

特集：新型CX-9

5

## 新型CX-9の低圧燃料供給制御システムの制御技術 Low Pressure Fuel Supply System Control Technology for New CX-9

鈴木 健一郎\*1      櫻谷 幸弘\*2      田中 憲一郎\*3  
Kenichiro Suzuki    Yukihiro Sakuradani    Kenichiro Tanaka  
清水 功\*4          西森 洋生\*5          本郷 均\*6  
Isao Shimizu          Yosei Nishimori          Hitoshi Hongo

### 要 約

新型CX-9に搭載したERFS (Electronic Return-less Fuel System) は、2.5L直噴ターボエンジンの高圧燃料噴射システムに最適な燃料圧力 (燃圧) と燃料量を供給するための低圧燃料供給制御システムであり、最小限の投入エネルギーで効率的に燃料供給できる優れたシステムである。熱間始動時、燃料配管内に発生している燃料ベーパーを瞬時に圧縮し、液化させるために必要な高い燃圧、及びW.O.T. (Wide Open Throttle) 時に求められる大流量の燃料供給を両立させるために不可欠な低圧燃料供給制御システムの消費エネルギーの最小化の課題をシステムのハードウェア構成と制御ソフトウェアを新規に構築することで解決した。新型CX-9は、SKYACTIV-Gに適用してきた低圧燃料供給制御システムを進化させ、マツダのフラッグシップモデルに相応しい制御システムを搭載した。本稿では、新規開発した制御システムの技術について紹介する。

### Summary

ERFS (Electronic Return-less Fuel System) installed on the new CX-9 is a low pressure fuel supply control system which supplies the optimal fuel pressure and fuel quantity to the high pressure fuel injection system in the 2.5L turbo engine. The excellent system can efficiently carry out fuel supply with the minimum input energy. Minimization of energy consumption of the low pressure fuel supply control system, which is essential for satisfying both high pressure required for instantaneously compressing and liquefying vapor generated in a fuel pipe at hot start and high flow fuel supply required at W.O.T. (Wide Open Throttle), was achieved by developing a new system hardware configuration and a new control software. The new CX-9 is equipped with a control system that evolved from the low pressure fuel supply control system applied to SKYACTIV-G, which is appropriate for the Mazda's flagship model. This article introduces new technologies for the control system developed for the new CX-9.

## 1. はじめに

新型CX-9は、「走る歓び」を実現する強いトルクと「優れた環境性能」を実現する低燃費を高い次元で両立した。これには、新規に開発した燃料供給制御システムも貢献している。燃料供給制御システムは、低圧燃料供給制御システムと高圧燃料供給制御システムから構成される。前者の低圧燃料供給制御システムは、エンジンの高圧燃料噴射システムの燃料噴射圧と噴射量を実現するために低圧燃料配管内を最適な燃料圧力 (燃圧) に制御し、高圧燃料供

給制御システムに燃料を供給する。新型CX-9は、燃圧を最適に制御する技術を新規開発したことにより、省燃費性に加えて、車室内の静粛性や耐燃料ベーパーロック性なども大幅に改善した。本稿では、新規開発した低圧燃料供給制御システムを構成するハードウェア及びソフトウェアの機能について紹介する。

## 2. 開発の狙い

### 2.1 低圧燃料供給制御システムによる燃費改善

SKYACTIV-Gは、省燃費化を目的として、低圧燃料供

\*1~3 PT制御システム開発部  
PT Control System Development Dept.

\*5 走行・環境性能開発部  
Driveability & Environmental Performance Development Dept.

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

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

給制御システムの電源供給ラインにFPC (Fuel Pump Controller) を搭載し、燃料タンクに搭載されたFDM (Fuel Delivery Module) の構成部品である低圧燃料ポンプへの印加電圧をPWM (Pulse Width Modulation) コントロールして、エンジンの運転状態に応じた高圧燃料噴射システムが要求する燃料量を一定の燃圧で供給する制御システムを搭載した。この制御システムは、①バッテリーの電圧を直接、低圧燃料ポンプに印加するシステムや、②バッテリーの電圧をレジスターを介して、低圧燃料ポンプに印加する電源供給ラインとレジスターを介さない電源供給ラインの2系統を切り替えて制御するシステムに比べて消費電力を大幅に抑制し、CX-5、アテンザ、アクセラ、デミオなどの車両燃費の改善に貢献してきた。

## 2.2 低圧燃料供給制御システムの開発課題とその対応

新型CX-9は、2.5L直噴ターボエンジンを搭載し、CX-5等に搭載している2.5L直噴NA (Natural Aspiration) エンジンと比べて高出力化しているため、エンジンルーム内部の雰囲気温度が高い。そのため、エンジンルームにレイアウトされた低圧燃料配管の内部の燃料温度 (燃温) が高くなるため、低圧燃料配管内の燃圧を高めて燃料ベーパーの発生を抑制しなければならない。また、従来のNAエンジンでは、あらかじめ、低圧燃料配管内の燃温が最大となる条件で、低圧燃料配管内で燃料ベーパーを発生させないような燃圧を制御燃圧とし、FDM内の燃圧制御機構によって一定の燃圧に制御している。そのため、通常の運転では低圧燃料配管内の燃温に対して、過剰な高い燃圧で制御しており、低圧燃料ポンプは必要以上の仕事をしている。今回、従来のNAエンジンより高い燃圧が必要になったため、このいわば不必要な仕事は増大する。

一方、エンジンの高出力化に伴い、高圧燃料噴射システムの燃料噴射量要求が増加するため、NAエンジンよりも、大流量の燃料を供給する必要がある。

以上より、低圧燃料ポンプの燃料吐出能力を従来比大きく向上させることが必要となり、燃料ポンプの仕事量が増大することにより、NAエンジンよりも燃費・車室内静粛性を悪化させることになる。

今回、燃圧制御機構の構造を変更して、低圧燃料配管内の燃温に応じて、燃圧を最適制御できるようにすることで、低圧燃料供給制御システムにおける仕事量を大幅抑制し、課題を克服した。

## 3. 実現手段

新型CX-9は、MBD (Model Based Development) を導入して、低圧燃料供給制御システムを2.5L直噴ターボエンジン専用開発した。ここでは、その内容を紹介する。

## 3.1 ハードウェア

低圧燃料供給制御システムのハードウェア構成をFig. 1に示す。まず始めに、構成する主要部品の機能を説明する。①高圧燃料ポンプは、直噴インジェクターが高圧燃料噴射するために低圧燃料を高圧化する。また、低圧燃料流路の一部を構成する。②FDMは、燃料タンク内の燃料を濾過するとともに、所定燃圧に昇圧し、低圧燃料配管経由で高圧燃料ポンプに供給する。③FPCは、低圧燃料ポンプに印加する電圧を制御する。④センサーとして、低圧燃温センサーは、低圧燃料配管内の燃温を検出する。低圧燃圧センサーは、低圧燃料配管内の燃圧を検出する。⑤PCM (Powertrain Control Module) は、エンジンや車両の状態とセンサーの検出値から、低圧燃料供給制御システムへの要求燃料量と燃圧を設定し、それを実現するために必要なFDMへの印加電圧を演算する。更に、その演算結果をFPCに指示する。

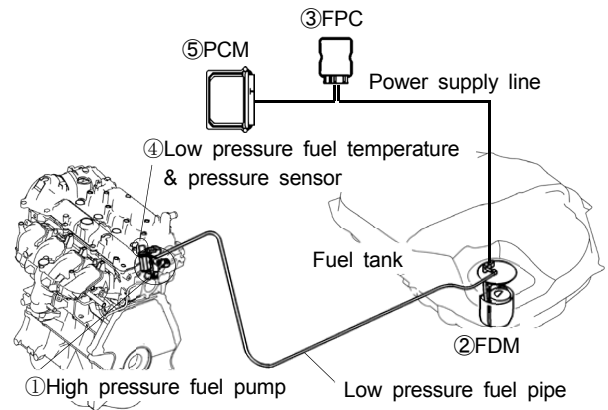


Fig. 1 Hardware Configuration of Low Pressure Fuel Supply Control System

### (1) 高圧燃料ポンプ

高圧燃料ポンプ (Fig. 2) は、エンジンに直付けされており、エンジンとの固体伝導により、熱を受けやすく、低圧燃料流路の中で最も高温になる部位である。従い、高圧燃料ポンプ内部の低圧燃料流路で燃料ベーパーが発生しないようにFDMで燃圧を供給する。つまり、高圧燃料ポンプ内部の低圧燃料流路の燃温がFDMで供給すべき燃圧を決めている。新型CX-9の開発では、新たに高圧燃料ポン

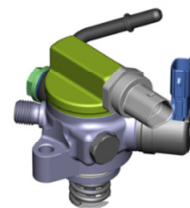


Fig. 2 High Pressure Fuel Pump

プ内の燃温推定モデルを構築した。高圧燃料ポンプ内の燃温は、高圧燃料ポンプ内に流入する燃料の温度と流入量、流出した燃料の温度と流出量および、高圧燃料ポンプ壁面からの受熱量で決まる。それぞれの入出力の関係は、Fig. 3に示す簡易熱移動モデルで表現できる。Fig. 3のモデルから、高圧燃料ポンプ内の燃温 $T_P$ を導いた。

$$T_P = \frac{Q_{P2}}{m_p} = \frac{Q_{P1} + Q_{in} - Q_{out} + Q_w}{m_p} \quad (1)$$

燃料タンクからの低温燃料が高圧燃料ポンプ内に多く流入すると、高圧燃料ポンプ内の燃温の低下速度が速くなる関係に着目して低圧燃料ポンプに要求される燃料吐出能力を検証した。

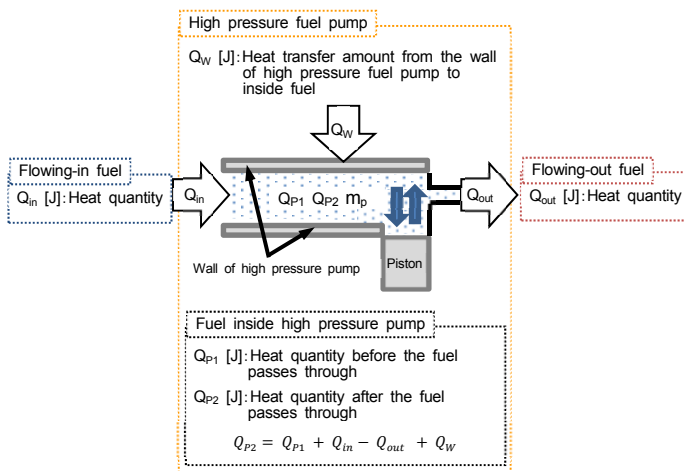


Fig. 3 The Model for Estimating the Temperature of Fuel in a High Pressure Fuel Pump

(2) FDM

新型CX-9は、燃圧と燃料量の可変制御に対応したFDMを専用設計した (Fig. 4)。ここでは、FDMを構成する低圧燃料ポンプと燃圧制御機構について紹介する。

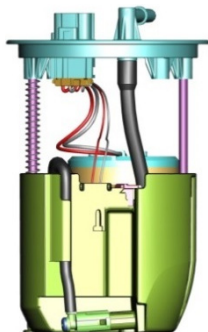


Fig. 4 FDM

a. 低圧燃料ポンプ

高圧燃料噴射システムの燃料噴射量要求と低圧燃圧要求から低圧燃料ポンプに必要な仕事量が決まる。この燃圧の

制約条件は、低圧燃料配管内で燃料ベーパーを発生させないことである。燃料噴射量ごとに、式(1)から高圧燃料ポンプ内の燃温を導出し、燃圧の制約条件を満足させる低圧燃料ポンプの要件を決定した。

NAエンジン用の低圧燃料供給制御システムは、制御燃圧を一定にしかできないので、エンジンの熱間始動時に要求される最大の燃圧を制御燃圧とし、その制御燃圧において、W.O.T. (Wide Open Throttle) 時の最大燃料噴射量を供給できる低圧燃料ポンプを設定する必要があり、低圧燃料ポンプの燃料吐出流量サイズが大型化する。

新型CX-9は、NAエンジン用の低圧燃料供給制御システムに対して、制御燃圧を一定とする制約を排除し、制御燃圧をリアルタイムで可変させたことにより、W.O.T.時の燃圧を低減し、低圧燃料ポンプの要求最大仕事量を抑制することができた。これにより、NAエンジンを搭載したCX-5やアテンザと同じ小型の低圧燃料ポンプの共用を可能とし、開発効率化にも大きく寄与した。

b. 燃圧制御機構

新型CX-9は、従来のNAエンジン用に採用してきた機械的な燃圧制御機構であるダイヤフラム式プレッシャーレギュレーターを廃止し、代わりにFDMの燃料流路に絞りを入れ、絞りを通過する燃料量を制御することで燃圧の可変制御を可能にした。

構造モデルを用いたCFD (Computational Fluid Dynamics) や燃圧制御機構を含むハードウェアシステムのプラントモデルと制御モデルを用いた燃圧制御性検証、タグチメソッドを用いたパラメータ設計により絞り形状を含む燃料流路の設計諸元検証を実施し、仕様の最適化を実施した。Fig. 5に燃料流路の絞り部のCFDの結果を示す。異常な乱流の発生はなく、ばらつきの少ない安定した調圧を可能とした。

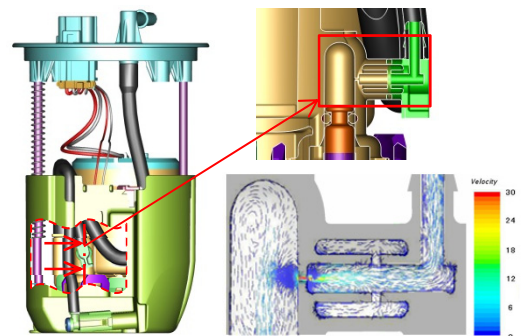


Fig. 5 Computational Fluid Dynamics of Orifice

(3) 低圧燃温センサー

低圧燃温センサーは、低圧燃料流路で最も温度が高くなり、燃料ベーパーが発生する高圧燃料ポンプに取り付けた。新型CX-9は、車載レイアウトや高圧燃料ポンプの構造により、高圧燃料ポンプ内でのセンサー測温部の配置場所

に制約があったため、高圧燃料ポンプの低圧燃料流路を分岐させ、センサー測温部を配置可能な場所まで燃料流路を延長させた。そのため、センサー測温部が分岐した燃料流路の袋小路部に配置される。ところが、袋小路部は燃料が滞留しやすく、FDMから供給される燃料タンクの比較的低温の燃料の影響を受けた主流の燃温より高い燃温を検出するため、最適な燃圧制御ができない。そこで、流れ解析モデルを用いてセンサー測温部に燃料流れを引き込むように構造を最適化した。Fig. 6に解析結果を示す。青色部は燃料よどみ部、赤色部は燃料流れが活発であることを示しており、改善後は測温部周辺において燃料よどみは発生していないことが分かる。その結果、主流と同等の燃温を検出できるようになり、低圧燃料供給制御システムの消費エネルギーの低減に貢献した。

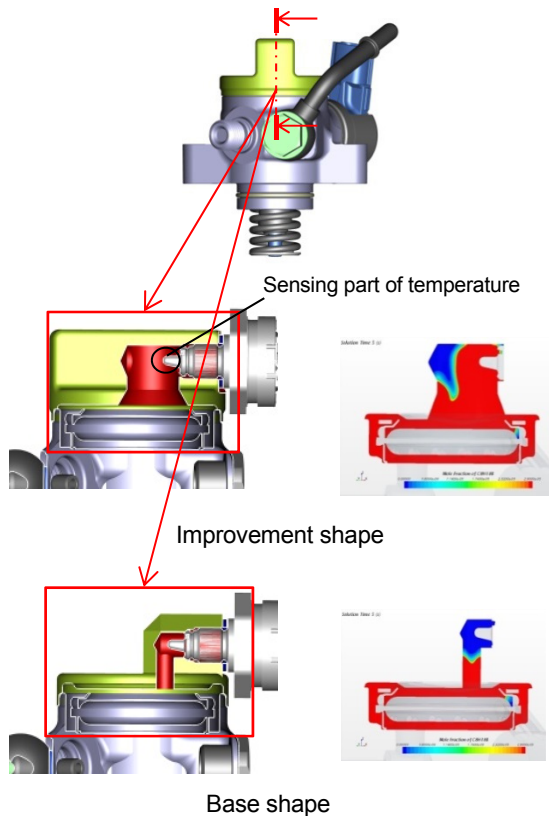


Fig. 6 Computational Fluid Dynamics of High Pressure Fuel Pump

3.2 ソフトウェア

低圧燃料供給制御システムの制御ソフトウェアのフローチャートを Fig. 7に示す。ここでは、制御の肝となる燃圧フィードバック制御と燃料ベーパー検出制御を取り上げて説明する。

(1) 燃圧のフィードバック制御

燃料の飽和蒸気圧特性より、燃温に応じた低圧燃料配管内で燃料ベーパーの発生を抑制できる最低限の燃圧を参照して、低圧燃料供給制御システムの制御コントローラー

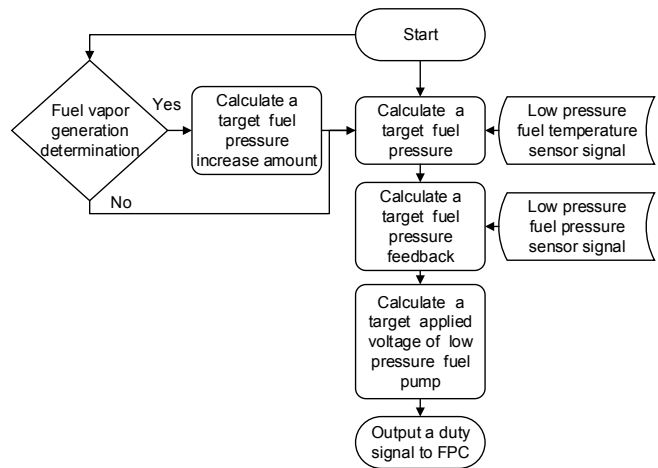


Fig. 7 Flowchart of Software

の目標値を設定した。さらに、この目標値と低圧燃圧センサーの出力値が一致するように燃圧をフィードバック制御することで制御精度を高めた。

制御コントローラーは、プラントモデルや実車にて制御性を検証し、フィードバック制御とフィードフォワード制御を組み合わせた。目標燃圧より低い燃圧では燃料ベーパーが発生するため、目標燃圧より実際の燃圧を低下させてはならない。外乱の影響に強く、確実に所定値以上の燃圧を応答よく出力させるフィードフォワード制御をベースとして、アンダーシュートさせないようにゲイン設定したフィードバック制御を組み合わせることにより、応答性と制御性を両立させた。

(2) 燃料ベーパーの検出と制御

低圧燃料配管内で燃料ベーパーが発生すると高圧燃料噴射システムが所定圧力の燃料を噴射できず、ドライバビリティの不調やエンジントールを引き起こしてしまうため、エンジン作動中はどのような状況下であれ、燃料ベーパーを発生させてはならない。マツダは、全世界の燃料性状を継続的に調査しており、世界中のどのような燃料に対しても、燃料ベーパーが発生しないような燃圧で制御している。しかし、市場状況は刻一刻と変化しており、マツダが想定していないような性状の燃料が流通する可能性もある。

新型CX-9は、そのような状況でも、各種センサー信号や制御状態から、いち早く燃料ベーパーの発生を検出して、システムが許容する範囲で燃料ベーパーの発生を抑制するよう燃圧制御することで、低圧燃料供給制御システムのロバスト性を向上させた。

#### 4. 低圧燃料供給制御システムの効果

最後に新型CX-9で達成した代表的な性能を紹介する。

##### 4.1 制御システムの消費電流

低圧燃料供給制御システムの消費電流を約40%低減することができ、オルタネータの発電負荷低減による省燃費化に貢献した。

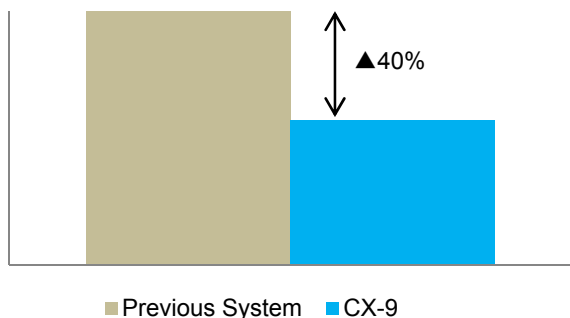


Fig. 8 Current Consumption of Low Pressure Fuel Supply Control System

##### 4.2 低圧燃料ポンプの信頼性

低圧燃料ポンプの仕事量を最適化したことにより、モーター部のブラシ摩耗量を約半減することができ、モーターの信頼性向上に大きく貢献した。

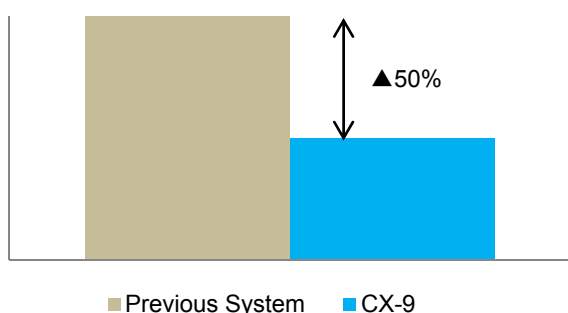


Fig. 9 Amount of Friction the Carbon Brush in Low Pressure Fuel Pump

##### 4.3 低圧燃料ポンプの作動音

低圧燃料ポンプは2列目のシート下の燃料タンク内に配置されており、燃料ポンプ内部のモーターの回転による振動が燃料タンク及びフロアパネルへ伝搬し、乗員に可聴ノイズとして認知されることがある。燃圧と燃料量を必要最小限に制御するためにモーターの回転数を抑制した結果、可聴ノイズの主因であるモーターの回転1次・2次振動を低減し、車室内の静粛性向上に貢献することができた。

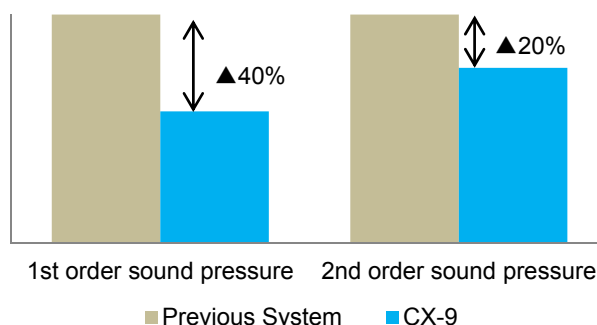


Fig. 10 Sound Pressure Inside the Vehicle Cabin

#### 5. おわりに

2.5L直噴ターボエンジンを搭載した新型CX-9は、可変燃圧に対応した低圧燃料供給制御システムを搭載した。低圧燃圧を可変制御することにより、要求に応じた最適な仕事ができるようになり、省燃費化、信頼性向上と車室内静粛性向上を実現した。今後更にMBDで重要となるプラントモデルの精度向上を進め、ハードウェアとソフトウェアの機能を進化させることで、システムのエネルギー効率を向上させ、「走る喜び」と「優れた環境性能」を高いレベルで両立する商品の実現に貢献していく所存である。

##### ■ 著 者 ■



鈴木 健一郎



櫻谷 幸弘



田中 憲一郎



清水 功



西森 洋生



本郷 均