

特集：MAZDA CX-90

03

## SKYACTIV-G 3.3T の開発 Development of Skyactiv-G 3.3T

清水 幸一<sup>\*1</sup> 山谷 光隆<sup>\*2</sup> 山口 直宏<sup>\*3</sup>  
Koichi Shimizu Mitsutaka Yamaya Naohiro Yamaguchi  
松尾 佳朋<sup>\*4</sup> 志々目 宏二<sup>\*5</sup> 西村 和浩<sup>\*6</sup>  
Yoshitomo Matsuo Kouji Shishime Kazuhiro Nishimura

### 要約

カーボンニュートラル社会に向けた再生可能エネルギーによる発電への過渡期において、Well-to-Wheel 及びライフサイクル視点で CO<sub>2</sub> を現実的かつ効果的に低減するためには、マツダは地域のエネルギー事情に応じたパワートレインを用いるマルチソリューション戦略を進めている。そのためには電動化とともに、将来の再生可能燃料の普及も見据えた内燃機関の効率改善が重要である。その 1 つの取り組みとして、新型 3.3L 直列 6 気筒ガソリンターボエンジンを開発した。内燃機関の理想を追求した高圧縮燃焼技術と、排気量を現行の 2.5L から 3.3L に拡大することによって、高出力と中低速域の力強いトルクとレスポンスを実現し、同時に高熱効率での運転を広範囲で達成した。これらによって高次元の「走る喜び」と「優れた環境性能」を実現した。本稿では、その実現に向けて導入した技術を紹介する。

### Abstract

In a transitional period to a carbon-neutral society with renewable energy power generation, it is necessary to apply a multi-solution strategy utilizing powertrains in line with regional power supply configurations, so that CO<sub>2</sub> emissions can be practically and effectively reduced from both “Well-to-Wheel” and Life cycle perspectives. With a view to the widespread use of renewable fuels in future, along with electrification, it is imperative to improve the thermal efficiency of internal combustion engines.

As part of initiatives, we have developed a new 3.3L in-line six-cylinder gasoline turbocharged engine (New-model 3.3T). With the high-compression combustion technology pursuing the ideal of an internal combustion engine and the increased displacement from 2.5L to 3.3L, this engine achieves high power, strong torque, and good acceleration response in the mid-to-low speed range as well as high thermal efficiency across a wide operating range. As a result, upgraded “driving pleasure” and “excellent environmental performance” have been realized. This paper introduces the technologies we have achieved.

**Key words** : Heat engine, Spark ignition engine, Performance/Fuel economy/Efficiency, High tumble ratio

### 1. はじめに

クルマの電動化の移行期において、Well-to-Wheel 及びライフサイクル視点で CO<sub>2</sub> を現実的かつ効果的に低減するために、カーボンニュートラル社会に向けた再生可能燃料の普及を見据えた内燃機関の効率改善が重要である。マツダは地域のエネルギー事情に応じたパワートレインを用いるマルチソリューション戦略をとっており、このたびラージ商品群のパワートレインの一つとして、「走る喜び」と「優れた環境性能」を実現した新型 3.3L

直列 6 気筒ガソリンターボエンジン（以下 新型 3.3T）を開発した。

### 2. 開発コンセプトと主要諸元

著者らのグループでは、Fig. 1 のロードマップに示したように、7 つの制御因子の理想化に取り組んできた<sup>(1)</sup>。新型 3.3T は、従来のガソリンターボエンジンの 1st Step<sup>(2,3)</sup> から、圧縮比を高めるとともに SI (Spark Ignition) 燃焼の燃焼期間と燃焼時期の更なる理想化をねらった 1.5 Step と位置付けている。

\*1~2 エンジン設計部  
Engine Design Engineering Dept.

\*3~6 エンジン開発部  
Engine Performance Development Dept.

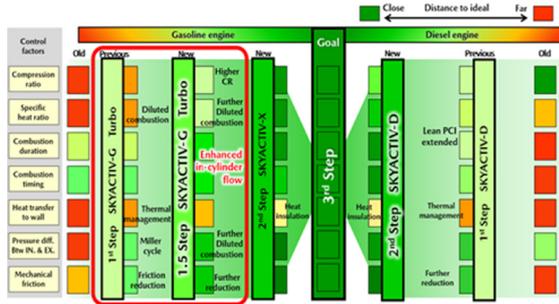


Fig. 1 Evolution Roadmap to Ideal of ICE

このロードマップを実現するための技術開発コンセプトを Fig. 2 に示す。コンセプトの柱となるのは、燃焼室内の流動強化、流動維持による SI 燃焼の進化、そして大排気量化である。現行 2.5L ターボエンジン（以下 現行 2.5T）から排気量を 3.3L へ拡大してトルクと出力を向上させるとともに、正味平均有効圧 BMEP（Brake Mean Effective Pressure）の最大値を現行よりも抑え、燃焼室内の流動強化によるノッキングを抑制し、圧縮比を 10.5 から 12.0 まで高めた。また、この流動強化によって燃焼期間を短縮化し、サイクルごとの燃焼変動を抑制した上で、外部 EGR（Exhaust Gas Recirculation）と内部 EGR 導入による希釈燃焼を拡大することにより燃費を改善しエンジン排出 NOx（以下 Raw NOx）を低減した。これらの技術により高負荷運転の広い範囲まで高効率な燃焼を実現した。ターボ過給機については、小型ターボで中低速域のレスポンスを重視している現行 2.5T に対して、排気量拡大により、中低速域のトルクが向上したことで大型ターボへ変更して高出力化を実現した。

また、排気量拡大と大型ターボによって得られた吸入空気量の増加分を、出力性能の向上とミラーサイクル領域の拡大に活用し、更にツインスクロールターボを採用することで低回転域からでも踏み込みに対して高応答でリニアな加速を得た。

加えて、新開発の燃焼アシスト始動技術によって、EV 走行範囲を拡大し、内燃機関の不得意な領域である極軽負荷域での燃費を改善した。

これらの技術によって、新型 3.3T は出力／燃費ともに優れるエンジンへと進化することができた。

マイルドハイブリッドと 8 速多段オートマチックトランスミッションとの組み合わせによって、車格の大きい CX-90 を力強く走らせるために十分なトルクと出力をクリーンかつ高効率に実現した。これらの取り組みにより得られた新型 3.3T の主要諸元を Table 1 に示す。

Table 2 に示す諸元内容やチェーンレイアウト・補機配置・車載吸気システムの配置などの基本骨格は、新世代 3.3L 直列 6 気筒クリーンディーゼルエンジン<sup>(4,5,6)</sup>と共通設計とした。使用回転数や発熱量の違いからガソリンエンジンでは過剰品質になる部分や信頼性機能強化が必要な部分には、ユニークでの個別最適化を施し、最小限の開発要素とすることで、短期間での開発を実現した。

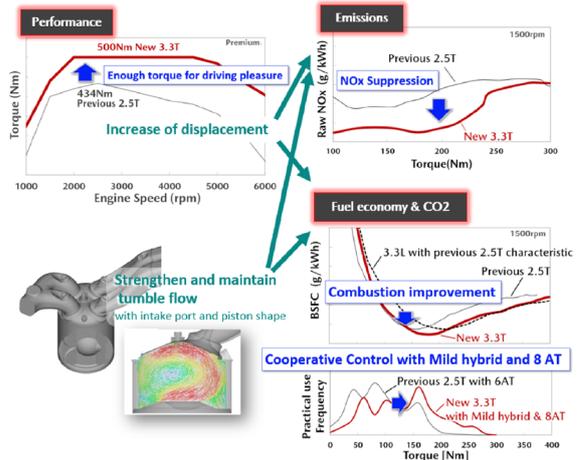
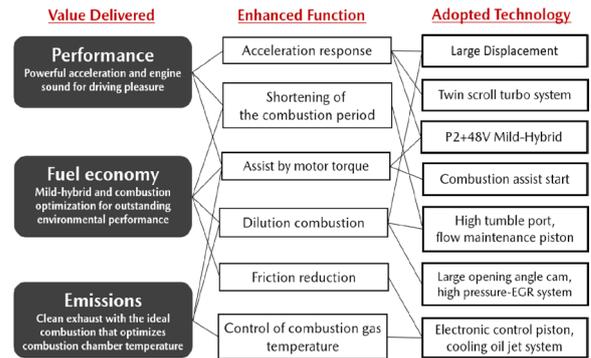


Fig. 2 Development and Technology Concept

Table 1 Engine Specifications

	Previous 2.5T (Regular)	New 3.3T Hi-power (Premium Recommend)	New 3.3T Std-power (Regular)
Engine Type	In-Line4	In-Line6 MHEV48	←
Displacement	2488cm <sup>3</sup>	3283cm <sup>3</sup>	←
Bore x Stroke	89mm×100mm	86mm×94.2mm	←
Compression ratio	10.5	12.0	←
Fuel Injection	DI (6 Hole Injectore)	←	←
Turbocharger	Single Turbocharger "Dynamic Pressure Turbo"	Twin Scroll Turbocharger	←
EGR System	HP-Cooled EGR	←	←
Intake-Valve Timing	Open (BTDC)	-24~50	-10~45
	Close (ABDC)	100~26	100~45
Valve opening angle	256	270	←
Exhaust-Valve Timing	Open (BBDC)	50~5	68~30
	Close (ATDC)	2~47	3~41
Valve opening angle	232	251	←
Max.Torque /rpm	420Nm/2000rpm	500Nm/2000-4500 rpm	450Nm/2000-3500 rpm
Max.Power /rpm	169kw/5000rpm	254kw/5000-6000 rpm	209kw/5000-6000 rpm

Table 2 Common Basic Frame

In-Engine System	Bore	86mm
	Stroke	94.2mm
	Cylinder Block Height	228.05mm
	Bore Pitch	94mm
	Pin Journal Diameter	φ52mm
	Crank Journal Diameter	φ52mm
	Intercooler Size	2.7L: 213.6×153.8×82.9mm
In-Vehicle System	LT Radiator	570×229.5×31mm
	HT Radiator	570×397.5×31mm

### 3. 性能パフォーマンス

#### 3.1 出力性能

新型 3.3T は、幅広いニーズに応えるため、Hi-Power と Std-power の 2 つのエンジン仕様を設定した。両仕様ともに幅広い領域で余裕のある走りを実現するために、排気量拡大とターボ大型化により高出力化を達成させながら、ツインスクロールターボにより低速トルクとレスポンスを向上させた。また、新型 3.3T を共通仕様で各国市場に展開できるよう E10 燃料に対応させた。

両者の出力性能を Fig. 3 に示す。最大トルクは 500Nm/450Nm を幅広い領域で発生し、最高出力は 254kw (340HP)/209kw (280HP) を達成した。現行 2.5T に対して、Hi-power 仕様では最大トルク 19%、最高出力 50% 向上、Std-power 仕様では最大トルク 7%、最高出力 23% 向上させた。これらにより低回転から高回転まで、どこからアクセルを踏み込んでも余裕のあるトルクと出力を体感できる加速性能を実現した。

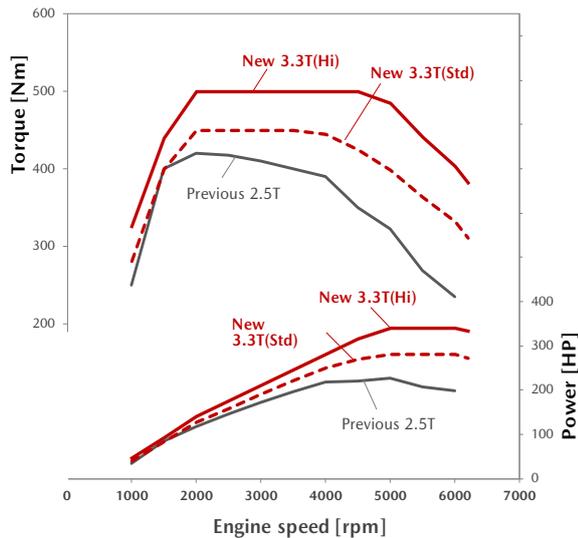


Fig. 3 Torque and Power Performance

#### 3.2 燃費性能

Fig. 4 に正味燃料消費率 BSFC (Brake Specific Fuel Consumption) の比較を示す。エンジンの燃焼効率の視点として BMEP で比較すると、現行 2.5T に対して圧縮比を高めたことで低中負荷域での燃費性能を改善し、併せて高負荷域でのノッキングによる燃費悪化を抑制した。競合スカッターバンドと比較して、世界トップクラスの低燃費を達成した。排気量を拡大しているのにトルク軸で比較した場合、低トルク域の燃費を維持しつつ中高トルク域の大幅な燃費改善となる。現行 2.5T に対して、マイルドハイブリッドと 8 速多段オートマチックトランスミッションとの組み合わせで、走行頻度の高い領域をこの燃費改善域へとシフトさせ、車両燃費改善を施した。

Fig. 5 の BSFC マップに示すように、高効率な運転領域

を広い範囲で実現しているため、実用域と考えられる領域での燃費性能向上につながると考えられる。

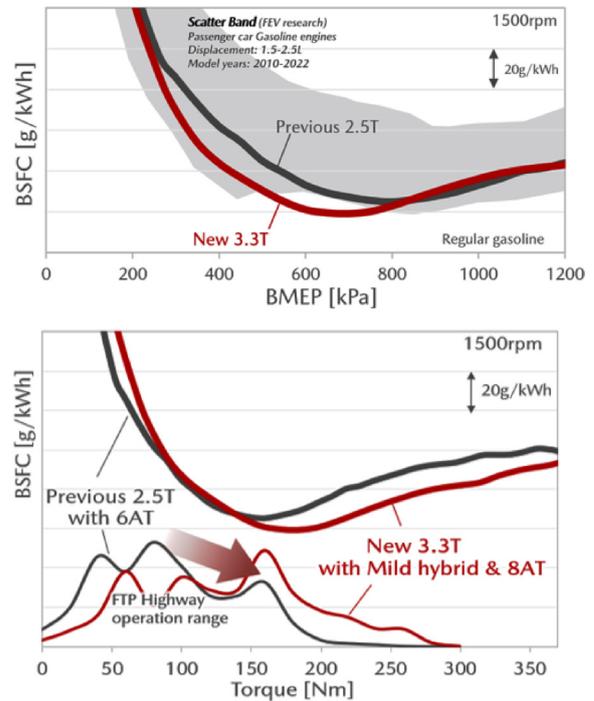


Fig. 4 Fuel Consumption Characteristic

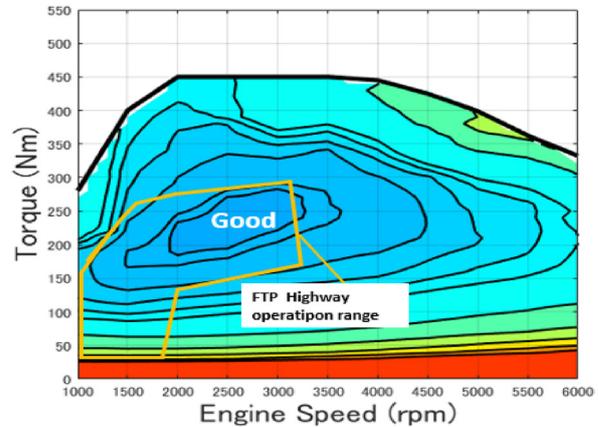


Fig. 5 BSFC MAP

### 4. 進化技術

#### 4.1 筒内流動強化による燃焼改善

新型 3.3T は、熱効率向上のために流動強化による燃焼改善に取り組み、現行 2.5T に対して点火時の乱流エネルギーを向上させるため、タンブル流動を大きく強化した (Fig. 6)。タンブル流動強化のため、吸気ポート形状は、現行 2.5T から燃焼室流入直前のエッジ形状をシャープにし、ポート上面の曲面化とを組み合わせることで流れを更に剥離させ、筒内への流動の指向性を強化することで、吸気工程でのタンブル流動の強化を実現した (Fig. 7)。Fig. 8 に示すピストン形状は、現行 2.5T のバスタブ型キャビ

ティ形状から球型へと変更して、圧縮工程でのタンブル流動を維持させている。過剰なキャビティ径の拡大は、燃焼室排気壁側に流動が衝突し、タンブル形成を阻害する傾向にあるため、流動解析と燃焼解析を繰り返し、最適な球型のキャビティ形状を設計した。また、ピストン端部にはエッジカット加工を施し、空間を設けることでクレビス部に残る未燃ガスの低減を図った。

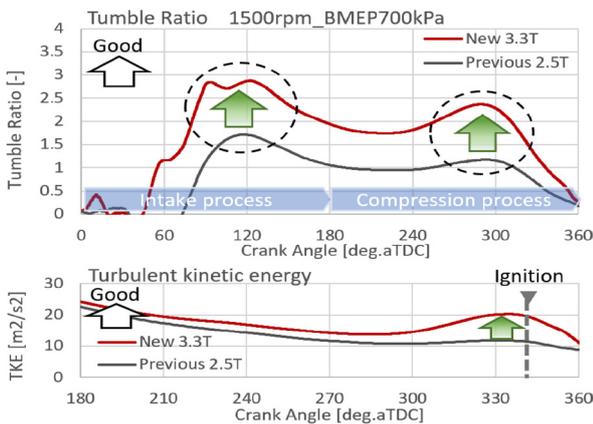


Fig. 6 Flow Strengthening from Intake to Compression Process

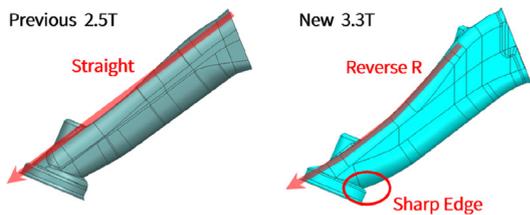


Fig. 7 High Tumble Port

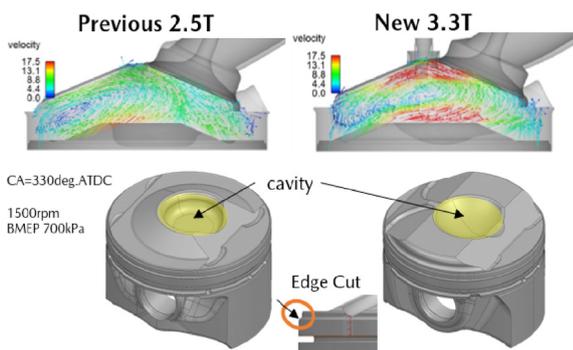


Fig. 8 Effect of Combustion Chamber Shape on Cylinder Flow

これらの流動強化により、新型 3.3T は現行 2.5T に比べ燃焼期間が短縮した (Fig. 9)。燃焼期間の短縮は、高圧縮比でありながら高負荷域でのノッキングの発生を抑制し、BMEP 軸で現行 2.5T と等価な範囲で MBT を実現した。更に排気量拡大によって、トルク軸で MBT の範囲の拡大を実現した (Fig. 10)。

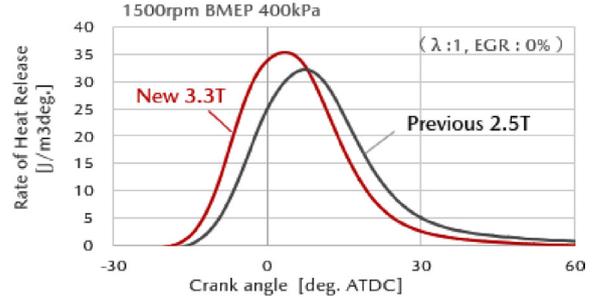


Fig. 9 Heat Release Curve

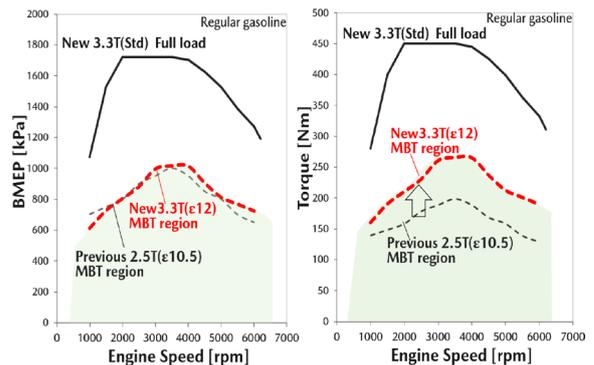


Fig. 10 MBT Region of BMEP-Axis and Torque-Axis

加えて、燃焼期間の短縮による燃焼サイクル変動の抑制は、内部 EGR 及び外部 EGR の増量による更なる希釈燃焼を可能とした。

Fig. 11 にバルブオーバーラップ量に対する燃焼サイクル変動率 COV (Coefficient of Variation) を示す。現行 2.5T に対して COV を維持してバルブオーバーラップ拡大、つまり内部 EGR の更なる導入を実現した。この燃焼低温化は、冷却損失を低減するとともに、Fig. 2 に示した Raw NOx の低減にも貢献しており、キャタリストの貴金属量低減も可能とした。希釈燃焼に加え、吸排気カムの開弁角を従来比拡大し、吸気遅閉じミラーサイクルによるポンプ損失を広範囲で改善した。これらの効率改善の内訳を Fig. 12 に示す。

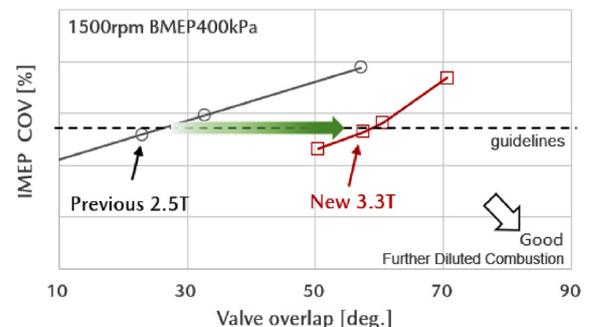


Fig. 11 Valve Overlap and IMEP Coefficient of Variation

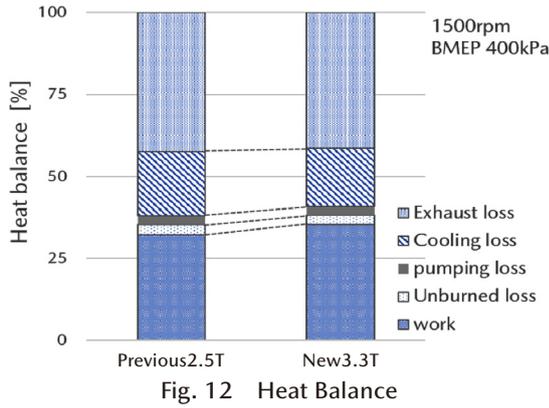


Fig. 12 Heat Balance

4.2 燃焼アシスト始動

マイルドハイブリッドを採用する新型 3.3T は、EV 走行状態からエンジン再始動時に、始動に必要なモータートルクを確保しておく必要がある。この始動用のモータートルクを低減させて EV 走行範囲を更に拡大して燃費改善を図るため、停止時膨張気筒を燃焼させ、始動用のモータートルクを燃焼トルクによって低減させる燃焼アシスト始動技術を開発した (Fig. 13)。

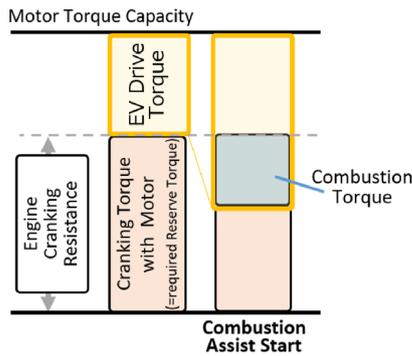


Fig. 13 Combustion Assist Start

燃焼アシスト始動は無圧縮の停止時膨張気筒を燃焼させるため、筒内流動に頼らない混合気形成と、無圧縮での低温低圧下で確実に火炎伝ばさせるための筒内残留ガスの低減が重要になる。

まず混合気形成は、噴霧噴射エネルギーによってスパークプラグ近傍に混合気を輸送する機能を、ピストン形状と燃焼室形状を最適化して実現した (Fig. 14)。

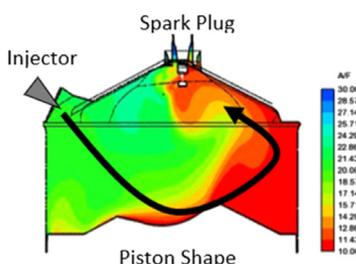


Fig. 14 Transportation of the Fuel Injection

更に噴射多段化により、燃焼噴霧の筒内壁面への付着を低減して混合気をリッチ化し、前段噴霧の混合気の流動を後段噴霧の噴射エネルギーで維持してスパークプラグへ輸送することで、着火に必要なリッチ混合気を早期に形成させた (Fig. 15)。

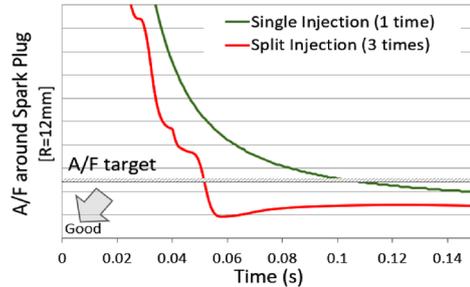


Fig. 15 CAE Result of A/F Around Spark Plug

次に筒内残留ガスの低減は、エンジン切り離し後からエンジン停止までの過程に掃気を行うことで実現する。単純にスロットルを開け、新気導入量を増やすと掃気が促進されて残留ガスの低減が可能となるが、新気導入量が増えることで圧縮反力によるクランク軸の角加速度変動が大きくなり、エンジン停止前のフロア振動が悪化する (Fig. 16-①)。

この背反を両立させるために、エンジン切り離し直後を掃気区間、エンジン停止前をフロア振動抑制区間として、まず掃気区間ではスロットルを大きく開けて新気導入量を増やすことに加え、吸気 S-VT を進角させて圧縮工程中の吸気閉タイミングを下死点側とすることで、吸気系への既燃ガス吹き返しを減らして残留ガスを低減させる。

次にフロア振動抑制区間では、圧縮反力が小さくなるようスロットルを閉じ、吸気 S-VT を遅角させることで有効圧縮比を下げてフロア振動を抑える。これらにより、残留ガス低減とフロア振動低減の両立した (Fig. 16-②)。

Fig. 17 に停止時膨張気筒の燃焼の有無でのエンジン再始動挙動の比較を示す。停止時膨張気筒を燃焼させることで、始動性能を損なうことなく始動時に必要なモータートルクを低減して EV 走行領域を拡大した。

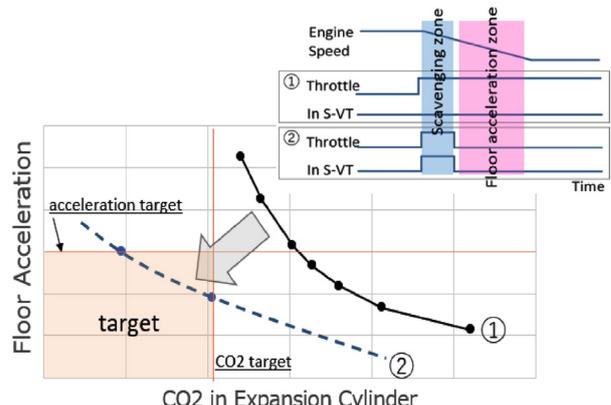


Fig. 16 Improvement of Scavenging and Floor Acceleration

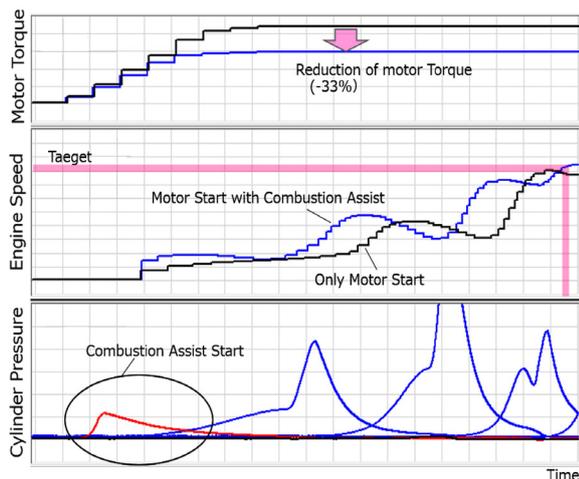


Fig. 17 Engine Restart Behavior by Combustion Assist

### 4.3 電子制御ピストンクーリングジェット噴射システム

ピストンクーリングジェットについては、現行 2.5T では一定油圧以上で噴射するチェックボール式噴射タイプを採用していたが、新型 3.3T では、電子制御ピストンクーリングジェット噴射システムを採用した。シリンダーブロック内のメインギャラリーとは別に、オイルジェット専用油路を配置し、オイル通路に油路を開閉できる電子制御バルブを設定している (Fig. 18)。

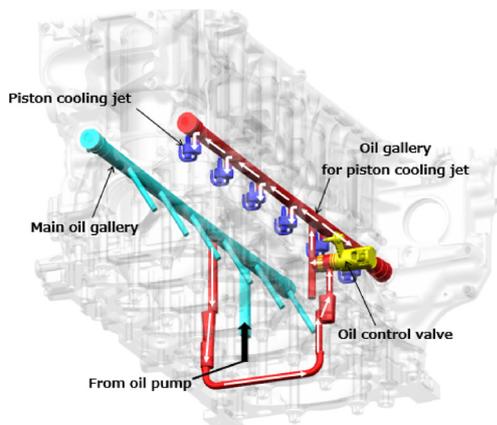


Fig. 18 Oil Jet Electric Control System

これにより、エンジン回転と負荷、油温に応じてオイルジェット噴射有無を適切にコントロールし、ピストン過冷却を抑制することで、ピストン付着燃料の低減、燃焼室の早期暖機によるクリーン排気貢献している。

Table 3 にオイルジェット噴射を抑制した領域を示す。従来の一般的なチェックボール式のオイルジェットでは、開弁圧バラツキの影響で、閉弁/開弁時の要求油圧差が生じ、オイルポンプ吐出量を増加させていた。この開閉弁機構を電子制御バルブに置き換えることで、開閉弁時の要求油圧差を削減でき、大幅にオイルポンプ吐出量を抑制した。また、メインベアリング部に鋳鉄インサートを採用することで、温間時のエンドフロー量を抑制した

効果も併せて、オイルポンプ吐出量を現行 2.5T と同等に抑制して (Fig. 19), 機械抵抗低減に貢献した。

Table 3 Oil Jet Spray Mapping

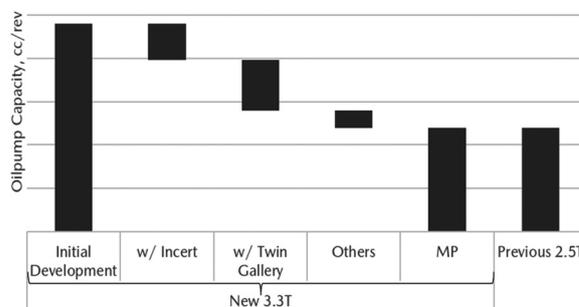
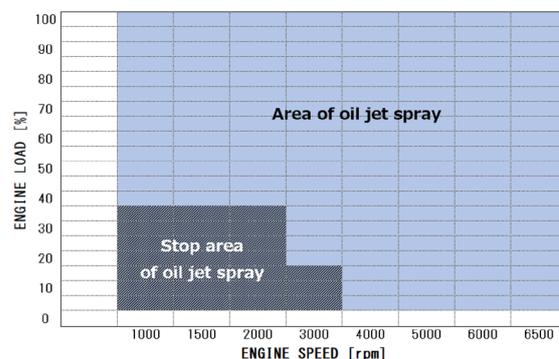


Fig. 19 Reduced Oil Pump Discharge

## 5. まとめ

1. SI 燃焼の進化とともに、排気量を 2.5L から 3.3L に拡大することで、車格の大きい CX-90 を力強く加速させるために十分なトルクと出力を達成した。
2. 排気量拡大かつ BMEP の最大値を現行より抑えることに加えて、燃焼室内の流動の強化と維持による SI 燃焼の進化によってノッキングを抑制し、現行 2.5T からの高圧縮比化を実現した。更に、SI 燃焼の進化は EGR を活用した希釈燃焼範囲の拡大を可能とし、吸気遅閉じミラーサイクルとともに、実用域の広い範囲で熱効率改善を実現し、世界トップクラスの低燃費を達成した。また、希釈燃焼による Raw NOx 低減、エッジカットを施したピストンによる Raw HC 低減でクリーン排気に貢献した。
3. マイルドハイブリッドの採用において、EV 走行状態からエンジン再始動時に、最初の膨張工程気筒を燃焼させて始動時に必要なモーター側のトルクを燃焼トルクに配分して低減させる燃焼アシスト始動技術を開発した。EV 走行範囲を拡大して、内燃機関の不得意な領域である極軽負荷域での燃費を改善した。
4. 電子制御ピストンクーリングジェット噴射システムを採用し、運転条件ごとにオイルジェット噴射を最適化して、ピストン付着燃料の抑制、及び燃焼室の早期

暖機によるクリーン排気に貢献し、従来のチェックボール式噴射タイプに比べてオイルポンプ最大吐出量を抑制し、機械抵抗低減を実現できた。

## 6. おわりに

新型 3.3L 直列 6 気筒ガソリンターボエンジンは、排気量拡大と燃焼の理想追求を柱にした技術コンセプトを、マイルドハイブリッドと 8 速多段オートマチックトランスミッションを組み合わせ、走り、燃費、排気の全ての提供価値を大幅に向上させて「走る歓び」と「優れた環境性能」を高次元で両立させることができた。

今後も内燃機関の更なる効率改善を進めながら、電気デバイスとの協調技術を進化させ、マルチソリューションによるカーボンニュートラル社会の実現に向け、「走る歓び」と「優れた環境性能」を高次元で実現していく所存である。

## 参考文献

- (1) Hitomi M.: Both the Gasoline and Diesel Engines will be Winners, 26th International AVL Conference Graz (2014)
- (2) Hirose I.: Mazda 2.5L SKYACTIV-G Engine with New Boosting Technology, 37. Internationales Wiener Motorensymposium (2016)
- (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 \(2016\)](#)
- (4) 志茂ほか: 新世代 3.3L クリーンディーゼルエンジンの開発 (第 1 報), 自技会秋季大会予稿集 (2022)
- (5) 山川ほか: 新世代 3.3L クリーンディーゼルエンジンの開発 (第 2 報), 自技会秋季大会予稿集 (2022)
- (6) 岡澤ほか: 新世代 3.3L クリーンディーゼルエンジンの開発 (第 3 報), 自技会秋季大会予稿集 (2022)

## ■ 著 者 ■



清水 幸一



山谷 光隆



山口 直宏



松尾 佳朋



志々目 宏二



西村 和浩