

# Aiming High



マツダは自動車開発における2つの大きな目標として「走る歓び」と「優れた環境性能」の両立を掲げ、2015年までにグローバルでの全車平均燃費を2008年レベルから30%向上する計画を進めています。目標達成に必要なすべての技術を高めるために、SKYACTIVプログラムを立ち上げ、車両の全領域で改良を進めてきました。dSPACE シミュレータとASM (Automotive Simulation Model)は、この目標達成に大きな役割を果たしています。



超高圧縮比(14:1)ガソリンエンジンを  
制御するための機能設計と検証

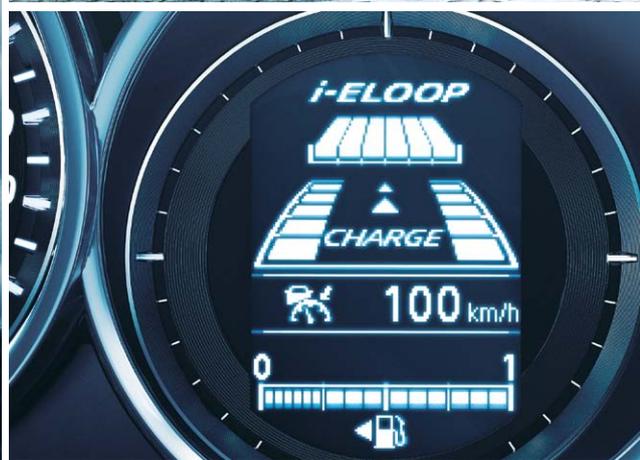




図1: ベース技術を徹底的に改善するSKYACTIVプログラム

#### エンジンの最適化

通常のエンジンでは、燃料エネルギーの70~80%が駆動力とならずに失われます。マツダはこの課題に挑戦し、超高圧縮比で理想的な燃焼に近づけることによって、燃焼効率の改善を目指します。2015年までに、グローバルでの全車平均燃費を2008年レベルから30%改善することが目

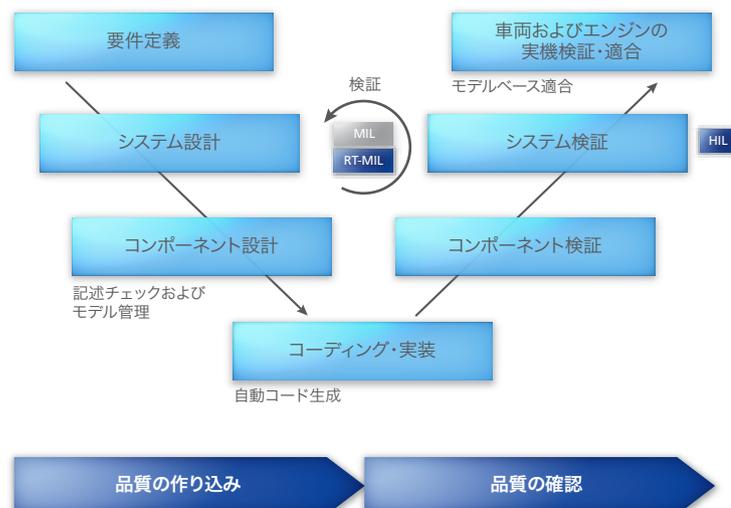
標です。これらの目標を達成すべく、ガソリンエンジンの最適化を進めるSKYACTIV-Gプログラムを立ち上げました。エンジン本体の改良だけでなく、i-stop (アイドリングストップシステム) やi-ELOOP (キャパシタを用いた減速エネルギー回収システム) などの環境技術もすべて含めて、燃費の向上を目指します。

#### エンジンマネージメントの最適化

高圧縮比により内燃機関の熱効率は大幅に改善されます。

現在の一般的なガソリンエンジンの圧縮比はおおむね10~12です。圧縮比を10から15に高めると、理論熱効率は約10%向上します。しかし、ノッキングが発生しやすくなり、熱損失が増加するため、これまで高

図2: 品質保証の鍵となるHILシミュレーションと早期の機能検証に新たな可能性をもたらすMILシミュレーション



圧縮比エンジンは実現化されてきませんでした。

ノッキングは空気／燃料混合気の一部が早期に着火する異常燃焼です。これは筒内の温度と圧力が高いほど発生しやすくなります。このため、エンジンを改善するには総合的なエンジンマネジメントが必要です。最適なエンジンマネジメントを実現するには、エンジンECUを一から見直して多くの新しい機能を追加する必要があります。ノッキングなどに対処するために、異常燃焼検知や異常燃焼抑制のための新しい制御機能が開発されました。これらの機能では、可変バルブタイミング (VVT) システムで吸気と排気を理想的に制御することが必要でした。

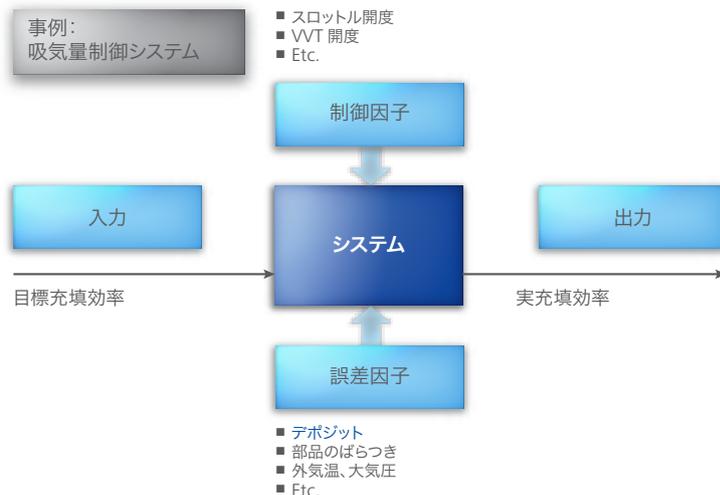


図3: エンジン吸気量への影響因子

#### 開発プロセスの最適化

開発対象の機能はますます複雑化するため、ソフトウェア開発プロセスも新しい開発要件に適合させる必要があります。このためマツダは、モデルベース開発手法へ完全に切り替えることを決めました。これには専用ツール、適切なプロセス、膨大なエンジニアリングノウハウを伴いますが、そのメリットはさまざまな領域で実証されています。

#### モデルベースによる機能開発と検証

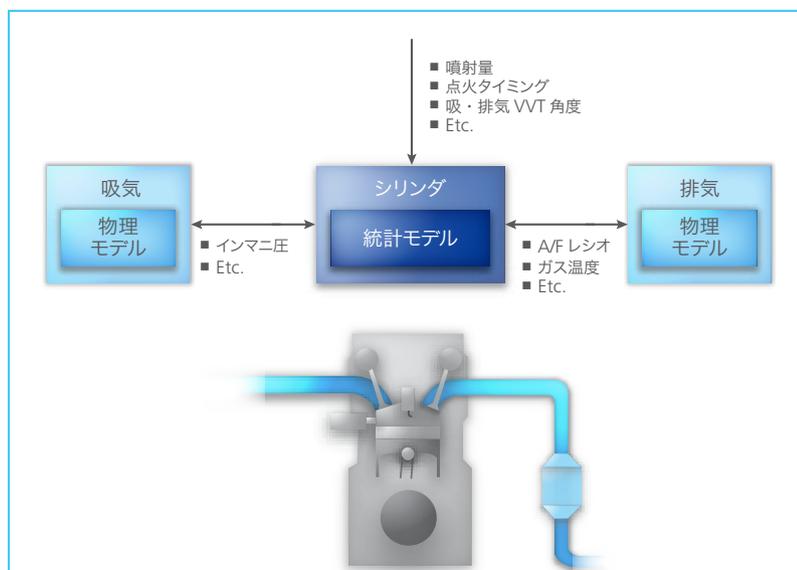
一般的なモデルベース開発における検証には、確立された手法が存在します。V字サイクルでは、各開発ステージに固有のテストフェーズが設定されています。これらのテスト手法には、HIL (Hardware-In-the-Loop) や MIL (Model-In-the-Loop) シ

ミュレーションなどが含まれます (図2)。SKYACTIVプログラムでは、HILとMILの両方を使用し、ASM (Automotive Simulation Model) を実装したdSPACE シミュレータも採用しました。シミュレータのポテンシャルは非常に高いため、テストのみならず機能の最適化にも活用可能です。

## 「dSPACEシステムをコントローラアルゴリズムの設計段階から使用することで、同じテストシナリオを開発プロセス全体を通して再利用できました」

マツダ株式会社、小森氏

図4: 物理モデルと統計モデルを組み合わせることで「扱い易さ」と「高精度」を両立したプラットフォームモデル



SKYACTIV-Gでは目的達成のため、明確なコンセプトとアプローチを設定しました。例えば品質工学的手法の適用です。このアプローチは機能に着目し、我々が制御できる「制御因子」と機能に影響するが制御できない「誤差因子」を正しく把握することで、機能の最適化を図る手法です。目標とする超高圧縮比を達成するには、吸気制御を改善する必要がありました。吸気量に対しては、スロットルバルブとVVTバルブの開度が主要な制御因子となります。しかし、誤差因子としてデポジット、部品ばらつき、外気温と大気圧の影響も明らかにして対処する必要があります (図3)。

## まとめと今後の展望

SKYACTIVプログラムでは、dSPACEシミュレータによるMILおよびHILシミュレーションを活用し、dSPACE ASM (Automotive Simulation Model) を使用することで、開発を迅速かつ効率的に立ち上げました。これらのテスト機器は、機能の最適化と検証用に使われています。エンジンECUや複雑な電気/電子 (E/E) システムネットワークなどの個々の機能を高め、それらの検証を網羅的に実施することができました。HILテストの特徴的なメリットは、再現可能なテストを自動化できることです。導入当初には早い段階でのテストによる効率化を期待していましたが、HIL・MIL両方を活用する中でテストの再利用は更なる効率化に大きな可能性を持つことがわかりました。この手法の有効性は、超高圧縮比を誇るSKYACTIV-Gガソリンエンジンの成果を採用したCX-5やMazda6 (アテンザ) などの新機種で実証されました。将来の開発に向けて、開発プロセスとテストシステムをさらに最適化し拡張する予定です。これらは高度化する今後のE/Eシステム開発に不可欠であることは明らかであり、開発プロセスにおいて更なる役割を担うことになるでしょう。

図5: SKYACTIV-G ECUのテストベンチ

### HILによる機能分析と最適化

機能分析と最適化におけるHILシミュレーションの有効性を示す一例として、誤差因子であるデポジットの影響分析が挙げられます。デポジットは燃焼残留物によってバルブおよびバルブシート上に形成され、ガスの流れを阻害します。デポジットは低バルブ開度での流量特性に大きく影響します。HILシミュレータを導入する以前の機能開発では、影響分析に実機を使用したため、部品と車両の準備に相応の時間・コストがかかりました。HILシミュレーションを導入して以来、このような分析はシミュレーションで実施できるようになりました。使用したプラントモデルは、バルブを通過するガスの質量流量と燃焼プロセスを高精度にシミュレートするもので、これにデポジットの機能を追加・統合し、その影響が考慮できるようにしました(図4)。これらにより、各種の分析を実施

して機能の最適化を適切に進めることが可能となります。

また、必要に応じてテストを自動化することもできます。デポジットの事例ではHILシミュレータの使用により、従来アプローチに比べて8倍の効率化が示されました。部品のばらつきや摩耗などの誤差因子の影響分析をする機能検証をさらに拡大していくことで、2500時間の削減効果が期待できます。加えて、HILシミュレータはコントローラの意図しない挙動を発見して潜在的問題を排除する上でも役立ちました。

### リアルタイムMILによるプロセスの最適化

もう一つのテスト手法であるリアルタイムMILは、シミュレーションがもたらす柔軟性とテスト能力を明確に示してくれました。リアルタイムMILは、一般的なMILにリアルタイム性をもたせたシミュレーシ

図6: リアルタイムMILシミュレーションを実行するワークステーション





「SKYACTIV-Gは、開発スピードという点でもチャレンジングでしたが、そのチャレンジを可能にしたモデルベース開発をdSPACE製品・サービスが強力にサポートしてくれました」

マツダ株式会社、彌生 氏

ンで、dSPACE のシミュレータ上でプラントモデルとコントローラモデルの両方が閉ループを形成しリアルタイムに動作するものです(図6)。リアルタイム能力は必然的にプロセッサの処理能力に依存します。本プロジェクトでは、DS1006 Quad-Core Processor Boardを使用しました。dSPACE の製品を標準として共通に使用することのメリットの1つは、テストケースをHILとMIL間で再利用できる点です。テストケースの再利用を有効活用できた一つの例としては、実車で起こった問題を迅速に解決できたことがあります。具体的には、まず実車により近いHIL環境で問題のメカニズムを究明し対応策を検討する。次にこの対応策を制御モデルに反映し、その効果・弊害をMIL環境で確認しました。この時、HILで作成済のテストケースを再利用することで一連の確認プロセスを効率的に進めることができました。現在は実車での不具合発見が減るように、V字プロセスの左バンクでMILをより有効活用できるよう進めています。今後、更にSKYACTIVテクノロジーを進化させるために、我々はdSPACE製品とともにモデルベース開発の更なる進化を目指します。■

マツダ株式会社  
小森賢  
彌生啓介

#### 小森賢

マツダ株式会社  
パワートレイン開発本部  
パワートレインシステム開発部  
PT制御システム設計グループ  
アシスタントマネージャー



#### 彌生啓介

マツダ株式会社  
パワートレイン開発本部  
パワートレインシステム開発部  
PT制御システム設計グループ  
シニアスタッフ



#### マツダの開発チーム

SKYACTIV制御システムの開発を担当したマツダのHIL MILチームメンバー左から右：寺岡陽一、土井康弘、彌生啓介、小森賢、三吉拓郎

