

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

11

## “i-ELOOP”制御系開発における机上環境の進化 Evolution of the Virtual Environment in the Development of “i-ELOOP” Control System

柴田 敏治\*<sup>1</sup>  
Toshiharu Shibata  
上野 隆司\*<sup>4</sup>  
Takashi Ueno

小森 賢\*<sup>2</sup>  
Satoshi Komori  
小谷 和也\*<sup>5</sup>  
Kazuya Kotani

彌生 啓介\*<sup>3</sup>  
Keisuke Yayoi  
亀井 裕介\*<sup>6</sup>  
Yusuke Kamei

### 要約

新型アテンザでは、マツダ独自の減速エネルギー回生技術である「i-ELOOP」を搭載した。これは社会からの要求の高い燃費向上技術であるが、この要求にタイムリーに応えるためには、より短期間での開発が必要であった。そこでモデルベース開発を全面的に採用し、各段階で活用可能な仮想開発環境を構築した。これによって、実車試作までに机上でシステム検証を終え、更に適合までも机上にて実施することができた。

### Summary

All-new ATENZA is equipped with Mazda-unique regenerative braking system, “i-ELOOP.” The fuel-saving technology was much demanded from society. To respond to the demand in a timely manner, a model-based development approach was applied overall, in which virtual development environments available in each process were established. As a result, calibration works as well as system verifications were completed with the computer before a prototype vehicle was actually built.

### 1. はじめに

環境意識の高まりから燃費向上への期待はますます大きくなってきている。マツダでは、この期待に応えるために、まず優先的に内燃機関などの「ベース技術」を改良した上で、段階的に電気デバイスを追加していく“ビルディングブロック戦略”を掲げて技術開発を行っている<sup>(1)</sup> (Fig.1)。

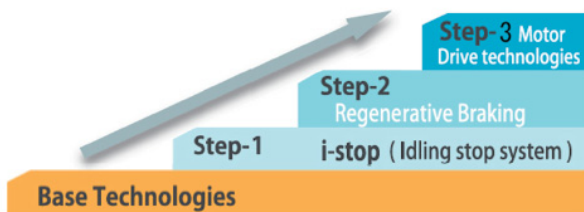


Fig.1 Building Block Strategy

今回、新型アテンザでは、ビルディングブロック構想の Step-2 として、減速エネルギー回生システムである「i-ELOOP」を搭載した。「i-ELOOP」によって、減速エネルギーを電力として効率良く回生・蓄電・活用することがで

き、大幅なコストアップなく約 10%の実用燃費低減効果が期待できる。しかしながら、この機能を実現するためには、従来以上に複雑化した電気回路を高頻度かつ緻密に切り替えながら、発電トルクや電流の大きさおよびエネルギーの流れを適切に制御する必要がある。

そこで、この新技術を開発するにあたり、効率的な設計・検証を行う手法であるモデルベース開発 (MBD) を全面的に採用した。これにより開発初期から実車検証に至るまでの各段階で設計・検証のサイクルを充実させ、試作車の完成前に、机上でシステム検証や適合まで実施できた。

本稿では、「i-ELOOP」の開発で活用した仮想開発環境について紹介する。

### 2. 「i-ELOOP」について

「i-ELOOP」とは、乗用車として世界で初めて蓄電器にキャパシタを用いることで、減速時のエネルギー蓄積量の増加と、充放電速度を向上させたマツダ独自の減速エネルギー回生システムである。このシステムは、主要デバイスと

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

して可変電圧オルタネータ・DC-DC コンバータ・キャパシタ・バッテリーから構成される (Fig.2)。

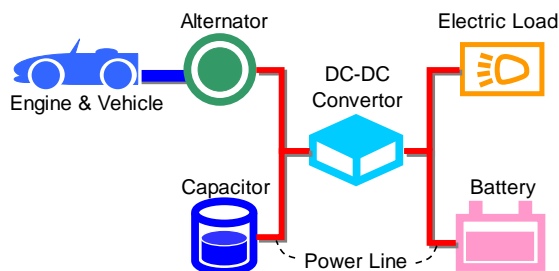


Fig.2 System of i-ELOOP

「i-ELOOP」は、エアコンやオーディオなど、走行中の車両に必要な電力をほぼ減速回生エネルギーで賄うだけでなく、アイドリングストップ技術「i-stop<sup>(2)</sup>」と組み合わせで適切な充放電コントロールを行うことにより、アイドリングの停止時間を延長し、相乗的な燃費低減効果を発揮する。

この相乗効果を十分に引き出すべく、エンジンが停止して発電できないアイドリングストップ中に、蓄電したキャパシタから消費分の電力を供給する必要がある。このため、アイドリングストップに入る前にはできるだけキャパシタを満杯に充電しておきたい。一方で、減速時に多くのエネルギーを回生するには、事前にできるだけキャパシタを空にしておきたい。これらの相反する要件を満たし、時々刻々と変化する走行状態に応じて各デバイスを適切な状態に保てるような、緻密なエネルギーフロー制御を行っている。

### 3. 仮想開発環境について

#### 3.1 全体概要

自動車の制御系開発で採用されている V 字型の開発プロセスにおいて、下流の検証段階で不具合が発覚した場合には大きな手戻りにつながる。手戻りを最小化するには、各段階において検証サイクルをまわす必要があり、今回複雑なシステムを短期間で開発するために、MBD を最大限活用した (Fig.3)。

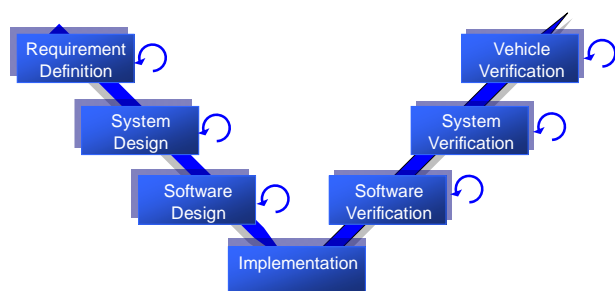


Fig.3 V-Process in MBD

これまでもSKYACTIV-G開発においてMBDを実践し、仮想開発環境を構築・活用してきた<sup>(3)</sup>。例えば制御ソ

フトウェア設計段階でMILS (Model In the Loop Simulation) 環境や、制御ソフトウェア検証段階でのHILS (Hardware In the Loop Simulation) 環境を構築し開発効率化を図ってきた。

「i-ELOOP」の開発においても、これらの MILS・HILS 環境を活用しつつ、更に仮想開発環境を充実させた。その結果、従来以上に多くの開発項目をこれまでにない短時間で完了し、高品質なシステムとして「i-ELOOP」を完成させることができた。

以下では、今回新たに充実させた、システム設計・システム検証における仮想開発環境と、一部机上で完了することができた適合について記す。

#### 3.2 システム設計段階での仮想開発環境

システム設計とは、プロセスの上流にて定義された要件を満足するためのシステムを検討する段階である。

本開発においては、燃費目標を達成するシステム構成とエネルギーフロー制御のコンセプトを構築し、回路構成や各デバイスの仕様を決定する必要がある。また、よりロバストなシステムとするために、お客様の様々な使い方のデータから実用上のシーンや使用頻度などを分析し、個々の加減速の大きさや頻度、停車時間などを加味して最適なシステムとする必要がある。

ここで求められる仮想開発環境の要件は、燃費を含む車両全体のエネルギーフローを高速で解析できることである。そこでマツダ社内で開発・運用している、燃費検討用モデル<sup>(4)</sup>をベースとして仮想開発環境を構築した (Fig.4)。

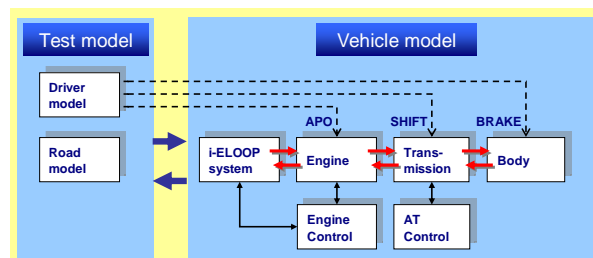


Fig.4 Framework of Virtual Testing Model

利用したモデルは、エンジンやトランスミッション、車両など走行に関わる主要な要素を含む仮想車両モデルであり、機械系および電気系のエネルギー収支を短時間で計算できるよう簡素に構築した。これにより動的に変化するエネルギーフローを可視化しながら、お客様の走行シーンを網羅的に検討することができ、燃費に大きく影響する回生・蓄電・活用の推移を解析し、効率的なエネルギーフローを検討した。

デバイス容量を大きくすればするほど、より多くのエネルギーを扱うことができ、より多くの走行シーンに対応できるようになるが、重量およびコストが増大してしまう。また、エネルギーをどのタイミングでどのデバイスに配分するか、という制御の方法においても回生エネルギーは増減する。

これらを踏まえて燃費効果・重量・コストのバランスから最も効率的なエネルギーフローを検討し、最適な回路構成および過不足ないデバイス容量を決定し、最小限のサイズおよびコストで最大限の燃費効果を実現する仕様を決定できた。

3.3 システム検証段階での仮想開発環境

システム検証とは、設計した機能が実現できているかを確認し、実用上の品質確認を行いロバスト性を検証する段階である。「i-ELOOP」においてはエネルギーフローを確認し、各デバイスの動作およびロバスト性について検証する必要がある。

特に設計段階とのギャップが出やすい領域、例えば極高温や劣化によるデバイス性能の急激な変化については、十分な動作確認が必要である。しかし、この領域は関わる因子が多く、再現のための技術的な難易度が高い。そこで、精度よく再現しつつ品質検証を短期間で行うために、キャパシタやバッテリーといったデバイスの実部品を活用し、「電気デバイス HILS」と呼ぶ HILS 環境を構築した (Fig.5,6)。

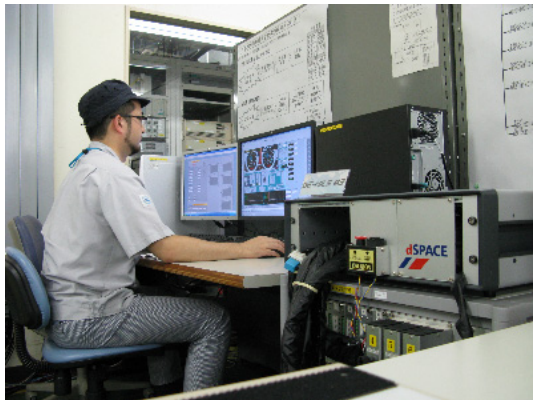


Fig.5 Operation Room for HILS

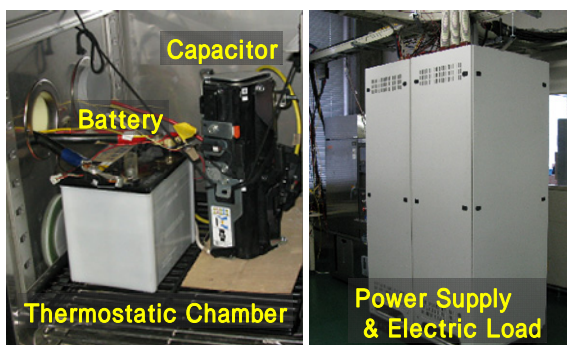


Fig.6 Experimental Equipment of HILS

電気デバイス HILS では、キャパシタ・バッテリー・DC-DC コンバータ・PCM について実部品を使用し、その他の要素はモデルや装置で置き換えて演算する (Fig.7)。

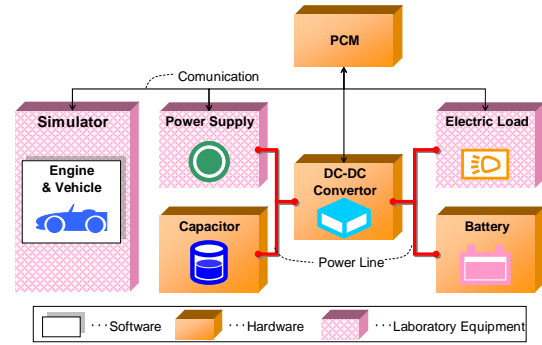


Fig.7 Framework of HILS

オルタネータの発電量の演算はシミュレータ上でを行い、この情報が電源装置に伝えられて狙いの電流が発生する。電源装置から発生したオルタネータ発電相当の電流はキャパシタに蓄電され、一部は DC-DC コンバータを介して、変圧後にバッテリー系統へと供給される。ここでの変圧は、DC-DC コンバータに内蔵されたコントローラが制御する。また、お客様の操作によって変化するオーディオなどの電気負荷は、消費電流としてシミュレータ上で演算し、この情報を電気負荷装置へと伝え、演算量と同じになるように電流が消費される。このように、電流・電圧を伴った実回路としての状態を動作させることで、「i-ELOOP」における回生・蓄電・活用を再現させた。

従来、デバイスを組み合わせたトータルシステムとしての動作は、実車に搭載して確認を行っていたが、今回電気デバイス HILS を用いることで、温度や劣化による性能の急変やフェイルといった領域についても、机上で検証することができた。

テストでは、まず設計段階に想定したエネルギーフローを実際の電圧・電流として再現させ、時系列での動作確認を行った。次に、劣化状態にあるデバイスと交換することで長期使用を模擬したり、物理的な断線・短絡によるフェイル処理などを発生させたりして、想定した異常状態におけるシステムの動作確認を行った。更にロバスト検証として、様々な条件を想定した意地悪テストを行い、極端な温度条件での挙動や、異常な高電圧下における破損に至るまでの推移などを確認し、試作車への搭載までに対策を打つことができた。

以上のようなステップを踏んで検証を実施していくことで、机上においてシステムのロバスト性までも十分に確認することができた。

#### 4. 仮想開発環境での検証結果

電気デバイス HILS と実車との比較結果を以下に示す (Fig.8)。

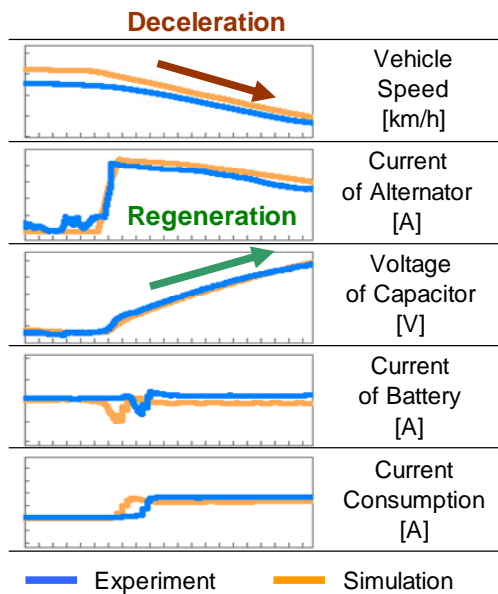


Fig.8 Comparison of Test Results

電気デバイス HILS は、減速時のオルタネータの回生電流、蓄電されていくキャパシタの電圧、バッテリーへ供給される電流および消費電流といった推移を、机上において精度よく実現できている。

これにより、実車を試作する前に、様々な環境で十分な精度を持った検証を行うことができ、「i-ELOOP」に関わるほとんどの制御適合定数もセッティングすることができた (Fig.9)。

結果として、時間のかかる実車でのセッティングを省くことが可能となり、大きな手戻りなく短期間に開発することができた。

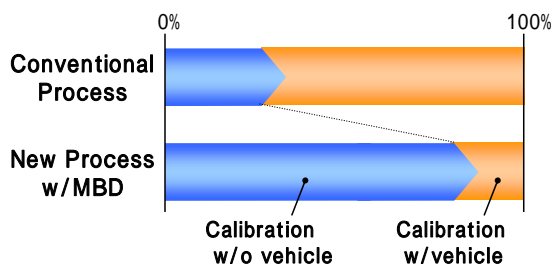


Fig.9 Numbers of Calibration Parameters

#### 5. おわりに

以上に述べたように、V 字型の開発プロセスの各段階で活用可能な仮想開発環境を構築し、これらを活用することで実車に搭載する前段階で、高品質に「i-ELOOP」の技術を確認することができた。今後もビルディングブロック戦

略に従う技術開発等において、仮想開発環境を発展させ、品質の確保と開発効率の向上を両立させていく予定である。

#### 参考文献

- (1) 石野ほか: 新世代技術「SKYACTIV パワートレイン」, マツダ技報, No.29, pp.29-35 (2011)
- (2) 猿渡ほか: マツダ i-STOP (アイ・ストップ) マツダ技報No.27, pp.9-14 (2009)
- (3) 江角ほか: SKYACTIV-G制御技術の紹介, マツダ技報, No.29, pp.36-40 (2011)
- (4) 平松ほか: パワートレイン構想設計のVirtual Testing技術の紹介, マツダ技報, No.22, pp.50-55 (2004)

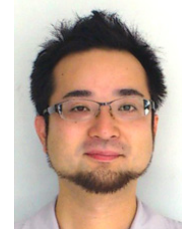
#### 著者



柴田 敏治



小森 賢



彌生 啓介



上野 隆司



小谷 和也



亀井 裕介