

論文・解説

39

新開発SKYACTIV-D 1.8 の紹介

Introduction of newly developed SKYACTIV-D 1.8

丸岡 規之*1 Noriyuki Maruoka	平林 千典*2 Kazunori Hirabayashi	福馬 真生*3 Masaki Fukuma
森永 真一*4 Shinichi Morinaga	牛谷 真樹*5 Masaki Ushitani	三村 勇樹*6 Yuki Mimura

要約

SKYACTIV-D 2.2とSKYACTIV-D 1.5では、超低圧縮比と高効率過給をイネーブラにした燃焼コンセプトによって、幅広いユーザーへトルクフルかつ伸びやかな走り、クラストップレベルの燃費、NO_x触媒を用いずに最新の排気規制に適合するクリーン排気の提供を実現した。この価値を日常的に使用されるシーンにおいて、更に高いレベルで「走る喜び」と「優れた環境性能」の両立を狙ったSKYACTIV-D 1.8を新たに開発し、新型MAZDA CX-3に搭載した。本報ではこの新型エンジンの開発コンセプトと、新たに採用した技術について紹介する。

Summary

With a combustion concept realized by super-low compression ratios and high-efficiency boosting, the Skyactiv-D 2.2 and Skyactiv-D 1.5 delivered powerful and extensive acceleration and class-top level fuel economy to a wide range of users, as well as clean emissions that meet the latest emission regulations without using NO_x after-treatment systems. Aiming to enhance this value in everyday usages, Mazda newly developed Skyactiv-D 1.8 that achieved both driving pleasure and environmental performance at a higher level, and installed it in the All-New Mazda CX-3. This paper introduces the development concept of the new engine and newly adopted technologies.

Key words : Heat Engine, Compression Ignition Engine, Turbocharger/Variable Geometry Turbo, Post Treatment System, Performance/Fuel Economy/Efficiency, Fuel Injection/Fuel Spray

1. はじめに

マツダは2012年に発表した新世代クリーンディーゼルエンジン「SKYACTIV-D 2.2」⁽¹⁾、2014年に発表した「SKYACTIV-D 1.5」⁽²⁾(以下1.5L)で、低圧縮比と高効率過給をイネーブラにした燃焼コンセプトによって

- ・トルクフルかつ伸びやかな走り
- ・クラストップレベルの低燃費
- ・NO_x触媒なしで厳しい規制に適合したクリーンな排気を実現した。新型MAZDA CX-3 (Fig. 1) に搭載された新開発「SKYACTIV-D 1.8」(以下1.8L) (Fig. 2)は、日常的に使用されるシーンにおいて、更に高いレベルで「走る喜び」と「優れた環境性能」の両立を狙った。本稿では、この新開発エンジンの開発コンセプトと新たに採用した技術について紹介する。



Fig. 1 New MAZDA CX-3



Fig. 2 SKYACTIV-D 1.8

*1~3 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

*4~6 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

2. 開発コンセプト／お客様への提供価値

マツダでは究極の内燃機関を目指し、Fig. 3に示すように、熱効率の7つの制御因子を理想状態に近づける取り組みを進めている⁽³⁾。この活動による一貫したコンセプトで各因子を理想に近づけてきた。本エンジンはこれまでのコンセプトを踏襲した上で、ディーゼルらしい力強さに加え、応答性を改善、より深化したエンジンでお客様へ下記の価値を提供した。

- (1) 意のままの走り：自分の体のように加速コントロールができる
- (2) 実用燃費：実際の使用環境での燃費性能
- (3) 環境性能：実際の使用環境でのエミッション低減

市場の燃費やエミッションは使用される外気温や乗員数、道路の状態や加減速などさまざまな要因で変動する。これらを考慮し、変動の少ないシステムや性能を実現することで、いつでも走りと燃費の良さを実感できるようにした。

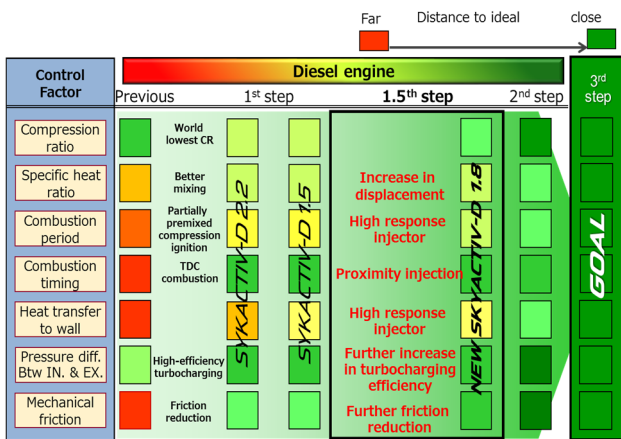


Fig. 3 Vision for Evolution of Diesel Engine

3. エンジン諸元と性能

3.1 エンジン諸元

Table 1 に主要なエンジン諸元を示す。Fig. 4 にエンジン制御システム図を示す。1.5Lからの変更点は、排気量／インジェクタシステム／可変ジオメトリターボチャージャーである。排気量は 1498cm³ から 1756cm³ へと増やした。可変ジオメトリターボチャージャーは排気量を増やしたことに伴う出力向上のための空気量を確保しつつ、実用域の低速においても十分な過給能力をもつ高効率なものを採用した。インジェクタは 1.5Lでも採用した高分散インジェクタであるが、より高応答に噴射可能なピエゾアクチュエータ駆動のものを採用した。1.5Lと同様に後処理なしで規制に対応した。

Table 1 Main Dimension and Specifications

Engine	SKYACTIV-D 1.5	SKYACTIV-D 1.8
Engine Type	In-line 4	←
Displacement	1498 cm ³	1756 cm ³
Bore x Stroke	φ76 x 82.6	φ79 x 89.6
Compression Ratio	14.8	←
Injection System	DENSO G4 Solenoid (Max. 200 MPa)	DENSO G4 Piezo (Max. 200 MPa)
Nozzle Type	10 Holes, Short Hole Length Nozzle 600 cm ³ /min	←
Piston Combustion Bowl Shape	Stepped Egg-Shaped Bowl	←
Turbocharger	Turbocharger with Variable Turbine geometry w/ Rev. Sensor	Turbocharger with Variable Turbine Geometry
EGR System	High Pressure Loop w/o Cooling & Low Pressure Loop w/ Cooling	←
After-treatment System	DOC + Diesel Particulate Filter	←
Maximum Torque	270 Nm / 1600-2500 rpm	270 Nm / 1600-2600 rpm
Maximum Power	77 kw / 4000 rpm	85 kw / 4000 rpm
Emissions	JPN PNLT	WLTP

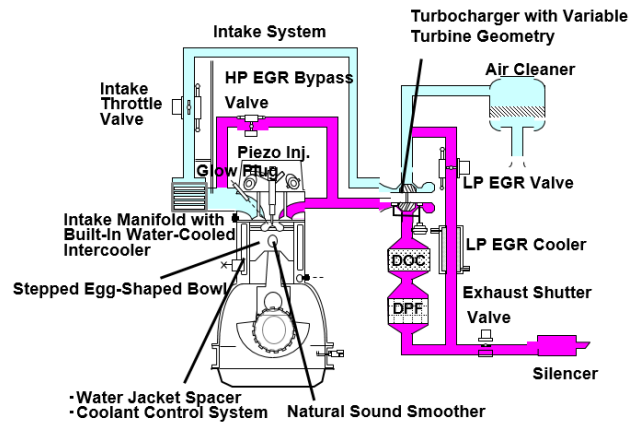


Fig. 4 Engine System

3.2 出力/トルク性能

Fig. 5 にエンジン回転数[rpm]に対するトルク[N・m]を示す。1.5Lに対し排気量アップ及び可変ジオメトリターボチャージャーの高効率化により、高回転域における出力及びトルクの向上を実現した。最大トルクは1500rpmから2600rpmの幅広い領域で 270N・mという高トルクを維持し、最高出力点は 4000rpmで、出力を 77kWから 85kWへと約 10%向上させた。

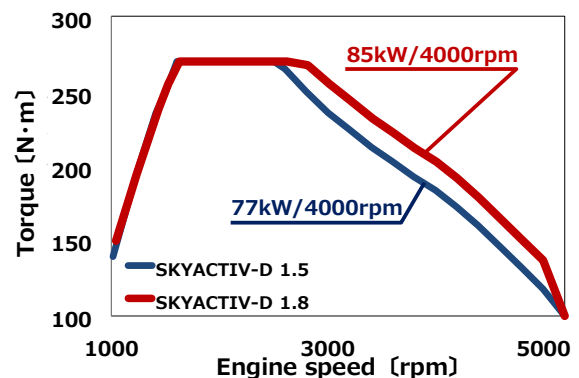


Fig. 5 Engine Performance

3.3 燃費性能

1.8Lは1.5Lで導入した冷却水制御バルブによる冷却損失低減、高応答インジェクタによる壁面熱損失低減、及び燃焼期間短縮、可変ジオメトリターボチャージャーの高効率化による混合気均質リーン化により熱効率の改善を図った。更に、機械抵抗の低減もあわせて、排気量アップしたにもかかわらず、同一トルクにてエンジン燃費率を改善した (Fig. 6)。

これにより、実用走行に近いとされる世界統一試験サイクル (以下WLTC) ベースの市街、郊外、高速走行の各走行モードにおいて1.5L比3%前後のCO₂改善を実現した。

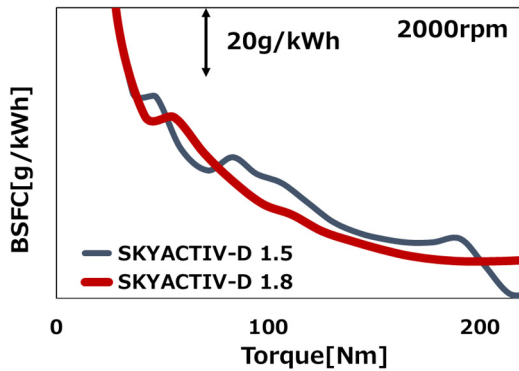


Fig. 6 Fuel consumption

3.4 走行性能

1.5Lでも採用しているDE精密過給制御を本エンジンも採用している。DEのトルクは燃料噴射量調整により制御されるが、排気エミッションや煤低減の観点から排気酸素濃度を制御するため発生トルクは制約を受ける。

そこで加速中のEGRガス流量と可変ジオメトリターボチャージャーを最適に制御することで、加速初期において早期にトルク上昇させることを実現した。また、排気量を増やしたことや、高効率の可変ジオメトリターボチャージャーを採用することで、加速後半においてもEGRを導入したまま、高い加速度G [m/sec²]を実現している。

Fig. 7に3rd 30km/hからの全開加速性能を示す。1.5Lと比べて、加速初期のGの落ち込みを改善し、伸びのあるリニアな加速性能を実現した。更に、EGR導入によるNO_x排出量低減と、噴射量やEGR制御による排気酸素濃度制御での煤改善を同時に実現し、環境性能を向上させている。また、過渡トルクの制御性を改善したことでFig. 8に示すように、アクセルの踏み分けに対するリニアリティを実現した。

これらにより操作に対する実際の車両挙動がドライバーのイメージと一致 (予見性が向上) することで、意のままの走りを実現した。

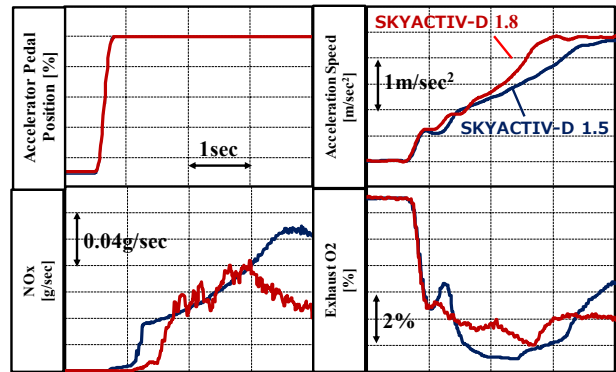


Fig. 7 Acceleration Performance from 3rd 30km/h

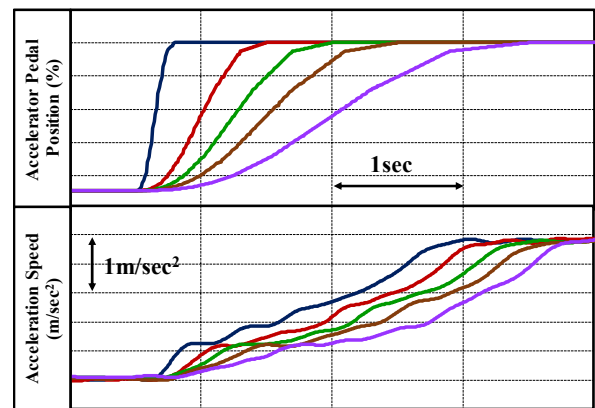


Fig. 8 Acceleration Speed Per Accelerator Pedal Position

4. SKYACTIV-D 1.8で採用した新技術

前章で紹介した性能を実現するために、また、更に高いレベルで「走る喜び」と「優れた環境性能」の両立をうぐために採用した下記の技術について紹介する。

- (1) 排気量最適化 (ライトサイジング)
- (2) 高応答インジェクタによる燃焼改善
- (3) Diesel Particulate Filter 再生制御
- (4) 機械抵抗低減

4.1 排気量最適化 (ライトサイジング)

排気量は、低圧縮比コンセプトで実現した燃焼のリーン化及び低温化を維持したまま、エミッション性能を更に低減するため最適化を実施した。Fig. 9に1.5Lから2.2Lまでの排気量違いのエンジントルクに対するNO_x排出量を示す。NO_x排出量の変曲点が、1.5Lは約210N・m、1.8Lは約270N・m付近である。実用使用最大負荷を1.5Lで走行した場合、NO_x変化点以上のトルクを使用するためNO_x排出量が急増し、NO_xを浄化するために高価なエミッションシステムの追加が必要となる。一方、1.8Lで走行した場合、NO_x変曲点以下での走行が可能となるため、走り方に依存

せず、エミッションを改善できる。Fig. 10に、1.5Lまたは1.8Lにおけるエンジン回転数[rpm]とトルク[N・m]に対するWLTP時間頻度分布及びEGR率を示す。このように、最適な排気量を選択することで、高負荷でのNOxを低減した。同時に、最高出力を上昇させることができ、ディーゼルらしく力強い、高回転まで伸びのある加速性能を実現した。

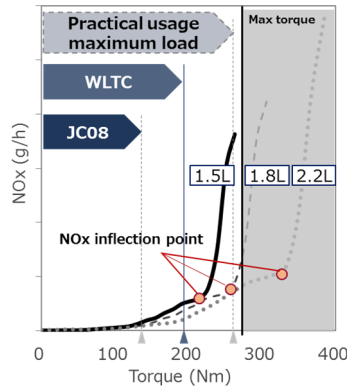


Fig. 9 NOx Inflection Point

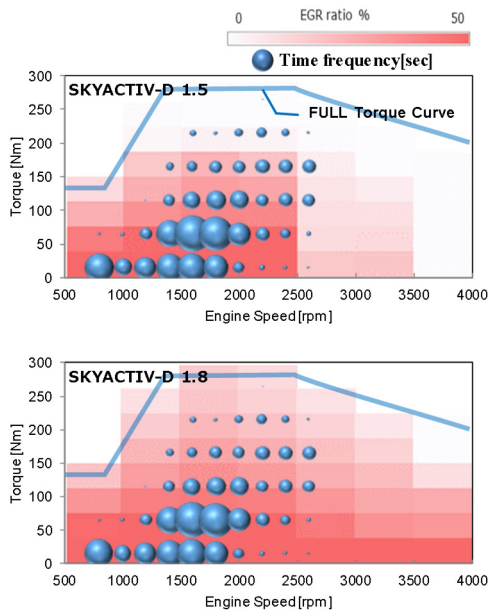


Fig. 10 EGR Ratio Map with WLTP Time Frequency

4.2 高応答インジェクタによる燃焼改善

新たに採用したピエゾ駆動インジェクタは1.5Lのソレノイド駆動に比べて高応答な噴射が可能である。この特性を活用し、熱効率改善とノック音低減による静粛性の向上を図った。燃料噴射段数を増やし、1段あたりの噴射量を減らすことで、噴霧ペネトレーションが下がり、燃料の燃焼室壁面への付着量を低減させ燃損失を低減した。同時に、燃焼ガスと燃焼室壁面を空気層で断熱することで壁面熱伝達を低減し、熱効率を改善した (Fig. 11)。

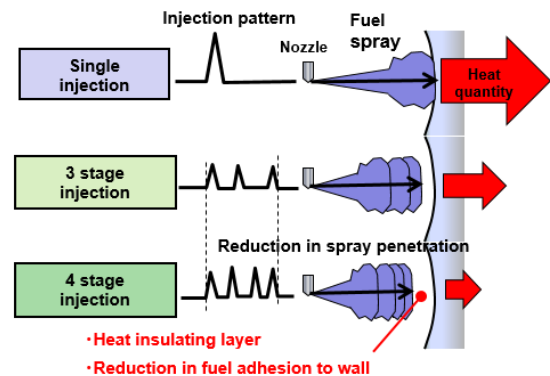


Fig. 11 Aim of Injecting Small Quantity at Each Injection Stage

また、1.5Lと同一の噴射段数にて、高応答化したインジェクタによって、従来に比べて噴射間隔を短くすることが可能となった。メイン噴射前に近接噴射を行うことで、メイン燃焼の傾きを抑制することができノック音が改善。更に、アフター噴射近接化により煤再燃焼量は減少するものの、噴射後の燃料だれ減少によって煤発生量も減少するため、煤排出量は同等となり、燃焼期間が短くなることで、熱効率が改善した (Fig. 12)。

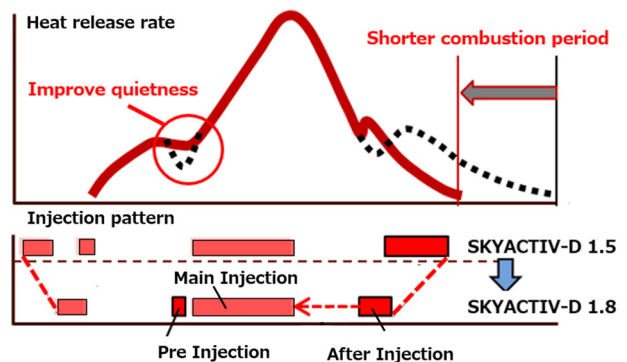


Fig. 12 Shorter Combustion Period

ノック音は燃焼による加振力とそれを伝える部品の共振特性及び放射特性により決まる。これまで、熱発生山谷の間隔を最適にコントロールすることでノック音ピークを下げたり、ナチュラル・サウンド・スーマー⁽⁴⁾によって構造系の共振を下げる等の手段で改善を図ってきた。

本エンジンは熱効率を改善しつつ、さらなるノック音改善を可能とする新たな燃焼を採用した。燃焼加振力は、噴射から着火までの着火遅れが長く、着火する際の予混合気量が多いほど強くなる。そこで、燃料を最大6段で分割噴射することによって、上死点付近で各噴射の燃焼を連続的につなげることで、各噴射の着火遅れを短くし、燃焼初期の熱発生傾きを抑制した。これにより、等容度の改善にて熱効率改善しつつ、ノック音の低減が可能となった。

また、筒内の温度や圧力などの状態と噴射パターン及び燃焼の関係を明確にすることで、時々刻々と変わる筒内状態に応じた噴射パターンを選択、走り方によらずロバストにノック音を改善した。Fig. 13に1600rpm/Pe600kPaでの1.5Lと1.8Lの噴射パターン及び熱発生率を示す。Fig. 14に15deg.ATDCにおける燃焼ガス温度の3D-CFDの図を示す。

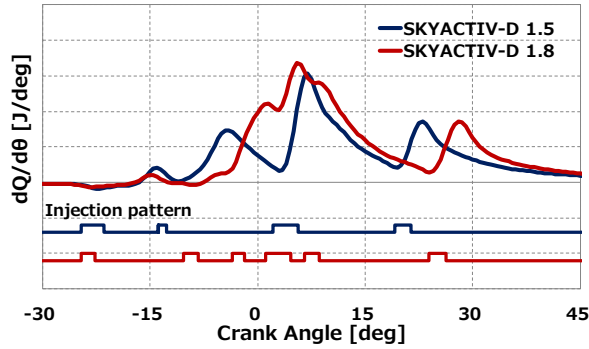


Fig. 13 Heat Release Rate Compared with 1.5L

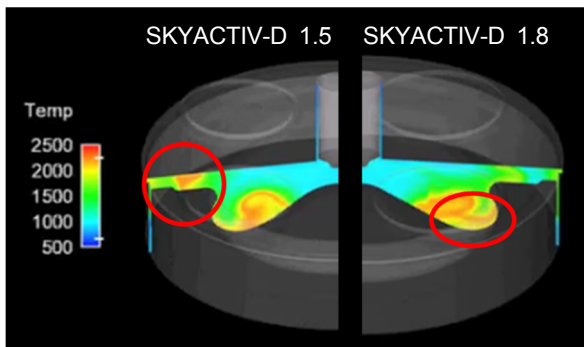


Fig. 14 Combustion Gas Temperature at 15 Deg. ATDC

4段噴射の1.5Lと比較して、6段噴射の1.8Lはキャビティトップ部の高温部の低減と、キャビティ内での壁面との断熱層が確認できる。この噴射パターンにより、煤やNOx同等で、燃費率が4%改善、ノック音の指標であるCylinder Pressure Levelを3dB改善した。

これらの燃焼コンセプトで7つの制御因子の中の、壁面熱伝達と燃焼期間を理想に近づけた結果、市街地走行などの低車速、軽負荷を多用するシーンではより静粛性を高めながら、力強い走りを求めるシーンでは、加速Gと調和するリニアなエンジンサウンドを低燃費とともに実現した。

4.3 Diesel Particulate Filter再生制御

走行時にDiesel Particulate Filterに捕集した煤を高温の排気ガスで燃焼するDiesel Particulate Filter再生制御は、排気ガス温度昇温のために通常よりも多くの燃料を必要とし、燃費が悪化する。特に、1回当たりの運転時間が短いユーザーについては、Diesel Particulate Filter再生が中断するたびに再昇温が必要となり、再生時間が長くなること

で燃費悪化が顕著になる。そこで1.8Lでは、実用燃費の改善を目的として、Diesel Particulate Filter昇温時間の短縮及び堆積した煤の燃焼を効率化することで、再生時間を減した (Fig. 15)。昇温時間の改善は、Diesel Particulate Filter再生燃焼時の排気ガス流量を増やし、多量の高温ガスをDiesel Particulate Filterに流入させることで実現した。煤燃焼速度の効率化は、Diesel Particulate Filter内部の温度と煤量を分割モデルとし予測することで、効率的に内部の煤が燃焼できるように改良することで実現した。

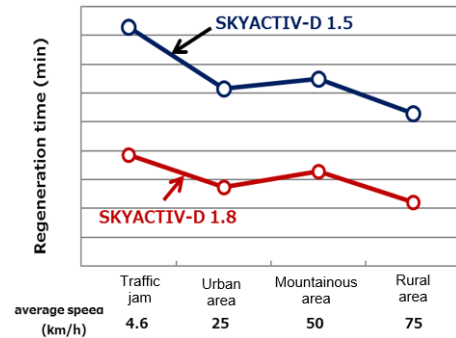


Fig. 15 Comparison of Regeneration Time

4.4 機械抵抗低減

一般的に排気量を増やした場合、主運動系部品の重量と運動速度が増加し慣性力が増大するため、機械抵抗は増加する。

1.8Lでは、ピストン圧縮高さの低減と薄肉化、コンロッド小端テーパ角増大と小径ボルトの採用 (Fig. 16)、クランクカウンターウェイト配置の最適化などにより、主運動系部品の重量を1.5Lから排気量が増えたにもかかわらず約300g軽量化し、慣性力起因の機械抵抗を低減した。

更に、ピストンリングに非対称バレル形状の摺動面を採用することで20%の張力低減を実現したことと合わせて、同一排気量当たりの機械抵抗低減を実現した。

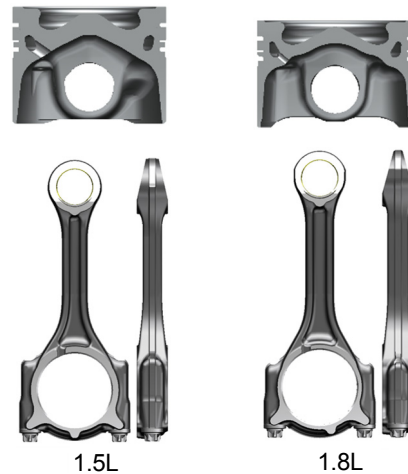


Fig. 16 Reduction in Mechanical Friction

4.5 新技術に対する燃費改善効果

Fig. 17に1.5Lに対するWLTC CO₂排出量の改善率を示す。排気量を増やすことで機械抵抗が悪化する一方で、7つの制御因子の中で、機械抵抗、比熱比、燃焼期間及び時期を、排気量増加と高応答インジェクタを用いることで改善し、1.5L比3%前後のCO₂改善を実現した。

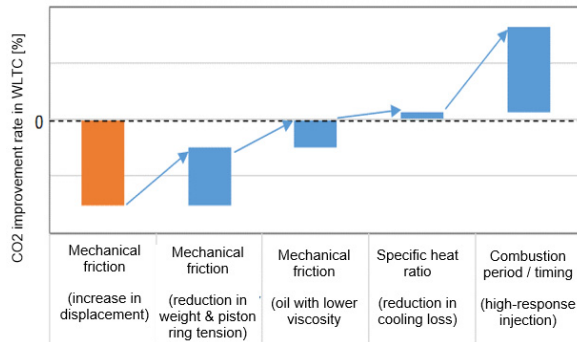


Fig. 17 WLTC CO₂ Improvement

■ 著 者 ■



丸岡 規之



平林 千典



福馬 真生



森永 真一



牛谷 真樹



三村 勇樹

5. おわりに

新型MAZDA CX-3に搭載した新開発SKYACTIV-D 1.8は、これまでの低圧縮比コンセプトに加え、排気量最適化や高応答インジェクタなどの新技術によって「走る喜び」と「優れた環境性能」の両立を高い次元で実現させたことに加え、熱効率を支配する制御因子の状態の更なる改善を達成した。これによりSKYACTIV-Dシリーズの共通価値である、走り、燃費、クリーンな排気、及び静粛性を高い次元でバランスさせたクリーンディーゼルエンジンとなった。

参考文献

- (1) 森永真一，詫間修治，西村博幸：SKYACTIV-D エンジンの紹介，[マツダ技報, No.30, p9-13 \(2012\)](#)
- (2) 平林千典，大西毅，白井裕久，佐藤雅昭，森永真一，志茂大輔：小排気量クリーンディーゼルエンジンSKYACTIV-D1.5 の開発，[マツダ技報, No.32, p.21-27 \(2015\)](#)
- (3) 人見，第21回内燃機関シンポジウム講演論文集，pp.1-23 (2010)
- (4) 白橋尚俊，森恒寛，岩田陽明，長門清則，菊池拓哉：SKYACTIV-Dディーゼルノック音の低減技術，[マツダ技報, No.34, p29-34 \(2017\)](#)