

特集 : Virtual Testing

10

パワートレイン構想設計のVirtual Testing技術の紹介

Introduction of Virtual Testing Technology for Concept Design of Powertrain

平松 繁喜*1 百田 浩一*2 小森 賢*3
Shigeki Hiramatsu Kouichi Momota Satoshi Komori
徳光 文広*4 城谷 佳孝*5 村井 亜樹*6
Fumihito Tokumitsu Yoshitaka Shirotani Aki Murai

要約

パワートレイン (PT) 開発初期段階の構想設計におけるVirtual Testingに適用することを目的として、シミュレーションシステムPT-VTES (Power Train Virtual Testing and Evaluation System) を開発した。構想設計は製品開発の中で重要な位置を占め、その効率化と検討充実のためにCAEの導入が求められている。しかし、構想設計には一般的なCAEの適用は必ずしも適切ではなく、異なるアプローチのモデル化が必要である。本稿では、まず構想設計で求められるシミュレーションモデルの要件について述べる。次に、それらの要件を実現するために導入した、システムとしてのモデル定式化および階層構造化の概念について説明する。また、シミュレーションを実行するためのシステムの概要と適用事例を紹介する。

Summary

A simulation system, PT-VTES (Power Train Virtual Testing and Evaluation System), has been developed for applying to virtual testing in a concept design of a powertrain. A concept design phase occupies an important place in a product development and needs introducing computer simulations for efficient and scrupulous studies. General simulation models, however, are not always suitable for studies in the concept design, and a new modeling approach is necessary. This paper describes prerequisites of simulation models in the concept design phase of the product development and the basic concepts of PT-VTES that enables to realize simulation models with these prerequisites, as well as the formulation of models by system approach and the organization of models by the concept of hierarchy structure, and introduces the outlines of the computer system of PT-VTES and applicable examples of simulations.

1. はじめに

顧客ニーズに適合したコストパフォーマンスに優れた製品を迅速に市場へ提供するために、当社ではMDI (Mazda Digital Innovation)⁽¹⁾をはじめとする開発の革新を進めている。昨今の自動車開発は、国際的な部品調達や開発拠点の世界的分散によって、時間的・空間的な同時並行・協調活動としての様相を呈している。更に、省エネルギー・低公害・安全性向上など、自動車に対する社会的な要求も高度となり、開発活動は困難さを増している。このような中で高品質の自動車を短期間で開発するためには、開発プロセス

が整然かつ効率的に進むことが求められ、それには開発初期の基礎的な検討の充実が成否を握るといって過言ではない。PTにおいては、開発着手時点において、車両が実現すべき性能目標からエンジンや変速機等のユニットや部品が満たすべき性能・機能を明確化する、構想設計における検討の充実と精度の向上が必要である。

そこで、構想設計段階でPTの性能目標検討を充実させることを主目的として、シミュレーションシステムPT-VTESを開発した。本稿では、このシステムの基本概念と、システムの適用例について紹介する。

*1~5 第3エンジン開発部
Engine Development Dept. No.3

*6 パワートレイン先行開発部
Powertrain Advance Development Dept.

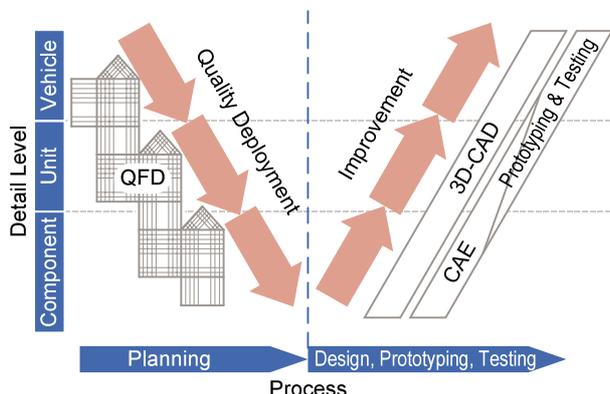


Fig.1 Flow of Product Development

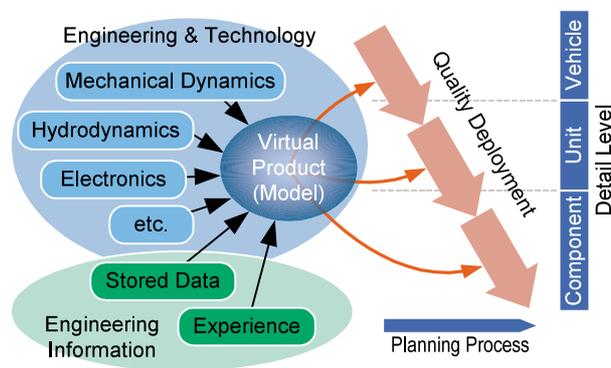


Fig.2 Concept of Product Development with Virtual Product

2. 構想設計とCAE⁽²⁾

2.1 商品開発プロセスの課題

Fig.1は開発プロセスを模式的に表した図で、車両・ユニット・コンポーネントを検討順に上から縦方向に並べ、横方向をプロセスの進捗としている。この図の右側は設計・試作・評価段階を表し、そこではCAEやCADなどコンピュータ援用技術の充実によって効率化が進んでいる。その反面、車両の目標を設定し、それをエンジンや変速機などユニットやそれらの部品の目標に展開していく左側の構想設計プロセスでは、品質機能展開(QFD)⁽³⁾を軸に据えた品質管理ツールが主要な手段として用いられ、その適用や運用には人の経験や英知に多くを依存せざるを得ないというのが実情である。しかし、開発プロセス全体に対して企画段階の検討は極めて重要な意味を持つ。この段階における失敗は開発全体のやり直しを招くことになり、それは人・物・金など開発資源の大きなロスを生むだけでなく、開発の遅れや性能・機能の熟成不足などの大きな原因となる。従って、優れた製品を短期間で開発するためには合理的かつ高精度な目標設定と展開が不可欠である。

そのために、QFDを中心とする品質管理手法に依存した構想設計段階にCAEを導入し、PTの構想設計検討を充実させることを考えた。これが、PT-VTES開発の目的である。

2.2 構想設計で求められるCAE

構想設計は、自動車の「燃費」や「走り」など数値や感覚として表現される性能を、自動車を構成するユニットや部品の具体的構造・機構へと変換するプロセスである。それに対して、一般的なCAEは現象の解析を目的として発展してきた。これらのCAEにとって現象の要因は構造や機構であり、入力すべきデータとして詳細な諸元が存在することが前提となっている。このようなCAEを構想設計に適用すると、幾つもの構造案、機構案をモデル化して組み合わ

せ、自動車全体のシミュレーションを行うことになる。しかし、各諸元はコストや信頼性、レイアウトなど、性能や機能以外の様々な制約の下で設定されるため、案を策定しモデル化するには多くの時間と労力を要する。更に、シミュレーション自体が大規模化して、実行が非常に困難なものとなる。このように、構想設計への一般的なCAEの導入には問題があり、この場面で用いるCAEにはそれらとは異なる以下のような特徴が要求される。

- (1) 全体から部分へと目標展開するとともに、それを逆にたどって目標の妥当性を検証できなければならない。そのため、シミュレーションモデル(モデル)の構成は実車の階層構造と一致しなければならない。
- (2) 自動車は様々な工学分野に基礎を置く装置の集合体であり、分野を越えたモデル化が可能でなければならない。
- (3) 形状や機構がない段階で検討するのであるから、それらに依存せずにモデル化できることが必要である。
- (4) 過去から培われた膨大なデータや経験が有効活用できることが必要である。これには、物理的なデータだけでなく、顧客満足度など市場情報やそれに基づく試験手順など品質管理上の知識も含む。

以上の要件を満たすことによって、構想設計のためのCAEが実現できる。それは、ユニットや部品の構造・機構を与えてその特性・挙動を求める一般的CAEと異なり、ユニットや部品の抽象的な特性を与え、それらを組み合わせで構成される製品全体の性能や機能を求めるCAEであり、仮想製品と呼ぶことができるものである(Fig.2)。

この仮想製品を実現するため、一般化されたシステムとしての定式化と階層構造化の概念をモデル化に導入した。次章でその概要を述べる。

3. 構想設計モデルの概念と構成

3.1 モデルの定式化⁽⁴⁾、⁽⁵⁾

異なる分野に跨るユニットや部品のモデルを実体と同様に統合・分解できるという要求を満たすために、対象を一

一般的なシステムと捉え、モデルを定式化する。

Fig.3は一般化したシステムを表している。全体システムの機能は、サブシステムが入出力で結ばれ相互に作用し構成される。また、システムの外部は環境と呼ばれる。例えば、エンジンや変速機はサブシステム、それらが結び付いたPTは全体システムと位置付けられる。また、環境はドライバの操作や道路勾配など試験条件を意味する。このようなシステムとして捉えることで、内燃機関やモータのようにユニットの種別や立脚する理論分野が異なっても、支配方程式を統一された形式で表すことができる。また、ユニット・部品単独や、それらを統合したPT全体のシミュレーションが自在となる。更に、走りや燃費など様々な評価目的の試験に適応したモデル化が可能となる。このように、一般化したシステムに基づくモデル化によってシミュレーションは高い普遍性を持ち、検討目的に合わせたモデル修正の必要がなくなり、シミュレーションの運用が容易となる。また、データや試験手段など技術的資産の蓄積と活用が促進でき、技術と開発効率の向上にもつながる。

サブシステムの動きは、一般的に次の支配方程式で表される。

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x(t), u(t)) \\ y = h(x(t), u(t)) \end{cases} \quad (1)$$

ここでxは内部状態量, uは入力状態量, yは出力状態量で、これらの状態量は情報・物質・エネルギーなどを意味する。式(1)で表されたサブシステムを統合すると、システムの外部(環境)に他のシステムを持たない、独立した全体システムとなる。特に線形の全体システムでは

$$0 = X\dot{x} + Ax + G \quad (2)$$

と表すことができる。上式に含まれるG, X, Aの各因子の役割や意味を考えると、まずGは系内部の状態量発生源で、エンジンが発生するトルクや摩擦抵抗などである。Aは定常状態を形成する因子で、粘性抵抗係数が代表例である。Xは状態量の過渡的变化に関係する因子で、バネやマスなどエネルギーを保存する因子である。このように、式の各因子には機能と意味があり、それらを利用することで、次節に述べるモデルの体系化が可能となる。

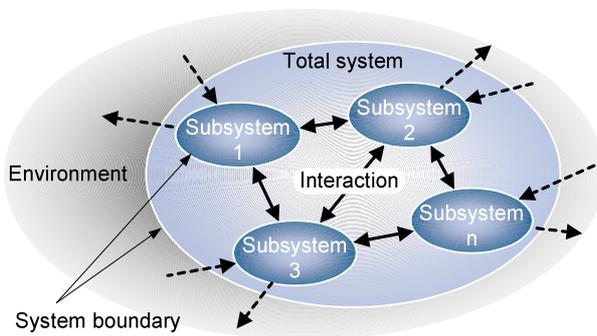


Fig.3 Concept of System

3.2 階層構造の概念⁽⁶⁾

一般的CAEでは、部品やユニットの設計図などを基にし、それらが組み立てられ全体が構成されるという関係に基づいて、部品・ユニットのモデルを繋いでPT全体のモデルを作成することができる。しかし、構想設計ではそれとは逆に、PT全体の性能や機能の目標を実現できる最適なユニットや部品を、多くの選択肢の中で模索する。従って、一般的CAEのように、部品やユニットの設計情報を積み上げて行くモデル化が困難である。そのため、拠り所となる新たな考え方として、階層構造化の概念を導入した。前節で述べたシステムとして一般化したモデルは、その因子と状態量を持つ意味や機能の包含関係による階層構造化によって、Fig.4のように体系化される。これによって、単なる省略ではなく、詳細な構造・機構との結び付きを維持しながら実体の機能を抽象化した汎用的モデル化が可能となる。また、抽象的モデルから、無理や無駄のない適切なモデルの詳細化も可能となる。更に、階層構造化の概念は品質機能展開における要因の展開と類同し、品質機能展開による目標の設定と展開をCAEに持ち込むことが容易となる。

階層構造の概念は、合成関係、集約関係、汎化・特化関係の3つの要素間関係が基本となる。まず、合成関係はFig.4で‘part-of’と表現されているもので、エンジンと変速機が締結されてPTとなるように、複数のモデルが統合され一つのモデルとなる関係を示す。これは同時に、統合されたモデルが部品となるモデルに分解できることも意味する。次に、集約関係は類似機能のモデルを関連付ける概念で、‘member-of’と呼ばれる。例えば、自動変速機(AT)と手動変速機(MT)は類似機能であるから集約関係となる。最後に、汎化・特化関係は抽象と具象の関係を表し、‘is-a’と称される。例えば、変速機はATとMTを包含する概念で、減速比としてモデル化できる。このように、共通機能でモデル化することによって、類似機能の集合に含まれるすべてのモデルを代表する抽象的なモデルが作られる。そして、元の集合との間で抽象的な上位概念とより具体的な下位概念の関係、すなわち、汎化・特化関係を構成する。

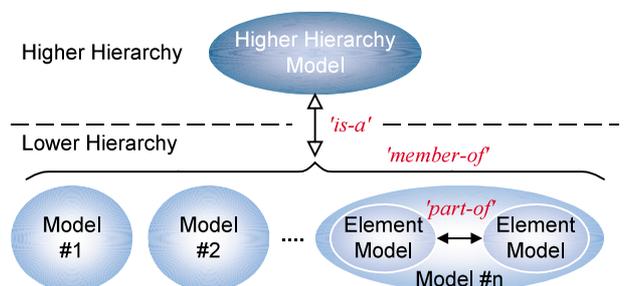


Fig.4 Organaization of Models

3.3 構想設計モデルの基本構成

以上に述べたシステムと階層構造化の概念をモデルとして実現するために、Fig.5に示すように構想設計モデルの基本形を構成した。この基本形では、線形の形式で表現されたサブシステムの支配方程式である式(1)と、その因子の数値を設定する因子演算部から構成される。因子演算部は理論式あるいは実験データから構成され、ユニットや部品のメカニズム・制御が状況に応じて働く状態を、支配方程式中の因子値の変化として表す。そして、基本型として作成されたユニットや部品のモデルをモデル要素(要素)とし、それらの支配方程式を統合することによって全体モデルを構築する。

要素は、階層構造による体系化を利用して、検討対象に応じた詳細度の階層を選択する。例えば、車両性能からエンジンや変速機などPTの各ユニットへの目標展開では、それぞれの抽象度が高い要素を選択し、それらを統合してPT全体モデルを構築する。そして、更に深く検討する際には、階層構造をたどり詳細化・具体化した要素を選択し、単独で、あるいは全体モデルの中に組み込んで検討を行う。

このモデル構造によって、まず、各ユニットに架空の特性を設定してシステム全体に与える効果を評価し、適切な特性を見出す。そして次に、それを実現するための構造や

機構を、システム全体の中で、あるいは全体から切り離して単独で検討することが可能となる。このように、従来QFDとして表現されていた実車や実機が持つ機能とその要因の包含関係をモデルに反映でき、実物と同様に統合・分解することが可能となる。そして、上位階層の目標を下位に展開し、全体との整合を保ちつつ領域を絞り込んだ深く綿密な検討を進めることが可能となる。また、シミュレーション実行中に因子の値は常に変動し、モデルは実質的に非線形となるが、支配方程式は線形の形式を維持している。このことは、シミュレーションの精度・実行速度・頑健性を両立するための重要な要因となっている。

4 . PT-VTESの構成

4.1 PTの機能展開とモデル構成

PTの機能はFig.6のように展開することができる。PT-VTESでは、図の水準3で支配方程式を構成し、下位は因子演算部として表した。この水準では変速機がMT, AT, 無段変速機(CVT)を包含する抽象的な支配方程式として表されるため、因子演算部を交換するだけで変速機の種別を変えることが可能である。更に、変速機については水準4でATとして詳細化した支配方程式を用意し、より詳細な検討に適用している。

シミュレーション実行状態のモデルは、Fig.7に示すように、PTのモデルを中心に据え、操作モデルと評価モデルを接続する。エンジンとATの因子演算部には、それぞれの制御がモデル化され接続される。操作モデルは、データ化された試験標準に従って、試験条件やドライバ操作をPTの各モデルに入力する。ドライバのスロットルおよびブレーキ操作は、時系列データとして与える他、あらかじめ与えた目標速度に自動追従する機能によって計算させる。後者を特にドライバモデルと呼んでいる。また、シミュレーション実行中にリアルタイムで任意な操作を直接入力する機能も用意している。評価モデルは、観測したモデルの状態量から評価基準に基づいて良否を判定する。このように、開発対象のモデルと試験標準とを分離することに

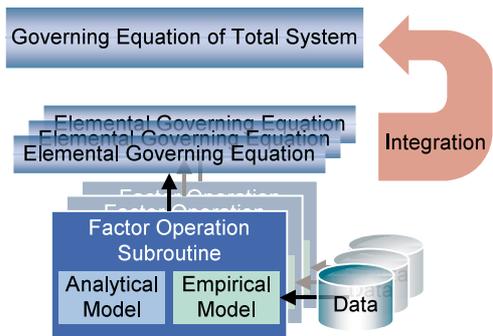


Fig.5 Construction of Simulation Models

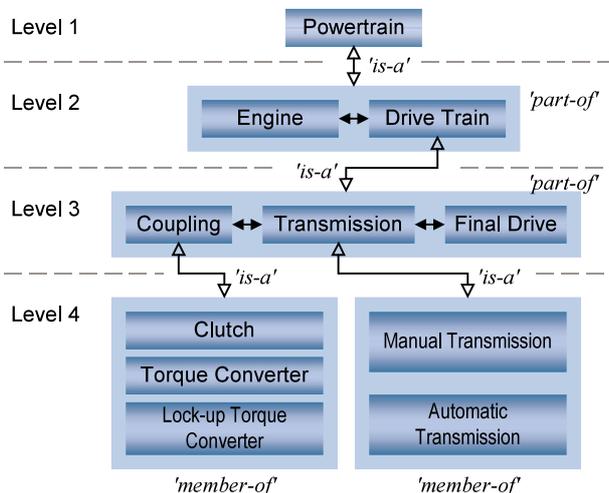


Fig.6 Functional Deployment of Powertrain

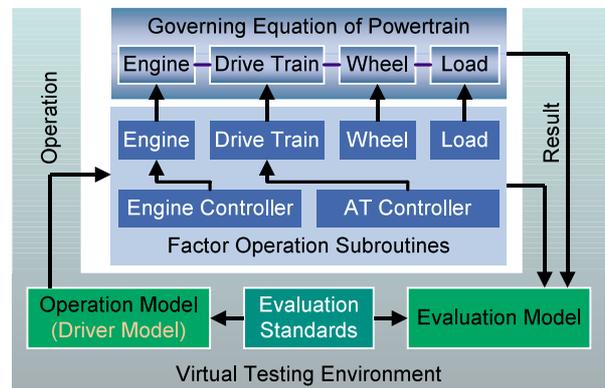


Fig.7 Powertrain Model

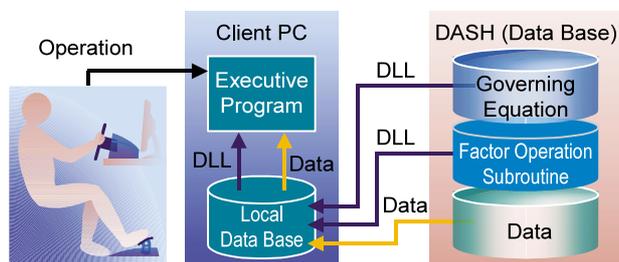


Fig.8 Structure of PT-VTES

よって、後述する動力性能評価と燃費性能評価の事例のように、一つのモデルを用いて複数の試験を机上で実行することが可能となる。このことによって、数多くある試験の机上化を効率的に進められるだけでなく、試験ごとにモデルやデータの整合性を維持することも容易となる。

4.2 PT-VTESのシステム構成

Fig.8に、PT-VTESのシステム構成を示す。システムは、シミュレーション実行部とデータやシミュレーション手順を管理する運用管理部が中心にあり、モデルの支配方程式の定義・演算部と因子演算部がDLL (Dynamic Link Library)としてプログラム化され、実行部に組み込まれる。機構・構造の種別変更に対しては、これらのモデルDLLの組み合わせを変更することで容易に対応することができる。例えば、変速機ではMTやATに対応した因子演算部のDLLを組み込むことで、MTやAT搭載車としてシミュレーションを行うことができる。更に、そのDLLが用いるデータを車種に応じて変更して、任意の仮想車両を構築することができる。操作モデルについても同様にDLLとしてプログラム化し、試験標準に基づいてデータ化した操作条件を与える。また、シミュレーションにアクセル・ブレーキ・シフトレンジ操作などを任意に直接入力するために、操作入力デバイスの接続が可能となっている。

モデルDLLやデータ化された試験標準、特性データは、DASH (Data Analysis and Standardization Headquarters)と呼んでいるPT開発部門の基幹データベースシステムに蓄積して一元管理している。ユーザは必要なモデルとデータをDASHから選択・抽出して手元のパーソナルコンピュータ(PC)にダウンロードし、シミュレーションを実行できる。これによって、一元管理されたモデルとデータ、試験標準に基づいて、関連する部門の多数のユーザが、同時並行的に目標展開や実現手段の検討を行うことができる。

5. 適用事例

本章では、最上位階層である車両の性能目標を、エンジン特性や変速機ギヤ比そして制御のあり方など各PTユニットの目標に展開することを目的として行った、動力性能と燃費性能評価のシミュレーション事例を紹介する。

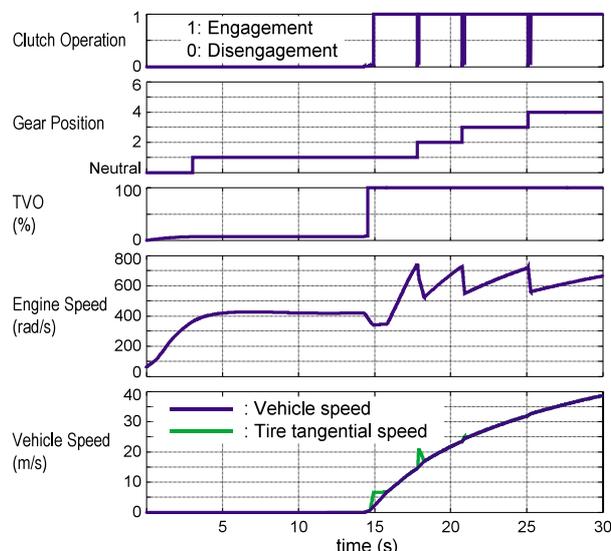


Fig.9 Simulation Result (Full Throttle Acceleration)

5.1 動力性能評価の机上試験

Fig.9は、車両の動力性能を評価する仮想試験の例で、車両は、排気量1.8L4気筒エンジンと6速手動変速機を搭載した乗用車を想定している。この試験は、停止状態で所定のエンジン回転数に維持し、クラッチを係合させると同時にスロットルを全開にして発進する。また、所定のエンジン回転で、スロットルを全開のままクラッチ操作と変速段目の切り替え操作を行い、変速する。計測項目は、一定の速度あるいは距離に到達するまでの所用時間である。

シミュレーションでは、上記スロットル操作 (TVO) およびブレーキ操作を時系列データとしてドライバモデルに与えた。また、変速を行うエンジン回転数を条件として与え、これに従いドライバモデルはFig.9の上から1および2段目に示すようにクラッチ操作と変速段目の切り替えを行っている。クラッチ操作は、1が係合を示している。Fig.9の下から1段目には車両速度と駆動輪接線方向速度を示している。これを見ると、車両走行速度よりも駆動輪の接線方向速度が高いところがあるが、これは駆動力が駆動輪の伝達できる力を越えたためにスリップしていることを表し、同様の現象は実車試験でも確認されている。

5.2 燃費性能評価の机上試験

Fig.10は10-15モードによって、2.3L4気筒エンジンと4速自動変速機を搭載した乗用車の燃費評価をシミュレーションで行った例である。モデルは全開加速試験と同一で、変速機の因子演算部をAT用に交換し、AT制御モデルを接続し、各因子演算部に上記車両の特性データを与えた。また、ドライバモデルを目標車速追従用に交換した。Fig.10の最上段は、ドライバモデルの出力であるスロットル開度である。また、上から2段目には目標車速となる走行モードデータと仮想車両の速度が示されているが、両者はほぼ完全に重なっており、ドライバモデルが目標車速に対して正確

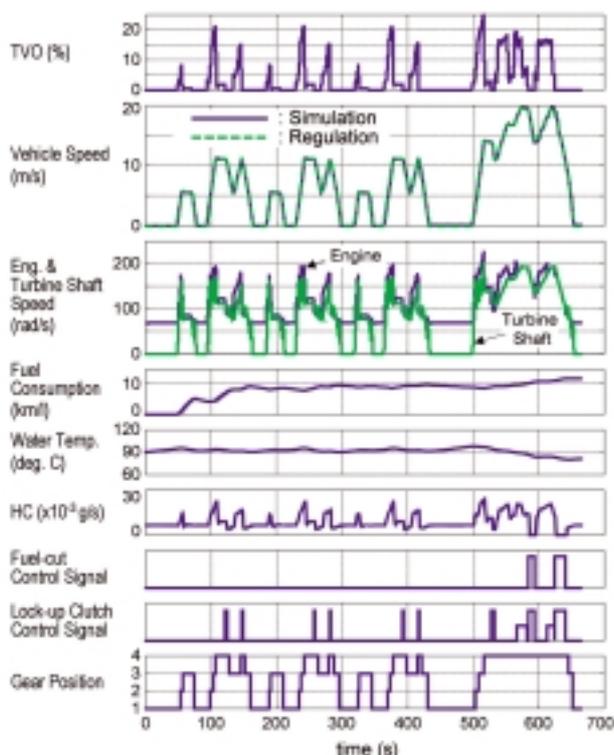


Fig.10 Simulation Result (10-15 Mode)

に追従していることがわかる。3段目は、エンジンとAT入力軸（タービンシャフト）の回転を示している。4段目は燃費率、5段目はエンジン内部の冷却水温度である。また、6段目はエミッションの計算例として、浄化前のHC排出量を1秒ごとの累積値として描いている。Fig.10の下から3段目はエンジン制御を観測した例で、燃費を向上させるために減速時に燃料噴射を停止する減速時燃料カット信号を示している。また、下から2段目と1段目はそれぞれロックアップクラッチを操作するAT制御信号と変速段である。この例からわかるように、各ユニットの制御が相互に与える影響を考慮したシミュレーションが可能となっている。また、燃費率・動力性能の誤差は、数パーセントに止まることが実車テストで検証されている。

以上の例から理解できるように、PT-VTESでは共通のモデルとデータそして実車試験に準じた標準を用いることで、評価項目間やモデルと実車間の一貫性を維持して、車両やユニットの性能・機能を効率的に検討することができる。

6. 適用領域の拡大

PT-VTESのモデル構造は、安定性や実行速度・モデル化の容易さなどの面で、集中定数系の非線形シミュレーションとして優れた特徴を有しており、様々な領域への展開が期待できる。特に、開発後期に試作ユニットや試作車によって行われる評価は構想設計と表裏の関係にあり、これらを机上化するための有効なモデル化手法と考える。例えば、市場における一般ユーザの様々な操作を網羅した包括的評

価は膨大な資源と時間を要し、机上化の必要性が高い。また、制御系開発の領域において適用が広がりつつあるHILS (Hardware in the Loop Simulation) や制御系開発の標準的ツールと位置付けられているSimulinkと連携させることで、車両・ユニットの特質や市場での使われ方をより深く考慮した制御の検討が可能となると考える。このように、適用場面の拡大や他のツールとの連携を進めることにより、開発プロセス全体で活用できるCAEとして発展させていきたいと考える。

7. おわりに

PTの構想設計を支援するCAEとして開発した、PT-VTESの基本概念とシステム構成、適用事例について述べた。

最後に、当システムの開発にご協力を頂いたキャテック(株)、技術・理論面でご指導頂いた角田鎮男工学博士、長松昭男法政大学教授に感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 新見：製造業のデジタル革新，マツダ技報，No.18，pp.3-7 (2000)
- (2) 長松ほか：自動車開発のための仮想製品の概念と運用，日本機械学会論文集（C編），Vol.69，No.678，pp.356-368 (2003)
- (3) TQM委員会：TQM-21世紀の総合「質」経営，東京，日科技連出版社（1998）
- (4) 近藤：システム工学，東京，丸善（1981）
- (5) Arthur D.Hall：システム工学方法論，東京，共立出版（1969）
- (6) D. W. Embleyほか：オブジェクト指向システム分析，東京，東京電機大学出版局（1993）

著者



平松繁喜



百田浩一



小森 賢



徳光文広



城谷佳孝



村井亜樹