

論文・解説

19 MAZDA SPIRIT RACING MAZDA3 Bio concept エンジンの紹介**Introduction of Engine for Mazda Spirit Racing Mazda3 Bio concept**

山内 道広^{*1} 中島 研吾^{*2} 金 尚奎^{*3} 旗生 篤宏^{*4} 坂口 英司^{*5}
 Michihiro Yamauchi Kengo Nakashima Sangkyu Kim Atsuhiko Hatabu Eiji Sakaguchi
 越智 康博^{*6} 神田 智行^{*7} 野中 泰輝^{*8} 小園 智哉^{*9} 吉田 壮太郎^{*10}
 Yasuhiro Ochi Tomoyuki Kanda Taiki Nonaka Tomoya Kozono Sotaro Yoshida
 小林 徹^{*11}
 Toru Kobayashi

要 約

2050年のカーボンニュートラル達成のため、Mazdaは各国のエネルギー事情を踏まえたマルチソリューション戦略を掲げており、その中の1つとしてバイオディーゼルエンジンの普及を目指している。

次世代バイオディーゼル燃料の実証として2021年からスーパー耐久シリーズに参戦を開始し、レースを通じてバイオディーゼルエンジンの信頼性と認知度をアピールしてきた。

今回量産開発で培ってきた技術と開発プロセスをベースにレースという厳しい使い方を分析することで有限寿命の目標設定と各システムの持っているポテンシャルを無駄なく、かつ、最適な機能配分を再構築しエンジントータルの性能を最大限引出したレース用バイオディーゼルエンジンを開発したので紹介する。

Abstract

To achieve carbon neutrality by 2050, Mazda has adopted a multi-solution strategy considering the energy situation of each country, and one of these solutions is the promotion of biodiesel engines.

Since 2021, Mazda has been participating in the Super Taikyu Race Series for demonstration of next-generation biodiesel fuel and promoting the reliability and awareness of biodiesel engines through the races.

This paper introduces the racing biodiesel engine that we have developed recently based on the technologies and development processes fostered through mass-production developments. By analyzing severe operating conditions of racing, we set a finite lifespan target, fully utilized the potential of each system and optimally reallocated system functions so that we could maximize the overall performance of the engine.

Key words : Heat engine, Compression ignition engine, Performance/fuel economy/efficiency, Carbon neutral, Biodiesel engine, MAZDA SPIRIT RACING, SuperTaikyu

1. はじめに

MAZDA SPIRIT RACINGはカーボンニュートラルの実現と「人を育て、技術を鍛える」ことを目標におき、将来に向け「共挑」(キョウチョウ、共に挑む)を合言葉に技術開発やモータースポーツ文化の発展に向けてOEM5社と一丸となって取り組んでいる。

この度、MAZDA SPIRIT RACING MAZDA3 Bio conceptはカーボンニュートラル社会においてもEV一辺倒ではない選択肢があることを認知してもらうために、カーボンニュートラル燃料を使用した内燃機関で魅力あるレースを行うことでクルマの未来を盛り上げることをねらい、量産エンジンをベースにチューンナップしたレース用ディーゼルを搭載した。

*1,4~8 エンジン設計部
 Engine Design Engineering Dept.

*9 車両開発本部
 Vehicle Development Div.

*11 ファクトリーモータースポーツ推進部
 Factory Motorsports Promotion Dept.

*2,3 エンジン性能開発部
 Engine Performance Development Dept.

*10 PT制御システム開発部
 PT Control System Development Dept.

2. 開発コンセプトと主要諸元

本レース用エンジンのコンセプトは、SKYACTIV-D 燃焼コンセプトを踏襲し、カーボンニュートラル燃料とレース環境への適合を最適に行い、各システムの機能配分を一から見直すことで量産エンジンの基本骨格は変更することなく、将来の量産型カーボンニュートラル内燃機関を見据えた技術を取り入れた。

主要諸元を Table 1 に示す。

Table 1 Main Dimension and Specification

Engine	Mass Production Engines	SuperTaiky Engine
Engine Type	In-Line 4	←
Displacement	2188cm ³	←
Compression ratio	14.4	13.0
Combustion Bowl Shape	Stepped Egg-shape Combustion Chamber	Dual Zone Egg-shape Combustion Chamber
Fuel Injection	10holes 1112cc/min	10holes 1400cc/min
Turbocharger	2stage HP+LP	Single With variable turbine geometry
Intake-Camshaft	IVC36 Solid Camshaft	IVC55 Hollow Camshaft
Exhaust-Camshaft	Solid Camshaft	Hollow Camshaft
Exhaust-Valve	Na hollow stem valve	Na-Ni hollow head valve
Oil cooler	9.6kW	13.7kW
Inter cooler	44kW	52kW
After Treatment	DOC+DPF	DOC+Low-pressure DPF
Boost pressure sensor	300kPa	450kPa
Exhaust manifold	Material D5S	Material SCS17

カーボンニュートラル燃料対応として、エンジン燃焼と燃料・噴射系部品に与える影響を調査し、同じ ST-Q クラスのライバル車とスーパー耐久シリーズで戦うため、出力の向上とディーゼルエンジンの絶対的良さである燃費（耐久レースの勝敗に大きく影響するファクター）の両立を行った。

出力の向上は、主に吸排気系の抵抗低減と高効率ターボチャージャ、バルブタイミング、燃料噴射量、燃焼室を最適化することで実現した。

出力の向上により熱負荷が増加し背反として各部品の信頼性が低下するため、ラジエータ、インタークーラー、オイルクーラー、排気バルブの冷却系の強化を行っている。更に圧縮比を量産エンジンの 14.4 から 13.0 に下げることで出力向上かつ筒内圧力を抑えることができる。そのため機械的負荷も低減することで信頼性を確保した。

燃費対策は燃焼室形状の改善、ピストンへの遮熱膜塗

装を行った。また遮熱膜にはピストンへの入熱を低減する効果があり、出力と信頼性の両立が実現できた。

3. カーボンニュートラル燃料適用開発

3.1 カーボンニュートラル燃料について

カーボンニュートラル燃料とは、燃料製造時に CO₂ を吸収することにより、製造からエンジンで消費するまでの間、大気中の CO₂ 濃度を増やさない燃料を指す。軽油代替のカーボンニュートラル燃料として廃食油等を水素化・脱酸素化処理して生成する HVO 燃料 (Hydrotreated Vegetable Oil) がある。HVO 燃料は軽油にも含まれているパラフィン系の成分が 9 割以上を占めており、欧州では一般流通している。マツダはこの次世代燃料に対し熱負荷が高く過酷なレースの場でエンジンへの適合性検証を実施することで将来の普及に向けた取り組みを進めてきた。MAZDA SPIRIT RACING MAZDA3 Bio concept ではユーグレナ社、及び Neste 社の 2 種類の HVO100%燃料を用いて検証を実施した。

3.2 燃料による性能差

HVO 燃料は軽油に比べてセタン価が高く着火しやすいという特性がある。最高出力点のような熱負荷が高い条件では燃料の着火性の違いによる燃焼への影響は小さく熱効率も同等であった。トルク特性の差を Fig. 1 に示す。排出ガス成分については NO_x 排出量は同等で HC・煤排出量が改善した。また芳香族成分が少ない燃料であるため排出ガスの臭気低減にも効果があった。これらの結果から HVO 燃料はレースでの使用において制御修正を必要としない環境負荷の低い燃料であることが確認できた。

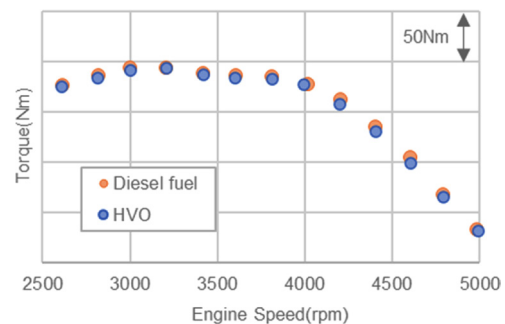


Fig. 1 Engine Torque

3.3 信頼性検証結果

HVO 燃料は芳香族成分が少ないため部品同士の潤滑性やゴム材の信頼性に懸念があることが知られている。潤滑性は潤滑改善剤などの添加剤等に依存しゴム材は材質を考慮する必要がある。これらの信頼性を確認するために、2022 年最終戦から 2024 年のシーズンで 2 種類の HVO 燃料を使用した。量産車とレースでの使用条件を Fig. 2 に示す。量産車と比較してレースでは高燃圧高噴射量域の使用時間の割合が高く、厳しい使用条件で検証

を行った。部品調査の結果、懸念していた顕著な摩耗は確認されず想定範囲であることや、ゴム材の影響などから継続使用できることを確認した。

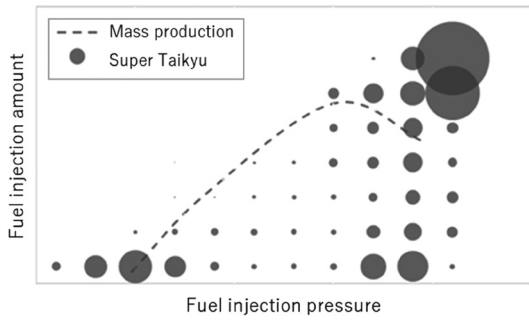


Fig. 2 Frequency of Fuel Injection Condition

4. 出力向上の開発

2022年の開発初期に2.2Lディーゼルで量産比1.5倍となる出力300psの達成を目標に掲げた。量産開発での知見を基に筒内圧力や排気温度等の信頼性制約値を定めて適合した結果、最大トルク530Nm、最大出力270psが限界であった。そこで各部品に機能配分を再検討し、制約値の見直しと次節以降で示す部品改良に取り組んだ。制約値と出力の関係性を基に300ps化に必要な信頼性要件を定め、モデルベースで部品耐力を予測し有限寿命の領域まで踏み込んで制約値を決めた。これらの活動の結果、最大出力300psを達成しスーパー耐久シリーズ2023第7戦への投入を実現できた。各レースでの全負荷性能の履歴をFig. 3に示す。最大トルクは550Nmとし、レースでの回転負荷使用頻度を考慮して低回転域は量産比でトルクを絞る適合とした。

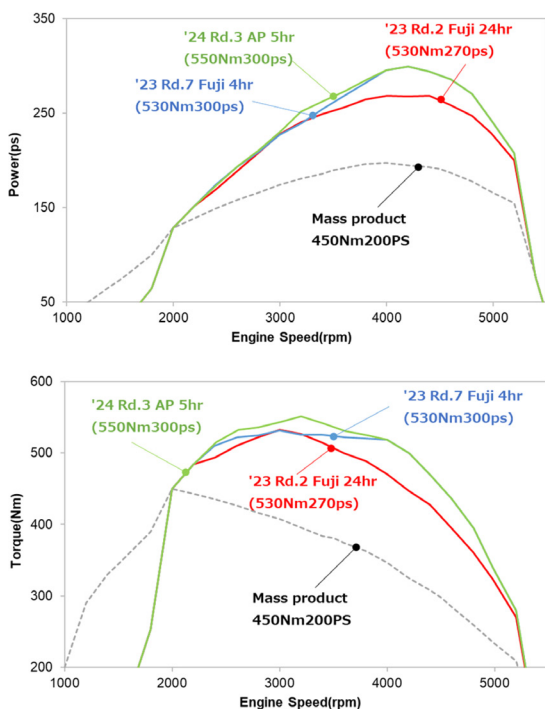


Fig. 3 Engine Power

4.1 ターボチャージャ

ターボチャージャシステムはベースエンジンの広範囲なエンジン回転での過給をカバーする2stageターボチャージャシステムではなく3000rpm~5000rpmのトルクバンドでの高効率過給をねらったシングル可変ジオメトリターボチャージャ(以下、VGターボチャージャ)システムを採用した(Fig. 4)。

高圧段ターボチャージャ、及びコンプレッサバイパス機構を廃することで高出力用にターボチャージャを大型化したにもかかわらず約5kgの重量低減を達成した。

大型化したターボチャージャには300psを発揮するための吸気量を吐出するために3.3Lディーゼルターボチャージャ用コンプレッサ仕様を用いレース特有の高温環境による潤滑機能破綻を防止するためセンターハウジングを水冷仕様に変更している。

ベース仕様に比べ大量の吸気量を流すため圧力損失は2次曲線的に増大する。特にコンプレッサ入口までの圧力損失は圧縮機の吐出可能な最大流量を制約してしまうためベース仕様から圧力損失特性を大きく改善させる必要があった。小型リチウムイオンバッテリーへの変更等で確保したスペースを活用しエアクリーナからコンプレッサまでの流路内径や曲げ曲率の拡大、レーシング用エアクリーナを採用することで約55%の圧力損失低減を実現した(Fig. 5)。

ターボチャージャ排気側においてはタービン流入ガス温は1000°C近くになるため2024年シーズンよりガソリン向け高耐熱VGカートリッジ、及び高耐熱鋳鋼材エキゾーストマニフォールドを採用し24時間レースに向けた耐久性を確保した。

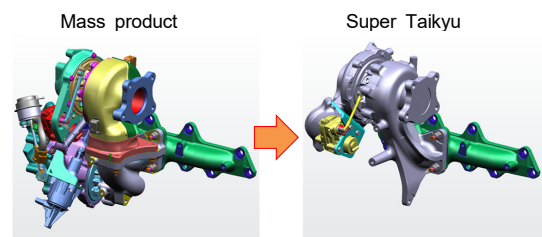


Fig. 4 Turbocharger

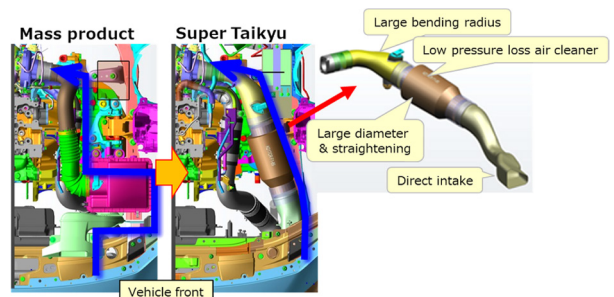


Fig. 5 Intake System

4.2 インタークーラーシステム

出力目標 300ps 達成に向けインタークーラーシステムは (1) 配管類の低圧力損失化、及び (2) 過給された吸気の低温化 (高い放熱性能の確立) が必要で現行量産 CX-5 のインタークーラーシステムから 80% の低圧損失と 19% の放熱量アップを目標に開発を進めた。

インタークーラーシステムを作動理論に基づいた物理モデルで表すと (1) 同システム配管の内部圧力損失 ΔP 、及び (2) インタークーラー出口吸気温 T_{out} は以下式で示される。

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} + K \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

ΔP : 圧力損失

f : 配管内面粗さや Re 数から決まる摩擦係数

K : 曲げ部損失係数 (制御因子)

L : 吸気配管長 (制御因子)

D : 吸気配管内径 (制御因子)

ρ : 気体の質量

v : 気体の流速 (制御因子)

$$T_{out} = T_{in} - \frac{Q}{m \cdot Cp}$$

T_{out} : インタークーラー出口吸気温度

T_{in} : インタークーラー入口吸気温度

m : 気体の質量流量

Cp : 気体の比熱比

Q : インタークーラー放熱量 (制御因子)

インタークーラーシステム性能の最大化に向けて上述の物理モデル式のうち設計者がコントロールできる因子 (制御因子) の最適化に着目した。検討を進めるにあたり、通常の市販車開発に必要な車両組立要件や騒音規制要件等の制約排除に加え、快適装備のエアコン用コンデンサーや停車兼渋滞走行用の電動ファン除去による車体通気抵抗低減を図った。放熱器の配置は温度勾配を考慮して車両前列からインタークーラー、ラジエータの配置とすることを前提とし最終的な放熱器サイズや配置については CFD 等を用いて最適解を求めた。

具体的に (1) ΔP 圧力損失低減は Fig. 6 に示す配管類の内径拡大、曲げ曲率拡大、曲げ点数低減、シャッターバルブ廃止等を行い、現行量産 CX-5 ベース比約 80% の圧力損失低減を実現した (Fig. 7)。(2) インタークーラー出口吸気温 T_{out} はインタークーラー本体の大型化に加え Fig. 8 に示すボンネットダクト追加やフロントグリル形状の最適化、及び Fig. 9 に示すパッケージ変更を加えることでインタークーラー通過風速が全域約 30% 向上し市販車ベース比 17% のシステム放熱量向上を実現した (Fig. 10)。ラジエータ放熱量は高車速域で 19% の向上を実現した。



Fig. 6 Intercooler System

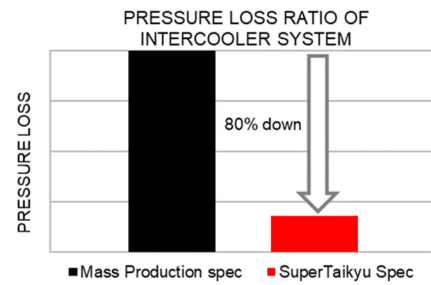


Fig. 7 Pressure Loss Ratio of Intercooler System

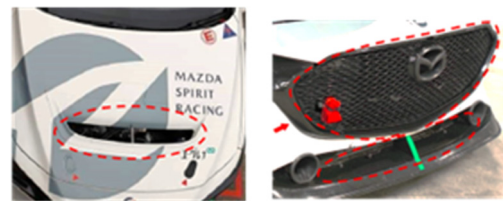


Fig. 8 Front Design

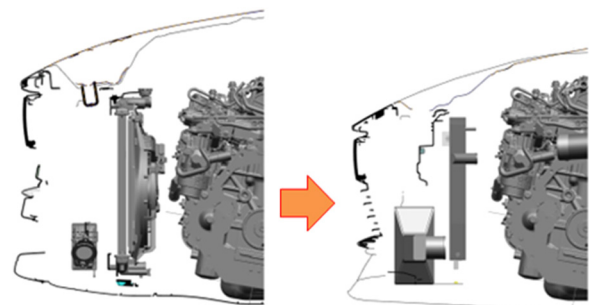


Fig. 9 Mass Production Vehicle (Left) and Super Taikyu Vehicle (Right)

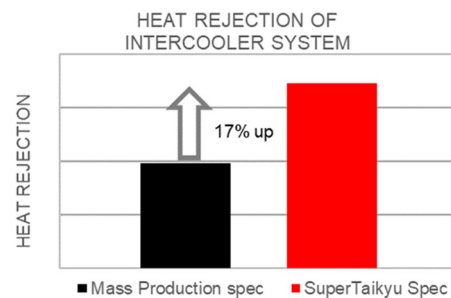


Fig. 10 Heat Rejection of Intercooler System

4.3 ピストン・燃焼室形状と遮熱膜

出力向上を図りつつ最高燃焼圧力を抑えるために圧縮比を 14.4 から 13.0 まで下げた。低圧縮比化によって拡大した燃焼室空間を有効利用しつつ、高効率かつクリーン燃焼を行うために CX-60 から搭載されている SKYACTIV-D 3.3 に導入された 2 段 EGG 燃焼室⁽¹⁾を適用した (Fig. 11)。また出力向上に伴い増加するピストンへの熱負荷を低減するために遮熱膜を適用した⁽²⁾。Fig. 12 には 3 次元燃焼解析、及び温度解析により得られたピストン母材表面における温度分布を示しており遮熱膜によってピストンへの熱負荷が低減できることが分かる。Fig. 13 の耐久前後の遮熱膜ピストンに示すように通常の燃焼によるデポジット (黒色部分) はみられるが全負荷領域が大半を占める過酷なレース環境でも剥離等の遮熱膜の劣化は見られなかった。

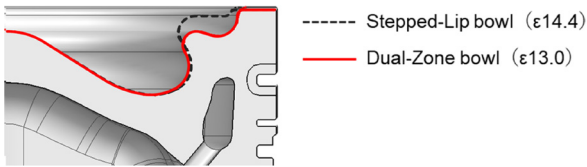


Fig. 11 Dual-Zone Egg-Shaped Bowl

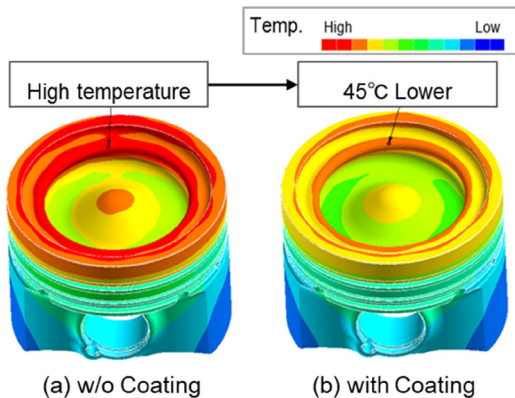


Fig. 12 Reduction of Heat Flux to the Piston Base Material by Heat Insulation Coating



Fig. 13 Comparison of Pistons Before and After Testing

4.4 排気バルブ

出力向上に対応するため、排気バルブの冷却効率をより進化した新開発のナトリウム封入 Ni (ニッケル) 傘中空バルブを採用した。

この新開発の傘中空バルブはスムーズな 2 段穴形状とすることでナトリウムの攪拌が促進され冷却性が向上する。Fig. 14 に冷却効果を示す。

これは 2.0L N/A ガソリンエンジンの実研結果であるが新開発の傘中空バルブは従来のナトリウム封入軸中空バルブより傘表で約 100°C、首部で約 140°C (5200rpm) の温度低減効果が実測されている。同様にディーゼルエンジンにおいても温度低減が期待できるため出力向上に伴う熱負荷の増大に対応する技術として本エンジンでも採用した。

新開発の傘中空バルブはガソリンエンジンに用いた場合は傘表の温度が下がることでノッキングの抑制ができ、圧縮比 UP や点火時期のアドバンス化が可能となり熱効率向上の効果が期待できる。

また中実バルブに比べ軸中心部を中空化することにより軽量化と動弁系のフリクション低減にも貢献できる。

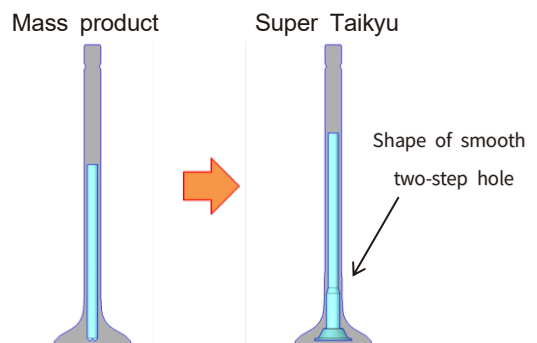
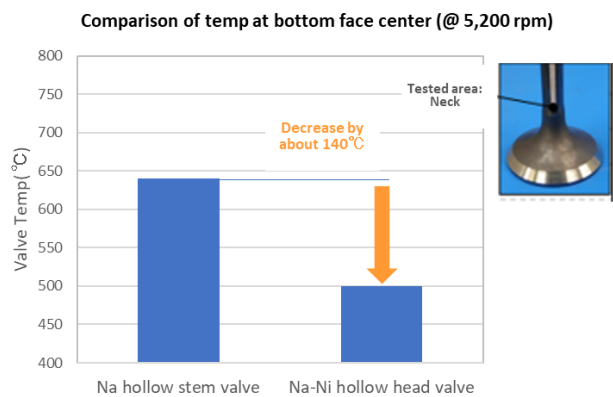
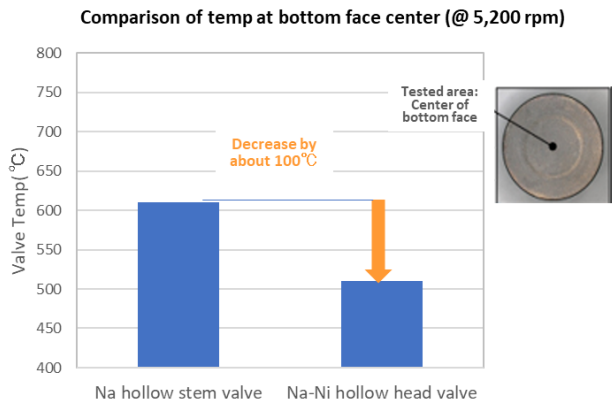


Fig. 14 Hollow Head Valve

4.5 バルブタイミング

本エンジンは体積効率の改善をねらいモデルベースで吸気バルブの開弁期間を最適化した。4400rpm で効率が最大となる 吸気バルブ閉弁時期 (IVC) を選定し、台形形状のカムプロフィールとすることでリフトを抑えてピストンとの干渉を回避し燃焼室を成立させながら最適開弁角を実現した。IVC は量産仕様の 36deg.ABDC (After Bottom Dead Center) から 55deg.ABDC に遅角した (Fig. 15)。

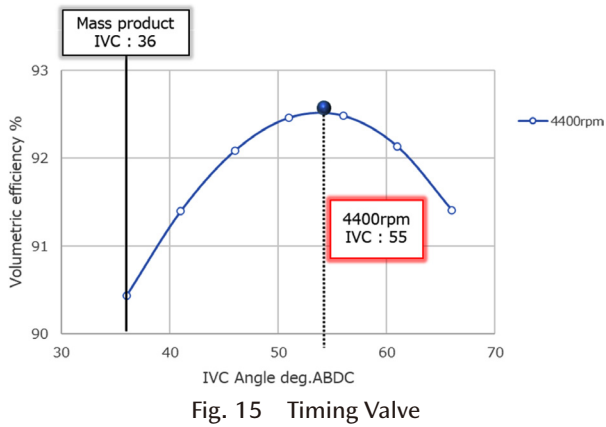


Fig. 15 Timing Valve

4.6 DPF

量産仕様に対して壁厚が薄い DPF (Diesel Particulate Filter) を新たに採用し、圧損低減による出力向上と軽量化を図った。更に全負荷運転中に排気工程で少量の Post 噴射を行い、DPF の前段に配置した DOC (Diesel Oxidation Catalyst) により排出ガスを昇温させることで常時 DPF 内の煤を燃焼除去し、煤堆積による圧損上昇を防いだ。この制御で DPF の過昇温による溶損回避と煤燃焼促進触媒の廃止も可能となった。煤の捕集機能は維持したまま量産仕様に対して 35%の圧損低減を実現することで出力と燃費の改善に貢献した。

4.7 エンジン制御

(1) アクセル全開シフト制御

サーキット走行では 1 レースで量産想定 of 負荷を大きく超える負荷が駆動系に入力される (Fig. 16)。負荷の増加主要因の一つである変速ショック入力の低減とドライバーの操作負担軽減、及び駆動系保護のためにアクセル全開シフト制御を導入した。ドライバーはアクセル全開のままクラッチとシフト操作を行い、実エンジン回転数と変速後の推定エンジン回転数との差回転に応じてエンジントルクをコントロールする制御とした。ディーゼルならではの高速応答を生かした緻密なトルクコントロールにより回転イナーシャをミニマム化しショックトルクを抑えるとともに、クラッチ締結状態に応じてトルク伝達量を最適化することで振じりトルクも低減させた。またアクセルとクラッチの操作タイミングにより生じていた入力ばらつきも抑制し、素早い変速操作においても締結

時トルクの 1.3 倍以内に安定的にショックトルクを抑え、速さと信頼性確保を高い次元で両立させた (Fig. 17)。

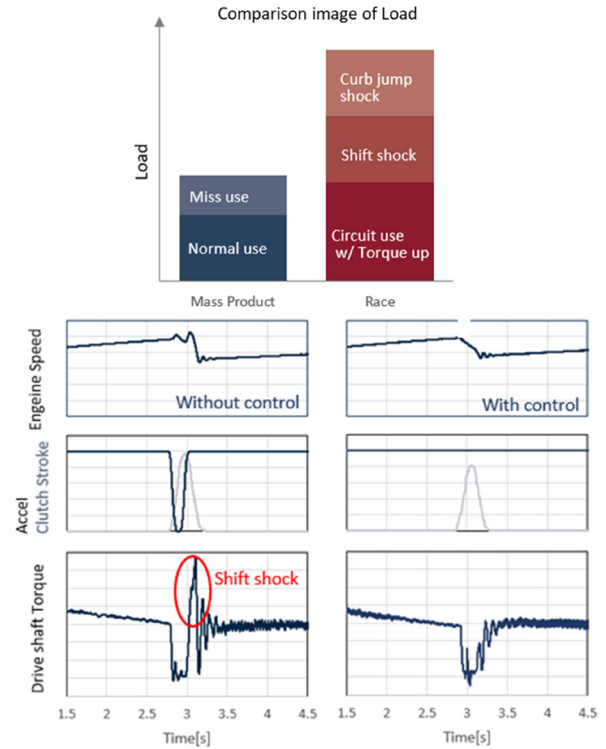


Fig. 16 Driveline Shift Shock Torque

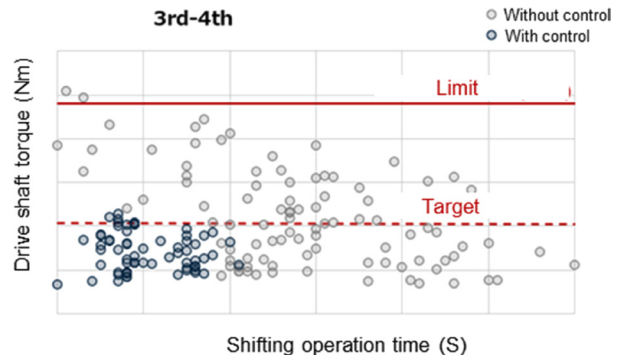


Fig. 17 Drive Shaft Torque

(2) ターボチャージャ制御

ターボチャージャ制御は SKYACTIV-D 3.3 の VG ターボチャージャ制御モデルを水平展開した。ドライバーのアクセル操作に応じて精密にベーン開度を制御することで過給の応答性を高め、加速時のレスポンスとリニアリティを向上させた。全負荷運転時には空気量とポンピングロスとを両立させる最適な過給圧に制御することで燃焼効率を高めた。またアクセル全開シフト制御と協調し、変速中の過給圧低下を最小限とすることで変速後のトルク応答性を確保した。

5. 軽量化開発

5.1 排気系

コーナーでの操作性改善をねらい、左右の重量バランス調整を目的に新規でキャタリストコンバーター、フロ

ントパイプを製作した。更にレース環境を想定し排気系部品が縁石等に当たらない位置まで量産仕様比でキャタリストコンバーター位置を車両後方へ移動させた。それにより排気システムの重心位置が350mm程度車両後方へ移動し車両前後重量配分の改善へ貢献した (Fig. 18)。同時にシェルやブラケットといった構造部材を鋳物から板金へ変更することで量産エンジン比で4kg以上の軽量化を実現し、排気系重量の低減に貢献した。また新規部品を設計するにあたり、モデルベース開発 (MBD) を活用することで短納期かつ実機検証で目標を満たす仕様を一度で製作した。

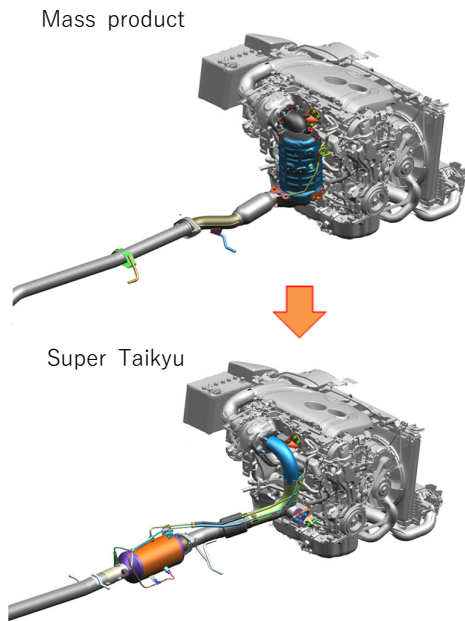


Fig. 18 Exhaust System Arrangement

5.2 中空カムシャフト

エンジンの低重心化を目的にカムシャフトの軽量化を行った。カムシャフトの必要捩じり剛性と曲げ剛性を確保しつつカムシャフトの中空化を行った (Fig. 19)。これにより量産のカムシャフトより吸気カムシャフトで277g、排気カムシャフトで200gの軽量化を実現した。

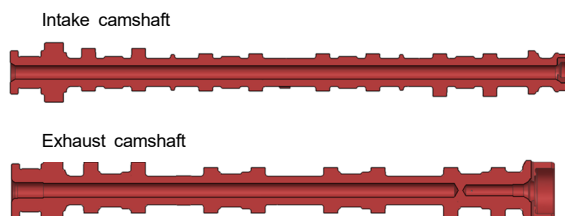


Fig. 19 lightweight Camshaft

6. おわりに

スーパー耐久シリーズに参戦することで将来のカーボンニュートラル社会においても内燃機関がカーボン

ニュートラル燃料を使用してレースを楽しめることができ、一般市場でも今までの内燃機関と遜色のない原動力として活躍できることの証明とアピールが出来た。

今後もカーボンニュートラル化に対するマツダの積極的な姿勢、ディーゼルエンジンに対する高い技術力を磨いていく所存である。

参考文献

- (1) 金ほか：第2世代 SKYACTIV-Dの燃焼技術，[マツダ技報, No.39, pp.14-20 \(2022\)](#)
- (2) 湊ほか：エンジンの燃費を向上する燃焼室高応答遮熱材料技術の開発 (第3報)，自技会学術講演会予稿集 (春)，(2024)

■ 著 者 ■



山内 道広



中島 研吾



金 尚奎



旗生 篤宏



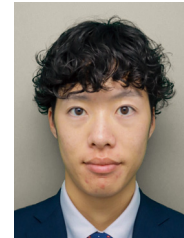
坂口 英司



越智 康博



神田 智行



野中 泰輝



小園 智哉



吉田 壮太郎



小林 徹