することなくターボ化できた要因のひとつであり、軽量コンパクト化に大きく貢献している。

6.4 NVHとエミッション対応

ターボ化による燃焼圧力増加と回転系の慣性質量増加により悪化するNVHは、シリンダーブロックやクランクシャフト形状の最適化で抑制した。低回転域を高過給化することで生じるキャビティーンノイズ（ターボチャージャーのエアバイパスバルブからの吸気気流音）を抑制するためエアバイパスバルブ通路断面積と通路容積の比を最適化し、吸気システムの固有振動数と吸気脈動周波数をチューニングすることで周波数の近接を防止して静粛性を高めている。冷間始動時は、電動ウェイトゲートを開弁制御して排気ガスをバイパスさせることで、タービン回転数を6万回転から3万回転に低減させて回転1次音の発生を抑制した。

また、始動時のエンジン回転数を上昇させてキャタリストへ供給する排気ガスを増やすことで触媒の早期活性化を促し、燃焼室内の燃料分布均質化、点火タイミング制御の緻密化と合わせて排気ガスの浄化性能を高め、USA LEV IIとEU Stage6規制をクリアしている。

7. まとめ

SKYACTIV-Gの進化版として新型2.5Lターボチャージャーエンジンの新技術を紹介した。既存のダウンサイジングターボとは一線を画すマツダ独自のライトサイジングターボエンジンを実現させることを目標にして、One Mazdaで取り組み立ちはだかる課題をひとつひとつ解決しブレークスルーを実現したものである。個々の技術をうまく組み合わせることでいくつかの機能を持たせ進化した技術として新型CX-9に搭載し、世界のお客様に「走る歓び」と「優れた環境性能」を届けることができた。

今後も、マツダは内燃機関の理想を求めて技術の進化と深化を目指していくとともに、お客様の期待を上回るサブライズを提供し続けていく所存である。

参考文献

- (1) 富澤ほか：新型デミオのエンジン技術，マツダ技報，No.29，pp.8-13（2011）
- (2) 長谷川ほか：CX-5 SKYACTIV-Gのエンジン技術，マツダ技報，No.30，pp.3-8（2012）
- (3) 星野ほか：新型ロードスターのエンジン技術，マツダ技報，No.32，pp.124-127（2015）

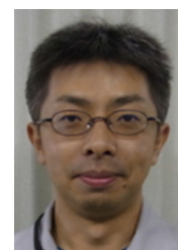
■ 著 者 ■



室谷 満幸



末國 栄之介



藤山 智彰



山形 直之



岩井 浩平



沖田 齡次