

特集：新型MAZDA3

8

新型2L直列4気筒「SKYACTIV-X」のエンジン技術 Newly Developed In-line Four-cylinder Engine “SKYACTIV-X”

西田 良太郎*¹ 中原 康志*² 西田 正美*³ 山谷 光隆*⁴
Ryotaro Nishida Yasushi Nakahara Masami Nishida Mitsutaka Yamaya
加藤 二郎*⁵ 高籙 達也*⁶ 岡澤 寿史*⁷ 福馬 真生*⁸
Jiro Kato Tatsuya Takahata Hisashi Okazawa Masaki Fukuma

要 約

マツダは2030年を見据えた技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言2030」を発表し、「走る歓び」によって、「地球」「社会」「人」それぞれの課題解決を目指す新しいチャレンジに取り組んでいる。この中でマツダは「Well-to-Wheel」での企業平均CO₂排出量を2050年までに2010年比90%削減することを視野に、2030年までに50%削減するという具体的目標を定めている。このビジョンの実現に向けて、ガソリンエンジンにおける圧縮着火を世界で初めて実用化した次世代エンジン「SKYACTIV-X」を開発した。このエンジンは「SKYACTIV-G」から始めた理想の内燃機関を追求する2nd Stepにあたり、更なる高圧縮比化やリーンバーンによる比熱比改善、それらを達成させるSPCCI（火花点火制御圧縮着火）を実現させた。結果、SKYACTIV-Gに対して 全域で10%以上のトルク改善を図りつつも、量産ガソリンエンジンとしては世界最高レベルの燃費率を達成した。本稿では主にエンジンのハード構成を紹介する。

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. Under the vision, Mazda aims to reduce corporate average “well-to-wheel” carbon dioxide emissions to 50 percent of 2010 levels by 2030, and achieve a 90-percent reduction by 2050. To fulfill the vision, Mazda has developed a next generation engine “SKYACTIV-X”, the world’s first commercial gasoline engine to employ compression ignition. This engine, which was developed in the second step of Mazda’s quest for the ideal internal combustion engine which started with SKYACTIV-G, has further increased compression ratio, improved specific heat ratio by means of lean burn, and realized spark controlled compression ignition (SPCCI). As a result, the SKYACTIV-X engine has increased the torque up to 10% overall and reduced fuel consumption over the current SKYACTIV-G, achieving the world’s high-level fuel economy rate as the gasoline engine. This article introduces the engine’s hardware aspects and others.

Key words : Heat Engine, New Combustion Model Engine, Engine Component or Element, Performance/
Fuel Economy/Efficiency

1. はじめに

マツダは2030年を見据えた技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言2030」⁽¹⁾を発表した。地球を守るために自動車の実用環境下での燃費改善とエミッションのクリーン化の効果を最大化することを方針とする。内燃機関搭載車は将来においても世界的に大多数を占めると予想され、CO₂削減効果の大きい内燃機関の理想を徹底的に追求しつつ、効率的な電動化技術と組み合

わせる。この考えの下、マツダは次世代ガソリンエンジン「SKYACTIV-X」(Fig. 1)を開発した。

SKYACTIV-Gに対して 全域で10%以上のトルク改善を図りつつも、量産ガソリンエンジンとして世界最高レベルの燃費率を達成した。本稿ではエンジンハード面での技術紹介を中心に説明を行う。

*1~8 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

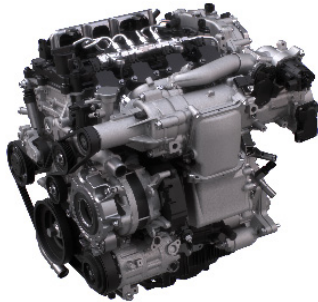


Fig. 1 SKYACTIV-X

2. エンジン開発コンセプト

マツダは究極の内燃機関を目指し、Fig. 2で示した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。新型2L直列4気筒ガソリンエンジン「SKYACTIV-X」ではこのロードマップに従い、異常燃焼回避機能を向上させSKYACTIV-G^(2,3)よりも更に圧縮比を高めつつ、従来よりも多量の空気やEGRを導入して燃焼させるリーンバーン化による比熱比改善を行った。リーンバーン化は比熱比向上による燃費改善効果だけでなく、ポンピング損失低減や冷却損失低減による燃費改善効果がある。また大幅なリーン条件下ではNO_x 排出量低減などのエミッション改善効果も期待できる。ただし通常の火炎伝ばによる燃焼（SI燃焼）では 安定的な運転は困難である。今回、スーパーリーン条件下での安定的な燃焼を実現するブレークスルー技術としてSPCCI燃焼技術を開発した。

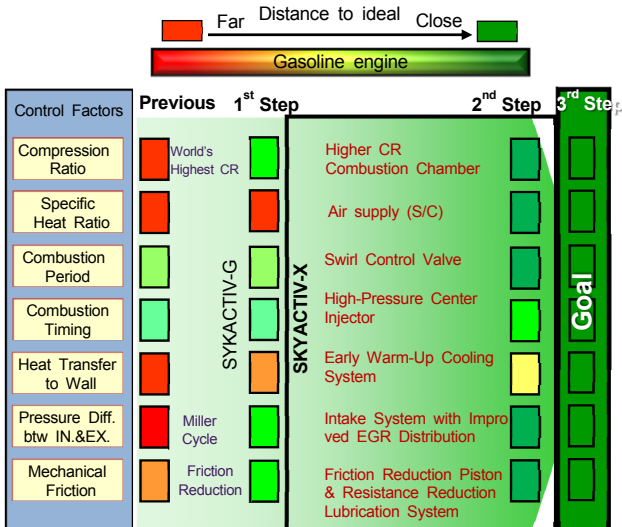


Fig. 2 Vision for Evolution of Internal Combustion Engine

3. エンジン諸元とシステム

SKYACTIV-XではSPCCI燃焼実現のために、筒内温度や混合気状態、流動形成などねらいとする筒内状態量の実現が必要となり、燃焼室形状や高圧噴射系、エアサプライなどのシステム選定を行った。Fig. 3にシステム図、Table 1

に主要諸元を示す。

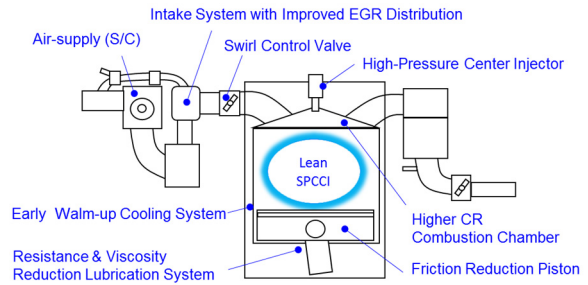


Fig. 3 System Diagram for Lean SPCCI at SKYACTIV-X

Table 1 Dimension and Specification

Engine	SKYACTIV-G 2.0 Previous	SKYACTIV-X
Engine Type	In-line4	←
Displacement	1997cm ³	←
Bore x Stroke	83.5 mm x 91.2 mm	←
Compression ratio	14.0	16.3
Fuel Injection	DI (20 MPa)	DI (70 MPa)
Air-supply system	—	Roots-Type Supercharger
Max Power	121kw / 6000rpm	132kw / 6000rpm
Max Torque	210Nm / 4000rpm	224Nm / 3000rpm

4. パフォーマンス

4.1 出力性能

SKYACTIV-Xでは、SPCCIとエアサプライの利用により、高応答でのトルク改善を達成し、走る喜びの提供に努めている。特に発生トルクはSKYACTIV-Gに対して 全域で10%以上の改善を実現した (Fig. 4)。

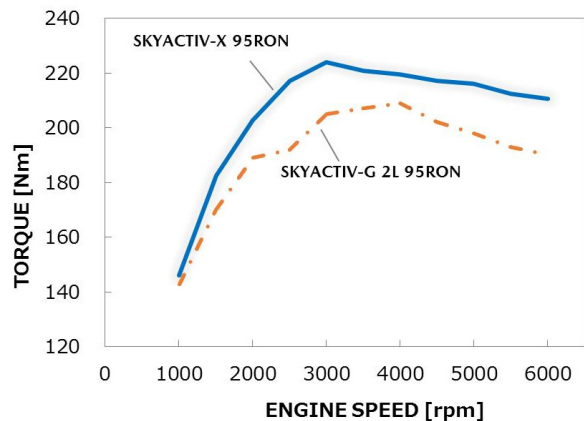


Fig. 4 Engine Performance

4.2 燃費性能

SKYACTIV-Xでは、前回取り組んだ高圧縮比に磨きをかけつつ、リーン燃焼による比熱比改善を行い、SKYACTIV-G比大幅な燃費改善を実現した (Fig. 5)。結果、量産ガソリンエンジンとしては世界最高レベルの燃費率を達成した。

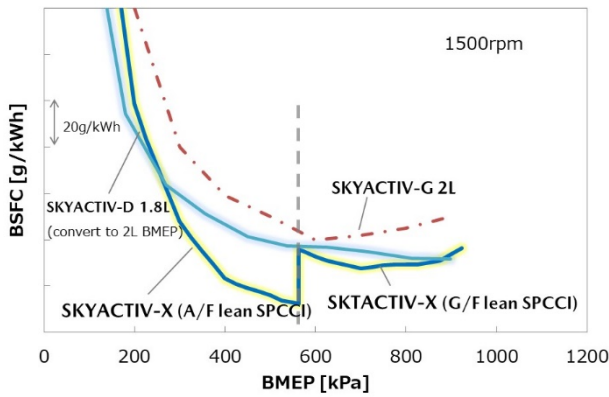


Fig. 5 Fuel Consumption Characteristic

5. 燃焼実現のためのKey技術

5.1 超高圧縮比 燃焼室形状

SPCCI燃焼のコンセプトは、SI燃焼での火種を急峻に伝ばさせてCI燃焼へ導くものである。そこで、筒内の燃料分布の高分散化が必要となるため、燃焼室中央へインジェクターを配置した。SPCCI燃焼領域は、スワール流をコントロールして火種を急峻に伝ばさせるため、吸気ポートへSCV (Swirl Control Valve) を採用している。

また、点火プラグを通過するスワール流起因の流動を活用する目的で点火プラグを吸気ポート間へ配置した (Fig. 6)。

SI燃焼領域は SKYACTIV-Gと同様に高タンブル吸気ポートを採用して点火プラグへの流動を強化している。

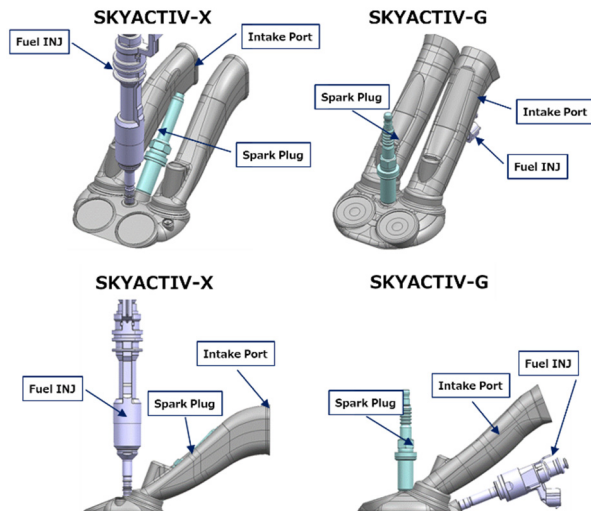


Fig. 6 Layout over Combustion Chamber

SKYACTIV-Xは、超高圧縮比を採用している。超高圧縮比を高次元で管理するため現行SKYACTIV-Gでは燃焼室容積をねらいの値に近づける調整加工を採用しているが

更なる燃焼室容積公差の縮小が必要となる。

そこで、SKYACTIV-Xでは燃焼室形状を全て加工で形成させる「Full加工」Typeを採用した (Fig. 7)。Full加工燃焼室に関しては、加工による形状制約があるが、SKYACTIV-Gで得られた知見を活用して3種類の刃具で加工できる形状とし、吸入時の抵抗や排気時の掃気性は従来性能と同等とした。

SPCCI燃焼及びSI燃焼を理想の熱発生パターンへコントロールする目的で、初期燃焼速度と燃焼期間に感度の高いスワール及びタンブルと言った流動因子による高い乱流速度を生ずるピストンキャビティ形状を新たに設計した (Fig. 8, 9)。スワール流による燃料を点火プラグへ導き、かつ圧縮行程中のタンブル流を維持させるために浅皿で大径キャビティ形状とした (Fig. 10)。また、超高圧縮比、広いバルブオーバーラップを確保した上で理想の燃焼を実現させるため、燃焼解析を多数実施して最適なキャビティ形状を具現化した。

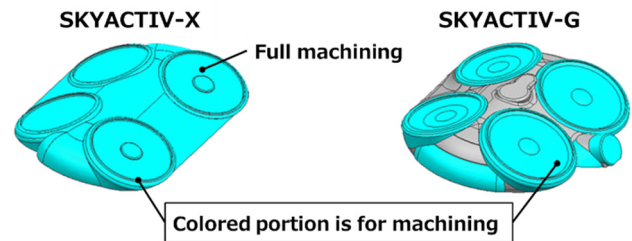


Fig. 7 Combustion Chamber

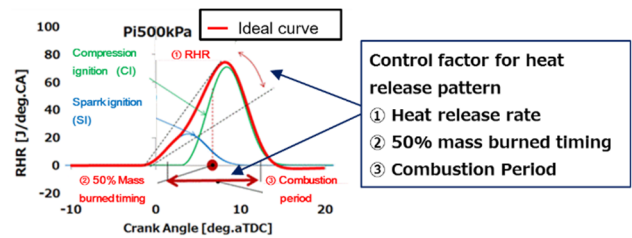


Fig. 8 Control Factor for Heat Generation Parameter

< 2000 rpm, P/L, SCV closed >

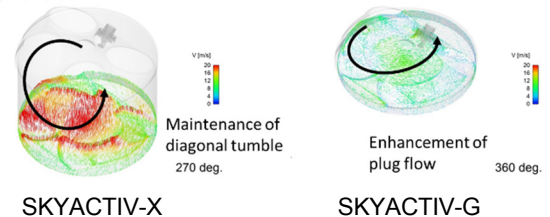


Fig. 9 Maintenance of Tumble and Enhancement of Plug Flow with Piston Cavity

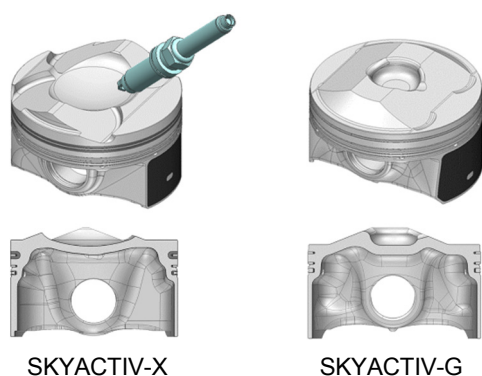


Fig. 10 Piston Cavity Design

5.2 往復回転系

SPCCI燃焼では圧縮自着火によって従来燃焼に比べて急激な筒内圧力上昇が発生するため、往復回転系部品はより高いレベルの強度確保と振動騒音対策が必要となる。これに対してSKYACTIV-Xでは、以下の技術を織り込むことで対応し、重量増加を最小限にとどめ、更に機械抵抗低減を実現することができた (Fig. 11)。

1. 強度確保：コンロッド小端のテーパ形状によりピンボス間距離を短縮して発生モーメントを低減しつつ、燃焼室裏を大きく除肉することで軽量化に結び付けた。
2. 振動騒音対策：SKYACTIV-Dで採用したNatural Sound Smoother を水平展開した。
3. 機械抵抗低減：筒内圧力増加による境界潤滑割合増加に抑制するため、非対称バレル形状のオイルリング、TopリングへのDLC追加、各部摺動面の粗さ低減、高さ方向で楕円量を最適変化させたスカートプロファイルを採用して機械抵抗低減を実現した。

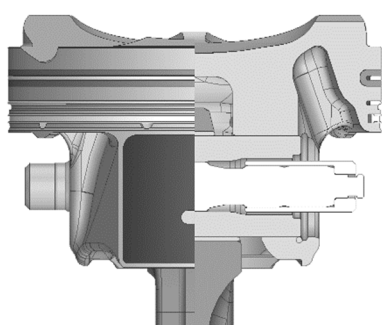


Fig. 11 SKYACTIV-X Piston

5.3 燃料噴射系

(1) 燃料噴射系の開発のねらい

リーン混合気の均質性の向上や、圧縮工程噴射による低温酸化反応の抑制、成層化による着火性とリーン化の両立のため、以下をねらいとした超高燃圧、センター噴射、流量調整弁内蔵インジェクターを特徴とする燃料噴射系を開発した。

1. 燃料の気化時間短縮
2. 燃料の高分散性
3. 高精度微小量、多段噴射

(2) 超高燃圧噴射系

従来の直噴ガソリンエンジン燃料系の燃圧は30MPa程度であるが、倍以上の70MPaの燃圧を実現した。インジェクターの高燃圧化でまず課題になるのは開弁力の増大手段である。インジェクター開弁時には、燃圧が芯弁を閉じる方向にかかるため開弁するにはこれに打ち勝つ開弁力が必要となるので、燃圧の70MPa化に伴い開弁力を増加しなければならない。開弁力は通常はコイルを大型化すれば電磁力は強くなるが、電磁力の増加、減少の応答時間が長くなり極短時間での開閉が困難になるため、上記の多段噴射の要求を満たせなくなる。それを解決するために、世界初の2段ソレノイドのインジェクターを開発し、開弁力と作動速度の両立を図った (Fig. 12)。

また高燃圧化のために、全ての燃料系部品を新規開発している。燃料ポンプは高燃圧化に伴いポンプ駆動荷重が増大する。これに対応するために、ポンプ駆動カムはクランク等速化によりカムを2山とし、ポンプタペットは従来のニードル軸受から滑り軸受に変更することで、それぞれ面圧を低減した (Fig. 13)。

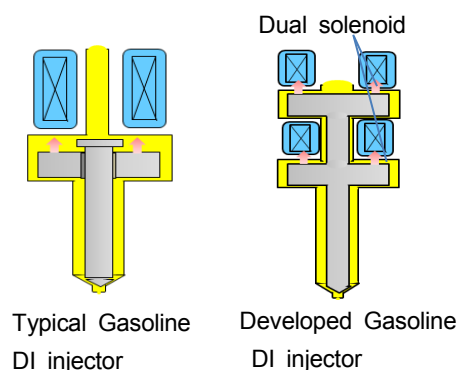


Fig. 12 Injector Mechanism

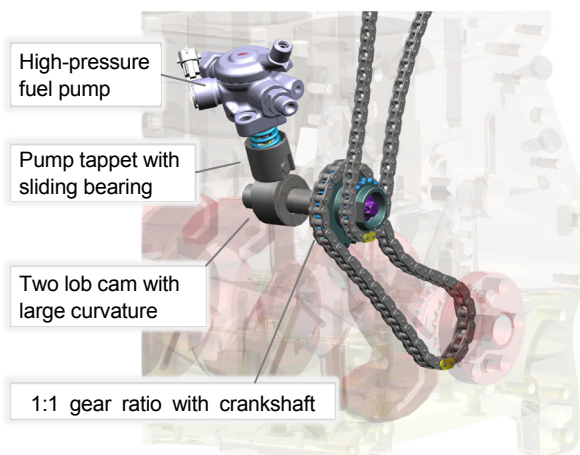
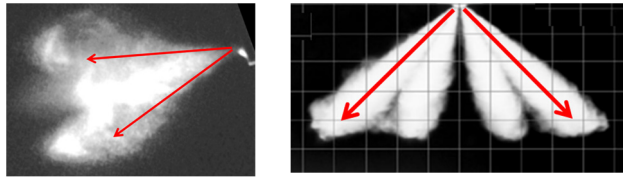


Fig. 13 Fuel Pump Drive System

(3) センター噴射

短時間に多くの空気と接触させて気化を促進しエンドガス冷却効果を得るために、ガソリン用直噴インジェクターでは世界最多の10噴口を採用した。一般的なサイド噴射ではピストン等の制約から噴霧角は左右70° 上下40° 程度しか取れず、噴霧どうしの干渉による微粒化悪化のため多噴口化は難しい。センター噴射化により90° もの広い噴霧角を実現し、10本の噴霧を十分空気と接触させることで、気化を促進した (Fig. 14)。



Side Injectio Center Injection

Fig.14 Spray Angle

(4) 流量調整弁内蔵インジェクター

さまざまな運転条件で圧縮工程噴射でのエンドガス冷却効果を得るためには、微小流量から高流量まで連続的に使える噴射量制御性が必要がある。

一般的にガソリン直噴インジェクターの噴射量特性は Fig. 15 のように、芯弁リフトの動作の違いにより、放物線を描く微小リフト域、ニードルが上部ストッパに当たって跳ね返るバウンス域、フルリフト域の3つの領域に分けられる。しかし一般的なインジェクターでは微小リフト域、バウンス域の芯弁の動きは外乱に対し敏感で不安定なので、その領域は限定的にしか使えない。SPCCI燃焼を実現するため、その制限を排除し微小リフト域から全領域高い噴射量制御性をもつ流量調整弁を内蔵したインジェクターを開発した (Fig. 16)。流量調整弁により芯弁にかかる電磁力と燃圧による油圧力はバランスし安定して作動する。これにより微小流量域の作動速度のばらつきを抑制するとともに、バウンス現象を排除した。その結果、従来システムの約1/5の微小流量から全負荷領域までの広い噴射量ダイナミックレンジを実現した。この油圧制御弁による作動安定性は、ソレノイド駆動インジェクターとして世界最多クラスの5段噴射を可能とした重要な技術要素のひとつと考える。

5.4 エアサプライシステム

SKYACTIV-Xでは、SPCCI燃焼が要求する状態量の吸気ガス (新気+EGR) を高効率で供給するためのエアサプライシステムを採用している。エアサプライシステムの選定にあたっては、以下の機能が求められる。

- ・燃費面から、比熱比改善のためにEGR導入によるリーン燃焼 (G/Fリーン燃焼) を広範囲でサポートができること (Fig. 17)。

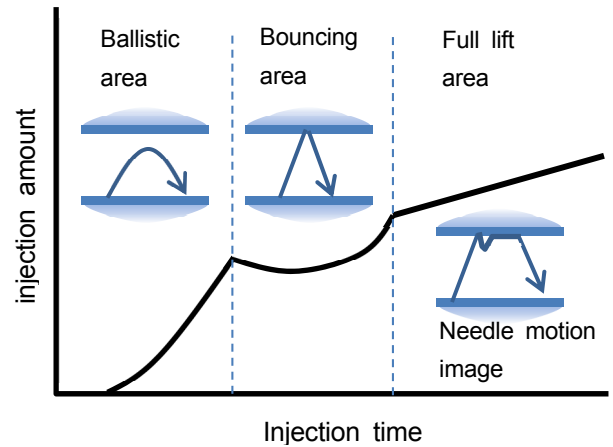
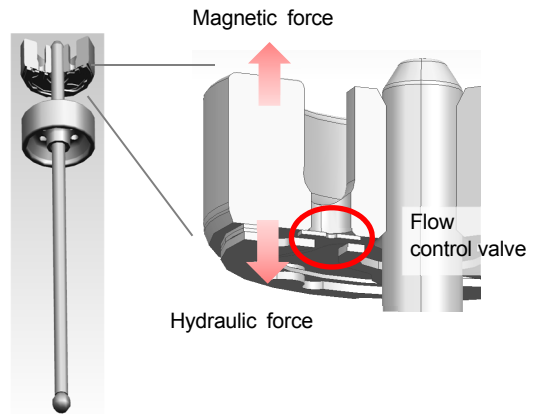


Fig. 15 Schematic Illustration of Injection Amount



Needle assembly

Fig. 16 Structure of Flow Control Valve

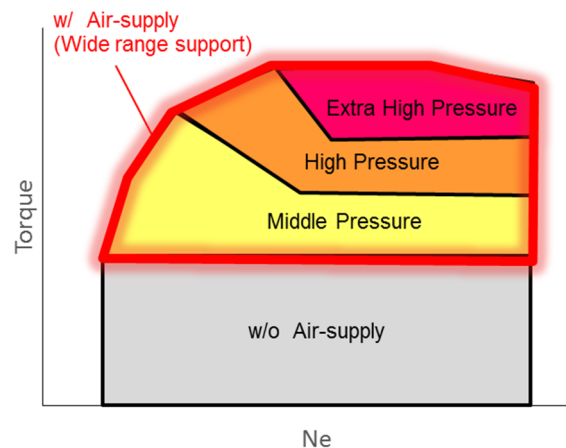


Fig. 17 Boost Pressure with Air-supply

- ・ガス量コントロールのため、定常連続過給ができ、過渡応答性がよいこと。
 - ・排気ガス浄化の観点から、排気ガス温度の低下を避けるため、触媒前の熱容量が小さいこと。
- これらの要求を満たすシステムとして、ルーツブロー式

スーパーチャージャー（以下S/C）を選定した（Fig. 18）。

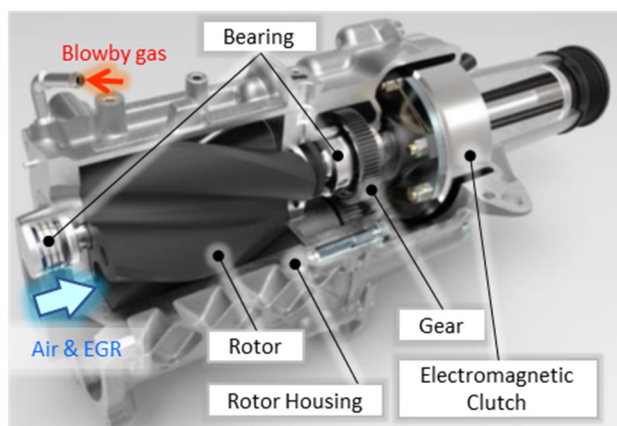


Fig. 18 Air-supply system (Supercharger)

また、S/Cには、以下の技術を取り入れた。

- (a) 機械抵抗抑制：NA領域でのS/Cの引きずり抵抗を避けるために電磁式クラッチを採用し、エアサプライが必要な領域だけ駆動させる。
- (b) 断熱効率改善：ロータープロファイル最適化やロータークリアランス縮小により高効率化を実現した。
- (c) NV抑制：吐出前にハウジング内部を昇圧する構造のチューニングにより、高効率と吐出音・振動低減を両立させた。
- (d) Heavy-EGR対策：Heavy-EGRによる凝縮水やデブリットの悪影響を避けるため、ベアリングやギアケース内に侵入するEGRガスの排出や、ブローバイガスによる潤滑を促すための経路を設けた。

これらの対応により、高い環境性能と走りの両立をサポートする最適なエアサプライシステムを提供できた。

6. 熱効率改善に向けた機能強化

6.1 吸気系によるEGR分配改善

SKYACTIV-XではSPCCI燃焼における燃焼制御のためにEGRを活用している。軽負荷域ではSPCCI燃焼の自己着火性確保のために高温の内部EGRを導入する。また、高負荷域になると筒内温度が高温化するため、ブレイグニッション抑制のために低温の外部EGRを導入する。多量のEGR導入はSPCCI領域を広げるとともに、ポンピングロス低減という観点からも燃費改善に貢献する。

このように燃費改善から多量のEGR導入要求がある一方で、EGR過多になると燃焼は不安定となる。EGR率の気筒間差が大きいとEGR過多の気筒に制約され十分にEGRが導入できない。SKYACTIV-Xでは吸気系構造の工夫により内部・外部EGR率の気筒間差低減を行い、燃費改善と燃焼安定性を両立した（Fig. 19, 20）。

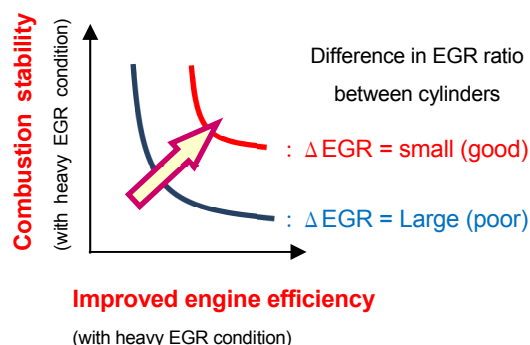


Fig. 19 Relationship Between Fuel Economy Improvement and Stable Combustion in Relation to Increased EGR

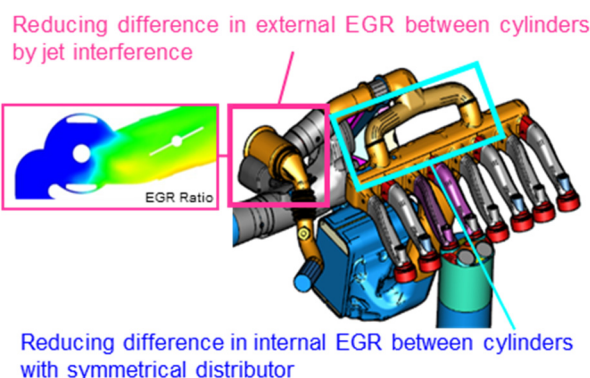


Fig. 20 Intake System Passage and Technology for Improved EGR Distribution

(1) 内部EGR分配改善

SKYACTIV-Xでは、バルブオーバーラップ中に吸気側に既燃ガスを吹き戻し、再吸入するPositive Valve Overlap (PVO) 方式による内部EGR導入を行っている。また排気シャッターバルブでA/Fリーン領域での内部EGR導入量拡大を図っている。これら技術により多量の内部EGR導入が可能となった一方で、出力・パッケージ面から吸気ランナー長は短縮化しており、多量の内部EGR導入時にはサージタンク内まで内部EGRが吹き戻る。この結果、サージタンク内にEGR濃度ムラが生ずると、導入EGR率の気筒間差につながる。通常のセンターエントリー方式のマニホールドでは空気吸入口付近の空気濃度が高まり、端部にいくほど内部EGR濃度が高まる傾向をもつが、SKYACTIV-Xではトーナメント方式の吸気経路を利用することで、この問題を解決した。上方にある2箇所の吸気口を気筒間に配置することで、サージタンク内の内部EGRの偏りを抑制することができ、内部EGRの気筒間差を低減できた（Fig. 21）。

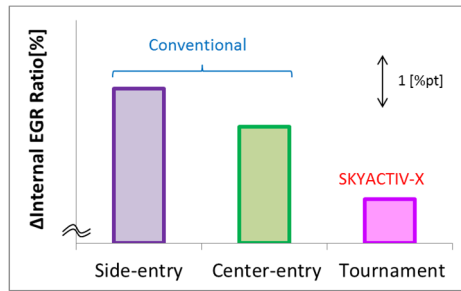


Fig. 21 Relationship Between Internal EGR Ratio and Intake System Specification

(2) 外部EGR分配改善

外部EGRについては十分に空気との混合を進めた状態でサージタンクに導入し、各気筒へ分配することを考えた。外部EGRの混合面からは長い距離をかけて混合を進めることも有効だが、レスポンスの悪化につながる。SKYACTIV-Xでは短い距離で十分な混合を行うためにEGRバルブからのEGR噴流と吸気経路からの空気を互いに衝突させることでミキシングを行っている。結果、EGR導入率の高いNA領域にて高レスポンスを維持しつつ、燃焼安定性と燃費改善の両立を行うことができた。

6.2 サーマルマネージメント

早期にSPCCI燃焼へ移行するため暖機性能の向上を図った。経路ごとにバルブを設けることで、各補機の適正温度を確保しつつ、温めたいシリンダーヘッドの放熱を抑制させ暖機性能を高めた。また、暖機後は、電子制御サーモスタットで水温を制御し、冷却水切替バルブ (CSV) によるパルス制御で流量調整できる構成とした。これにより、軽負荷時にSPCCI燃焼を可能とする壁温にするため、電子制御サーモスタットの設定温度を高めて制御し、CSVでエンジン循環流量を絞ることで水温100℃レベルまで高めた。一方、高負荷では、電子制御サーモスタットの設定温度を低めに制御し、更にCSVの開度を全開にしてエンジン循環流量を高めることでエンジン信頼性を確保させた (Fig. 22, 23)。


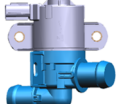
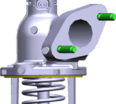
New model		
Thermostat	Coolant switching valve	Electronic control thermostat
- ATF warmer flow control	- Engine flow control - EGR cooler flow control - Heater flow control	- Radiator flow control
		

Fig. 22 Technology Utilizing Cooling System

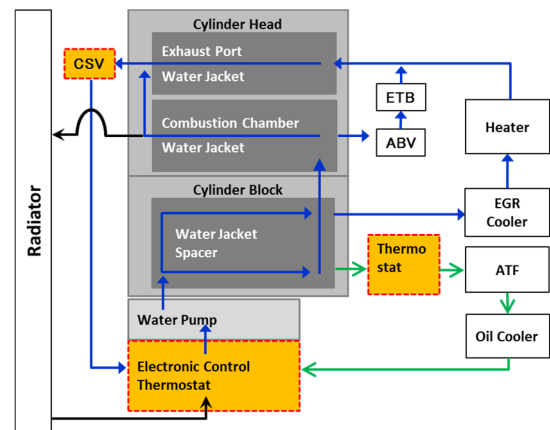


Fig. 23 Cooling Circuit of SKYACTIV-X

6.3 潤滑システム

幅広い領域でSPCCI燃焼を成立させるためのピストンクレーンジェットコントロールと、オイル圧送仕事の低減を実現するためには、きめ細かな油圧コントロールが必要となる。そのため、SKYACTIV-Xでは、Oil Control Valve (OCV) を内蔵した可変容量オイルポンプを新開発し、運転状態に応じて吐出量をコントロールすることで各種要求性能を実現した。またオイルポンプの吐出性能や各軸受のクリアランス、オイルの粘性等の油圧性能に影響を及ぼす因子について、初期バラツキや劣化状態をモデルで再現することで、信頼性を担保しながら必要最低限のポンプサイズを決定した。以下に本エンジンで特に実用燃費低減につながった2つの技術について紹介する。

(1) 低油圧化

本エンジンの潤滑油路をFig. 24に示す。SKYACTIV-Gから、①排気S-VTの油圧タイプから電動タイプへの変更、②タイミングチェーンテンショナーの圧損低減を行うことで、油圧デバイスの要求で決まっていた目標油圧を飛躍的に下げることが出来た。またOCVをオイルポンプに内蔵し (Fig. 25)，吐出直後の高い油圧を可変機構の作動圧に利用することで、油圧の制御範囲を低圧側へ拡大した (Fig. 26)。以上により常用域における目標油圧を従来比30%以上低減している。

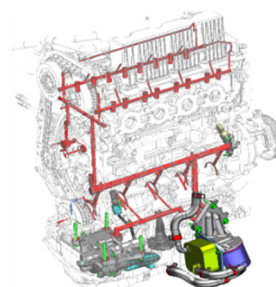


Fig. 24 Lubrication Passage

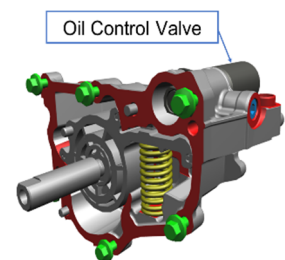


Fig. 25 Oil Pump

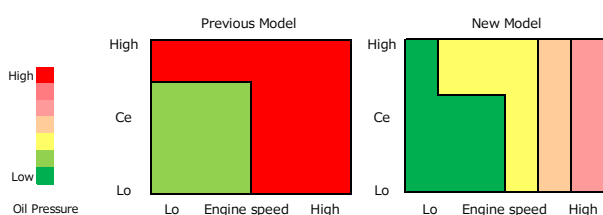


Fig. 26 Oil Pressure MAP (90°C)

(2) 低粘度化

実用燃費の低減とSPCCI燃焼の効果を最大化する為に、新しいエンジンオイルを開発した。本エンジンでは始動後にSPCCI燃焼への早期移行を目的に、積極的に燃焼室へ熱を輸送する為、オイルへの入熱は従来比少なく粘度が高い状態が増える。一方で、高油温においては超高圧縮比燃焼を支えるために従来並みの油膜が必要となる。そこで高粘度指数化を行い、高温時の油膜厚さを確保しつつ、低温時の粘度を従来比約7°C分低減した (Fig. 27)。またプリイグニッション性能への影響が有ると言われているCa系清浄剤を減量し、他の清浄剤とリバランスすることで、従来同等以上のオイル寿命を確保した。

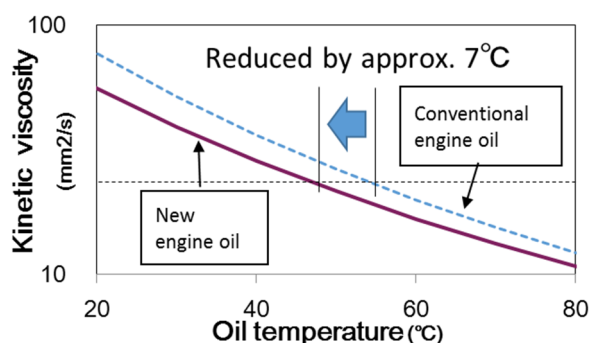


Fig. 27 Viscosity Characteristic

7. おわりに

SKYACTIV-Xでは理想に向けた内燃機関開発の2nd Stepとして、圧縮着火技術を用いて更なる高圧縮比化とリーン燃焼実現に取り組み、「優れた環境性能」と「走る歓び」の両立を達成した。

今後も基本・着実に内燃機関の理想を徹底的に追求することで、「Well-to-Wheel」の考えに基づいた本質的なCO₂削減及び心と体を活性化させる「人馬一体」感の進化により、美しい地球や心豊かな人・社会の実現に貢献していく。

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) 長谷川ほか：CX-5 SKYACTIV-Gのエンジン技術,

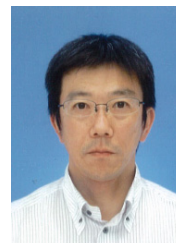
[マツダ技報, No.30, pp.3-8 \(2012\)](#)

- (3) 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 \(2016\)](#)

■ 著 者 ■



西田 良太郎



中原 康志



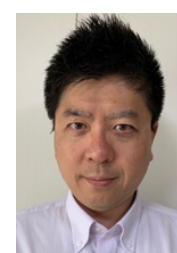
西田 正美



山谷 光隆



加藤 二郎



高旗 達也



岡澤 寿史



福馬 真生