

特集：新型デミオ

4

小排気量クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 1.5の開発 Newly Developed SKYACTIV-D 1.5

平林 千典*1 大西 毅*2 白井 裕久*3
Kazunori Hirabayashi Tsuyoshi Onishi Hirohisa Shirai

佐藤 雅昭*4 森永 真一*5 志茂 大輔*6
Masaaki Sato Shinichi Morinaga Daisuke Shimo

要 約

超低圧縮比と高効率過給をキーイネーブラにした燃焼コンセプトによって、SKYACTIV-D 2.2 では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、及びNOx触媒なしで最新の排気規制に適合するクリーン排気を実現した。この価値をより幅広いユーザへ提供したいと願い、小排気量エンジンへの燃焼コンセプトの踏襲とその更なる進化を狙った SKYACTIV-D 1.5 を新たに開発し、新型デミオに搭載した。本報ではこの新型エンジンの開発コンセプトと、小排気量コンパクト化という困難な制約をブレイクスルーした新技術について紹介する。

Summary

SKYACTIV-D 2.2, which embodied SKYACTIV-D combustion concept with a super-low compression ratio and high-efficiency supercharging as key enablers, realized torqueful and smooth driving, class-top fuel consumption and emissions clean enough to comply with the latest emission regulations without NOx after-treatment systems. In order to deliver the value of SKYACTIV-D to wider range of users by incorporating or even refining the combustion concept in a small-displacement engine, Mazda has newly developed SKYACTIV-D 1.5 and mounted it in New Demio. This paper introduces the development concept of the new engine and the new technologies adopted to break through the restrictions due to the small displacement and package.

1. はじめに

走行性能・燃費性能・環境性能のすべてに高次元でのバランスを実現した排気量2.2Lの新世代クリーンディーゼルエンジン「SKYACTIV-D 2.2」(以下2.2L)の価値⁽¹⁾⁽²⁾を、より幅広いお客様に提供したいと願い、小排気量1.5Lのクリーンディーゼルエンジン「SKYACTIV-D 1.5」(以下1.5L)を新しく開発した。本稿ではこの新型エンジンの開発コンセプトと、その実現のために採用した新技術について紹介する。

2. 開発コンセプトと主要諸元

マツダでは究極の内燃機関を目指し、Fig. 1に示すように、熱効率を支配する7つの制御因子を理想状態に近づける取組みをガソリンとディーゼル両面から進めている⁽³⁾。ディーゼル側の取り組みの1st StepがSKYACTIV-D燃焼コ

ンセプトであり、既存の2.2Lにおいて超低圧縮比と高効率過給をキーイネーブラ技術にして各制御因子の状態を改善した。この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、優れた燃費性能と静粛性、およびNOx触媒なしで国内平成21年(ポスト新長期)規制および欧州EURO6規制へ適合するクリーン排気を実現した⁽¹⁾⁽²⁾。

1.5Lの開発においても2.2Lと同じ燃焼コンセプトの踏襲を狙った。しかしながら小排気量&コンパクト化に際しては自然法則や空間自由度の制約が厳しくなる問題を伴う。具体的には要求噴射量が少ないことに伴う燃料噴霧の自己着火性低下、燃焼室壁面からの冷却熱損失悪化、構造系の比熱容量増大による暖機性悪化、および排気系面積/体積比増大に伴うDOC (Diesel Oxidation Catalyst) 入口ガス温度の低下などである。これらの問題を克服するため1.5LではFig. 2に示すようなブレイクスルー技術を新たに開発した。

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

*2, 3, 5, 6 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

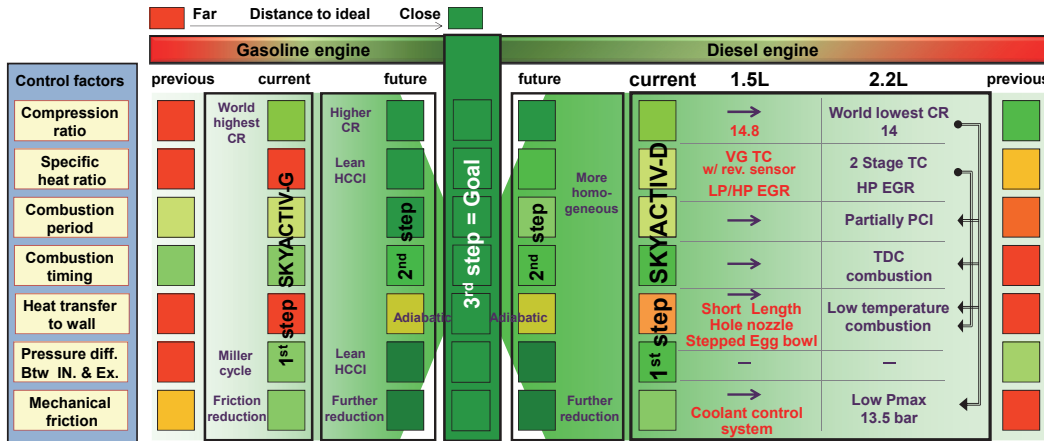


Fig. 1 SKYACTIV-D 2.2/1.5 Combustion Concept on Internal Combustion Engine Evolution Roadmap

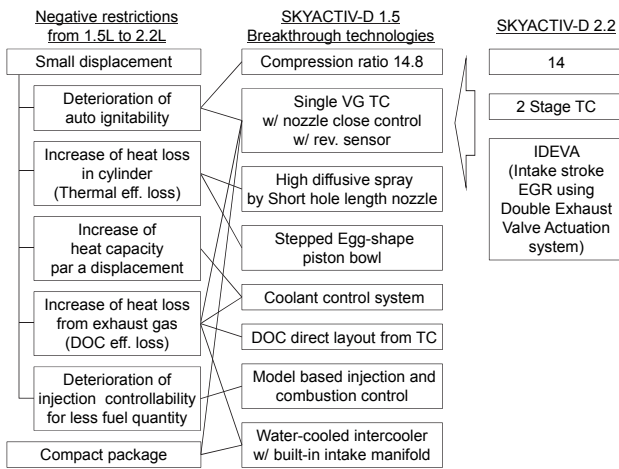


Fig. 2 Restrictions from SKYACTIV-D 2.2 to 1.5 Small Displacement Engine and Breakthrough Technologies

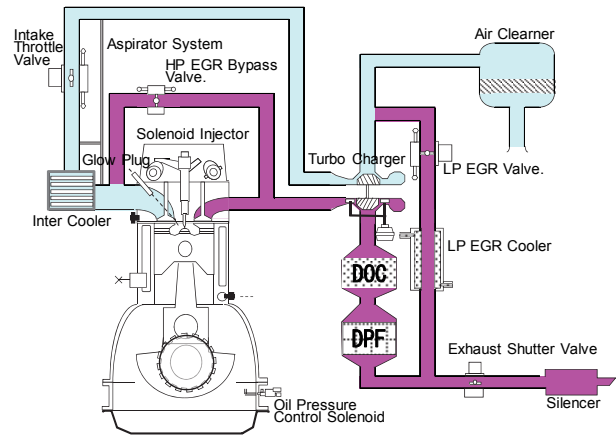


Fig. 3 SKYACTIV-D 1.5 Engine System

同時にこれらの技術によってFig. 1に示した熱効率を支配する各制御因子の状態の更なる改善を狙った。これらの技術の詳細については後述する。1.5Lの主要諸元をTable 1に、システム概要をFig. 3に示す。

3. 性能パフォーマンス

1.5Lは後述のブレイクスルー技術によって、2.2Lの燃焼コンセプトの踏襲、および熱効率を支配する各制御因子の状態の更なる改善を実現した。これによりSKYACTIV-Dの共通価値を提供可能とした。

3.1 出力性能

1.5LはFig. 4に示すように1500rpmから2500rpmの幅広い領域で250Nmという高いトルクを達成した。高回転側は4000rpmで最高出力77kWを発生し、5200rpmまでリニアなトルク特性を達成した。その結果、Fig. 5に示すように実用域からのリニアで力強くかつ高速域までの伸びやかな加速を実現した。性能の絶対値は異なるものの、1.5Lのこのようなトルクや加速の特性は2.2Lを踏襲している。

Table 1 Dimensions and Specifications

Engine	SKYACTIV-D 2.2	SKYACTIV-D 1.5 (New Model)
Engine Type	In-line4	←
Displacement	2188 cm ³	1498 cm ³
Bore x Stroke	φ86 x 94.2	φ76 x 82.6
Compression Ratio	14	14.8
Injection System	Common Rail System G3 Piezo (Max. 200 MPa)	Common Rail System G4 Solenoid (Max. 200 MPa)
Nozzle Type	10 holes 1112 cm ³ /min	10 holes Short Hole Length Nozzle 600 cm ³ /min Stepped
Piston Combustion Bowl Shape	Conventional Egg-shape Bowl	Egg-shape Bowl
Turbocharger	Serial Sequential 2-Stage Turbocharger	Turbocharger with Variable Turbine Geometry with Rev. Sensor
EGR System	High Pressure with & w/o Cooling	High Pressure w/o Cooling & Low Pressure with Cooling
After-treatment System	DOC+DPF	←
Maximum Torque	420 Nm / 2000 rpm	220/250/270 Nm / 1600~2500 rpm
Maximum Power	129 kW / 4500 rpm	77 kW / 4000 rpm
Emissions	EURO6 JPN PNLT	←

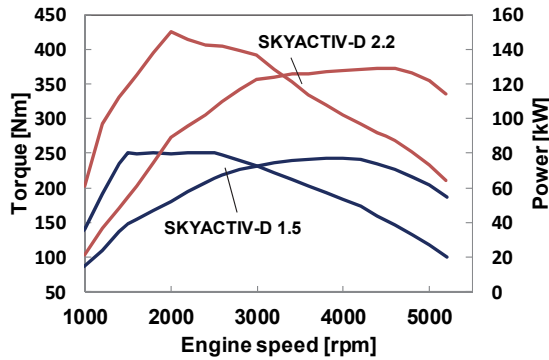


Fig. 4 Torque and Power Performance

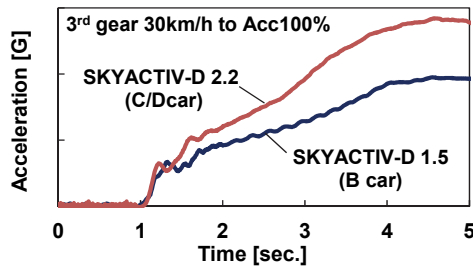


Fig. 5 Acceleration Performance

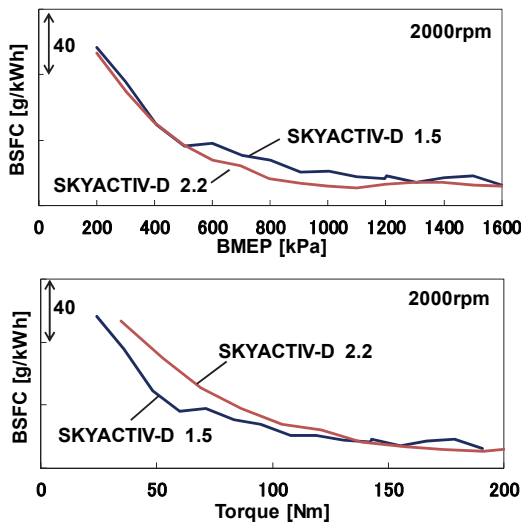


Fig. 6 Fuel Consumption Characteristics

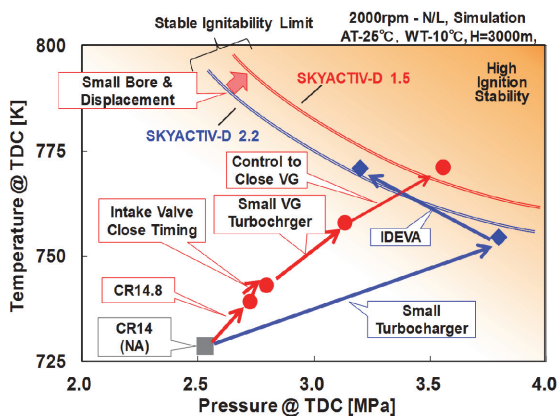


Fig. 7 Comparison of Technologies for Fuel Auto-ignitability

3.2 燃費性能と排気性能

1.5Lは、Fig. 6に示すように平均有効圧[kPa]に対する燃費率において2.2Lと同様の乗用車用ディーゼルトップレベルの値を達成した。また、NO_x触媒なしで国内ポスト新長期規制およびEURO6規制へ適合するクリーン排気性能についても2.2Lから1.5Lへ踏襲している。

4. ブレークスルー技術

SKYACTIV-D燃焼コンセプトを踏襲するために小排気量&コンパクト化に伴う制約の悪化を克服し、加えて熱効率を支配する各制御因子の状態の更なる改善を狙って、以下のブレークスルー技術を新たに開発した。

4.1 超低圧縮比燃焼の継承と機械抵抗の更なる低減

SKYACTIV-D燃焼コンセプトの要が超低圧縮比である。しかしながら小排気量では無負荷運転条件での燃料噴射量の減少、小ボア燃焼室での壁面と燃料の干渉などにより、燃料の自己着火性が低下する。この対策のためFig. 7に示すように技術構成と機能配分を見直した。近接少量多段噴射によるリッチ混合気形成機能⁽¹⁾は踏襲しつつ、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）のノズルベンを一般的な使用域よりも絞り込む精密制御を行い、無負荷域での過給効果と内部EGR増量を得た。これにより2.2Lでは内部EGR増量のために採用していた切替式排気二度開きシステム（Intake Stroke EGR using Double Exhaust Valve Actuation system, 以下IDEVA）^{(1),(2)}の機能統合を図った。更に吸気バルブタイミングの変更および圧縮比を14.8とすることで、1.5Lと2.2Lで等価の自己着火性を確保した。

最小限の圧縮比上昇に留めることでSKYACTIV-D燃焼コンセプトの特徴である最高燃焼圧13.5MPaの低P_{max}燃焼を踏襲し、更にピストンリング、動弁系等の構造系摺動部をトライボロジ上最適な形状に見直した結果、Fig. 8に示すように1.5Lは2.2Lをしのぐ摩擦平均有効圧力を達成した。

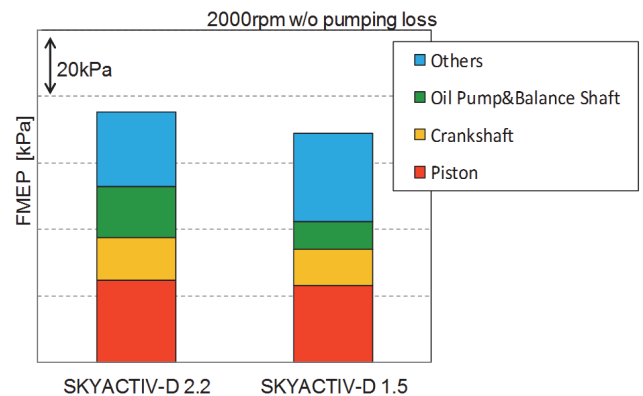


Fig. 8 Comparison of Mechanical Resistance

4.2 高効率過給, EGR, 吸排気システム

SKYACTIV-D燃焼コンセプトのもう一つの要が高効率過給である。空気とEGRガスを同時に過給することで、高比熱比での低温燃焼が可能となり、高熱効率とクリーン排気の両立が達成できる。1.5Lでは回転センサ付き小型VGターボチャージャ、およびHP (High Pressure) 経路とLP (Low Pressure) 経路を併用したEGRシステムを採用し、高効率過給を実現した。

Fig. 9に中負荷条件においてLP-EGRとHP-EGR (EGRクーラレス) を比較したエンジン実験結果を示す。LP-EGRではEGR増量によってNOxを低減した場合においても、過給圧と吸気温度がほとんど変化しない。このためHP-EGRと比較して充填量が大きくなる分、比熱比を高くすることができる。また吸気温度が低く保てるので冷却損失の抑制にも有利である。これらの効果によってLP-EGRはHP-EGRに対し、特にNOxを低減した条件において大幅に低い燃費率を達成している。また、充填酸素量が多いためにスモークの増大も抑制できている。

LP-EGRシステムでは一般に、長いEGR経路でのガス交換に伴うレスポンスの遅れ、およびEGRガス中の水蒸気が冷却されて生じる凝縮水の問題が懸念される。1.5Lでは、高機能化した水冷式インタークーラー一体式の樹脂製インテークマニホールドによってこれらの問題を対策した。Fig. 10に示すように2.2Lの別体式の空冷インタークーラーシステムと比べてガス経路を大幅に短縮してガス交換のレスポンスを確保した。また2ステージターボチャージャからシングルターボチャージャへの変更とも合わせて、コンパクトなエンジンルームに合わせた小スペース化と軽量化を実現した。耐凝縮水については、冷却効率制御性の高い水冷式インタークーラーによりEGRガスの過度な冷却を抑え、発生してしまった少量の凝縮水はFig. 3のシステム図に示したアスピレータ機構によって強制的にエンジン筒内に噴霧状に吸引することで対処した。

1.5Lでは小型VGターボチャージャを採用することで低中速域を重視しながらも、回転センサによってターボチャージャの回転数をセンシングして細やかに燃焼を制御することで従来よりも12000rpm以上も回転限界を高めることが可能となった。これによりシングルターボチャージャながらFig. 4に示したように高回転側5200rpmまでリニアなトルク特性を実現した。

4.3 高分散噴霧と燃焼室による低冷却損失燃焼システム

小排気量で悪化する燃焼室壁面からの冷却損失を抑制するため、燃焼室壁面への燃料付着と火炎の接触を抑制可能な噴霧混合気形成技術として、ペネトレーションを抑えた高分散噴霧インジェクタを新たに採用した。

高分散噴霧の実現手段として、噴孔長を短くし、特に冷却損失の影響が大きい軽負荷での低噴射圧の少量多段噴射

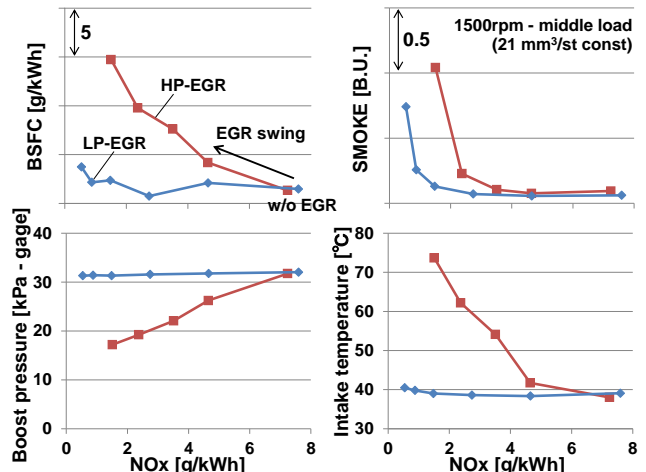


Fig. 9 LP-EGR Effect on Fuel Consumption and Emissions

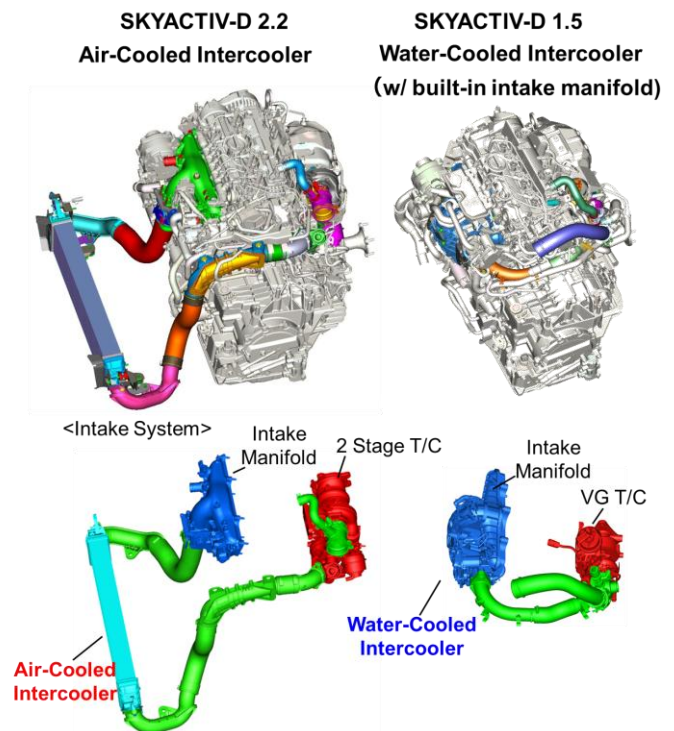


Fig. 10 Compact Package of Intercooler System

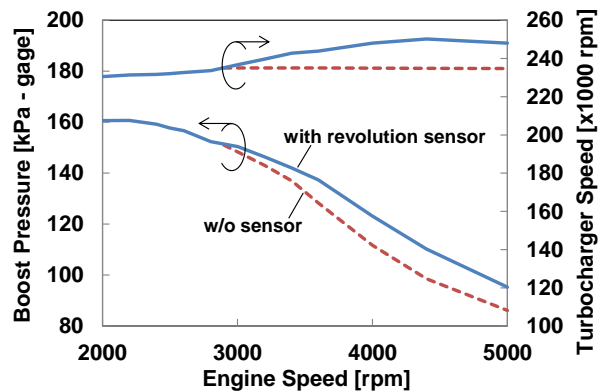


Fig. 11 Turbocharger Speed and Boost Pressure

条件において噴孔内部で生じた乱流エネルギーを噴霧に保持させたまま噴射することを可能とした。これにより、Fig. 12に示すように狙いどおりにペネトレーションを抑制した高分散噴霧を実現した。一方で冷却損失の影響が少ない高負荷での高噴射圧の噴射条件においては従来どおりの強いペネトレーションが得られることも確認した。

2.2Lで採用したエッグ燃烧室壁面によって噴射燃料の運動エネルギーから強い縦渦流動を形成し、これにより燃料と空気の混合を促進してクリーン燃焼を実現するエッグシェイプ燃烧室コンセプト⁽⁴⁾を1.5Lでも踏襲した。これに加えて小排気量化に伴う冷却損失の悪化への更なる対策として、Fig. 13に示すように膨張行程初期に冷却損失の要因となるリップ部での逆スキッシュ流動の低減を狙って、段付きエッグシェイプ燃烧室コンセプトを新たに開発した。

高分散噴霧と段付きエッグシェイプ燃烧室を用いて冷却損失の影響が大きい軽負荷条件でCFD燃焼解析を行った結果をFig. 14に示す。Fig. 14上段に示すように多段で少量噴射された高分散噴霧によって狙いどおりに噴霧混合気と壁面との接触を抑制できている。またFig. 14下段に示すように膨張行程初期にリップ部とシリンダヘッド間に生じる逆スキッシュ流についても狙いどおりに低減できていることを確認した。Fig. 15に軽負荷条件と中負荷条件でのエンジン実験による検証結果を示す。高分散噴霧と段付きエッグシェイプ燃烧室では、狙い通りに軽負荷で大幅な

燃費率の低減を達成し、中負荷でも有意な燃費率の低減を確認した。この際のスモークの増大はほとんどなく、THC (Total Hydro Carbon) については有意な低減を確認した。

4.4 多段燃料噴射による噴射量制御と燃焼制御

前述の高分散噴霧は少量多段燃料噴射時に有効であるが、小排気量化に伴い要求される燃料噴射量の絶対値が小さくなるために噴射量制御の精度が相対的に低下する問題がある。一般的に多段噴射を実施すると、前噴射の終了時に生じる圧力脈動の影響を受け、噴射間隔に応じて後段の噴射量が変化する。従って、噴射圧力・噴射指示値・噴射間隔

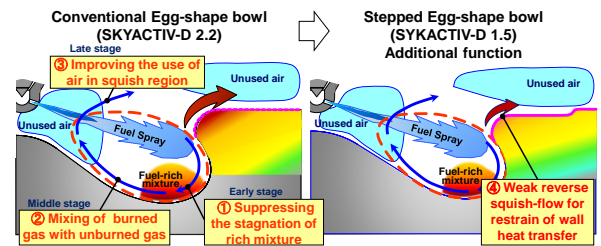


Fig. 13 Stepped Egg-shape Piston Bowl Concept

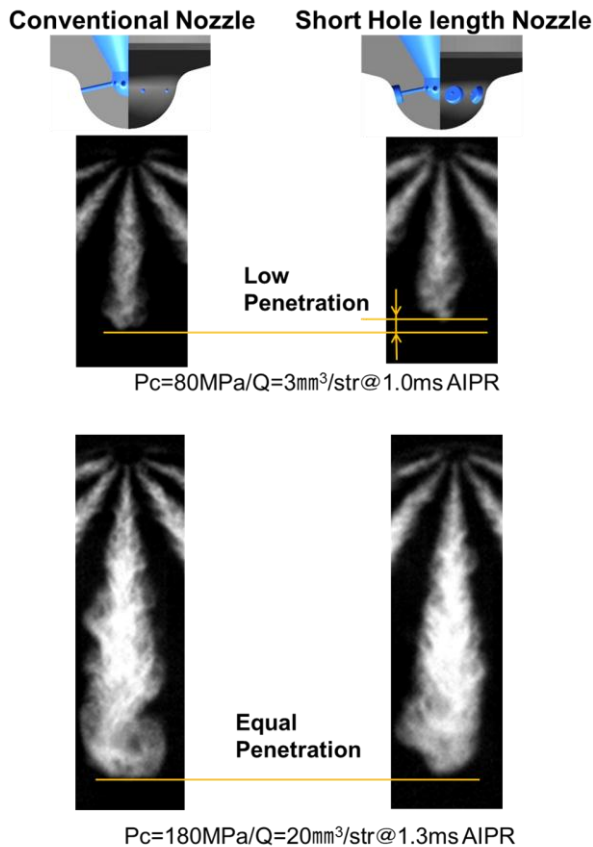


Fig. 12 Improvement of Spray Characteristics

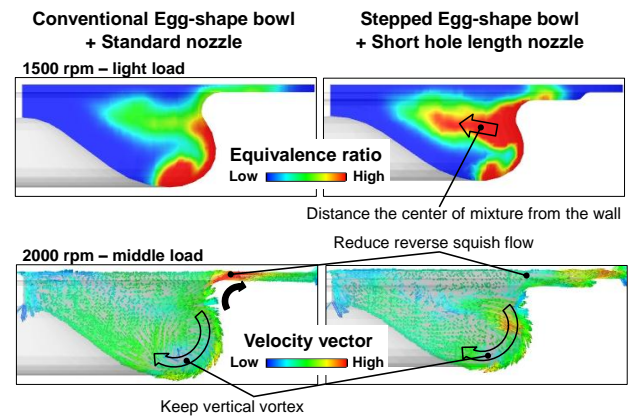


Fig. 14 CFD Results for Piston Bowl and Spray Concept

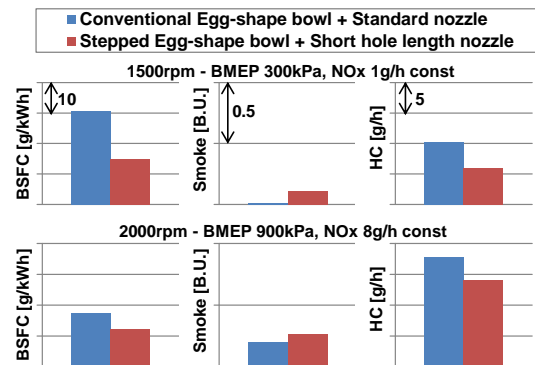


Fig. 15 Engine Experimental Results for Piston Bowl and Spray Concept

などの条件ごとに変化する噴射量のずれを補正する噴射量制御が必要となる。このような多段噴射時の各段噴射量の補正制御の精度を向上させるため、1.5Lでは2.2Lで採用していた補正マップによる制御ではなく、燃圧脈動の物理現象を数式化して噴射量のずれを噴射間隔に対する減衰振動の和で表すモデル制御を新たに開発して採用した。数式モデル内の振幅や位相などのパラメータを噴射圧力や噴射量指示値ごとに同定することでFig. 16に示すように任意の条件における噴射量ずれの予測を可能とした。

高精度な噴射量制御性の確保により、1.5Lでは Fig. 17 に示すような多段燃料噴射による燃焼制御を実施している。2.2Lで構築した燃焼制御⁽¹⁾ (6)をベースに、各段の燃料噴射量が少なく、また小刻みなアクセルワークが多くなる小排気量化に対応させている。更に過渡や環境条件変化に伴う外乱に際しては、サイクルごとに筒内の温度、圧力、ガス成分等の状態を予測して、その筒内状態において必要十分なパイロット発熱量が得られるような要求パイロット噴射量を数式から予測して制御するモデル燃焼制御を新たに開発して採用した。これにより過渡や環境条件変化の外乱に際しても、燃費と排気の悪化を最小限に留め、かつ燃焼ノック音を抑制した優れた静粛性を実現した。

4.5 冷却水制御システム

小排気量化に伴う構造系の比熱容量増大による暖機性悪化、および排気系面積/体積比増大に伴うDOC入口ガス温度の低下への対策として、1.5LではFig. 18に示すように、エンジン冷却水回路をモータ駆動の専用バルブで切り替える冷却水制御システムを採用している。冷間時にはシリンダブロック、オイルクーラ、ATFクーラへの水流を停止して、シリンダヘッドへは最低限の水流を供給する。エンジン実験による検証結果をFig. 19に示す。冷却水回路を制限した場合に冷間始動後200secでの冷却水温度、シリンダライナ壁温度、DOC入口排ガス温度ともに約15degの暖機効果を確認した。また暖機後において従来の機械式サーモスタットと比べて目標水温への安定した制御が可能になった。

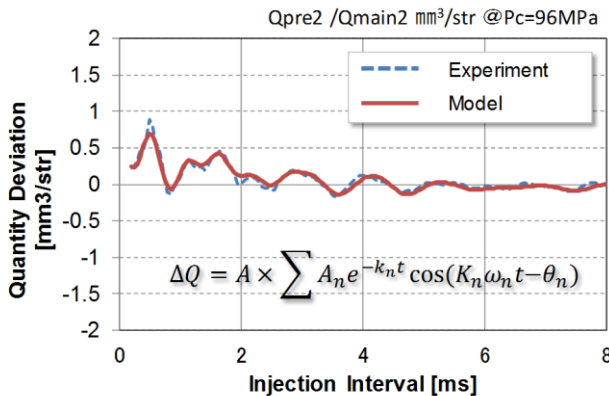


Fig. 16 Results of Injection Quantity Deviation Model

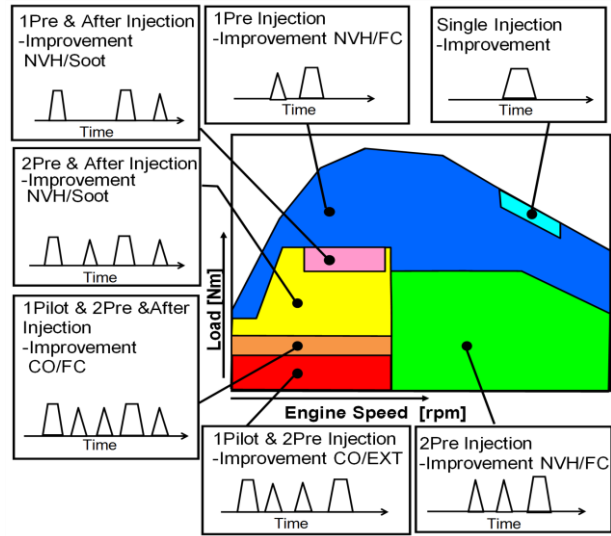


Fig. 17 Multi-Stage Injection Control Strategies

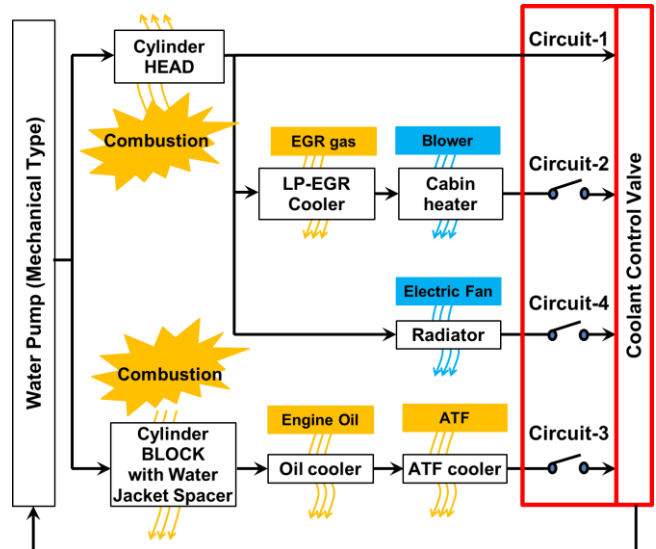


Fig. 18 Engine Coolant Control System

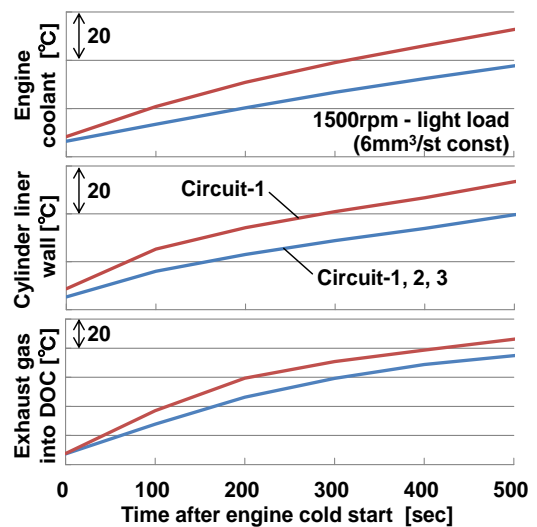


Fig. 19 Results of Engine Warm-up Curves

5. おわりに

SKYACTIV-D 1.5 は、小排気量&コンパクト化に伴う困難な制約の克服に加え、熱効率を支配する各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、排気、および静粛性を高次元でバランスさせた、国内外に無類の小排気量クリーンディーゼルエンジンである。

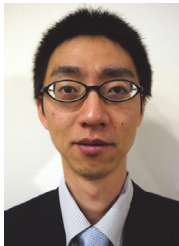
参考文献

- (1) 森永ほか：SKYACTIV-D エンジンの紹介，マツダ技報，No.30，pp.9-13 (2012)
- (2) T. Sakono, et al. : 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, pp.943-965 (2011)
- (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) S. K. Kim, et al. : 8th COMODIA, Paper No. EC1-2 (2012)
- (5) H. Sahara, et al. : 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, pp.95-100 (2013)

■ 著 者 ■



平林 千典



大西 毅



白井 裕久



佐藤 雅昭



森永 真一



志茂 大輔