

特集：MAZDA CX-60

04

## SKYACTIV-D 3.3 の開発

—大排気量・直列 6 気筒と燃焼の理想追求による提供価値の向上—

## Development of the Skyactiv-D 3.3

—Increased Value Provided by Large Displacement In-line 6 Cylinders and Pursuing the Ideal of Combustion—

志茂 大輔 <sup>*1</sup> Daisuke Shimo	皆本 洋 <sup>*2</sup> Hiroshi Minamoto	福田 大介 <sup>*3</sup> Daisuke Fukuda	岩田 陽明 <sup>*4</sup> Kiyooki Iwata	松本 大典 <sup>*5</sup> Daisuke Matsumoto
旗生 篤宏 <sup>*6</sup> Atsuhiko Hatabu	岡澤 寿史 <sup>*7</sup> Hisashi Okazawa	辻 幸治 <sup>*8</sup> Kouji Tsuji	森永 真一 <sup>*9</sup> Shinichi Morinaga	

## 要 約

カーボンニュートラルに向けた再生可能エネルギー発電への移行期において、将来的な再生可能燃料の選択肢も考慮し、現実的な CO<sub>2</sub> 削減のためには電動化とともに内燃機関の効率改善によるマルチソリューションが有効であると考えられる。その一つの答えとして新世代クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 3.3 を開発した。排気量を従来の 2.2L から 3.3L に拡大することで高トルク・高出力化は元より、理想を追求したリーン予混合燃焼の拡大の手段としても大排気量化を用いることで、乗用車量産エンジン世界トップの実用域で広い熱効率、及び排気クリーン化を達成した。また低 Pmax（最大燃焼圧）対応の構造系を進化させて摩擦抵抗を抑制し、更に直列 6 気筒による低振動と心地よいエンジン音を創り込んだ。これらの技術によって運転者が愉しく元気になる「走る歓び」、及び抜群の燃費とクリーン排気による「優れた環境性能」の両方をこれまでにない次元にまで高めた。

## Abstract

A new 3.3-liter inline six-cylinder diesel engine has been developed. In addition to the high power realized by its large displacement, the combination of the large displacement and a new combustion method devised in pursuit of ideal combustion has achieved the world's highest level of thermal efficiency and clean emissions in a wide operating range. The engine is therefore able to deliver "driving pleasure" enhanced by its six-cylinder sound and strong torque and "outstanding environmental performance" thanks to its distinguishingly low fuel consumption.

**Key words :** Heat engine, Compression ignition engine, Performance/fuel economy/efficiency, Emissions

## 1. はじめに

マツダは、初代 SKYACTIV エンジン導入時より「適正な排気量の選択」を提唱しており、ラージ商品群の開発にあたっては求められる高い商品性能と環境性能を同時に達成するため 3.3L への大排気量化、及び直列 6 気筒化を選択した。これによりお客様への提供価値としての「走る歓び」と「優れた環境性能」を以下のように高めた。

「走る歓び」:

✓どこまでもアクセルに追従する力強いトルクと心地よい直列 6 気筒エンジン音により運転する誰もが愉しく元気になる加速

「優れた環境性能」:

✓実用域での世界トップの熱効率による抜群の低燃費 (Large クラスで従来 Small クラス並の燃費, Mild Hybrid との組み合わせで競合 Strong Hybrid 並の燃費)

\*1~4,9 エンジン性能開発部  
Engine Performance Development Dept.

\*5~7 エンジン設計部  
Engine Design Engineering Div.

\*8 パワートレイン開発本部  
Powertrain Development Div.

✓ NOx 後処理装置なしで国内 RDE (Real Drive Emission) 規制に余裕をもって対応するクリーン排気

本稿ではこれらを実現した SKYACTIV-D 3.3 の開発コンセプトと採用技術について紹介する。

## 2. 開発コンセプトと主要諸元

マツダでは初代 SKYACTIV エンジン導入以来、Fig. 1 のロードマップに示したように内燃機関の熱効率を支配する 7 因子の理想化に向けた取り組みを進めている<sup>(1)</sup>。新型エンジンはディーゼルの 2nd Step であり、従来の 1st step<sup>(2,3)</sup> からリーン予混合燃焼 PCI (Premixed Charge Compression Ignition) を拡大して燃焼期間と燃焼時期の理想化を狙う。これを実現するための技術開発コンセプトを Fig. 2 に示す。新型ではこの燃焼の進化を走り、燃費、排気の全ての機能強化につなげるための実現手段として排気量を 2.2L から 3.3L に拡大する。大排気量化によってラージクラス SUV 車両を力強く走らせるために十分なトルクと出力を確保しつつ、その上で最大平均有効圧を従来比で抑制することで高負荷まで十分な EGR を用いて NOx を大幅に低減する。また大排気量化による実用域の平均有効圧低下と、新開発の 2 段エッグ燃焼室<sup>(4)</sup> を用いた空間制御予混合燃焼 DCPCI (Distribution Controlled partially Premixed Compression Ignition) によって、PCI 領域を実用中負荷域まで拡大する。大排気量化で通常は不利になる摩擦抵抗は低 Pmax (Maximum cylinder pressure) の踏襲及びスチールピストン採用などの構造系技術の進化<sup>(5)</sup> により従来比で改善を図る。これを実現した新型エンジンの諸元を Table 1 に示す。次章以降で得られた性能と技術の詳細について紹介する。なお、構造系技術<sup>(5)</sup> とハイブリッド&トランスミッションとの協調技術<sup>(6)</sup> については別報にて紹介している。

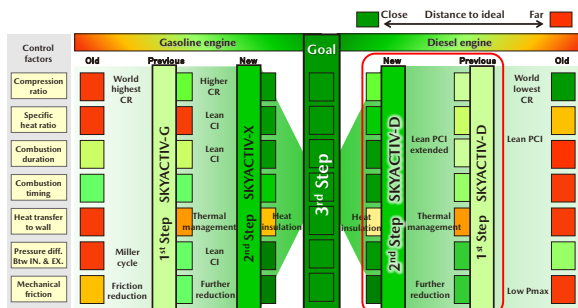


Fig. 1 Evolution Roadmap to Ideal of ICE

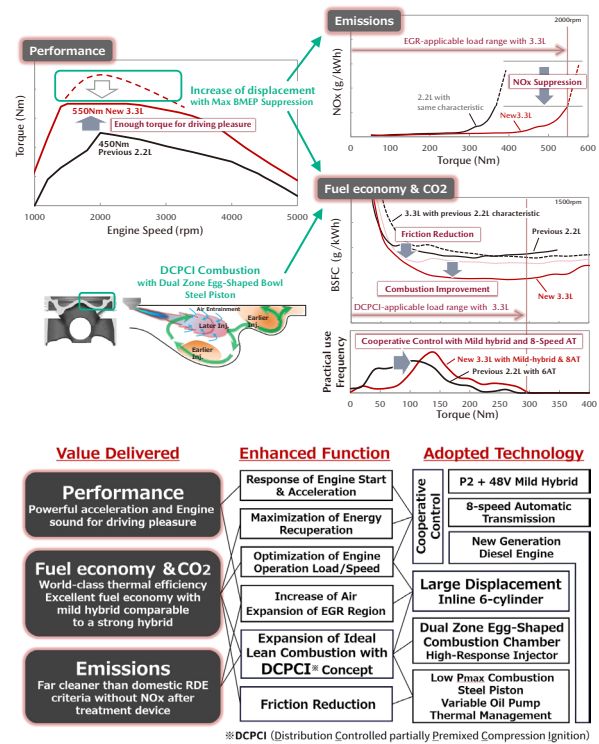


Fig. 2 SKYACTIV-D 3.3 Technology Concept

Table 1 Engine Specifications

	Previous 2.2 model	New 3.3 model Hi-power	New 3.3 model Lo-power
Engine Type	In-Line 4	In-Line 6	←
Displacement	2188cm <sup>3</sup>	3283cm <sup>3</sup>	←
Compression ratio	14.4	15.2	←
Fuel Injection System	Common Rail System G4P-1 (Piezo w/ i-ART <sup>※</sup> )	←	←
Max. Injection Pressure	200MPa	250MPa	200MPa
Piston material	Aluminum	Steel	←
Combustion Bowl Shape	Stepped Egg-shape Combustion Chamber	Dual Zone Egg-shape Combustion Chamber	←
Thermal Management System	Coolant Control Valve	Coolant Switching Valve with Zero flow Water Jacket Spacer	N/A
Variable Valve Train System	N/A	Electrical Intake SVT	N/A
Engine Sound System	N/A	Induction Sound Enhancer	N/A
Turbocharger	2 Stage Turbocharger HP: FGT LP: Turbocharger with variable turbine geometry	Single Turbocharger with variable turbine geometry	←
EGR System	HP-EGR	HP & LP-EGR	←
After-treatment System	DOC+DPF	←	←
Max. Torque/rpm	450Nm/2000rpm	550Nm/1500-2400rpm	500Nm/1500-3000rpm
Max. Power/rpm	147kW/4000 rpm	187kW/3750 rpm	170kW/4000-4200rpm
Emissions	JPN H30 (WLTC)	←	←

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

### 3. 性能パフォーマンス

#### 3.1 トルク出力性能

新型は最高燃料噴射圧の違いによって Hi-power/Lo-power の 2 仕様のエンジンを国内向けに設定した。Fig. 3 に示すように、最大トルクは 550/500Nm を低回転域から幅広い領域で発生し、最大出力は 187/170kW を達成した。従来型に対し Hi-power では最大トルクを 22%、最大出力を 27% 向上させた。これらにより、ラージクラスの SUV 車両において実用域から高速域まであらゆるシーンでの力強くトルクフルな加速性能を実現した。

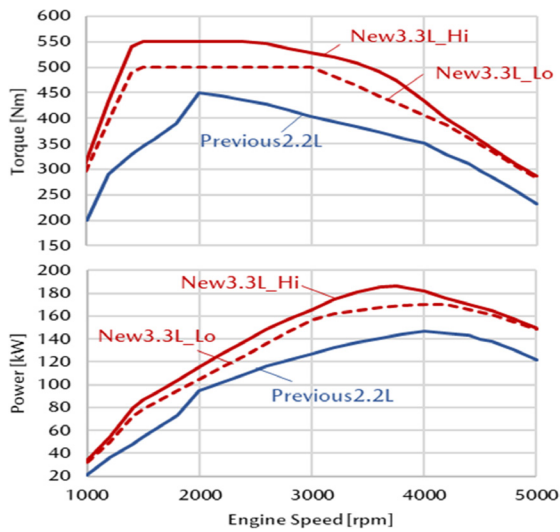


Fig. 3 Torque and Power Performance (Engine Only)

#### 3.2 燃費性能と排気性能

新型は Fig. 4 に示すように、燃費率 BSFC (g/kWh) に関して、横軸を排気量で正規化した正味平均有効圧 BMEP (kPa) で、従来比 10% 以上改善した。従来と同じ車格の車両で大排気量化していることから、横軸を絶対値トルク (Nm) で整理した場合でも従来比で 8% 以上改善しており、極軽負荷を除いた実用域で広く競争を凌駕する世界トップの低燃費率を達成した。Fig. 5 に正味熱効率マップを示す。実用走行を代表する WLTC モード使用域の大部分で高熱効率 40% 以上を達成しており、また最高熱効率点も実用走行域としている。

次に Fig. 6 に横軸を絶対値トルク (Nm) で整理した NOx 排出量を示す。従来型に対して特に高負荷域まで大幅な NOx 低減を達成し、NOx 後処理装置なしで国内 RDE (Real Drive Emission) 規制に余裕をもって対応するクリーンな排気性能を実現した。

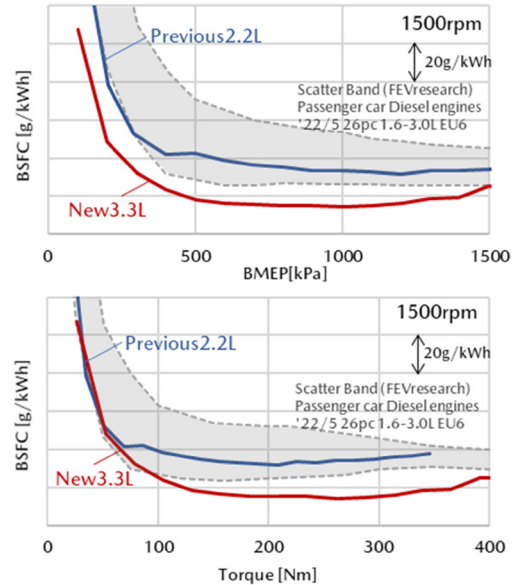


Fig. 4 Fuel Consumption Characteristic

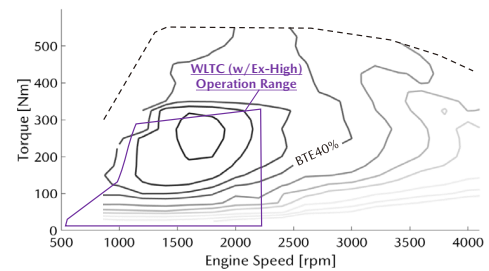


Fig. 5 Thermal Efficiency Map

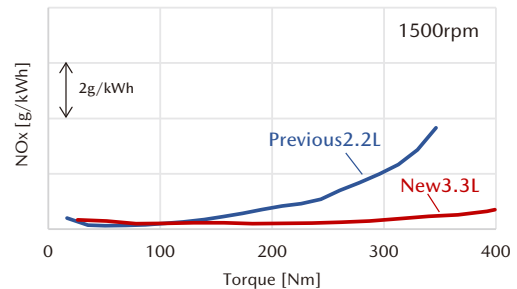


Fig. 6 NOx Characteristic

### 4. ブレークスルー技術

#### 4.1 燃焼改善と大排気量化

燃料噴射後着火までに噴霧内に十分な空気を取り込んでリーン予混合気を形成し、多段噴射によって燃焼音の悪化を抑え、熱効率最良となる TDC (上死点) 付近でクリーンな燃焼を実現する予混合燃焼 PCI を従来型エンジンから採用している<sup>(7)</sup>。しかしながら、従来の燃焼系では燃料噴射量が増大してかつ着火遅れが短くなる中負荷ではリーン予混合気を形成できずに排気が悪化するため、適用は軽負荷に限られていた。これに対して新型エンジンでは Fig. 7 に示す 2 段エッグ燃焼室<sup>(4)</sup> を用いた新しい考え方の空間制御予混合燃焼 DCPCI を開発し、大排気量化を組み合わせることでこの課題の解決を図った。

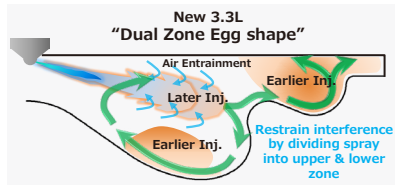


Fig. 7 Dual Zone Egg Shape Concept of Piston Bowl

新型エンジンにおけるDCPCI燃焼の燃料噴射率と熱発生率の実機試験結果、噴霧混合気のCFD解析結果を従来型と比較してFig. 8に示す。運転条件は1500rpm中負荷BMEP600kPaである。CFD結果に示すようにTDC前に噴射する1段目と2段目の噴霧は何れも燃焼室リップへ衝突させてその後上下の燃焼室空間で予混合気を形成する。TDC付近で1&2段目の噴霧予混合気が着火して熱発生が始まってから3段目を噴射するが、3段目の噴霧が混合気を形成する空間には高温の燃焼ガスが存在しないため、3段目の噴霧も十分に空気を取り込んで予混合気を形成してから着火に至る。3段目の噴霧もリップに衝突させて上下の燃焼室空間に移動していく中で、混合気を形成する空間が確保できた所に4段目を噴射する。この時期の混合気ΦTマップ解析からはSoot領域をかすめる程度まで予混合気をリーン化ができていたことが観察される。次に4段目の噴霧が移動してきた空間に5段目を噴射する。このように2段エッグ燃焼室と高応答燃料インジェクターによる噴射量&時期の最適化によって噴霧混合気分布を空間的に制御することで、3, 4, 5段目の噴霧も空気を十分に取り込んで予混合気を形成できるようにしている。また噴霧予混合気を形成するための機能の一部を着火遅れへの依存から2段エッグ燃焼室に配分したことで、新型では従来の14.4から15.2への圧縮比向上を実現している。

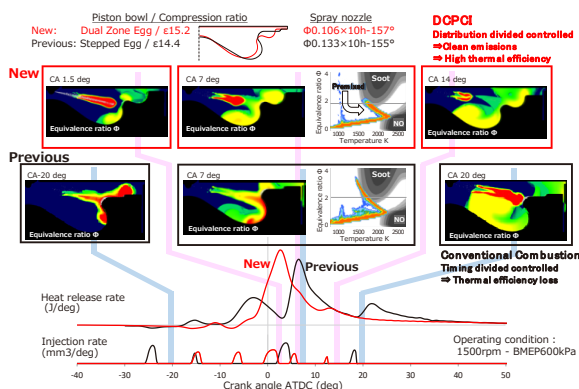


Fig. 8 Engine Test and CFD Results of DCPCI (Distribution Controlled Partially Premixed Compression Ignition)

一方、従来型エンジンは中負荷BMEP600kPaにおいて、排気の悪化を防ぐために早期パイロット噴射、リタードメイン噴射、更に大きくリタードしたアフター噴射によって

時間的に分割することで噴霧の干渉をできるだけ回避しているが、燃焼期間が長くなって熱効率の損失が大きかった。また混合気のΦTマップ解析では拡散的な燃焼に伴うリッチな混合気が観察される。Fig. 9に1500rpmの負荷違いにおける熱発生率と各性能の実機評価結果について新型と従来型の比較を示す。負荷はトルクNmと平均有効圧kPaを併記している。トルク79Nmにおいて従来型は早期パイロット、メイン、アフター燃焼によって時間分割した拡散型燃焼であったが、新型は大排気量化の効果でPCIが適用できるようになり、図示燃費率を約4%改善しSmokeも大幅に改善している。中負荷158Nmにおいても従来型は時間分割した拡散型燃焼であったが、新型はDCPCIを適用して図示燃費率を約6.3%改善している。更に中高負荷263Nmにおいては、従来型はメイン燃焼を大きくリタードした拡散型燃焼としていたのに対し、新型はDCPCIを適用してTDCでの燃焼を実現しており図示燃費率を約9.5%改善し、かつNOxも大幅に低減できている。なおこれらの図示熱効率の改善には燃焼時期と燃焼期間の改善に加えて、圧縮比の上昇、予混合燃焼化による高温燃焼ガスと燃焼室壁面との接触部の流速低下、及びスチールピストンによる壁温上昇の効果<sup>(5)</sup>も含まれる。

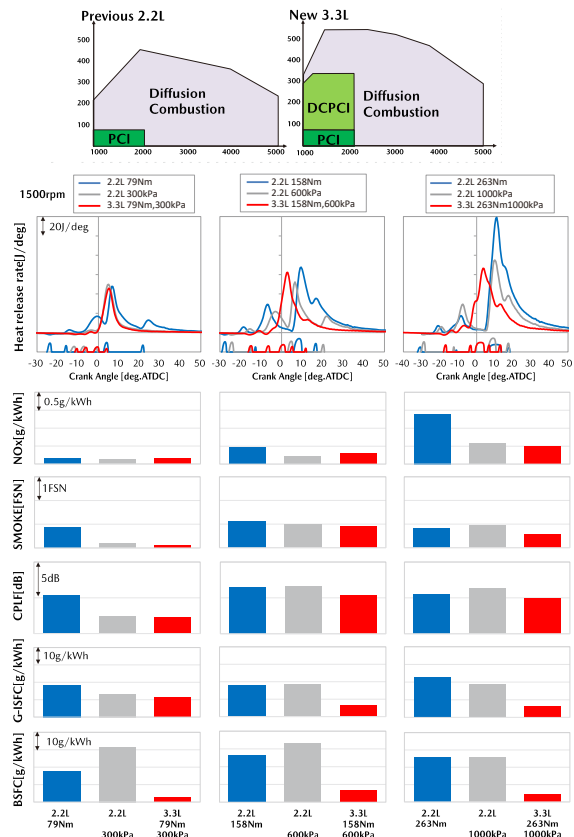


Fig. 9 Multiple Injection Control MAP and Test Results of Heat Release Ratio, Emissions, Noise, and FC

4.2 大排気量化と空気マネージメント

新型は加速性能、燃費性能、排気性能の全てにおいて



大幅改善を実現すべく、大排気量化を活用した最適空気マネージメントシステムを選定した。具体的には、従来型がワイドレンジ過給性能に特化した2ステージターボチャージャー+HPEGRを採用しているのに対し、新型では排気量による空気量アップと低速重視の過給システムを組み合わせ、シングル可変ジオメトリターボチャージャー（以下、VGターボチャージャー）+HP/LPEGRに変更した。VGターボチャージャーには従来型2.2Lの大型タービンに近い容量の新世代タービンを採用し、VGベーンとHP/LPEGRをコントロールするアクチュエーターをドライバー加速要求に応じて最適制御することで、高効率過給と高応答の両立を狙った。これにより Fig. 10 に示すように筒内吸入空気量増加に合わせてEGRを増量し、大幅なNOx低減を達成しながらも従来型並みのポンピングロスに抑制した。また、Fig. 11 に示すように加速要求が高まるとタービン流入量と膨張比を増大させることで過給を瞬時に立ち上げ、高応答なエンジントルク特性による加速レスポンスの大幅向上を実現した。

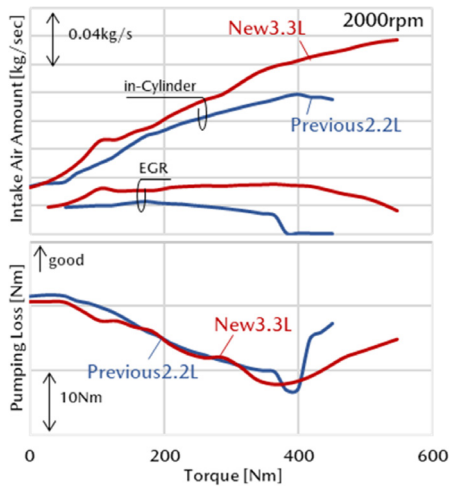


Fig. 10 Air Condition and Pumping Loss Characteristic

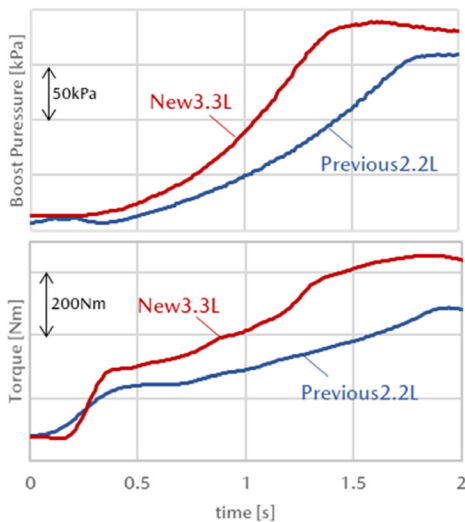


Fig. 11 Engine Torque Response

一方で、上述の大排気量化による筒内吸入空気量増加は排気ガス温度低下につながり、排気浄化システムであるDOC (Diesel Oxidation Catalyst) やDPF (Diesel Particulate Filter) の機能低下を招いてしまう問題が生じる。新型では、Fig. 12 に示すように、シングルターボチャージャー化や排気浄化システムとの締結構造小型化、及びDOC前の排気管鋼板を一体型化するなど、徹底した熱容量低減を実施した。加えて、放熱量低減策として放熱部位全体の遮熱構造強化や走行風に伴うエンジンルーム内風流れの最適化実施により、従来型同等以上の排気昇温（保温）性能を達成した。

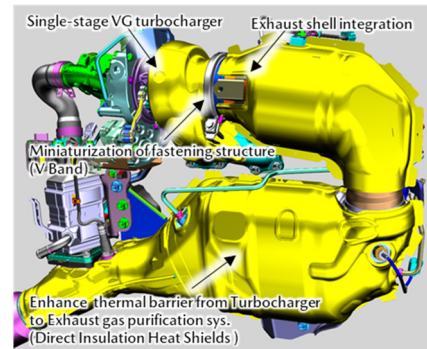


Fig. 12 Exhaust Sys. Appearance

### 4.3 大排気量での摩擦損失低減、サーマルマネージメント

新型では従来型からの筒内最高燃焼圧を低く抑えた低Pmax燃焼コンセプトの踏襲に加えて、スチールピストンと可変容量オイルポンプの採用、更には6気筒化によるバランスシャフトの廃止などにより摩擦損失の低減を図った。これにより大排気量化で通常は不利になる摩擦損失を Fig. 13 左図に示すように従来型から改善している<sup>(5)</sup>。スチール製ピストンはアルミ製シリンダーブロックとの線膨張係数の違いから実用温度帯でのクリアランスを十分に確保しつつ、小型のスカートを採用して摩擦面積を低減した。可変容量オイルポンプは各部品が必要とする要求油圧を明確にし、WLTCモードのような実用的な走行では各部品が必要とするだけの油圧を確保することで駆動ロスを低減し、高油水温の高負荷時にはアルミ製よりも温度が上がり易いスチールピストンを十分に冷却するためのオイルジェット流量を確保できる仕様としている。また Fig. 13 右図に示すように従来よりもせん断粘度を下げつつ、油膜強度や耐酸化性を向上した新開発の0W-20エンジンオイルにより更なる摩擦抵抗の低減を図っている。

サーマルマネージメントとして、筒内で発生した熱量を有効に活用して摩擦損失の大きい箇所を優先的に暖機するシステムを採用した。そのエンジン冷却水回路図を Fig. 14 に示す。摩擦損失が最も大きいピストンとシリンダーライナー部に対して、シリンダーライナー壁温を最優先で暖機する。ウォータージャケットへの熱移動を低減するために断

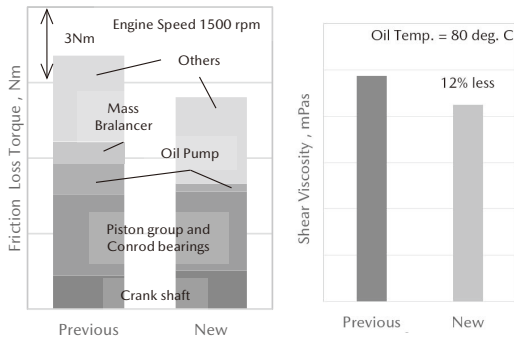


Fig. 13 Friction and Engine Oil Improvement

熱材付のWJS (Water-jacket spacer) を採用し、更にシリンダーライナーから冷却水を介した熱移動を低減するために回路のエンジン出口にCSV (Coolant Switching Valve) を採用して暖機初期にはブロック内の冷却水流れを完全に停止した。暖機中期にシリンダーライナー壁温が上昇するとオイルクーラーに冷却水を流して燃焼によって発生した熱をオイルに受け渡し、各部の摩擦損失を低減した。一方で、安定した排気性能と寒冷期の暖房性能を確保するために常時循環する経路にEGRクーラーとキャビンヒーターを設定した。WJSとCSVを採用したHi-power仕様ではFig. 15に示すようにWLTCモード平均でシリンダーライナー壁温を約10°C上昇することができた。

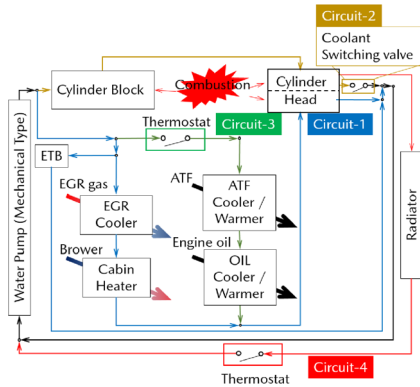


Fig. 14 Engine Coolant Control System

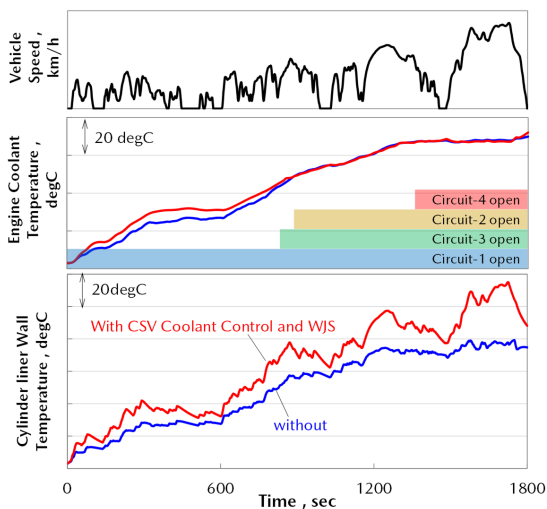


Fig. 15 Cylinder Liner Wall Temperature

#### 4.4 直列6気筒による低振動・静粛性とエンジン音創り

新型3.3Lエンジンでは直列6気筒機能もつ低振動と静粛性を更に際立たせる技術と、直列6気筒の心地良いエンジン音をアクセルペダル操作量と連動させる技術により、「走る喜び」をより向上させるこだわりの音創りを行った。

静粛性については現行2.2L直列4気筒で開発してきた燃焼加振力制御やクランクシャフトと主軸受け構造の高剛性化及び個々の部品の共振周波数の分散配置を踏襲し、加えて、音源×主要経路を一か所で集中対応するべくFig. 16に示すカプセルカバーによる車体遮音強化を新たに採用した。カプセルカバーは、初期設定した遮音構造に対し、静粛性目標を達成した上でコスト・重量低減可能な遮音構造への最適化を行った。具体的にはエンジンの各経路から伝達される部分音圧に対し目標値を定め、どの経路もほぼ同等になるように遮音構造を選定した。Fig. 17に遮音機能を強化して部分音圧を改善した部位と部分音圧を増して最適化した部位を示す。

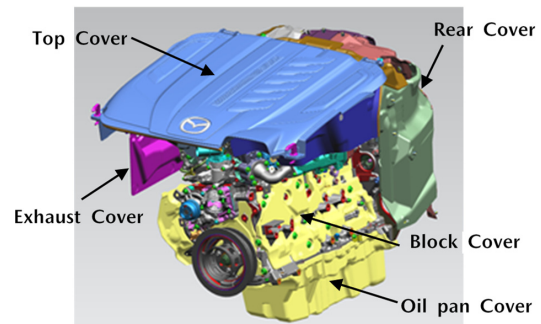


Fig. 16 Diagram of Capsule Cover

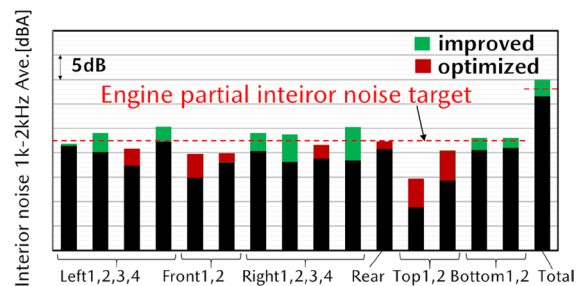


Fig. 17 Optimization of Capsule Cover

エンジン音については新型では吸気音強調技術を採用した。トルク変化に対して音源の感度が最も高いのは、Fig. 18に示すように吸気音である。そこでアクセル踏み込み時に積極的に吸気音を運転者に聞かせて新型エンジンの力強いトルクを感じさせるためにスポーツカーで実績のあるISE (Induction Sound Enhancer) を採用した。Fig. 19にその外観を示す。強調する音の周波数は直列6気筒の構造もつ回転にリニアできめ細やかな音の300~500Hzに対して力強く心地よい音となる250Hzに設定した。

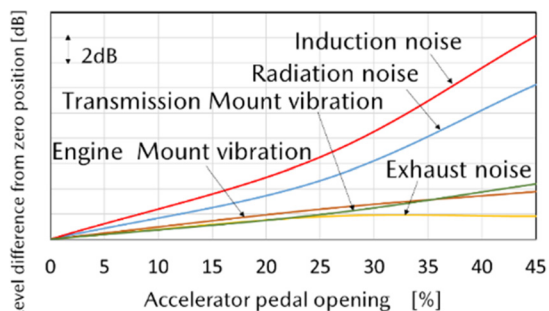


Fig. 18 Comparison of Noise Source Sensitivity

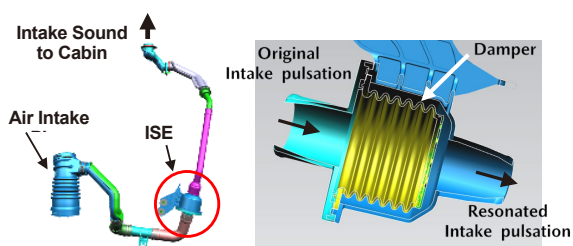


Fig. 19 Diagram of ISE (Induction Sound Enhancer)

これにより Fig. 20 に示すように運転者がアクセルを踏んだ瞬間から音を聞き取れるまでの時間を 53%短縮し、アクセル操作に対する明確なフィードバックを実現した。

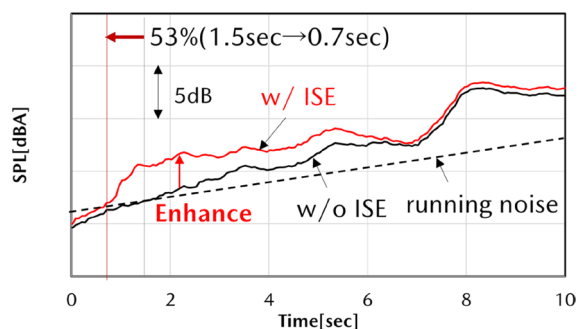


Fig. 20 Sound Effect with ISE at Accelerator Pedal Opening

### 5. おわりに

新型 3.3L ディーゼルエンジンは、初代 SKYACTIV エンジン導入時からの「適正な排気量の選択」の考え方を進化させて、新技術の採用と排気量 1.5 倍のアップサイジングによる筒内空気量増加を有効活用して、大排気量化と燃費の一般的な関係の概念を覆し、既存の 2.2L ディーゼルエンジンに対して燃費を大幅改善した。実用域の多くで熱効率 40%以上として現時点で量産されている乗用車ディーゼルエンジンで最高の熱効率を達成し、更に、走る喜びを提供する意のままに加速するレスポンス向上とトルクアップを実現した。また、クリーンな排気性能及び高い静粛性の中に気持ちのよいエンジンサウンドという新たな価値を提供することができた。カーボンニュートラル社会での一役を担うべく理想の内燃機関へ

向けてさらなる熱効率改善へ挑戦していく所存である。

### 参考文献

- (1) Mitsuo Hitomi: Both the Gasoline and Diesel Engines will be Winners, 26th International AVL Conference Graz, (2014)
- (2) 森永ほか：SKYACTIV-D エンジンの紹介, [マツダ技報, No.30, pp.9-13 \(2012\)](#)
- (3) 山谷ほか：クリーンディーゼルエンジン新型 SKYACTIV-D 2.2 の開発, [マツダ技報, No.34, pp.133-138 \(2017\)](#)
- (4) 金ほか：第 2 世代 SKYACTIV-D の燃焼技術, [マツダ技報, No.39, pp.14-20 \(2022\)](#)
- (5) 岡澤ほか：SKYACTIV-D 3.3 の開発—軽量で低燃費、低振動、高信頼性を両立した直列 6 気筒構造系技術—, [マツダ技報, No.39, pp.28-35 \(2022\)](#)
- (6) 小林ほか：SKYACTIV-D 3.3 の開発—大排気量エンジンとマイルドハイブリッドの協調による提供価値の向上—, [マツダ技報, No.39, pp.36-42 \(2022\)](#)
- (7) 志茂ほか：予混合型ディーゼル燃焼による排気と燃費の低減, 自技会論文集, Vol.44, No.6, pp.1335-1340 (2013)

### ■ 著 者 ■



志茂 大輔



皆本 洋



福田 大介



岩田 陽明



松本 大典



旗生 篤宏



岡澤 寿史



辻 幸治



森永 真一