

MBD 実現に向けたエンジンプラントモデルと 段階的システム同定環境の構築

Development of High-performance Engine Plant Model and Sequential System Identification
Environment for Realization of Model-based Development

藤 本 茂 希*
Shigeki FUJIMOTO

大 高 義 行*
Yoshiyuki OHTAKA

小 堂 智 史*
Satoshi KODO

要 旨

ソフトウェア開発手法の一つである V プロセスとモデルベース開発 (MBD) を合わせた MBD-V プロセスによる開発の効率化が、各自動車メーカーで進められている。この MBD-V プロセスにおいては、設計と検証工程の対応レベルに合わせて階層化し、各階層では異なるプラントモデルを利用する。エンジン開発でこの MBD-V プロセスを推進するにあたり、同階層モデルの一致性と異階層モデルの整合性に課題があった。そこで、同階層共通で使える高性能プラントモデルを開発し、異階層モデルを段階的にシステム同定することで、全階層で一貫したプラントモデルを使用することができる環境を構築した。この環境で作成したプラントモデルを MILS, HILS 環境で動作検証し、構築した環境の有効性を確認した。

ABSTRACT

Attempts to realize more efficient development by combining the V-model, a method used in software development, with model-based development (MBD) are proceeding among automotive manufacturers. The design and test processes for this combined development method are organized into corresponding levels, and different plant models are used for each level. Attempts to employ an MBD-V-model combination in engine development presented the issues of mismatches between models on the same level, and lack of consistency between models on different levels. A high-performance plant model able to be used in both design and test procedures on the same level was therefore developed, and an environment was created making it possible to use consistent plant models at all levels by means of sequential system identification of models for different levels. The functioning of models generated by this environment was studied in MILS and HILS environments, verifying the effectiveness of the developed environment.

1. まえがき

一般的なソフトウェア開発では、以前より設計工程とテスト工程の対応関係を V 型に整理した V プロセスが採用されている⁽¹⁾。

Fig. 1⁽²⁾ の V プロセスでは、左半分に設計工程を右下がり、右半分にテスト工程を右上がり、並べた図として表現され、工程の繋がりがソフトウェア開発過程を表すと共に、左右の関係で設計工程の各要求がどのテスト工程に対応しているかを示している。テスト工程では、対応する設計工程の要求を基に、達成しているか否かの確認や検証をおこなう。

この左右の対応関係に応じて上下に分割したものを階層と呼ぶ。各階層では目的や視点が異なるため、要求やテスト項目も異なってくる。

一方、開発スピードや品質の向上を目指したフロントローディングを達成するための手段として、モデルベース開発 (MBD) が注目されている⁽³⁾。一般的な制御 ECU の

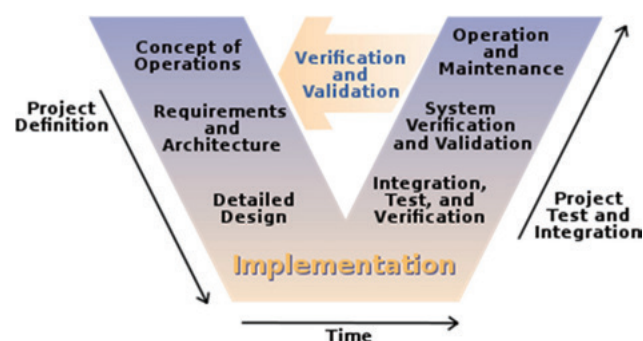


Fig. 1 Standard V-model

*四輪 R&D センター

MBD では、コントローラと制御対象であるプラントの機能をモデル化し、開発初期から各工程においてモデルを活用する。このモデルを用いて、これまでテスト工程でおこなわれていた検証作業の一部を設計工程に前倒しすることで、仕様変更等の大きな手戻り負荷を減らし、ECU の品質向上や開発期間の短縮を実現することができる。

近年では、この V プロセスと MBD を組み合わせ、V プロセスの階層に応じたモデル化をおこなうことで、より効率的なモデル活用を目指した取り組みが各自動車メーカーで進められている⁽⁴⁾。

Honda でも以前よりこの MBD-V プロセスを推進する試みをおこなってきた。エンジン開発における MBD-V プロセスの概略を Fig. 2 に示す。V プロセスの各階層は上から車両、システム、ハードウェアおよびコントローラ、実装に分けられ、それぞれの工程では目的に応じたモデルを用いて開発を試みている。

しかし、この MBD-V プロセスを実践するにあたり、制御対象のエンジンをモデル化したプラントモデルに対して以下のような課題があった。

一つ目は同一階層内でのプラントモデルの不一致である。MBD-V プロセスで検証の前倒しをおこなうためには、同一階層内で等しいプラントモデルを使用する必要がある。しかし、コントローラ階層では、テスト工程の Hardware In the Loop Simulation (HILS) にてリアルタイムシミュレータを使用するため、プラントモデルに求められる計算速度の制約が厳しく、設計工程での Model In the Loop Simulation (MILS) と同一のプラントモデルを使用することは困難であった。

二つ目は異なる階層間でのプラントモデルの不整合である。従来、各階層ではそれぞれ目的や視点が異なるため、各工程で独自のプラントモデルを作成し開発に利用してき

た。そのため、各階層間のプラントモデルは挙動に整合がとれず、システム階層のプラントモデルで検討したシステム要件をコントローラ階層に直接反映できなかった。その結果、MBD を活用したコントローラ検証の前倒しは困難であった。

上記 2 点の課題を解決するため、まずコントローラ階層にて設計およびテストで共に使用可能な、高性能プラントモデルを開発し、次にこのプラントモデルをシステム階層から段階的にシステム同定することで、階層間で異なるプラントモデルの挙動を一致させる環境を構築したのでここに紹介する。

2. 開発のねらい

今回開発した高性能プラントモデル High Performance Engine plant Model (HPEM) の必要条件と段階的システム同定環境の概要、および達成基準について以下に示す。

2.1. HPEM 開発における必要条件

コントローラ階層の HILS および MILS で共に使用可能なプラントモデルを開発するに当たり、モデル挙動と計算速度には次のような必要条件がある。

一つ目はモデル挙動の必要条件である。近年のエンジンは、制御すべきアクチュエータおよびセンサ数の増加や、厳しい法規制に対応するため、制御ロジックの複雑度が増している。排気ガス規制に対応するための空燃費フィードバック制御を例にとると、状態推定器を備えた適応制御理論に基づく制御ロジックを実装しているが⁽⁵⁾、このような制御ロジックの動作確認をおこなうためには、エンジンのプラントモデルが、実機エンジンの無駄時間や遅れ要素といった、時間軸に対する動的な挙動を表現でき

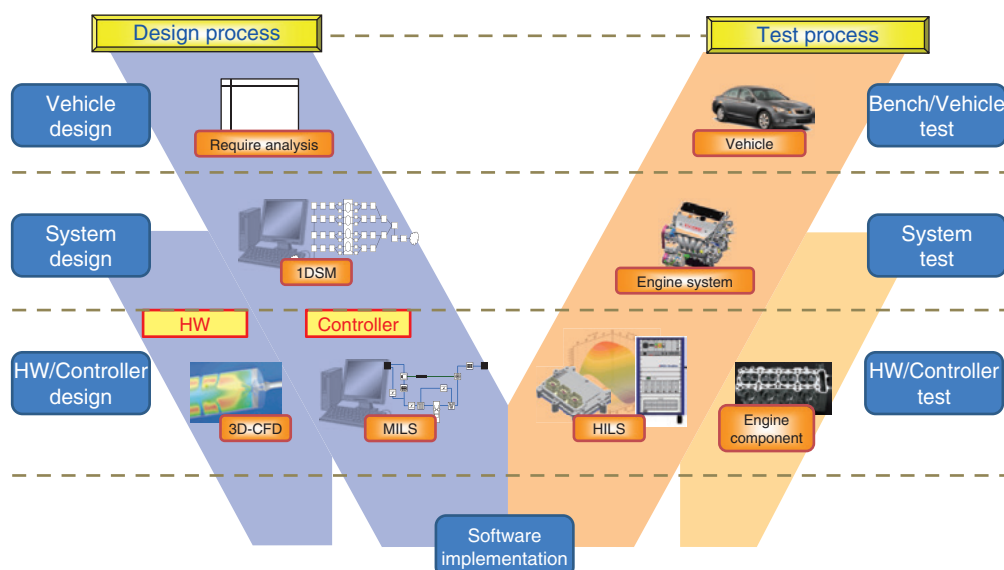


Fig. 2 Model-based development combined with V-model

る必要がある。

二つ目は計算速度の必要条件である。HILSはECU本体の検証を目的としたもので、実物のECUとプラントモデルを搭載したコンピュータと接続し、リアルタイムで動作するシミュレータである。そのため、コンピュータに搭載するプラントモデルの計算負荷が高いと、リアルタイムでエンジンの状態を算出できず、ECUの検証ができない。リアルタイムでの演算ができるか否かは搭載するコンピュータの性能に依存するが、現在市販されているリアルタイムシミュレータは、一般的なPCの演算処理性能とほぼ等しい。このような計算速度条件下で、リアルタイムに演算ができるプラントモデルが必要となる。

上記のモデル挙動と計算速度の必要条件のもと、一般的な Mean Value Engine Model (MVEM)⁽⁶⁾をベースに、エンジン仕様に合わせてカスタマイズをおこない、HPEMを開発する。

2.2. 段階的システム同定環境の概要

まず、エンジンプラントモデルとその使用目的を、以下に紹介する。

2.2.1. 1D-Simulation Model (1DSM)

1DSMは動径方向のみの数値流体力学 (CFD) 解析をおこなうモデルであり、3D-CFDと比較して計算負荷が軽く、システム全体での性能予測が可能となる。そのため、システム設計工程にて、主に吸排気諸元の検討やモード燃費計算、簡易燃焼評価を目的として使用している。

2.2.2. Mean Value Engine Model (MVEM)

空間的広がりを考えない集中定数系で、各燃焼サイクルの出力を時間軸で平均化して計算するモデルである。CFD計算をおこなっていないので1DSMよりさらに計算負荷

が軽い。反面、クランク角毎の挙動が表現できないため、ハードウェアの設計には向かない。そのため、コントローラ設計工程のMILSにて、制御ロジックの動作確認モデルとして使用する。

2.2.3. MAP Engine Model

MAP Engine Modelとは、エンジンの各コンポーネント特性を、実験値に基づき入出力の単純な対応付けで表現したモデルである。各状態値を高速に参照できるが、作成に当たり全運転状態での計測又は計算データを事前に用意する必要がある。コントローラテスト工程のHILSにてECU本体の検証に使用されるが、アクチュエータやセンサ数が増加している現在、全状態を網羅的に設定することは困難であり、主に制御ロジックのデバッグやOn Board Diagnosis (OBD) 検証といった限られた用途にのみ使用している。

2.2.4. 段階的システム同定フロー

本稿ではコントローラの開発フローに着目し、MVEMとMAP Engine Modelの役割をHPEMで担い、既存のエンジンから、1DSM、HPEMを段階的に同定することで、階層間で異なるプラントモデルの挙動を一致させる環境を構築する。

各階層間のプラントモデル挙動を一致させるため、本稿が提案する段階的なシステム同定フローをFig. 3に示す。この図は使用するモデルのカテゴリと、開発工程におけるモデルの変遷を表している。制御対象となるエンジンプラントモデルに注視すると、初めに既存エンジンのベンチ計測結果と1DSMを同定し、次に1DSM上で開発エンジンに合わせて諸元値の変更をおこなう。次に変更した1DSMの計算結果からHPEMを同定する。このような段階的システム同定を経て得られたプラントモデルをMILSおよび

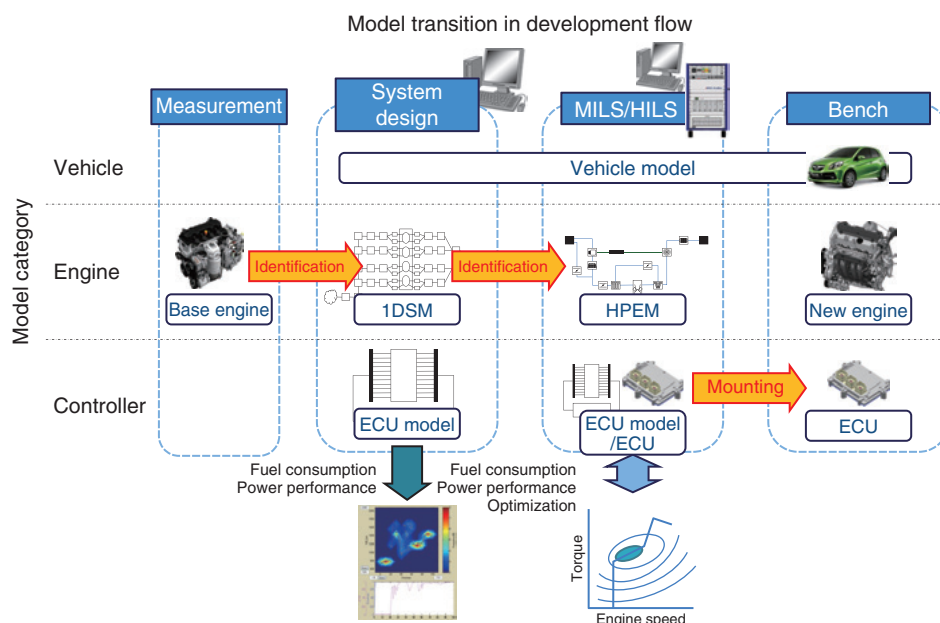


Fig. 3 Identification flow for engine plant model

HILS で使用することで、システム階層で検討したシステム要件が直接コントローラ階層に反映でき、ECU 検証の前倒しが可能となる。

2.3. プラントモデルの達成基準

2.1. 節の HPEM と段階的システム同定環境の有効性を確認するため、検証手順と達成基準を以下に示す。

2.3.1. 段階的システム同定の達成基準

段階的システム同定環境の検証として、まず、既存エンジンと 1DSM の同定結果を比較し、その誤差が許容範囲に収まっているかを確認する。次に、1DSM と HPEM の同定結果を比較し、同じく許容誤差範囲に収まっているかを確認する。達成基準として、それぞれの比較対象と許容誤差範囲を、既存エンジンと 1DSM の比較では吸排気系誤差 3% 以内、1DSM と HPEM の比較では BSFC 誤差 3% 以内に設定する。

既存エンジンと 1DSM の比較対象を吸排気系に限定したのは、1DSM における燃焼系は既存エンジンの計測結果を実験式として直接取り込むため、精度比較をおこなう必要がないためである。また、各許容誤差を 3% と定めたのは、実際のエンジンベンチの計測ばらつきがおおよそ 3% であることに起因しており、この数値を達成すれば制御対象のプラントモデルとして十分な精度を満たしているといえる。

2.3.2. HPEM の達成基準

HPEM の検証として、まず段階的にシステム同定をおこなったプラントモデルを、簡易 ECU モデルと共に MILS に実装し、燃費を算出する各種モード走行にて動作確認をおこなう。次に同プラントモデルを HILS に搭載し、実物 ECU と接続して同様の動作確認をおこなう。その際、市販の HIL シミュレータを使い、計算が収束する最大のタイム

ステップで、リアルタイム計算ができることを達成基準に設定した。これは計算するモデルやソルバの種類によって、計算が収束するタイムステップは異なるものの、実用に耐えるプラントモデルであることを重視したためである。

3. HPEM の開発

3.1. HPEM の構成

システム設計工程で使用される 1DSM は、クランク角度ごとの吸排気や燃焼状態の計算を逐次おこなっているの 비해、一般的な MVEM は各燃焼サイクルの出力を時間軸で平均化した平均値モデルである。MVEM は 1 次元や 3 次元の CFD 計算をおこなっていないので計算負荷は低いが、Map Engine Model と異なり微分方程式による動的な挙動を表現できるため、コントローラ設計時の制御対象モデルに適している。

HPEM は MVEM をベースとし、HILS 用に計算負荷を低減させるべく、一般的な教科書や論文等で広く認知されている数式、実測値から作成した実験式、応答曲面を計算精度と計算負荷の観点で取捨選択した。また数式による特性の表現は、1DSM からの予測値を反映できるよう、スロットルバルブ、インテークマニホールド、シリンダ、エキゾーストマニホールド、タービン、コンプレッサ、インタークーラ、キャタライザ等、部位別に細かくモデル化した (Fig. 4)。部位別に立てた多数の式を、数式処理ソフトを用いて式の簡単化をおこなった後実装することで、さらに計算負荷を低減し、リアルタイムの演算が可能となった。

3.2. HPEM の計算概要

HPEM は、空気、EGR ガスの流れを計算する吸排気系のモデルと、シリンダにおける燃焼の計算をおこなう燃焼

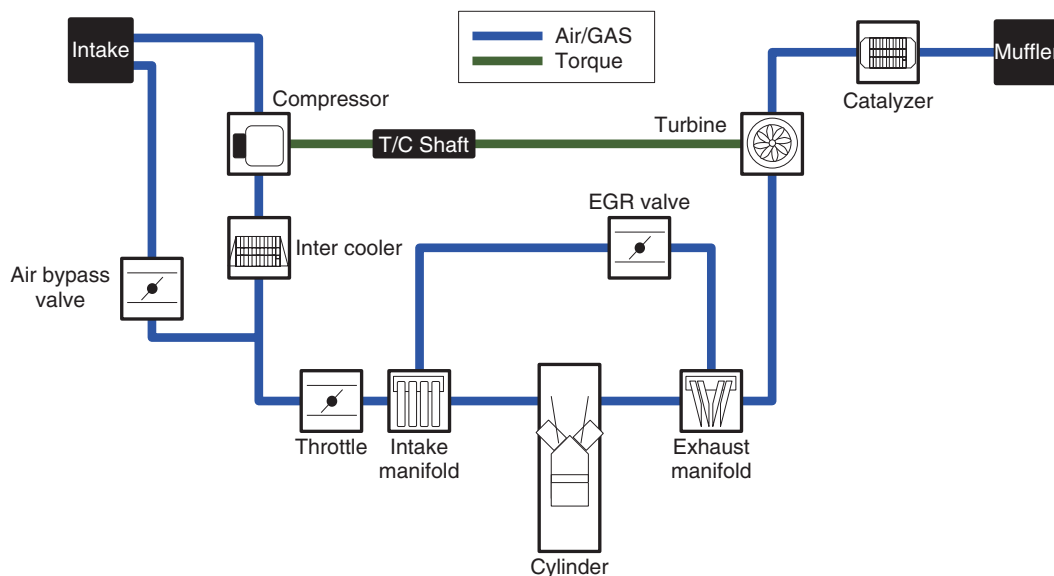


Fig. 4 High Performance Engine Plant Model (HPEM)

系のモデルから構成され、エンジン回転、ECU 指示値を起点として計算がおこなわれる。

エンジンが回転することによりシリンダに空気が吸入され、これによりインテークマニホールド圧が低下する。一方、シリンダに吸入された空気量と ECU 指示値である燃料噴射量、点火タイミングより図示平均有効圧 (IMEP) が算出され、この IMEP とポンプ損失平均有効圧 (PMEP)、摩擦平均有効圧 (FMEP)、トランスミッションからの負荷トルク、エンジンの慣性モーメントからエンジン回転数を計算する。また、シリンダからの排気ガスと ECU 指示であるウェストゲート開度からタービン、コンプレッサの仕事量が計算され吸気系の空気が過給される。このスロットル前後の過給圧とインテークマニホールド圧、ECU 指示であるスロットル開度からスロットルを通過する空気量が算出される。

3.2.1. 吸気系モデル

吸排気系のモデルは、空間的広がりを考えない集中定数系の 0 次元モデルである。このモデルは気体の状態方程式 ($PV=mRT$)、連続の式 (質量保存)、熱量の関係、オリフィスの式を用いてレシーバとオリフィスにより構成される。

参考として、スロットルモデルの数式⁽⁶⁾を以下に示す。

$$\dot{m} = C_d \cdot A(t) \cdot \frac{p_{in}(t)}{R \cdot g_{in}(t)} \cdot \Psi \left(\frac{p_{in}(t)}{p_{out}(t)} \right)$$

$$\Psi \left(\frac{p_{in}(t)}{p_{out}(t)} \right) = \begin{cases} \sqrt{\kappa \left[\frac{2}{\kappa+1} \right]^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} & \text{for } p_{out} < p_{cr} \\ \left(\frac{p_{out}}{p_{in}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[1 - \left(\frac{p_{out}}{p_{in}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} & \text{for } p_{out} \geq p_{cr} \end{cases}$$

$$p_{cr} = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \cdot p_{in}$$

t : Time

$\dot{m}(t)$: Mass flow through the valve

C_d : Discharge coefficient

$A(t)$: Open area of the valve

$p_{in}(t)$: Pressure upstream of the valve

$p_{out}(t)$: Pressure downstream of the valve

p_{cr} : Critical pressure where the flow reaches sonic conditions

R : Gas constant

$g_{in}(t)$: Air temperature

κ : Ratio of specific heats

3.2.2. 燃焼系モデル

燃焼系のモデルは、実験式により定義した熱発生率とシリンダ容積を、熱力学の第 1 法則、状態方程式、比熱の関係に代入することにより筒内圧を算出し、この筒内圧を体積変化で積分することにより IMEP を算出する。この燃焼

モデルにより、点火タイミングに対する出力変化や燃焼パラメータ (燃焼重心、熱発生量等) も算出可能となる。

4. 段階的システム同定環境の構築

一般的に、システム同定とは同定対象に応じて以下二つの手法が存在する。

一つ目はグレーボックス・モデルの同定である。グレーボックス・モデルとは、システム構造がほぼ明らかで、対象を支配する物理方程式に基づく数式によって記述されたモデルである。ただし、このモデルでは物理特性が計測できないパラメータもあり、それらを推定するためにシステム同定をおこなう。この手法をコリレーションと呼ぶ。

二つ目はブラックボックス・モデルの同定である。ブラックボックス・モデルとはシステム構造が不明、あるいは複雑で記述が困難な場合、実際に何が起きているかという詳細に立ち入らず、入出力の数学的關係のみでモデル化されたものである。このモデルの同定には、最小二乗法などを用いて、入出力が一致するような近似式を作成する。この手法を応答曲面作成と呼ぶ。

既存のエンジンから、1DSM, HPEM を段階的に同定するにあたり、プラントモデルの各部位ごとの特性に応じて、上記のコリレーションと応答曲面作成の両手法を組み合わせで実施した。

実際の各部位の同定手順を以下に示す。初めにエンジン吸排気系に関する同定フローを Fig. 5(a) に示す。まず既存エンジンの体積効率特性を目標値とし、1DSM の体積効率が指定誤差範囲内で目標値に一致するように、1DSM の筒内壁温度を同定パラメータとしてコリレーションをおこなった。コリレーションアルゴリズムには遺伝的アルゴリズム (GA) による最適値探索法を用いた。次にこの同定した 1DSM から、エンジン回転数、目標吸気圧、点火タイミング、VTC 等を設計変数とし、実験計画法 (DOE) を用いて体積効率特性の応答曲面を作成した。そこで作成した数式を HPEM へ組み込んだ。

続けてエンジン燃焼系に関する同定フローを Fig. 5(b) に示す。既存エンジンで計測した筒内圧波形から、燃焼状態に影響する各操作量を設計変数とし、燃焼重心と燃焼期間の応答曲面を作成した。その応答曲面の数式を、1DSM の燃焼モデル Wiebe⁽⁷⁾ の式に組込んだ。この 1DSM の燃焼出力を目標値にとり、HPEM の燃焼モデルの出力が、指定誤差範囲内で一致するように、GA を用いて同定パラメータのコリレーションをおこなった。

最後に各コンポーネントの細かな特性やフリクションロス等も、同様の手法により既存エンジン、1DSM, HPEM の段階的システム同定をおこない、最終的に各モデルの出力トルク、BSFC が共に許容誤差範囲で一致するエンジンプラントモデルを作成した。

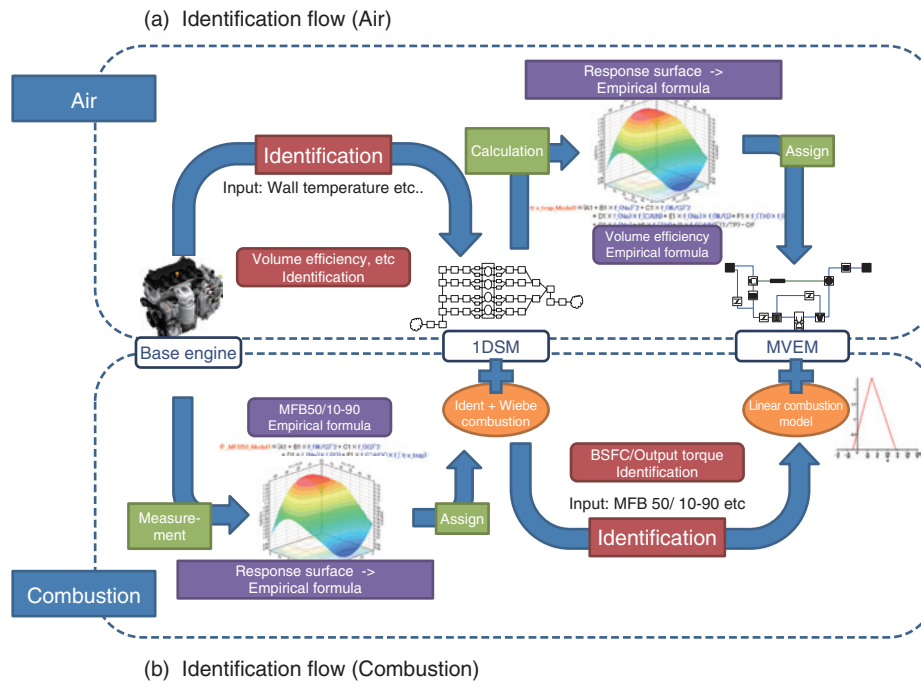


Fig. 5 Identification flow

5. プラントモデルの動作検証

HPEM と段階的システム同定環境の有効性を確認するため、それぞれに対する検証をおこなった。

5.1. 同定検証

段階的システム同定環境の検証として、まず、試作エンジンと 1DSM の吸排気系のシステム同定結果を比較した。両体積効率の比較結果を Fig. 6 に示す。

グラフは横軸に回転数、縦軸に体積効率を表している。この結果から、誤差が 3% の許容範囲に収まっていることを確認した。

次に、1DSM と HPEM の同定結果を比較した。両モデルの BSFC の比較結果を Fig. 7 に示す。各回転時における BSFC が同じく誤差が 3% の許容範囲に収まっていることを確認した。

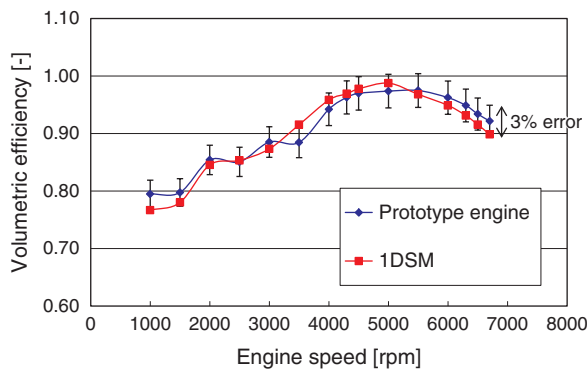


Fig. 6 Comparison between prototype engine and 1DSM

この他、各コンポーネント単位で入出力を確認し、各プラントモデルの挙動を許容誤差範囲内で一致させることができていることを確認している。

5.2. モデル検証

HPEM の検証として、まず段階的同定をおこなった後のプラントモデルを、簡易コントローラモデルと共に MILS に実装し、燃費や加速性能を算出する各種モード走行にて動作確認をおこなった。次に同プラントモデルを以下で説明する構成の HILS に搭載し、実物 ECU と接続して同様の動作確認をおこなった。

Fig. 8 に今回使用した HILS の構成を示す。HILS は、ECU とリアルタイムシミュレータを Load Rack を介して接続する構成となっている。この Load Rack はシミュレー

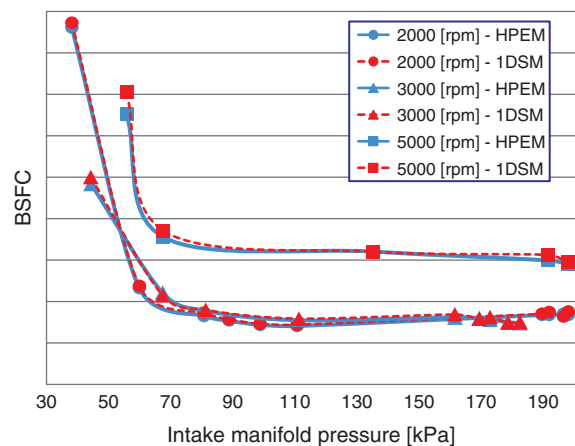


Fig. 7 Comparison of 1DSM and HPEM

タで模擬することが困難な信号を、実デバイスによって補う役割をしており、リニアソレノイド、インジェクタ、DBW、ヒータ抵抗、擬似抵抗等を内包している。

試作エンジンと HILS プラントモデルのそれぞれで、JC08 と NEDC の異なる二つの燃費モード走行をおこなった結果を Fig. 9 に示す。エンジンベンチと HILS の吸入空気量を走行モードごとに比較した。両モードとも実機に近い動的挙動を示しており、このエンジンプラントモデルが特定のモード走行に依存せず ECU 検証に利用可能な精度であることが確認できた。

また、このプラントモデルのHILS上で計算時間をFig. 10に示す。グラフは各タイムステップにおいて、実際の計算時間がどれくらいかかったかを表している。今回の検証では、計算を収束させるため、サンプリング時間を200 μsec で実行しているが、両走行モード共にサンプリングにおけるプラントモデルの計算時間は最大でも90 μsec 未満に収まっており、リアルタイム計算をおこなうにあた

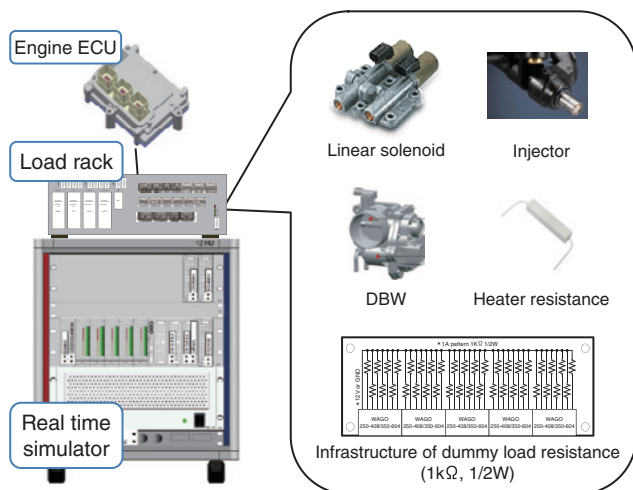


Fig. 8 Hardware-in-the-Loop Simulation (HILS)

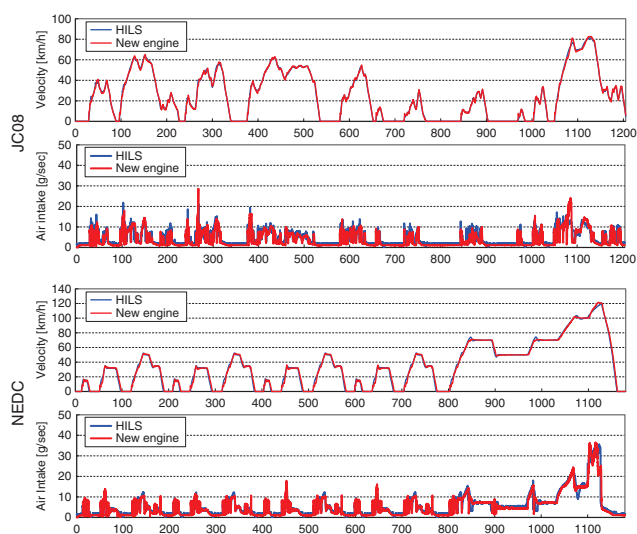


Fig. 9 HIL simulation result

り十分な計算速度を示していることが確認できた。

以上の検証から、作成した HPEM が、コントローラ階層の設計およびテストの MILS と HILS で、共に使用可能な精度と速度を満たしていることが確認できた。

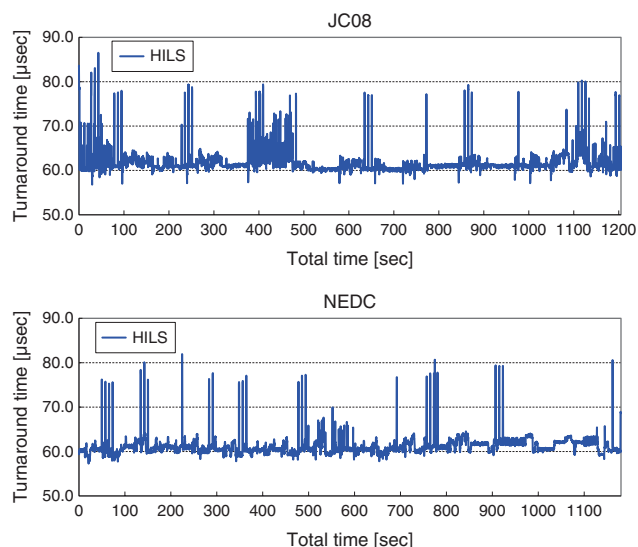


Fig. 10 Turnaround time of HIL simulation

6. まとめ

Honda で MBD-V プロセスを実現するあたり、プラントモデル上の課題となっていた、同階層モデルの不一致と異階層モデルの不整合を解決するため、以下の開発と検証をおこなった。

- (1) コントローラ階層において、設計とテストで共に使用可能な HPEM を開発し、MILS および HILS にてその動作確認をおこない、同階層モデルの不一致を解決した。
- (2) 既存エンジンから 1DSM、HPEM と段階的システム同定をおこなうことができる環境を構築し、異階層モデルの不整合を解決した。

7. あとがき

この HPEM と段階的システム同定環境を活用することで、MBD-V プロセスによる開発効率の向上が見込まれる。今後は開発の中でこの環境を利用した新規制御ロジックの実装をおこない、MBD-V プロセスの有効性を実証していく。

MBD-V プロセスを定着させるためには、これらの環境を継続的に運用、管理していくことが重要である。また、技術者の教育にあたっては多くの課題を含んでおり、これら乗り越えていくためには、開発メンバ全員で将来ビジョンを共有し、戦略的に推進する必要があると考える。

参考文献

- (1) Forsberg, K., Mooz, H.: The Relationship of Systems Engineering to the Project Cycle, First Annual Symposium of the National Council On Systems Engineering(1991)
- (2) Federal Highway Administration: Clarus Concept of Operations, FHWA-JPO-05-072, p.20(2005)
- (3) Schatz, B., Pretschner, A., Huber, F., Philipps, J.: Model-based Development of Embedded Systems, Advances in Object-Oriented Information Systems, p.331-336(2002)
- (4) 独立行政法人情報処理推進機構:「組込みシステムの先端モデルベース開発実態調査」調査報告書 (2012)
- (5) Hasegawa, Y., Akazaki, S., Komoriya, I., Maki, H., Nishimura, Y., Hirota, T.: Individual Cylinder Air-Fuel Ratio Feedback Control Using an Observer, SAE Technical Paper 940376(1994)
- (6) Guzzella, L., Onder, C.: Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems, Springer(2010)
- (7) Wiebe, I. I.: The Combustion Speed in Internal Combustion Piston-Engines-fuel combustion rate equation combining an empirical and a theoretical approach, Collected works of piston engine research, Laboratory of Engines, Academy of Science(1956)

■ 著 者 ■



藤本 茂希



大高 義行



小堂 智史