

特集：サステイナブル “Zoom-Zoom”

3

## 新型MZR-CD 2.2エンジンの紹介

### Introduction of New MZR-CD 2.2 Engine

上 杉 康 範<sup>\*1</sup> 内 藤 雅 博<sup>\*2</sup> 安 田 浩 明<sup>\*3</sup> 山 内 道 広<sup>\*4</sup>  
 Yasunori Uesugi Masahiro Naito Hiroaki Yasuda Michihiro Yamauchi  
 上 月 正 志<sup>\*5</sup> 森 恒 寛<sup>\*6</sup> 谷 村 兼 次<sup>\*7</sup> 森 永 真 一<sup>\*8</sup>  
 Masashi Kouzuki Tsunehiro Mori Kenji Tanimura Shinichi Morinaga

#### 要 約

欧州市場のディーゼルエンジン（以下DE）に求められる性能は燃費だけでなく、環境保護、走り性能、NVH性能を高次元で実現することであり、その期待は更に高まる一方である。この度All-New Mazda6のモデルチェンジに際し、2002年の初代Mazda6からMZR-CD2.0を導入してきた経験を元に「サステイナブルZoom-Zoom」を実現することを目標とし、全面的に改良した。本エンジンはAll-New Mazda3にも搭載し、今後のモデルへも搭載して行く。本稿では、New MZR-CD2.2における開発の狙いと導入技術コンセプトについて紹介する。

#### Summary

What is required for the diesel engine (DE) on the European market is to raise fuel efficiency, environmental protection, running performance and NVH performance to higher dimensions, and expectations keep rising further. On the occasion of the restyling of All-New Mazda6, we have improved the MZR-CD2.0 engine in full scale to develop New MZR-CD2.2 engine, aiming to achieve “Sustainable Zoom-Zoom”. We undertook the development based on the experience of introducing the MZR-CD2.0 engine from the original Mazda6 launched in 2002. New MZR-CD2.2 engine has also been mounted on All-New Mazda3, and is planned to be mounted on future models. In this paper, the aim of the development of New MZR-CD2.2 engine and the concept for the introduction of new technologies are outlined.

#### 1. はじめに

マツダはガソリン車に匹敵する出力性能、環境性能を兼ね揃え、大幅に進化させた新型クリーンディーゼルエンジンMZR-CD2.2を開発し、このたび欧州、豪州All-New Mazda6、Mazda3に搭載した（Table 1）。

このエンジンは初代Mazda6搭載のMZR-CD2.0から、排気量を10%拡大させた上で、大きく改良を加えている。

ソレノイド駆動のインジェクタでは業界トップの最大噴射圧、高応答 & 微粒化インジェクタ、多段噴射による優れた燃費性能、可変容量、高効率のターボチャージャーによる、低速から高速までクラストップレベルの高トルクと高レスポンス、そして高剛性ロアブロック、バランスシャフトによる、優れた静粛性を実現した。

また、独自に開発した世界初の触媒活性メカニズムを採用したディーゼルバティキュレートフィルタ（DPF）により、DE特有の煤の燃焼処理速度を大幅に高め、欧州の排気ガス規制であるStage5まで対応するポテンシャルを有し

Table 1 Main Specification

Engine	MZR-CD2.0	New MZR-CD2.2		
Displacement (ml)	1998	2184		
Bore×Stroke (mm)	86×86	86×94		
Combustion type	Direct Injection	←		
Intake shutter valve	DC Motor	←		
EGR valve	DC Motor	←		
EGR cooler	with	←		
EGR cooler by-pass valve	N/A	with		
Compression ratio	16.7	16.3		
Valve driving system	OHC,belt-driven 16valves	DOHC,chain-driven 16valves		
Valve timing	IN	Open BTDC	6°	←
		Close ABDC	30°	←
	EX	Open BBDC	41°	40°
		Close ATDC	8°	←
Valve lift (mm)	IN:10mm,EX:8mm	IN:9.5mm,EX:9mm		
Fuel injection system	Common rail system DENSO U2-F	Common rail system DENSO U2-F(Improved)		
Max Fuel pressure (MPa)	180	200		
Supercharger system	Variable geometry turbocharger IHI RHFV4	←+ Abradable seal & Camber nozzle & Position sensor IHI RHFV4		
Inter-cooler	with	←		
Max. torque (N·m)	330	400		
Max. power (kW)	103	136		
Disel particulate filter	with	←		
Linear O2 sensor	with	←		
EU exhaust gas emission level	Stage4	Stage5 (Some model : Stag4)		

\*1~4 エンジン設計部  
Engine Engineering Dept.

\*6,7 エンジン実研部  
Engine Testing & Research Dept.

\*5 パワートレイン開発推進部  
Powertrain Development Promotion Dept.

\*8 パワートレイン技術開発部  
Powertrain Technology Development Dept.

ている。

以下、主要性能と、それを達成した技術メニューについて詳しく紹介する。

## 2. 技術課題と主要導入技術

前述のエンジンユニットの狙いから、以下課題に対応する技術導入を行った。

### 1) 燃費, 出力, エミッション性能の両立

ターボ効率改善, 200MPa & 高応答 & 微粒化インジェクタ採用, 噴射系, 燃焼室, スワールの最適化とMBC (Model Base Calibration) によるEGR / 噴射セットの最適化

### 2) 本体系改良によるNVH性能改善と更なる信頼性向上

バランスシャフト, 高剛性ロアブロック, ノーマンテナンスカム駆動チェーン

### 3) DPFシステムの改善

スプリット噴射, DPF煤堆積量UPによる再生間インターバル拡大, および高耐熱DPFと新触媒 & 再生制御改善による再生時間の短縮

### 4) ドライバビリティの向上

トルク制御による燃焼切り替え時トルク段差の改善

## 3. 基本性能

### 3.1 燃費性能

一般的にDE車両は燃費性能が良いが、お客様の燃費性能への期待に応えるべく、継続した燃費性能の改善を行った。具体的には、ピストン変更による低圧縮比を採用してポンプ損失低減や燃焼温度の低減によるエミッション改善や燃費改善を図った。更に、大型EGRクーラー/インタークーラーを採用することで吸気温度も低減した。それらの採用による燃焼温度の低減および噴射システム改善（高応答化, 高噴射圧力化, 近接噴射間隔短縮）に伴い、EGR量と噴射パターン・燃料噴射圧力・タイミングを最適化して燃焼効率を改善した。

また、エンジンシステム・排気量アップに伴う機械抵抗の増加を最小限に抑えるために基本構造の機械抵抗を低減した。オイルリングのレール外周あたり面を最適化することでMZR-CD2.0比30%の張力を低減した。

オイルポンプの容量については、各部のエンドフロー低減および油路構造最適化による圧力損失低減を行い、

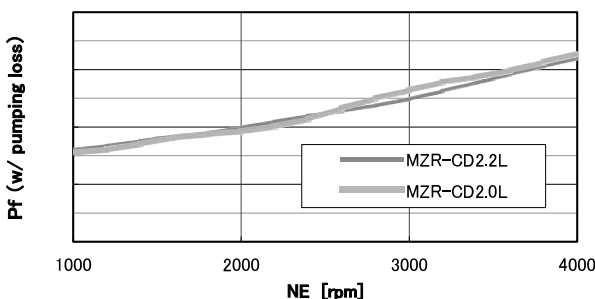


Fig.1 Comparison of Pf New 2.2L and 2.0L

MZR-CD2.0比8%アップに留めている。更にサプライポンプ駆動損失低減などのPfを低減し、チェーン駆動&バランスシャフトを装着しながら、MZR-CD2.0とほぼ同等のPfを実現した (Fig.1)。

車両燃費性能は、①エンジン単体による燃費改善、②エンジン改良による煤排出量低減により、DPF再生回数を半減および再生時間の短縮化、③車両抵抗低減により、欧州モード燃費 (NEFC) は前モデルから5%~7%改善した (Fig.2)。

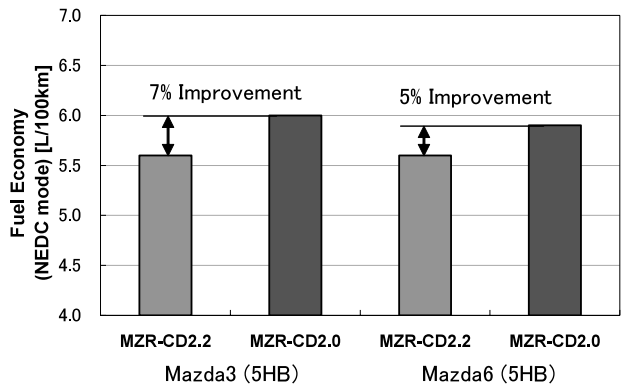


Fig.2 Fuel Consumption Performance

### 3.2 出力性能

出力性能の比較をFig.3に示す。Zoom-Zoomな走りを実現するために排気量アップ, DOHC, 過給効率改善, 低圧縮比化と構造系の高剛性化および最高噴射圧力高圧化による燃焼効率改善などにより、大幅な出力アップを実現した。出力アップと低速トルク性能の両立は過給機性能改善によって補った。これらにより、車両の過渡レスポンス改善に大きく貢献している。

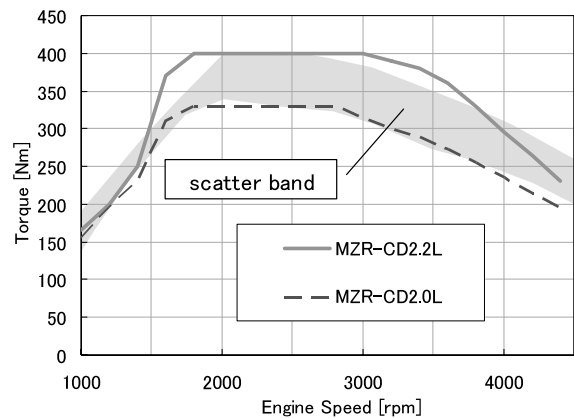


Fig.3 Output Performance

### 3.3 排気エミッション性能

前モデルは欧州Stage4規制に対応した低排気エミッション性能を実現していた<sup>(1)</sup>が、今回は更にクリーンであるStage5規制適合を実現した (一部Stage4適合)。エンジン改善メニューとしては、3.1項でも述べたように①低圧縮比化および吸入空気温度低下によるNOx低減、②噴射系・燃焼室・スワールの最適化による低エミッション化、

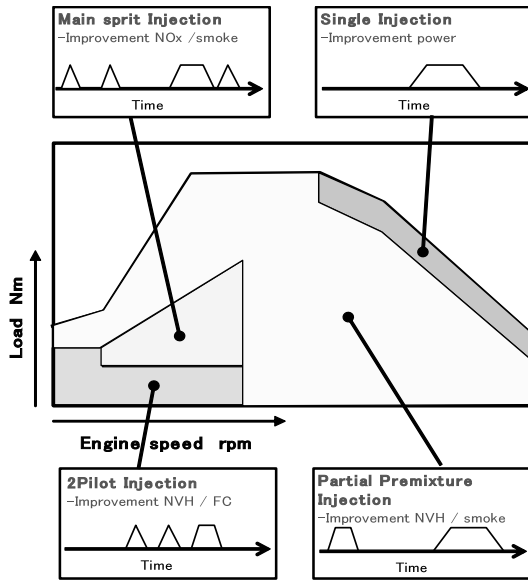


Fig.4 Multi Injection Pattern Map

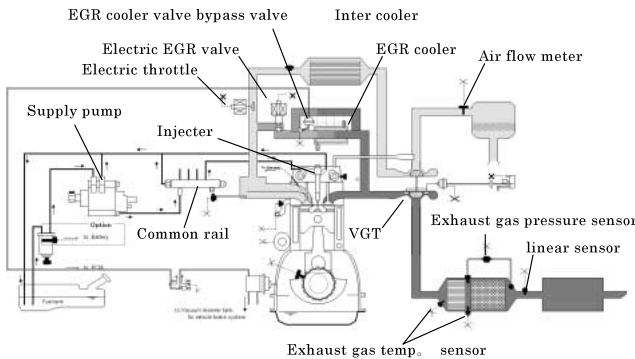


Fig.5 Engine Control System Diagram

- ③MBC<sup>②</sup>によるEGR / 噴射パラメータの最適化 (Fig.4),
- ④排気量アップによる高負荷領域のNOx低減により, 低騒音・燃費改善・高出力等の性能を改善しながら, 低排気エミッション性能を実現している。

#### 4. 基本エンジンシステム

Fig.5に示すように, コモンレールシステム, 可変容量ターボチャージャ, EGRシステムによりエンジン制御システムおよび吸排気システムを構築した。

基本システムとしてはMZR-CD2.0を踏襲しているが, Stage5対応することを狙いとし, EGRバルブ&クーラーの大型化を実施するとともにEGRクーラーバイパスを導入することで, NOxとCO, HCの両立を図っている。

可変容量ターボチャージャにはノズルの開度センサを追加し, 過渡時における過給圧制御を精密化することで, ドライブビリティとEGRガスの統合したコントロールを実現している。またアブレードダブルシールや流体性能に優れた湾曲ノズルを採用して, 効率化と信頼性改善を図った。

DPFシステムは更に高性能とすべく, システム全面での改善を実施するとともに, ①貴金属量の低減, ②1次元のDPF温度シミュレーション制御導入による排気温度センサ

の削減によりコストを大幅に低減した。

コモンレールシステムは, インジェクタを更に高応答化し, 最大噴射圧は業界トップの200MPa (ソレノイドタイプ)を採用して, 高出力化を図った。

#### 5. 本体系開発

##### 5.1 NVH開発

通常, 排気量を拡大すると2次慣性力が増加し, 車室内の“こもり音”が悪化する。MZR-CD2.2では新たにバランスシャフト (以下B/S)を採用することで, MZR-CD2.0に比べてエンジン2次振動を10dB以上低減した (Fig.6)。これにより2.2Lにも関わらず, 高回転域までこもり音を低減し, リニアなエンジン音圧を開発した。

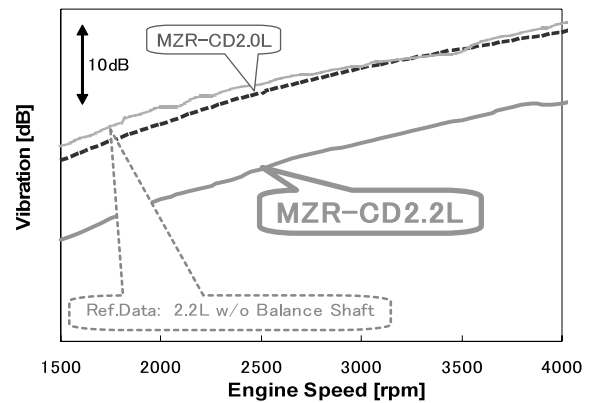


Fig.6 2<sup>nd</sup> Order Vibration at Engine Mount Position

このB/Sシステムはクランクシャフトからチェーンで駆動しており, ハウジング材質をアルミニウムとした。駆動方式についてはチェーン駆動を選定した。これは, エンジン全高低減, クランク軸との軸間距離調整 / ミスアライメント吸収の面でギヤ駆動に対し有利であるためである。またバランス率は, 駆動チェーンノイズおよび2次振動低減効果から最適な値を選定した。

オイルポンプは, バランスシャフトの後端への一体化および駆動方式とした (Fig.7)。

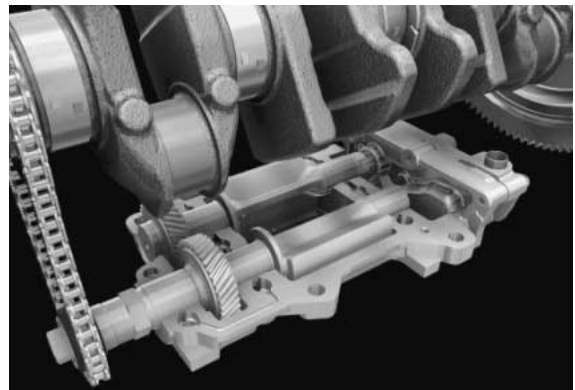


Fig.7 B/S with OIL Pump

チェーンとスプロケットの噛合時に, 歯数に応じた次数音が発生する。MZR-CD2.2ではノイズ低減のため, ロー

ラチェン、ラバーリングの採用、スプロケットの歯形、テンショナ、チェーン長さの最適化を行った。加えてチェーンとスプロケットの衝突振動の伝達を抑えるため、影響の大きい構造系は共振周波数を考慮し、FEM（有限要素法解析）による適切なリップ配置などの対応を行った。これらの加振力、伝達系改善により、車内で聞こえやすい3,000rpm以下のチェーンノイズを台上評価で10dB以上低減した（Fig.8）。これにより車室内外のチェーンノイズを全く聞こえないレベルとした。

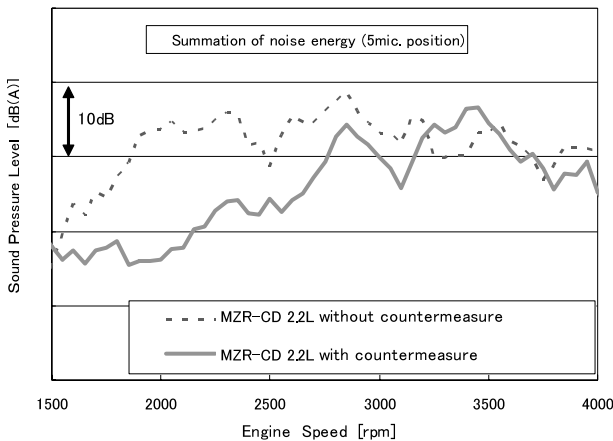


Fig.8 B/S Chain Noise (36 Order Noise)

シリンダブロックは鋳鉄製（Fig.10）とし、ベアリングキャップとブロックスカートを高剛性締結したアルミダイキャスト製クアブロック（Fig.10）を採用した。FEMとリグ評価により各部の肉厚・構造・リップ配置を最適化して、前モデルからの重量増を最小限に抑えたとともに、エンジン振動・放射音を低減した。

また、シリンダブロック下部には制振鋼板製オイルパンとオイルパン専用の遮音カバー（Fig.10）を適用して、エンジン下部からの放射音を低減した。

一方で、NVHではDE特有のノック音について、これまでもエミッション、スモークとの両立の観点で改善を進めてきた。関連する構造変更の改善に加え、更なる両立のキャリアレーションを進めた。特にMZR-CD2.2では2,500rpm以下の常用域と加速時に使用する高負荷時のノック音の改善を進めた。これにより現モデルに比べ、ノック音の指標となる振幅変調度で3～10%低減させ、よりガソリンエン

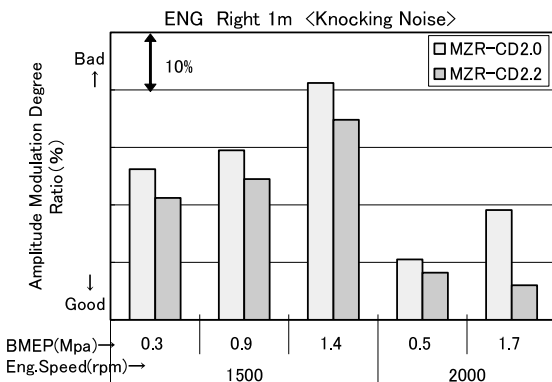


Fig.9 Knocking Noise of DE

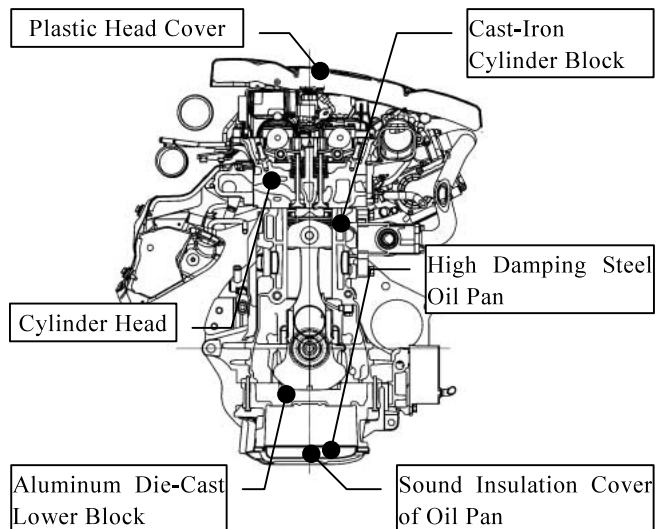


Fig.10 Engine Cross Section

ジンに近い音質を実現した（Fig.9）

5.2 高出力化

1) シリンダヘッド

シリンダヘッド（Fig.10）の強度・剛性を確保するために、FEM解析とリグ評価・簡易的な耐久試験を実施して、各部の肉厚・構造を最適化した。

この活動により、ヘッド内の水流れを最適化してバルブシート間の温度低減、ウォータージャケット内部構造を最適化して高燃焼圧に対する信頼性を確保した。

2) ピストン

高い燃焼圧と温度に耐えられるように、ピストン材質を高疲労強度の高い（350 で50%アップ）新材質とし、更に中空耐摩環（Fig.11）を採用することで燃焼室リップ部は10、トップリング溝は40 の温度低減を行った。また、スラスト力増加によるスカッフ対策としてピストンスカートのコーティング膜厚も8μmアップさせた。

トップリングについてはPVD皮膜（イオンプレーティング）を耐スカッフ/耐クラック性の良いものとし、リング溝に溜まるカーボンでのスティック防止のため、カーボン除去効果のあるハーフキースト形状を採用している。

コンロッドについても高強度材（疲労強度約2倍）を採用し、小端プッシュはPbフリー化とともに耐面圧も20%向上、Lowメタルは耐面圧50%向上させている。クランクシャフトは全ピン全ジャーナルフィレット部に高周波焼入

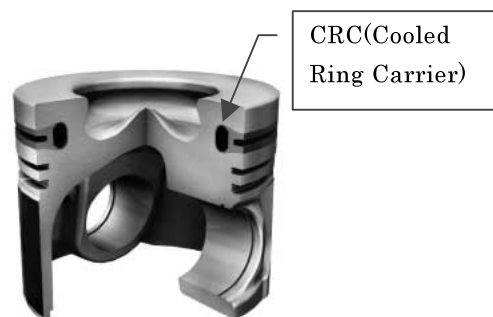


Fig.11 Piston

れを行い、疲労強度を向上している。

5.3 軽量化

1) クランクシャフト

クランクシャフトのカウンタウエイトをセミハーフ化することで1.3kg軽量化した。

2) エンジンオイルクーラ

エンジンオイルクーラは、従来のステンレス製からアルミニウム製とし、0.6kg軽量化した。それに伴う強度低下については、補強版の設置および厚みの最適化により確保した。

3) ヘッドカバー

樹脂製ヘッドカバー (Fig.10) を適用して、アルミカバー比1.0kg軽量化した。また軽量化とは別に、次に示す技術も同時に採用した。ヘッドカバー上面&パッフルプレートにカムからの噴出オイルを跳ね返して近接するカム上に滴下する構造を採用し、動弁系潤滑油量を半減して燃費改善につなげた。ブローパイガス中に含まれるオイルミストを効率良く補足してエンジン内に排出するために、スリットを持つ二重の隔壁によるセパレート構造、オイルドレイン用の斜面・溝を持つセパレート室を採用した。

6. DPFシステム開発

煤の堆積したDPFは定期的に再生させる必要があるが、高温の排ガスを生成するため追加の燃料をポスト噴射しなければならないが、この際に燃費悪化や燃料によるオイル希釈の弊害が発生する。またMZR-CD2.2ではカムシャフト、バランスシャフトの駆動にチェーンシステムを採用しており、オイル希釈下でのチェーンの信頼性開発という新たな課題が加わった。以上から、市街地での再生性能改善による燃費改善、オイル希釈性能向上を中心にDPFシステムの

更なる性能向上を図った。

開発課題と導入技術の関係をFig.12に示す。

Fig.13に示すように、再生時間短縮にはDPFの排ガス温を向上させることが非常に有効である。

- ・高耐熱DPF採用による再生目標温度40 UP
- ・減速時のポスト噴射実施
- ・新触媒の採用<sup>3)</sup>

新触媒はマツダ独自開発である。この触媒は煤燃焼性と耐熱性に優れており、煤燃焼速度をMZR-CD2.0以上としながら貴金属量を低減し、低コスト化を実現した。

その結果をFig.14に示す。DPF再生時の燃費をMZR-CD2.0比約60%改善し、オイル希釈もお客様の問題とまらないレベルにまで改善できた。また渋滞などの低車速でも再生可能な運転領域が拡大したことでお客様への負担は大幅に軽減できたと考えている。

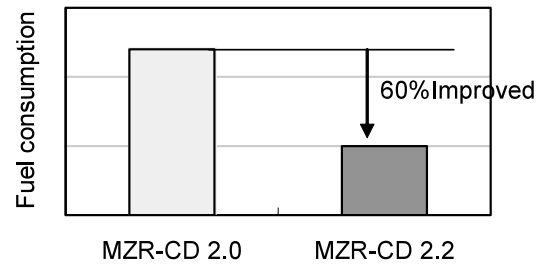


Fig.14 Improvement of Fuel Consumption at DPF Regeneration

7. ドライバビリティ改善技術

7.1 トルクベース制御の導入

現行MZR-CD2.0では、排気エミッション性能、NVH性能、燃費性能といった、相反する性能をバランスさせるため、噴射パターン、共通レール圧力、多段噴射インターバルなどの最適化を実施してきた<sup>1)</sup>。現行MZR-CD2.0は噴射量ベース制御であり、噴射パターンの切り替わり時にトルク段差が生じ、各性能とドライバビリティの両立に多くの工数を費やしてきた。

MZR-CD2.2では新たにスプリット噴射などを活用し、より高次元のキャリブレーションを実施している。一方でスプリット噴射はトルクへの影響が大きく、抜本的なドライバビリティ向上のために、MZR-CD2.2においてはトルクベース制御を開発した。

7.2 トルクベース制御概要と効果

本来、ドライバはアクセル操作よりトルクをコントロールしている。ドライバの要求トルクを読み取り、そのトルクを発生するための燃料噴射量を算出する制御である。

加速シーンでのエンジントルク変化を噴射量ベース制御と比較した形でFig.15に模式的に示す。

噴射量ベース制御 = トルク制御なしでは、要求噴射量から噴射パラメータを決定するため、噴射パターン切り替わ

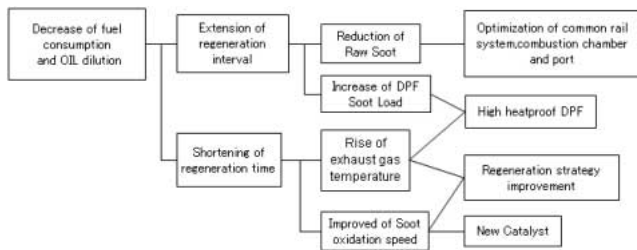


Fig.12 DPF Introduced Technology

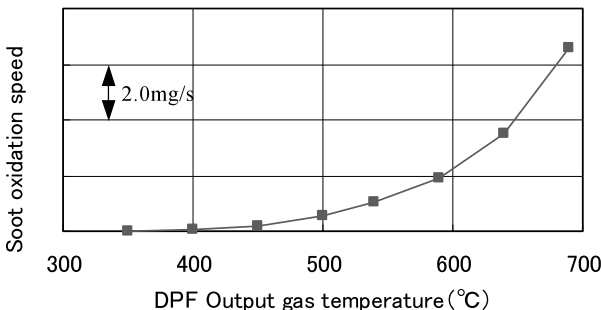


Fig.13 Soot Oxidation Performance

り時にトルク段差が発生する。トルクベース制御では、ドライバ要求トルクを達成できる、噴射量、レール圧、噴射インターバルを選択する。これらの噴射パラメータは噴射パターンに応じて最適化されており、様々な噴射切り替わり時においても、的確に要求トルクを発生することが可能となる。

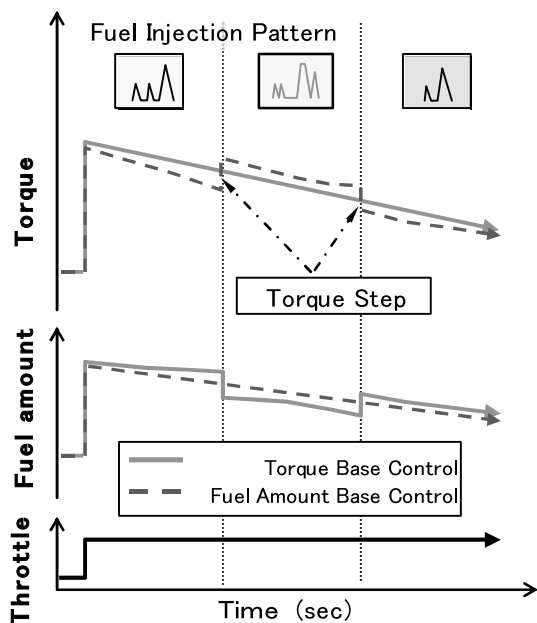


Fig.15 Benefit of Torque Control

このトルク制御導入により、実車ではトルク領域でのドライバビリティ開発、台上エンジンでは要求トルクに対する噴射パラメータの最適化といった、開発分担の明確化とともに、セット変更時におけるドライバビリティ開発の修正を最少とすることができ、飛躍的にキャリブレーション効率を改善した。

### 8. まとめ

要約でも述べたように、欧州ユーザのDEへの商品性に対する要求は高次元である。MZR-CD2.2の商品性を作りこむ上で、前モデル以上にMRE（欧州R&D拠点）と合同で、開発を実施した。その結果をフィードバックすることで、各性能のバランス点=ヨーロピアンテイストを作りこみ、「サステナブルZoom-Zoom」を達成することができた。

### 9. おわりに

2002年に初めて導入したコモンレールMZR-CD2.0から、本エンジンで3世代目となった。現行MZR-CD2.0を踏襲し、全面的な商品性の向上を本エンジンにて達成できたことから、欧州Stage5のエンジン開発はひとつの節目を迎えることができたと感じている。

この経験を今後の開発へフィードバックしながら、北米Tire2bin5、欧州Stage6、国内ポスト新長期など、新たな

技術課題へ挑戦し、マツダのDEブランドイメージを確実にしていく所存である。

### 参考文献

- (1) 中井ほか：乗用車直噴ディーゼルエンジンNew MZR-CDの紹介，マツダ技報，No.23，p98-103（2005）
- (2) 吉田ほか：直噴ディーゼル・エンジンにおけるモデルベースキャリブレーションの適用，機械学会基礎教育講習会資料集，No.07-114，p21-25（2007）
- (3) 鈴木ほか：新しいメカニズムによるPM燃焼触媒，マツダ技報，No.26，p88-93（2008）

### 著者



上杉康範



内藤雅博



安田浩明



山内道広



上月正志



森 恒寛



谷村兼次



森永真一