

ドライブシステムのエネルギー動特性を精度よく予測できるEVシミュレータ

Electric Vehicle Simulator for Evaluating Dynamic Energy Performance of Drive Systems with High Accuracy

石井 恵奈 吉田 充伸

■ISHII Ena

■YOSHIDA Mitsunobu

近年、走行中に二酸化炭素(CO₂)を排出しない電気自動車(EV)が注目されているが、ガソリン車に比べ航続距離が短いという課題がある。EVの航続距離を延ばすためには、車両に搭載するドライブシステムの構成コンポーネントについて、走行時の電力消費を把握しエネルギー損失を少なくする設計が求められる。

東芝は、EVドライブシステムの主要コンポーネントであるモータ、インバータ、及びバッテリーを開発し製品化しており、今回、それらの電気・制御系モデルと車両の機械系モデルを組み合わせ、車両全体の動作を模擬するEVシミュレータを開発した。EVシミュレータは、走行時に車両やコンポーネントの諸元が車両全体の電力消費に与える影響を評価でき、EV搭載時の性能を意識したコンポーネントの開発とともに、EVを含むエネルギーマネジメントシステムの設計などスマートコミュニティ技術の開発にも活用できる。

Although attention has recently been focused on electric vehicles (EVs), which emit no carbon dioxide while running, their shorter mileage per charge compared with the mileage of gasoline-powered cars has been hindering their dissemination. In order to increase the mileage per charge of EVs, it is necessary to assess the energy consumption of each component of the vehicle while it is being driven.

Toshiba has been developing and releasing motors, inverters, and batteries for automotive use, which are the main components of the drive system of EVs. We have now developed an electric vehicle simulator that integrates electrical and control models of a drive system and mechanical models of a vehicle body, to understand the behavior of an entire vehicle system. The electric vehicle simulator can be used not only for estimation of the energy consumption of each component, but also for the design of smart community technologies such as energy management systems that include EVs within their scope.

1 まえがき

近年、走行中にCO₂を排出しない環境対策車として、また、社会インフラと連携した蓄電システムとしてEVが期待されている。東芝は、EVドライブシステムの主要コンポーネントである永久磁石リラクタンスマータ (PRM: Permanent-Magnet Reluctance Motor)、インバータ、及び二次電池SCiBTMを開発し、製品化している⁽¹⁾。また当社は、国内外のスマートコミュニティ実証試験に参画し、地域や家庭など様々な単位でEVを含むシステムのエネルギーマネジメント技術や交通システム技術を開発している⁽²⁾。

EVの普及を加速するためには、ガソリン車に比べ短い航続距離を延ばすことが不可欠である。そのためには、モータ、インバータ、バッテリーといったコンポーネントの開発、設計において、車両に搭載して走行した際の挙動から電力消費を正確に把握し、走行時の損失が少なくなるような特性を目指すことが必要である。

また、スマートコミュニティの中でEVが活躍する場面として、EV搭載のバッテリーを家庭用などの電源として利用する状況が考えられる。このような場面では、その後予定される

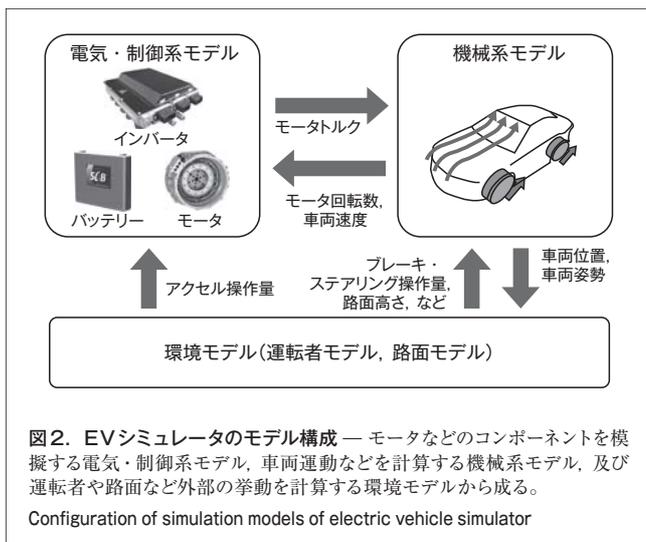
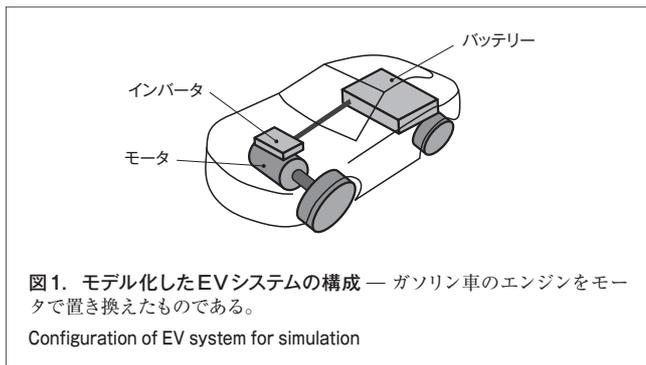
走行に必要な電力を把握できれば、必要量を残して利用することが可能になる。更に、多数のEVが走行する環境では、各車両が必要とする充電量を見積もることができれば、公共の充電ステーションの使用時間を効率的に割り当てられるようになる。このように目的地までの移動に必要な電力を正確に見積もることができれば、スマートコミュニティの中でEVをより効果的に利用できるようになる⁽³⁾。

ここでは、EV走行時の電力消費を把握するために開発した、EVドライブシステムを構成する各コンポーネントの電気・制御系モデルと車両の機械モデルを組み合わせ車両全体の動作を模擬するEVシミュレータについて述べる。更に、その妥当性を確認するために行ったシミュレーション結果と実車走行試験との比較評価について述べる。

2 EVシミュレータの概要

今回、モデル化の対象としたのは、ガソリン車のエンジンをモータに置き換えたEVシステムである(図1)。

開発したEVシミュレータのモデル構成を図2に示す。モデルは電気・制御系モデル、機械系モデル、及び環境モデルの



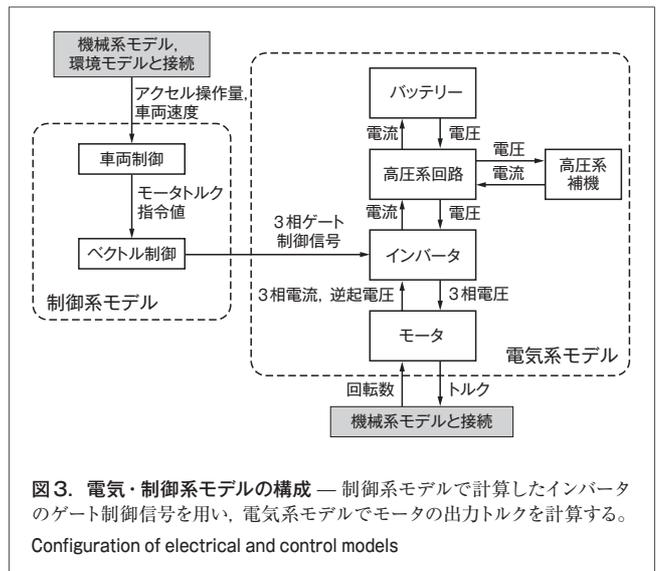
三つから構成される。電気・制御系モデルでは、モータ、インバータ、バッテリー及びコントローラを模擬し、モータが発生するトルクを計算する。機械系モデルでは、モータが発生するトルクや車両に加わる外力から車両の位置と姿勢を計算する。環境モデルでは、運転者や路面などの車両システム外部の挙動を計算する。運転者モデルは、時系列の速度情報といった与えられた走行シナリオに応じて、ペダルやステアリングなど車両への入力を計算する。路面モデルは、あらかじめ定義された道路情報と車両の位置や姿勢から、タイヤ接地点における路面の高さや、傾斜、摩擦係数などを計算する。

電気・制御系モデルと機械系モデルの詳細と特徴について、以下に述べる。

2.1 電気・制御系モデル

電気・制御系モデルの構成を図3に示す。

制御系モデルは、車両制御モデルとベクトル制御モデルから成る。車両制御モデルはECU (Electronic Control Unit) の動作を模擬し、アクセルペダル入力と車両速度に応じてモータトルク指令を生成する。ベクトル制御モデルはベクトル制御器を模擬し、モータトルク指令からモータの電機子に流す電流値を計算し、求めた電流になるように3相インバータのゲート制御信号を生成する。



電気系モデルは、バッテリー、高圧系回路、高圧系補機、インバータ、及びモータの各モデルから成る。

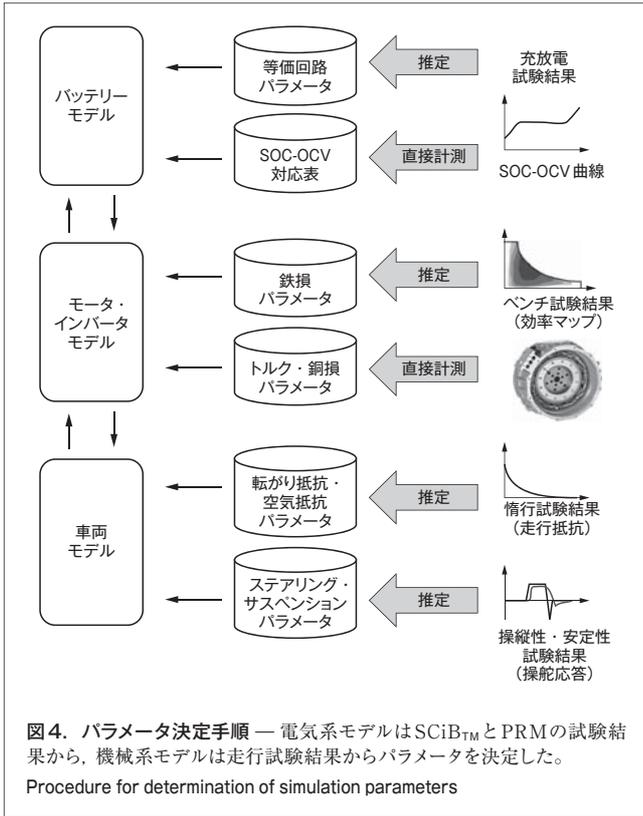
バッテリーモデルはSCiB™を模擬したモデルである。このモデルでは端子電流を入力とし、電流を積分することで充電電圧によるSOC (State of Charge : 充電状態) 変化を計算してSOCに対応するOCV (Open Circuit Voltage : 開回路電圧) を求める。続いて、等価回路を用いて内部抵抗による電圧降下を計算し、端子電圧を求めて出力する。SOCとOCVの関係はテーブルで与える構成とし、SCiB™の特性を反映した値を用いた。また等価回路の各パラメータは、シミュレーション結果がSCiB™の充放電試験の結果と一致するように設定した(図4)。

高圧系回路モデルは配線部品の抵抗による電圧降下を表すモデルである。高圧系補機モデルは空調用コンプレッサなどの高電圧電源を用いる補機の電力消費を抵抗による電力消費としてモデル化したものである。なおEVの補機には、高圧系補機の他にECUなどの低電圧電源を用いるものもある。

インバータモデルは3相のハーフブリッジインバータを模擬したモデルで、各相のゲート信号に応じて出力電圧を計算する。

モータモデルはPRMを模擬したモデルである。まず、インバータモデルから出力される3相電圧をモータ座標系のd, q軸に変換する。次に、PRMのd, q軸等価回路から導出される電圧方程式を解いてd, q軸の電流を計算し、最後に、d, q軸電流からトルク方程式を用いて出力トルクを計算する。ここで用いるd, q軸等価回路は、モータの電氣的損失を構成する銅損と鉄損の両方を模擬できる構成になっている。

等価回路のパラメータのうち、出力トルク及び銅損に関わるパラメータはPRMを直接測定した値を用い、鉄損に関わるパラメータはモータモデルのシミュレーション結果がPRMのベンチ試験結果と一致するように定めた(図4)。また、一部の



パラメータは電流によって非線形に変化するため、電流をインデックスとするテーブルを用いた。

このようにコンポーネントの試験結果を用いてパラメータを設定したため、電気系モデルは当社製コンポーネントの特性を反映したものになっているのが特徴である。

2.2 機械系モデル

機械系モデルは、動力伝達系モデルと車両運動モデルから成る。

動力伝達系モデルはモータの出力トルクから各輪のドライブシャフトの駆動トルクまでの動力伝達系を模擬しており、ギアによるエネルギー損失や、シャフト類のねじり剛性、粘性などのモデルを含んでいる。

車両運動モデルは、各輪のドライブシャフトに加わる駆動トルクと車体に加わる力から車両の位置と姿勢を計算するモデルであり、タイヤ、ホイール、ブレーキ、サスペンション、ステアリング、及び車体の運動の各モデルから成る。タイヤモデルでは、タイヤの位置、姿勢、及び角速度から接地点に働く力、トルク及びホイールに伝わる力を計算する。ホイールモデルでは、駆動トルク、ブレーキトルク、及びタイヤトルクからホイールの角速度を計算し、ブレーキモデルでは、運転者モデルからの入力であるブレーキペダル操作量からブレーキが発生するブレーキトルクを計算する。サスペンションモデルとステアリングモデルでは、運転者モデルからの入力であるステアリングホイールの角度、及びタイヤ接地面に働く力とトルクから車体に

対するホイールの位置と姿勢を計算する。車体の運動モデルでは、タイヤやサスペンションなどの各モデルで計算される力や空気抵抗などを足し合わせ、車両の位置と姿勢を決定する。

機械系モデルのパラメータは、実車による走行試験結果とシミュレーション結果が一致するように定めた。具体的には図4に示すように、一定速度で走行した状態で動力を切断して車両が静止するまでの速度変化を調べる惰行試験から転がり抵抗と空気抵抗に関わるパラメータを決定した。また、走行中に操舵(そうだ)を行い車両の横方向の応答を調べる操縦性・安定性試験の結果からステアリングとサスペンションに関わるパラメータを決定した。

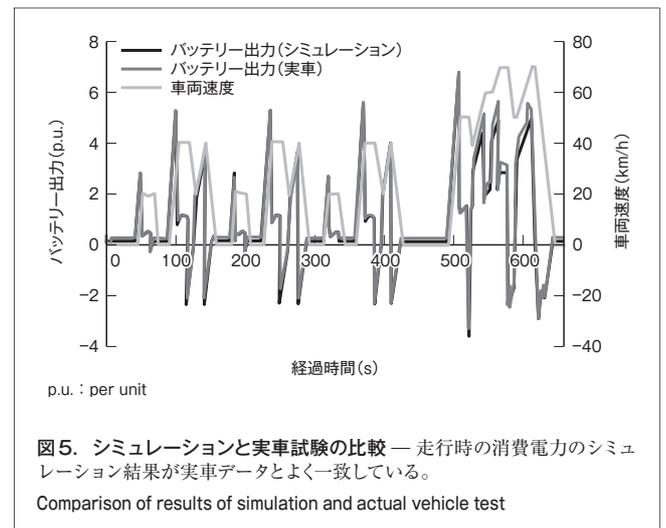
このように、機械系モデルがサスペンションの弾性変形やステアリングの影響を考慮したモデルになっているため、路面の凹凸や操舵の影響も再現できるという特徴がある。

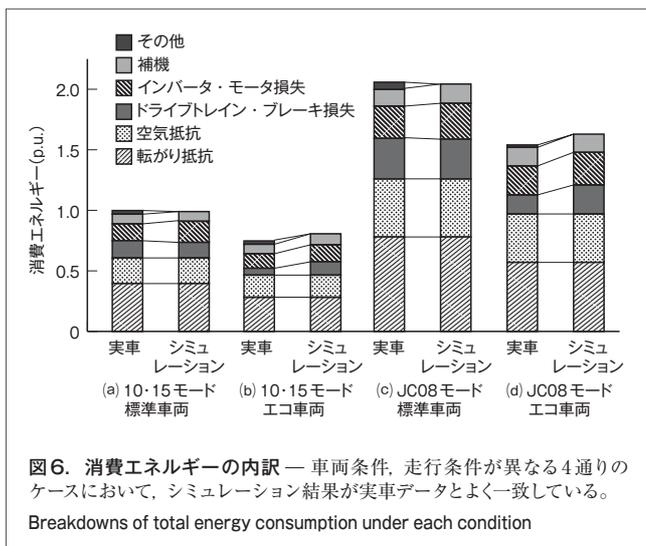
3 実車試験との比較評価

開発したEVシミュレータの妥当性を評価するため、シミュレーション結果と実車試験結果の比較評価を行った。

評価に用いた車両は小型乗用車である。車両条件は、標準的なタイヤを用いて標準的な割合で回生する制御を適用した場合(以下、標準車両と呼ぶ)と、低抵抗タイヤを用いて回生量が多くなるような制御を適用した場合(以下、エコ車両と呼ぶ)の2ケースとし、それぞれの車両条件に対して国土交通省が定めた燃費の試験方法である10・15モードとJC08モードの2ケースのパターンで走行し、合計4通りの検証を行った。

標準車両で10・15モード走行を行ったときのバッテリー出力(消費電力)を、シミュレーション結果と実車試験結果を比較して図5に示す。バッテリー出力は正が放電、負が充電を表しており、10・15モード走行時の平均出力を1として正規化した。加速時や定速走行時などバッテリー電力を消費して走行して





いるときだけでなく, 減速時にモータからバッテリーに電力が回生されている区間でも消費電力のシミュレーション結果が, 実車試験の結果とよく一致している。

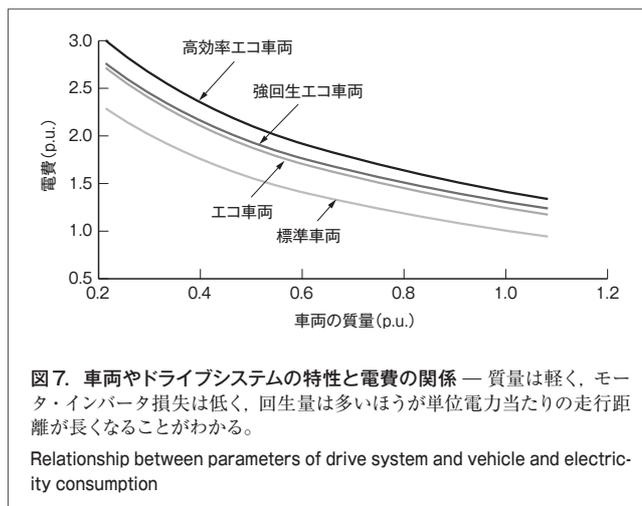
両モード走行時の1回当たりの総消費エネルギーとその内訳を図6に示す。消費エネルギーは標準車両で10・15モード走行時の実車試験の結果を1として正規化した。ここでは, バッテリー端子での電流及び電圧値を用いて消費エネルギーを計算しているため, バッテリー内での損失は含まれない。また, 実車では計測できる情報が限られているため, ドライブトレイン損失とブレーキ損失, 及びインバータ損失とモータ損失はそれぞれ合計値で算出している。いずれの車両条件, 走行条件においてもエネルギー消費量及びその内訳のシミュレーション結果が実車の試験結果とよく一致している。

4 特性予測への適用事例

EVシミュレータを用いて, 車両やドライブシステムの特性を変化させたときの電力消費への影響を評価した。

車両の質量, モータ効率, インバータ効率, 及び回生割合を変化させたときの10・15モードにおける単位電力当たりの走行距離(電費)のシミュレーション結果を図7に示す。横軸, 縦軸とも実車との比較で用いた標準車両の値を1として正規化している。標準車両, エコ車両, エコ車両をベースにモータとインバータの損失をそれぞれ1/2にした車両(高効率エコ車両), 及びエコ車両をベースに回生量が更に多くなるような制御を適用した車両(強回生エコ車両)の4ケースで比較した。車両の質量が軽いほど, モータ及びインバータ効率が高いほど, また回生量が多くなるほど電費が向上することが確認できる。

ここでの評価はモード走行で行ったため, 直進方向の運動だけしか含まれていない。しかし, 開発したシミュレータは機械系の詳細なモデルを用いているため, 操舵を行った際の車



両の応答についても模擬できる構成になっている。そのため, 実際の走行状況により近い状況で, 電力消費量などを見積もることも可能となり, 目的地までの走行に必要な電力を把握できるようになる。

5 あとがき

EVドライブシステムや車両運動を考慮したEVシミュレータを開発し, 走行時のエネルギー消費が精度よく推定できることを確認した。このシミュレータを用いることで, 各コンポーネントが車両全体のエネルギー消費に与える影響を評価できる。

今後は, EV搭載時における性能を意識したコンポーネントの開発や, EVを含むエネルギーマネジメントシステムの開発に, このシミュレータを活用していく。

文 献

- (1) 荒木邦行 他. HEV・EVドライブシステムを支える最新技術と次世代システムへ向けての取組み. 東芝レビュー. 66, 2, 2011, p.8-12.
- (2) 神竹孝至. 新時代の電力インフラを支えるスマートグリッド技術と東芝の取組み. 東芝レビュー. 66, 12, 2011, p.2-6.
- (3) 鈴木裕之. 電気自動車の利便性を向上させるBigData分析技術. 東芝レビュー. 67, 2, 2012, p.52-53.



石井 恵奈 ISHII Ena

研究開発センター 機械・システムラボラトリー。
機械システムの物理モデリング・シミュレーション技術の研究・開発に従事。電気学会会員。
Mechanical Systems Lab.



吉田 充伸 YOSHIDA Mitsunobu

研究開発センター 機械・システムラボラトリー主任研究員。
設計支援技術の研究・開発に従事。日本機械学会, 情報処理学会会員。
Mechanical Systems Lab.