

特集：MAZDA CX-60

07 SKYACTIV-D 3.3 の開発における MBD プロセス革新と適用

MBD Process Innovation and Application in the Development of Skyactiv-D 3.3

宮崎 正浩^{*1} 小林 謙太^{*2} 角田 良枝^{*3} 加藤 雄大^{*4} 村井 亜樹^{*5}
 Masahiro Miyazaki Kenta Kobayashi Yoshie Kakuda Yudai Kato Aki Murai
 久禮 晋一^{*6} 福田 大介^{*7} 城 侑生^{*8} 山口 能将^{*9} 志茂 大輔^{*10}
 Shinichi Kure Daisuke Fukuda Yukio Jo Takayuki Yamaguchi Daisuke Shimo

要 約

CX-60 搭載の新世代クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 3.3 では大排気量化と燃焼の理想追及に加えて、48V マイルドハイブリッドとトルコンレス 8 速 AT を組み合わせた独創的な技術によって、「走る喜び」と「優れた環境性能」をこれまでにない次元にまで高めた。その開発を可能にしたのが 1D モデルを用いた MBD プロセスである。エンジン／電駆／Drive Train (DT)／車両の各ユニットを 1D モデルでつないで、走り／燃費／エミッションの全てを満足する機能をハードと制御に最適に配分する機能開発の理想を追及した。本稿ではこの MBD プロセスと代表的な適用事例について紹介する。

Abstract

The new clean diesel engine Skyactiv-D 3.3 equipped with the CX-60 offers through its unique technology with a large displacement volume and improved combustion, and combined with a 48V mild hybrid and torque converter-less 8-speed AT, has taken “driving pleasure” and “outstanding environmental performance” to an unprecedented level. What made this possible is the MBD process, which thoroughly pursues a hardware and control system that balances all of driving, fuel efficiency, and emissions by connecting the functions of each unit of the engine/electric drive/drive train/vehicle with a model. This paper introduces this MBD process and its applications.

Key words : Diesel Engine, MBD, MILS, Functional Development

1. はじめに

マツダが目指す Model Based Development (以下、MBD) は「走る喜び」と「優れた環境性能」の両立を実現するため、MBD を単なる効率化のツールとしてではなく、機能開発の理想を追求するツールとして用い、その結果として独創的な SKYACTIV テクノロジーを生み出すことである^(1,2)。その MBD プロセスの概念を Fig. 1 に示す。具体的には、モデル構築と精度確保、ハード／制御システムへの機能配分 (1D)、詳細設計 (3D) から成る

V プロセスの左バンクにおいて、目指す商品性能を達成するための機能すなわちメカニズムの理想を徹底的に追求し、それをコントロールするための有効な方法を、各ユニットのハードと制御に配分することに重きを置いている。そのためには、各機能をコントロールするハードや制御の設計因子の変化が、最上位にある車両性能としての価値に効率的につながるかどうかを把握しながら検討する必要がある。このためエンジン／電駆／Drive Train (DT)／車両の各ユニットの機能をつないだ 1D モデル環境を準備する。1D モデルで適切に配分した機能目標に

*1,4,7,10 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*3,6 PT 制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

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

*2,5 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

*8 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

対し、ハード側はそれを実現する仕様を 3D 設計モデルにより決定し、制御側は 1D モデルを用いた MILS (Model In the Loop Simulation) 環境上で評価して制御仕様を決定する。

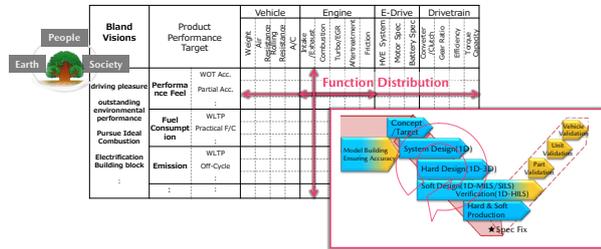


Fig. 1 MBD Process in Mazda

新世代クリーンディーゼルエンジンにおいては Fig. 2 に示すように大排気量と燃焼の理想追及に加えて、48V マイルドハイブリッドとトルコンレス 8 速 AT との組み合わせによって走りと環境性能を大幅に高める開発構想とした。本稿では、この構想をシステムとして具現化するために用いた MBD プロセスとモデル環境、その具体的な適用事例について紹介する。

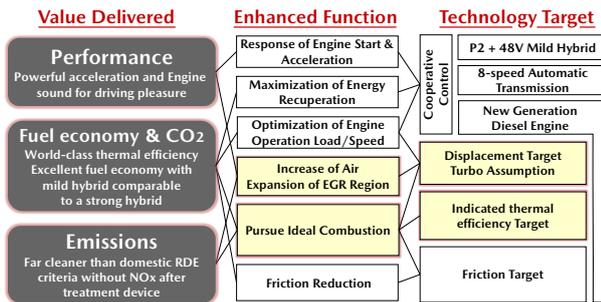


Fig. 2 Development Concept of New Generation Diesel Engine

2. モデル環境

2.1 つながる 1D モデル

提案する MBD プロセスにおいては車両としての性能目標とそれを確実に実現するシステムを決定するため、開発の初めにエンジン／電駆／DT／車両／制御の各ユニットの機能をつないだ 1D モデルを準備する。ここでの 1D モデルとは特に 1 次元であることを意味しているわけではなく、物事の本質を的確にとらえ、見通しの良い形式でシンプルに表現したモデル群を示す。走り、燃費、エミッションの各性能は相互に背反関係にあることが多く、また各ユニットのハード能力とその制御の相互影響で決まるため、それらを 1D モデルで考慮しながら各ユニットと制御への機能目標を配分していく。また、グローバルに商品展開する中で、多様な使い方（アクセル／ブレーキ操作）や使用環境（外気温度、高度、勾配、積載量）に対しての、ロバストな性能担保や信頼性の確

保が必要である。これについてハード能力と制御によってロバスト性を担保できるように 1D モデルで検証する。このようにして各ユニットのハードと制御に配分された機能目標に対して、詳細な 3D 設計や実装制御設計を行い実現手段となる技術の仕様を決定する。その過程でさまざまな制約によって機能目標の達成が難しくなった場合は 1D モデルに戻って機能の再配分や目標の見直しを行う。このようにして 1D モデルを開発初期から開発完了までの目標管理の規範モデルとして運用する。

検討に用いる「つながる 1D モデル」の概念図を Fig. 3 に示す。開発段階、検討目的によって必要なサブモデルとその詳細度が異なるため、必要十分な機能と粒度を備えたサブモデルを用いることが肝要となる。エンジンユニット、サーマルモデルには、空気流動・燃焼・伝熱等の過渡応答遅れを伴う物理現象に支配されるエンジンの過渡性能を再現するために、比較的粒度の細かいモデルをベースとし、必要に応じて機能的に抽出したマップモデルを用いている。更に、サーマルモデルにおいてピストンやシリンダーヘッド等の信頼性に関わる温度制約の考慮が必要な場合には 3D-FEM とも連携させる。一方で、電駆／DT／車両モデルには、機能の配分が可能で比較的粒度の粗いモデルを用いている。制御ユニットモデルは、開発初期は机上専用で作成した簡易モデルを、後期には MATLAB/Simulink で書かれた実装制御を用いている。これらサブモデルにおける注力点について、以降で説明する。

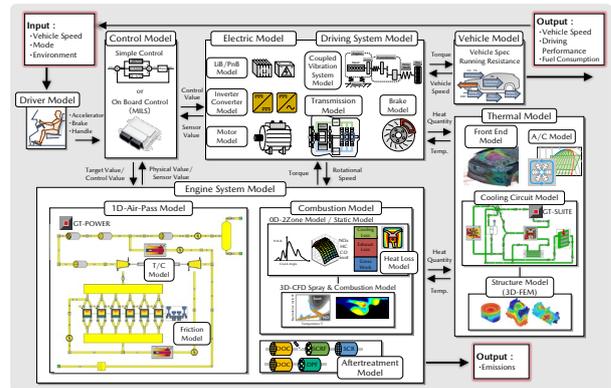


Fig. 3 Schematic of 1D Functional Model

2.2 エンジン吸排気モデル

マツダのディーゼルエンジンは、高過給、高 EGR と多段噴射によるさまざまな燃焼形式を用いることによって高いレベルで走りと排気性能の両立を目指しており、これを机上で検討するためには性能を支配する各部温度や圧力、流量といった状態量を過渡的に精度良く予測する必要がある。これを実現するために、エンジン吸排気の 1D ツールとして業界内で広く使われ、物理式を 1 次元的に解く GT-POWER を採用し、既存エンジンに対して

モデル改善を行ってきた。特に、過給モデルに対しては高精度なリグ計測により、タービン/コンプレッサの翼車効率と熱損失を切り分け、モデル化を行うことで高精度な性能予測を可能とした (Fig. 4)。また、燃焼モデルは GT-POWER 内の DIPulse モデル、マツダ内製の 2 領域簡易燃焼モデル⁽³⁾、既存エンジン特性を取り込んだ統計モデルを検討目的に応じて使い分けるが、新しい燃焼を扱う場合には 3D-CFD の予測を用いる場合もある。いずれにおいても熱効率を支配する因子を正しく切り分け、モデル化することで各々の機能への配分を可能としている。このように物理式に基づき、支配する機能因子ごとにモデル化することで新規のエンジン開発においても正しく性能を予測することが可能となる。

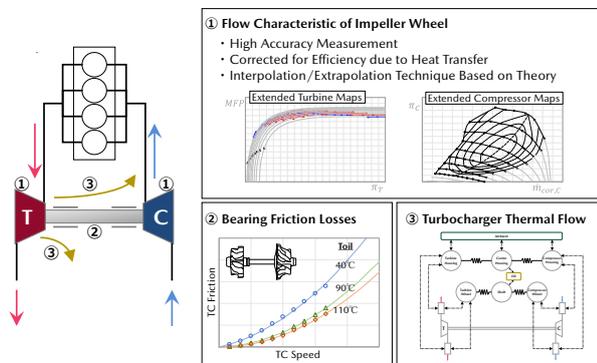


Fig. 4 Functional Modeling of Turbo

一方で、一般的に詳細な 1D モデルは計算コストが高く、他ユニットモデルとの連成や数多くの検討に対しては不向きである。この点は開発が進むほどにモデル活用の障壁となる。そこで、本開発においては、精度と計算コストの最適なバランスをとり簡素化した Fast Running Model (FRM) を構築し、更に GT-POWER をより高速に演算可能な GT-POWER-xRT ソルバーを適用することで、詳細モデル同等の精度を確保しつつ計算時間を 1/60 にまで短縮し実時間よりも速く演算可能とした。これにより開発上流から下流まで 1 つのモデルを再利用し続けることが可能となり、開発段階ごとのモデル精度確保を容易にし、モデル環境整備の効率化を実現した (Fig. 5)。

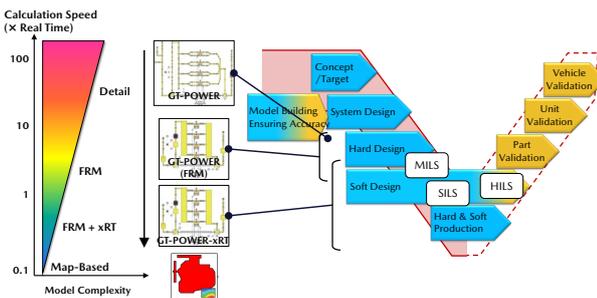
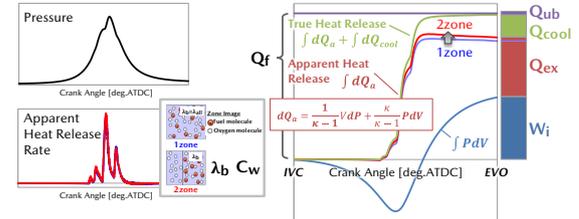


Fig. 5 Improvement of Calculation Speed and Model Application to V-Process

2.3 エンジン熱勘定モデル/サーマルモデル

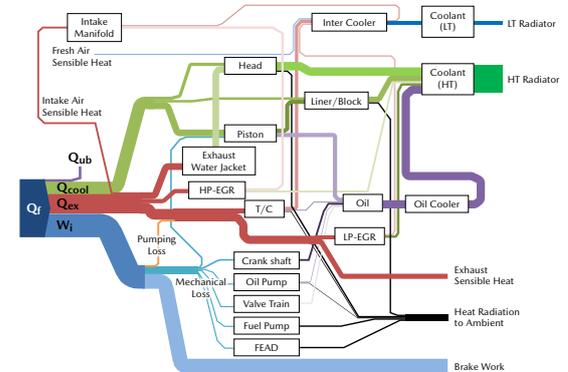
システム最大の発熱源であるエンジンの熱勘定モデルについての工夫を Fig. 6 に示す。ディーゼル燃焼によって発生する冷却損失と排気損失はエンジン筒内、LP-EGRクーラー、インタークーラーを介して高温、低温冷却水回路に入熱され、冷却水を通じて電駆デバイスやトランスミッションに影響を与える。従って、ディーゼル燃焼における熱勘定を正確に行うことは確度の高いサーマルマネージメント解析を実施する上での鍵となる。熱勘定については、計測されるトルクや指圧線図から正味仕事、ポンプ損失、機械損失を求めた上で、指圧線図の解析から得られる見かけの熱発生率の積算値と、投入熱量から未燃損失を除いた真の発熱量との差を冷却損失とする手法がある。この際、比熱比の扱いが結果に大きく影響するが、実際のディーゼル燃焼は燃料が空間的に不均質に分布するため、燃焼が起きている局所の当量比や比熱比の変化を模擬する必要がある。マツダはこのようなディーゼル燃焼の不均質さを簡単に模擬するための 2 領域簡易燃焼モデル⁽³⁾を構築し、計測データに基づく熱勘定推定の高精度化を図った上で、さまざまな運転条件において筒内冷却損失の推定を可能とし、これを用いてエンジンユニットモデルの筒内冷却損失に関する熱伝達率に掛かる係数 (Cw) を同定した。これに基づき式 (1) に示す回転数 (NE)、筒内状態量 (燃料噴射量: Qinj, 吸

In-Cylinder (Heat Balance Analysis)



$$C_w = a + b * NE + c * Q_{inj} + d * P_{in} + e * T_{in} + f * CA_{10} \quad (1)$$

In-Engine Unit (Thermal Flow Analysis)



- λ_b : representative excess air ratio of the burned zone
- C_w : heat transfer correction factor
- Q_f : fuel energy
- W_i : gross indicated work
- Q_{ex} : exhaust loss
- Q_{cool} : cooling loss
- Q_{ub} : heat loss due to incomplete combustion

Fig. 6 Heat Flow Model in the Engine

気圧：Pin, 吸気温度：Tin), 燃焼開始時期 (CA10) など説明変数とする Cw の重回帰式を構築し, あらゆる運転条件における冷却水回路に対する入熱量予測精度を向上させた。

新世代クリーンディーゼルエンジンの冷却システムの開発においては, お客様の多様な使い方や環境条件におけるエンジン本体の冷却性能の確保, エンジン燃焼に対する最適な吸気温度の実現, 電駆部品の効率最適化のための温度コントロールが求められた。このような冷却, 温調要求に対して最適な冷却システムの選定や各ユニット間における機能配分や機能成立性検証を効率的に実施するために, 車両全体における発熱や放熱などの熱流れを再現した 1D モデルを構築し, 開発に適用した。新世代クリーンディーゼルエンジンに採用している冷却システムを Fig. 7 に示す。空調用コンデンサーの後方に高水温回路と低水温回路のラジエーターが上下に分割された形で配置されており, それぞれエンジン本体系, インタークーラーやモーターなどの電駆部品を冷却している。ATF に関しては高水温回路による昇温/冷却と, 低水温回路による冷却を 2 つのバルブによって切り替えることが可能である。また制御デバイスとしてはウォーターポンプや, 冷却水切替バルブ (CSV), グリルシャッターが存在し, 要求された温度を実現するための各部の流量や, フロントエンドの熱交換器に当たる風速を制御することができる。これらの熱交換器の特性や, 冷却回路の配管圧損, 冷却水熱容量などを 1D モデルで考慮した冷却回路システムモデルを前述の「つながる 1D モデル」に組み込んだ。

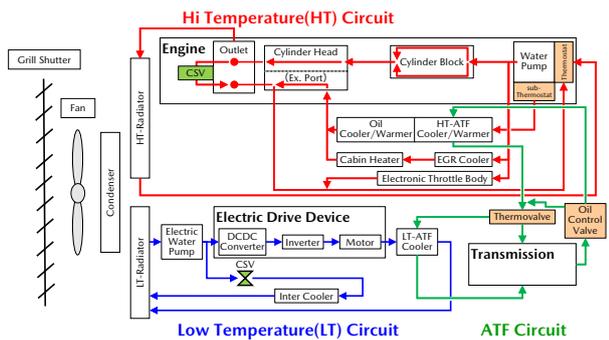


Fig. 7 Vehicle Cooling System

2.4 制御モデル

ディーゼルエンジンの性能は空気系や噴射系の制御によって大きく変化する。また, 電駆や DT との機能配分を行うためには各ユニットを協調させた状態での検討が必要となる。これを開発の早い段階で実現するために, 前述のエンジンユニットモデル, サーマルモデル等と制御モデルを連成させることで制御を含めた多くの机上検討を行えるようにした。開発初期のハードや制御システムの構想段階においては, 機能のつながりが分かりやすく,

ハードとの機能配分が容易である簡易的な制御モデルを作成し用いた。一方で, 開発が進んだ段階においては MATLAB/Simulink にて作成された量産ソフト向け制御モデルを用いた。この量産ソフト向け制御モデルは大規模であるため, C 言語化することで計算コストを抑える高速 MILS 環境⁽⁴⁾ というマツダ独自のシミュレーション環境を構築している (Fig. 8)。この際, 従来の高速 MILS では GT-POWER で作成されたモデルとの連成が難しかったため, Functional Mock-up Interface (FMI) という連成機能に対応させた。FMI とは, さまざまなツールベンダーが提供するモデルのやり取りや統合をツールに依存せずに行うためのオープンな規格に則った連成機能であり, この機能へ対応したことにより, 高速 MILS 環境は多くの CAE ツールとの連成が可能となった。

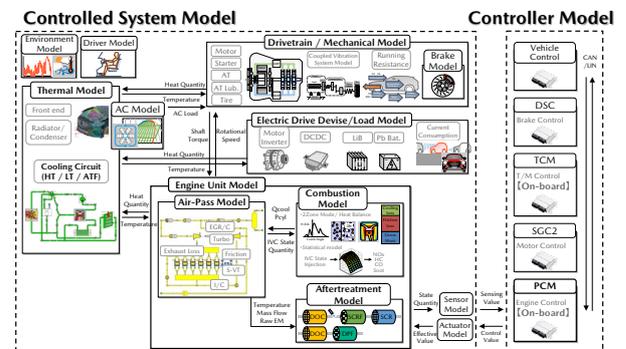


Fig. 8 Schematic of High Speed MILS

3. MBD 適用事例

3.1 走り, 燃費, エミッションを両立させる排気量検討

本項では, 新世代クリーンディーゼルエンジンの排気量選定における MBD 適用事例について紹介する。一般に過給ディーゼルエンジンにおいては, 燃費・エミッション (特に NOx) 性能と走り性能は背反する関係にあり, この関係をブレイクスルーする手段として新世代エンジンでは燃焼の機能強化と併せて大排気量化を採用している。この大排気量化について, 各性能目標を満たしうる最適値を開発初期に選定するために, 「つながる 1D モデル」による検討を行った。検討において, 燃焼の機能強化については Fig. 3 のモデル環境のうち, エンジンモデルに別報⁽⁵⁾ で紹介している熱効率の支配因子の機能配分を前提として反映した。また, 過渡的なガス流動変化の影響度が高く比較的短いモードが検討対象の走り性能には, モデル粒度が細かい GT-POWER を, 長いモード計算を対象とする燃費・エミッションの検討では計算コストを下げるために各特性をマップ化したモデルを用いた。このように, 検討に応じて適切なモデルを使用し効率的に検討を進める工夫をした。

燃費・エミッション検討において前提としたエンジン

ユニットのNOx排出量、燃費率特性を Fig. 9, 10 に示す。NOx 排出特性は、排気量増加した分だけ EGR 導入が可能となるため、Fig. 9 のように大排気量ほど高負荷まで NOx を低くすることが可能である。一方で燃費率特性は、Fig. 10 左図のように、軽負荷側では排気量が小さいほど燃費率が良くなり、高負荷側では逆転し大排気量ほど燃費率が良くなる。これは Fig. 10 右図のように従来エンジンが中高負荷でフラットな燃費率特性であるのに対して、新世代エンジン燃費率目標は空間制御予混合燃焼 DCPCI (Distribution Control partially Premixed Compression Ignition) を BMEP 1200kPa 程度まで適用する前提で、中負荷に極小がある燃費率特性としていることによるものである⁽⁵⁾。これらの特性を用いた燃費・エミッションの検討結果例として Fig. 11 に RDE (Real Drive Emission) 走行における車両 NOx 排出量 (上段) と、WLTC 走行での車両燃費の既存エンジンに対する改善率 (下段) を示す。横軸は WLTC 走行時の必要走行エネルギーで、値が大きいほど重量や走行抵抗が大きいことを表し、新世代エンジンを搭載する Large 商品群で想定される幅を振って検討している。RDE 走行における NOx 排出量は、ユニットの NOx 排出特性が排気量に対して上述の Fig. 9 のような特性であるため、高負荷使用頻度が高くなる重い車両では大排気量ほど NOx を低減でき、排気量を 3.3L 以上にすることで重い車両まで含めて目標値を達成できることが分かる。一方で、WLTC 燃費は上述の Fig. 10 のユニット燃費率特性によって、軽負荷使用頻度が高い軽い車両側では排気量増加によって燃費が悪化するが、高負荷使用頻度が増加する重い車両側では排気量増加によって燃費が同等もしくは改善効果が

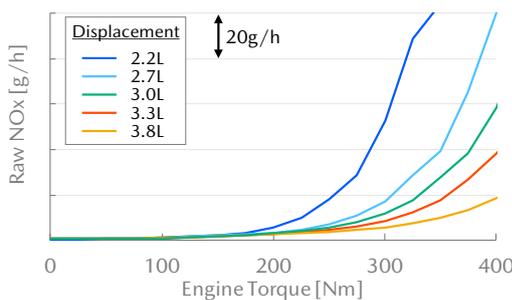


Fig. 9 NOx Characteristic with Different Displacement

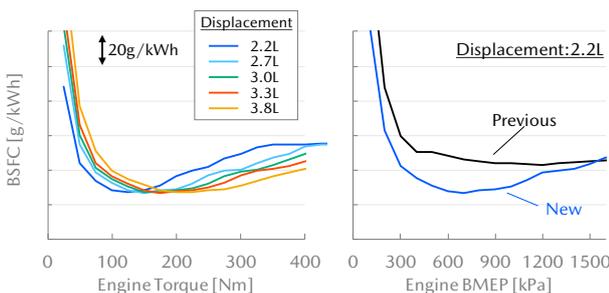


Fig. 10 BSFC Characteristic with Different Displacement

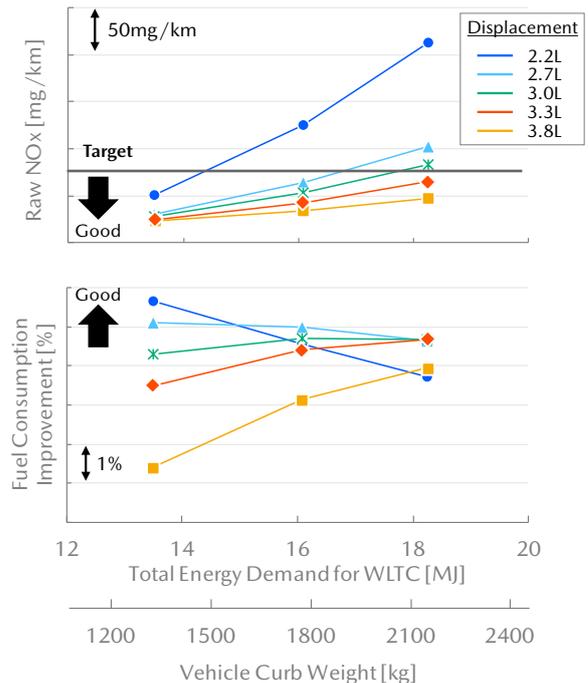


Fig. 11 Engine Displacement Study Results for NOx & Fuel Consumption

得られることが分かる。以上のように、Large 商品群で想定される車両走行エネルギーの幅をカバー可能な RDE の NOx 排出量と、WLTC の燃費のバランスから排気量 3.3L が最適値となる。

次に、走り性能の検討例として Fig. 12 に排気量 3.3L での 30km/h 定常走行からのパーシャル加速の予測結果を示す。排気量選定に併せて、目標加速度達成のために低速域の応答性を重視した仕様のシングル可変ジオメトリ (VG) ターボチャージャーを Fig. 4 で示した過給モデルを用いて選定している。排気量増加とシングル VG ターボチャージャーによって確保した空気を使うことで、NOx 低減のための十分な EGR を導入しながら、従来の 2.2L よりも大幅な加速度の向上が可能となっている。また、モーターとの協調により、目標とする走り性能の実現が可能であることが確認できた。以上のような検討を市場において重要であり、かつエンジンユニットにおいて各性能の両立が難しいいくつかのシーンで実施し、選定したシングル VG ターボチャージャーとの組み合わせによって、3.3L が各性能目標を満たすに必要な十分な排気量であることを確認した。

3.2 大排気量コンセプトのロバスト性検証

エミッション性能は環境や走り方に応じて EGR バルブや過給器などを制御して燃焼に適切な吸気ガス状態を作り出すとともに、緻密な噴射コントロールによって実現される。これに関わるハードデバイスには製造バラツキや使用による劣化が存在し、一方で先述のように市場においては多様な環境、走り方が存在する。これらの要素

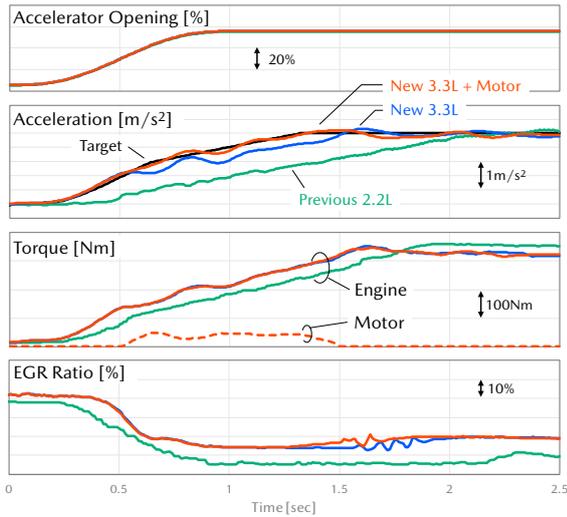


Fig. 12 Acceleration Performance Study Results

は当然のごとくエミッション性能に影響するが、どのような状況下であってもクリーンなエミッション性能が担保できていることが要求される。そこで、Fig. 8 に示した高速 MILS 環境を用いてエミッション性能のロバスト性検証を実施した。結果を Fig. 13 に示す。図下段に示すように、EGR バルブや過給器、インジェクターなどの製造バラツキの上下限での評価や、エミッションに対して最も厳しいと想定される環境、ドライバー操作での評価を実施している。このような評価は、バラツキによるハードの特性変化や、環境条件違いによる影響を正しくモデル上で表現することが肝要であるが、評価に用いた高速 MILS 環境は物理式ベースのエンジンモデルを採用することで、それを可能としている。評価結果として、図上段に示すように、あらゆるバラツキを加味しても、どのエミッション値も規制値以下となることが確認できた。

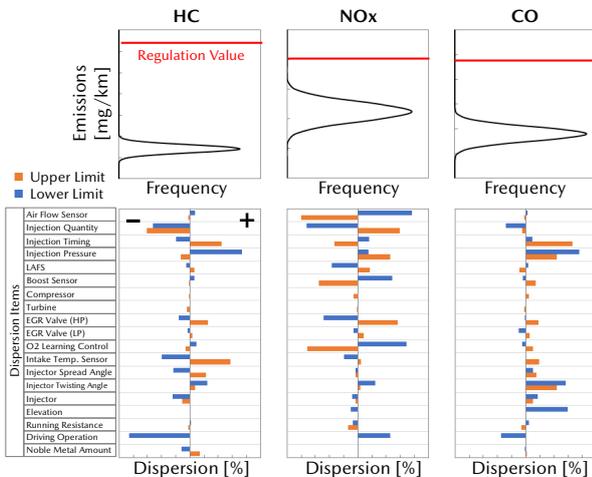


Fig. 13 Robust Study Results for Emissions

次に走りのロバスト性の検証事例について紹介する。マツダは「意のままの走り」を提供することに価値を置いているが、その実現のためにはあらゆるアクセル操作

に対して適切な加速度応答が求められる。このため、エンジンユニットはアクセルに応じたリニアなトルク応答を返す必要がある。この要求に対して、選定した排気量 3.3L+ 電駆システムの性能検証を Fig. 8 の高速 MILS 環境を用いて実施した。Fig. 14 にその結果の一例を示す。加速度とその微分値である躍度を走りの指標として整理している。アクセルの操作としては踏み込み量と速度をパラメーターとし、環境条件や製造ばらつきで最も悪影響を受ける条件も評価している。図のように、アクセル操作に対して、特異な点は認められず、アクセル操作量に対してリニアな応答が確認できる。

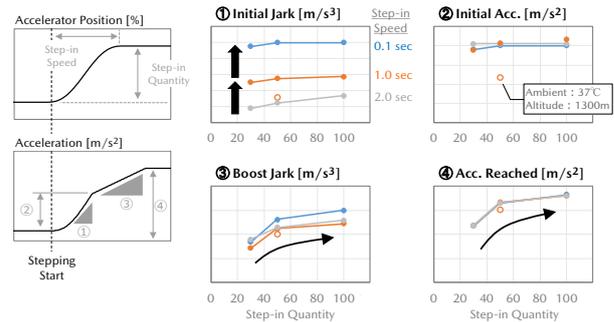


Fig. 14 Robust Study Results for Acceleration Performance

以上のような性能のロバスト性検証は、従来は全て実車を用いて行っていたが、上記のように 1D モデル環境を活用して実車ではポイントを絞った確認のみとすることで、試作車両台数と評価期間の短縮に貢献した。

3.3 ENG、電駆への LT サーマル機能の最適配分検討

ここでは WLTP における冷却システムに関連した機能開発事例を紹介する。前述のとおり新世代クリーンディーゼルエンジンの冷却システムに対してはエンジン燃焼や電駆部品の効率を最適化するための冷却水温度制御が求められており、制御デバイスとしてウォーターポンプ、CSV、グリルシャッターが存在する。ウォーターポンプ、CSV は要求された冷却水温度を実現するための冷却水流量、グリルシャッターはフロントエンドにおける必要熱交換を実現するための熱交換器通過風量を制御しているが、消費電力の増加や空気抵抗の悪化といった燃費悪化因子も持ち合わせおり、背反性能を考慮した協調的な制御が重要となる。そこでエンジン吸排気モデル、サーマルモデル、に加えてウォーターポンプ、CSV、グリルシャッターに関連する部分を抽出した制御モデルを連携させた「つながる 1D モデル」を活用し、エンジン燃焼や電駆部品から要求された低水温回路の冷却水温度を実現した上で、消費電力や空気抵抗悪化が最小となる制御デバイスの動かし方の机上検討を試みた。Fig. 15 に検討結果を示す。低水温回路の冷却水温度をエンジン燃焼や電駆部品の効率に加えて、エンジンから発生する凝

縮水も考慮し最適な温度を実現した上で、消費電力や空気抵抗悪化が最小化できていることが分かる。結果として0.55g/kmのCO₂改善を達成することができ、本検討で構築したウォーターポンプ、CSV、グリルシャッターの制御ロジックを実車制御に実装した。

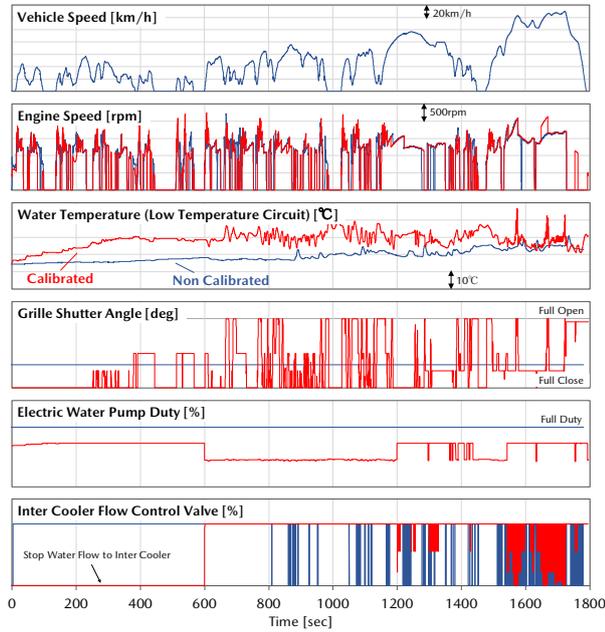


Fig. 15 LT Thermal Fuel Economy Development Study Results

3.4 高外気温度環境に対するロバスト性検証

高外気温度環境におけるシステム冷却系は重要な課題である。Fig. 7 に示した冷却回路によってエンジン、電動デバイス、トランスミッションの各々が信頼性限界温度に達しないよう設計が必要になる。加えて、市場での頻度は低いが高外気温度でかつ高負荷での使用条件に対してラジエーターなどのハードウェアだけで冷却性能を担保しようとすると巨大なラジエーターが必要となり、レイアウトや重量が問題になる。このため、通常環境条件においては必要十分な冷却性能をもつハードウェアを選定した上で、高外気温度特殊環境下での高負荷使用時には適切な保護制御を作動させることで、各ユニットの温度を制約内におさめることが肝要となる。しかしながら、特殊な環境での制御を実機で開発及び検証するためには膨大な工数がかかるだけでなく、オーバーヒートなどの危険を伴う。そこで Fig. 8 に示した高速 MILS 環境を用いた机上開発が重要となる。欧州を想定した仕様においてアクセル開度 100%全開走行を 60 分行う場合の、高外気温度環境での保護制御の作動検証結果の例を Fig. 16 に示す。エンジン本体を冷却する HT 冷却水温、インタークーラーや電駆デバイスを冷却する LT 冷却水温、トランスミッションを冷却する ATF 温度それぞれが、限界温度に達しないように、グリルシャッター、

電動ファンの出力をまずは操作している。更に高温になった場合には HT 冷却水温、LT 冷却水温、及び ATF 温度それぞれが限界温度に達しないようにエンジントルクを徐々に制限することで、信頼性を担保しつつ最低限の最高速度低下となるように制御している。このような検討をさまざまな車速や勾配、トローイング走行等で実施して、高外気温度特殊環境に対してロバストな冷却性保護制御を構築している。

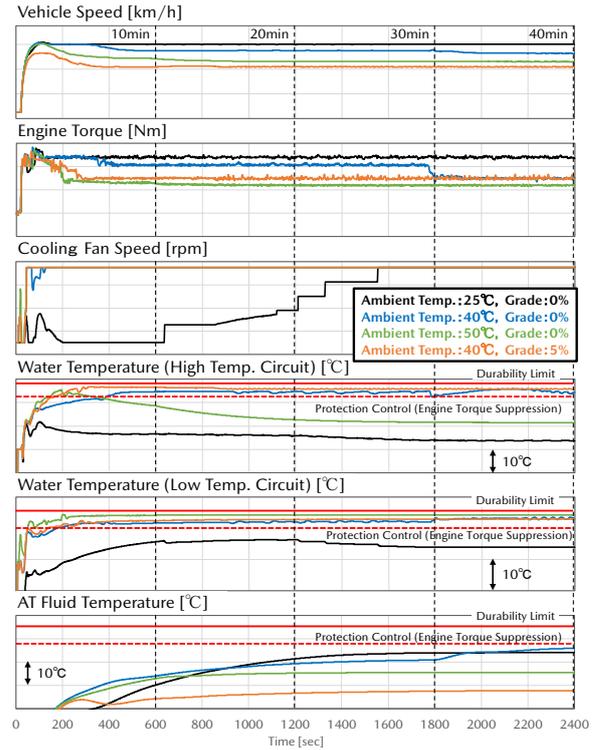


Fig. 16 Protection Control during Accelerator Fully Open in High Air Temperature Environment

4. おわりに

SKYACTIV-D シリーズの開発においては走り、燃費、エミッション各性能の背反とバランスを考慮しながら全ての性能を高めるため、1D モデルによる MBD に注力してきた。新世代 SKYACTIV-D 3.3 においてはそれを拡張して、開発初期の機能配分から開発後期のロバスト検証まで、一貫して 1D モデルを規範モデルとして用いて機能開発の理想を追求する MBD プロセスへと変革した。これによりエンジンの大排気量と燃焼の理想追及に加え、48V マイルドハイブリッドとトルコンレス 8 速 AT を組み合わせた独創的な技術コンセプトをシステムとして具体化し、アクセルにどこまでも追従する力強い加速による「走る喜び」と国内 WLTC モードで 21km/L を達成する「優れた環境性能」の実現につなげた。カーボンニュートラルに向けた移行期において、電動モーターと高効率な内燃機関の両立を搭載した車両が CO₂ 削減の有効かつ現実的な方法となる中で、その開発のためのあ

るべき MBD プロセスの形を築くことができた。今後は更なる適用拡大を進めていく。

参考文献

- (1) 藤川智士：マツダの目指すモデルベース開発，[マツダ技報，No.31，pp.44-47 \(2013\)](#)
- (2) 志茂ほか：乗用車用ディーゼルエンジンのモデルベース開発，第 1 回 1DCAE・MBD シンポジウム講演論文集，No.214 (2019)
- (3) Y. Kato, et al.: Heat Balance Analysis Using Cylinder Pressure Obtained by Engine Experiments Considering the Spatial Heterogeneity of Diesel Combustion, SAE Technical Paper, No.2019-01-2228 (2019)
- (4) 白田ほか：SKYACTIV の MBD 検証環境について，[マツダ技報，No.31，pp.48-53 \(2013\)](#)
- (5) 金ほか：第 2 世代 SKYACTIV-D の燃焼技術，[マツダ技報，No.39，pp.14-20 \(2022\)](#)

■著者■



宮崎 正浩



小林 謙太



角田 良枝



加藤 雄大



村井 亜樹



久禮 晋一



福田 大介



城 侑生



山口 能将



志茂 大輔