

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

3

SKYACTIV-D の電子制御システム Electronic Control System for SKYACTIV-D

杉山 貴則 ^{*1} Takanori Sugiyama	丸本 真玄 ^{*2} Masaharu Marumoto	名越 匡宏 ^{*3} Masahiro Nagoshi
前川 耕太 ^{*4} Kota Maekawa	波多野 崇 ^{*5} Takashi Hatano	

要約

マツダの技術開発の長期ビジョンである「サステナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づいて、「走る歓び」と「優れた環境性能」を両立させた新世代クリーンディーゼル「SKYACTIV-D」を開発し、CX-5に搭載した。

自動車用量産ディーゼルエンジンとして世界一低い圧縮比(14.0)を採用し、高価な NOx 後処理システムなしで排出ガス規制をクリアし燃費を従来比約 20%向上した。また、2 ステージターボチャージャを採用し低速から高速までスムーズでリニアなレスポンスと力強い走りを実現した。

本稿ではこれらの目標達成のために新規に構築した SKYACTIV-D の電子制御システムの概要について述べるとともに高い制御精度を実現し、飛躍的な性能向上を可能とした燃焼 / 吸排気のシステムについて紹介する。

Summary

Based on the “Sustainable Zoom-Zoom” plan, detailing company’s long-term vision for technology development, the next generation clean diesel engine, SKYACTIV-D, was developed, which provides both “driving pleasure” and “excellent environmental performance”. The engine is installed in CX-5.

By achieving the world’s lowest compression ratio (14.0:1) as a mass production automotive diesel engine, global emissions regulations were cleared without expensive NOx aftertreatment, and the fuel efficiency was improved by 20 percent from that of conventional diesel engines. In addition, the new two-stage turbocharger realizes smooth and linear response from low to high engine speeds as well as powerful driving performance.

This paper describes the outline of the electronic control system of the SKYACTIV-D, which was newly constructed to achieve above mentioned goals, and the combustion and intake/exhaust systems that realize high control accuracy, enabling drastic improvement in the performance.

1. はじめに

マツダは、パワートレインの効率改善や車両軽量化などの「ベース技術」を徹底追求した上で、段階的に減速エネルギー回生システムやハイブリッドシステムなどの電気デバイスを導入して環境技術を進化させる「ビルディングブロック戦略」を進めている (Fig.1)。

SKYACTIV-D はこの戦略に沿って展開される新世代ク

リーンディーゼルであり、燃費・出力・エミッション性能を飛躍的に高めることを目標としている。

以下、SKYACTIV-D の開発目標と技術コンセプト、および、それを実現するために構築した制御技術について詳しく説明していく。

*1,3~6 パワートレインシステム開発部
PT System Development Dept.

*2 技術研究所
Technical Research Center

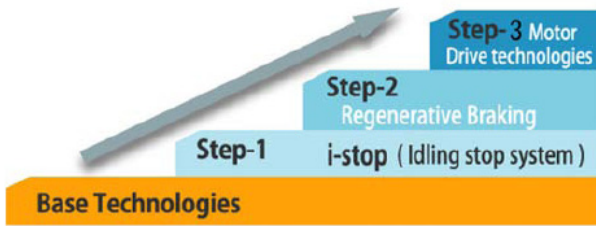


Fig.1 Building Block Strategy

2. SKYACTIV-D の開発目標

SKYACTIV-D では環境性能の追求だけではなく燃費 / エミッション / 出力 / 騒音・振動の各性能を高次元でバランスさせ、マツダらしい力強い走りを実現させることを目標とした。以下、具体的な各性能目標について述べる。

2.1 エミッション

大幅に強化される欧州の Euro6 / 国内のポスト新長期規制に適合させることはもちろん、燃費改善が進むガソリン車や低価格化が進むハイブリット車に対しても優位な商品競争力を持たせるため排出ガス規制対応のためのコストを低減することが必要不可欠である。

クリーンな燃焼によりエンジンより排出されるエミッションを低減し、コストアップにつながる尿素 SCR システムやリーン NO_x トラップ触媒といった NO_x 後処理システムなしでグローバルな排出ガス規制に適合することを目標とした。

2.2 燃費

一般的にガソリンエンジンに比べ燃費性能が良いとされているディーゼルエンジンであるが、近年の厳しい排出ガス規制に対応するため、高圧縮ディーゼルエンジン本来の高い熱効率が実現できていない。

SKYACTIV-D では従来の 16.0 ~ 18.0 という圧縮比に対し 14.0 という低圧縮比を採用し高膨張比燃焼と機械抵抗低減を実現し、更にアイドリングストップシステムも導入し従来比約 20% の燃費向上を図ることを目標とした。

2.3 走行性能

燃費やエミッションといった環境性能を高めるだけではなく、マツダの Zoom-Zoom な走り感を実現するため、ディーゼルエンジン特有の力強さの更なる向上 (MAX トルク 420Nm/2,000rpm) と、スムーズに高回転 (5,200rpm) まで伸びのある特性の実現を目標とした (Fig.2)。

加えて、ドライバの「意のままに」、アクセル操作に対して期待どおりの車両挙動(加速 G)で狙いの車速に到達する走りを目指した。

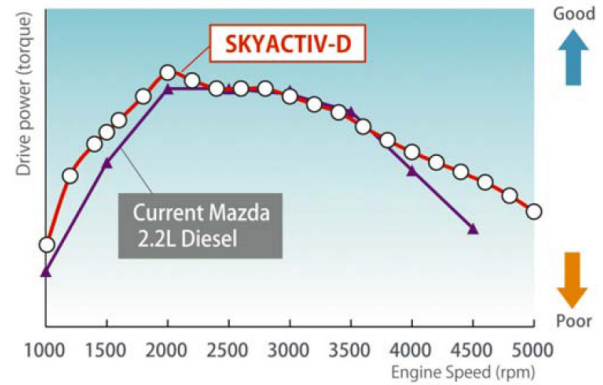


Fig.2 SKYACTIV-D Torque Improvement

3. SKYACTIV-D の制御システム

3.1 技術コンセプト

従来の高圧縮比ディーゼルエンジンでは、上死点における圧縮温度や圧力が非常に高くなるため、筒内に噴射された燃料は空気と十分に混合する前に着火し局所的で不均一な燃焼が起こり、高温化による NO_x 生成や酸素不足によるススの発生を招いてしまう。そのため、ピストンが上死点を超え筒内圧力と温度が低下してから低膨張比で燃焼させる必要があり燃費が悪化していた。

SKYACTIV-D では圧縮比を大幅に下げ上死点における筒内圧力と温度を低下させ、燃料と空気を混合する時間を稼ぎ均質燃焼させることを可能にした (Fig.3)。

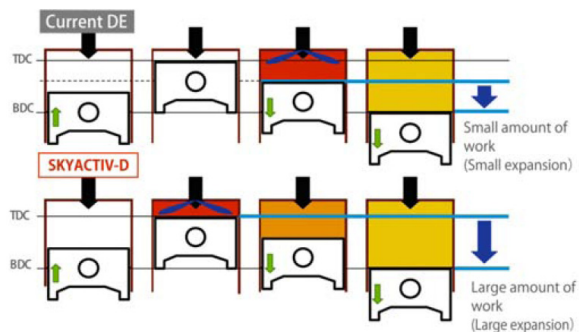


Fig.3 Higher Expansion Ratio Due to Lower Compression Ratio

その結果、NO_x・ススの発生を抑制しつつ、上死点付近から高膨張比で燃焼できるようになり燃費が向上した。更に EGR 率を高め燃焼温度を下げることで NO_x の低減を図り、NO_x 後処理システムなしで排出ガス規制に適合している。

また、2 ステージターボチャージャを採用し、少流量で効率よく過給できる高圧段小型ターボチャージャ (以下小ターボ) と大流量での高過給が可能な低圧段大型ターボチャージャ (以下大ターボ) を、それぞれ最適な運転領域で作動させることにより、低回転での高トルクと高回転における高出力を両立し、従来のディーゼルエンジンと比較しワイドレンジな運転領域、かつ全域での高いレスポンス性能を

実現している。また、高い EGR 率を満たしつつモスの発生を抑制し、加速時に要求される燃料を燃焼させるために必要となる余剰空気を確保している。

ドライバの「意のまま」の走りを実現するため、ドライバのアクセル操作に対して期待される目標加速度を推定し、そのときの車両状態を考慮し目標エンジントルク、目標燃料噴射量を決定する駆動力制御を採用した。

また、停車時の燃料消費量を最小限に抑えるため、ディーゼルエンジン乗用車としては国内初のアイドリングストップシステム (i-stop) を搭載した。

3.2 全体システム

Fig.4 に SKYACTIV-D の全体システムを示す。

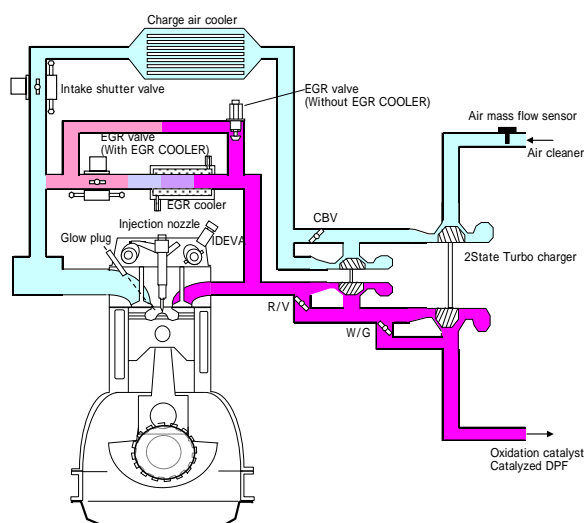


Fig.4 Fuel and Engine Control System

(1) 燃料噴射システム

最大噴射圧 197MPa のマルチホールピエゾインジェクタを採用することにより、従来のソレノイドインジェクタに対し噴霧粒径・噴射量・タイミング・段数・噴射インターバルの制御性を改善し、緻密な混合気形成を可能としている。

(2) 吸気システム

エアフロセンサにより吸入空気量を検出した後、2ステージターボチャージャの大ターボ・小ターボにより過給されインタークーラを介してインテークマニホールドに流入させる。

(3) 排気システム

排気ガスをインテークマニホールドに再循環し燃焼温度を下げることにより NO_x 発生を低減させる EGR 経路と、ターボチャージャ(タービン)を駆動し、酸化触媒・DPF にてススを処理した後、外部に排出する経路からなる。

EGR 経路では、2つのバルブを使用しホット EGR と EGR クーラを通過したクールド EGR の割合を適切にコントロールしている。また、インテークマニホールド上流のインテークシャッターバルブにより吸入空気量・EGR 量を

制御している。

(4) IDEVA (Intake stroke EGR using Double Exhaust Valve Actuation system)

排気バルブ二度開きによる吸気行程 EGR システムを採用し、吸入行程中に排気バルブを開くことにより高温の燃焼ガスをシリンダ内に逆流させ圧縮時の温度上昇を促進し着火を安定させている。

(5) グロー

耐久性に優れたセラミックグローと通電電流を調整するグローコントローラを採用し、始動時に急速昇温を行うことで、極冷間での始動時間を大幅に短縮させている。

3.3 車両制御との協調

PCM (Powertrain Control Module) は、TCM (Transmission Control Module) や DSC (Dynamic Stability Control) などの車両系制御モジュールと、CAN 信号によりエンジン・車両状態について相互に通信を行い、車両全体として整合の取れた制御を実現している。

以下、CX-5 で採用した走行性能・安全性能・燃費性能の向上のための各種制御について説明する。

(1) AT 協調制御

PCM はエンジン回転数や目標トルクなどの各種運転状態に加え、高精度に推定したエンジン発生トルクを TCM へ送信し、変速時には TCM の要求トルクを忠実に再現することにより新世代高効率 AT「SKYACTIV-DRIVE」でのなめらかな変速に貢献している。

(2) DSC

滑りやすい路面や危険回避の急ハンドル操作時などにも安定した走行姿勢を維持するために DSC から要求されるホイールトルクに対し、PCM は TCM から受信したギヤ比やトランスミッション伝達効率のほか、オルタネータやエアコンプレッサでのロストルクを推定し、目標エンジントルクを決定したのちエンジン制御をしている。

(3) i-stop

エンジンがアイドリングしている間の燃焼消費をなくし燃費を向上するシステムである。

PCM はハンドル舵角信号やドア・シートベルト等の情報をもとに、運転者の安全性を確保しエンジン休止、エンジン再始動を行う。また車両の電源を確保するためにバッテリーの状態を監視し確実なエンジン再始動を実現している。

以下、SKYACTIV-D 制御として、新規に開発した燃料噴射制御と吸気排気コントロールについて説明する。

3.4 燃料噴射制御

(1) 予混合燃焼の着火時期制御

SKYACTIV-D では低圧縮比と多量 EGR により、燃料と空気を十分に混ぜて均一に燃焼させる予混合燃焼を実現することで、不均一燃焼によって発生する NO_x とススの抑制を目指した。予混合燃焼では、従来の拡散燃焼のよう

に燃料を噴いて直ちに着火はせず、エンジンの吸気温度、圧力および EGR 量などの影響により、燃料を噴射してから着火するまでの時間が変化する (Fig.5)。また、着火時期によって NO_x、ススおよびエンジン出力 (燃費・音) などの各性能に影響を及ぼす (Fig.6)。

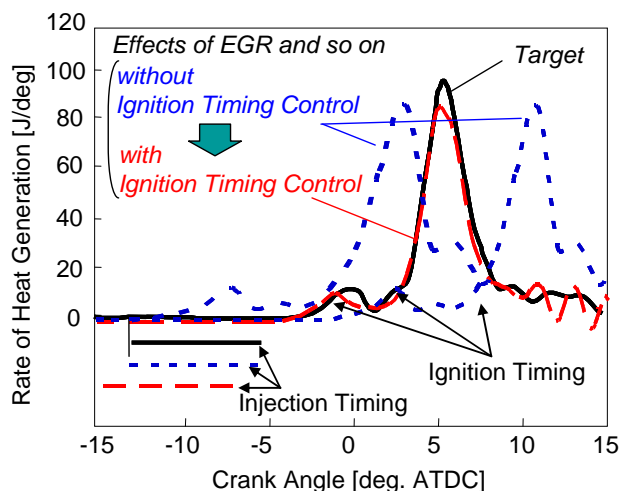


Fig.5 Ignition Timing of Premixed Combustion

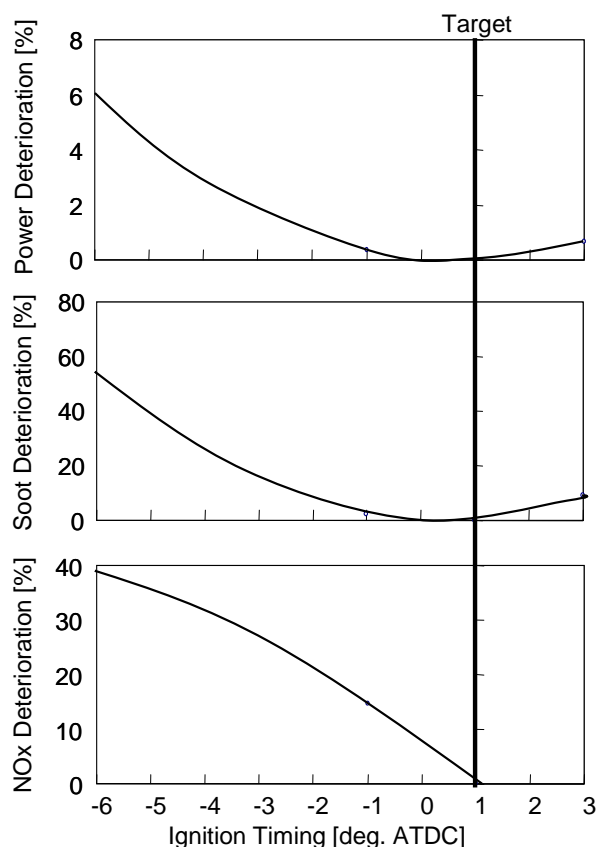


Fig.6 Performance of Ignition Timing

このため、予混合燃焼については、熱炎自着火発生時期の推定方法として知られている Livengood-Wu 積分式をベースにエンジンの吸気温度、圧力および EGR 量などの影響因子から着火時期を予測し、狙いの着火時期になるように噴射タイミングを最適に制御している。これにより、着

火時期の影響因子に対して NO_x、ススおよび燃費などのロバスト性を確保している。

(2) 拡散燃焼の燃料噴射制御

SKYACTIV-D では低圧縮比と多量 EGR により、ピストンの圧縮圧力や温度が下がるため、エンジンの吸気温度、圧力および EGR 量などの影響により、失火や半失火が生じてエンジンが不安定な状況が起きる可能性が高圧縮比エンジンと比べ高くなる。

このため、着火誘導期の前炎反応進行速度を表現する方法として、実験結果の回帰式を用いて、エンジンの吸気温度、圧力および EGR 量など着火に影響する因子から着火のしやすさを見積もる指標を設定し、確実に燃焼させるために必要な噴射回数、噴射量および噴射タイミングを最適に制御することで、耐失火性を確保した。

3.5 吸排気コントロール

(1) EGR 制御

EGR の制御方式として排気 λ 制御が一般的であるが、SKYACTIV-D ではシリンダ内の酸素濃度制御を採用している。

NO_x 排出量に高い相関がある筒内酸素濃度を制御することにより、排気 λ の変動や過給遅れに対しても NO_x 排出量をロバストに制御可能となる。また、筒内酸素濃度は予混合燃焼時の着火遅れ期間に対しても支配的であるため、着火タイミング制御にも貢献する。

一方、排気 λ と異なり、筒内酸素濃度のセンシングは非常に困難であるため、吸排気経路内ガスの酸素濃度をモデル化することにより筒内酸素濃度制御を実現している。

(2) 2 ステージターボチャージャ制御

Fig.7 に 2 ステージターボチャージャのシステム図を示す。排気側にはレギュレート・バルブ (以下、R/V)、ウェイストゲート・バルブ (以下、W/G) の 2 つのバルブを備えており、R/V を制御することで小タービンへの排気ガス流入量を、W/G で大タービンへの流入量を調整している。吸気側に配したコンプレッサ・バイパス・バルブ (以下、CBV) は、大コンプレッサで過給した新気を、小コンプレッサを介さずにシリンダへ吸気させる場合に開放する。これら 3 つのバルブを制御することにより、低回転軽負荷では小ターボを主体とした大小ターボ 2 段過給とし、高回転高負荷側では大ターボ単段過給へと切り替えを行っている (Fig.8)。

低回転軽負荷では全バルブを閉とし、大小 2 ステージ過給を行う。回転/負荷の上昇と排気エネルギーの上昇に応じて R/V を徐々に開けてゆき、過給圧の急激な低下を発生させないように CBV を開け、大ターボ単段過給へと切り替える。一方減速時、大ターボ単段過給から、大小 2 ステージ過給に切り替える場合には、CBV を閉じる前に R/V をわずかに閉じて小ターボを予回転させた後に CBV を閉じることで過給圧変動を抑制している。

また、酸化触媒への熱供給が要求される冷間の早期暖機制御時や DPF 再生制御時には、排気側の 2 つのバルブを開けてタービンをバイパスさせて排気ガスを流すことにより、効率よく酸化触媒への熱供給を行っている。

更に、EGR 量変化によるターボ運転状態の変動を抑えるため、EGR 量の変化に合わせてタービンに流入する排気エネルギー量が変動しないように R/V 開度の補正を行い EGR 制御との協調を行っている。

SKYACTIV-D では、大小ターボの過給状態をコンプレッサ特性マップおよびタービン特性マップに基づくモデルにより推定しながら制御することにより、ターボおよびエンジンの信頼性を確保しつつ、上述のような過給圧制御を実現した。

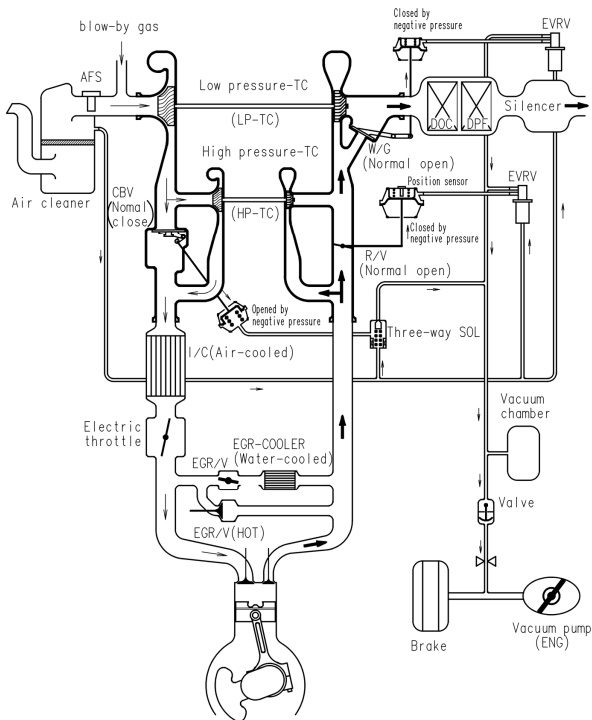


Fig.7 2stage Turbocharger System

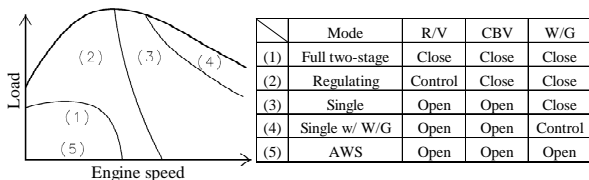


Fig.8 Two-Stage Turbocharger Operating Mode

4. おわりに

CX-5 に採用された SKYACTIV-D では、低圧縮燃焼コンセプトのもと冷間時の始動性や燃焼安定性が悪化するという低圧縮比ディーゼルエンジンの課題をハードウェアとソフトウェアの改良により解決し理想的な燃焼を追求することで、燃費・出力・EM を飛躍的に高めた新世代高効率クリーンディーゼルエンジンを実現できた。

今後もマツダのビルディングブロック戦略に沿ってベースエンジンの改良と電気デバイスの導入を進めていき、全てのお客様に走る喜びと優れた環境性能をお届けする“Zoom-Zoom”な車づくりを進化させていく。

著者



杉山 貴則



丸本 真玄



名越 匡宏



前川 耕太



波多野 崇