

特集：MAZDA CX-60

05

SKYACTIV-D 3.3 の開発
—軽量で低燃費，低振動，高信頼性を両立した
直列 6 気筒構造系技術—
Development of the Skyactiv-D 3.3
— Technology of Inline Six-Cylinder Engine Structural Parts that
Achieved Lightweight, Low Fuel Consumption,
Low Vibration and High Reliability—

岡澤 寿史 ^{*1} Hisashi Okazawa	本田 絢大 ^{*2} Kenta Honda	青木 勇 ^{*3} Yu Aoki	詫間 修治 ^{*4} Shuji Takuma	西岡 勇介 ^{*5} Yusuke Nishioka
山内 智博 ^{*6} Tomohiro Yamauchi	山口 正徳 ^{*7} Masanori Yamaguchi	菊池 正和 ^{*8} Masakazu Kikuchi	小泉 昌弘 ^{*9} Masahiro Koizumi	内田 敦 ^{*10} Atsushi Uchida

要 約

マルチソリューションによる本質的な環境貢献を実現するためには、電動化が進む現状においても、内燃機関の進化が継続して求められている。今回、内燃機関の進化ビジョンの 2nd Step を実現する新型直列 6 気筒の縦置きディーゼルエンジンを開発した。このエンジンはこれまでの SKYACTIV-D の特徴である低 Pmax 燃焼技術に加えて、これまで 4 気筒開発で培ってきた構造技術における機能の進化、最適化及び統合を行い、大排気量で課題となる重量と機械抵抗に対して、クラストップレベルの軽量化と従来 4 気筒エンジンを凌ぐ低機械抵抗を実現した。加えて 6 気筒の良さである低振動を確保しつつ、マツダの独自価値である魂動デザインや人馬一体といった人間中心のクルマ作りに求められるパッケージ要求を、高い信頼性を確保しながら実現した。本稿では、その実現に向けて導入した技術について紹介する。

Abstract

To realize essential contributions to the environment in a multi-solution approach, evolution of the ICE is continuously required even in the midst of electrification. Mazda has newly developed an inline six-cylinder diesel engine which embodies the 2nd step of the company's vision for ICE evolution. The Pmax-lowering combustion technology that characterizes Skyactiv-D was inherited from the previous four-cylinder engine, but the engine hardware was improved by evolving, optimizing and integrating the functions of structural parts. The combination of these technologies solved weight and friction loss issues associated with a large-displacement engine. As a result, the engine has achieved best-in-class lightness and even smaller friction loss than the former four-cylinder engine. It has also satisfied vehicle package requirements to realize KODO design and the human-centric car development represented by "Jinba Ittai", while maintaining low vibration of a six-cylinder engine and ensuring reliability. This article introduces the technologies adopted to achieve such results.

Key words : Heat engine, Compression ignition engine, Performance/fuel economy/efficiency, NVH lightness, Low friction loss

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

*5~8 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*9,10 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

1. はじめに

クルマの電動化への移行期及び将来的なカーボンニュートラル液体燃料の選択肢を考慮し、マツダは内燃機関の理想を追求し続け⁽¹⁾、どのような時代でも、意のままの走りや環境性能の進化を両立するマルチソリューションの提供を目指している。

この度、ラージ商品群を支えるパワートレインの1つとして、力強いトルク特性に加えて、乗用車用ディーゼルエンジン実用域世界トップの熱効率、及び従来比で更なるクリーン排気を同時に実現した 3.3L 新型直列 6 気筒のクリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D3.3 を開発した。

2. 開発コンセプトと主要諸元

新型エンジンの外観を Fig. 1 に、技術開発コンセプトを Fig. 2 に、及び主要諸元を Table 1 に示す。新型エンジンは Fig. 2 上段に示すように大排気量化と、2 段エッグ燃焼室と空間制御予混合燃焼 DCPCI による燃焼改善をコンセプトの中心に据えて、走りや排気の改善、及び燃費の大幅改善を達成している^(2,3)。この中で Fig. 2 下段に示すように特に軽負荷域の燃費については燃焼改善だけでなく機械抵抗改善がこのコンセプトを支えている。



Fig. 1 Engine General View

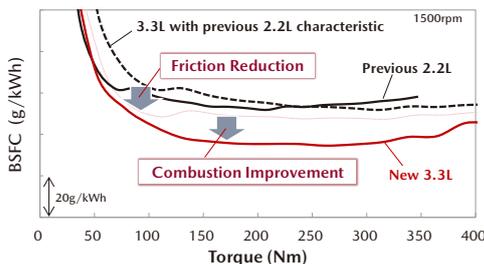
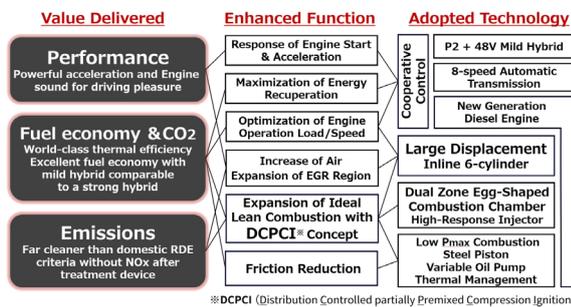


Fig. 2 Development and Technology Concept

Table 1 Main Dimension and Specification

Engine	Previous 2.2L	New 3.3L
Engine Type	In-Line 4	In-Line 6w/48V mild hybrid
Displacement	2188cm ³	3283cm ³
Compression ratio	14.4	15.2
Fuel Injection System	Common Rail System	←
	G4P-I (Piezo w/ i-ART [®] *)	←
Max. Injection Pressure	200MPa	250MPa
Piston material	Aluminum	Steel
Combustion Bowl Shape	Stepped Egg-shae Combustion Chamber	Dual Zone Egg-shape Combustion Chamber
Type of Combustion	Premixed Charge Ignition	Distribution Controlled partially Premixed Compression Ignition
Turbocharger	2 Stage Turbocharger HP: FGT LP: Turbocharger with variable turbine geometry	Single Turbocharger with variable turbine geometry
EGR System	HP-EGR	HP & LP-EGR
After-treatment System	DOC+DPF	←
Max. Torque/rpm	450Nm/2000rpm	550Nm/1500-2400rpm
Max. Power/rpm	147kW/4000rpm	187kW/3750rpm
Emissions	JPN H30 (WLTC)	←

*: 「i-ART[®]」 is a registered trademark of DENSO CORPORATION

しかし、排気量や気筒数を増やすと、エンジン本体の大型化による重量の増加と摺動部の増加による機械抵抗の増加、更にはマツダの独自価値である魂動デザイン及び人間中心を支える人馬一体を実現するためには、限られたスペースへの搭載性といった課題の解決が必要となる。新型ではこれらを従来からの低 Pmax (Maximum cylinder pressure) 軽量構造系^(4,5)の踏襲と 6 気筒化を含めた機能進化によって合理的に解決した。これら構造系技術の具体的な機能進化について紹介する。

2.1 重量の最小化

重量比でエンジンのおよそ半分を占めるシリンダーブロック・ヘッド等の構造部品とピストン・クランク・コンロッドの往復回転部品について、諸元を決めている共通因子を抽出し、関連する機能目標の適正化及び技術進化による重量低減を図った。

(1) 機能目標の適正化

SKYACTIV-D の大きな特徴である低 Pmax コンセプト^(4,5)を踏襲しつつ、往復回転系部品に作用する実働荷重が一定となるようにエンジン回転数に応じた保証筒内圧の適正化 (Fig. 3)、排気量拡大を燃費・エミッション

性能に機能配分することによる最大トルクの適正化、ゆとりあるトルク特性を活かしたエンジン保証回転数の適正化を行い、部品への作用力をミニマム化した。

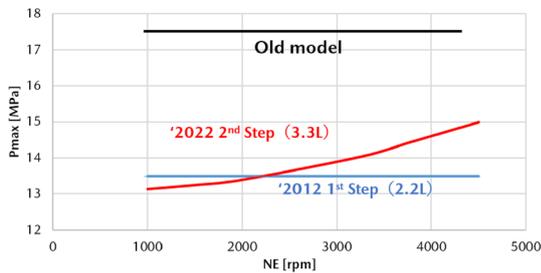


Fig. 3 Cylinder Pressure Limitation

(2) 技術進化

シリンダーライナーへの溝形状追加と冷却用クロスドリル径の縮小により、同製法のディーゼルエンジンではクラストップレベルであるボア間肉厚 8mm を実現し、エンジン全長の短縮化を実現した。また各構造部品は作用力に対して機能目標を制約関数とし、肉厚を徐変しながら最小重量で機能成立する最適化解析を行い仕様決定した (Fig. 4)。これらの結果、SKYACTIV-D3.3 はトルク vs 重量のトレンドラインに対して BIC (ベストインクラス) を、排気量 vs 重量のトレンドラインに対してクラストップレベルを実現した (Fig. 5)。

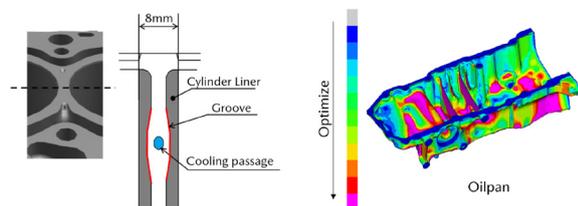


Fig. 4 Weight Reduction

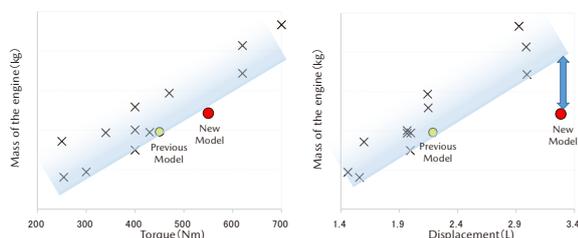


Fig. 5 Engine Mass

2.2 機械抵抗の最小化

ピストン材質をアルミからスチールへ変更し、冷却損失の低減だけでなく、ライナーとのクリアランスを最適に制御することで全体の約 1/3 を占めるピストンの摺動抵抗を低減した。また新開発した低粘度オイルを可変容量オイルポンプで緻密に油圧制御することで、各摺動部の信頼性を確保しながら機械抵抗低減を実現している。加えて冷却水制御バルブやウォータージャケットスペー

サーにより暖機性を改善することで実用領域も考慮した機械抵抗低減を実現している。更に、直列 6 気筒化によりバランスシャフトを廃止することができ、排気量増加にもかかわらず、前モデル比低減し、クラストップの低機械抵抗を実現した (Fig. 6)。

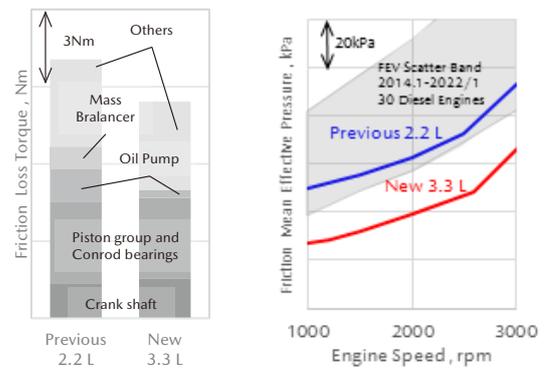


Fig. 6 Engine Friction

2.3 搭載性

直列 6 気筒縦置きのパッケージを実現するために、ボアピッチ縮小によるエンジン全長の短縮に加えて、クラッチャブルプーリーによる衝突安全性の確保、ドライブシャフトが貫通したオイルパン構造とすることで、AWD でも 2WD と同等のエンジン全高を実現した。また各部品の寸法を切り詰め、フロントデファレンシャル及びプロペラシャフトをエンジンセンターに限りなく寄せる構造とすることで、人馬一体の一丁目一番地であるアクセルペダル理想位置の確保を実現した (Fig. 7)。

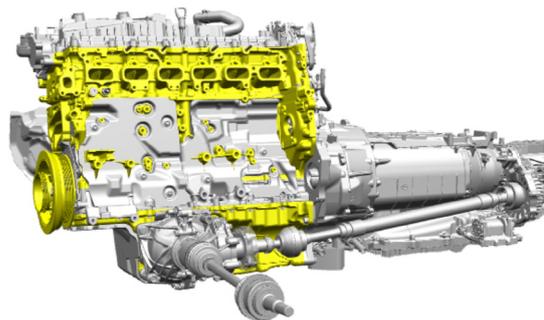


Fig. 7 Package

以降の章では、上記機能進化を実現したエンジン内部構造技術として、可変油圧システムの開発、スチールピストンの開発及びクランクシステムの開発を中心に紹介する。

3. ブレークスルー技術

3.1 可変油圧システムの開発

Fig. 8 に油圧システム回路を示す。ピストンのスチール化に伴う高負荷域でのピストン冷却性の強化 (ピストンクーリングオイルジェット流量増大) と、直列 6 気筒

化に伴うクランクシャフト軸受への供給油量増加により、従来比 250%の供給流量が必要となった。増加した要求流量を確保し、実用低負荷領域におけるエミッションや燃費をより向上させるため、可変容量オイルポンプで緻密に制御することで、現行 4 気筒ディーゼルエンジン同等以下のオイルポンプ駆動力で各種要求を実現した (Fig. 9)。

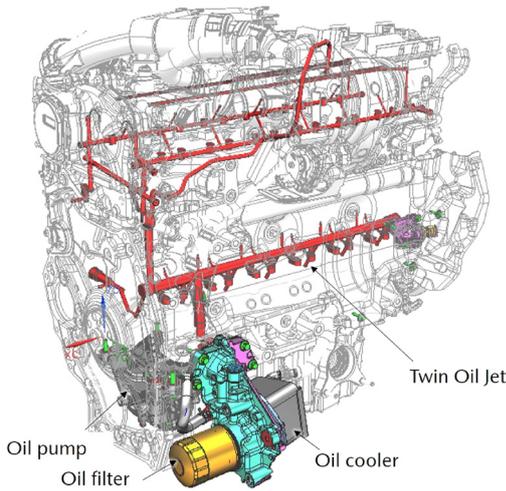


Fig. 8 Oil Circuit

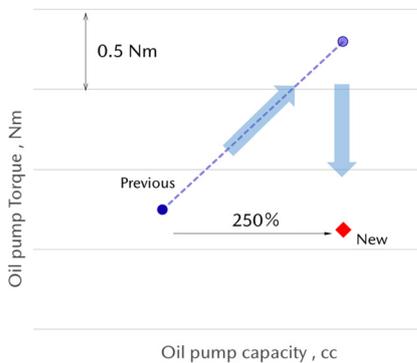


Fig. 9 Oil Pump Capacity vs Torque

Fig. 10 に目標油圧 MAP を示す。低油圧、中間油圧、高油圧の大きく 3 つの目標油圧を設定しており高負荷ほど信頼性に機能配分している。一方で常用回転域は低油圧制御にして常時噴射するサブジェットによりピストン信頼性を確保しつつ、ピストン表面温度は高くして冷却損失や未燃損失、オイルポンプの機械抵抗を低減させて燃費性能に機能配分した。ピストンに関する詳細については後述する。

また、登坂走行や高速走行により油温が高くなると、低油圧制御領域を縮小し、中間油圧制御の領域を拡大させた。それにより、負荷が低くてもメインジェットを噴射させてピストン冷却に必要な最小限の油圧となるよう制御した。このように運転シーンごとに可変容量オイルポンプによる緻密な油圧制御を行い、性能と信頼性を高次元で両立させた。

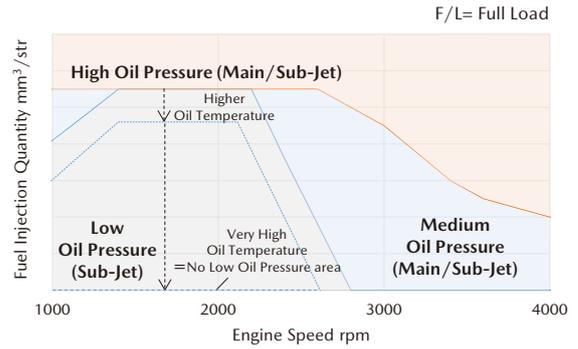


Fig. 10 Target Oil Pressure Map

3.2 スチールピストンの開発

(1) スチール製ピストンの採用

新型エンジンでは、燃費改善を目的にスチール製のピストンを採用した。改善の内訳は機械抵抗損失と未燃&冷却損失の低減による。Fig. 11 に新旧モデルのピストン外観を示す。各損失の低減メカニズムについて以下に説明する。



Fig. 11 Previous-Aluminum Piston (Left)
New-Steel Piston (Right)

a. 機械抵抗損失の低減

スチールピストンによる機械抵抗低減のメカニズムはスカートクリアランスの最適化によるものである。アルミピストンの場合、一定以上の温度域で運転すると、熱膨張によりシリンダボア径<ピストンスカート径となる。このときスカート部分はシリンダーに対し緊縛された状態となり、機械抵抗を増大させる。一方でスチールピストンの場合は線膨張係数が小さいため、極冷間の一部の条件を除いてスカートクリアランスを保つことができ、機械抵抗が低減できる。機械抵抗損失低減の効果でWLTC 国内モードの場合は 1.8%の燃費改善効果を得ている。

b. 未燃&冷却損失の低減

スチールピストンはアルミピストンと比較して熱伝導率が低く、耐熱性が高い。そのため燃焼室表面温度を高くすることができ、燃え残りによる未燃損失を低減することができる。また、材料強度が高いことにより TOP ランド部 (ピストン上面から TOP リング溝までの領域) の高さを小さく抑えることができ、クレビス部 (TOP ランドとボアの隙間の細長い空間で、燃焼火炎が届きにくい領域) の体積が小さくできることも未燃損失の低減に効果がある。また燃焼室表面の温度を高くして燃焼ガスとの温度差が小さくなることにより壁面熱流束を低減して、

冷却損失を低減できる。未燃損失と冷却損失の低減分を合わせ、WLTC 国内モードの場合は 0.4%の燃費改善効果を得ている。

(2) スチールピストン採用における技術課題への対応

スチールピストンの採用に際しては、メリットがある一方でいくつかの点で配慮を要する技術課題があった。以下よりその内容と新型エンジンのスチールピストンで実施した対策について解説する。

a. 温度設計

既述のように、低熱伝導の特性をもつスチールピストンでは局所的に温度が超高温になる信頼性懸念があるため、燃費と信頼性を両立するためにはピストン温度を精度良くモデルで予測し、ピストン冷却のための機能をハードと制御へ最適に配分する設計が重要となる。Fig. 12 にそのプロセスのフロー図を示す。本開発ではピストン熱流れに関する入熱と放熱のモデルと予実検証に用いる測温精度を向上させた。入熱は入熱タイミングの正確な把握のため、ピストンの上死点を正しく管理した上で行う高精度な筒内指圧計測とマツダ独自の熱勘定解析⁽⁶⁾によりピストンへの入熱量予測精度を向上した。ピストン入熱分布については噴霧燃焼に関する 3D-CFD により詳細に予測した。放熱はオイルジェット流量について往復運動しているピストンのクーリングチャンネル内に入るオイルジェット有効流量を定義することで予測精度を向上した。測温については計測前に CT スキャンにてピストンに手加工で埋めた測温センサーの壁面からの距離を正確に把握して、CAE と同じ座標位置で予実比較できるようにした。

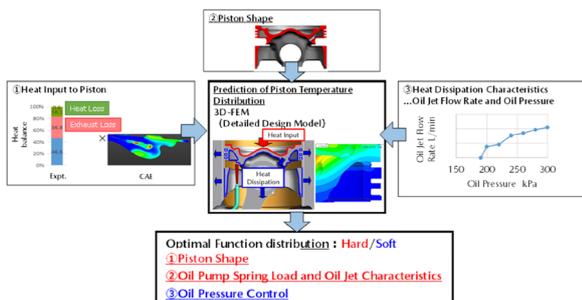


Fig. 12 MBD Environment and Function Distribution for both Performance and Piston Reliability

この取り組みで精度を向上させたモデルによる温度予測を用いて、Fig. 13 に示すようにピストン冷却のための機能強化を新型エンジンのスチールピストン形状に対して行った。リング溝部温度はオイル炭化抑制のためクーリングチャンネルの形状を最適化し、メインオイルジェット流量増加と合わせて従来型のアルミピストンと同じ信頼性基準温度に収まるように冷却性を高めた。ピンボス温度についても従来型と同じ基準温度に収まるようにピンボスからトップまでのコンプレッションハイト

と後述のサブオイルジェット流量を最適に設計した。一方、ピストンリップ温度に関しては材料をアルミからスチールにすることによる熱伝導率低下と耐熱性向上によって従来型から新型で大幅に上昇させている。

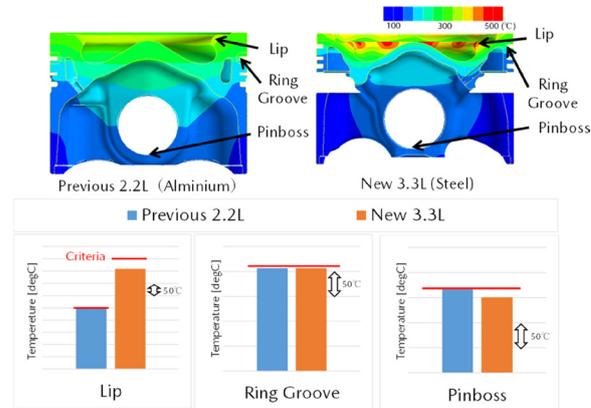


Fig. 13 Comparison of Piston Temperature Results with 3D-FEM CAE Model in Maximum Power Operating Conditions

b. スカート構造設計

スカート構造の設計に際しては、アルミピストンと異なる熱膨張特性とヤング率を考慮した。熱膨張に関しては、シリンダー素材のアルミと比較して線膨張係数が小さいため、シリンダー（アルミ）・ピストン（スチール）ともに冷えている時にはスカート部のクリアランスが小さくなり、温間では逆にクリアランスが大きくなる特性をもつ。またヤング率はアルミの 2 倍強であり、アルミピストンと同形状で設計した場合は剛性が高くなりすぎる。従って、下記条件を含むあらゆる使用環境で満足するように、スカート剛性、スカートプロファイルを最適設計した。

冷間時は、極寒環境における始動後からエンジンが温まるまでの限定的な期間でのみクリアランスが極小の緊縛状態となる。このとき緊縛力 (Fig. 14 の①) が発生し、スカートの剛性が高いと荷重が過大となり焼付きを生じる懸念があるため、適切な剛性にする必要がある。一方で温間時は、特に長期間の運転による劣化でシリンダーボアが拡大 (クリアランス増) する時、ピストンがピストンピンを中心に回転する 2 次運動が増大する。このピストンの傾きが過剰である場合 (Fig. 14 の②)、スカートの上下端部のエッジが接触し、スラップ音の発生、もしくは焼付きや異常摩耗に至るリスクが生じる。そのため、温間時のボア拡大量は、燃焼入熱分布、冷却の抜熱分布をモデル化し、構造体の FEM との連携で予測した。劣化拡大量の実験式をベースにしたモデル化は、あらゆる使用環境 (劣化含む) を考慮した最適設計に寄与した。

また焼付きや異音の原因となることから、ピストンとシリンダーボアの接触界面には適度な油膜が必要である。そのため、常に必要な油量が届けられるように油圧制御を行った。

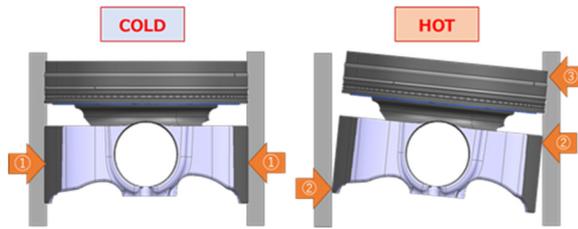


Fig. 14 Piston Skirt Clearances in COLD/HOT Situation, and Its Contact to Cylinder Boar

c. ディーゼルノック音の対策

ディーゼルノック音低減のため、これまで燃焼加振力の低減や、ピストンピン内部に装着しダイナミックダンパーとして機能するナチュラル・サウンド・スムーザーを採用してきた⁽⁷⁾。今回スチールピストンを新たに採用するにあたり、往復系部品の共振周波数コントロールによる対策を行った。ノック音は、燃焼圧による加振力がピストンからピストンピン、コンロッド、クランク、ブロックへと順に伝達し、最終的にブロックの外壁で放射音に変換されることで音として知覚されるようになる。その際ピストンからコンロッドまでの往復系部品がもつ伸縮モードの共振周波数とノック音の強度ピークが一致することが分かっており、ナチュラル・サウンド・スムーザーによる対策はこの共振周波数をねらったダンピングによるノック音レベルの低減であった。新型エンジンで行った対策は、音レベルを低減するのではなく、車内音として聞こえづらい周波数へと共振周波数をずらすことをねらいとしている (Fig. 15)。

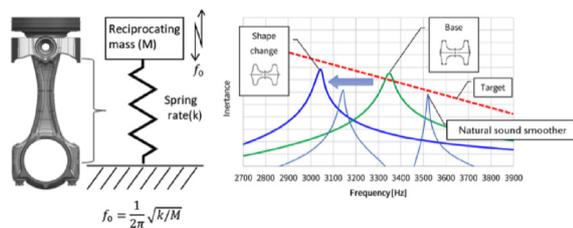


Fig. 15 Knocking Noise Reduction

往復系の共振はコンロッドをばね要素と見立てた単振動系と見なすことができる。このときばね定数はコンロッドの剛性により決定されるため、コンロッドI幹部の断面積を変化させることで共振周波数 f_0 を任意に調整することができる。一般に車内の暗騒音は低周波側で大きくなるため、I幹部の断面積を縮小しノック音の周波数を低周波側にシフトすることで、車内音の目標を達成した。これにより、往復系部品の重量とコストの増加を抑制しながらノック音を低減することができた。

3.3 クランクシステムの開発

直列6気筒エンジンとして高い静粛性の実現と衝突要件を含めたパッケージの成立が必要であり、これらの課

題を高次元で達成するためモデルを活用したクランクシステム全体での最適化を行った。

(1) クランクシステムの開発構想

直列6気筒化によるクランクシャフト全長拡大によりクランクシャフト自体のねじり共振周波数は低下するため (Fig. 16)、エンジンの常用回転領域内でねじり共振が励起される頻度は大幅に増加する。

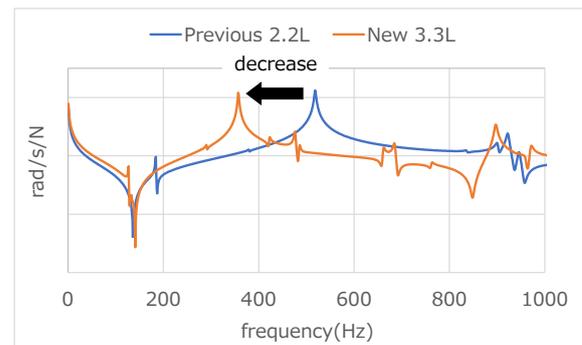


Fig. 16 Resonance Characteristics of Crank System

一方、ねじり共振周波数を常用域以外に配置するためにはクランクシャフトの剛性を大幅に変更する必要があるが、大幅な重量増加を伴うため現実的な解決策とはなりえない。このため、クランクシャフトの基本諸元は現行の4気筒ディーゼルエンジンを踏襲し、増大する角速度変動はダンパープリーで減衰することを基本構想として仕様検討した。また、衝突要件を成立させるため、ダンパープリーはクラッシュプルタイプのゴムダンパーを用いた構造を選択した。

(2) 角速度変動予測モデルを用いた最適システム的设计

今回の開発では、開発構想段階でモデルによる角速度変動を精度良く予測できるようにし、この結果を元に関連システムの信頼性や異音などの成立性/余裕度を検討することで、クランクシステム全体の最適化を行った。角速度変動の予測モデルは開発初期に試作6気筒エンジンを用いてクランクプリーやFEADシステム、フライホイールなどの詳細挙動の計測・分析を行うことで解析パラメーターの調整を実施するとともに、システム間の相互影響を検証し各システムのモデル化規模やモデルの連成範囲・条件の改善を実施した。この結果、各システム間の相互影響も含め高い精度による角速度変動の再現が可能となった (Fig. 17)。

高精度のモデルを用いてシステム各部位の信頼性や異音の成立性/余裕度を設定した上で (Fig. 18)、Table 2に示すように開発構想を具現化した設計諸元を決定した。

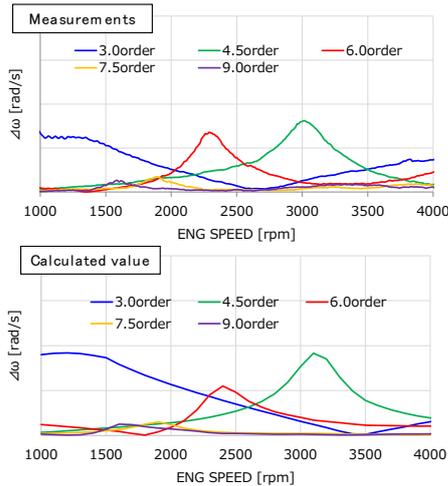


Fig. 17 Improved Model and Compare Results

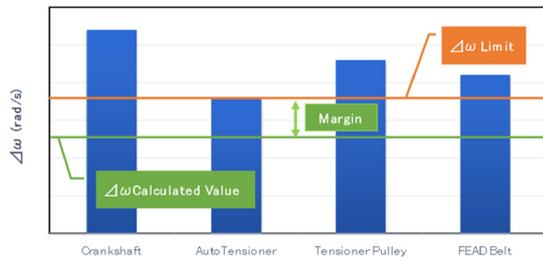


Fig. 18 $\Delta\omega$ Margin of Crank System

Table 2 Crank System Specifications

Engine	Previous 2.2L	New 3.3L
Pin dia.	$\phi 52\text{mm}$	←
Journal dia.	$\phi 52\text{mm}$	←
Counter Weight	Full	Half
Pulley Inertia: Main	$3.56\text{g}\cdot\text{m}^2$	$14.75\text{g}\cdot\text{m}^2$
Pulley Inertia: Sub	$1.00\text{g}\cdot\text{m}^2$	$5.76\text{g}\cdot\text{m}^2$

6. おわりに

新世代クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 3.3 は、低 Pmax コンセプトを踏襲した構造系の機能進化と最適化を行うことで、同排気量クラストップの軽量さを実現した。またスチールピストンや可変油圧システムなどの採用により、6気筒でありながら従来型4気筒のSKYACTIV-D 2.2よりも低い、クラストップの低機械抵抗を実現した。更に直列6気筒化による全長拡大で課題となるねじり共振に対してもロバストな諸元を決定した。マツダ初となる6気筒エンジン開発となったが、これまでのMBDで培ってきた予測・解析モデルを進化させながら適用することで、1クラス上のディーゼルエンジンに進化させることができた。手の内化した技術を今後の開発にも順次適用し、マルチソリューションによる本質的な環境貢献に繋げていく。

参考文献

- (1) Hitomi M.: Both the Gasoline and Diesel Engines will be Winners, 26th International AVL Conference Graz (2014)
- (2) 志茂ほか：新世代 3.3L クリーンディーゼルエンジンの開発 (第1報), 自技会秋季大会予稿集, (2022)
- (3) S. KIM: A New Concept for High Efficiency and Clean Diesel Combustion by Controlling Mixture Distribution with Dual Zone Combustion Chamber, Proceedings of 10th COMODIA, pp.177-186 (2022)
- (4) Nakai E.: MAZDA SKYACTIV-D 2.2L Diesel Engine, 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, pp.943-965 Aachen (2011)
- (5) 皆本ほか：新型 2.2L 低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの開発, 自技会秋季大会予稿集, No.280, (2018)
- (6) Y. Kato: Heat Balance Analysis Using Cylinder Pressure Obtained by Engine Experiments Considering the Spatial Heterogeneity of Diesel Combustion, SAE Paper No.2019-01-2228 (2019)
- (7) 白橋ほか：SKYACTIV-D ディーゼルノック音の低減技術, マツダ技報, No.34, pp.29-34 (2017)

■著者■



岡澤 寿史



本田 絢大



青木 勇



詫間 修治



西岡 勇介



山内 智博



山口 正徳



菊池 正和



小泉 昌弘



内田 敦