

自動車電源システムの VHDL-AMS による モデリングとそのシミュレーション

Modeling and Simulation of an Automotive Electrical Power System with VHDL-AMS

加藤利次*

Toshiji Kato

Doshisha University

Abstract

An analog hardware description language is useful to simulate an automotive electrical power system including control circuits and multi-domain physical systems generally and flexibly. The IEEE standard 1076.1, or IEC 61691-6, which is known as VHDL-AMS (Very-High Speed IC Hardware Description Language-Analog and Mixed Signal) along with the original IEEE standard 1076 for digital circuits, has accelerated this tendency. It is suitable for model-based design (MBD) by multi-domain, multi-level, and multi-organization simulations. It has wide applications as the international standard. This report introduces basic ideas of the language and its application examples to automotive electrical power systems including battery models.

Key words: Model-based design; Model description language; VHDL-AMS; Model distribution; Battery model

1 はじめに

自動車電源システムをはじめ様々な分野における応用技術において、解析設計にシミュレータがよく用いられるようになってきている¹⁻⁶。この背景には対象とするシステムの規模の拡大化や解析の詳細化による複雑さが増してきていることがあげられる。そのためそれらシステムの設計解析には、個々の制御装置や回路、さらには周辺の補助装置を含んだ多様な混在系である対象システム全体を一体としてとらえて、それらの相互の影響を解析する必要が生じてきており、その

設計・解析には各種のシミュレータによる数値的な処理によらざるを得ない場合が多くなってきている。現在では、設計における各段階でこれらツールが積極的に活用され、制御系をはじめとした各部分や全体の動作確認および設計のためのツール、すなわち MBD(Model-Based Design or Development) ツールとして必要不可欠なものとなってきている。さらにこれらは、設計期間の短縮のためのツールとしても活用され、対象システムを分割して各部分を独立・並行した同時(コンカレント)開発をも可能としている^{2,4}。

シミュレータは2つの方向で進化してきている。その1つはシミュレーションアルゴリズムの工夫改善による計算の高精度高効率化である。例えば陰公式の数

* 同志社大学

値積分法による安定な解法や連立一次方程式のスパース行列による高速な解法などがあげられる。またもう1つの方向はシミュレーション対象の汎用化である。つまり「どんなシステムもシミュレーションできる」シミュレータを目指している。シミュレータの汎用化を目指すとき、対象システムの全構成要素が処理可能となっていなければならない。例えば自動車電源システムは主に主回路の電気・電子回路部分と制御回路部分とからなる。前者は抵抗、インダクタ、キャパシタ、スイッチ、電源、オルタネータ、バッテリー等からなる。後者は信号のフローを構成するアナログ制御部分と論理回路素子よりなるデジタル制御部分にさらに分けられる。これら3種類の部分はシミュレータ内ではそれぞれ違った数値処理がされる。またシミュレータは電気系のみならず機械系や熱系等他の物理系を含んでいるようなマルチドメインのシステムにも対応する必要が生じてきた。例えば電気自動車は電気系と機械系との連成系である。シミュレータを汎用拡張化してこのような連成系を処理可能とする工夫が必要があり、実際にその工夫がされてきた。

このようなことを実現するためのシミュレータの汎用化には2つの方法がある。その1つはシミュレータ自身を拡張汎用化するすなわち組み込めるコンポーネントの数をどんどん増やしていく方法である。新しいコンポーネントに対してどんどん拡張していく必要があるため、膨大な量のマニュアルを有するシミュレータまである。この場合、組み込まれているコンポーネントを使う場合は便利であるが、これらの組み合わせで表現できないものはどうすることもできない。これに対して、もう1つはコンポーネントの特性を記述言語でモデリングして、組み込み可能なコンポーネントを新しく作成する方法である。すなわちシミュレータ本体は解析機能のみをもち、記述言語のコンパイラがコンポーネントモデルを解釈・展開のちライブラリ化してシミュレータにモデルデータを受け渡すようにするものである。これによれば記述言語のカバーする範囲でモデルの汎用化が可能である。

このような考えに基づく本格的なモデル記述言語は、例えば SABER⁷ の MAST (Modeling Analog System with Template) 言語⁸ や SIMPLORER⁹ の SML (Simplorer Modeling Language) 言語等がある。しかしながらそれらは単なる1シミュレータのみに有効な言語、すなわちいわば方言であった。そのため、それらの文法・アイデアを基にして1999年に通称 VHDL-AMS と呼ばれる IEEE 規格による標準言語が作成された¹⁰⁻¹³。

しかもこれは同時に IEC 国際規格でありこの言語に対応しているシミュレータが現在では次々と増えつつある。本解説はこの規格化されたモデル記述言語についてその基本的概念およびモデリング例を通して、これらの特長にふれながら、VHDL-AMS によるモデル開発活用法と自動車電源システムのモデル開発への応用を解説する。

2 汎用シミュレータによる MBD

2.1 汎用シミュレータとモデル記述言語

シミュレータはモデリングの情報に基づいて次のような連立微分代数方程式をいわゆるアナログソルバーにより数値処理されて解かれる。

$$f(x(t), \dot{x}(t), t) = 0 \quad (1)$$

ただし t を時間、変数を x , \dot{x} をその時間微分値とする。この方程式の定式化にモデル記述言語をツールとして用いれば、モデル記述情報に基づいてツールが自動的に微分代数方程式を定式化してくれる。

自動車システム等をシミュレーションするためには、多重の混在性、すなわち各種物理系（マルチドメイン）、制御系、デジタル系が混在しているため、その各部の特徴・性質を分類してモデリングする必要がある。VHDL-AMS では、モデルの記述に関して文法が体系化されており、各部分のモデリングが簡便かつ汎用的・階層的に対応可能である。ただしこの過程でいかに簡潔かつ柔軟にツールに動き方を指示できるかがモデル記述の要である。

VHDL-AMS は汎用的なモデル記述言語仕様であって、IC 設計用の回路シミュレータの開発・発展を背景に持つ。回路シミュレータは、1970年代前半に定式化原理として ASTAP や SPICE 等に用いられたタブロー法や修正節点解析法が確立された。1970年代後半にこれらを基にさらなる汎用化や混在システムへの対応を可能とするため様々なモデル記述言語の検討が始められた。例えば1986年に MAST 言語が開発されている^{7,8}。1990年代に様々な記述言語を共通化するため、その規格化が検討された。米国国防総省は、ASIC の動作の記述のために VHDL を開発したが、これがデジタル用の IEEE 規格 1076 としてまとめられた¹⁰。その後、上記規格を拡張してアナログ変数が取り扱えるように検討が始められ、MAST 言語をベースにして1993年に IEEE 規格 1076.1 として VHDL-

AMS の通称で呼ばれるモデル記述言語として登場した¹¹。2000年代には、様々な分野で、例えばドイツ自動車工業会 (VDA) のワーキンググループ (FAT-AK30) 等により自動車部品のモデル開発に応用されてきている¹⁴。

2.2 VHDL-AMS による混在マルチドメインモデリング

前述の多重の混在性、すなわち各種物理系、制御系、デジタル系の混在に対して、それら各部の特徴・性質を分類・整理してモデル記述がされる^{12,13}。まず第1に、物理系のマルチドメイン性についてはすべてを同一の原理で取り扱えるようにするため Fig. 1 に示すスルー (through) 変数とアクロス (across) 変数という概念が用いられ、キルヒホッフの電流則を一般化したスルー変数の平衡方程式として取り扱われる。Table 1 に各系におけるスルー変数とアクロス変数の例を示す、例えば回転系においては、対象の軸におけるすべてのトルクの和は零となる平衡方程式を用いる。VHDL-AMS において回転系はアクロス変数を角度もしくは角速度に選んだ場合の2種類が標準的に用意されており、また任意の物理系が定義できるように汎用的に構成されている。そして第2に、物理系と制御系の混在性に関しては、物理系の平衡方程式と制御

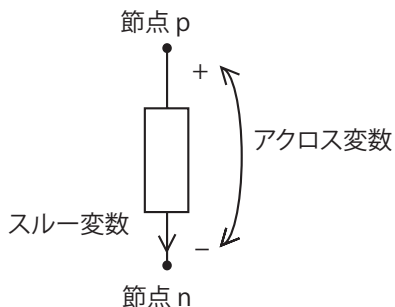


Fig. 1 Across and through variables.

Table 1 Across and through variables (quantities) in various domains.

energy domain	across quantity	through quantity
electrical	voltage [V]	current [A]
magnetic	MMF [AT]	magnetic flux [Wb]
translational	displacement [m]	force [N]
translational_v	velocity [m/sec]	force [N]
rotational	angle [rad]	torque [Nm]
rotational_v	angular frequency [rad/sec]	torque [Nm]
fluidic	pressure [Pa]	flow rate [m ³ /s]
thermal	temperature [K]	heat flux [J/s]

ブロックの信号のフローを表現する制御方程式が混在して定式化され、それらが連立して解かれる。これらの微分代数連立方程式は、微分・積分・代数演算の任意の組み合わせで表現でき、システムモデリングにより自由に定義記述可能である。さらに第3に、アナログ・デジタルの混在性に関しては、上述のアナログ回路部分とは別に、デジタル部分のみが論理レベルの変化をイベントドリブン方式、すなわちデジタル回路内部の信号変化すなわちイベントが生じたときに、その伝搬を処理してシミュレーションする方式でシーケンシャルに解かれる。イベント発生等により、両者の同期が必要な場合には、連携されて反復修正処理がされる。そしてすべてのアナログ部分の方程式は、その中の微分演算子部分が後退オイラー法、台形則、ギア法等により離散化されて、各時間ステップにおいて連立して解かれる。数値的には、微分代数方程式が陰的な関係をそのまま解かれるので、数値処理の順序に対して柔軟性があるため、スイッチ等の素子値の変化が大きい場合にも、数値安定性の確保に対して有利である。

3 VHDL-AMS によるモデル記述

3.1 VHDL-AMS における変数のタイプ

自動車電源等の解析対象システムは、まず主回路と制御回路に分けることができる。さらに制御回路はデジタルおよびアナログ回路に分けられる。まずデジタル部分は元のデジタル用規格の VHDL やその拡張規格を基に記述する。アナログ部分は quantity と名付けられたアナログ変数により記述する。これらをキルヒホッフの電流則 (KCL) 等の物理系の平衡方程式が成り立つ双方向性の変数の branch quantity とこのような関係のないシグナルフローに適した free quantity とに分けて記述する。

自由変数は、様々な補助記述等に用いられ、信号変数であって物理的なものではない。必要に応じて定義され、文字通り自由に活用できる。基本的に定義された自由変数の数だけ、その特性方程式が定義される。ただし制御信号変数 (Interface Quantity) として用いられる場合は、入力節点 (in) から出力節点 (out) への1方向的である特徴があり、出力節点の数だけ制御信号の特性方程式が定義される。

デジタル論理変数は、元のデジタル用の言語 VHDL により記述され、イベント変数として定義されるため、上記のアナログの方程式とは全く別に解かれる。

従って VHDL-AMS における全体の連立方程式数は、物理平衡方程式の数と上述の各コンポーネントの特性を定義する連立文 (simultaneous statement) の数の和となる。物理平衡方程式はモデルの接続情報から直接的に構成されるため、モデリングのポイントは各コンポーネントの特性を示す連立文の記述法となる。このコンポーネントの特性の方程式数は、定義されたスルー変数、制御信号出力変数、制御信号以外の自由変数の数の総和となる。すなわち、それら変数の数と以下に記号 “==” を用いて記述する連立文の数は一致する。

3.2 モデリング例

VHDL-AMS の特長は規格で記述可能な範囲内の任意のコンポーネントが柔軟に定義できることである。そのため逆にそれぞれのコンポーネントを記述して与えてやらなければならない。抵抗 resistor の記述例を Fig. 2 に示す。まず最初の 2 行でシステムの定義ファイル、すなわちスルー変数やアクロス変数、グラウンド節点、V や A 等の単位、誤差のトレランス等をパッケージングしたものを取り込む。次にポート変数を entity として定義する。そしてコンポーネントの特性そのものを記述するために、アクロス・スルー変数を定義して、これらを用いて電圧と電流のオームの法則の関係を連立式記号 == で記述している。VHDL-AMS による他のモデル記述例を Fig. 3 ~ 5 に示す。まずダイオードの記述を指数関数形の非線形抵抗としてモデリングしたものを Fig. 3(a) に、オン抵抗・オフ抵抗の切り替えモデルとしたものを Fig. 3(b) に示す。(a) は端子電圧電流特性を指数関数による 1 つの式で定義しているが、(b) はオンもしくはオフを端子電圧

```
library IEEE ;
use IEEE. electrical_systems. all ;
entity resistor is
    generic (res : resistance) ;
    port (terminal p, m : electrical) ;
end entity resistor ;
architecture behav of resistor is
quantity v across i through p to m ;
begin
    v == i*res ;
end architecture behav ;
```

Fig. 2 VHDL-AMS model of a resistor.

の正負による if 文で判定している。いずれも場合も物理平衡方程式が解かれる際に動作点が定まるまで反

```
library IEEE ;
use IEEE. math_real.all ;
use IEEE. electrical_systems.all ;
entity diode is
    generic (iss : real := 1.0e-14 ;
            n : real := 1.0 ;
            tau : real := 1.0e-6 ;
            cj0 : real := 100.0e-9 ;
            vj : real := 0.7 ;
            rs : real := 0.05) ;
    port (terminal a, c : electrical) ;
end diode ;
architecture behav of diode is
quantity vd across id through a to c ;
constant vt : real := 0.0258 ;
begin
    id == iss*(exp((vd-rs*id)/(n * vt))-1.0) ;
end architecture behav ;
(a) Nonlinear resistor model
```

```
library IEEE;
use IEEE. electrical_systems. all ;
entity diode is
    generic (r_on : real := 1.0e-3 ;
            r_off : real := 1.0e5) ;
    port (terminal a, c : electrical) ;
end;
architecture behav of diode is
quantity vd across id through a to c ;
quantity r : real ;
begin
    if vd'above (0.00) use
        r == r_on ;
    else
        r == r_off ;
    end use ;
    vd == r*id ;
end architecture behav ;
(b) On-off switch model
```

Fig. 3 VHDL-AMS model examples of diodes.

復修正計算がされる。また (b) では特性式が見かけ上、2 式記述されているが、それらは排他的な条件により記述されているため、1 式とみなされる。また制御回路の例として Fig. 4 に加算器の例を示す。この場合の変数は制御信号であるため、入出力を in および out により定義している。特性式は入力変数の和が出力であるという記述となる。最後に電気機械回転系にわたる連成系として DC モータの例を Fig. 5 に示す。電気系および回転系のポートおよび各変数の定義の後、電気系および回転系における方程式を記述するだけでよい。他の物理系および連成系の場合も同様で、必要なパッケージングの呼び出しの後、必要な系の必要な変数の定義およびそれらの関係式の記述をすればよい。

4 自動車電源システムの解析例

4.1 構成システム

以上の VHDL-AMS によるモデル記述法を Fig. 6 に示す自動車電源システムに適用した例を示す。エンジンモデルからの出力が、クラッチモデル、変速機モデル、ディファレンシャルギアモデルを介して車輛モデルに伝達し、車輛モデルで車速を計算することができる。また、今回の解析では JE05 モードでの走行パターンでの燃費を求めることを目的としている。

VHDL-AMS モデルによる解析結果の精度検証のため、国土交通省 (MLIT) より公開されている重量車用燃費計算プログラムとの比較を行う。そのため VHDL-AMS モデルもこれに対応するようにパラメータ設定している。またこのプログラムにはオルタネータやバッテリーといった電装品は含まれてないため、まずこれら電装品を省いたモデルでの比較を行った。エ

```
entity sum is
  generic ( k1 : real := 1.0 ;
            k2 : real := 1.0 ) ;
  port ( quantity in1, in2 : in real ;
        quantity output : out real ) ;
end entity sum ;
architecture behav of sum is
begin
  output == k1*in1 + k2*in2 ;
end architecture behav ;
```

Fig. 4 VHDL-AMS model of an adder.

ンジンの最大回転数などの性能や、変速機の段数および各ギア比、燃費データマップなど一部の設定は自由に変更できるが、走行パターンについては JE05 モードで固定となっている。

VHDL-AMS モデルによる結果を国交省プログラムのもものと比較して Fig. 7 に解析波形を示す。シフトの切替およびクラッチの切り離し始めのタイミングは、全て比較対象である国交省プログラムと同じように動作するように設定した。PI 制御により計算車体速度は目標速度に良好に追従しており、変速機モデルなどの非線形なモデルも正常に動作している。また走行中の消費燃料に関して両者において一致した結果が得られている。

本システムの解析結果から求めた燃費と、国土交通省の燃費計算プログラムの燃費を比較した結果を Table 2 に示す。本システムで計算された重量車に対する燃費は 8.9 km/L、国交省プログラムの結果 8.8 km/L と比較して誤差 0.6% とほぼ同等の結果を得られている。この結果から、今回開発した VHDL-AMS モデルで国土交通省プログラムと同程度の精度で計算が可能であることが示された。

```
library IEEE ;
use IEEE.mechanical_systems.all ;
use IEEE.electrical_systems.all ;
entity DC_Motor is
  generic ( r_wind : resistance ;
            kt : real ;
            l : inductance ;
            d : real ;
            j : mmoment_i ) ;
  port ( terminal p, m : electrical ;
        terminal shaft_rotv : rotational_v ) ;
end entity DC_Motor ;
architecture behav of DC_Motor is
  quantity v across i through p to m ;
  quantity w across torq through shaft_rotv -
    to rotational_v_ref ;
begin
  torq == -1.0*kt*i + d*w + j*w'dot ;
  v == kt*w + i*r_wind + l*i'dot ;
end architecture behav ;
```

Fig. 5 VHDL-AMS model of a DC motor.

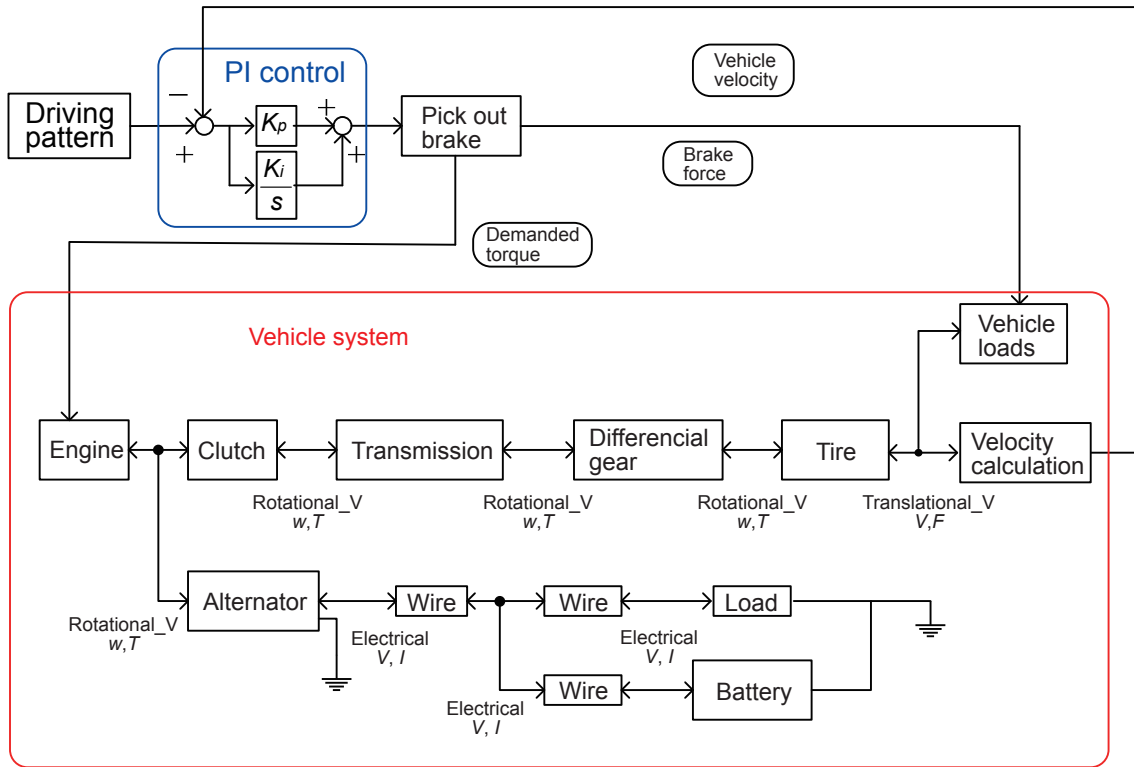


Fig. 6 Block diagram of a vehicle system equipped with electrical components.

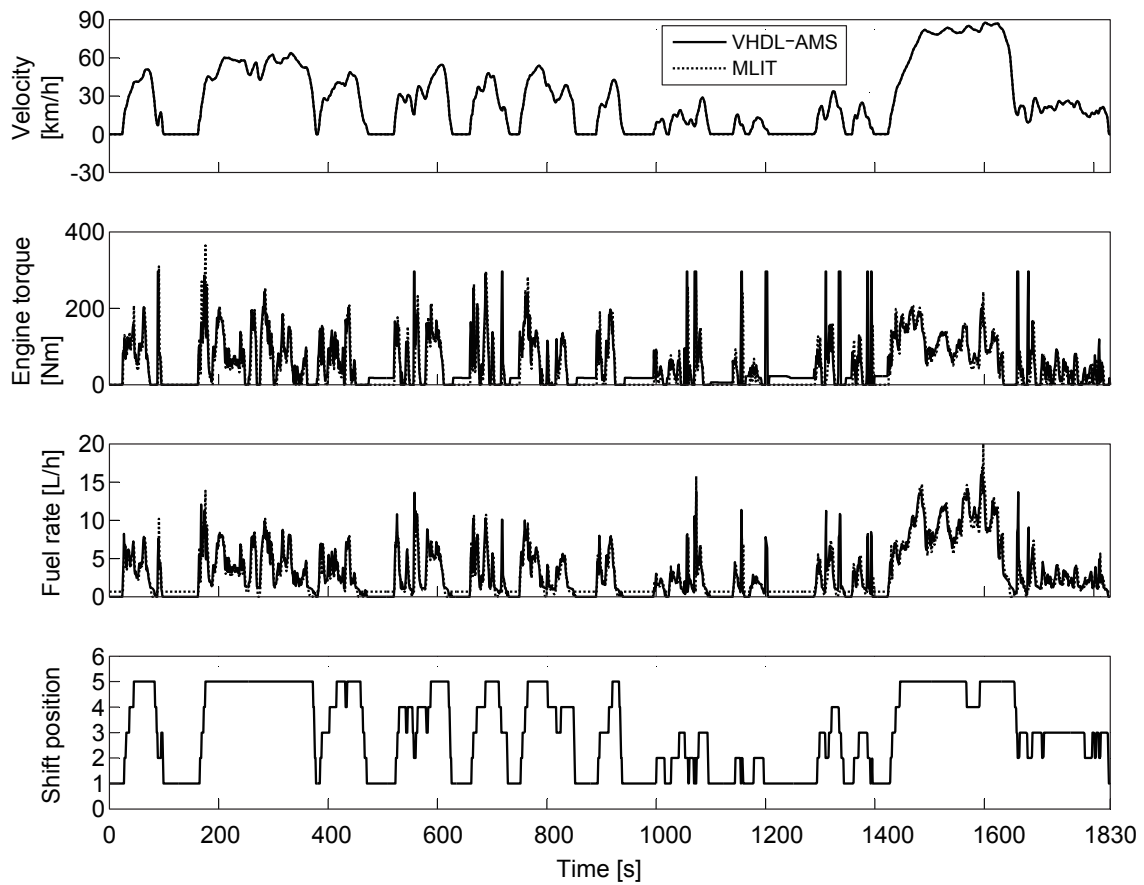


Fig. 7 Simulation results of a manual transmission vehicle.

Table 2 Computed fuel rate results of a manual transmission vehicle.

	Fuel [L]	Fuel rate [km/L]	Diff. [%]
MLIT program	1.56	8.9	-
VHDL_AMS model	1.57	8.8	-0.6

4.2 電装システムを追加したシステム

次にオルタネータ、ワイヤ、バッテリーモデル等を追加した Fig. 6 に示す全負荷を含むシステムで、電装システムがどの程度燃費に影響を与えるかを検証した⁵。オルタネータについては、FAT-AK30 より公開されているデータモデルを使用した。

電装品を含まない場合との燃費の比較を Table 3 に示す。本システムでは、電装品を含まない場合と比べて燃費が 4.1% 悪くなっている。これは、エンジンでの消費燃料はエンジンの回転角速度と出力トルクによって決まり、走行パターンは同条件のため回転角速度に大きな変化はないが、オルタネータを駆動させるためにより多くのトルクを出力するようになったためである。

5 バッテリモデルの検討

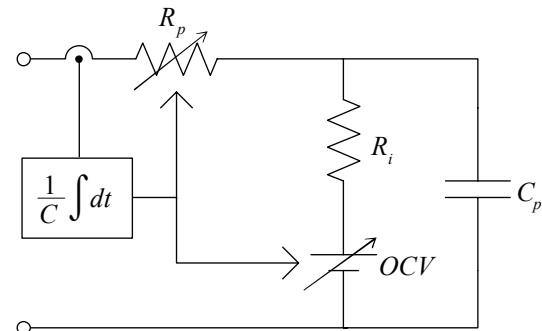
5.1 バッテリモデル

バッテリーモデルのモデリングは化学反応式を基にしたモデルと電気的特性を等価回路で表現したブラックボックスモデルがある。化学反応式を用いたモデルはバッテリー内部の化学反応式をそのまま表現できる利点があるが、モデルパラメータの決定等に電池の専門知識が必要になる等の技術的に困難が伴う場合が多い。そのためバッテリーの測定電気的特性に基づいて、それより等価回路を求める方法が、電気技術者であれば取り扱い易いためよく用いられる⁶。

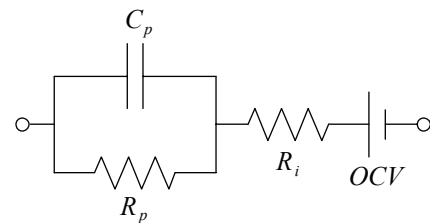
自動車技術会の国際標準記述によるモデル開発・流通検討委員会で検討されてきたバッテリーの基本的な参考モデルの例を Fig. 8(a) に示す。モデルは、充放電に伴って生じる開回路電圧 (OCV ; Open Circuit Voltage) からの抵抗分極、活性化分極、濃度分極による電圧変化を表現できるように構成される。すなわち開回路電圧は電圧源 OCV により、抵抗分極は R_i により、活性化分極、濃度分極はまとめて R_p, C_p の直列回路により表現している。OCV と R_i は、充電率 SOC (State of Charge) に依存するものとしている。そのため各 SOC に対して測定した充放電特性より、 R_p, C_p を求めている。逆にモデルでは、端子電流を積分して充電率

Table 3 Computed fuel rate results of a manual transmission vehicle equipped with electrical components.

	Fuel [L]	Fuel rate [km/L]	Diff. [%]
MT	1.57	8.9	-
MT with elec. comp.	1.64	8.5	-4.1



(a) Basic model



(b) RC parallel model

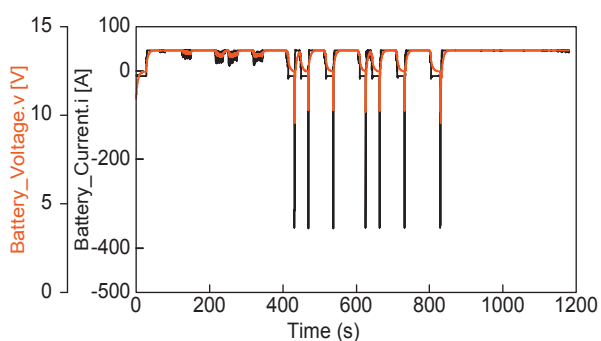
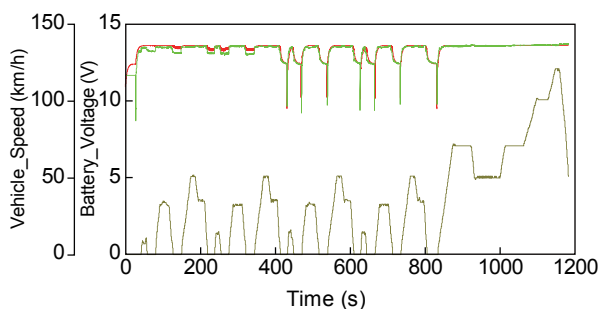
Fig. 8 Basic battery models.

SOC(State of Charge) を求め、それに応じて OCV と R_i を変化させるモデルとなっている。

5.2 自動車電源システムにおける充放電特性のシミュレーション

上述のバッテリーの基本参考モデルを用いてスタータによる放電や走行時のオルタネータによる充電特性のシミュレーションを行った。その解析波形を実測結果とあわせて Fig. 9 に示す。まず (a) において、下部の山状の走向パターンに対して充放電に伴う電圧波形の変化が上部に示され、シミュレーション結果が実測結果によく一致している。また (b) はその際にバッテリーの充電電流と電圧波形を示している。

本シミュレーションで用いたバッテリーモデルは当初基本的なものであったが、その後さらに上記委員会で検討が重ねられ、RC 直列回路が Fig. 8(b) に示す RC 並列回路に改善されている⁶。さらに活性化分極、濃度分極による電圧変化をよりよく表現するため、現在では RC 並列回路の多段接続の構成が検討されている。



(b) Battery voltage and current

Fig. 9 Simulated results using the basic battery model and measured results.

6 まとめ

VHDL-AMS を用いたモデリングによりシミュレーションを行うことは主に次の5つの利点がある。

- (1) 言語のカバーする範囲が広いこと、多様な混在性を持つマルチドメインシステムを柔軟かつ汎用的にモデル記述することができる、
- (2) アナログ・デジタル (AD) の連携すなわちイベントによるシミュレーション時間ステップの制御に対応した言語である、
- (3) モデル記述言語としてあいまいさがなく厳密に解析検証されている、
- (4) IEEE 規格 1076.1 であって、同時に国際標準規格 IEC 61691-6 である、
- (5) 数値的には微分代数方程式が陰的な関係をそのまま解かれるので、その解法処理に対して柔軟性がある。

本解説においては、VHDL-AMS によるモデル記述の例として、機械系コンポーネントと電気系コンポーネントをモデル化しモデル上で制御を行う自動車電源システムでの適用例やバッテリーモデルの活用例を紹介した。上記の特長を生かして、VHDL-AMS によるモ

デル記述を用いた MBD は様々な応用システムへの応用が今後期待される。

最後に普段よりモデル作成等に関して議論や検討していただいている自動車技術会の国際標準記述によるモデル開発・流通検討委員会のメンバーに深謝します。

文献

1. パワーエレクトロニクスシステムにおけるモデリングとシミュレーション技術協同研究委員会：電気学会技術報告，第 1114 号 (2008).
2. T. Kato, K. Tsuji, and S. Shimada : 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, Vol.7, Part 1, 157-160 (2013).
3. K. Tsuji and T. Kato : 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, Vol.7, Part 1, 161-165(2013).
4. 加藤利次, 辻公壽, 嶋田敏, 早田克久, 西田知史, 2013 年自動車技術会春季大会, No.406-20135391 (2013).
5. 関末崇行, 辻公壽, 小川誠, 深田隆文, 谷本功一, 引田栄, 上田雅生, 加藤利次, 2013 年自動車技術会春季大会, No.407-20135490 (2013).
6. 横山努, 藤田幸雄, 小池喜一, 河原洋平, 市原純一, 辻公壽, 加藤利次, 2013 年自動車技術会春季大会, No.408-20135492(2013).
7. *Saber Manuals*, Synopsys Corporation.
8. H.A. Mantooth and M. Fiegenbaum : *Modeling with an Analog Hardware Description Language*, Kluwer Academic Publishers, (1995).
9. *Simplorer Manuals*, Ansoft Corporation.
10. *VHDL Language Reference Manual*, IEEE Standard, 1076-1987 (最新のものは 2008 年).
11. *VHDL Analog and Mixed-Signal Extensions*, IEEE Standard 1076.1-1999, IEC 61691-6 (最新のものは 2009 年) .
12. 加藤利次 : 平成 16 年産業応用全国大会, Vol.I, No.1-S11-3, pp.I-75-80 (2004).
13. P.J. Ashenden, G.D. Peterson, and D.A. Teegarden : *The System Designer's Guide to VHDL-AMS*, Morgan Kaufmann Publishers, (2003).
14. FAT-AK30 (Working Group: Simulation of Mixed Systems with VHDL-AMS) ; http://fat-ak30.eas.iis.fraunhofer.de/index_en.html.