

特集：MAZDA CX-60

03

第2世代 SKYACTIV-D の燃焼技術

The Combustion Technology for 2nd Step Skyactiv-D

金 尚奎 ^{*1} Sangkyu Kim	加藤 雄大 ^{*2} Yudai Kato	松尾 建 ^{*3} Takeru Matsuo	神崎 淳 ^{*4} Jun Kanzaki	田所 正 ^{*5} Tadashi Tadokoro
白橋 尚俊 ^{*6} Naotoshi Shirahashi	稲角 健 ^{*7} Takeshi Inazumi	皆本 洋 ^{*8} Hiroshi Minamoto	志茂 大輔 ^{*9} Daisuke Shimo	

要 約

第2世代 SKYACTIV-D では、熱効率の制御因子の理想化を一段と推し進め、燃焼時期と燃焼期間を更に進化させた新燃焼コンセプトにより大幅な熱効率向上を実現した。新開発の2段エッグ燃焼室を用いた空間制御予混合燃焼 (Distribution Controlled partially Premixed Compression Ignition: DCPCI) により、従来は軽負荷領域に限られていた高効率でクリーンな予混合燃焼の考え方を、中・高負荷の実用域にまで拡張することができた。

本報では、第2世代 SKYACTIV-D の燃焼技術を中心に、熱効率改善に向けた機能開発プロセスと CFD 解析による新燃焼コンセプトの提案及び実機エンジンによる検証結果について報告する。

Abstract

For the 2nd generation Skyactiv-D, we have significantly improved thermal efficiency by pursuing the ideal-state of the predominant control factors of the thermal efficiency and by the new combustion approach of evolving combustion timing and duration. With the newly developed “Distribution Controlled partially Premixed Compression Ignition (DCPCI)” using a newly devised Dual Zone Egg-shaped piston bowl, we have succeeded in the extensive application of the highly efficient and combustion-clean Premixed-charge Compression Ignition (PCI) concept to the practical medium-high load range, which had been applied only to the light load range. Focusing on the combustion technology of the 2nd generation Skyactiv-D, here we report on the function development process for improving thermal efficiency, the proposed new combustion concept based on CFD analysis, and the verification results by engine experiments.

Key words : Diesel Engine, Combustion, Thermal Efficiency

1. はじめに

カーボンニュートラル社会に向けてさまざまな施策が世界規模で進行する中、内燃機関にはより一層の熱効率改善が求められており、その実現には燃焼技術の革新が重要である。本報では、高効率と低エミッションを両立する革新的な燃焼コンセプトである空間制御予混合燃焼 (DCPCI) を中心に第2世代 SKYACTIV-D に採用した燃焼技術について紹介する。

2. 熱効率改善に向けた機能開発

マツダは Fig. 1 に示すように究極の内燃機関を目指して、熱効率を支配する制御因子の理想化をガソリンエンジン、ディーゼルエンジン両面から追求してきた⁽¹⁾。1st step から更なる熱効率の改善を目指す 2nd step の第2世代 SKYACTIV-D の開発にあたって、まずゴールである 3rd step における各制御因子の理想状態を検討し、そこからのバックキャストで 2nd step の目標を定めた。この際には 0 次元サイクルシミュレーションモデルを用いたフィジビリティスタディにより、目標となる熱効率

*1~4,6,8,9 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*7 (株)マツダ E&T
Mazda Engineering & Technology Co., LTD.

*5 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

を達成するように各制御因子に定量的な改善目標を配分した。燃焼モデルにはディーゼル燃焼の特徴である空間的不均質さが及ぼす熱効率への影響を簡易的に模擬することを可能とするため、筒内を未燃領域と既燃領域に分けて表現する独自開発の2領域簡易燃焼モデル⁽²⁾(以下、2領域モデル)を用いた。また配分した目標に対する進捗・達成のエンジン実験での検証を、同じ2領域モデルを用いた実測指圧の熱力学的解析により行う。マツダではこのように目標設定と検証のループを回し、制御因子を作り込んでいく開発を機能開発と呼んでいる。

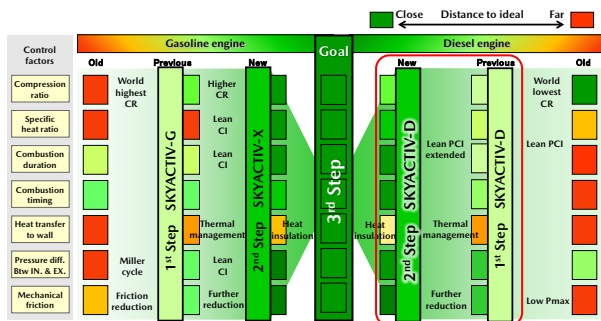


Fig. 1 Roadmap to Ideal Internal Combustion Engine

Fig. 2 に 1500rpm BMEP600kPa (エンジン諸元は Table 2 の現行型) を代表運転条件と定め、この回転負荷においてグロスの図示燃料消費率 (以下、G-ISFC) に関連する圧縮比、比熱比、燃焼期間、燃焼時期、壁面熱伝達の5つの制御因子に改善目標を配分した結果を示す。5因子のうち燃焼時期・期間の指標には等容度を、壁面熱伝達の指標には吸気温度と壁面熱伝達予測式にかかる補正係数 C_w を、比熱比の指標には吸気温度と2領域燃焼モデルの既燃領域における代表空気過剰率 λ_b を用いることで定量化した。各グラフは黒い縦線で示した1st stepにおけるステータス値をベースに各因子及びその関連指標を任意に変化させ G-ISFC の改善をスタディした結果である。Fig. 2 の緑の縦線は、ゴールとして正味熱効率 50%、G-ISFC 155g/kWh を仮目標値と置いて検討した3rd stepの各因子の目標を示し、赤の縦線は2nd stepの各因子の目標を示す。圧縮比と等容度のグラフには、G-ISFC に対する因子間の相互作用がある C_w をベースの 0.83, 0.6, 0.4 の3水準で計算した結果を示している。3rd stepでは全ての因子で大幅な改善が必要であることがわかる。一方、2nd stepでは等容度に大きな改善目標を配分した。この高い等容度目標は1st stepで軽負荷に適用したPCI燃焼の等容度に迫る目標である。これと併せて吸気温度と熱伝達補正係数 C_w の低減を行うことで大幅な G-ISFC 改善を狙った。これらの目標を達成するための燃焼技術の革新について以降に検討する。

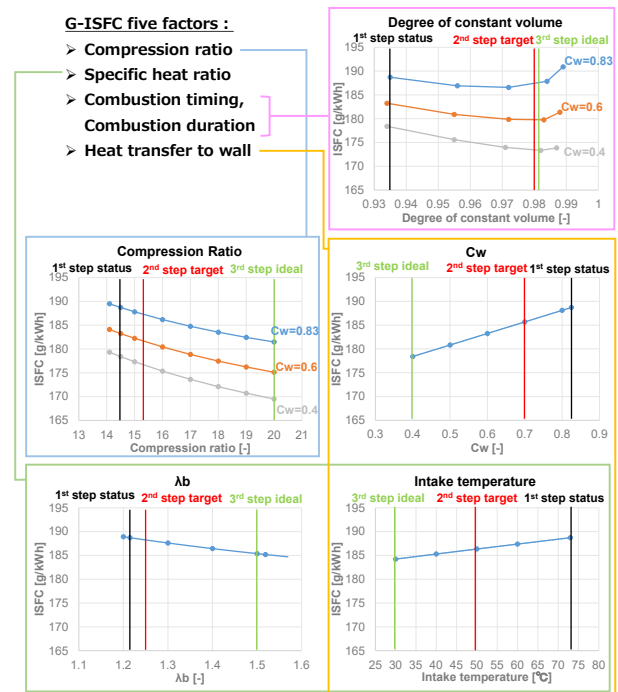


Fig. 2 Targets of Control Factors for Improving Thermal Efficiency

3. 新燃焼コンセプト

Fig. 3 に示すように、マツダの現行量産ディーゼルエンジンの軽負荷条件においては、燃焼期間の短いPCI燃焼が採用されている⁽³⁾。一方、中・高負荷領域においては主燃焼の前後に熱発生を伴う拡散燃焼が主体となっており、その長い燃焼期間のため等容度が低く燃費が犠牲になっている。そこで、中・高負荷域に適用可能な部分予混合燃焼を新たに開発し、燃焼期間短縮による等容度の向上を図った。TDC付近で短期間の燃焼を行いつつ、燃焼音やエミッションの性能目標を両立するためには、多段噴射の各噴射段を時間的・空間的に制御することで、前段噴霧によって形成される既燃部と後段噴霧との干渉を抑えることが重要である。

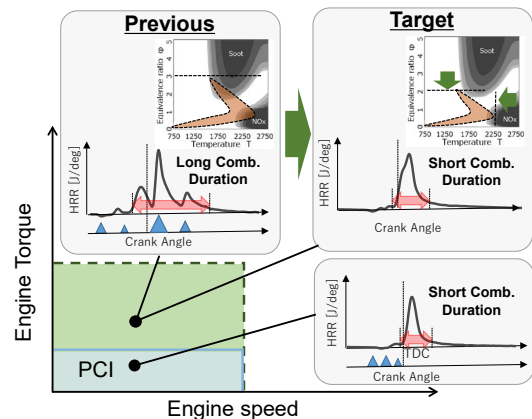


Fig. 3 Target of Combustion Duration and Mixture Distribution for Medium-load Conditions

Fig. 4 には、新たに考案した 2 段エッグ燃烧室を用いた混合気の空間分布制御による部分予混合燃烧の考え方を示す。前段噴霧を 2 段エッグ燃烧室の上下空間に分割配置させ、前段噴霧の既燃ガスと後段噴霧との干渉を抑えることで、後段噴霧があらかじめ混合した状態で着火・燃烧することをねらいとしている。本燃烧コンセプトを「空間制御予混合燃烧」(DCPCI: Distribution Controlled partially Premixed Compression Ignition) と称する。

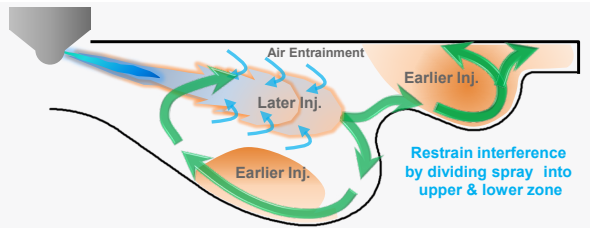


Fig. 4 New Combustion Concept by Means of Dual Zone Egg-shaped Bowl

新燃烧コンセプトについて CFD (CONVERGE ver.2.3) を用いて検証した。Table 1 にエンジン諸元及び計算条件を示す。ラベル名には、噴射パターンと燃烧室形状、噴孔仕様の各々について、従来仕様と新仕様を“CDC”と“DCP”, “SL” と “DZ”, “133” と “106” と略記している。EGR 率は各条件で同じ排出 NO_x レベルになるように調整した。Fig. 5 には、燃烧室形状とノズル仕様の比較を示す。

Table 1 Engine Specification and Calculation Condition

Label name	CDC_SL_133	DCP_SL_133	DCP_DZ_106
Bore × Stroke	φ 86mm × 94		
Compression ratio	14.4 : 1		
Engine speed [rpm]	1500		
Fuel amount [mm ³ /str]	22		
Temperature at IVC [K]	400		
Pressure at IVC [kPa]	135		
EGR rate [%]	38	45	
Combustion type	Conventional diesel combustion (“CDC” in label)	DCPCI (“DCP” in label)	
Inj. pressure [Mpa]	150		
Inj. timing (SOI) [deg.ATDC]/Inj. quantity [mm ³]	1st : -26/6 2nd : -16/2 3rd : 1/11 4th : 13/3	1st : -13/14.5 2nd : -4/1.5 3rd : 0/5 4th : 6/1	
Bowl shape	Stepped-Lip Egg-Shaped (“SL” in label)	Dual Zone Egg-Shaped (“DZ” in label)	
Nozzle type	φ 0.133 × 10 -155° (“133” in label)	φ 0.106 × 10 -157° (“106” in label)	

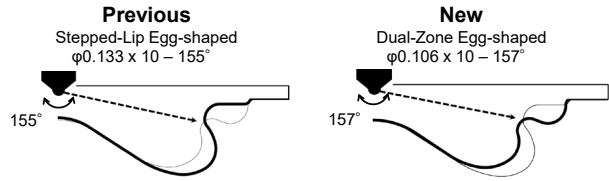


Fig. 5 Comparison of Piston Bowl Shape and Injector Specification

Fig. 6 には、計算結果の圧力及び熱発生率履歴を示す。従来燃烧の CDC_SL_133 では、遠隔パイロットやアフター噴射により、三つのピークをもつ熱発生率の波形となっており、燃烧期間が長くなっている。これに対して、DCPCI 用の噴射パターンを適用した DCP_SL_133 と DCP_DZ_106 では、TDC 付近での一山の熱発生率となっており、燃烧期間が短縮されていることが分かる。

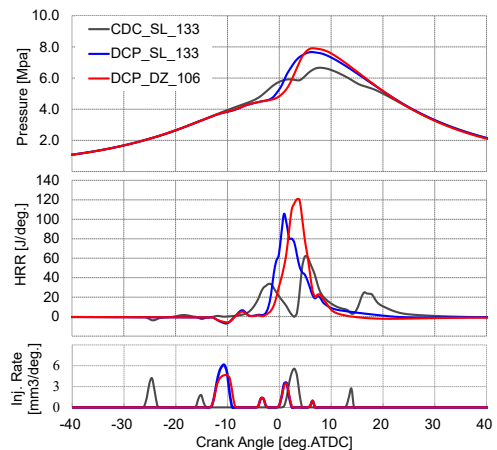


Fig. 6 Calculated Cylinder Pressure and Heat Release Rate

Fig. 7 には、燃烧期間の代表指標として燃烧率 (Mass Fraction of Burned-fuel: MFB) が 10% から 90% に達するまでの期間を表す MFB10-90 と Soot の計算結果を示す。従来の燃烧室形状とノズル仕様のまま DCPCI 用の噴射パターンを適用した DCP_SL_133 では、従来燃烧の CDC_SL_133 と比べて燃烧期間が短くなっている。また、2 段エッグ燃烧室と小径ノズルを適用した DCP_DZ_106 では更に燃烧期間が短くなっている。これは、DCP_DZ_106 では DCP_SL_133 と比べて着火遅れ期間が長く (MFB10 が遅く)、後燃え期間が短縮された (MFB90 が早い) ことに起因する。

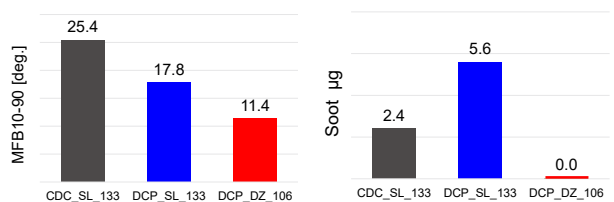


Fig. 7 Calculated Combustion Duration and Soot Emission

また、Sootの計算結果では、従来の燃焼室形状とノズル仕様のまま噴射パターンのみをTDC付近に寄せたDCP_SL_133の場合にはSootが悪化するのに対して、2段エッグ燃焼室と小径ノズルを用いたDCPCIではSootが大幅に低減できている。

Fig. 8には、当量比分布の計算結果を示す。各条件の各噴射段の噴射終了（EOI）時期における噴射軸断面である。噴射量が比較的に多い1段目と3段目の噴霧に注目して考察する。CDC_SL_133とDCP_DZ_106の1段目噴射から、従来の燃焼室で噴霧をスキッシュエリアとキャビティ領域に分配させるためには早期噴射を行う必要がある一方、新燃焼室ではTDC近傍の噴射でも噴霧が燃焼室の上下空間に分配できることが分かる。3段目噴射に注目すると、従来の燃焼室のまま噴射のみTDC付近に寄せたDCP_SL_133では、前段噴霧の大半が燃焼室キャビティに分布しており、そのリッチ領域と3段目噴射とが強く干渉している様子が見られる。これに対して、DCP_DZ_106では、前段噴霧が燃焼室の上下に分割され、3段目噴霧の前段噴霧との干渉が低減されている。この前段噴射と後段噴射の干渉は、Fig. 4の熱発生率における後燃えとFig. 7におけるSoot排出量増加の原因になっていると推察される。

Fig. 9には混合気の ϕ -Tマップ上の分布を示す。従来の燃焼室を用いたCDC_SL_133とDCP_SL_133では燃焼が活発な3deg~7degにSoot生成領域への分布が多くなっているのに対して、DCP_DZ_106ではSoot生成領域を回避できている。これらの傾向はSoot排出量

(Fig. 7)と定性的に一致している。

以上のことにより、新燃焼コンセプトにより燃焼時期と燃焼期間を理想状態に近づけつつ、クリーンな燃焼が実現できることが確認できた。

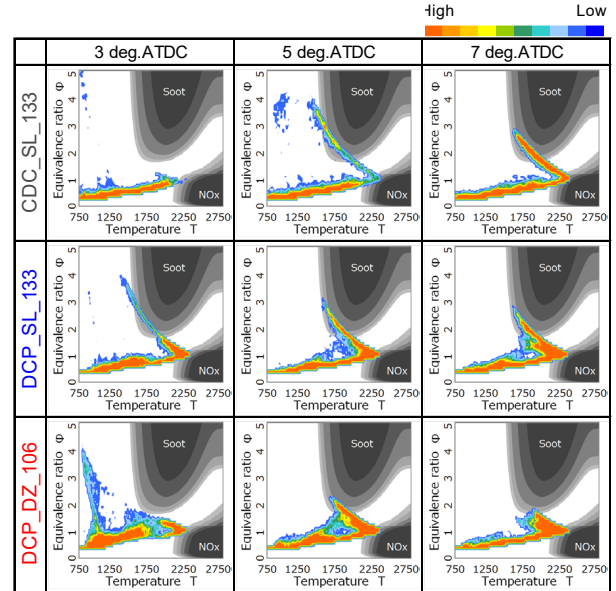


Fig. 9 Calculated Mixture Distribution on ϕ -T Map

4. 新燃焼コンセプトの実用化

新燃焼コンセプトの効果検証として、燃費、エミッション、NVHに関わる諸性能について旧型エンジンとの

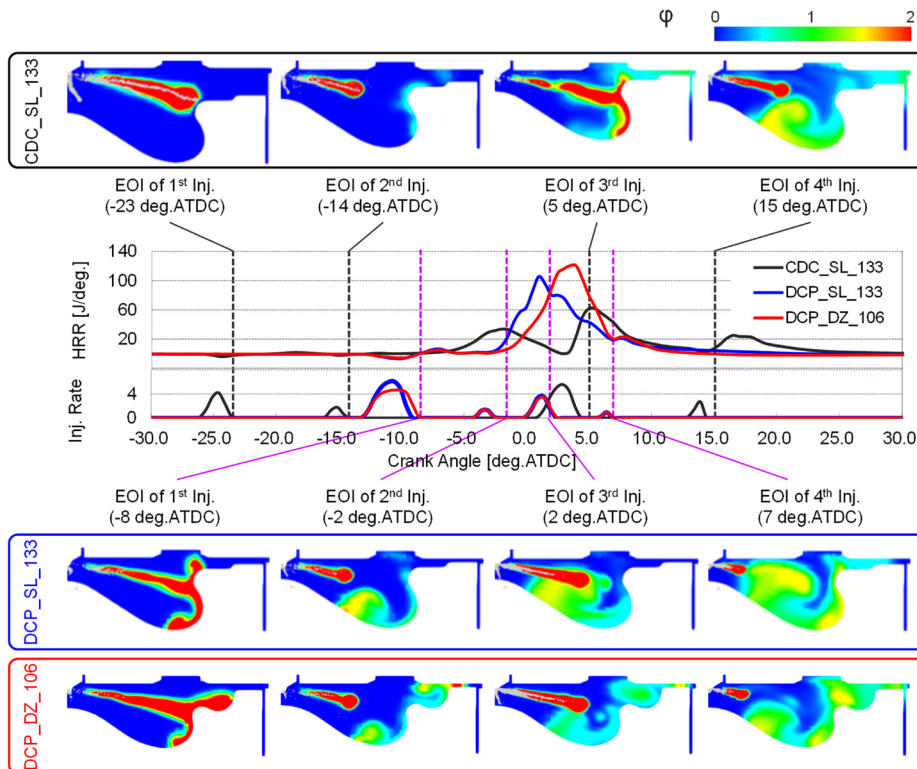


Fig. 8 Calculated Mixture Distribution

比較を行った。また、カーボンニュートラル燃料（以下、CN 燃料）への適用性についても検証を行った。

4.1 新燃焼コンセプトの性能評価

Table 2 に性能評価に用いた新開発の第2世代 SKYACTIV-D（以下、新型）と現行型の第1世代 SKYACTIV-D（以下、旧型）の諸元を示す。新型エンジンでは、4気筒から6気筒にして総排気量を拡大しているが、気筒あたりの排気量は旧型エンジンと同じである。吸気温度を低減するためにLP-EGRを採用した。また、熱伝達補正係数 C_w を低減するためにピストンを旧型のアルミ製よりも燃焼室壁温が高いスチールピストンを採用した⁽⁴⁾。圧縮比も14.4から15.2に高めている。これらは第2章で述べた各制御因子の機能目標設定に対応している。また燃料噴射ノズル仕様及び燃焼室形状については、第3章で述べた新燃焼コンセプトに基づいている。

Table 2 Engine Specification

	Previous Engine	New Engine
Engine Type	In-Line 4	In-Line 6
Bore/Stroke [mm]	86/94	←
Displacement per cylinder	547 [cm ³]	←
Compression ratio	14.4	15.2
Fuel injection system	Common Rail/ Piezo injector	←
Injector nozzle dimension	φ 0.133mm × 10hole	φ 0.106mm × 10hole
Piston material	Aluminum	Steel
Piston bowl shape	Stepped-Lip Egg-shaped	Dual Zone Egg-shaped
EGR System	HP-EGR	HP & LP-EGR

Fig. 10 に、軽負荷と中高負荷に対して各々の代表運転点における新型及び旧型エンジンの熱発生率を示す。縦軸は排気量差を除くため、図示平均有効圧（IMEP）としている。旧型エンジンでは、IMEP400kPa付近まではPCI燃焼によりTDC付近に燃焼が集まる高等容度燃焼（TDC燃焼）を実現しているが、それ以上の負荷条件では混合確保のため燃焼期間の長い拡散燃焼となっていた。新型エンジンでは、DCPCI燃焼を適用しIMEP1200kPa付近においても燃焼期間の短いTDC燃焼を可能にした。

新型と旧型エンジンの性能評価結果を Fig. 11 に示す。軽負荷から中高負荷域にかけて3点の代表点において、比較を示した。熱発生率とNOx, Soot (SMOKE), 図示燃費 (G-ISFC), 等容度 (DCV: Degree of Constant Volume), 冷却損失割合 (Qcool), 燃焼音 (CPLF) を示している。NOxについては、いずれのIMEP条件におい

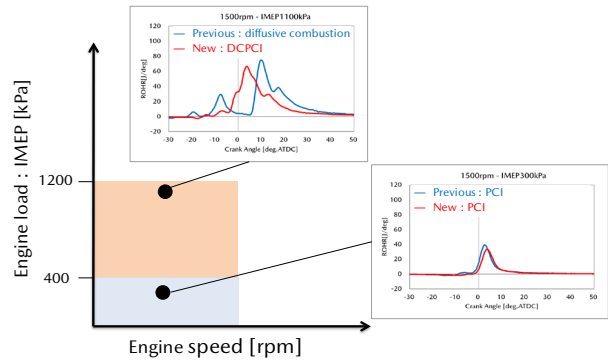


Fig. 10 Expansion of TDC Combustion Area

ても旧型から新型でおおむね同等となっている。Sootについては、いずれのIMEP条件においても低減されており、第3章で示したDCPCIによる多段噴射噴霧の干渉抑制の効果が確認できた。図示燃費については、いずれの条件でも改善し、IMEP700kPaと1100kPaにおいては10g/kWh以上の大幅な改善を達成している。これは、IMEP300kPaにおいては高圧縮比とスチールピストン採用による冷却損失改善の寄与が大きく、IMEP700と1100kPaにおいてはDCPCI燃焼を適用することで、PCI燃焼並みの高い等容度を実現したこと寄与が大きい。更に、燃焼室形状と噴射間隔の適正化により熱発生率の急峻な立ち上がりを抑制することで、TDC付近で燃焼期間を短縮しながらも、燃焼音を改善できている。

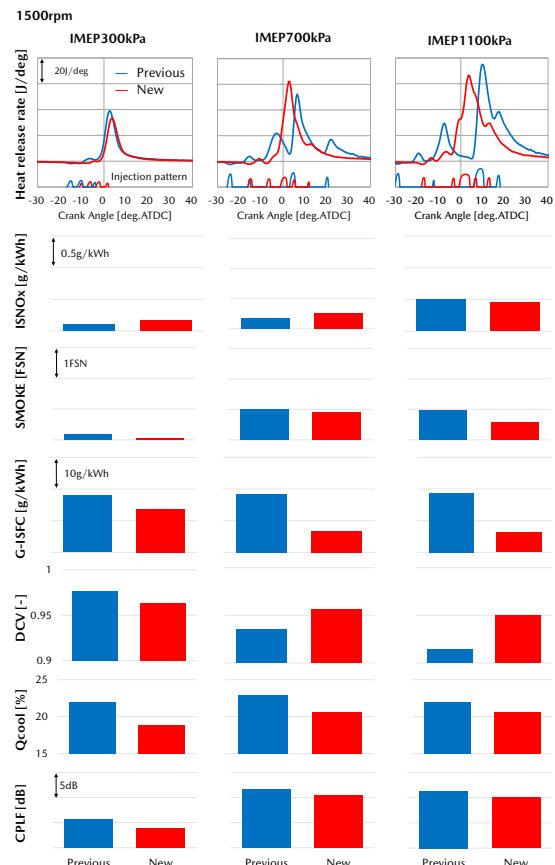


Fig. 11 Comparison of Combustion Performance between Previous and New Combustion Concept

以上のように、第2章で設定した熱効率制御因子の機能目標及び第3章で提案したDCPCI燃焼コンセプトによる大幅な燃費の改善を確認した。

4.2 カーボンニュートラル燃料の適用性

新型エンジンでは、次世代CN燃料への対応を念頭に置いて、燃料性状の差による燃焼影響を検証した。CN燃料として注目されている水素化処理タイプの次世代バイオ燃料（Hydro-treated Vegetable Oil: HVO）など、パラフィン系の炭化水素を主成分とする燃料はセタン価が高く、早期着火に伴う混合時間不足によるSoot悪化や、燃焼速度増大による燃焼音悪化等の懸念がある。このようなCN燃料対応においては、着火性、とりわけ高セタン価燃料に対するロバストな性能を確保することが重要である。供試燃料には、ディーゼル燃料の国際規格EN15940に準拠した水素化処理タイプの次世代バイオ燃料HVOと、国内JIS規格2号軽油（以下、軽油）を用いた。Table 3に燃料性状の比較を示す。バイオ燃料は軽油と比べてセタン価が高くなっている。バイオ燃料の評価については、市場においてドロップインで使用されることを想定し、特別に制御パラメーターを変更せず、軽油と同じ条件で行った。

Table 3 Specification of Test Fuel

	Diesel Fuel	Bio Fuel
Type	JIS #2 Diesel	100% of Hydro-treated Vegetable Oil
Cetane number	55.7 (Cetane index)	75.1
Density	0.83 [g/cm ³]	0.78 [g/cm ³]
Viscosity	3.66 [mm ² /s]	3.0 [mm ² /s]

Fig. 12に軽油とバイオ燃料を用いた性能評価結果を示す。燃料の低位発熱量の差を除くため、同一正味平均有効圧（BMEP）で比較している。BMEP200kPaはPCI燃焼、BMEP600及び1000kPaはDCPCI燃焼となっている。いずれの条件においても、バイオ燃料を用いた場合は高セタン価によって着火時期が早まっているが、NO_xとSootは、軽油と同等となっていることが判る。また、燃焼音については燃焼の進角に伴い僅かに増加しているが、車載状態で変化量が許容範囲内であることを確認した。熱効率に関しては、燃料の低位発熱量の差を考慮した上で同等となった。

以上のように、新型エンジンの燃焼では水素化処理タイプの次世代バイオ燃料をドロップインで使用した場合においても、軽油とおおむね同等の性能が得られることを確認した。

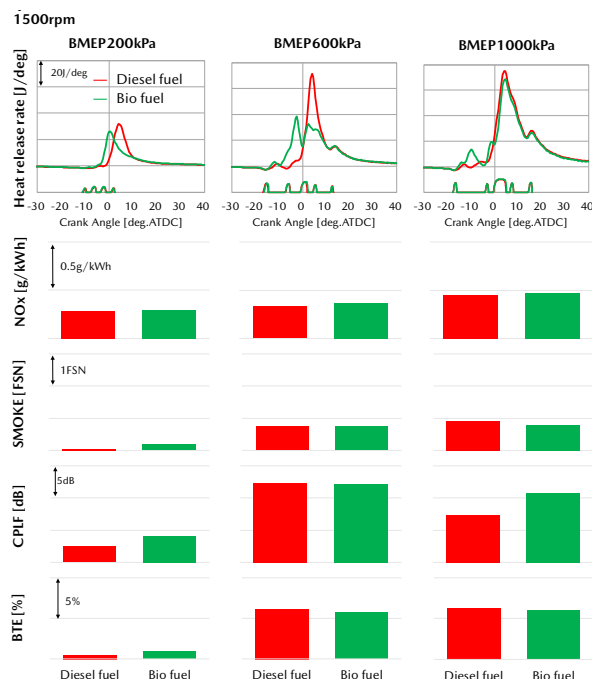


Fig. 12 Compatibility of New Combustion Concept with Biofuel

5. おわりに

第2世代SKYACTIV-Dでは、新開発の2段エッグ燃焼室を用いた空間制御予混合燃焼（DCPCI）により、熱効率の制御因子の理想化を一段と進化させ、既存エンジンでは軽負荷領域に限定されていた予混合燃焼の考え方を中高負荷領域において実現することで、実用域における大幅な燃費改善を達成した。更に、グローバル市場で普及が拡大しつつあるバイオ燃料に対する燃焼のロバスト性を確保した。今後、カーボンニュートラル社会に向けて内燃機関の更なる進化に挑戦しつつある所存である。

参考文献

- (1) M. Hitomi: “Both the Gasoline and Diesel Engines will be Winners” 26th Int. AVL Conference Graz, (2014)
- (2) Y. Kato, et al.: Heat Balance Analysis Using Cylinder Pressure Obtained by Engine Experiments Considering the Spatial Heterogeneity of Diesel Combustion, SAE Technical Paper, No.2019-01-2228 (2019)
- (3) 志茂ほか：予混合型ディーゼル燃焼による排気と燃費の低減，自技会論文集，Vol.42 No.42, pp.867-872 (2011)
- (4) 岡澤ほか：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—，マツダ技報，No.39, pp.28-35 (2022)

■著者■



金尚奎



加藤雄大



松尾建



神崎淳



田所正



白橋尚俊



稲角健



皆本洋



志茂大輔