

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

7

## SKYACTIV-G制御技術の紹介

### Introduction of SKYACTIV-G Control Technology

江 角 圭太郎\*<sup>1</sup> 佃 厚 典\*<sup>2</sup> 今 村 友 之\*<sup>3</sup>  
 Keitaro Ezumi Atsunori Tsukuda Tomoyuki Imamura  
 遠 藤 孝 次\*<sup>4</sup> 上 野 隆 司\*<sup>5</sup> 小 森 賢\*<sup>6</sup>  
 Kouji Endou Takashi Ueno Satoshi Komori

#### 要 約

デミオを皮切りにそれ以降の車種で搭載するSKYACTIV-Gの開発に当たり、常識を打ち破る機能／性能を実現するため、エンジン制御を基本から見直して一新した。

具体的には、ガソリン・エンジン制御の基本である吸排気制御／吸気量予測、DISIエンジンの噴射自由度を活用して最適な混合気を形成する燃料噴射制御、SKYACTIV-Gの特徴である超高圧縮比を使い切るための異常燃焼検出・抑制制御、燃費向上のための次世代i-stopバッテリーマネジメントシステムや燃費最適制御、および「走る喜び」を実現するための駆動力制御などである。

またこれらの制御技術を適切に動作させるための新しいPowertrain Control Module（以下PCM）階層構造を採用するとともに、モデルベース開発の実践を掲げて設計検証の充実を図った。

#### Summary

To develop SKYACTIV-G, which will be installed in Demio as its leading vehicle, conventional engine control was thoroughly reexamined and completely renewed to achieve functionality and performance beyond common knowledge.

Newly adopted technologies include intake / exhaust gas control and airflow prediction as it is the base of gasoline engine control, fuel injection control to optimize air mixture utilizing DISI engine's high flexibility in fuel injection, and abnormal combustion detection / containment control, which takes full advantage of super-high compression ratio that SKYACTIV-G supplies; furthermore, next generation i-stop battery management system and optimized fuel consumption control improve vehicle fuel economy while driving force control delivers "fun-to-drive."

In addition, new PCM hierarchy structure was adopted to properly operate those control technologies along with model-based development technology to enhance design verification.

#### 1. はじめに

マツダにおけるガソリン・エンジン制御の歴史は30年を越え、その間、走行性能や環境性能の向上を狙って年々進化してきたが、これに伴って制御も大規模化／複雑化し、マイコンのROM容量で表すとこの20年間で100倍と指数的に増大している（Fig.1）。

このような中、マツダ独自の「ビルディングブロック戦

略」および「内燃機関の3step進化構想」に則ったSKYACTIV-Gの開発に当たって、走行性能と環境性能を大幅に向上し、かつ将来の発展性を確保するため、エンジン制御もその構造から一新し、開発手法も変革することで、常識を打ち破る機能／性能を実現した。

本稿では、このSKYACTIV-G制御に織り込んだ制御技術や開発手法について紹介する。

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

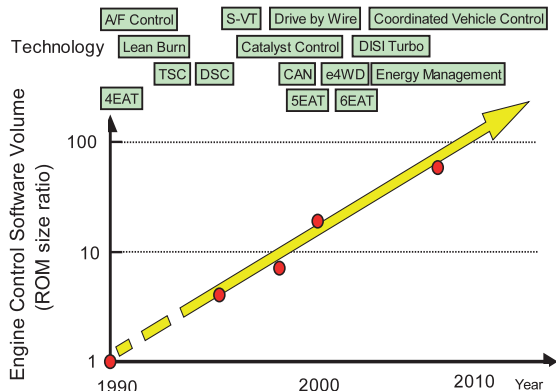


Fig.1 Enhancement of Engine Control

## 2. SKYACTIV-G制御技術

### 2.1 制御構造

SKYACTIV-Gでは、PCMにセンサやアクチュエータでそれぞれ約50系統（故障判定用信号含む）の信号入出力があり、更にTransmission Control Module (TCM) や Dynamic Stability Control System (DSC) などの車両系 Electronic Control Unit (ECU) 群との多数の通信情報が加わるため、車両やエンジンとして整合の取れた制御が行え、かつ効率的に開発するためには適切な構造を有することが必須である。

このため、まずアプリケーション層とプラットフォーム層に大別した上で、前者は更に車両としての挙動を制御する車両制御層と、エンジンの挙動を制御するエンジン制御層に分けた。

車両制御層とエンジン制御層の情報伝達はトルク信号に集約し、エンジン制御層内でその他の制約条件を満たしつつ所望のトルクを出力するように吸排気/燃料/点火制御を協調させた（トルクベース制御、Fig.2）。

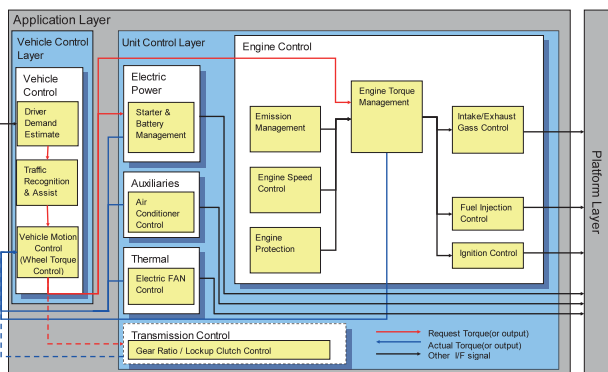


Fig.2 Engine Control Structure

また、後者のプラットフォーム層には、PCMハードウェアと接し、センサからの信号を物理量に変換する機能とアクチュエータを駆動する機能を置いた。

なお、それぞれの層に配置する制御機能群は、SKYACTIV-Gで新規に必要なものを含めて、従来

機種比約1/3に再編および統廃合して機能間の独立性を高め、複数の制御技術者による並行開発を可能にした。

### 2.2 制御技術

SKYACTIV-G制御として新規開発した以下の技術について述べる。

#### (1) 吸排気制御/吸気量推定

SKYACTIV-Gでは、吸気/排気S-VTとEGRを用いてエンジンを常に効率の良い状態に制御している（Fig.3）。

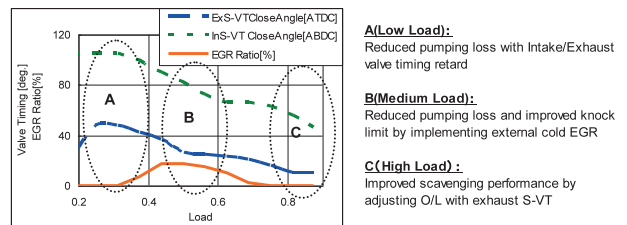


Fig.3 Optimized Intake/Exhaust Control Strategy

今回のシステムでは、EGRバルブ、吸気/排気S-VTの応答性がほぼ同等かつエレキスロットルがそれよりも速いことから、応答性の遅いデバイスにまず目標値を与え、それら目標値が入力されたときの各制御デバイスとエンジンの将来の状態をPCM内部のモデルで予測し、狙いの吸気量が実現できるようにスロットルで調整することで、目標値を精度よく実現しつつ、常にエンジンの効率が最適となる組み合わせを維持している。また、PCM内部の予測モデルをエンジンに装着している各センサを使ってフィードバック補正することで、モデルによる誤差や外乱に対するロバスト性を確保している（Fig.4）。

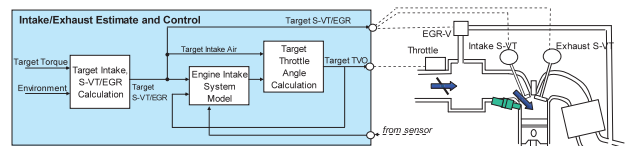


Fig.4 Intake/Exhaust Control Structure

#### (2) 燃料噴射制御

DISIは、筒内の吸気量が確定する吸気バルブを閉じた後でも燃料を筒内へ噴射することが可能である。急激な吸気量の変化等に対しても、圧縮行程で噴射量を調整することで、精度の高い空燃比制御や筒内の混合気温度の低減による耐ノッキング性能を改善した。

また、Fig.3でも述べた通り、吸気バルブ閉タイミングを遅くすることで燃費を改善しているが、吸気制御吸気バルブ閉タイミングが最も遅い状態（ABDC110deg）では、一旦シリンダへ吸入したガスの大半はインテークマニホールドへ吹き返される。吸気行程中に筒内へ噴射した燃料も、大半はインテークマニホールドへ吹き返されることになるため、この吹き返し量の変化によって空燃比が大きく変動してしまう。今回、吸気バルブタイミングや燃料噴射時期などから、燃料の吹き返し量を計算して噴射量を補正することで、空燃比制御性を向上した（Fig.5）。

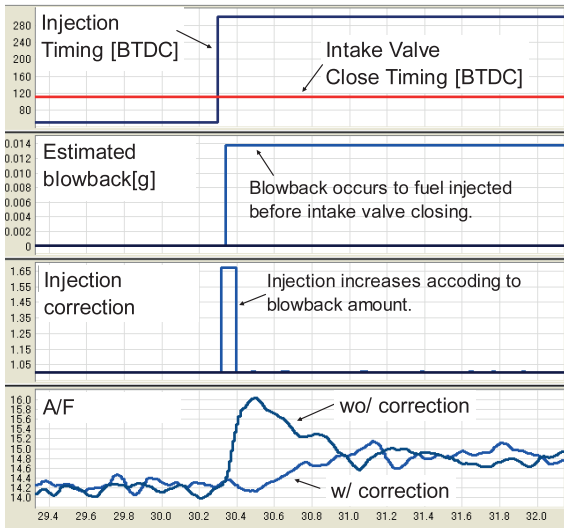


Fig.5 Behavior of Air-to-Fuel Ratio at Transient

(3) 異常燃焼検出・抑制制御

① 新デジタルノックコントロールシステム

高圧縮比エンジンでは、点火時期に対するノッキングの感度が高くなるため、微小なノッキングを検出して点火時期を制御する必要がある。SKYACTIV-Gでは、吸気/排気S-VTの採用や圧縮行程での高圧噴射のために、バルブ着座時やインジェクタの噴射開始/終了時の振動発生がノッキングの発生するタイミングと重なり、従来のノックウインドウを用いたノイズ分離ができない他、正常燃焼時の筒内圧刺激で発生するノッキングに近い振動も分離する必要があった (Fig.6)。

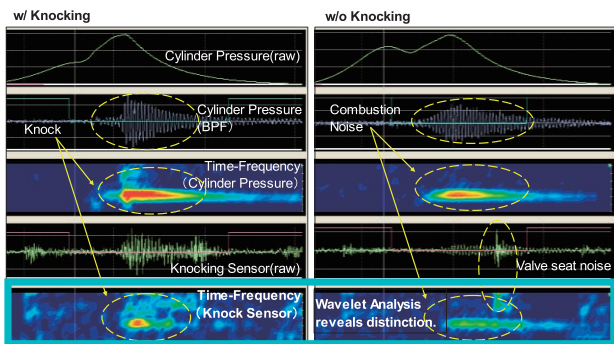


Fig.6 Wavelet Analysis of Knocking Signal and Noise

Fig.6の例のように、ノックセンサ信号を周波数軸、時間軸で解析すると各ノイズには特徴があることが分かる。

今回、高速でA/D変換可能なマイコンを採用することで、ノックセンサ信号をマイコン内で周波数と時間軸で解析してノイズを分離し、微小なノッキングを捉えることができた (制御ブロック図, Fig.7)。

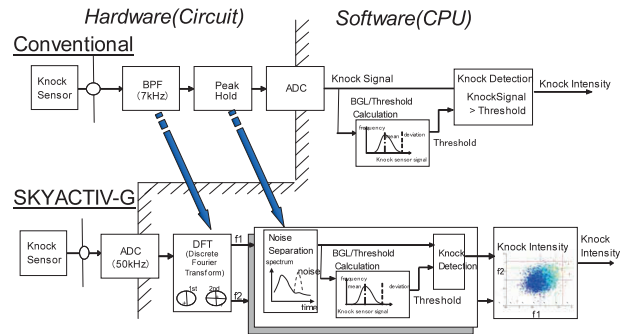


Fig.7 Knocking Control Strategy

② プリイグ抑制制御

低回転、高負荷で圧縮比を高くすると、プリイグ (圧縮自着火) が発生し、非常に大きなノッキング音が発生する。吸気S-VTを遅角させ有効圧縮比を下げることでプリイグは回避可能であるが、S-VTを遅角すると、一旦シリンダへ吸い込んだ吸気がインテークマニホールドへ押し戻されるため、充填量が低下しトルクが低下してしまう。このため、プリイグが発生しない限界までS-VTを進角させておく必要がある。

プリイグが発生する時期は、Livengood-Wu積分式で求める手法が知られており、SKYACTIV-Gでもこの予測式を用いてプリイグが発生しない有効圧縮比を求め、吸気S-VTを制御している。

しかし、プリイグ予測に必要な情報の内、湿度、オクタン価、燃焼室内へのデポジット堆積など、PCMでは直接知ることができない因子があり、実際のプリイグ限界より、S-VTを遅角側に設定する必要があった。今回、点火プラグに電圧を印加して燃焼で発生するイオンを検出し、燃焼開始時期を推定することで、プリイグが発生する予兆を捉えてS-VTを遅角し、プリイグを回避した (Fig.8)。

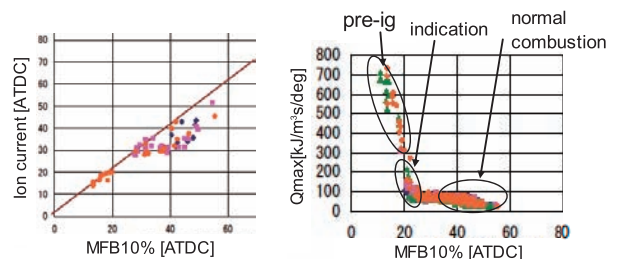


Fig.8 Correlation of Ion Current and MFB

(4) 次世代i-stopバッテリーマネジメント

バッテリーマネジメントについて詳細は本号別稿に譲るが、システムの進化に合わせて減速時のエネルギー回生量の増加、および後述の駆動力制御と協調させて違和感のない減速感を実現した。

i-stop機能については、従来Dレンジのみの動作であったものをNレンジやLレンジ、またSSモードでも動作させることでi-stop作動頻度を向上させるとともに、SKYACTIV-Gの特徴である吸気S-VTによる吸気弁超遅

閉じ機能を活用し、より滑らかな再始動とその際の燃料消費量の低減を図った (Fig.9)。

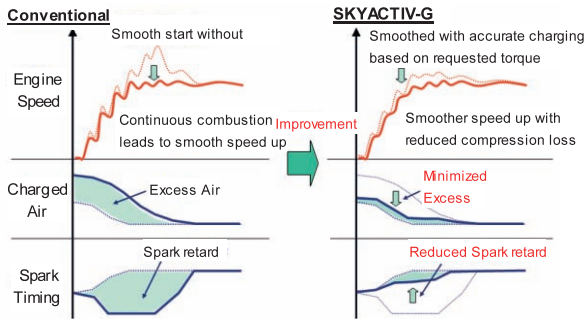


Fig.9 Comparison of Re-Start Behavior

(5) 駆動力制御

SKYACTIV-Gでは「意のままに」をスローガンに、アクセル操作に対してドライバーが期待する駆動力を実現することを上位目標として設定し、その駆動力を最も少ない燃料で実現することを目指した。

「意のまま」を実現するにあたり、Fig.10のようにドライバーのペダル操作～車両挙動までの一連のループの中に、目標加速度決定部とユニット目標決定部を配置し、理想の車両挙動を目標加速度として設定することで、エンジン、トランスミッションなどのユニット制御部と切り離して実現できる構成とした。

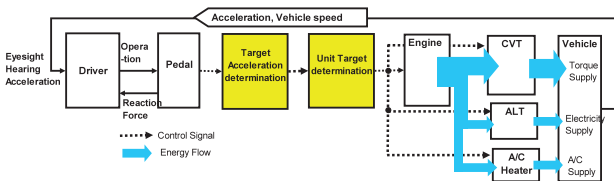


Fig.10 Driving Force Control

また、ユニット目標決定部では、必要な電力の供給と快適な冷暖房性能を実現しつつ、目標とする加速度を最小の燃料流量で実現するための、発電量、エアコンのコンプレッサ駆動/ヒーターへの熱エネルギー供給量、ギヤ比、およびエンジントルクを決定している (「燃費最適制御」, Fig.11)。

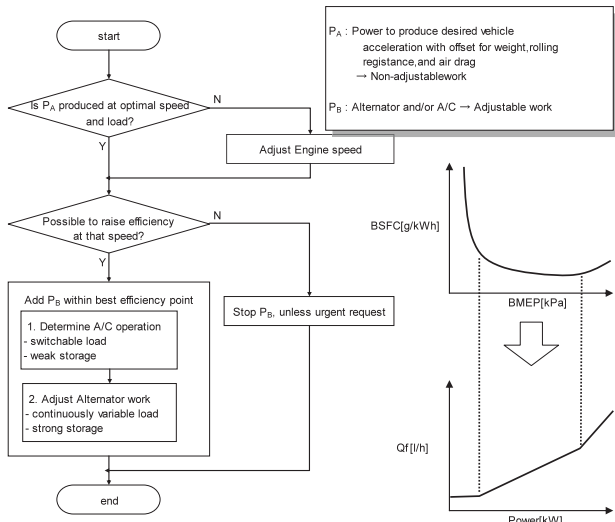


Fig.11 Flowchart of "Optimized Fuel Consumption Control"

Fig.12は、燃費最適制御有無の2仕様で同一ルートを行なったときの、エンジン領域使用頻度をバブルチャートで示したものである。本制御によって最も効率が良い領域 (太線部) を使った走行が実現できた。

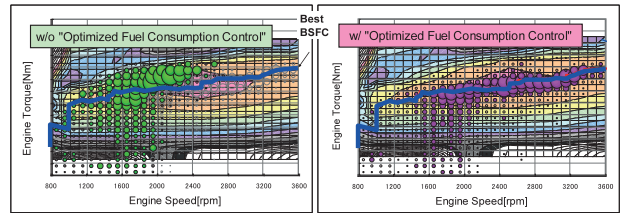


Fig.12 Result of "Optimized Fuel Consumption Control"

3. 開発手法

3.1 制御モデル

アプリケーション層の全制御機能およびプラットフォーム層の一部の制御機能については、ブロック線図表記と状態遷移図表記を併用し、前述の制御構造に沿って「制御モデル」として記述した。

これにより、機能単体およびPCM全体の両面で制御アルゴリズムの設計段階での検証が可能になった。

またほとんどの制御モデルについては自動コード生成技術が適用可能であり、迅速かつ高品質にPCMに実装でき、最終的に実車で検証/適合を行うまでの期間を劇的に短縮できた。

3.2 制御対象モデル

制御機能の検証のため、エンジンやセンサ/アクチュエータ、補機、トランスミッションおよび車両の走行抵抗等をモデル化した。

この内、エンジンのシリンダ内挙動についてはMBC (Model-Based Calibration) のために得た統計モデルを用い、その他は物理モデルとして組み合わせたハイブリッド構造にすることで、扱いやすさと精度の両立を図った (Fig.13)。

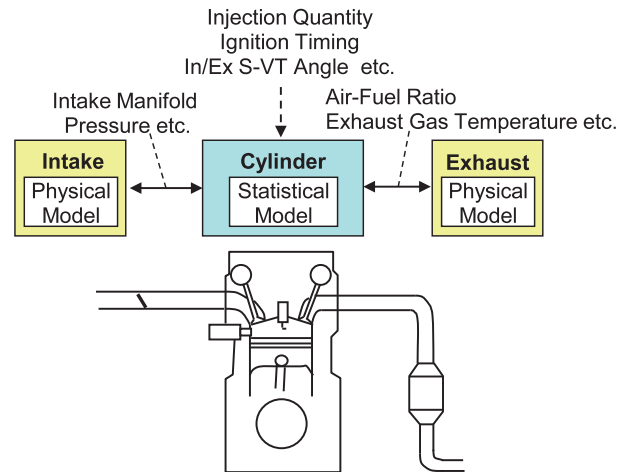


Fig.13 Plant Model Structure

また同一の制御対象モデルを、制御モデル設計段階ではMILS (Model-In-the-Loop Simulation) に組み込んで用い、その後、制御モデルをPCMに実装した段階ではHILS (Hardware-In-the-Loop Simulation) に組み込んで用いることで、設計開始から実車検証前まで、プロセスごとの検証が容易になった。

### 3.3 支援ツール

前述のモデル群を用いてより効率的に開発するため、下記の支援ツールを導入／開発した。

#### (1) 高速MILS

モデル編集機能を省いた、高速でシミュレーションできる環境。個別の制御モデル設計段階で、PCM全体での機能確認が短時間で行えるようになった (Fig.14)。

#### (2) 構成管理システム

モデル群のバージョン／派生管理システム。大規模化／並行開発に伴う作業ミスの防止と、モデル開発履歴の可視化が可能になった。

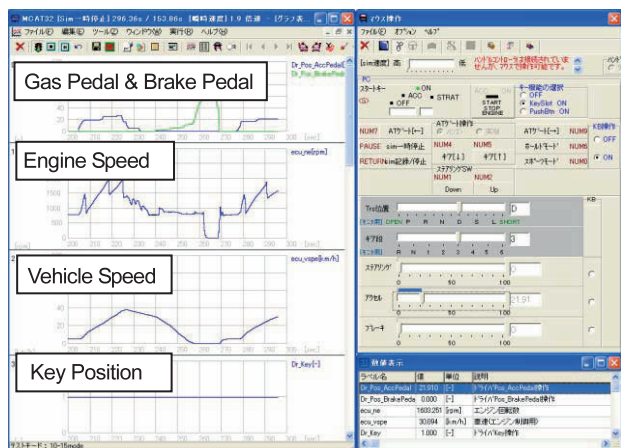


Fig.14 Screen-Shot of Hi-Speed MILS

## 4. おわりに

次世代パワートレインとしてのSKYACTIV-Gを完成させるため、エンジン制御を開発手法も含めて一新し、その搭載第1弾となるデミオでは、クラストップの10-15モード燃費30km/L達成に貢献するとともに、走りについてもアクセル操作に対してよりリニアで滑らかな車両挙動を実現した。

また、この開発を通じてエンジン制御のモデルベース開発ができるようになった。

引き続き、今後のマツダの内燃機関および商品の進化に貢献していきたい。

### ■ 著 者 ■



江角圭太郎



佃 厚典



今村友之



遠藤孝次



上野隆司



小森 賢