

特集：MAZDA CX-30

03

新世代Cセグメント向け「SKYACTIV-G 2.5T」の紹介

“Skyactiv-G 2.5T” for the New Generation C-segment Cars

西田 良太郎^{*1} 加藤 二郎^{*2} 藤山 智彰^{*3}
Ryotaro Nishida Jiro Kato Tomoaki Fujiyama
西尾 貴史^{*4} 平田 宏喜^{*5} 篠原 宏文^{*6}
Takafumi Nishio Hiroki Hirata Hirofumi Shinohara

要 約

マツダは「走る喜び」を通じて、地球・社会・人それぞれの課題解決を目指すことを「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030」の中で示した。SKYACTIV-G 2.5Tは、CX-9やCX-8、CX-5、MAZDA6といった比較的大型の車種に搭載され、高いトルク性能や加速レスポンス性能を特徴に、走る喜びを提供して市場で好評を得てきた。今回、新たに北米向けCX-30やMAZDA3などCセグメント車に本エンジンを搭載して、意のままの力強い走りを提供する。水冷インタークーラーを高い冷却効率で活用することで、エンジンの大幅なコンパクト化を実現した。本稿では「走る喜び」をより多くのお客様に提供する新世代Cセグメント向けガソリンターボエンジンSKYACTIV-G 2.5Tの技術紹介を行う。

Summary

Mazda announced its long-term vision for technology development “Sustainable Zoom-Zoom 2030” and launched a new initiative in helping solve a variety of issues facing the earth, society and people through driving pleasure. Skyactiv-G 2.5T has been installed on relatively large vehicle models, such as the CX-9, the CX-8, the CX-5 and the Mazda6, to provide customers with driving pleasure, and has earned a good reputation for its high torque and acceleration response performance. This engine is now going to be installed on C-segment cars such as the CX-30 and the Mazda3 for North American market to offer customers responsive and torqueful driving. A water-cooled intercooler is used at maximum efficiency, and the engine has been significantly reduced in size. This paper introduces technologies employed for the new generation C-segment gasoline turbocharged Skyactiv-G 2.5T, which offers driving pleasure to many customers.

Key words : Heat engine, Spark ignition engine, Design/Control, Intake and exhaust, Turbocharging

1. はじめに

2030年を見据えた技術開発の長期ビジョンとして、マツダは「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030」⁽¹⁾を発表し、この中で「走る喜び」を通じて、地球・社会・人それぞれの課題解決を目指すことを示した。これまでSKYACTIV-G 2.5Tは4.0L V8自然吸気ガソリンエンジン並みの力強いトルクやターボラグを感じさせない加速レスポンスなどを特徴に、市場で高い評価を得てきた⁽²⁾⁽³⁾。ただし従来エンジンではユニットサイズが大きく、CX-9やCX-8、CX-5、MAZDA6といった比較的大型の車種への搭

載に限定されていた。今回、新たにCX-30やMAZDA3などCセグメント車に本エンジンを搭載して、より多くのお客様に意のままの力強い走りを提供する。エンジンの大幅なコンパクト化を行うべく、吸気系を一新し、インテークマニホールド内蔵型の水冷インタークーラーを採用した。動力性能面では最大253PS、434N・mの高い動力性能を有しつつも、過給レスポンス性能（ターボラグ）の大幅改善を達成した。環境性能面でもEGR導入域の拡張、排気S-VTの作動角拡大、ダイナミック・プレッシャー・ターボのエゼクタバルブ開度セットの最適化等により、更なるCO₂低減に貢献した。本稿ではCX-30やMAZDA3

*1,2,5,6 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

*4 PT制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

*3 エンジン開発部
Engine Performance Development Dept.

など新世代Cセグメント車に搭載するガソリンターボエンジン「SKYACTIV-G 2.5T」の技術紹介を行う (Fig. 1)。



Fig. 1 SKYACTIV-G 2.5T

2. エンジン開発コンセプト

新世代Cセグメント車に高性能の過給エンジンを搭載して、意のままの走りを提供し、「お客様の心にゆとりを与え、生活の質を高める」ことを目指した。

これにはエンジン性能として、①レスポンスとコントロール性の両立、②力強いトルクの実現が重要となる。前者は、現行エンジンに対してコンプレッサ後の吸気系容積を低減しつつ、制御ロジックの最適化を行い、ターボラグを克服して実現を図る。後者は、新世代Cセグメントプラットフォームがもつ優れた衝突安全性能との両立を踏まえ、現行エンジンがもつハイパフォーマンスの維持をねらいとした。エンジンの大幅なコンパクト化が課題となるが、省スペース性に優れたマニホールド内蔵型の水冷インタークーラーを高い冷却効率で利用することで高性能とコンパクト化の両立を実現した。

一本エンジンにより提供する特性一

- ・洗練された「走りのリズムと余裕」
- ・余裕が生み出す「心のゆとり」
- ・意のままの踏み込みに応える「躍動感」

3. エンジン諸元とシステム

Table 1 に新 SKYACTIV-G 2.5T (New, 2020, US) と従来エンジン (Previous, 2016, US) の主要諸元を示す。また Fig. 2 に新エンジンのシステム図を示す。新エンジンでは、これまで利用してきた空冷式インタークーラーを用いず、省スペース性に優れたマニホールド内蔵型の水冷式インタークーラーを採用した。インタークーラーはコアバイパス流量の最小化やコア部へのガス当たり性最適化を織り込みつつ、冷却系としても水冷式インタークーラー専用のサブ回路を組むなど、冷却効率の最大化を狙った。これら対応によりCセグメント車に搭載可能なコンパクト化とねらいとする動力性能の両立を実現した。加えてコンプレッサ後の吸気系容積の大幅低減を達成し、過給レスポンスの大幅な改善を実現した。

Table 1 Dimension and Specification

Engine	SKYACTIV-G 2.5T (Previous: US, 2016)	SKYACTIV-G 2.5T (New: US, 2020)
Engine Type	In-line4	In-line4
Displacement	2488cm ³	←
Bore × Stroke	89.0mm × 100.0mm	←
Compression ratio	10.5	←
Turbocharger System	Dynamic pressure turbo system	←
Intercooler	Air-cooled	Water-cooled
ETB L/O	after Inter-cooler	before Inter-cooler
Intake Volume After Compressor	10.8L	6.6L
Max Power	169kW (230PS)* ¹ / 5000rpm 186kW (253PS)* ² / 5000rpm	←
Max Torque	420Nm / 2000rpm	420Nm* ¹ / 2000rpm 434Nm* ² / 2500rpm

*1: Regular gasoline *2: Premium gasoline

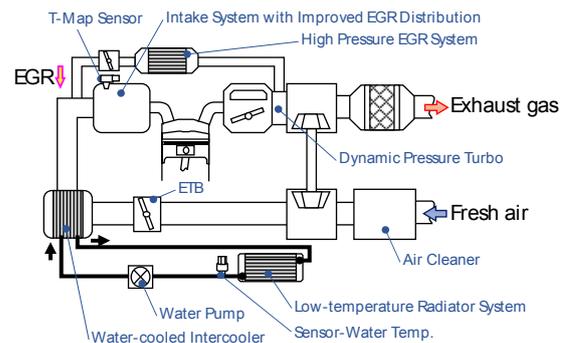


Fig. 2 System Diagram at Skyactiv-G 2.5T

またマツダが取り組む内燃機関の熱効率改善に向けた取り組みに沿って、Cooled EGR の利用領域拡張と排気 S-VT 作動角の拡大、ダイナミック・プレッシャー・ターボのエゼクタバルブ開度セットの最適化を行い、ポンピング損失と比熱比の更なる改善を達成した (Fig. 3)。

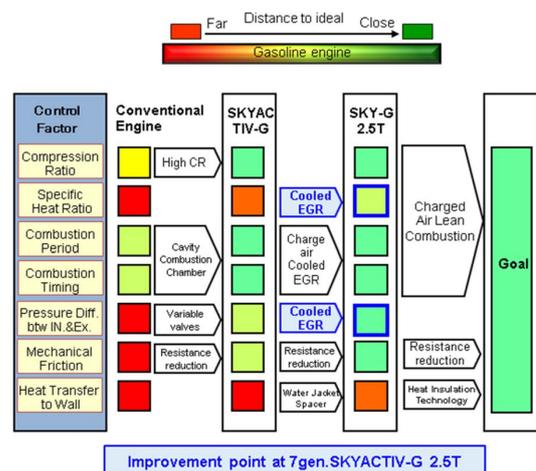


Fig. 3 Vision for Evolution of Internal Combustion Engine

4. パフォーマンス

4.1 出力性能

新 SKYACTIV-G 2.5T では従来の空冷インタークーラー同等の冷却性能を小型の水冷インタークーラーで実現し、吸気抵抗低減やメインサイレンサの排圧低減を行うことで、従来型と同じ 420Nm/2000rpm, 169kW (230PS)/5000rpm (プレミアムガソリン使用時は 434Nm/2500rpm, 186kW (253PS)/5000rpm) を達成した (Fig. 4)。またコンパクト化に伴うコンプレッサ後の吸気系容積を大幅に低減したことにより、従来仕様に対して 1500rpm 全開加速の過渡レスポンス性能において初期の応答性は継承しつつ、Boost 上昇時間を 30%短縮した。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、そして高速域までの伸びやかな加速により一層磨きをかけている (Fig. 5)。

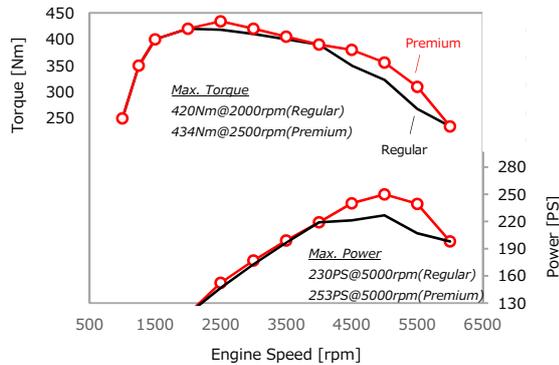


Fig. 4 Engine Performance

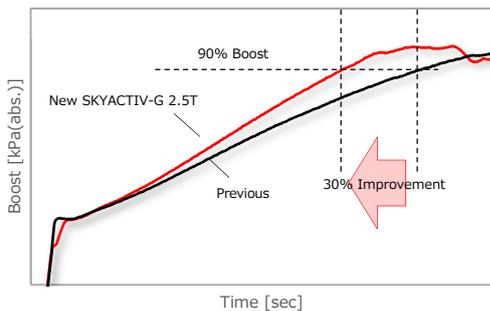


Fig. 5 Transient Response Performance

4.2 熱効率改善

新 SKYACTIV-G 2.5T では、従来仕様から熱効率を改善するため、①比熱比の上昇を目的に EGR 導入領域の拡大、②ポンピング損失を改善するため排気 S-VT の作動角拡大、エゼクタバルブ開度セット最適化を行った。結果、熱効率を改善することができ、ユニットとして実用領域の燃費を改善した (Fig. 6)。

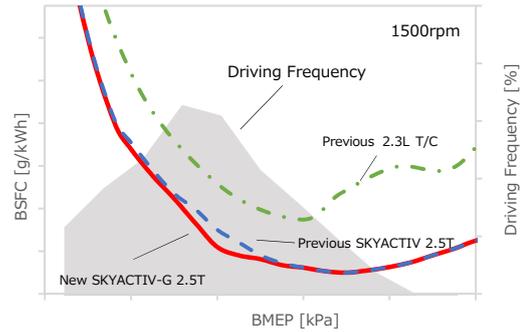


Fig. 6 Fuel Consumption Characteristic

5. エンジン性能とコンパクト化の両立

5.1 高効率マニホールド内蔵型水冷インタークーラー

過渡レスポンス性能と冷却性能の両立を図るために、水冷インタークーラーを採用した。また搭載性を考慮して、スタンドアロン型ではなく、マニホールド内蔵型を選定した (Fig. 7)。マニホールド内蔵型は搭載性に優れている一方で背反もある。コアの周囲に隙間ができるため、一部の高温ガスがコアを通らず下流への吹抜け (バイパス) が生じ、インタークーラーの冷却性能を十分に発揮できない。今回、マニホールド内蔵型の小型水冷インタークーラーに工夫を取り入れ、高効率で最大限活用しきることを検討した。具体的に、(1) バイパス量最小化、(2) コアへのガス当たり性最適化を行った。

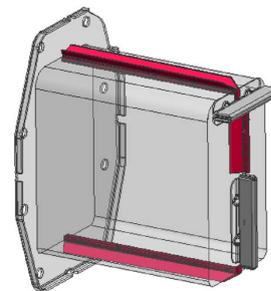


Fig. 7 Intercooler with Intake Manifold Integrated

(1) バイパス量最小化

マニホールド内蔵型はコア周囲にバイパス流路が形成され、一部高温ガスがコアを通らずに冷却されないままコア下流側へ通過し、冷却効率低下を引き起こす。今回、コアの周囲 3 か所にバイパスシールを設置して、冷却効率改善を行った。インタークーラー外周部の凹凸面ではなく、ケース側の平滑面でシールできるようインタークーラー側へのシール取り付けとした。また組付性を阻害しないようにシール形状は、先端部を調整したリップタイプとし、逆流にも対応できるよう Y 字型の断面を採用した。結果、本バイパスシール設置によりシールなし仕様に対して 9pt の冷却効率改善が確認できた (Fig. 8, 9)。

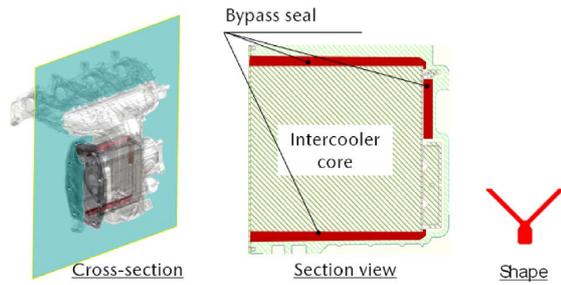


Fig. 8 Bypass Seal Layout and Shape

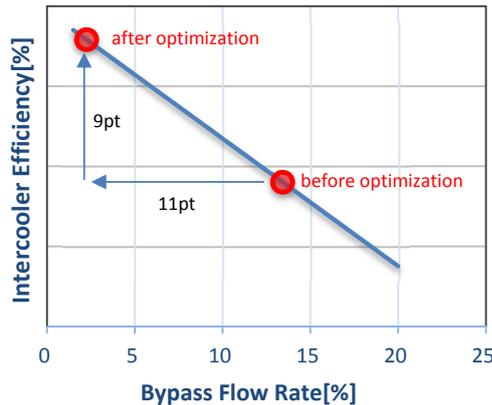


Fig. 9 Bypass Flow Rate vs Intercooler Efficiency

(2) インタークーラーコアへのガス当たり性最適化
 インタークーラーコアへのガス当たり性にムラ（偏流）が生ずると、冷却効率が低下する。今回、限られた空間の中で衝突要件を考慮すると、インタークーラー入口側タンク部が扁平形状となる。当初、偏流が強く出ているが、導風板を設置するなど構造面での工夫を行い、コアへのガス当たり性最適化を実現した。検討に際して、ガス当たり性による冷却効率改善と圧力損失の両面からの最適化を行なった結果、最適化前に対して 1.6pt の冷却効率改善を達成した (Fig. 10,11)。なおガス当たり指標として今回用いたコア入口部におけるガス流量の標準偏差を式(1)に示す。

$$\text{Flow Deviation} = \sqrt{\frac{\sum(G_i - \bar{G})^2}{n}} \quad (1)$$

$$G = \rho \times V \times S$$

- G_i : セル “ i ” におけるガス流量
- \bar{G} : 対象断面における平均ガス流量
- n : 対象断面におけるセル数
- V : ガス流速
- ρ : 密度
- S : 面積
- i : 対象断面のセル番号

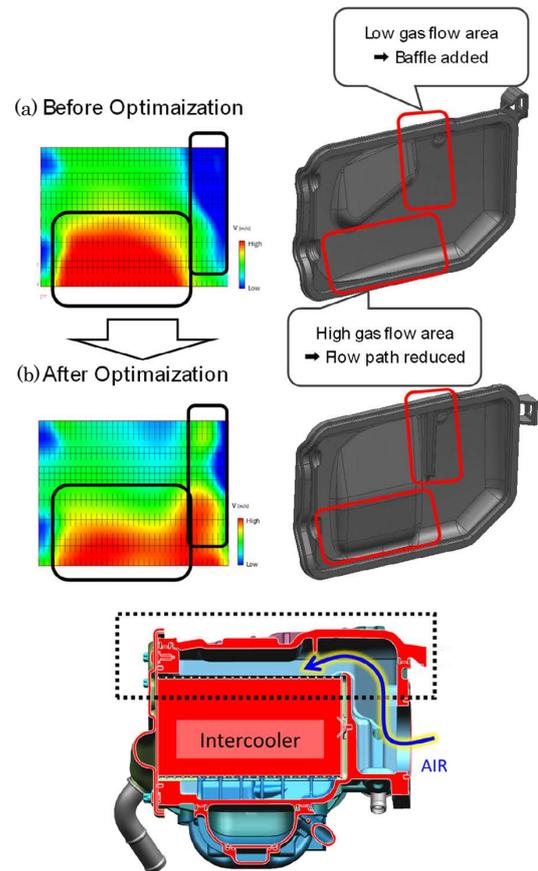


Fig. 10 Optimized Structure for Gas Exposure

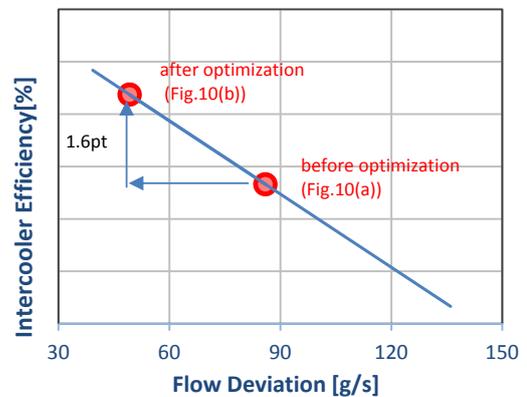


Fig. 11 Flow Deviation vs Intercooler Efficiency

5.2 水冷インタークーラー冷却システム

マニホールド内蔵型でねらいとする冷却性能を得られるように、新エンジン向けの水冷インタークーラー冷却システムを構築した (Fig. 12)。具体的には先行導入されている SKYACTIV-X などの C セグメント車をベースに、インタークーラーでの冷却効率を最大限高めるべく、本機能専用の冷却回路を設定した。

SKYACTIV-X に対し高車速で高出力をサポートするため、ラジエータ制御因子である冷却水流量／風量のうち電力消費量に対する放熱効果が大きい水流量を強化（電動ウォーターポンプ容量 15W → 70W）し、熱交換性能を最大限活用した (Fig. 13)。

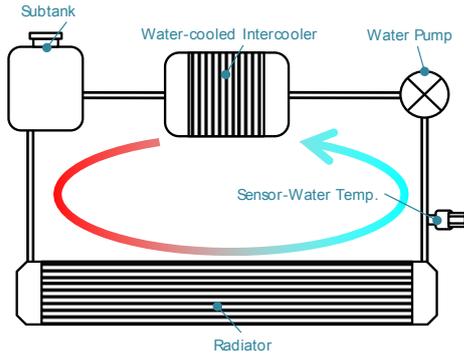


Fig. 12 Low-Temperature Water Cooling System

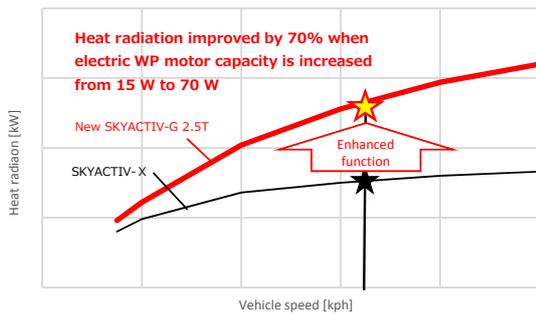


Fig. 13 Vehicle Speed vs Heat Radiation

一方、通水量を増やす手段として電動ウォーターポンプを大型化したため、MAX 通水時のポンプ仕事量がSKYACTIV-Xの5倍となったが走行シーンに応じた受放熱コントロールを実現することで日常使いなど軽負荷走行シーンではMAX 通水時の1/4レベルの仕事量に抑えることが出来ている (Fig. 14)。

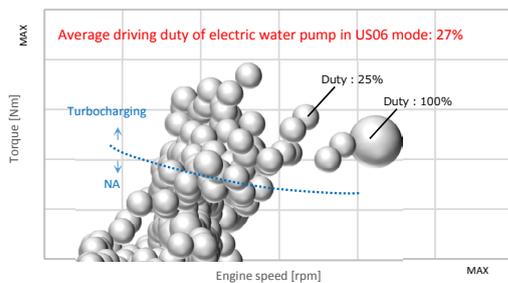


Fig. 14 Driving Duty of Electric Water Pump (US06)

水冷インタークーラー下流温度を最適にコントロールするため、インタークーラーを作動理論に基づいた物理モデルとして構築した。インタークーラーの仕事 (放熱) は、過給により温度上昇した空気を冷却することである。その放熱量は式 (2) で表せる。

$$Q = C_p \times W(T_{in} - T_{out}) \quad (2)$$

Q：インタークーラーの放熱量

C_p：ガスの比熱比

W：インタークーラー通過ガス量

T_{in}：インタークーラー上流 ガス温度

T_{out}：インタークーラー下流 ガス温度 (目標吸気温度)

インタークーラーの放熱量とインタークーラー通過ガス量から、Fig. 15 のインタークーラーの熱交換特性を用いて必要な冷却水流量を求め、その流量を電動ウォーターポンプで実現する。予実差についてはインタークーラー下流の温度センサーを用いて目標吸気温度に調整するよう冷却水流量をフィードバックする。

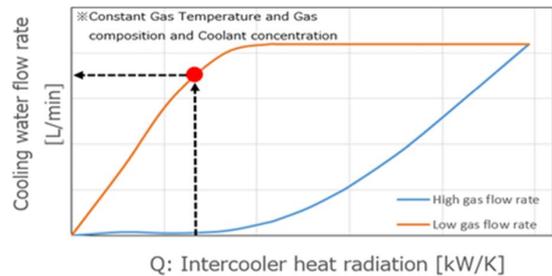


Fig. 15 Intercooler Characteristics

本制御構造によって、目標吸気温度を実現するために必要なインタークーラーに流れる冷却水流量を自動的に算出し、電動ウォーターポンプを用いて実現可能にした。その結果 Fig.16 のとおり、基礎的な物理モデルにて、計測誤差や車速、外気温度に左右されない吸気温度のコントロールを可能にした。

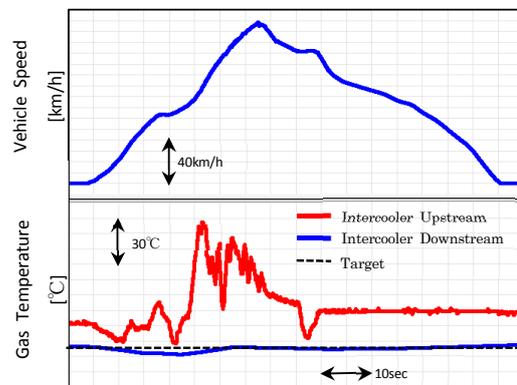


Fig. 16 Intake Air Temperature Independent of Vehicle Speed

5.3 外部 EGR 分配性 最適化

新エンジンではコンパクト化を目的にマニホールド内蔵型の水冷インタークーラーを採用したが、吸気系構造を従来仕様⁽²⁾から大きく見直す必要が生じ、スロットル位置をインタークーラー前へ移設した。吸気系の重要機能の1つにEGR分配機能があるが、従来エンジンではスロットリングによる乱れを活用することで機能確保を行ってきた。一方、新エンジンではEGR導入部はスロットルからは大きく離れ、同様の手法はとれないため、EGRの混合性が高まる様に吸気系構造を工夫することで従来同等以上のEGR分配性能達成を図った。

SKYACTIV-G 2.5Tでは新旧ともに、燃費改善を目的に中高負荷域において外部EGRを導入する。各気筒の吸入

EGR 率に差が生ずると、発生負荷や燃焼安定性の気筒間差につながり、トルク低下や燃費悪化を招く。このため全気筒の EGR 率が同等となる様に、吸気系を設計した。

今回、EGR 分配性の最適化にあたり、サージタンク直前の EGR 混合状態に着目した。本箇所では EGR と空気が十分に混ざっていれば、各気筒へ吸入される外部 EGR 率は一定となり、EGR 分配性能は高まる。3 次元 CFD にてサージタンク直前部での濃度分布を確認し、式(3)で示す γ 値を高めるように形状検討を進めた。この γ 値は EGR と空気の混合状態を表す指標であり、 γ 値が高いほど混合が進んだ状態を表す。(完全混合状態： $\gamma = 1.0$)

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(C_i - \bar{C})^2} \cdot A_i}{2 \cdot \bar{C} \cdot A_{tot}} \quad (3)$$

- C_i : セル “i” における既燃ガス濃度
- \bar{C} : 対象断面における平均既燃ガス濃度
- A_i : セル “i” の流れエリア
- A_{tot} : 対象断面の総流れエリア
- i : 対象断面のセル番号

ねらいとする混合状態を達成すべく、①吸気管内に EGR を均等に導入し、②空気と EGR がミキシングしやすい環境を整えた (Fig. 17)。前者に関して、マニホールドネック部に左右均等に外部 EGR を入れることで、EGR 導入時の拡散機能を強化した。後者に関して、EGR 導入部直前の吸気経路にバンド構造を設け、2 次流れによる混合促進を行った (Fig. 18)。これら対応により、サージタンク直前部での大幅な γ 値改善が机上で見られ (Fig. 19)、実機でも現行エンジン同等以上の EGR 分配性能が確認できた (Fig. 20)。

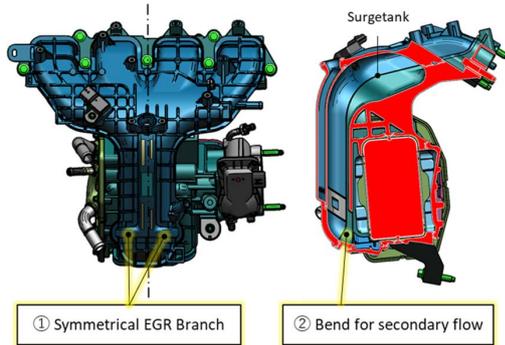


Fig. 17 Intake Manifold

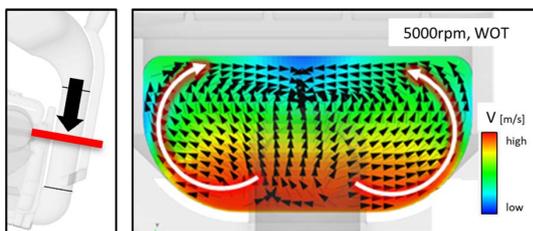


Fig. 18 Flow Field Involving Second Flow

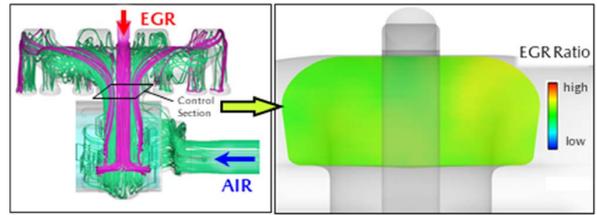


Fig. 19 EGR Flow and EGR Ratio at Intake Manifold Neck

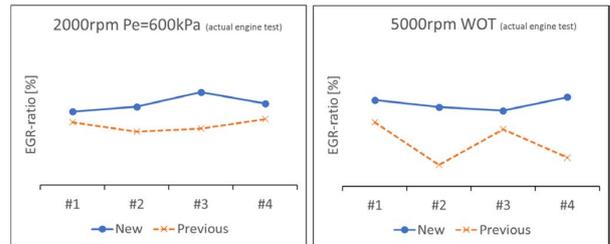


Fig. 20 EGR Ratio at Each Cylinder (Engine Test)

6. おわりに

CX-30 や MAZDA3 など新世代 C セグメント車に搭載可能とし、新たに改良を加えた 2.5L ガソリンターボエンジン「SKYACTIV-G 2.5T」の技術紹介を行った。このエンジンにより、実用領域での熱効率を改善し、高い動力性能により意のままの力強い走りを幅広いお客様に提供できるようになった。引き続き、人馬一体を支えるパワートレインを提供し続けることで、「走る喜び」を通じて、地球・社会・人の課題解決を目指し、お客様との絆を深めていきたい。

参考文献

- (1) 本橋ほか：サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030, [マツダ技報, No.35, pp.3-8 \(2018\)](#)
- (2) 室谷ほか：新型ガソリンターボエンジン SKYACTIV-G 2.5T の開発, [マツダ技報, No.33, pp.16-22 \(2016\)](#)
- (3) 西尾ほか：新型 2.5L ターボチャージャーエンジン制御技術の紹介, [マツダ技報, No.33, pp.23-27 \(2016\)](#)

■著者■



西田 良太郎



加藤 二郎



藤山 智彰



西尾 貴史



平田 宏喜



篠原 宏文