

特集：MAZDA CX-60

08

e-SKYACTIV PHEV システムの開発

Development of e-Skyactiv PHEV System

久米 章友 ^{*1} Akitomo Kume	福岡 泰明 ^{*2} Yasuaki Fukuoka	幸野 徹也 ^{*3} Tetsuya Kono	楠 友邦 ^{*4} Tomokuni Kusunoki	後藤 剛志 ^{*5} Tsuyoshi Goto
岡崎 真行 ^{*6} Masayuki Okazaki	中上 信宏 ^{*7} Nobuhiro Nakagami	春貝地 慎太郎 ^{*8} Shintaro Harugaichi	横手 達徳 ^{*9} Tatsunori Yokote	宮本 圭一 ^{*10} Keiichi Miyamoto

要 約

マツダは、「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030」でクルマの魅力である走る歓びによって、「地球」「社会」「人」それぞれの課題解決を目指すとして宣言した。今回、CX-60 に向けてマツダ初のプラグインハイブリッドシステム「e-SKYACTIV PHEV」を開発した。e-SKYACTIV PHEV が目指したのは、余裕を感じるパワフルで気持ちのよい走りと優れた環境性能、デイリーからウィークエンドユースに応える実用性、新しい保有体験を感じる利便性である。そこで、2.5L ガソリンエンジン+8 速 AT の間に新開発のモーターを挟みこむことで大出力/トルクを実現かつ、8 速ギヤによる滑らかな加速を実現した。また、高容量の高電圧リチウムイオンバッテリーをスペース制約のある FR の車に効率搭載して室内空間を確保するとともに、これらを高精度で制御マネジメントすることで 75km の EV 航続距離を実現した。充電装置は、満充電時間を 4 時間以内の仕様とした。また、災害時に備えて急速充電機（CHAdemo 方式）を搭載して V2H に対応できるようにした（日本仕様）。

Abstract

Mazda announced that we will seek driving pleasure—a fundamental appeal of automobiles—to help resolve issues that the earth, society and people are facing, in “Sustainable Zoom-Zoom 2030,” Mazda’s long-term vision for technology development. Mazda’s first plug-in hybrid system “e-Skyactiv PHEV” has been introduced for CX-60. Its targets are powerful and comfortable driving, outstanding environmental performance, practicality for daily and weekend use and convenience allowing for new ownership experience. Mazda newly developed sandwich type electric motor is combined with the 2.5L gasoline engine + 8 speed AT. It achieved high power/torque and smooth acceleration with the 8th gears. High-capacity/high-voltage lithium-ion battery is mounted efficiently on a vehicle to secure roomy interior space. The e-Skyactiv PHEV achieves 75km EV range by managing these components with high accuracy. The full charging time of the charging device is 4 hours maximum. Quick-Charging (CHAdemo) is adopted to support V2H in case of a disaster (Japan spec).

Key words : Plug-in hybrid, Electric motor, Lithium-ion battery, Charger, CHAdemo, V2H, High power output, EV range, Full charging time

1. はじめに

マツダは、電動化技術を「ビルディングブロック戦略」に基づいて開発している。これは、各国・地域のエネル

ギー資源/発電設備/インフラ/法規を考慮して最適な電動化技術を組み合わせることで効率的・効果的に CO₂ 排出を削減する戦略である。e-SKYACTIV PHEV では、挟み込みタイプのモーターを新規開発し、これまでの電動

*1,4 PT 制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

*5~7 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

*2,3 走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance
Development Dept.

*8~10 電駆・PT 制御部品開発部
Electric Drive & PT Control Parts Development
Dept.

化技術と組み合わせて導入することで高性能なシステムを効率的に開発した。e-SKYACTIV PHEV で目指した主な目標は以下である。

- ・ 2.5L ガソリンエンジン+8 速 AT にモーターを組み合わせた滑らかかつ力強い加速性能
- ・ デイリーユースに対応する EV 航続距離
- ・ 実用性のある充電時間性能
- ・ V2H/V2L への対応
- ・ CX-60 の室内/荷室空間の確保

次章より、e-SKYACTIV PHEV で開発した主要技術の詳細を紹介する。

2. システムの特徴

2.1 システム構成

一般的にプラグインハイブリッドシステムの方式は、パラレル、シリーズ、シリーズ・パラレルの3つの方式が主流である。e-SKYACTIV PHEV は、内燃機関+モーターでの長距離巡航や加速のつながりと最高速度に優位性があるパラレル方式を採用した。Fig. 1 に e-SKYACTIV PHEV システムの構成を示す。2.5L ガソリンエンジンと新開発の 8 速 AT の間に新開発のモーターを搭載した。モーターのローター内側には、エンジンとモーター切り離し用の湿式多板クラッチを搭載し、EV 走行と減速回生時はエンジンを切り離すことで、EV 航続距離を高めている (Fig. 2)。高電圧リチウムイオンバッテリーは、FR の構造 (車体中央にプロペラシャフトが通る) に合わせて後席床下に左右 2 分割搭載することで 17.8kWh の容量を確保した。2.5L ガソリンエンジンとモーターを合わせたシステム最大出力は 241kW、最大トルクは 500Nm を実現した。EV 航続距離は、75km を実現した。充発電装置は 2 相 7.2kW の AC 充電+CHAdemo (日本仕様のみ) を後部に配置し、V2L/V2H に対応している。

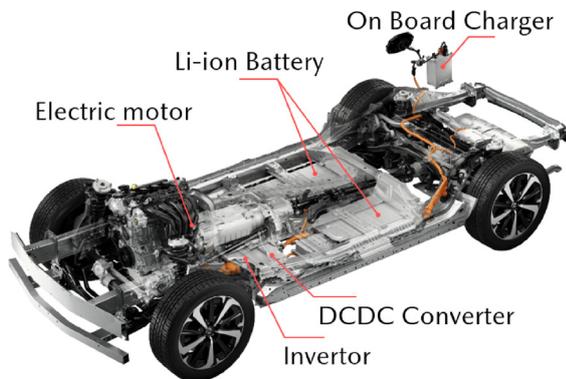


Fig. 1 Location of Main Components

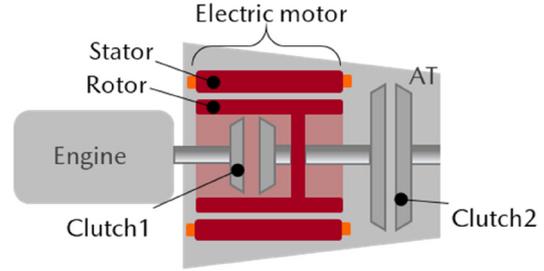


Fig. 2 Location of Engine Disconnecting Clutch

2.2 システム動作

(1) 内燃機関とモーターの動作

e-SKYACTIV PHEV の基本動作として、走り始めはガソリンエンジンを切り離して外部充電で蓄えたバッテリーのエネルギーでモーターによる EV 走行を行い、バッテリーのエネルギーがなくなった後はガソリンエンジンを始動して HEV 走行を行う。また、EV 走行中でもドライバーの要求加速度が大きければガソリンエンジンを始動し、ガソリンエンジンとモーターの出力を合わせて加速を行う (Fig. 3)。

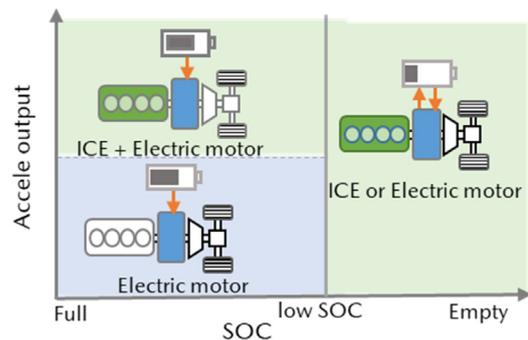


Fig. 3 Action of ICE and Electric Motor

(2) EV 走行からのエンジン始動

EV 走行からガソリンエンジンを使った走行に切り替える際のエンジン始動は、i-stop で開発したスターター始動とモーターでのクラッチ始動の2つの方式を導入した。スターター始動システムは、12V 鉛蓄電池からスターターに電力供給を行う。始動中の電装品の 12V 電源電圧保証は、サブバッテリーとスターター切離しリレーで行う (Fig. 4)。スターター始動の実施は、EV 走行中に最大出力での走行へ切替える要求が入った場合や高電圧リチウムイオンバッテリーの充電量低下時に行う。これにより、高電圧リチウムイオンバッテリーのエネルギーを始動用に保持しておく必要がないため、EV 走行時の航続距離及び最大出力性能を高めることができた。クラッチ始動システムは、Fig. 4 に示すクラッチ 1 でモータートルクをエンジンに伝達して始動する。また、クラッチ 2 を滑らせることで始動中のトルク変動が車両へ伝達するのを防いでいる。クラッチ始動は、主に HEV 走行や低出力 EV 走行から最大出力切り替え時に行う。作動頻度はこち

らがメインとなるよう設計しており、スターター始動システムの負担を抑えている。

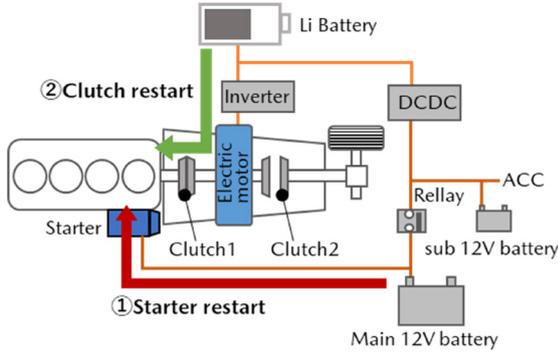


Fig. 4 Two Restart System

2.3 モーター

CX-60 のモーター設計では、M Hybrid Boost (直 6 内燃機関+8 速 AT に搭載した 48V マイルドハイブリッドシステム) と e-SKYACTIV PHEV に適した薄型のモーターが求められた。そこで、薄型モーターに適した集中巻タイプのモーターを開発し、新開発の 8 速 AT に搭載した (Fig. 5)。モーターの外径／幅を AT 本体と一体で設計することで、油路や冷却水路及び、ボルト固定点が最適化できたためモーター外周径の小型化が可能となり、ドライバーのペダルワークスペース確保に貢献した。インバーターは床下配置として、モーター下部にコネクタを配置することで線間距離を短縮して送電ロスを極力抑えている。これらと合わせ、最大出力 129kW/最大トルク 270Nm を達成した。

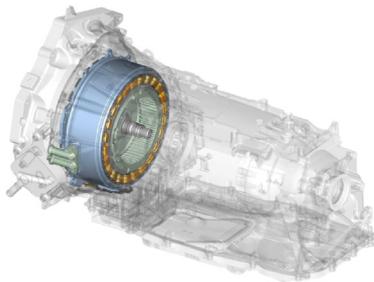


Fig. 5 Electric Motor

また、M Hybrid Boost と e-SKYACTIV PHEV 用のモーターを効率的に設計するためにスターター断面を共通化して外径を固定し、要求出力／トルクに応じて軸長を変動させる仕様とした (Table 1)。

Table 1 Adaptation of Electric Motor

	e-SKYACTIV PHEV	M Hybrid Boost
Max torque	270Nm	153Nm
Max Power	129kW	12kW
Stator diameter	266mm	266mm
Core active length	90mm	42.5mm
Cooling	Water jacket	Water jacket

2.4 高電圧リチウムイオンバッテリー

(1) 高電圧リチウムイオンバッテリー概要

CX-60 PHEV では、高容量リチウムイオンバッテリーセルを 96 個直列接続し、総容量 17.8kWh を有した高電圧バッテリーパックとして構成している。この高電圧バッテリーパックは、後席床下に搭載し、車両の低重心化と低慣性モーメント化により、マツダらしい人馬一体の運動性能に貢献している。

(2) 高電圧リチウムイオンバッテリー筐体

CX-60 PHEV の高電圧リチウムイオンバッテリーは、限られた車両空間に最大限のバッテリーを搭載するため、一般的に採用例の多い鋼板製ではなく、構造自由度が高いアルミダイキャスト製のバッテリー筐体を採用している。鋼板製のバッテリー筐体と比較して、固定構造部材の筐体活用や必要強度に応じて部分的に板厚を変更した一体成型を採用し、部品点数の 90% を削減した。

これまで、床下全面に搭載したバッテリーは衝突時の荷重影響を大きく受けるため、鋼板製に比べて低靱性であるアルミダイキャスト筐体は、不向きとされていた。そこで、モデルベースによるアルミダイキャストの破断予測手法 (Fig. 6) を確立し、一体成型による適切な板厚配分と材料選定を行うことで、アルミダイキャスト筐体の採用を実現した。採用したアルミダイキャスト材は、腐食成分が少ないため、床下被水による腐食耐性を大幅向上させている。また、バッテリーパックを車両に搭載する取付け部品に、エネルギー吸収機能をもつ押出アルミや、高張力鋼板を採用することで、衝突時にバッテリー筐体への入力を低減し、全体で最適化設計して、鋼板製バッテリー筐体に対して、質量 37kg の軽量化を実現した (Fig. 7)。



Fig. 6 Fracture Prediction for Aluminum Diecast

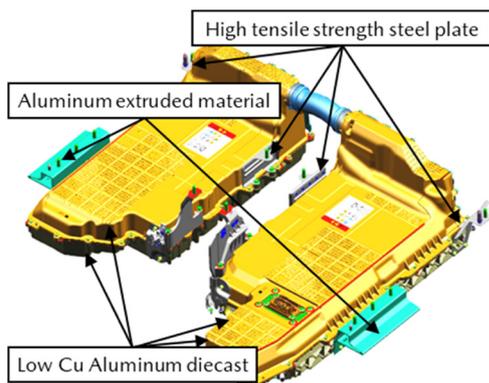


Fig. 7 Battery Pack

(3) バッテリークーリング

CX-60 PHEV では、バッテリーの温度を良好な入出力電力を発揮できる範囲に保つべく、室内空調システムと協調した、冷媒を用いるバッテリークーリングシステムを採用した。CX-60 のFR 駆動方式に合わせて、バッテリーパックは、プロペラシャフトで左右 2 分割する構造とした。左右のバッテリーパック間を接続するクーリングパイプは、排気管による高温エリアに配置されるため、バッテリークーリング用の冷媒が吸熱気化して左右バッテリーパック間で冷却能力に差が生まれないようにする必要がある。また、冷媒がコンプレッサーに液戻りしないよう熱交換器で完全に気化させることと、下流側のバッテリーモジュールまで均一に冷却することの両立が必要となる。

この課題を解決するために、CX-60 では、MX-30 で採用した電気式膨張弁に変えて、小型・シンプルな機械式の膨張弁を、左右のバッテリーパックそれぞれに搭載した。一方で機械式膨張弁は、電気式膨張弁と比較して、冷媒の流量を細かく制御できないため、バッテリーモジュールごとに 2 本の熱交換器を設定し、上流側と下流側の熱交換器を同じバッテリーモジュール下面にレイアウトするカウンターフロー方式を採用することで (Fig. 8), 冷却能力の向上及び均一化を実現した。

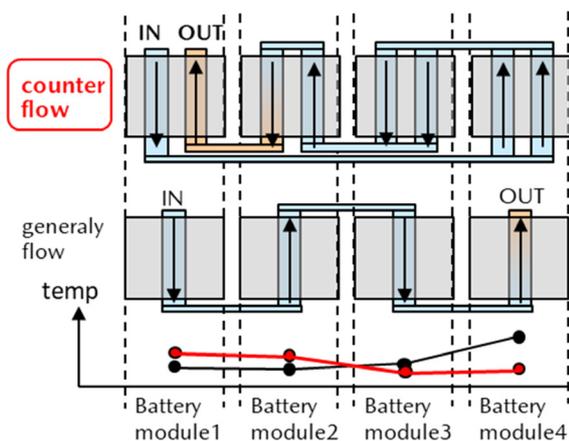


Fig. 8 Refrigerant Passage in Cooling Plate

2.5 充給電装置

(1) 充電

CX-60 PHEV では、充電時間の短縮及び小型軽量化を目的として新開発の充電器を採用した。PHEV 車両の普通充電に求められる市場のニーズを「欧州のデイリーユースにおける平均移動距離の 80% が EV 走行可能であること」と「電欠状態から就寝中または就業中に満充電になること」と定義した。上記より充電性能目標を「1 時間の充電で 20km 走行可能なこと」と「4 時間で満充電になること」と定め、2 相 7.2kW 充電器を採用した。CX-60 PHEV では 2 相対応したことにより、3 相 11kW 設備を使用した際の充電時間は、0%～満充電までを 2 時間 20 分、20～80% を 1 時間 30 分とした。また、充電器本体の小型化を行い、配置場所を従来 (MX-30) のトランク下からトランクのサイドトリム内に変更したことで荷室容量確保に貢献した。

(2) 給電

多様化するお客様のニーズに応えるため、CX-60 PHEV では 1500W の給電器をオプションで設定した。更に、災害の多い日本での緊急時の利便性を考慮し、CHAdeMO 方式の急速充電を搭載して V2H に対応させている。

3. e-SKYACTIV PHEV の特徴

3.1 ドライビングパフォーマンス

プレミアム車を操るドライバーの「大きな力を解き放ちたい」という期待に対し、同期が感じられるようにドライバーの操作に対するクルマのフィードバックの領域を拡大し、心の活性化を“昂る”レベルまで高めることを目指し以下の 2 点に注力した。

(1) 大トルク／高出力

(2) 緻密な駆動力制御

(1) 大トルク／高出力

2.5L ガソリンエンジンと最大出力 129kW / 最大トルク 270Nm のモーターの組み合わせで 3.3L/6 気筒ディーゼルエンジンを凌駕する駆動力を実現している。これにより、CX-60 のラインナップでトップレベルの性能を実現した (Fig. 9)。

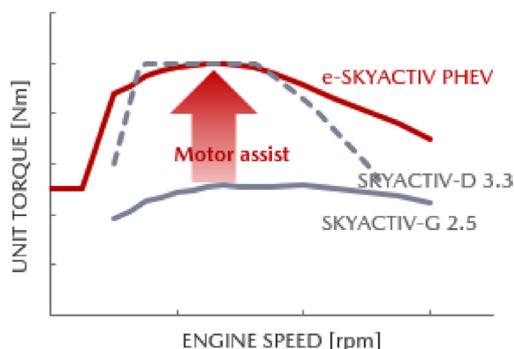


Fig. 9 UNIT TORQUE

(2) 緻密な駆動力制御

モーターの応答の良さとアクセルペダル操作精度の向上により緻密な駆動力コントロールを実現し、操作に対する車両挙動の一致性を高めている (Fig. 10)。

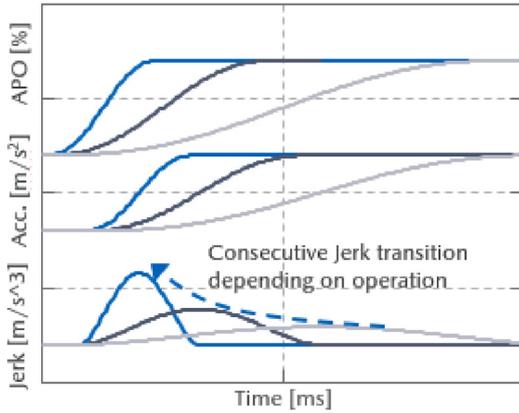


Fig. 10 Acceleration and Jerk

a. モーター応答性

PHEV では、モーターの応答性の良さを活かしてアクセル操作に対する加速度の立ち上がり応答時間をエンジンのみの場合の 150ms に対し 90ms まで短縮している。これにより緻密なコントロールの領域を拡大している (Fig. 11)。

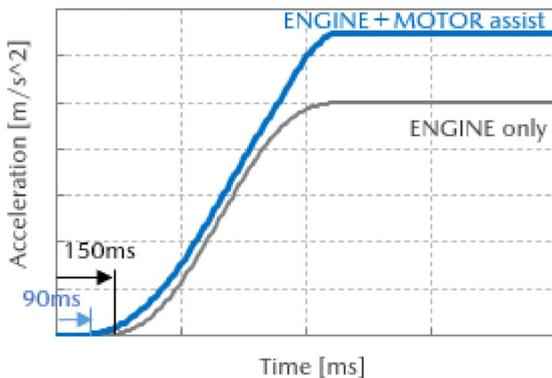


Fig. 11 Acceleration

b. アクセルペダル操作精度の向上

アクセルペダル操作精度の向上を実現するため、歩行運動に着目し、主動筋 (ふくらはぎの筋肉) による自然で滑らかな操作ができるペダルの踏力特性を目指した。CX-60 では踏み始めから主動筋のみによる操作を実現している (Fig. 12)。

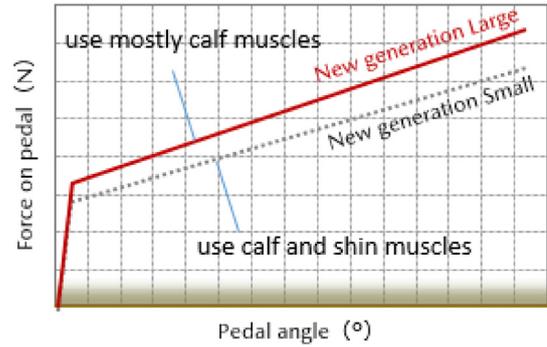


Fig. 12 Accelerator Pedal F-S Target

3.2 最適な走行モードの選択

CX-60 PHEV では、Mazda intelligent Drive Select (Mi-Drive) に NORMAL/ EV/ SPORT の走行モードを設定している。EV 走行と HEV 走行を両立したいお客様には NORMAL モード、日常での EV 走行を最大限活用されるお客様には EV モード、エンジンとモーターの動力性能を最大限楽しみたいお客様には SPORT モードを選択していただくことで、それぞれの楽しさを提供できるよう工夫した。

NORMAL モードでは、アクセル操作に応じてリニアにトルクがつながるように EV 走行と HEV 走行を切り替えて走行を行う。EV モードではバッテリーに十分電力がある際、アクセルを全開にしない限り EV 走行を続け、市街地や郊外などの一般的な走行シーンにおいて、お客様に電動走行を提供できる。これにより、平日の通勤や買い物等の近距離の使用において、電気自動車としての使用が可能となる。また、EV モード選択時には、モーターからタイヤまでの全体効率最適点を計算したシフトパターンを設定し電費の向上に貢献している。SPORT モードは自己主体感を高めることを目標に、ドライバーがアクセル操作で車を正確にコントロールする感覚を得るため、加減速の応答の速さや強さを高めている。また、NORMAL モードに対し、低速ギヤを使うことに加えて電動モーターアシスト量を増やすことで駆動力を高め、大トルクを思いどおりにコントロールするアクセル操作性を実現している (Fig. 13)。

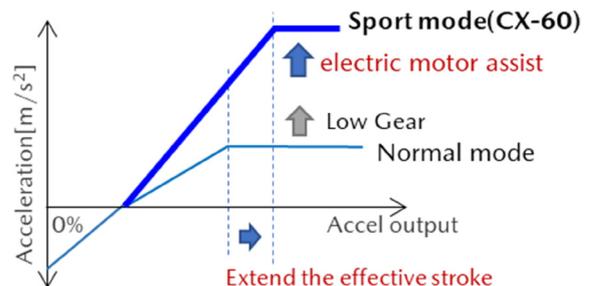


Fig. 13 Accelerator Pedal F-S Target

3.3 HEV 走行開始時の排気ガスのクリーン化

日常でのEV走行中にバッテリーの電力が減少し、HEV走行に切り替える際、エンジン始動から排ガスを浄化するための触媒が活性するまでの間、エンジンとモーターを協調させることで安定したクリーンな排ガス性能を実現した。新規開発要素としては、触媒暖機中のエンジン出力Up, 走り/NVH（振動）との整合、燃焼切り替え（状態遷移）の対応である。

触媒暖機中のエンジン出力Upは吸入空気量が増え、排気ガスの絶対量も増えることから、規制成分である全炭化水素（THC）低減と背反してしまう。このブレイクスルーは従来の均質燃焼から成層燃焼に切り替えることで達成し、成層燃焼をベースから見直すことで、Fig. 14のようにエンジン出力として最大150NmまではTHCを従来比半減させることができた。

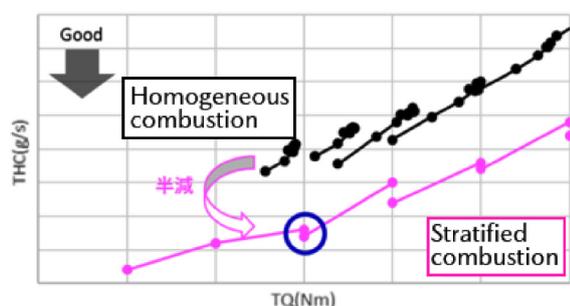


Fig. 14 Reduction of THC

更にTHCの排出量を低減した状態で安定させるために、エンジンは一定トルクをキープすることを基本とし、ドライバーが要求する出力を満足するためにモーターで過不足分を補い、協調させることで、排ガス性能と走りとNVH（振動）の各背反性能に対して、高い次元での成立解を見出した。

3.4 HEV 走行でのCO₂改善

CX-60は高出力モーターと大容量バッテリーを利用して、減速時には大きなエネルギーを蓄えることができるため、摩擦ブレーキと回生ブレーキを積極的に協調させることで回生率を向上させた。低速時のエンジンの燃費率が悪い領域では、バッテリーに蓄えたエネルギーでEV走行し、中高速時のエンジンの燃費率の良い領域では発電やモーターアシストを利用しエンジンがより効率の良い領域で動作するように制御した。これらの効果でHEV走行時のCO₂を改善した。

4. おわりに

e-SKYACTIV PHEVは、走る喜びと優れた環境性能において、CX-60のコンセプトであるドライビングエンターテインメントSUVにふさわしい性能を実現できた。マツダは2050年でのカーボンニュートラル化に向けて、ク

ルマのライフサイクルでのCO₂排出削減に取り組んでおり、今後も、マツダらしい電動化技術の進化に挑戦していく。

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) 吉田ほか：新型デミオ向けバッテリーマネジメントシステムの紹介, [マツダ技報, No.29, pp.14-19 \(2011\)](#)

■著者■



久米 章友



福岡 泰明



幸野 徹也



楠 友邦



後藤 剛志



岡崎 真行



中上 信宏



春貝地 慎太郎



横手 達徳



宮本 圭一