

論文・解説

24

クリーンディーゼルエンジン新型SKYACTIV-D 2.2の開発 Newly Developed Diesel Engine SKYACTIV-D 2.2

山谷 光隆*¹ 平林 千典*² 末國 栄之介*³
Mitsutaka Yamaya Kazunori Hirabayashi Einosuke Suekuni
上杉 康範*⁴ 辻 幸治*⁵ 松本 正義*⁶
Yasunori Uesugi Kouji Tsuji Masayoshi Matsumoto

要 約

2012年に発売したSKYACTIV-D 2.2は、低圧縮比と高効率過給をキーイネーブラにした燃焼コンセプトによって、熱効率を支配する制御因子を理想に近づけ、トルクフルで伸びやかな加速性能、クラストップレベルの低燃費、NO_xの後処理を必要としないクリーンな排気を実現した。この価値を踏襲しながら、更なる効率改善と2017年以降に導入されるRDE (Real Driving Emissions) 規制への適合を視野に入れて、「新型SKYACTIV-D 2.2」を開発し、CX-8に搭載した。本稿では、このリニューアルした2.2Lディーゼルエンジンの開発コンセプトとその実現のため採用した新技術について紹介する。

Summary

2012 SKYACTIV-D 2.2 embodied a combustion concept with a low compression ratio and high-efficiency supercharging as key enablers and realized torqueful and smooth acceleration, class-top fuel economy and clean emissions without NO_x after-treatment systems. Maintaining these values, Mazda has developed new SKYACTIV-D 2.2 and installed on CX-8, with a view to further improve thermal efficiency and comply with the RDE (Real Driving Emissions) legislation beginning in 2017. This paper describes a development concept of and new technologies adopted to the new 2.2L diesel engine.

1. はじめに

2012年に発売したCX-5に初めて搭載した排気量2.2Lの新世代クリーンディーゼルエンジン「SKYACTIV-D 2.2」(以下従来型)は、トルクフルで伸びやかな加速性能、クラストップレベルの低燃費、NO_x後処理を必要としないクリーン性能⁽¹⁾⁽²⁾を実現した。

本稿では、どこまでも走り続けたいSKYACTIV-Dならではの加速性能と燃費性能を更に向上し、リニューアルした「新型SKYACTIV-D 2.2」(以下新型)の開発コンセプトとその実現のため採用した新技術について紹介する。

2. 開発コンセプトと主要諸元

マツダは究極の内燃機関を目指して、熱効率の制御因子の状態を理想に近づける取り組みをFig. 1に示すように、

続けている。ディーゼルエンジンにおける1st Stepは、超低圧縮比と高効率過給をキーイネーブラにして、複数の制御因子を連鎖反動的に効率化するSKYACTIV-D燃焼コンセプトを実現した。新型の開発は、同じ燃焼コンセプトを踏襲しながらも更なる効率改善と、2017年以降に欧州から世界各国に広がるのが想定されるRDE (Real Driving Emissions) 規制をクリアするクリーン燃焼の拡大をねらった。具体的には、次の3つの視点で機能向上を図った。

- ・燃料噴射の高精度・多段化による燃費向上
- ・過給能力向上による加速性能向上
- ・機械抵抗の更なる低減による燃費向上

これらの視点を実現する新たなブレークスルー技術は、概要をFig. 2に示し、詳細を後述する。新型の主要諸元をTable 1に、システム概要をFig. 3に示す。

*1~3 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

*5 パワートレイン開発本部
Powertrain Development Div.

*4 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*6 パワートレイン企画部
Powertrain Planning Dept.

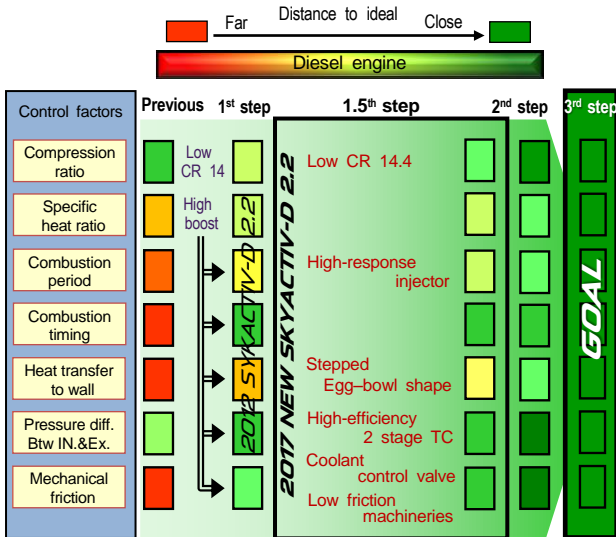


Fig. 1 Vision for Evolution of Diesel Engine

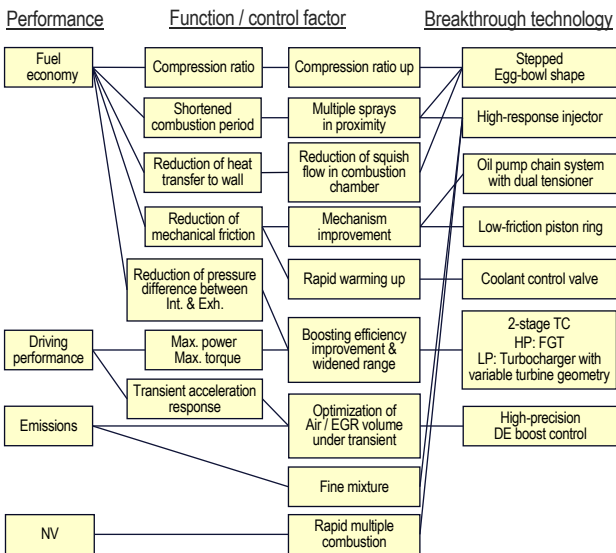


Fig. 2 Upgrading Technologies

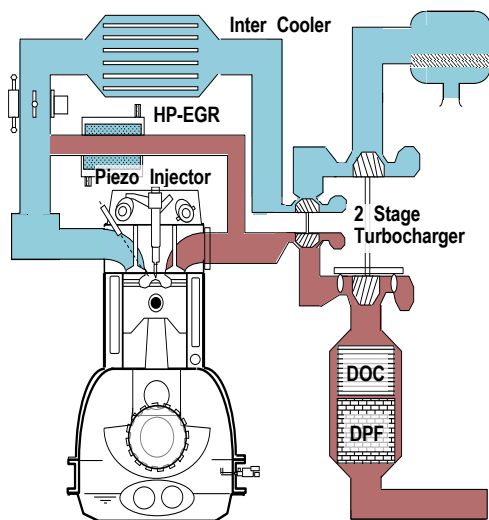


Fig. 3 Engine System

Table 1 Specifications

| Engine | 2012 SKYACTIV-D 2.2 | 2017 New SKYACTIV-D 2.2 |
|-------------------------|-----------------------------|--|
| Engine Type | In-Line 4 | ← |
| Displacement | 2188 cm ³ | ← |
| Compression ratio | 14.0 | 14.4 |
| Fuel Injection System | Common Rail System | ← |
| | G3P (Piezo) | G4P-i (Piezo w/ i-ART®*) |
| Max. Injection Pressure | 200 MPa | ← |
| Combustion Bowl Shape | Conventional Egg-Bowl Shape | Stepped Egg-Bowl Shape |
| 2 Stage Turbocharger | HP: FGT LP: FGT | HP: FGT LP: Turbocharger with variable turbine geometry |
| EGR System | HP-EGR | ← |
| After-treatment System | DOC + DPF | ← |
| Max. Torque/rpm | 420 Nm / 2000 rpm | 450 Nm / 2000 rpm |
| Max. Power/rpm | 129 kW / 4500 rpm | 140 kW / 4500 rpm |
| Emissions | JPN H21 | JPN H30 (WLTC) |

* 「i-ART®」 is a registered trademark of DENSO CORPORATION

3. 性能パフォーマンス

3.1 出力/トルク性能

新型では更なる商品性改善のため、最大出力、最大トルクの拡大を図った (Fig. 4)。最大空気量の増量と燃料噴射率の向上による燃焼期間短縮により、SKYACTIV-D 燃焼コンセプトの特徴である最高燃焼圧力13.5MPaの低Pmax燃焼を踏襲しつつ、更なる高出力・高トルク化を実現した。

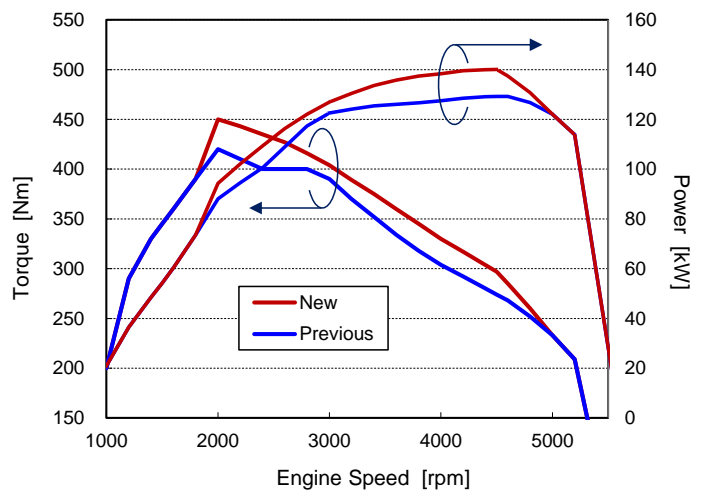


Fig. 4 Engine Performance

3.2 燃費性能

1.5Lで導入した段付きエッグシェイプ燃焼室コンセプト^③の採用により膨張行程初期の冷却損失を低減, また高応答インジェクタによる混合気形成の最適化, 後述の機械抵抗の更なる低減により, Fig. 5に示す燃費改善を実現した。更に1.5Lで導入した冷却水制御バルブの採用により, シリンダーライナ壁面, ピストンの早期暖気を実現し, 車両燃費性能の向上を図っている。

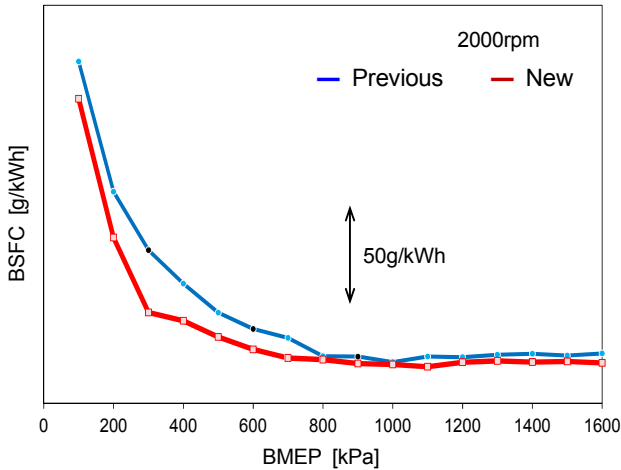


Fig. 5 Fuel Consumption

3.3 環境性能と走り性能の両立

新型は新しい規制である世界統一試験サイクル (以下WLTC), 及びRDEをクリアすることを前提として開発した。これらの新しい規制サイクルは市場での実走行との相関性を持つことを目的としている。その加速度分布はその意図どおりに市場走行シーンのそれと一致しており (Fig. 6), 今まで以上に幅広い運転領域にて走り・燃費・エミッションの両立が必要である。

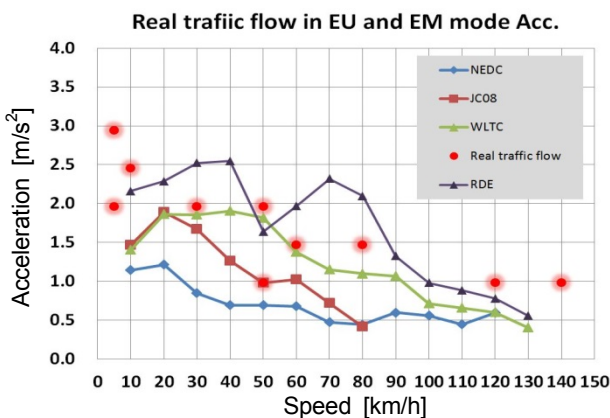


Fig. 6 Acceleration Distribution

一般的にディーゼルエンジンは, 走り・燃費・エミッションがトレードオフの関係にあり, NOx目標と走り目

標を適切に定めることが商品性向上のためには重要である。EGRを主としたNOx低減は, 過給システムの応答悪化やスモークの更なる抑制により, 日常の走り性能悪化の要因となり得る。そこで新型では, 理想とする走り性能のコンセプトを立て, 後述するDE精密過給制御により, 走りと NOx抑制の最適化を同時に実現した。

その大幅な加速性能改善結果をFig. 7に示す。

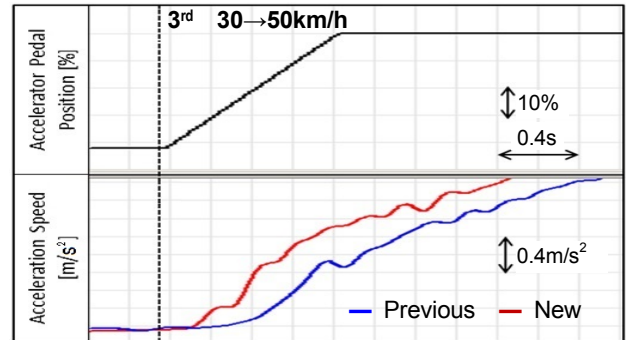


Fig. 7 Acceleration Performance

4. ブレークスルー技術

4.1 燃料噴射システム

熱効率を支配する7つの制御因子のうち, 燃焼期間の短縮をねらい, 燃料噴射量を緻密に制御する技術として, 新たな燃料噴射システム (G4P-i) を採用した。

具体的には, 各気筒のインジェクタの上部に燃圧センサーを内蔵した次世代ピエゾインジェクタに対し, 従来からのフィードフォワード制御に, インジェクタ内の燃圧変化を用いて噴射量や噴射時期をフィードバックする制御 (i-ART[®]) を追加することで, 噴射量制御機能を高め, Fig. 8に示すような多段燃料噴射による精密な燃焼制御を実現した。

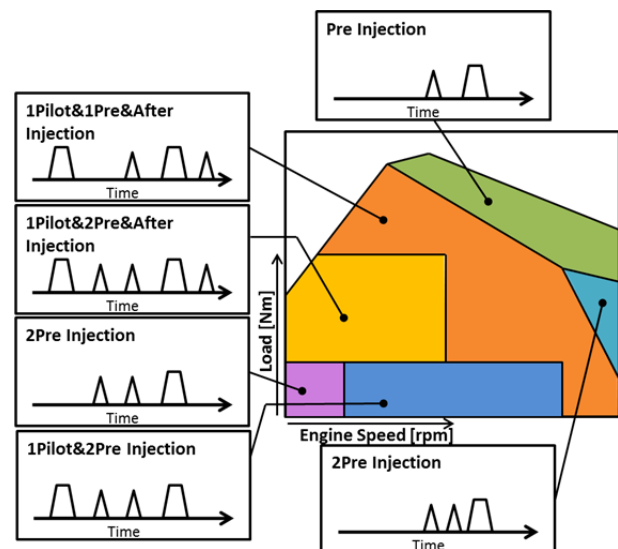


Fig. 8 Multi-Stage Injection Control Strategies

また、本システムにより、近接多段燃料噴射が実現できるため、キャビティの中に全ての燃料が噴射でき、段付きエッグシェイプ燃焼室の壁面熱伝達低減効果を最大限引き出すことを可能とした。その結果、燃焼音と排気性能への弊害なく、Fig. 9に示すように燃焼期間の短縮を図った。

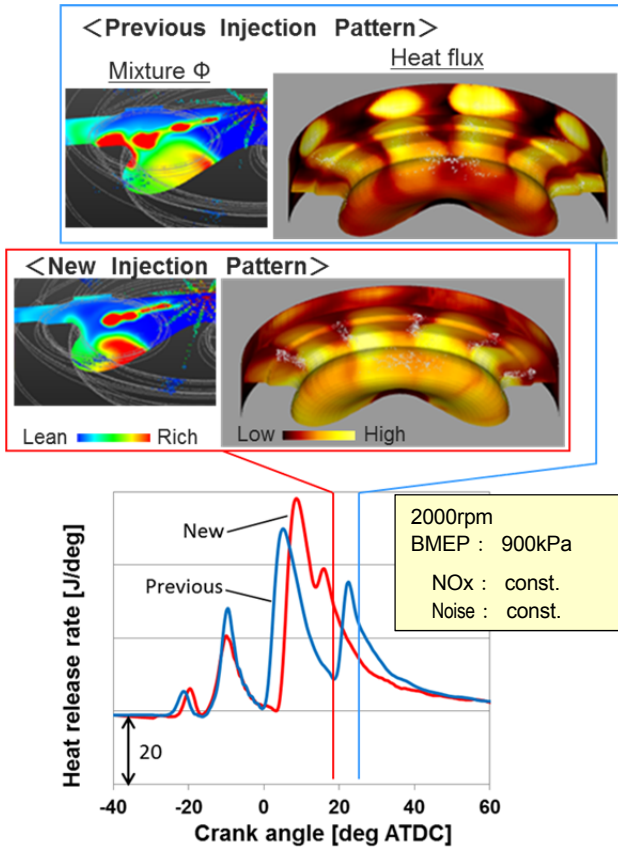


Fig. 9 Comparison of Rate of Heat Release

4.2 2ステージターボチャージャシステム

従来型で採用していた2ステージターボチャージャに対し、新型では大型ターボチャージャを固定ジオメトリターボチャージャから可変ジオメトリターボチャージャ（以下VGターボチャージャ）に変更した（Table 2, Fig. 10）。VGターボチャージャを採用したことで、小型ターボチャージャ運転領域とのつながりがスムーズになり、全域での滑らかな走りを実現した。

またVGターボチャージャを駆動するアクチュエータと、小型ターボチャージャ⇄大型ターボチャージャの切り替えを行うレギュレーティングバルブアクチュエータに電子制御式を採用することでより緻密な制御が可能になり、レスポンスが良く、かつ高効率で過給できる運転域が広がり、加速時、及び高速走行時のパワフルな走りを強化した。

Table 2 Specification Comparison

| Engine | | Previous 2.2L | New 2.2L |
|------------------|---------------------------------|---------------------|---|
| HP turbo | Turbo type | FGT | FGT |
| | Water cooled at bearing housing | with | without |
| Regulating valve | type | Butterfly type | Swing arm |
| | Control device | Vacuum Actuator | Electric Actuator |
| LP turbo | Turbo type | FGT with waste gate | Turbocharger with variable turbine geometry |
| | Control device | Vacuum Actuator | Electric Actuator |
| | Turbine housing | Cast iron | Double wall sheet metal |
| | Water cooled at bearing housing | with | without |

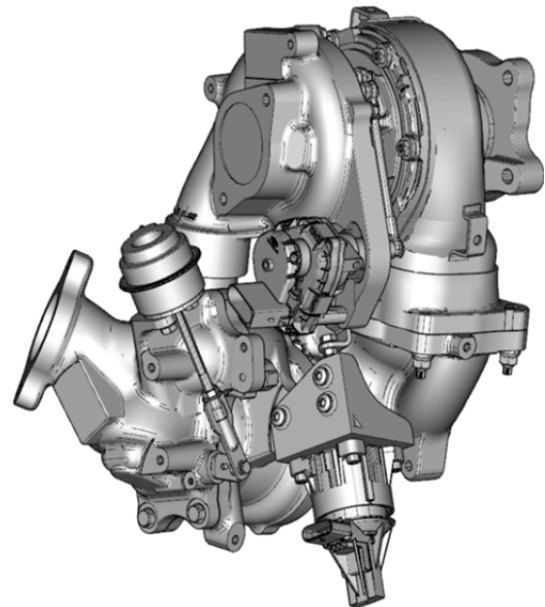


Fig. 10 2 Stage Turbocharger

一方、通常VGターボチャージャにすると、排気通路内部品の追加により質量は増加方向となるが、新型では大型側タービンハウジングを従来の鋳鉄から2重管構造に変更したこと、及び大型側のタービンハウジングの排気経路を変更したことにより、ターボチャージャトータルでの質量を約10%低減した。また2重管化による断熱効果により、排気ガス温度の低下を抑えて、DOC（Diesel Oxidation Catalyst）の早期昇温を実現した。この2重管構造は、ステンレス製プレス板とステンレス鋳物を組み合わせてTIG溶接で接合しているが、運転時の振動や熱による応力をCAEの積極活用で高精度に把握することで、各部の応力を低減させた最適形状とし、信頼性を確保している。

上記以外にも、従来型のターボチャージャに対してスペックを見直した。軸受は抵抗を従来型比約70%低減した低抵抗型を採用し、各ターボチャージャのインペラは、ねらいの過給特性に合わせたサイズ変更と最新設計の形状により高効率化を実現した。

4.3 DE精密過給制御

従来型は変速の少ない力強い加速、ガソリンエンジンのような高回転までの伸び感を実現した。しかし常用域での加速シーンでは、アクセル操作に対する加速度の応答遅れやねらい以上の加速度が発生する場合がある (Fig. 11)。

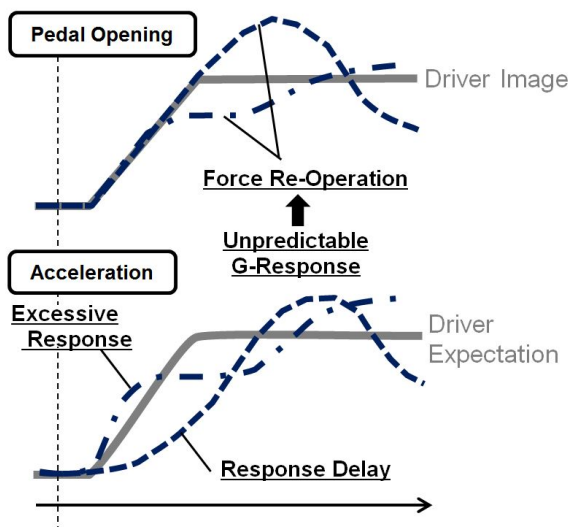


Fig. 11 Expected Acceleration

この意図しない加速度応答のために、踏み足しや踏み戻しなどの余計な操作を強いられている。そこで期待どおりの加速度応答を得る「人間中心の技術」として、過渡時のトルクコントロールを定常走行の噴射量主体から空気量主体へと変更し、以下の開発を進めた。

- ・空気量の初期応答性向上
- ・空気量のきめ細やかなコントロール

加速度の反応遅れは、気筒ごとの応答性がある噴射制御に対して反応時定数が大きく、反応が遅い過給システムに起因している。そこで、過給システムによる反応遅れをHP-EGRシステムの制御により補った。HP-EGRシステムは過給システムよりも経路が短い。また、EGRバルブを絞ることで、吸気酸素濃度と過給器へ流入する排気エネルギーを同時にすばやく増加させることができる。この特性を利用し、アクセル操作に応じたEGR制御をすることで過給初期の空気量の応答性を向上させた。

また、ひとたび過給が始まれば排気ポート後の圧力、及び流量が増大するため、加速中広範囲にわたって空気量とEGR量を同時確保することができる。そこで、アク

セルの操作スピード・量からドライバーの要求加速度を予測し、空気量をきめ細やかに制御することでねらいどおりの加速度を得るとともに、広範囲の運転シーンにおいてNOx抑制とスモーク低減の最適化も同時に実現した。

本制御を採用した新型と従来型の実車加速データの比較をFig. 12に示す。1) はアクセルペダル開度、2) は噴射量で、加速度・トルクを代用している。従来型では応答遅れによる過度なアクセルの踏み込みから戻しがあるのに対し、新型ではアクセル操作の修正なく、期待どおりの加速が得られている。NOxは同等、スモークは低減したうえで、「人間中心の走り」を実現した。

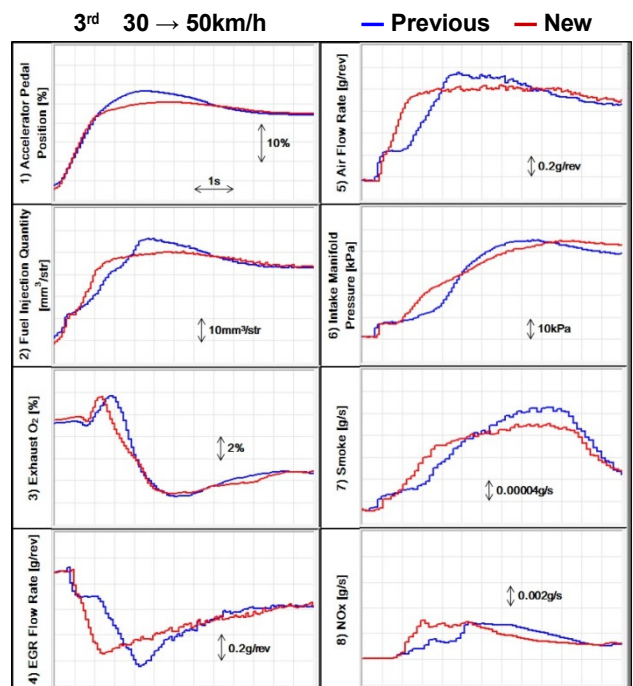


Fig. 12 Expected Acceleration

4.4 抵抗低減

(1) 冷却水制御バルブ (CCV)

新型では、Fig. 13に示す冷却水制御バルブを採用した。

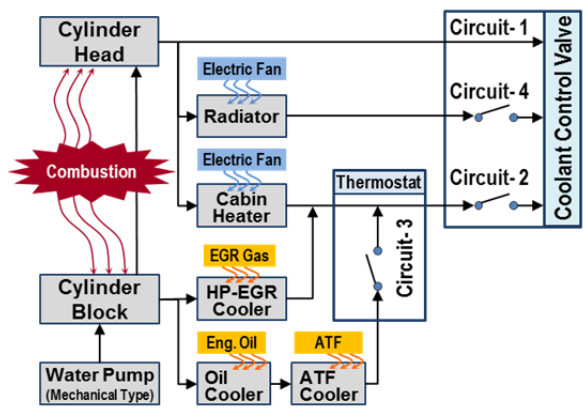


Fig. 13 Coolant Control Valve

この冷却水制御バルブは機械式ウォーターポンプ、サーモスタットとの組み合わせで、燃焼や摩擦で発生した熱を必要な場所へ必要なタイミングで送ることを可能とした。冷間始動時にシリンダーヘッド、シリンダーブロックへの水流を最小限に制御し、燃焼室近傍以外への熱拡散を抑えることで、シリンダーライナ壁（表面油膜）の昇温早期化による摩擦抵抗低減を実現した。エンジン実験での検証で冷間始動200sec後に、シリンダーライナ壁温として約7°Cの昇温効果を確認した。

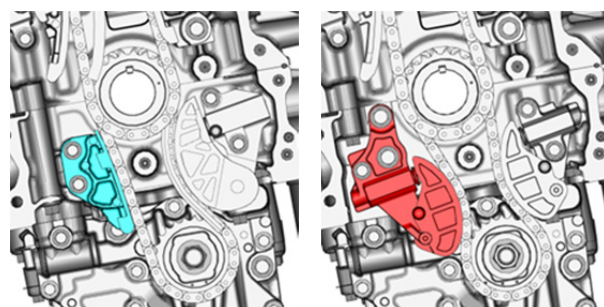
(2) ピストンリング

新型のピストンリングは、2ピースオイルリングでは世界初となる連続する二つの曲率半径からなる同方向偏心バレル形状のプロフィールを採用した。この同方向偏心バレル形状により得られるオイル消費性能の改善分を機械抵抗に機能再配分する事で、リング張力による抵抗を最大で約30%低減した。

(3) オイルポンプチェーンシステム

新型では、デュアルテンショナ式のチェーンシステムを新開発した (Fig. 14)。

このチェーンシステムは、一般的な張り側のチェーンガイドを油圧テンショナにすることで、エンジンの回転変動によるチェーン張力を油圧テンショナのダンピングで緩和し、チェーン張力の大幅な低減を可能とした。これにより、最大チェーン張力を全域で約20%低減した。



Single tensioner system

Dual tensioner system

Fig. 14 Comparison of Oil-Pump Chain System

5. おわりに

「新型SKYACTIV-D 2.2」は、従来型の進化版として、熱効率を支配する各制御因子の改善と、燃焼・過給など制御技術の進化により、更なる加速レスポンスの向上、静粛性の向上を実現した。これらのハード&ソフト両面からの技術の進化により、上質で意のままのレスポンスを体感できるクリーンディーゼルエンジンとして仕上がった。

参考文献

- (1) 森永ほか：SKYACTIV-D エンジンの紹介, マツダ技報, No.30, pp.9-13 (2012)
- (2) T. Sakono, et al. : 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, pp.943-965 (2011)
- (3) 平林ほか：小排気量クリーンディーゼルエンジンSKYACTIV-D 1.5 の開発, マツダ技報, No.32, pp.21-27 (2015)

■ 著 者 ■



山谷 光隆



平林 千典



末國 栄之介



上杉 康範



辻 幸治



松本 正義