

特集：MAZDA CX-60

06

## 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—Development of the Skyactiv-D 3.3  
— Cooperative Control Technology for Large Displacement Engine and  
48V Mild Hybrid —

小林 徹 <sup>*1</sup> Toru Kobayashi	高木 健太郎 <sup>*2</sup> Kentaro Takaki	杉本 浩一 <sup>*3</sup> Koichi Sugimoto	皆本 洋 <sup>*4</sup> Hiroshi Minamoto	松尾 建 <sup>*5</sup> Takeru Matsuo
山川 裕貴 <sup>*6</sup> Hirotaka Yamakawa	高橋 康太朗 <sup>*7</sup> Kotaro Takahashi	大地 晴樹 <sup>*8</sup> Haruki Ohji	齊藤 忠志 <sup>*9</sup> Tadashi Saito	五丹 宏明 <sup>*10</sup> Hiroaki Gotan
錦織 大悟 <sup>*11</sup> Daigo Nishikori	中上 信宏 <sup>*12</sup> Nobuhiro Nakagami	久米 章友 <sup>*13</sup> Akitomo Kume		

## 要 約

マツダは、CO<sub>2</sub> 排出量削減の目標達成に向け、基本となる内燃機関の効率改善を進めながら、段階的に電動化技術を組み合わせていく「ビルディングブロック戦略」を推進している。今回のラージ商品群では、48V のハイブリッドシステムを新たに採用し、新規開発の 3.3L 直列 6 気筒ディーゼルエンジンと組合せた M Hybrid Boost を導入する。高い熱効率を広い範囲で達成したディーゼルエンジンと小型で低出力なハイブリッドシステムを効果的に組合せる独自の協調制御技術により、マイルドハイブリッドシステム (MHEV) でありながら減速時のエンジン切り離しを可能にし、回生エネルギーを最大化させた。またそれを走りと燃費に効率的に配分することによって、アクセル操作に忠実に追従する意のままの駆動カコントロールの進化と、同クラスのストロングハイブリッド並みの低燃費を達成し、更なる「走る喜び」と「優れた環境性能」の提供価値向上を実現した。

## Abstract

Mazda has been promoting “Building Block Strategy” that involves making improvements to the base ICE technologies first and then adding in electric devices stepwise. For Large Product group, we have adopted a 48V hybrid system and introduced M Hybrid Boost in combination with a new 3.3-liter inline six-cylinder diesel engine. We have also developed cooperative control for the hybrid system using the new engine that achieved high thermal efficiency in a wide operating range. With this unique control technology, the system can disconnect the engine during deceleration, maximize regenerative energy and efficiently allocate the energy to acceleration and fuel consumption performance. As a result, the hybrid system has achieved further evolution of driving power control that faithfully follows accelerator operation, fuel economy of Strong Hybrid car and enhancement of the value delivered by “driving pleasure” and “outstanding environmental performance”.

**Key words** : Heat engine, Compression ignition engine, Design/control, HV systems, Cooperative control

\*1~6 エンジン性能開発部  
Engine Performance Development Dept.

\*9~11 走行・環境性能開発部  
Drivability & Environmental Performance  
Development Dept.

\*7,8,13 PT 制御システム開発部  
PT Control System Development Dept.

\*12 ドライブトレイン開発部  
Drivetrain Development Dept.

## 1. はじめに

マツダは、基本となる内燃機関の効率改善を主体に、適材適所に電動化技術を組み合わせていくマルチソリューションによるCO<sub>2</sub>削減に取り組んでいる。新開発のSKYACTIV-D 3.3は、実用域で世界トップの燃費率と、どこまでもアクセルに追従する力強いトルクを達成した。M Hybrid Boostは、この高効率なエンジンに48Vハイブリッドシステムのモーターと多段化されたトランスミッションを組み合わせている。これらを効果的に協調させることにより、ストロングエンジンのメリットを最大限に活かし、優れた走行性能と環境性能を更に向上させ、高い次元で両立させることをねらいとして開発し、アクセルに即応する意のままの走りの進化とストロングハイブリッド車両並みの低燃費を実現した。

本稿では、SKYACTIV-D 3.3をより際立たせるマイルドハイブリッドシステムとの独自の協調制御技術について紹介する。

## 2. ストロングエンジン+MHEV 開発のねらい

高効率なストロングエンジンと小型モーター、及びトランスミッションの組み合わせで、効果的に環境性能と走行性能を向上させることをねらって開発を行った。この提供価値向上をねらった技術コンセプトをFig. 1に、主要諸元をTable 1に示す。これらの提供価値と具体的な技術について以降に説明していく。

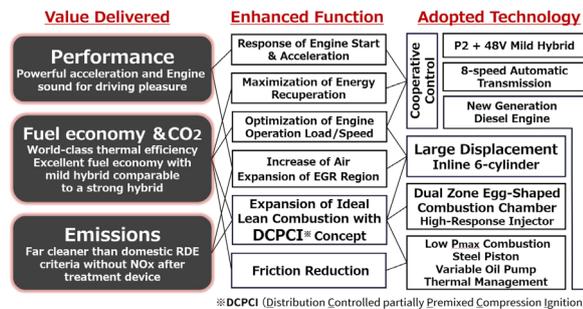


Fig. 1 Development and Technology Concept

Table 1 SKYACTIV-D and M Hybrid Boost Specifications

Engine	Engine	e-SKYACTIV D 3.3
	Engine Type	In-Line 6w/MildHybrid
	Displacement	3283cm <sup>3</sup>
	EGR system	HP & LP-EGR
	Max Torque/rpm	550Nm/1500-2400rpm
Motor	Max. Power/rpm	187kw/3750rpm
	Max Torque/rpm	153Nm/200rpm
Lithium-ion Battery	Max. Power/rpm	12.4kw/900rpm
	Voltage	44.4V
Fuel Consumption	Energy density	0.33kWh
	e-SKYACTIV D	21.1km/L
	SKYACTIV-D	18.5km/L

## 2.1 M Hybrid Boost のシステム構成

新世代 3.3Lディーゼルエンジンは広い負荷領域で燃費が良いため、容量の小さい電気デバイスでも合理的なシステムが構築可能である。そこで小型のモーターを備えた48Vマイルドハイブリッドを選択し、低抵抗の8速オートマチックトランスミッション<sup>(3)</sup>を組み合わせている。具体的な構成をFig. 2に示す。極軽負荷領域でのモーター駆動と回生エネルギーを最大化するために、エンジン切り離し機構を備えた挟み込みタイプのモーターを新規に開発した。モーターは集中巻きタイプで新型トランスミッション内に配置し、ローター内側にエンジン切り離し用の湿式多板クラッチを搭載して全長をコンパクト化している。また電圧を48Vに抑えることで小型/軽量化を実現すると同時に、①大電流化、②送電ロス低減、③各コンポーネントの性能を限界まで引き出すことで出力目標を実現した。インバーターはモーター直上に搭載し、結線距離/端子数の最小化で送電ロスを抑えるとともに、ペダルワークスペース確保に貢献している。またパワーモジュールの寿命予測解析を行い、最大電流を極限まで高めることで短時間定格トルクUPを実現した。バッテリーはリチウムイオンの12セル直列でDC60V以下として、車室外後席床下に搭載することで居住性/荷室スペースを確保した。48Vでの出力性能/頻度を満足するために、冷却は冷媒方式を採用した。また、バッテリーの充放電性能の検証により、最大電流と実効電流値を極限まで高めている。

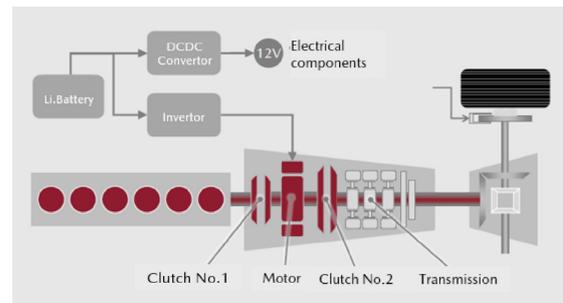


Fig. 2 System Configuration Diagram

## 2.2 協調制御のねらいと効果

効率のよいSKYACTIV-Dの特性を最大限に活かし、モーター容量の小さい電駆システムでありながらもストロングハイブリッド並みの燃費性能実現をねらった。減速時にはエンジン切り離しを行うことで回生エネルギーを最大化し、駆動時は効率上最適なエンジンとモーターのトルク配分となるようエネルギーマネージメントを行っている。また多段化されたトランスミッションのシフトパターンを低回転側に最適化することで、Fig. 3に示すように、エンジン効率の良い領域を最大限使えるようにした。特に極軽負荷領域でのエンジン切り離し走行を最大化するために、後述する Sequential Valve Timing

(以下 S-VT) と停止位置制御によりエンジンの再始動トルクを抑制し、モーターによる再始動に必要なトルクを最小化した。

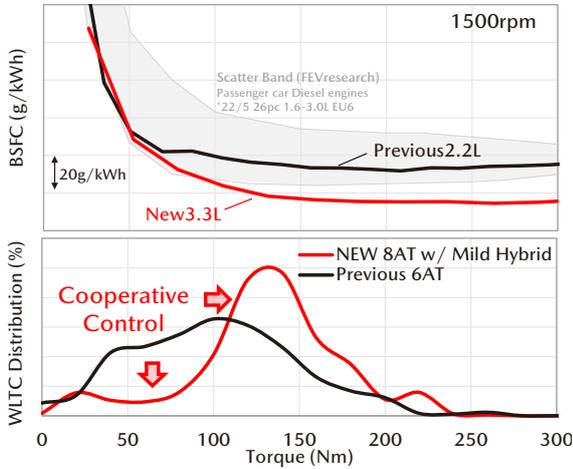


Fig. 3 SKYACTIV-D Fuel Consumption and Load Distribution by Cooperative Control with Motor and Transmission

これにより Fig. 4 及び Fig. 5 に示すとおり、WLTC モードにおいて、従来は停車時のみアイドルストップを作動させ、14%にとどまっていたエンジン停止頻度を、切り離しを行う事で 38%の停止頻度を達成している。切り離しをしない場合、6.5%の燃費改善にとどまるのに対し、エンジン切り離しを可能にすることで 12.6%の燃費改善を達成した。

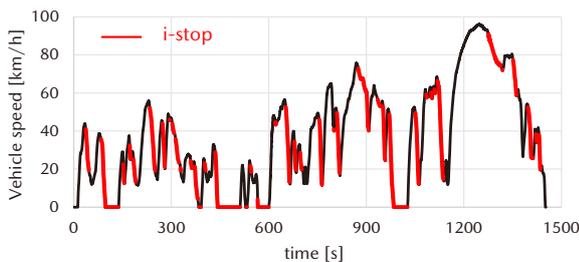


Fig. 4 i-stop Frequency @WLTC

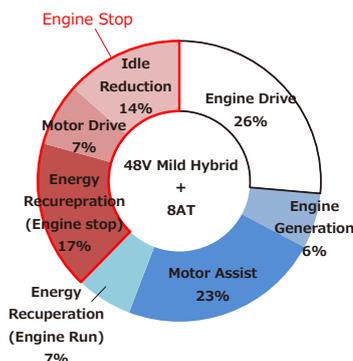


Fig. 5 Driving Pattern of 48V Mild Hybrid System + 8AT

また走行性能についても、これまで DE 精密過給制御として高めてきた空気量のきめ細やかなコントロールをベースに、高応答のモータートルクを効果的に配分させることで、過給機付きエンジンでありながらも、よりアクセル操作に忠実でダイレクトな駆動力コントロールを実現している。

これら性能を実現させるために key となる始動時クラッキング抵抗低減制御を 3 章で、個別の協調制御について 4 章で具体的に紹介する。

### 3. ストロングエンジン+MHEV を具現化する技術

走行中の燃費改善のための技術として、エンジンの切り離し範囲を最大化するためのエンジン停止/再始動時のクラッキング抵抗低減技術を新たに開発した。当シーンにおけるエンジン停止と再始動のチャート及びエンジン抵抗削減のための機能を Fig. 6 に示す。

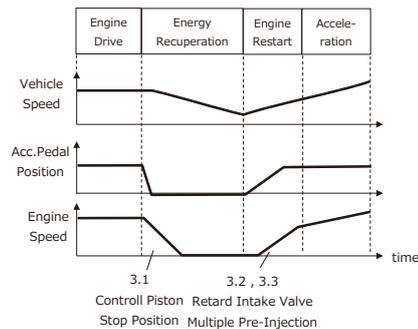


Fig. 6 Functions of the Reduce Restart Torque

#### 3.1 ピストン停止位置制御

小さなモーターによる EV 走行範囲最大化のためには、エンジン再始動時の圧縮工程気筒が上死点を乗り越えるのに必要なモーターアシストトルクを最小化する必要がある。そこでモーターアシストトルクの最小化に有効な ①再始動時の回転系慣性力の最大化、②エンジン起動抵抗の最小化に取り組んだ。回転系慣性力はクラッキング開始時のピストン停止位置に依存し、6 気筒エンジンでは圧縮行程気筒のピストンが下死点に停止した時に最も回転系慣性力が得られる。

ピストンが完全に停止する位置は停止直前の圧縮工程気筒の空気量と膨張行程気筒の空気量で決まり、両気筒の空気量を均等にできれば膨張と圧縮による釣り合いにより下死点に停止する。そこで新たに開発したピストン停止位置制御では、エンジンを切り離してから完全に停止するまでの間、インマニ圧力や S-VT 位相角をモニターして筒内の空気量状態からピストン停止位置を予測し、その結果を元に S-VT やスロットリング操作によって停止直前の圧縮・膨張気筒の空気量が均等となるようコントロールしている。停止位置制御を実施した場合の停止位置分

布を Fig. 7 に示す。再始動に必要なモーターアシストトルクが最小となる下死点（図中 180deg.BTDC）付近にピストン停止位置をコントロールできていることが分かる。

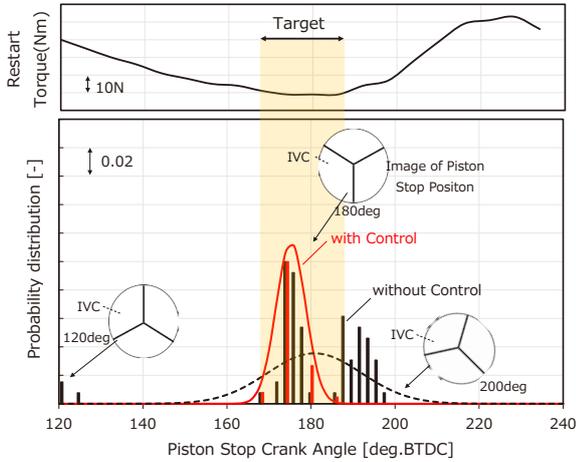


Fig. 7 Probability Distribution of Piston Stop Crank Angle

3.2 電動 S-VT によるエンジン起動抵抗の削減

再始動初期のエンジン抵抗は摩擦損失と圧縮行程気筒の圧縮抵抗で形成され、後者が支配的である。第 1 報にて報告した摩擦損失の削減<sup>(1)</sup>に加え、Fig. 8 に示すように吸気 S-VT を用いて吸気バルブを最遅角の状態で保持してクランキングを開始することで、始動時の最初の圧縮行程となる気筒の圧縮抵抗を大幅に削減する。ピストンの上昇が進んで吸気バルブが閉じると同時に吸気 S-VT の進角を開始し、以降の気筒は圧縮抵抗の低減よりも吸入空気量の増加を優先させて燃焼トルクを確保する。これにより再始動に必要な応答性を確保している。

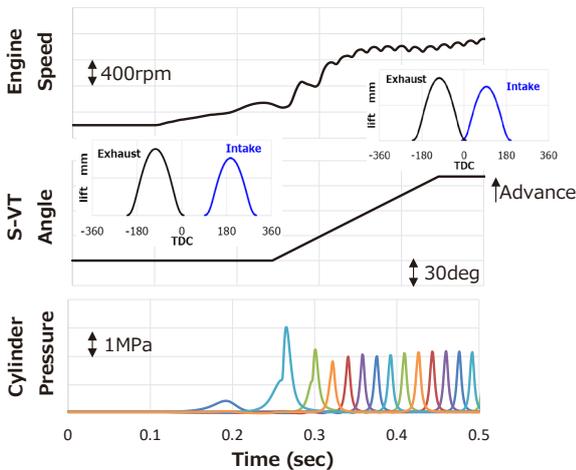


Fig. 8 Electrical S-VT Behavior at Engine Restart

3.3 少量多段プリ燃焼制御技術の拡大による着火性向上

前述の電動 S-VT によるリタード再始動により圧縮気筒の筒内温度・圧力は通常時に比べて低いいため燃料は着火

しにくい。このような筒内環境下で確実に着火させるには、燃料リッチな混合気を燃焼室内に長期間維持する多段プリ燃焼制御技術<sup>(2)</sup>が有効である。SKYACTIV-D 3.3 ではリタード状態から再始動を行うため従来機種よりも着火性が悪い。そこで従来の 3 段プリ燃焼を 7 段まで増加した。Fig. 9 に示すように従来よりもリッチ混合気を上死点まで長期間維持できている、リッチ混合気領域は緩やかに減少している。このように前段噴射の更なる多段化により再始動時の確実な着火を確保した。

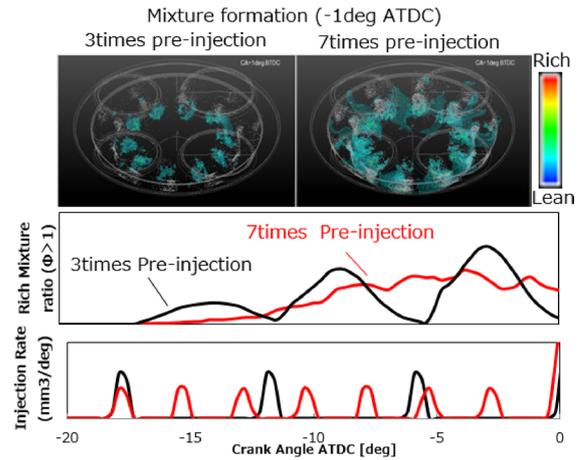


Fig. 9 Rich Mixture Formation by Multiple Pre-Injections

4. MHEV の DE への適用、個別技術

前述した MHEV による回生、EV 走行による CO<sub>2</sub> 改善に加え、DE ユニークの燃費ロス刈り取り並びに、ドライバビリティ向上にも MHEV48 技術を最大限活用した。

4.1 燃費改善：λコントロール、再生協調

(1) 過渡運転時λコントロール

SKYACTIV-D は高効率過給によってリーン燃焼を実現し燃費改善を図っているが、実運転状態によってはターボチャージャーの応答遅れが発生する。Fig. 10 に示すように、応答遅れが発生しているシーンでは、リーン燃焼の度合いを表す空気過剰率（以降、λ）が低下し、図示燃料消費率（以降、ISFC）が悪化する。SKYACTIV-D 3.3 では、大排気量へのアップサイジングコンセプトによって、こうしたシーンでもλを改善しリーン燃焼を進化させている。その上で、MHEV48 付き仕様においては、モーターアシストを活用し積極的にλをコントロールする技術を開発し実装した。Fig. 11 に緩加速時の動作概念を示す。加速中の空気量と目標燃焼トルクからλ悪化を予測し、λの悪化が大きい場合は、追加でモーターヘトルクを配分し、システムトルク同一のままエンジントルクを抑制する。その結果、同等過給圧（空気量）下で燃料噴射量を抑制し、λが上昇してリーン燃焼化することで、ISFC が改善している。なお、踏み込み量に応じて本制御

の介入量をリニアに制御し、強い踏み込み時はエンジントルクを最大限発揮させ、後述の過給応答アシストヘシームレスに切り替え、走り性能と燃費改善を両立した。

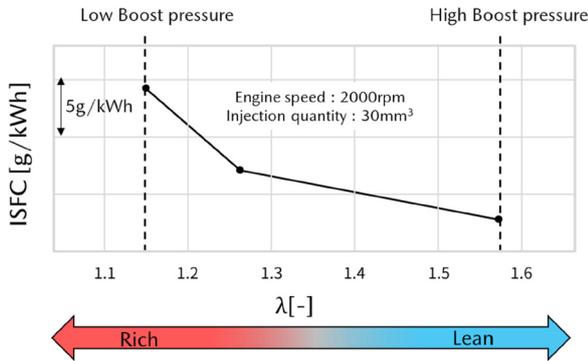


Fig. 10 Effect of Boost Delay on ISFC

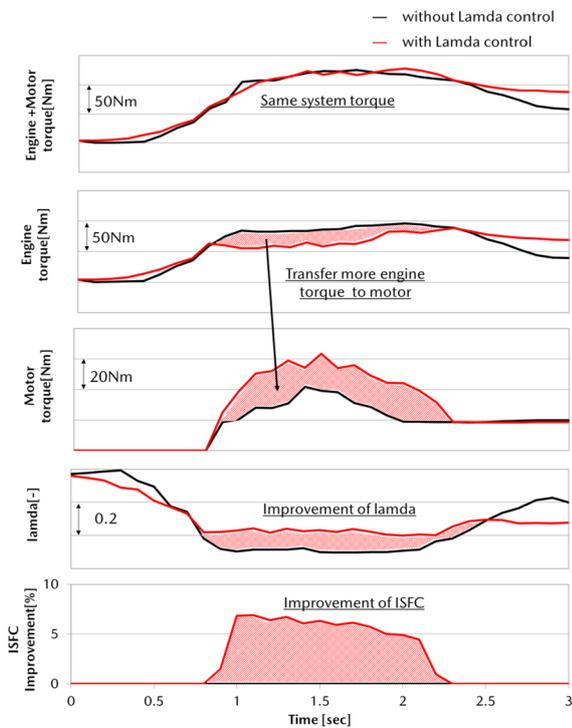


Fig. 11 Suppressing the Deterioration of Lamda at Transient Operating Condition

(2) DPF 再生との協調制御

DPF 再生制御は、堆積した煤 (スス) を燃焼させるための燃料が必要であり、通常時に比べ燃費悪化を伴う。煤の燃焼温度帯に急速昇温し、その温度帯を安定維持することが再生時間の短縮につながり、燃費悪化の抑制につながる。しかし、実際の走行シーンでは排気温度が下がる燃料カットを伴う減速シーンが多く、昇温や温度維持にロスが生じている。今回、条件を満たす減速シーンでは燃料カットは行わず、微小な燃焼トルクを発生させつつも、その燃焼トルクをモーター発電抵抗で相殺させることで、必要な減速度は確保しつつ、排気温度を確保することで、昇温早期化及び、温度の安定維持を実現さ

せた。これらにより、SKYACTIV-D 2.2 で進化させてきた DPF 再生効率を更に高め、CX-60 の優れた実用燃費性能の向上に貢献した (Fig. 12)。

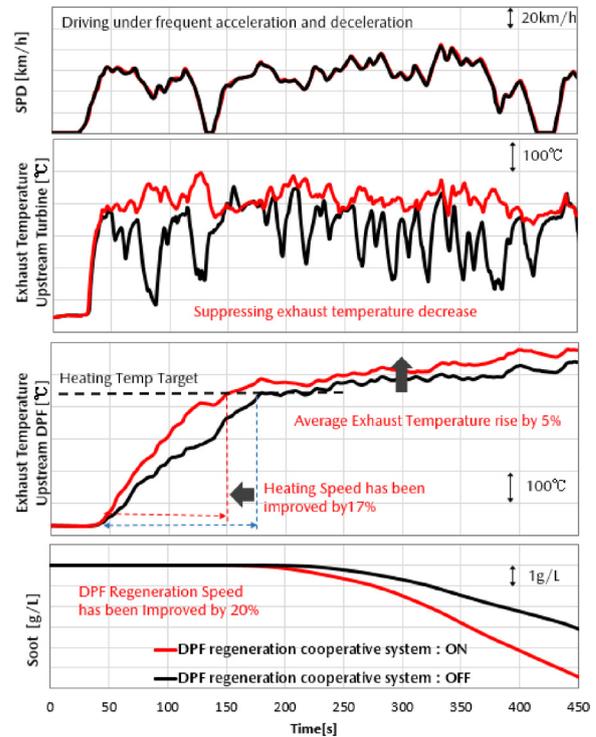


Fig. 12 Enhancing DPF Regeneration Speed and Temperature Stability

4.2 走り改善と過給応答アシスト

高応答モーターの特性を活かし、操作した瞬間から遅れなく先が予見できる初期応答と、操作に対する滑らかさ、及びコントロール幅の広さを深化させ、人間中心の走りを極めることをコンセプトに開発をおこなった。SKYACTIV-D では、大排気量化と VG ターボチャージャー + HP/LP-EGR の吸排気システムを採用しているが、これに合わせて空気系、噴射系、及びモーターの制御配分を見直し、従来制御からの刷新を図っている。

具体的には、要求加速度から定めた目標トルクに対して、まずは時定数の最も大きい空気系を主体にエンジントルクをコントロールし、過渡的に過給応答が不足する領域をモーターでアシストさせる制御構造とした。従来 HP-EGR システムに採用してきた踏み込みに応じて瞬時に適切な EGR バルブ開度へ動かすモデルベース制御を LP-EGR バルブにも適用拡大し、LP-EGR システムの課題である応答性を改善した (Fig. 13)。

またターボ制御についてもアクセル操作に応じて適切にベーンをコントロールし、定常走行時のポンプロス低減と加速時に必要な過給圧応答を確保し、燃費と応答性の両立を図っている。前述の EGR 制御との協調を効果的に使い、大排気量エンジンと組み合わせることでエンジン単体でもドライバーの意図に即応する過渡トルクを実

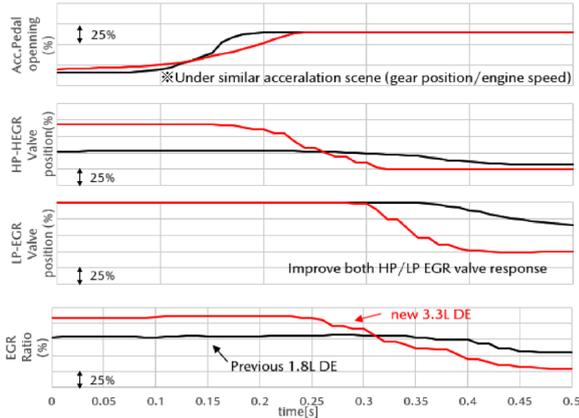


Fig. 13 HP/LP EGR Control Improvement at Transient Condition (vs 1.8L DE)

現させているが、M Hybrid Boost では、更に一段高い加速度目標を設定し、モーターでアシストさせることによって、Fig. 14 に示すとおり、より次元の高い駆動力特性を実現させている。(新型CX-60にはマツダDE初のスポーツモードを搭載しており、当モード選択時は目標加速度とともに、更に応答性に振った適合にしている。)

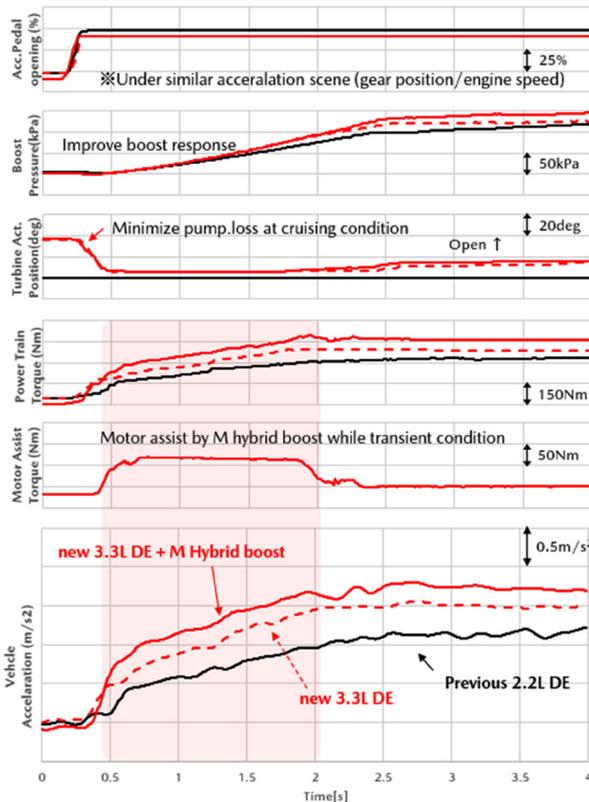


Fig. 14 Acceleration Performance Improvement with M Hybrid Boost Assist Technology (vs 2.2L DE)

なお、エネルギーマネージメントからも、必要最小限の加速アシストとし、エンジンポテンシャル以上のアシストはさせていない。またこれらトルクマネージメントをアクセル操作だけではなく、発進時や変速時のトラン

スミッションとのトルク協調シーンにも適用することで、さまざまなシーンにおいても高い応答性と連続的な駆動力特性を実現し、途切れることのない加速性能を実現した。

### 4.3 再始動制御

#### (1) 停車時再始動制御

モーターアシストと燃焼制御をドライバー操作に応じて協調させることで、迅速かつ低振動な再始動を可能にした。再始動時の振動は、エンジンの燃焼トルクによりPTの剛体共振が励起されることが主因であるが、特にディーゼルエンジンにおいては、ガソリンエンジン比イナーシャも大きく、燃焼トルクも大きいことから、この共振滞在回避が課題であった。M Hybrid Boostでは、S-VTをリタード状態で始動させ、圧縮トルク変動を低減しつつ、モーターにより共振領域以上にエンジン回転を上昇させてから着火させることで、大幅な振動抑制を達成した。またより発進応答性が求められるアクセルを踏みながら再始動させるシーンにおいても、必要最低限の燃焼トルクを与え、共振滞在を最小限に抑えつつ、クラッチ制御とも協調させることで、従来のスターター方式によるエンジン再始動に比べ大幅な応答性改善を実現すると同時に、振動のないスムーズな発進応答性を実現した (Fig. 15)。一方、エンジン停止時やアイドルストップ時にも圧縮トルク変動を入力としたPT剛体共振による振動が発生するが、S-VTとスロットル制御を組み合わせることでトルク変動を低減し、大幅な振動低減を実現した。

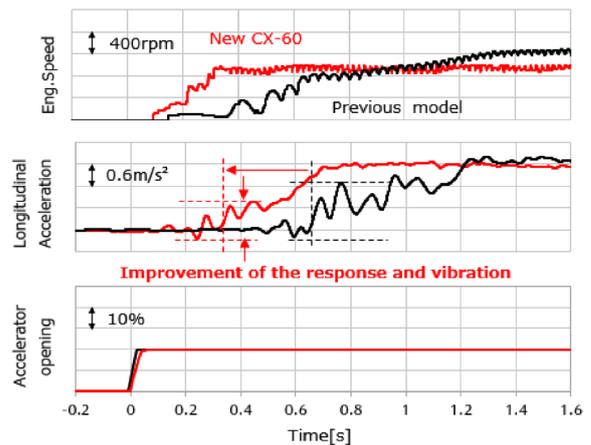


Fig. 15 Comparison of Re-Start Response from Idle Stop

#### (2) 有車速時再始動制御

限られたモーター出力であるため、走行エネルギーの一部を始動トルクとして使用することで、前述のエンジン始動トルク低減と合わせ、必要最小限の起動トルクで再始動させるとともに、エンジン、モーター及びクラッチとの協調制御によりショックと応答を両立した再始動

を実現した。

Fig. 16 に示すようにエンジン始動時は、No.2 クラッチをコントロールして駆動力変化を抑えつつ、必要最低限の走行エネルギーを始動に活用し、油圧制御性を高めた No.1 クラッチを高応答のモータートルクに最速で同期させながら、迅速に始動に必要な伝達トルクへの掛け替えを行う。更にはディーゼルならではの噴射量によるダイレクトなエンジントルクコントロールを合わせて行うことにより、始動応答と締結ショック抑制を両立させた。この際、主に回転を共通のターゲットとし、エンジン、モーター、クラッチの3者の協調制御を行っている。始動後はスムーズに駆動へつなげるべく、燃焼を開始したエンジントルクとモータートルクの掛け替えを行いつつ、No.2 クラッチも同期させて駆動力の連続性を確保している。特に、非駆動から駆動に遷移する再始動を実施する場合は、駆動系のガタをまたぐトルク伝達の非線形特性も考慮したコントロールも加えて実施している。また停車時同様に、操作に応じて各種トルクの高さと傾きを適切に変えることにより、アクセル操作に応じた応答性とショックのない再始動を両立させている。

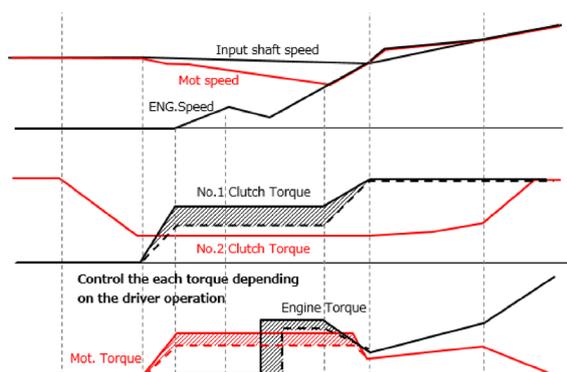


Fig. 16 Torque Control Image at Re-Start during Vehicle Travel

## 5. おわりに

新型 CX-60 の M Hybrid Boost では、新型 SKYAKTIV-D 3.3 との組合せにより、同クラスのストロングハイブリッド並み燃費である 21.1km/L を実現した。また、操作に応じたモーターやトランスミッションとの協調制御により、意のままの走りを進化させた。今後も内燃機関のさら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て、マツダ独自の価値である「走る喜び」をとおして貢献していく。

## 参考文献

- (1) 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）
- (2) 中本ほか：新型ディーゼルエンジンのアイドルス

トップ技術，第 22 回内燃機関シンポジウム，No.71（2011）

- (3) 朝倉ほか：新型 8 速 自動変速機の紹介，[マツダ技報](#)，No.39，pp.57-61（2022）

## ■ 著 者 ■



小林 徹



高木 健太郎



杉本 浩一



皆本 洋



松尾 建



山川 裕貴



高橋 康太郎



大地 晴樹



齊藤 忠志



五丹 宏明



錦織 大悟



中上 信宏



久米 章友