

論文・解説

19

# 乗用車用直噴ディーゼルエンジンNew MZR-CDの紹介

## Introduction of New MZR-CD, New Direct Injection Diesel Engine for Passenger Cars

中井英二\*1 森永真一\*2 廣瀬倫之\*3  
Eiji Nakai Shinichi Morinaga Tomoyuki Hirose  
白橋尚俊\*4 谷村兼次\*5 志茂大輔\*6  
Naotoshi Shirahashi Kenji Tanimura Daisuke Shimo

### 要約

欧州市場のディーゼルエンジン（以下DE）乗用車は、常に新しいモデルへのユーザの期待が高く、競争が激しい。マツダは2002年にコモンレール方式直噴DE（MZR-CD）をMazda6（日本名：アテンザ）、MPVに搭載して欧州市場導入し、2004年にディーゼルパティキュレートフィルタ（以下DPF）をボンゴで国内市場へ導入した。これらの経験を基に、環境性能、出力性能、燃費、NVH性能を、更に高い次元で両立できる、競争力のある乗用車用DEを設計開発した。本稿ではMazda5（日本名：新型プレマシー）、Mazda6用に開発量産化したDEの技術コンセプトについて紹介する。

### Summary

The diesel engine competition in Europe is ferocious since the customers are sensitive to the new diesel engine technologies. In 2002, Mazda launched “Common rail type Direct Injection Diesel Engine(MZR-CD)” in Europe, laded on Mazda6 and MPV. In 2004, Mazda brought “Diesel Particulate Filter(DPF)” to the domestic market, laded on Bongo. Based on these experiences, we developed more capable diesel engines heading to Mazda5 and Mazda6, further evolving the output, the environmental performance, NVH performance, and the fuel economy.

## 1. はじめに

乗用車用ディーゼルエンジン（以下DE）にコモンレール方式が普及して以来、欧州市場のディーゼル乗用車は、

ユーザの要望である、走行性、燃費、静粛性、環境への配慮といった項目が飛躍的に向上し、普及を続けている。

マツダでは、市場導入しているコモンレール方式DE（MZR-CD）の一層の改善を狙いとし、1）走行性能、NVH性能、燃費性能、ドライバビリティ性能の高次元で

Table 1 Main Specification

Engine	MZR-CD	New MZR-CD	
Displacement (ml)	1998	←	
Bore×Stroke (mm)	86×86	←	
Combustion type	Direct injection	←	
Swirl ratio	2.5/4.0	2.5	
Variable swirl system	with	N/A	
Intake shutter valve	DIAPHRAGM	DC MOTOR	
EGR valve	DIAPHRAGM	DC MOTOR	
EGR cooler	with	High efficiency	
Compression ratio	18.4	16.7	
Valve driving system	OHC, belt-driven 16valves	←	
Valve Timing	IN	Open BTDC	6°
		Close ABDC	30°
	EX	Open BBDC	41°
		Close ATDC	8°
Valve lift (mm)	IN:10mm, EX:8mm	←	
Fuel injection system	Common rail system DENSO U2-P	Common rail system DENSO U2-P (improved)	
Fuel pressure (MAX)	180MPa	←	
Supercharger system	Variable geometry turbocharger IHI RHF4V	← + High rpm & efficiency Low Inertia IHI RHF4V	
Inter-cooler	with	←	
Max. torque	310Nm/2000rpm	360Nm/2000rpm	
Max. power	100kW/3500rpm	105kW/3500rpm	
Diesel Particulate Filter	N/A	With	
A/F sensor	N/A	With	
EU exhaust gas emission level	D4(Some model/Stage3)	Stage4	

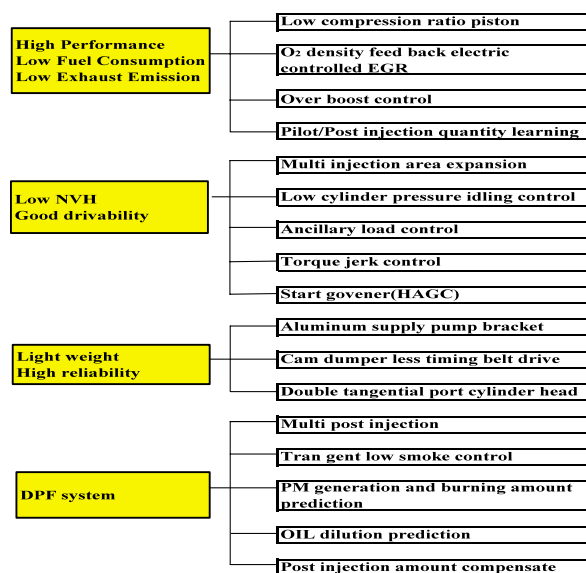


Fig.1 Main Introduced Technology

\*1~3 第2エンジン開発部  
Engine Development Dept. No.2

\*4, 5 第3エンジン開発部  
Engine Development Dept. No.3

\*6 技術研究所  
Technical Research Center

の両立, 2) PM排出を更に低減するDPFの装着, を具現化するシステムを設計し, 更なる進化を遂げた新型の乗用車用DE (New MZR-CD) を開発した (Table 1)

## 2. 技術課題と主要導入技術

前述の狙いに対し, 技術課題は以下の通りである。

- 1) 高出力低燃費及び低エミッション
- 2) 低NVH化制御及びドライバビリティ向上
- 3) エンジン本体の軽量化と高い信頼性
- 4) DPFによる低PM化

これら技術課題を解決するため, MZR-CDから継承発展させた技術と, 新しく導入した技術をFig.1に示す。

## 3. 基本性能

### 3.1 燃費性能

DE車両の燃費性能に対するお客様の期待は高く, それに応えるべく進化を遂げている。まず, 低圧縮比化ピストンを採用してポンプ損失低減と燃焼温度の低減を図った。そして, 燃焼温度の低減に伴い, EGR量と燃料噴射圧力・タイミングを最適化して燃焼効率を改善するとともに, サプライポンプ駆動時の損失を抑えた。これら施策により現行比5~8%のエンジン単体燃費を改善した。また, 車両燃費性能は, 通常, DPFにトラップしたPMの再生に使用する燃料分だけユニット燃費から目減りするが, ①O<sub>2</sub>濃度ベースのEGR制御及び燃料噴射制御の導入で過渡時のRawPM排出量を抑えてPM再生回数を低減, ②PM再生運転時の燃料噴射制御を高効率化, ③車両抵抗低減, によりDPF非装着の現行比において欧州モード燃費 (NEFC) で7%の車両燃費改善を実現している (Fig.2)。

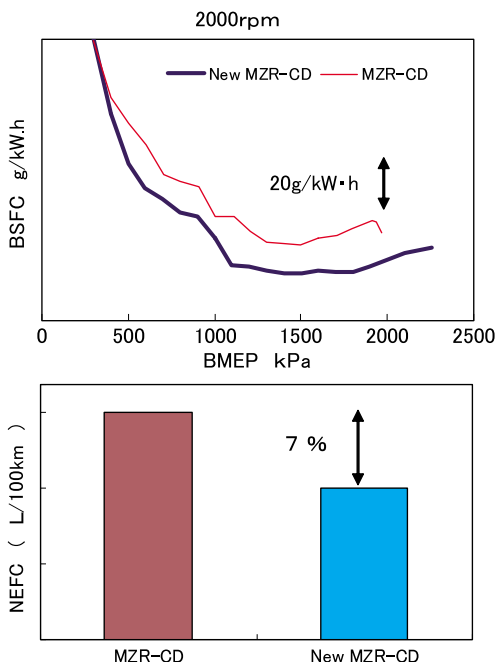


Fig.2 Fuel Consumption Performance

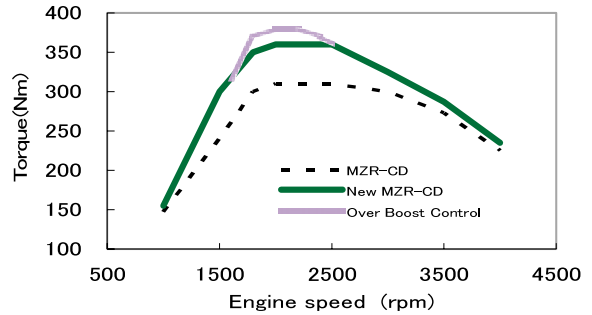


Fig.3 Output Performance

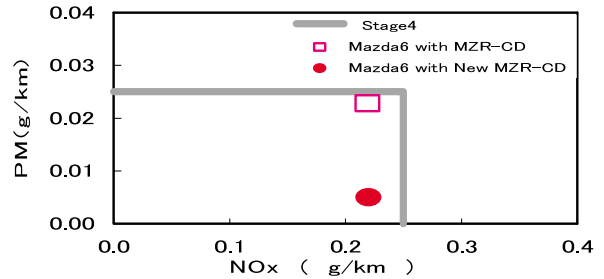


Fig.4 Exhaust Emission Performance

### 3.2 出力性能

出力性能の現行との比較をFig.3に示す。低圧縮比化と構造系の高剛性化による燃焼効率改善と, 特に低回転域での過給機効率改善が相まって, 大幅なトルク特性改善を実現している。また過渡時には, 一時的に過給圧を増加させトルクを向上するオーバーブースト制御を用いて, 車両の過渡レスポンス改善に貢献している。

### 3.3 排気エミッション性能

現行はEuro4 (一部Euro3) に対応した低排気エミッション性能を実現していた。このエンジンをベースとして①低圧縮比化によりベース燃焼が低NOxを実現できること, ②DPF導入により, PMの排出をほとんど0にすることができることにより, Fig.4に示すように十分な低排気エミッション性能を実現している。

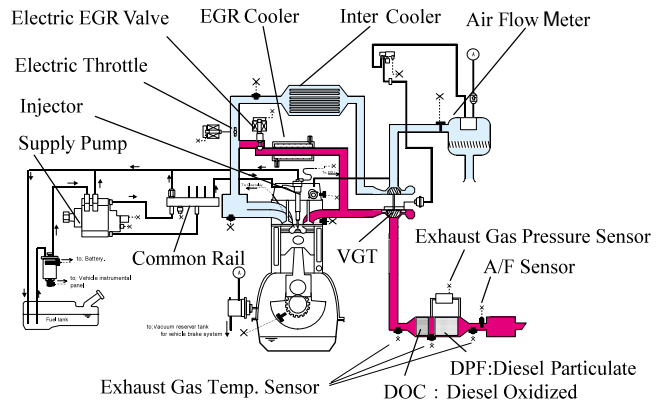


Fig.5 Engine Control System Diagram

#### 4. エンジンシステム

Fig.5に示すようにDPFシステム及びコモンレールシステムと、可変容量ターボチャージャによりエンジン制御システム及び、吸排気システムを構築した。

A/Fセンサは、DPF後に設置し、煤からの汚損を回避している。このセンサを用いて、シリンダ近傍の酸素濃度をモデルで推定し、目標の酸素濃度になるようにEGR量を制御することでEGR量と燃料噴射量ばらつきに起因した走行時のエミッションばらつきを抑制している (Fig.6)。また、Fig.7に示すように、過渡性能においても、酸素濃度を推定して最適な噴射パラメータを設定することで、狙いの低PM性能を得ることができている。DPFシステムは、国内商用車で採用している構成を基本的に流用しており、最新のコモンレールシステム (株デンソー製U2-P) と電子スロットル、各センサ類と1.9Lの酸化触媒と2.5LのDPFの組合せでPM堆積量を推定し再生するシステムを構築している。静粛性のための多段噴射に加えて、PM再生のためのポスト噴射の必要性から、コモンレールシステムは、PCMの32bit化を伴って、毎サイクル7回の多段噴射を実現している。また、過給機には、現行よりも更に高回転、ハイレスポンス化したIHI(株)製RHV4を装備し、車両レスポンス改善を図った。

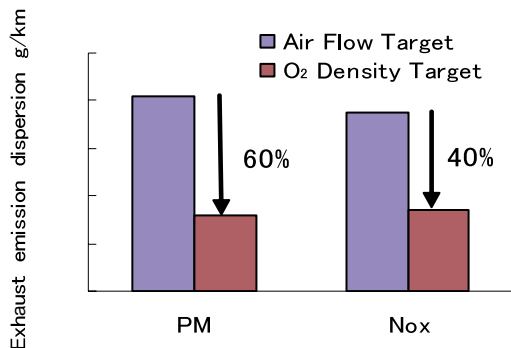


Fig.6 Effect of O<sub>2</sub> Model F/B EGR Control (W/O DPF)

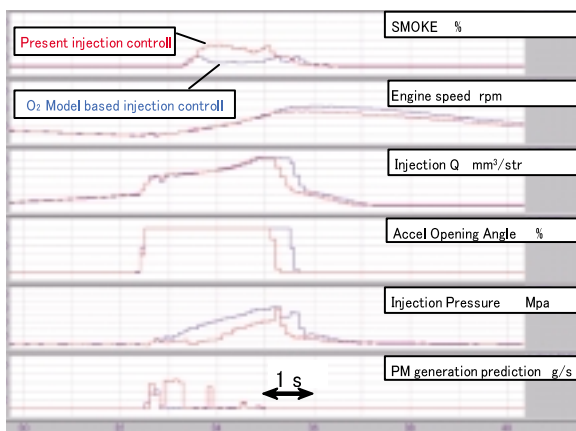


Fig.7 Smoke Reduction Effect of O<sub>2</sub> Model Based Injection Control

#### 5. エンジン本体構造

##### 5.1 軽量化

New MZR-CDエンジンでは従来の剛性&強度を維持しつつ本体系の軽量化に取り組み、それぞれ従来比、シリンダブロック系：3%、潤滑系：7%、タイミングベルト系：20%、ポンプブラケット：47%の軽量化を行った。これらはCAEの活用や負荷分析、レイアウトの最適化を含めた活動の成果である。

##### 5.2 シリンダヘッド、ピストン

シリンダヘッドは、スワール比と吸入効率を高次元で両立させたダブルタンジェンシャルポート<sup>(1)</sup>を踏襲しながら、燃焼圧力の増加に対応するべく、応力解析による検討を重ねた。Fig.8にFEM解析図を示す。

ピストンは従来構造をベースに燃焼改善を目的として低圧縮比化を図った。具体的には、燃焼室直径を大きくする方向で燃焼室容積と形状を変更した。その際、冷却空洞形状に制約が発生するため、冷却性能を損なわず、応力集中を避ける形状に改善することで、更なる信頼性向上を図った。また、トップリング溝部は従来の金属多孔体に対し、耐磨耗性の向上とコスト低減を狙ったセラミック繊維成形体を新たに開発した。

Fig.9にピストンカット図を示す。

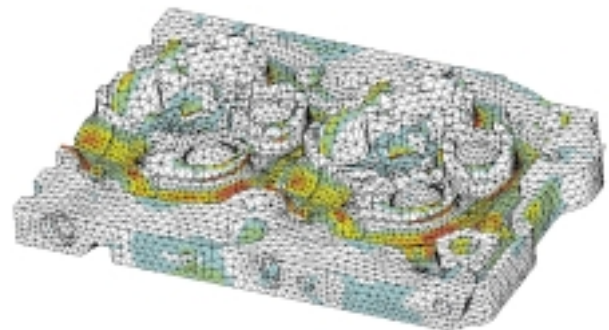


Fig.8 Cylinder Head FEM Analysis

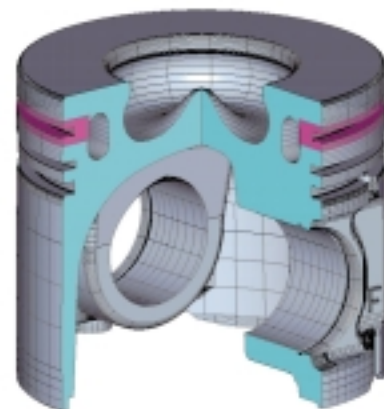


Fig.9 Low Compression EVVC Piston (EVVC: Expansive Vertical Vortex Combustion)

## 6. PM排出量予測技術

### 6.1 PM発生量予測

エンジンより排出されるPM発生量は、主に空気過剰率（以下、 $\lambda$ ）、噴霧の状態、筒内温度、噴射パターン等々の因子に影響される。このように、DEの場合には燃焼に起因する多くのパラメータが存在しているため、正確にPM発生量を見積もることは困難である。そのため、比較的影響度の高いパラメータについて実験値をもとにPM発生量を算出するモデルを構築した。特に大きく影響しているのは噴射パターンと  $\lambda$  の影響である。Fig.10に示すように、多段噴射回数が増えれば過渡時の低  $\lambda$  時には多くの煤が発生する。それをモデルにするとFig.11のような排出ガス重量中の煤密度特性になる。このような特性を領域毎に作成し、噴射圧力、温度、EGR量によって補正することで、Fig.12に示す高精度なPM発生量モデルとして実用化している。

### 6.2 差圧による堆積量予測

DPF内に堆積しているPM量の推定には、国内ポンゴで採用している「DPFへのPM捕集パターンのモデル化によりDPF前後の差圧から高精度に捕集量を算出するシステム<sup>(2)</sup>」を踏襲している。

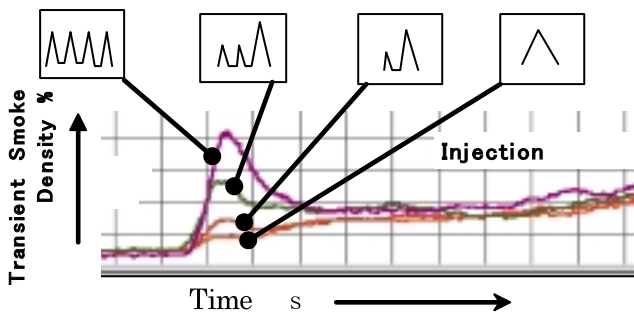


Fig.10 Multi Injection Transient Smoke Characteristic

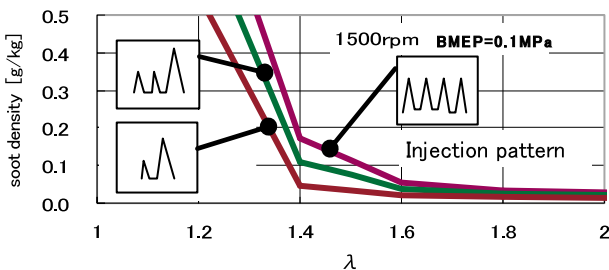


Fig.11 Multi Injection Smoke Density Characteristic

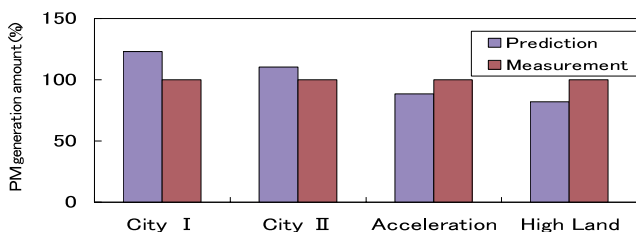


Fig.12 Accuracy of PM Generation Amount Prediction

## 7. DPF再生技術

### 7.1 燃料によるオイル希釈量推定

DPFに堆積したPMの燃焼（再生）には、DPFの温度をPMの自己発火温度（約550℃）以上に保持する必要がある。一定量のPMが堆積するとDPF再生のため膨張行程噴射（ポスト噴射）を行ってDPF入口の排出ガス温度を上昇させている。しかしポスト噴射は、ピストンが下降途中に燃料を噴射するため、蒸発せずにシリンダライナーに衝突した燃料はエンジンオイルに混入してオイルを希釈する。このオイル希釈量は、DPF再生中の車両の走行状態によって異なるため、本システムはこの希釈量を推定している。

希釈量推定にあたり、種々の走行条件においてシリンダライナーに燃料が衝突する割合の計算をCFD燃焼シミュレーション（GTT code<sup>(3)</sup>）を用いて行った（Fig.13）。Fig.14は膨張行程中盤でポスト噴射した燃料液滴がシリンダライナーへ衝突する割合と筒内温度と筒内圧力の関係を計算で求めたものである。円の大きさは各走行条件での燃料の衝突割合を示しており、筒内温度と筒内圧力が高いほど衝突割合は低下する傾向がある。この結果を使って算出したDPF再生中のオイル希釈の推定値と実測値は良好な相関が得られた。Mazda5/Mazda6は、オイル希釈量推定値が所定の値を越えた場合にDPF再生を中止するとともに、DPFランプを点滅させてドライバに販社でのオイル交換を知らせるシステムとしている。

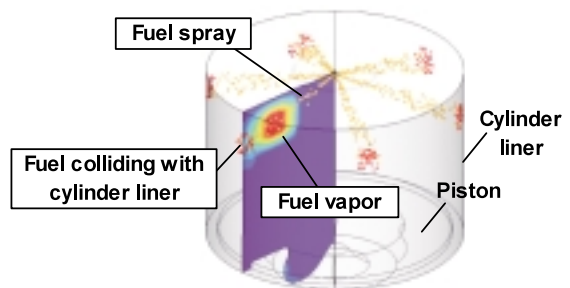


Fig.13 Post Injection Analysis with CFD

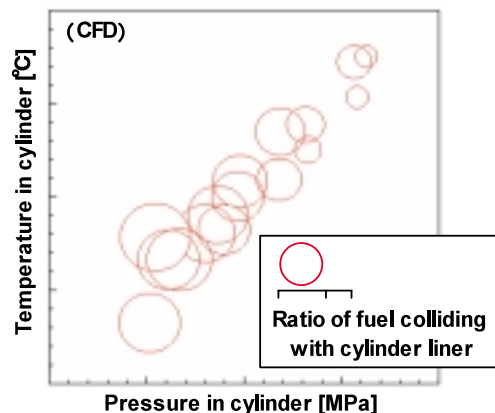


Fig.14 Effect of Temperature and Pressure in Cylinder on the Ratio of Fuel Colliding with Cylinder Liner in Post Injection



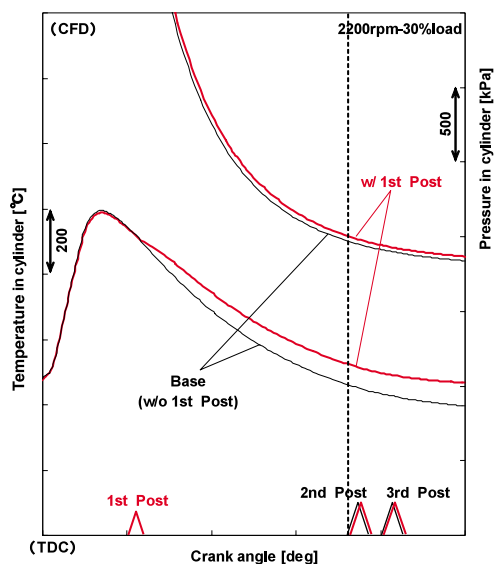


Fig.15 1st Post Injection Effect on Temperature and Pressure at 2nd and 3rd Post Injection Period

### 7.2 多段ポスト噴射

本システムは、エンジンオイル交換推奨距離の延長のため、DPF再生時に行うポスト噴射によるオイル希釈を抑制する多段噴射（多段ポスト噴射）を行っている。DPF再生中は、上述のCFDを用いたオイル希釈量推定技術を使い、最大3回にポスト噴射回数を分割して、燃料のシリンダライナーへの衝突を抑制している。エンジン負荷が低い走行条件においては、筒内温度と筒内圧力が低く、ポスト噴射した燃料がシリンダライナーへ衝突する割合が多くなる。この割合を抑えるため、圧縮上死点に近い噴射タイミングで近接ポスト噴射を行い、筒内温度を高めた後に、後半のポスト噴射を行っている（Fig.15）。後半のポスト噴射は、DPF上流にある酸化触媒へ燃料を供給し、酸化触媒で燃料を反応させた反応熱でDPF入口の排出ガス温度を上昇させるものである。軽負荷ではこの後半のポスト噴射も分割し、噴霧の到達距離を短縮してライナー衝突を抑制している。

## 8. 低NVH化技術

### 8.1 噴射適合による低NVH化

MZR-CDでは通常のDEで問題になるノッキング音を大幅に改善したがごく一部の領域では依然課題が残っていた。加えて、大幅なNVH向上を実現している他社最新車両との競争力を維持するために更なる改善が求められた。そのため、NVH（ノッキング）と排出ガスエミッション（NOx, PM）を高次元で両立させながら多段噴射領域（4段や3段噴射）を大幅に拡大して対応した（Fig.16）。高負荷領域に関しては、スモークを抑えてかつ、ノッキング音も低減できる予混合パイロット燃焼<sup>1)</sup>を採用した。また排出ガス、燃費、NVH性能が両立できる高回転領域では、パイロット噴射やシングル噴射を採用している。これらに

より、Fig.17に示すように全領域で現行比ノッキング音を大幅に改善できた。

また、エンジントルクアップに伴い、DMF（Dual Mass Flywheel）の影響で全負荷時の角速度変動が大きくなり、補機ベルトの異音が発生する問題に対して、従来のテンションチューニングに加え、補機に任意の負荷を与えることでベルト共振をコントロールして異音を抑える技術を採用している。

### 8.2 低燃焼圧アイドルリング

欧州ではアイドルストップなどの活動が進んでいるが、依然、お客様がアイドルの音、振動を耳にする機会が多い。車が停車している状態であり、周囲からの音も低いので、エンジンのノッキング音や振動伝達音、異音が目立つ傾向にある。現行でもアイドルノッキング音の少ないエンジンは好評であったが、新型では電子スロットルを活用して大幅なNVH改善を行った。アイドル時は通常時と比べ燃焼圧力を1.5Mpa下げる程度に吸気を絞り、エンジン回転数も25rpm低下させることで、エンジン音を2dB低減することができた。また、DMFの採用により、エンジン側の角速度変動が大きくなってギヤの歯打音などの異音が発生する問題やエンジン振動に対しても、燃焼圧力を抑え、角速度変動を約2rad/sec低減することで異音を大幅に低減し、DEとしてはベストインクラスの快適なアイドルリングNVHを実現している（Fig.18）。

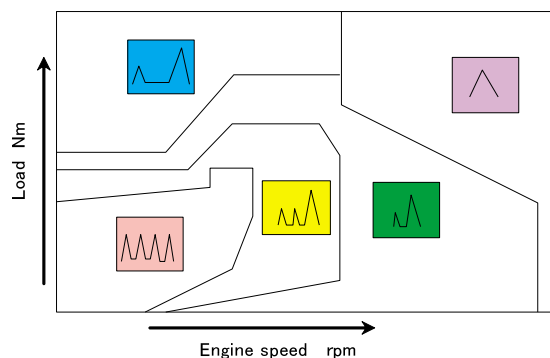


Fig.16 Multi Injection Pattern Map

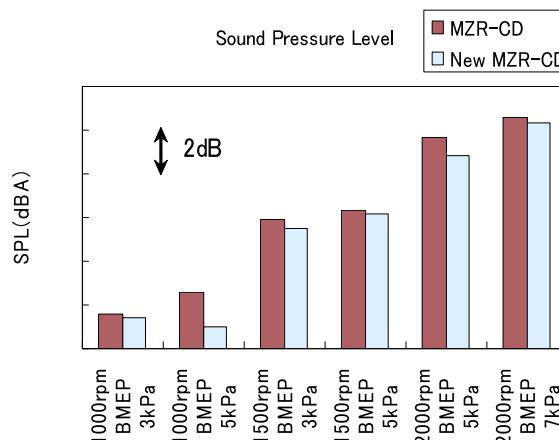


Fig.17 Effect of NVH Improvement

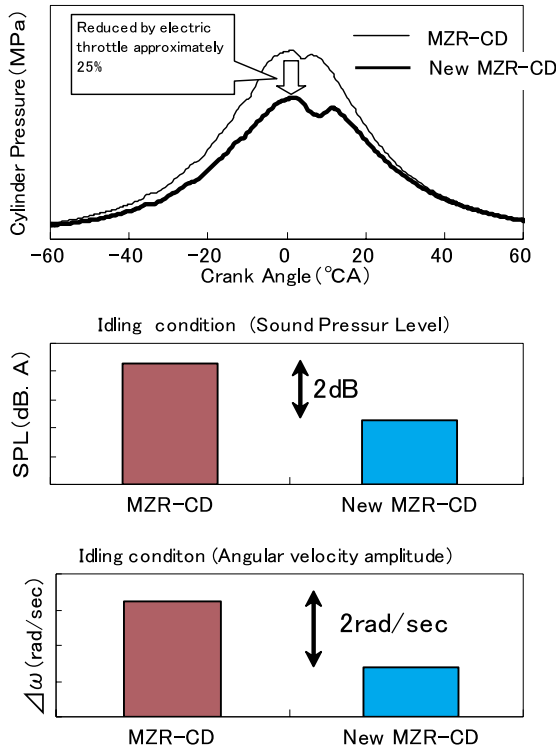


Fig.18 Effect of Low Pressure Idling Technology

### 9. ドライバビリティ改善技術

多段噴射コモンレールシステムのドライバビリティ改善は、排出ガスエミッション性能、NVH性能、DPF再生性能といった、相反する噴射制御要求の中で、それらの性能を両立せねばならず、コモンレール適合技術の中で最も難易度の高い技術の一つである。本モデルから、トルク制御技術を導入することで、より一層のレベルアップを図っている。

#### 9.1 サージ対策

現行から耐ジャーク性向上を狙い、トルクジャークフィードバック制御を追加した。各ギヤ毎にジャーク振動系の固有周波数、減衰係数を定義し、逆位相の燃料噴射をすることで車体振動を早く減衰させている (Fig.19)。

#### 9.2 発進ガバナ (HAGC)

ギヤ比が高速化するDE車の発進性を改善するためには

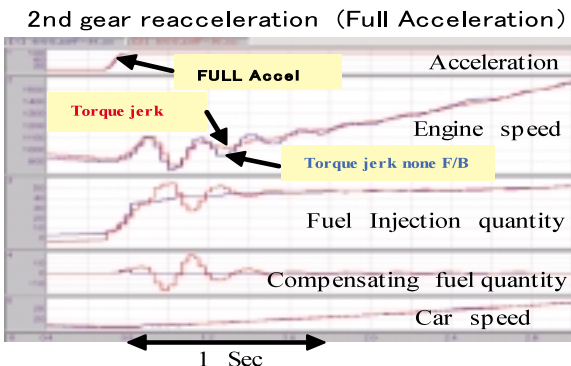


Fig.19 Effect of Torque Jerk Control

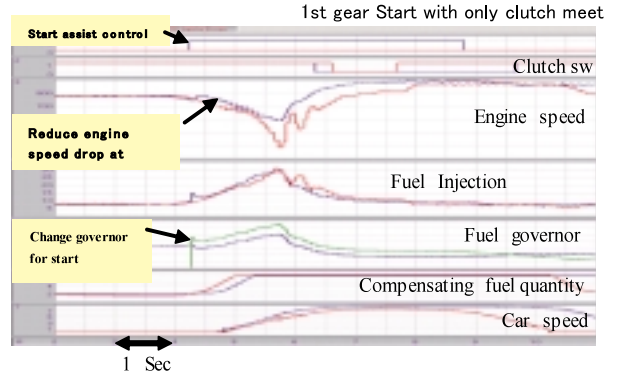


Fig.20 Effect of HAGC

アイドル回転速度付近での噴射量を持上げる必要がある。但し単純にガバナパターンを持上げてしまうと、アイドル回転付近でのアクセル全閉走行時の車体振動やアイドルハンチングなどの弊害が発生する。そのため、Fig.20に示すように、発進を判定した際は専用のガバナに切り替えることで弊害をなくした。また 発進後のガバナ切り替え(戻し)方も走行状態によって変えることで違和感を低減している。

### 10. おわりに

次世代ユニットとして導入したMZR-CDをベースにDPFシステムを構成要素に加えながら欧州乗用車トレンドをリードできるパワーユニットに進化させることができた。今後ともお客様に喜ばれる技術を育成していく所存である。

### 参考文献

- (1) 中井 他：コモンレール式直噴ディーゼルエンジン MZR-CD, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.44-02, p.1-4 (2002)
- (2) 松江 他：ポンゴ用触媒担持型DPFシステムの開発, マツダ技報, No.22, p.126-131 (2004)
- (3) Wakisaka, T. et al., COMODIA2001, p.426 (2001)

著者



中井英二



森永真一



廣瀬倫之



白橋尚俊



谷村兼次



志茂大輔