

論文・解説

31

技術開発用エンジン制御コンピュータの開発 Development of Engine Control Module for Technological Development

末繁 恵一郎*¹ 二宮 洋*² 高田 哲也*³ 福馬 勉*⁴
Keiichiro Sueshige Hiroshi Ninomiya Tetsuya Takata Tsutomu Fukuma
谷岡 輝明*⁵ 光本 伸義*⁶ 吉田 景太*⁷ 柏島 幸雄*⁸
Teruaki Tanioka Nobuyoshi Mitsumoto Keita Yoshida Yukio Kashiwajima

要 約

マツダでは、制御システムの開発プロセスとして「モデルベース開発（MBD：Model Based Development）」を導入し、性能・品質の向上及び開発の効率化に大きな成果を上げてきた。しかし、車両性能、環境・安全性能を究極まで追求すればするほど、システムの大規模・複雑化が従来とは桁違いのハイペースで進行しており、これまで取り組んできたレベルのMBDでは、解決できない課題も増えつつある。

その課題解決の1つとして、今後は電子制御ユニット（ECU：Electronic Control Unit）の電子回路レベルでのMBD技術獲得も必要となる。そして、技術開発用ECUの実機&モデルを駆使した環境下でハードウェア及びソフトウェアの機能開発を終え、ECUメーカー様には商品版ECUを整然と開発いただくプロセスを目指したい。

Summary

Mazda introduced “Model Based Development (MBD)” as a method of developing control systems, and thereby has greatly improved the performance and quality of its products and increased development efficiency. As we seek to improve the vehicle, safety, and environmental performances to the utmost limit, however, the control systems are becoming larger and more complex at a speed much faster than ever before. Consequently, the number of issues that cannot be solved by conventional MBD is on the rise.

To solve such issues, it is required to acquire MBD technologies at the level of electronic circuit in the ECU (Electronic Control Unit). Mazda aims at establishing a process in which the developments of hardware and software functions are completed in an environment where actual and/or virtual Technology Prove-out ECU models are made full use of and ECU manufacturers can develop mass-marketed ECUs in an orderly manner.

1. はじめに

マツダでは、技術開発の長期ビジョンとして策定した「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき、「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」の両立を目指してパワートレインを進化させてきた。これに伴って大規模化かつ複雑化してきたエンジン制御システムの開発プロセスとしてMBDを全面導入し、制御モデルの開発を手の内化することで、性能・品質の向上及び開発の効率化に多大な成果を上げることができた。

しかし、環境・安全性能への要求が今後一段と厳しさを増していく中、制御システムの大規模化・複雑化が、従来

とは桁違いのハイペースで進行していくことに疑いの余地はない。したがって、性能・品質の向上及び開発の効率化に向けた改善の手を緩める訳にはいかず、MBDの現状を踏まえた上で更なる進化を図る必要がある。

2. エンジン制御ECU開発の現状と課題

2.1 機能開発の現状

ECUの機能開発として導入したMBDをV字プロセスで表現したものをFig. 1に示す。

*1～8 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

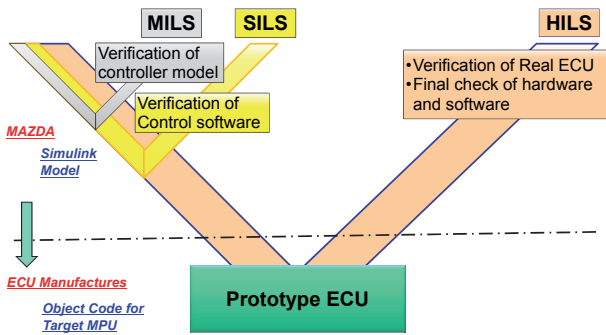


Fig. 1 Current MBD Process of ECU

左バンクには、ECUメーカー様によるECU試作の前工程として、Simulinkで記述した制御モデルをMATLAB上で実行するMILS (Model In the Loop Simulation) , 及び該モデルのC言語ソースを自動生成 (オートコード) 後PCネイティブコードに変換し実行するSILS (Software In the Loop Simulation) のプロセスを導入している。MILS/SILSは、制御モデルとプラントモデルが扱う物理データをメモリで共有する構成 (論理結合) となっており、制御モデルの機能開発に主眼を置いたプロセスといえる (Fig. 2) 。

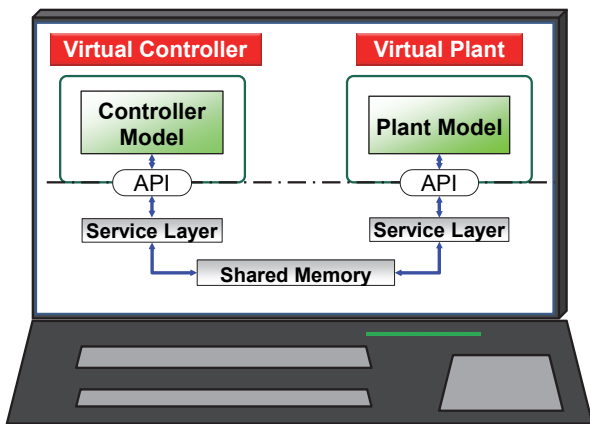


Fig. 2 Development Environment Using MILS/SILS

MILS/SILSでの制御モデルの機能開発完了後は、ECUメーカー様によるECU試作の工程に移行するが、ECUメーカー様へは、ECU仕様としてSimulinkで記述した制御モデルの他に、ハードウェア及びソフトウェアプラットフォーム (ソフトウェアPF) への要求仕様を提示する必要がある。

一方、右バンクには、実車による総合評価の前工程として、ECUメーカー様から納入された試作ECUの機能検証を行うHILS (Hardware In the Loop Simulation) のプロセスを導入している。HILSは、実ECU内の制御モデルとシミュレータ内のプラントモデルが扱う物理データをAPI (Application Programming Interface) よりも下の層で

変換された電気信号で接続する構成 (物理結合) となっており、ECUとしての全機能を実時間で検証することを目的としたプロセスである (Fig. 3) 。

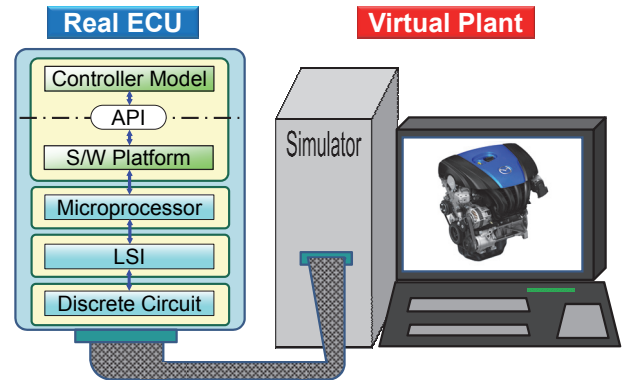


Fig. 3 Development Environment Using HILS

マツダでは制御モデルの機能開発として、技術開発から商品開発に至る各段階へのMBDの導入によって、ECUメーカー様へ提示する制御モデルの完成度が飛躍的に向上し、HILS検証や実車評価から制御モデル開発への手戻り、及び商品開発から技術開発への手戻りを大幅に削減することが可能となった。

2.2 開発プロセスの更なる進化ニーズ

Fig. 2, Fig. 3から明らかなように、MILS/HILSは実ECUには実装されているハードウェア (マイコン、システムLSI、汎用素子で構成されるディスクリート回路) 及びソフトウェアPFのモデルを省略した構成となっている。したがって、この部分に起因する問題が右バンクで発覚した場合、大きな手戻りや品質問題への発展、場合によっては機能上の制約に至るリスクを含んでいる。MBDの更なる進化によって、これらを未然防止することが課題だと考えている。

MBDの進化を考える上で、同時に織り込んでおくべき将来ニーズとして、下記3点を挙げておく必要がある。

(1) CPUのマルチコア化

マイコンのプログラム処理速度向上の手段として、今後のCPUがマルチコア化へ向かうことは必至であり、自動車メーカーにとっても並列プログラミングに対する技術修得は急務である。

(2) 故障注入への対応

機能安全規格ISO26262の要件として、半導体内部を含めた電気・電子回路への故障注入 (Fault Injection) による機能安全性検証が要求されている。

(3) 実チップ入手前の機能開発着手

新技術・新機構開発の早期開発着手による商品競争力の確保、及びチップ選定の効率化のため、仮想チップでの機能開発の必要性が高まっている。

2.3 MBD開発プロセスの更なる進化

上述のリスク及び将来ニーズへ対応するためには、左バンクでECUの全機能及び信頼性の開発が行えるよう、MBDプロセスを進化させる必要がある。

(1) 仮想ECU環境による機能開発の実現

ECUの全機能を左バンクで開発するためには、ハードウェア及びソフトウェアPFを含むECU全体を仮想空間上で設計し動作検証が行える仮想ECU (vECU) 環境の構築が必要である (Fig. 4)。これはFig. 3との対比から明らかのように、右バンクのHILS検証と等価な検証を左バンクのモデル上で行うプロセスとすることができる。これにより、右バンクから左バンクへの手戻りの大幅な削減が期待できる。

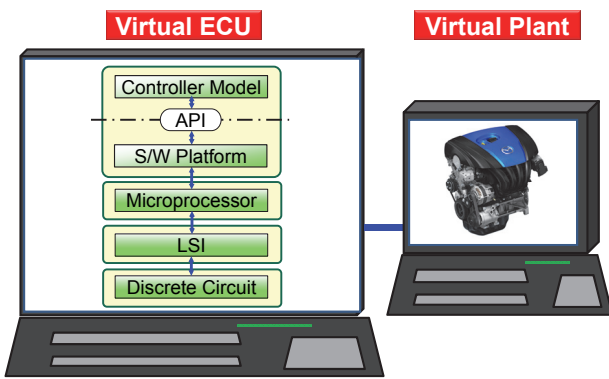


Fig. 4 Development Environment Using Virtual ECU

(2) シミュレーションによる信頼性開発

ECUハードウェアの信頼性開発についてもMBDを適用していくという基本的考え方は同じであるが、熱・振動・電磁ノイズは支配している物理法則が異なるため、それぞれ個別の解析環境の構築が必要である。

(3) MBDプロセスの将来構想

ECU機能開発のための仮想ECU環境、信頼性開発のためのシミュレーション環境を加えた新たなMBDのV字プロセスをFig. 5に示す。これを実現するためには、第一段階として、ハードウェア及びソフトウェアPFの開発技術を獲得してECUに関するブラックボックスを排除するこ

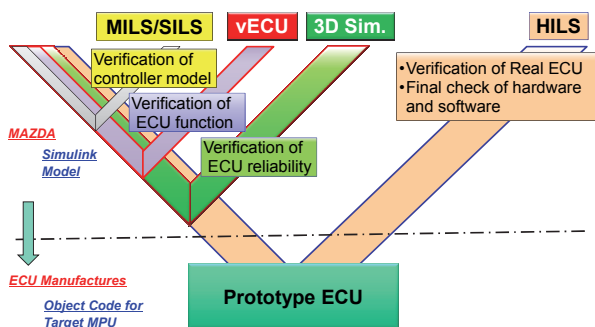


Fig. 5 MBD Process of ECU

とが必要であり、その開発に取り組んできた。次の章では、その結果について紹介する。

3. 将来構想実現に向けた取り組み

3.1 ハードウェア開発技術

マツダでは、ECUハードウェア設計をV字プロセスの左バンクでやり切れるほどの、開発力の内部留保を目指し、マイコンやICなど中核となるデバイスを選定して電子回路を設計する機能開発フェーズと、ECUの使用環境や搭載上の制約条件を考慮してプリント基板を設計する信頼性開発フェーズの、それぞれに対して取り組んだ (Fig. 6)。

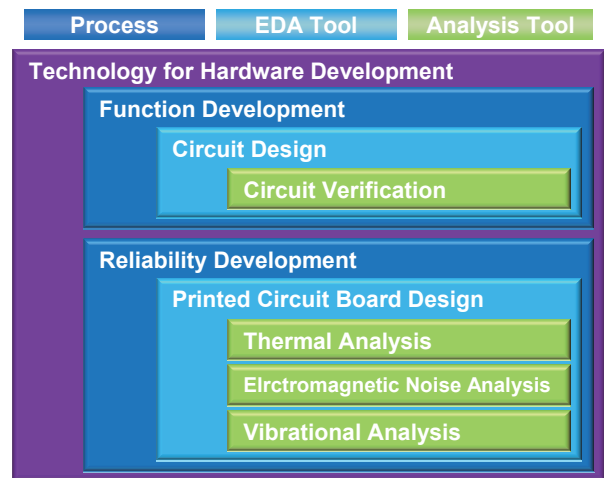


Fig. 6 Hardware Development in Left-bank of V-Process

3.2 ハードウェア機能開発力の内部留保

これまでマツダにとって技術開発用ECUハードウェアは、ECUメーカー様の高い技術により開発されたASIC (Application Specific IC) などの専用デバイスもあり、多くの部分がブラックボックス化していた。このため、新たな入出力機能を加えたり、処理能力を高めたりすることが、マツダだけの力では容易にできず、技術開発用ECUを準備するときの大きな支障になっていた。

そこで、マツダが必要とする入出力機能のからくりを分析・整理し、汎用電子部品によりFig. 7のような電子回路

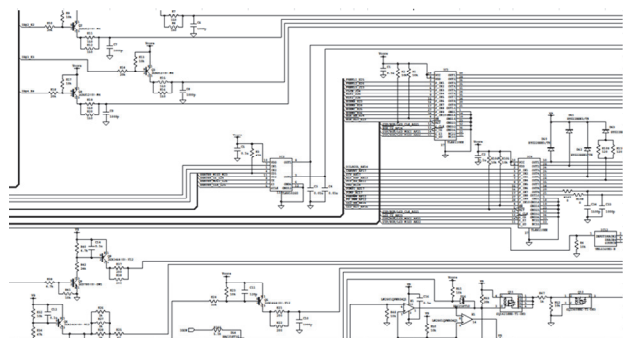


Fig. 7 Circuit Design

として組み直すことで、機能的なブラックボックスを排除した。

この結果、マツダだけの力で技術開発用ECUの機能を自在に変更・追加できるようになり、また、この過程で次のようなスキルも獲得することができた。

(1) 最適な電子部品の選定能力

処理負荷、入出力機能、耐環境性能から選択可能なマイコンなどの部品を選定する能力が身についた。この能力は、今後の量産開発で、適切なコスト低減を図りつつ品質を高めるために活用ができる。

(2) 回路設計検証技術の獲得

電子回路CADを使つての基板設計やSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) などの回路解析技術の獲得ができた。これにより、回路構成を考える段階から、基板上の部品配置や配線パターンの形状や取り回し、それらが性能や信頼性に与える影響をイメージしながら設計することが可能となった。

これにより、商品版ECUを見たときにも品質やコストの審査が可能となる。

3.3 ハードウェア信頼性開発力の内部留保

技術開発用ECUは、民生品に比べて熱や振動など、はるかに過酷な環境条件で使われ、しかも高い精度が要求される。また、1枚の基板上にマイコン、デジタル回路、小信号回路、高電流・高発熱回路などが混在して互いに干渉し合う。

上述の機能開発で得られた回路図は、あくまで理想状態であり、これを元にFig. 8のような基板を設計する際は、種々信頼性に対して設計結果を検証しながら進めていく必要がある。

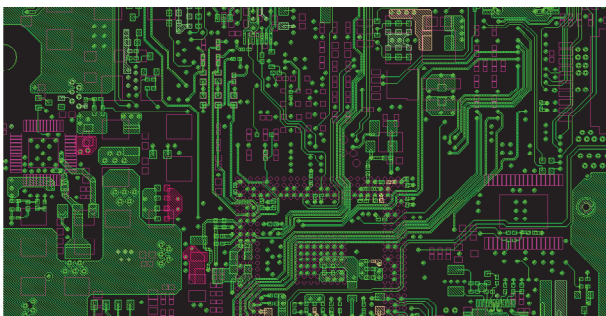


Fig. 8 Printed Circuit Board Design

基板上では、部品配置や回路パターンに依存して、回路の性能や安定性、発熱信頼性、電磁ノイズ、耐振性などが、同時に変化する。これを勘と経験、定性的な解析、人手による計算のみで検証するのは困難である。このため、開発対象と環境をモデル化した上で、回路解析、熱解析、電磁ノイズ解析、振動解析などによる検証技術が必須となる。

今回は中でも技術難度が高く、ブラックボックス化していた、熱、電磁ノイズ、振動について、解析技術の取り組みを紹介する。

信頼性開発も機能開発と同様に、実機で起こる技術的な問題及び検証の難しさを経験した上で、それらをイメージしながら、左バンクでやり切れるようになる姿を目指した取り組みとした。

(1) 熱解析

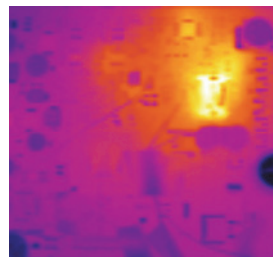
一般的に、解析ツールは解析対象の設計スペックなどから得たデータを入力しただけでは、予実差が大きく目標の精度が得られない。

そこで、まず実基板各部の温度を測定する技術を修得するところから始め、予実差の検証ができる状態とした。その上で、熱解析モデルの精度向上と、発熱量予測精度の向上に取り組み、目標の精度達成に目処を付けた。

1) 熱解析モデルの精度向上

熱解析モデルの対象デバイス内部構造の重要なパラメータのみを詳細にモデル化することで精度向上につなげた。また、リグ評価基板を製作して専用の同定装置により熱構造関数の合わせ込みを実施するやり方で、許容できる誤差範囲内で解析可能な、熱解析モデルを得ることができた。このようにして得た各デバイスの熱解析モデルを基板の熱解析モデルと結合し、部品が実装された基板全体の熱解析を、目標の精度で実施することを可能にした (Fig. 9)。

Measured by Thermo Viewer



Simulated by Analysis Tool

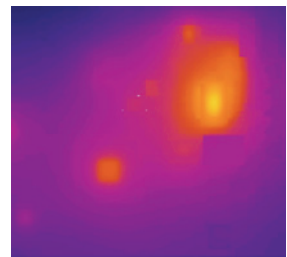


Fig. 9 Thermal Analysis

2) 発熱量予測精度の向上

解析時に入力する発熱量の精度を向上させるため、回路解析技術を組み合わせ、ソフトウェアでの動きを考慮した対象デバイスの作動状態で回路解析を行い、熱解析の発熱量を算出する。今後、技術開発用ECUの搭載要件や小型化でますます厳しくなる熱環境に対応するためにも、更なる精度向上を目指したい。

(2) 電磁ノイズ解析

特に、EMC (Electronic Magnetic Compatibility) においては、多層基板上に数千もある配線やパターン形状のひとつひとつが電磁ノイズに関連し、相互に影響し合う。このため複雑な解析が必要となる。

回路図では説明できない潜在的な裏のからくりが存在す

る。この複雑なからくりを理解し、戦略をもって基板設計検証を進めていける解析スキルアップも行った。これらに取り組んだ結果、左バンクでEMC基準を満たす基板を開発できる技術を獲得できた (Fig. 10)。

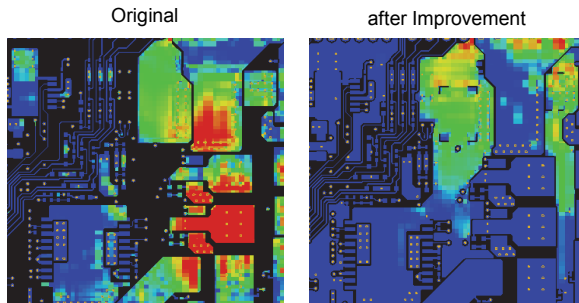


Fig. 10 Electromagnetic Noise Analysis

設計検証解析技術の強化だけでなく、できあがった実ECUの電磁ノイズ評価環境の強化も実施した。

クルマとエンジンのプラントモデルを実装したHILSに、実ECUを接続し、電磁ノイズ試験場内への持ち込みを可能にした。ここでの問題は、通常のHILSでは電磁ノイズでの悪影響から正しい機能検証ができなくなることであった。そこで、HILS自体の電磁ノイズ性能改善対策や、HILS-ECU間の干渉の切り離し対策のカスタマイズ開発を行った。

これにより、実機での確認が前倒しでき、効率化できるだけでなく、本来の目的である電磁ノイズ評価を安定して正しく実施できるようになる。

(3) 振動解析

振動は、熱や電磁ノイズのように、一般的な試験方法で機能不全になるまでの余裕度を求めることができず、設計の良否水準が判断しにくい特徴がある。

そこで、試験方法の中でも市場で発生する振動状態に近いといわれる6軸ランダム振動に温度も加え、複合ストレスとして与えるHALT (Highly Accelerated Limit Test) に着目して解析技術の内部留保に取り組んだ。

一般的な耐久試験は、一定のストレスを与えて対象の強度劣化を時間軸でとらえるが、HALTは、ある強度をもつ対象が、どの程度のストレスで、どこが機能不全になるかを試験する方法であり、短時間で部品を実装した基板の弱点を把握でき、そこからさまざまな考察につなげることができる。

更に、これを左バンクにもち込むために、基板設計時に机上で6軸ランダム振動と等価なCAE解析が可能な環境を構築した。今後、HALTの実測結果との予実差をみて精度改善を進めていく。

これらの技術は、購入品ECUに限らず、今後ますます増えてくる電子部品の審査の力を握ることにつながるものであり、品質の向上に貢献していきたい。

3.4 ソフトウェア開発技術

ECUのソフトウェア全体像は、大きくは2つの階層がある。上の階層から順番に、①アプリケーション層 (制御仕様書に主に書かれる表層機能)、②プラットフォーム層 (OSや入出力ドライバなど) である。これまでのソフトウェア開発は、Simulinkで記述したアプリケーション層をV字プロセスの左バンクで機能検証し、プラットフォーム層は右バンクでしか機能検証ができていなかった。今後は、仮想ECU環境にてプラットフォーム層も含むソフトウェア全体の機能検証を左バンクで実現できるように、これまでブラックボックスであったプラットフォーム層のソフトウェアをホワイトボックス化し、技術開発用ECU上でアプリケーション層が動作する独自のソフトウェアPFを開発した。

3.5 ソフトウェア機能開発力の獲得

ソフトウェアに対する要求分析、構想設計、詳細設計を行い、要求機能を満足するソフトウェアPFの設計技術を修得した。これにより、機能的なブラックボックスを排除することができた。

(1) ソフトウェアPF構想設計

プラットフォーム層は、階層化アーキテクチャを適用し、最下位層にマイコンの周辺回路などマイコンの機能に依存する層を配置し、その上にアナログ回路やシステムLSIなどECUハードウェアの機能に依存する層を、更にその上にセンサやアクチュエータなどデバイスの機能に依存する層を配置した。こうして、各層ごとに役割を分離することで、マイコンやデバイスの変更に対する影響を最小限に抑えた。

また、マイコン依存層は、クランク角センサ信号入力や燃料噴射パルス出力などの入出力処理を行うI/Oドライバ、CAN (Controller Area Network) 通信などの処理を行う通信ドライバ、RAM/ROMを管理するメモリドライバなどで構成した。これらドライバ群も、DIO (Digital Input Output) ドライバ、ADC (Analog Digital Converter) ドライバ、SPI (Serial Peripheral Interface) ドライバなど、個々の機能ごとにソフトウェアをコンポーネント化することで、ソフトウェアの保守性・拡張性を高めた (Fig. 11)。

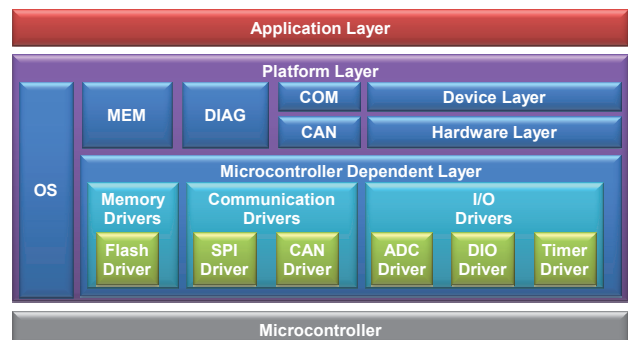


Fig. 11 Platform Software Architecture

(2) ソフトウェアPF詳細設計

ソフトウェアPF構想に基づき、個々のソフトウェア・コンポーネントの詳細設計を行った。ここでは、その事例を2つ紹介する。

1) 燃料噴射・点火タイミング処理

エンジン制御では、アプリケーション層からの燃料噴射及び点火要求をクランク角に同期して緻密に制御することが要求される。そのため、プラットフォーム層では、マイコンの高度なタイマ機能を用いて、緻密なタイミング制御を実現した。具体的には、クランク角信号からエンジンの回転角度位置を示すアングルクロックを生成し、これをコンペアマッチタイマのクロックソースとすることで、CPUの負荷を最小限に抑えながら、正確な燃料噴射及び点火タイミング制御を実現することができた。

2) デジタル信号処理

エンジン制御では、エンジンの燃焼状態をセンサで検知し、最適な燃焼状態となるようフィードバック制御しており、センサの電気信号からノイズ成分を除去し、特定の信号成分のみを正確に抽出することが要求される。そのため、プラットフォーム層では、センサ信号を高速にAD変換し、デジタルフィルタ処理を行うことで、簡易なアナログフィルタのみで、高次のアクティブフィルタを実現した (Fig. 12)。

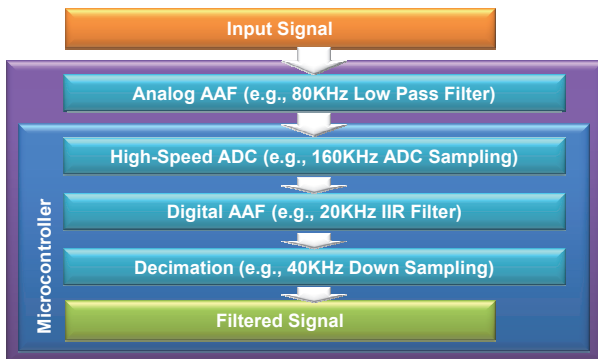


Fig. 12 Digital Anti-Aliasing Filter (AAF)

3.6 ソフトウェア開発環境の構築

組込みソフトウェアを開発するための統合開発環境を構築すると共に、ソフトウェア品質を検証するための静的・動的解析ツールを導入した。

(1) 自動コード生成環境の構築

アプリケーション層は、Simulinkを用いて実行可能な制御モデルとして記述している。そのため、オートコード・ジェネレータを用いて、制御モデルから組込みC言語ソフトウェアを自動生成する環境を構築した。これにより、組込みソフトウェア品質の安定と開発期間の短縮を図った。

(2) ソフトウェア統合開発環境の構築

実マイコン上で動作するソフトウェアを開発するため、

C言語コードのコンパイル、アセンブリ言語コードのアセンブル、出力されたオブジェクトコードのリンクといった一連のビルド環境を構築した。また、マイコンのオンチップ・デバッグ・インターフェイスを用いて、ソフトウェアを検証するテスト環境を構築した。これらのツール群をシームレスに結合させることにより、組込みソフトウェア開発の効率化を図った (Fig. 13)。

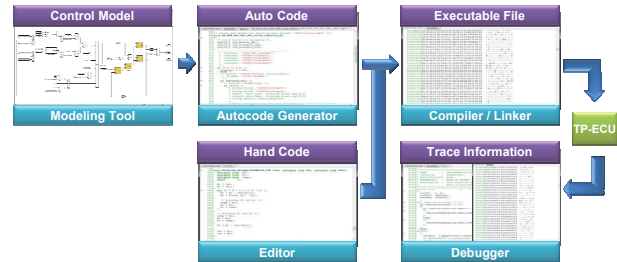


Fig. 13 Software Development Environment

(3) ソフトウェア品質検証環境の構築

ソフトウェアの品質を確保するには、網羅的なテストとレビューが重要であるが、大規模・複雑化するソフトウェアのテストやレビューの全てを人手に頼ることは困難である。そのため、ソースコードを静的に解析し欠陥を検出する静的解析ツールを導入して、ソフトウェアの信頼性・保守性・移植性の向上を図った。また、テストシナリオの作成を支援し、テストカバレッジを評価するカバレッジ計測ツールを導入して、テストの効率化と網羅性の向上を図った。

4. 成果

技術開発用ECUの開発を通じて以下の成果を得た。

(1) ECUハードウェア領域

半導体部品選定から始まり、基板設計CADを用いた設計技術獲得、信頼性などをCAE解析する技術が獲得できた。これにより、商品版ECUについての適切な仕様設計が上流で可能になる。

(2) ECUソフトウェア領域

従来からアプリケーション層については、モデルベース開発を実践し、図面を出す前にクルマモデルとの接続検証を終えていたが、それに加えて、プラットフォーム層のソフトウェア開発力も学び、エンジン制御の全ソフトウェアについての技術が獲得できた。

(3) プロセス領域

上記ホワイトボックス化された技術開発用ECUを用いた制御システムの先行技術開発が可能となった。

(4) 人材領域

電装品メーカー様の高い技術力をもつエンジニアの方と、このレベルの技術について共創できるエンジニアが社内にも育ったことは大きな成果であった。

5. おわりに

世界一のクルマを目指すとき、マツダは大規模・複雑化する制御システムの開発を克服しなければならない。今後も、更なるモデルベース開発技術力の進化で、これに立ち向かう決意である。そのためには、本稿で示したような、より深いレベルのMBD技術獲得が必要となる。

技術開発用ECUや仮想ECUモデルを駆使した環境下でハードウェア及びソフトウェアの機能開発を終えることをねらいたい。更には、熱・振動・電磁ノイズなどの解析技術の獲得も行い、電子回路レベルの不具合も未然防止したい。

将来は、商品版ECUの上で試行錯誤するのではなく、技術開発用ECU（実機&モデル）の上でしっかり開発を終え、ECUメーカー様には商品版ECUを整然と開発いただくプロセスを目指したい。今後もECUメーカー様とのWIN-WINな関係を発展させ、会社を超えたモデルベース開発の取り組みに広げ、自動車関連業界全体のビジネス強化につながれば理想である。

社内においては、「サステイナブル“Zoom-Zoom”」を実現するため、この活動をエンジン制御用ECUだけではなく全車載ECUの開発へ拡大展開していくことにより、MBDの次世代ステージへの進化を図っていく。

参考文献

- (1) 江角ほか：SKYACTIV-G制御技術の紹介，マツダ技報，No.29，pp.36-40（2011）
- (2) 寺岡ほか：エンジン制御系仮想開発環境と新型エンジン開発への適用，自技会論文集，No.20124464 Vol.43（2012）
- (3) 臼田ほか：SKYACTIVのMBD検証環境について，マツダ技報，No.31，pp.48-53（2013）

■著者■



末繁 恵一郎



二宮 洋



高田 哲也



福馬 勉



谷岡 輝明



光本 伸義



吉田 景太



柏島 幸雄