

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

2

SKYACTIV-D エンジンの紹介
Introduction of SKYACTIV-D Engine森永 真一*1
Shinichi Morinaga詫間 修治*2
Shuji Takuma西村 博幸*3
Hiroyuki Nishimura

要約

今日のディーゼルエンジンに求められるものは燃費性能はもちろんのこと、優れた環境性能、走り性能、音・振動性能を低コストで具現化することであり、その期待は更に高まる一方である。今回新開発した SKYACTIV-D は、内燃機関の効率を徹底的に追求し相反する関係にあった燃費とエミッションをブレークスルー技術で飛躍的に向上させた。このエンジンは、卓越した走行性能を実現した上でより厳しい排出ガス規制に NOx 後処理なしで適合し、前モデルより燃費を約 20% 向上した。本稿では SKYACTIV-D 2.2L における開発の狙いと導入技術コンセプトについて紹介する。

Summary

For today's diesel engines, not only high fuel efficiency but also excellent environmental protection performance, driving dynamics, noise and vibration performance are required, and all of them must be achieved at low cost. Such expectation seems to never cease. The newly developed SKYACTIV-D significantly improves the inversely related fuel efficiency and emission performance with breakthrough technologies developed through thorough pursuit of high efficiency of internal combustion engine. This engine, which achieves superior driving dynamics, complies with a stricter emissions regulation without a nitrogen oxide (NOx) aftertreatment system while increasing the fuel efficiency by 20 percent over the previous model. This paper describes the development target of the SKYACTIV-D 2.2L and applied technology concepts.

1. はじめに

近年の世界的な燃費志向の高まりにより、ガソリンエンジン（以下、GE）の燃費改善、HEV の低コスト化が進んでおり、これまで燃費ポテンシャルの高かったディーゼルエンジン（以下、DE）も一層の燃費改善とコスト低減が望まれている。また近年強化されつつあるエミッション規制に適合する優れた環境保護性能を有することも重要である。

以上の背景から、燃焼の理想状態を追求することで走る歓びと優れた環境性能を高い次元で両立させたエンジンユニットである新世代型 2.2L DE（以下、SKYACTIV-D）を開発した。

2. 技術コンセプト

内燃機関の効率改善とは、排気損失、冷却損失、ポンプ損失、機械抵抗損失を低減することである。各種損失を低減するために制御可能な因子としては、Fig.1 に示す圧縮比、比熱比、燃焼期間、燃焼時期、壁面熱伝達、吸排気行程圧力差、機械抵抗にまとめられ、内燃機関の効率改善とはそれらを理想状態に近づけて行くことであると考えている。SKYACTIV-D は、これら制御因子のうち、理想状態と乖離している燃費最適燃焼タイミングと機械抵抗の改善を行った。

従来の高圧縮比 DE（以下、既存 DE）はピストン上死点付近で燃焼（以下、TDC 燃焼）させて高膨張仕事を得

*1, 3 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*2 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

たいが、上死点付近で燃やそうとすると混合気の均質化のための時間が稼げないうちに燃焼するため NOx と煤の同時低減には限界がある。そのため、排気ガスのクリーン化の要望に応えるためにはリタード燃焼を強いられて Fig.2 のように有効膨張比が低下し、効率低下を招いていた。また、高圧縮比かつ出力増大を狙うと、筒内最高燃焼圧力（以下、Pmax）が高くなり、耐圧性のために部品強度を高くする必要があり、一般的な GE に比べて機械抵抗が高くなる傾向であった。この DE が抱える制約を解決するために SKYACTIV-D が採用したイネーブラは世界一の低圧縮比化であり、以下の技術コンセプトをサポートする。

-TDC で燃やしても煤と NOx を出さないよう、燃料と空気のみキシング時間を確保すること

-同一出力において低剛性構造を実現し、軽量化と機械抵抗低減するために Pmax の低減を図ること

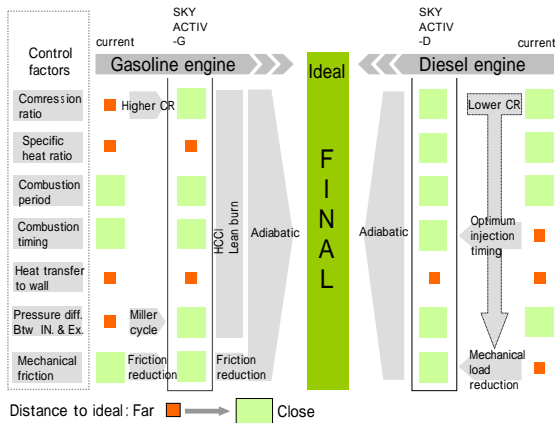


Fig.1 Vision for Evolution of Internal Combustion Engine

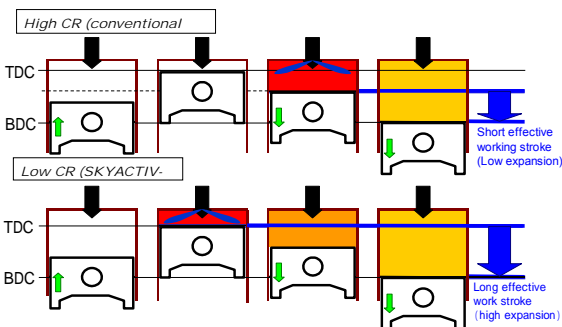


Fig.2 Increase of High Expansion Ratio With Low Compression Ratio

3. エンジン諸元と基本エンジンシステム

Table 1 に新エンジンの主要な特徴を前モデルと比較して示す。また、Fig.3 にエンジン制御システム図を示す。先に述べた技術コンセプト達成のために、圧縮比は 16.3 から 14.0 へ低下、EGR を多量に入れても必要な酸素量を確保できるような高効率過給のために、過給機を Variable Geometry Turbocharger から 2 つのターボチャージャーで低

回転から高回転まで突出した過給性能を実現する 2Stage Turbocharger（以下、2T/C）へ変更した⁽¹⁾。ノズルは前モデルと同様に 10 孔のミニサックノズルで高回転でも燃焼速度が緩慢にならないように 23% 噴孔流量を増加し、インジェクタは噴射制御性を改善するためにピエゾアクチュエータを採用した。また燃焼室形状は、キャビティー内での燃料と空気のみキシングの促進と、スキッシュエリアの空気利用の促進を目的とした新開発のエッグシェイプ型とした⁽²⁾。排気カムには吸気行程で排気バルブを微小リフトさせ、排気ガスを再度シリンダ内に導入できる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）を新規に採用した。後処理システムは前モデル同様に酸化触媒と DPf の組み合わせで、NOx 後処理システムを採用せずに国内ポスト新長期&Euro6 規制に適合している。

Table 1 Main Dimension and Specification

Engine	MZR-CD (Previous Model)	SKYACTIV-D (New Model)
Displacement (cm3)	2184	2188
Bore X Stroke (mm)	φ86 × 94	φ86 × 94.2
Mounting (Tilt) Angle (degree)	0	10
Compression Ratio	16.3	14.0
Max. Firing Pressure (MPa)	17.5	13.5
Valve System		
DOHC 4valve Chain-Driven		
DOHC 4valve Chain-Driven w/ IDEVA		
Valve Timing (deg.)	In. Open (BTDC)	6
	In. Close (ABDC)	30
Ex. Open (BBDC)	36	40
	Ex. Close (ATDC)	9
Crankshaft Main / Pin Journal Dia. (mm)		
φ60/φ51		
φ52/φ52		
Fuel Injection System		
Common Rail System G3 Solenoid		
Common Rail System G3 Piezo		
Maximum Injection Pressure		
200		
Nozzle		
10hole 900cc/min. Mini-Sac		
10hole 1112cc/min. Mini-Sac		
Combustion Bowl Shape		
Reentrant Type		
Egg-Shaped Type (New Concept of Reentrant Type)		
Glow		
Ceramic Glow		
Turbocharger		
Variable Geometry Turbocharger		
2Stage Turbocharger		
EGR Route		
High Pressure w/Cooling		
Aftertreatment System		
DOC + DPF /Under foot		
DOC + DPF /w Engine		
Maximum Torque		
400Nm / 2000rpm		
420Nm / 2000rpm		
Maximum Power		
136kW /3500rpm		
129kW /4500rpm		
Emission Standard		
EURO5		
EURO6 JPN PNLT		

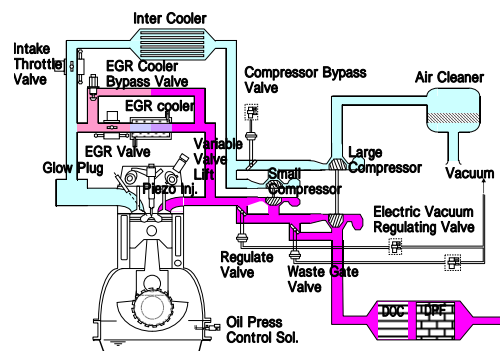


Fig.3 Engine Control System Diagram

4. 軽量化・機械抵抗低減

4.1 ピストン、クランク系

Fig.4 にDE, GEの機械抵抗総量の比較, Fig.5 にDEの各部品の抵抗比率を示す。前モデルのDEはGEに比べ機械抵抗総量が約 1.5 倍高い。その中でもピストン、クランク系の機械抵抗は全抵抗の約半分を占めている。⁽³⁾

既存 DE は GE に比べ Pmax が高く、ピストン、クランク系に加わる荷重が大きい。そのため荷重に応じた剛性に設定することから重量が重く、耐焼付き性から摺動部や軸受部の面積を広く設定するため、機械抵抗が大きい。

それに対して SKYACTIV-D では低圧縮比の採用による Pmax 低減とクランク軸オフセットを採用することでピストン、クランク系に加わる荷重を低減した。その結果下記のように軽量化や機械抵抗低減を行うことができた。

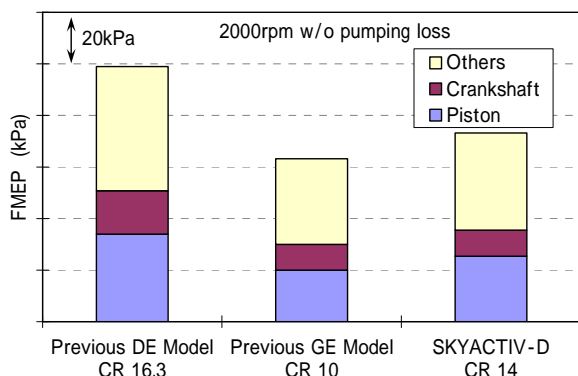


Fig.4 Comparison of Mechanical Resistance

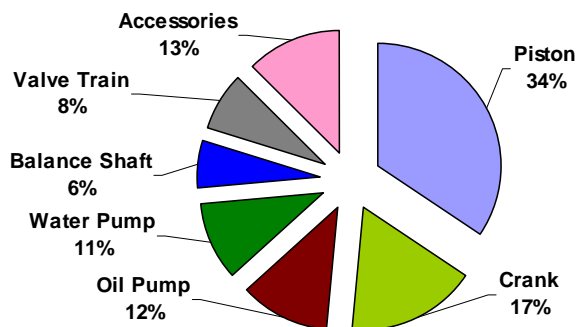


Fig.5 Breakdown of Diesel Engine Mechanical Resistance

ピストンは圧縮高さや各部肉厚の最適化を行うことで前モデル比約 26%重量低減した。またスカート剛性や面積を低減することで前モデル比約 28%機械抵抗を低減した。

ピストンリングはシリンダブロックのアルミオープンデッキ化によりボア真円度が向上した効果とオイルリング摺動面に採用したハーフバレル形状による油膜のせん断力低減により、オイル消費性能を前モデル比約 20%向上しながらも機械抵抗を 25%低減した。

クランクシャフトは荷重低減と剛性バランスの最適化によって、クランク軸の細軸化を行った。それにより、機械抵抗を前モデル比約 40%低減した。

4.2 オイルポンプ、ウォーターポンプ、補器駆動系

オイルポンプは, IDEVA, 2T/C 等, 全モデルと比較して油圧を要するデバイスが増加したが, オイル通路の最適化等により最小限のポンプ容量増加に抑えた。また油圧フィードバックシステムと電子制御 2 段油圧切り換え機構を採用し, 実用域と高負荷域の油圧切り替えにより, 必要最低限まで油圧を抑えることで機械抵抗を前モデル比約 22%低減した。

ウォーターポンプはインペラをシュラウド付き形状にすることで効率を改善した。また冷却を要するデバイスの水経路の最適化するとともにシリンダヘッド内冷却水方向をシリンダごとに排気から吸気側に水が横に流れるように設計し, 高流量時の流量抵抗を下げた。

補器駆動系は油圧式オートテンショナや 1WayClutch の採用によりベルトのスリップや弦振動音を抑えつつベルト幅, 張力を低減させることで, ウォーターポンプ含む補器駆動系の機械抵抗を前モデル比約 40%低減した。

以上による軽量化およびシリンダブロックのアルミ化や部品点数の削減により, エンジン全体の重量を前モデル比約 20%低減した。また全体の機械抵抗は約 26%低減することができ, 従来 GE 並みの機械抵抗レベルを達成した。

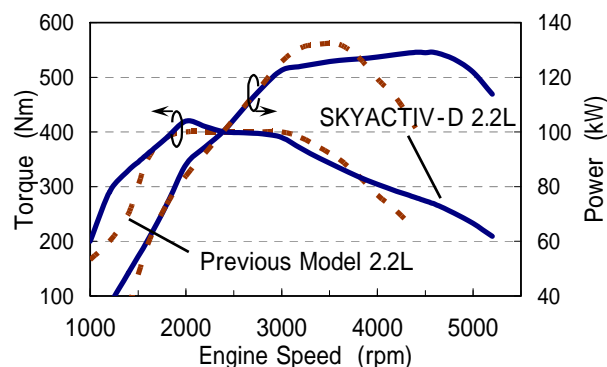


Fig.6 Engine Performance

5. パフォーマンス

5.1 出力性能

従来モデルのエンジンは出力を増加させるために Pmax を増大する手法を利用していたが, SKYACTIV-D は低圧縮比にして同じ吸気量を導入しても圧縮上死点での圧力を抑えることができる。そのため従来モデルより低い Pmax で Fig.6 に示すように最高出力 129kW を 4,500rpm で出し, 前述のピストン, クランクの往復回転系の軽量化のおかげで使用可能な回転領域を 5,200rpm まで拡大して, 伸びやかな加速ができるようにした。最大トルクは 420Nm を 2,000rpm で出し, 1,500rpm 以下のトルクを現行エンジンより 20-45%改善した。その結果, Fig.7 に示すように車両走行において低速からの加速性能を前モデルより大幅に改善することができた。

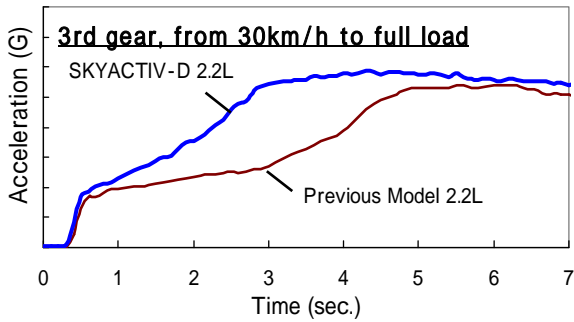


Fig.7 Acceleration Performance

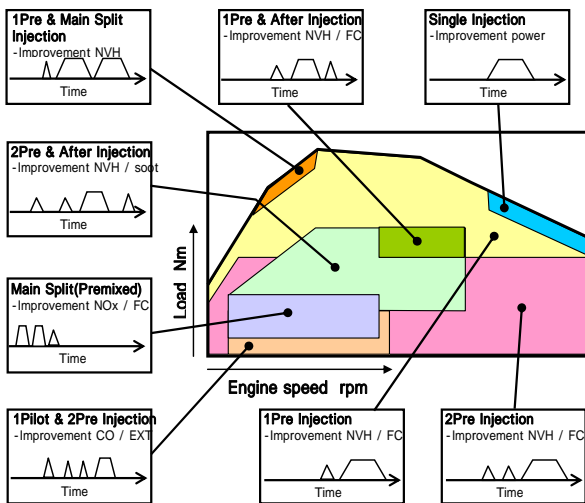


Fig.8 Example of Multi-Pilot Injection Pattern

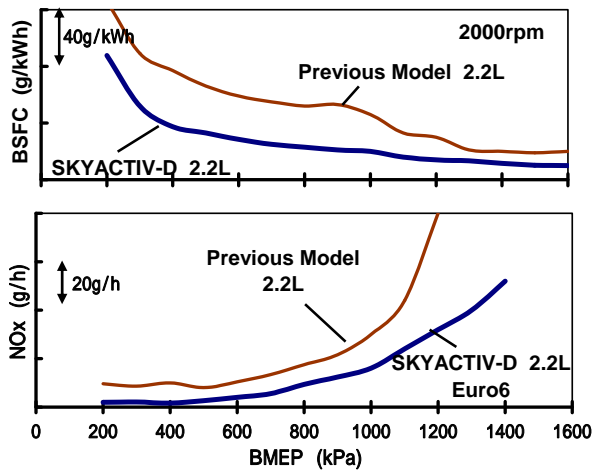


Fig.9 Fuel Efficiency and NOx Discharge Characteristic

5.2 低排気エミッションと燃費性能

SKYACTIV-Dでは低圧縮比と高過給・高EGRによる燃焼温度低下と空気と燃料のミキシング促進により、煤とNOxの発生を同時に低減できた。また、燃焼開始時期を進角させたことで膨張比が大きくとれ、燃焼期間も前モデルより短縮できた。更に従来モデルより実施してきた多段噴射⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾の更なる最適化を実施した (Fig.8)。これらの効果により、Fig.9 に示すように前述のPF低減と合わせて大

幅な燃費改善と同時にNOx低減を実現した。

6. 技術コンセプト実現の課題と対応技術

6.1 未燃成分低減技術

低圧縮比化および多量EGRの導入は、エンジンから排出されるNOxを低減させる一方で未燃成分であるHC/COは増加する。更に燃費を改善すると排気ガス温度が低下するため、触媒が活性するまでの期間が長期化する。これら問題を解決するため、後処理システムを前モデルのアンダーフット位置からクローズドカップルド位置へ移動させるとともに、エンジンスタート時にD-AWS (Diesel Accelerated Warm-up System)を採用して、触媒の早期活性を可能にする技術を開発した。D-AWS時は、排気ガス温度を上昇させるために吸気を絞り、最大で8段のマルチ噴射を行っている。D-AWS中のNOxはIDEVAで内部EGRを利用して抑制している。D-AWS採用でタールパイプHC/COが20~40%低減でき、触媒の貴金属量を前モデルより低減することができた。

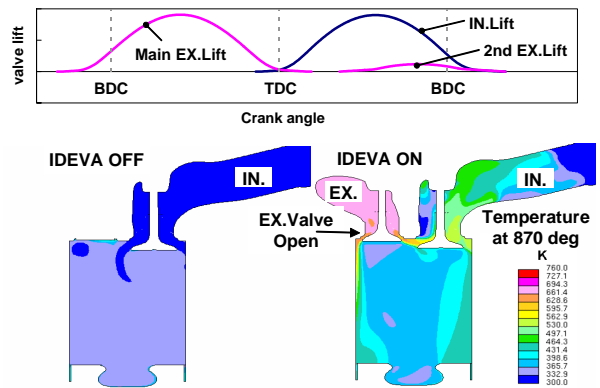


Fig.10 Rise of Temperature in Cylinder by IDEVA

6.2 極冷間の耐始動半失火性能

DEの圧縮比は年々低下傾向にあるが、低くなりすぎると高地極冷間のような環境下では必要十分な圧力・温度が確保できない。そのため、耐失火性能を確保する技術が必要となる。SKYACTIV-Dでは以下の技術により着火性能を向上した。

①多噴孔ノズルおよびピエゾインジェクタを活用した近接マルチパイロット噴射による可燃混合気増加、②2T/Cを活用した過給能力の向上、③セラミックグロー、④IDEVAによる残留ガス量の増加による筒内温度上昇 (Fig.10)。

これら着火安定技術により、低セタン燃料を使用して、極低外気かつ高地のような厳しい環境でも始動でき、安定した燃焼ができる。

6.3 後処理システムのコンパクト・低コスト化

(1) DPF 容量・貴金属量選定

近年ディーゼル車の後処理システムは、排出ガス規制強化に伴い大型・高コスト化しつつある。この後処理システムをコンパクトに仕上げかつ低コスト化を図ることが重要課題の一つに揚がっている。SKYACTIV-D では、理想に近づく燃焼の実現により NOx 触媒を不要にするだけでなく、世界最小レベルの DPF 容量とし、また貴金属の担持量についても前モデル比約 70%削減した。とくに DPF 容量低減にあたっては、容量を低減すると堆積できる煤の許容量が減少し再生頻度が増えることから、エンジンオイルへの燃料希釈量が過多になり場合によっては品質の不良につながってしまう。SKYACTIV-D では、前モデルに対して煤を高密度で収集し再生頻度を抑制する、また燃料希釈しにくい理想の再生燃焼を実現することで課題解決を図った。

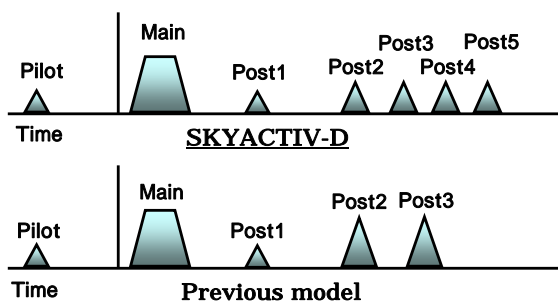


Fig.11 Multi-Pilot Injection Pattern of DPF Regeneration

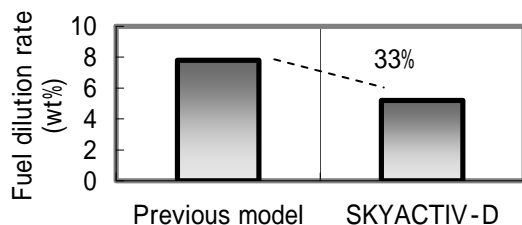


Fig.12 Fuel Dilution Rate Comparison

(2) DPF 再生時燃料噴射制御改良

DPF へ堆積した煤は、排気ガス温度を 600℃程度に昇温させ煤を再燃焼させる。この排気ガス温度昇温のために、ポスト噴射を実施するがポスト噴射は噴射時期が ATDC30deg 以降とピストンキャビティ外へ噴射するため、燃料の一部がシリンダライナ壁面へ付着しエンジンオイルへの燃料希釈が発生する。燃料希釈対策としてポスト噴射をピストンキャビティ内へ噴射する技術があるが、この場合ポスト噴射が主燃焼と干渉し排気ガス温度の異常上昇およびエンジントルクばらつき等が発生し実現は難しい。また、排気管へ専用の噴射インジェクタを追加するなどの技術があるがこのシステムは搭載性・コスト・排気インジェクタの耐久性等システムとして効率性に欠ける。そこで SKYACTIV-D では、壁面付着しないポスト噴射にて再生制御を行うことを理想に掲げ検討を行った。ポスト噴射の改良ポイントは噴霧のペネトレーションである。燃料噴射

インジェクタからシリンダライナへの到達距離よりポスト噴射時の噴霧ペネトレーションが短ければシリンダライナへの燃料付着量が抑制される。噴霧のペネトレーションは 1 噴射当りの噴射量および噴射圧で決まることからポスト噴射を多段化し 1 噴射当たりのポスト噴射量を少なくすることで燃料希釈は抑制可能である。SKYACTIV-D では、前モデル比ポスト噴射の更なる多段化を図りポスト噴射の段数を最大 5 段噴射 (Fig.11) とし前モデルに比べ燃料希釈を約 3 割低減した (Fig.12)。

7. まとめ

SKYACTIV-D は、理想の内燃機関へ近づけるために、世界一の低圧縮比をキーイネーブラとして従来の相反する技術課題をブレークスルーしていくことで、コスト低減しながら以下を実現した。

- ・ワイドレンジ高トルク化&機械抵抗を 26%低減
- ・TDC 燃焼による燃焼効率改善
- ・NOx 後処理なしで国内ポスト新長期規制&Euro6 適合
- ・20%の軽量化

SKYACTIV-D は走り、燃費、EM を高次元でバランスさせたユニットとして自信を持ってお客様に提供するものである。

参考文献

- (1) 旗生篤宏ほか:乗用車用新世代クリーンディーゼルエンジンの開発, 2012 年自技会春季大会, 20125188 (2012)
- (2) 金尚奎ほか:ディーゼル機関における燃焼室形状の改良による排気低減—EGG 燃焼室コンセプトの検証—, 第 21 回内燃機関シンポジウム, P.135-140
- (3) Sakono., et al. : Mazda SKYACTIV-D 2.2L Diesel Engine, AACHEN COLLOQUIUM 2011, p.943 (2011)
- (4) 中井英二ほか: 2002 年自技会春季大会, 20025154 (2002)
- (5) 中井英二ほか: 乗用車直噴ディーゼルエンジン New MZR-CD の紹介, マツダ技報, No.23, pp.98-103 (2005)
- (6) 上杉康範ほか: 新型 MZR-CD 2.2 エンジン の紹介, マツダ技報, No.27, pp.15-20 (2009)

■ 著 者 ■



森永 真一



詫間 修治



西村 博幸