

# 機械系と電源系を連携した 車両電源シミュレーション技術

Mechanical and Electrical Co-simulation Technique for In-Vehicle Power Supply System

荒井 光司\*  
Koji Arai

佐野 佑樹  
Yuki Sano

畑中 健一  
Kenichi Hatanaka

高山 浩一  
Koichi Takayama

2020年以降に向けて48V電源システムや自動運転等の新しいシステム・機能が提案されており、これらのシステムは車両の電源系と強く関わっているため、その搭載によって車両の電源アーキテクチャが変化することが予測される。変化する電源アーキテクチャの中で電源関連部品に求められる機能を見極めるべく、車両性能と部品性能の関係を明らかにし、車両目線で評価するシミュレーション技術の開発に取り組んでいる。本稿では、機械系と電源系を連携させたシミュレーションによって電源関連部品が燃費に与える影響を解析する技術について紹介する。

Car makers and suppliers are offering new systems, such as 48 V power supply and automated driving systems, for 2020 and beyond. Since these systems are closely related to in-vehicle power supply systems, their introduction will make changes to the architectures of power supply systems. To identify requirements for power supply components, Sumitomo Electric Industries, Ltd. has been developing in-vehicle simulation techniques that help investigate the relationships between automobiles and their components in performance. This paper introduces a technique to analyze the influence of power supply components on fuel efficiency, based on our mechanical and electrical co-simulation.

キーワード：自動車、シミュレーション、電源アーキテクチャ

## 1. 緒言

近年、世界各国における環境規制の強化及びユーザの燃費志向を背景に、アイドリングストップ（以下、IS）や運動エネルギー回生（以下、回生）といったシステムが広く普及している。これらの中には性能向上のため、従来の鉛バッテリーの他にリチウム（Li）イオンバッテリーやキャパシタを搭載する新しい電源アーキテクチャが搭載されたものがある。2020年以降に向けて提案が活発化してきている48V電源システムや自動運転等においても、従来とは異なる電源アーキテクチャが必要となることが予測される。電源アーキテクチャの変化に伴って各部品に要求される性能も変化すると考えられ、車メーカーからは、部品単体に留まらず車両全体の目線から性能を考え、システムとして提案する能力が求められている。

そこで、自動車新領域研究開発センターでは、個々の部品が車両の性能に与える影響（図1）を車両目線で定量的に評価するべく、シミュレーション技術の開発に取り組んでいる。この技術を用いることで、車両の性能と各部品特性の関係を明確にし、車両の要求に対して必要な性能を把握することができる。本稿では、機械系と電源系を連携させたシミュレーションによって、電源関連部品が燃費に与える影響を解析する技術について紹介する。

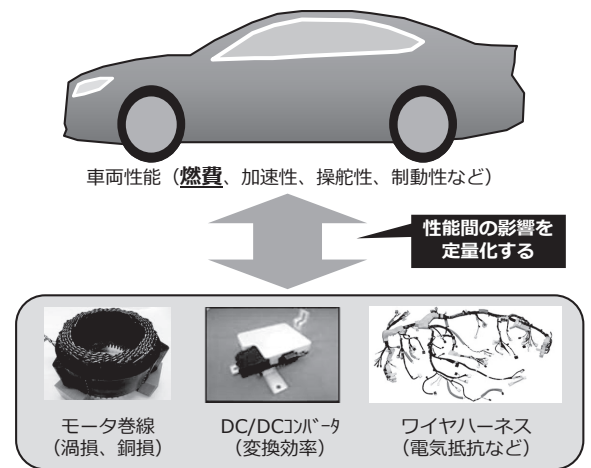


図1 車両性能と関係する電源関連部品の性能の例

## 2. 車両シミュレーションの概要

当社では電気回路の動作分析や、磁性部品における銅損、鉄損による損失の検証等にシミュレーション技術を活用し<sup>(1)</sup>、こうした解析を利用して設計をブラッシュアップすることで部品の損失低減を実現している。損失を低減することで消費電力を減らし、結果として発電が減ることで

燃費を低減できることは定性的には把握できている。しかしながら、発電による燃料消費量は車重・排気量・ギヤ比等の車両特性や、車速・加減速度・道路勾配等の走行条件によって大きく異なるため、従来のシミュレーション結果から部品性能向上の燃費への影響を定量的に解析することは難しい。

電源関連部品が燃費に与える影響を解析するには、バッテリー・電装品・ワイヤーハーネス（以下、W/H）等からなる電源系の挙動が、エンジン・トランスミッション・タイヤ等の機械系に与える負荷まで考慮しなければならない。そこで、機械系と電源系を一つのベンチ上に作成し、連携した解析を行うモデルの開発に取り組んだ。

### 3. プラントモデルの作成

シミュレーションは、解析したい対象と、それに影響を与える物品・事象群を数式化し、その物理的な挙動を再現するプラントモデルを用いて行われる。まずはこのプラントモデルの作成を行った。

#### 3-1 車両部品の数式表現

燃費の解析を行うためには、車両におけるエネルギーの流れを分析し、どこで、どんな要因で損失が発生しているかを把握して、それをパラメータとして数式化する必要がある。そのため、まずは燃費と各車両部品の関係について物理的に分析を行った。図2に示すように、燃費＝走行距離／燃料消費量から始めて、各部品で発生する力や電流等の物理量との関係を分析した。

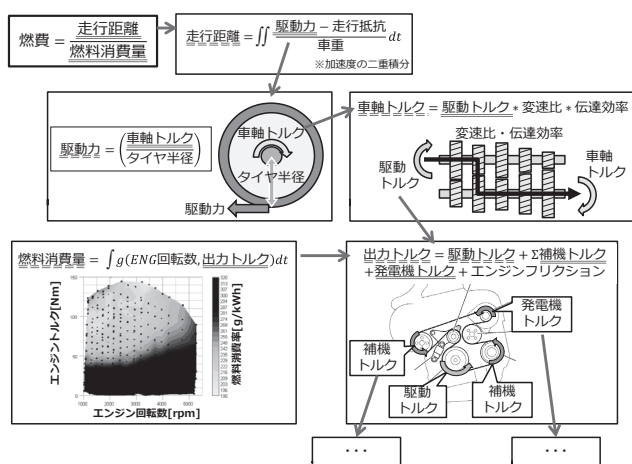


図2 車両部品の関係性分析

#### 3-2 モデルの抽象度の設定

この分析結果を元に各部品のモデル作成に取り掛かった。一般に、シミュレーションモデルは記述量が多いほど解析

精度は向上するが、解析時間が増大してしまうトレードオフの関係がある。そのため、解析する目的と検証対象の重要度に応じて各部品モデルの抽象度を決定する必要がある。今回のシミュレーションでは車両目線からの検証が目的であるため、各部品内部の動作は極力簡略化する方針とした。

ISや回生等の近年の技術動向を技報<sup>(2)</sup>や調査会社資料<sup>(3)</sup>、実車ベンチマーク結果等から調査し、燃費への寄与が大きいパラメータや、車両全体の制御に用いられるパラメータは実装し、それ以外のパラメータは簡略化した。例えばDC/DCコンバータでは、内部回路で、半導体素子や磁性部品、回路パターン等、様々な損失要因があり、これらが入出力電流等の動作条件に従って変化するのだが、車両目線からは内部の損失内訳に大きな意味はないため、詳細は記述せずに入出力電力間の効率を用いて表現した。バッテリーでは、過渡挙動が回生時のエネルギー回収量に大きく影響するため、これを再現できるよう等価回路表現を用い、車両の制御に用いられるSOC<sup>\*1</sup>やOCV<sup>\*2</sup>をパラメータとして実装した（図3）。このように、部品ごとに必要な抽象度を見極めてモデル化を行った。

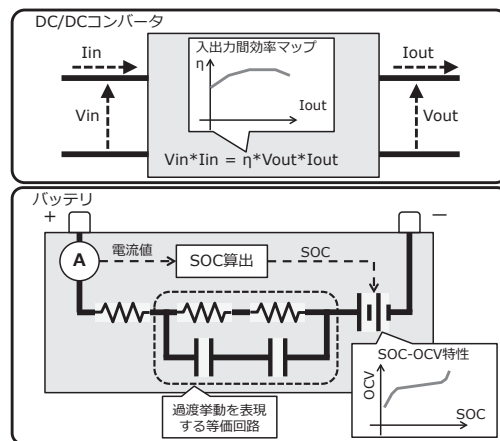


図3 モデルの例

#### 3-3 パラメータの設定

各部品のモデル化ができたため、続いてそれぞれのパラメータの数値設定を行った。ギヤ比・タイヤ径・バッテリーの容量等、車両諸元として公開されているデータはその値を入力し、トルク伝達効率・発電機効率等の公開されていないデータは技報・論文・特許等<sup>(4), (5)</sup>を調査して、一般的と思われる値を入力した。また、DC/DCコンバータの変換効率や、バッテリーの内部抵抗・SOC-OCV特性等は社内開発品の実験結果やベンチマーク試験で得られた結果を入力した。

このようにパラメータ設定を行っていったが、燃費解析の上で最も重要といえるエンジンの燃料消費率マップについては、エンジンによって特性が大きく異なること、文献等で入手できるデータは詳細が分からないよう数値が省かれているものが多いことから、実測データが必要と判断した。

### 3-4 エンジン燃料消費率マップの測定

燃料消費率マップの測定はシャシダイナモメータ<sup>※3</sup>設備を利用して行った。シャシダイナモメータ上で定速走行を行い、その時の燃料消費量を測定することで、その車速・駆動力における燃料消費率を測定することができる。ここで、車速・駆動力はタイヤ径・ギヤ比を用いてエンジンの回転数・トルクに変換することができるため、これらをパラメータとして複数点の測定を行うことにより、エンジンの燃料消費率マップを作成した。測定結果を図4に示す。これをエンジンのプラントモデルに実装し、燃料消費量の計算に用いるようにした。

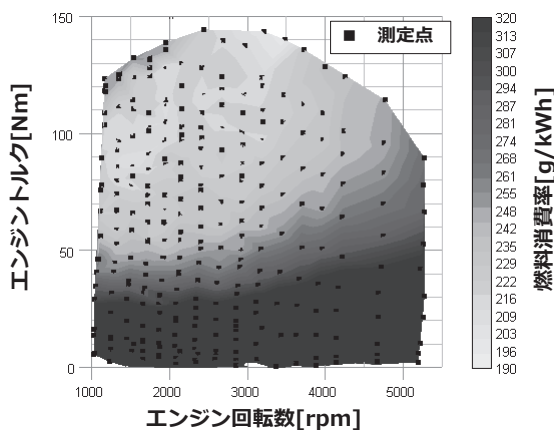


図4 エンジン燃料消費率マップ

## 4. 制御モデルの作成

近年の自動車は多数の電子制御が搭載されており、回生・IS<sup>※4</sup>の他、減速時フューエルカット<sup>※4</sup>・EGR<sup>※5</sup>・発電制御<sup>※6</sup>等、燃費低減に貢献する技術が電子制御によって実現されている。そのため、シミュレーションにおいて車両の挙動を再現するためには、これらの電子制御を読み解き、各部件の制御を行う制御モデルを作成しなければならない。

### 4-1 車両制御の調査

車両に搭載された機能・装備の一般的な挙動や動作条件は解説書に記されているため、まずはこれを調査して車両にどんな状態があるか整理を行った。蓄電素子を2つ搭載し、IS及び回生システムを搭載した車両を対象に調査したところ、車両状態は大まかに分けて①走行中、②回生、③IS、④補充電の4状態があり、更に、各状態の中で、2つ

のバッテリーのSOCに応じて、各バッテリーの充放電量や発電量の異なる状態があることがわかった(図5)。しかしながら、解説書では「バッテリーSOCが十分ある時」といった定性的な記述であるため、各状態間の遷移条件を明確に決めることができなかった。

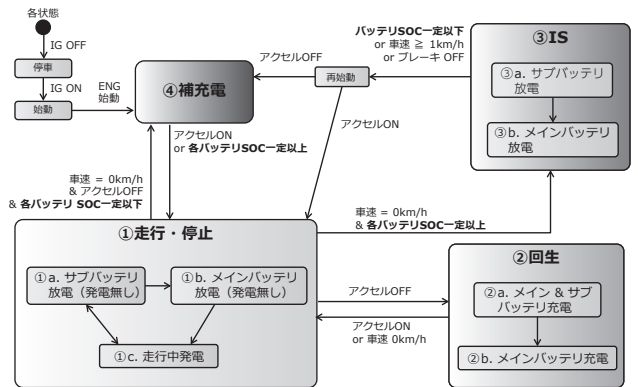


図5 状態遷移図

### 4-2 実車両での測定

解説書では状態間の遷移条件について定性的に表記されているため、制御モデル作成にあたって、その閾値を明確に定めることができなかった。そこで、シャシダイナモメータ上で実車測定を行い、定量的に調査を行った。定速走行や加減速の繰り返し等、調査したい項目に応じた走行パターンを用意し、車速・加速度・電池残電力等を変えながら走らせて、バッテリーの充放電量・発電機の発電量・トランスミッションの変速線等の挙動を調査した。これによって、状態遷移の閾値が明確になり、これを制御モデルに実装した。

また、測定結果の分析によって、バッテリーはSOCに応じて放電可状態と放電不可状態を行き来する制御になっていること等、解説書からは読み取れない制御もわかり、これも制御モデルに追加した。

### 4-3 ドライバモデルの作成

自動車は、ドライバによるアクセル及びブレーキペダルの操作に従って動作する。エンジンはもちろんのこと、オートマチックトランスミッションの変速動作や、回生・IS等のシステムもアクセルペダルの踏込量やブレーキペダルが踏まれているかを見てその動作を判断しているため、シミュレーション上でアクセル及びブレーキペダルを操作するドライバのモデルを用意する必要がある。

燃費測定モードの走行においては、1秒ごとの目標車速を規定した車速パターンが用意され、これに従って走ることから、目標車速パターンを入力して、これと現在車速の偏差に基づいてフィードバック制御を行うこととした。しかしながら、フィードバック制御のみでは発進時の遅れや、

それに伴う振動が大きく、燃費に悪影響を与えるため、車速と加速度に応じて必要となるアクセル踏込量を推測するフィードフォワード制御も用いることとした(図6)。

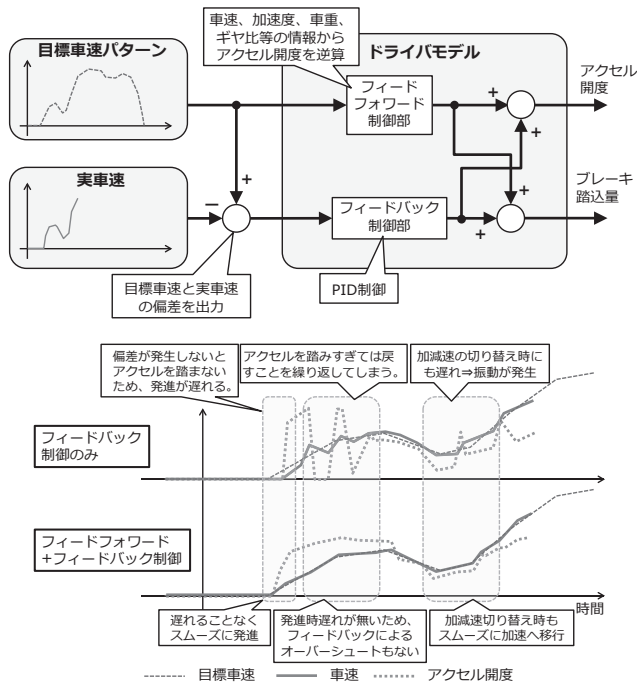


図6 ドライバモデル概略図

## 5. 車両モデルの構築

作成したプラントモデルと制御モデルを組み合わせ、車両全体のモデル構築を行った。3-1項で行った車両のエネルギーフローの分析に従ってプラントモデル間の接続を行い、制御に必要な電圧や回転数等のセンサを設置して各制御モデルへ入力し、制御モデルからの出力を各プラントモデルへ入力した(図7)。

作成した車両モデルに燃費測定モードの走行パターンを入力し、シミュレーションを行った結果を図8に示す。シャシダイナモメータで測定した実測結果16.60km/Lに対して16.68km/Lと、誤差は0.5%となった。車両各部の動作の様子を実測波形と比較すると、実測のドライブロボットとのアクセルワークのズレに起因する回生発電量のズレや、ATの変速タイミングの違いによる回転数のズレ等が一部であるものの、走行パターン全体としてはよく一致した挙動をすることが確認できた。

## 6. 燃費効果の検証

作成した車両モデルを用いて、電源関連部品の性能が車両の燃費に与える影響の検証に取り組んでいる。図7に示す電源系を搭載した車両において、走行パターンや電装品の消費電力を変えた複数のパターンで、各部品の特性が燃費にどんな影響を与えるかの解析を行っている。

これまでの解析の中で、発電機付近のW/Hを細径化する、つまり、W/Hの抵抗値を大きくした際、回生時の発電電力が大きく変化する様子が確認できており(図9)、このた

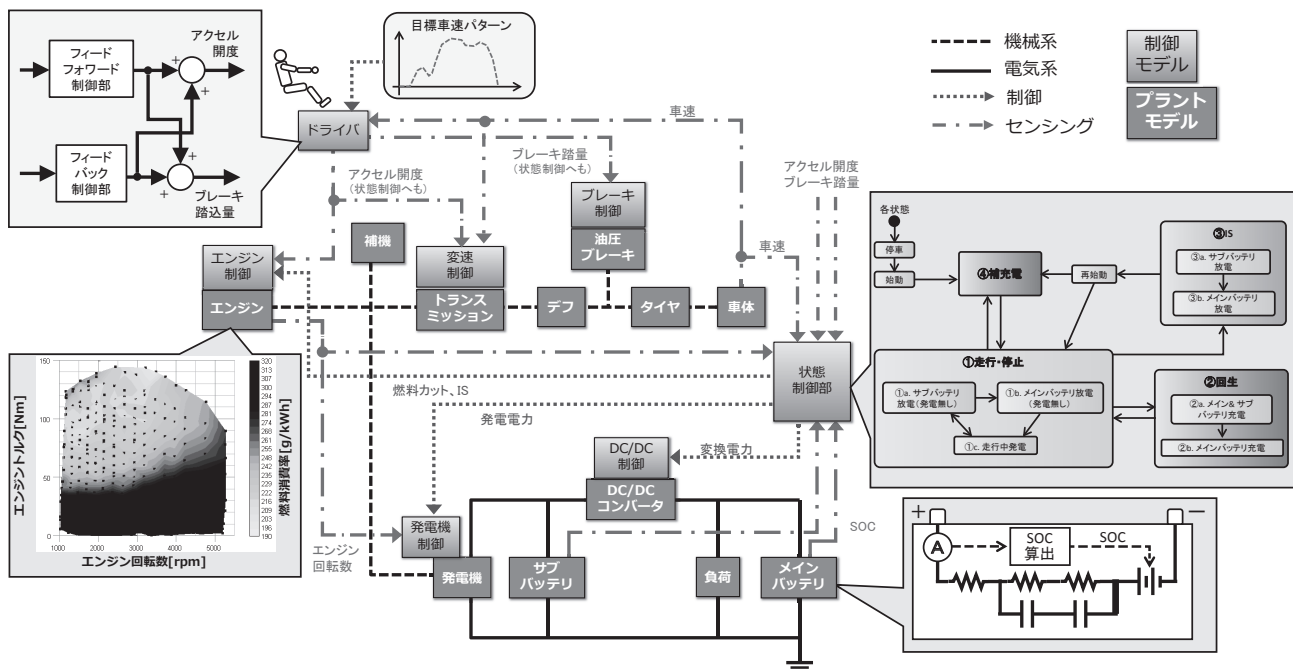


図7 車両モデル概略図

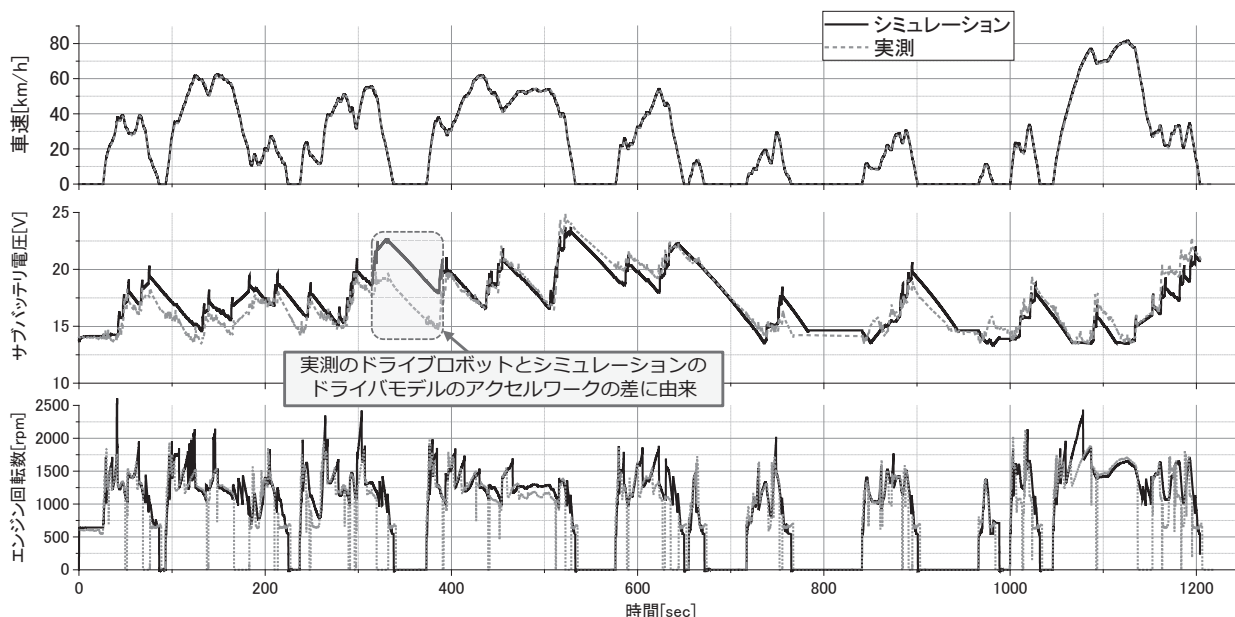


図8 実測-シミュレーション動作比較

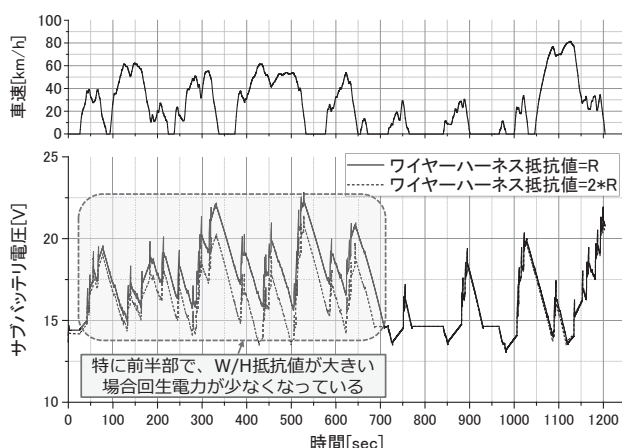


図9 W/H抵抗値の違いによる動作の比較

め、条件によっては走行パターン中における各機器の挙動が変化し、燃費が変動することがわかってきた。W/H抵抗値に限らず、DC/DCコンバータの変換効率等、各部位の特性と燃費との影響を明確化するため、継続して検証に取り組んでいく。

## 7. 結 言

電源関連部品が車両性能に与える影響を定量化することを目的とし、電源系と機械系を連携させた車両シミュレーション技術を開発した。この技術を用いて、各部位の特性をパラメータとして燃費への影響検証に着手しており、電

源システムの挙動の変化によって燃費が変動する様子が確認できているため、継続して検証に取り組んでいく。

今後は、自動運転や、車両の電動化等、変化が予測される電源アーキテクチャの解析への展開を行うと共に、燃費以外の評価軸も取り入れ、製品の設計・開発に貢献できるよう技術開発を推進する。

## 用語集

### ※1 SOC

State of Chargeの略。電池の残電力が満充電容量に対してどれだけ残っているかを表す数値。Liバッテリーでは過充電・過放電が爆発・発火や寿命短縮につながるため、厳重に管理される。

### ※2 OCV

Open Circuit Voltageの略。電池に何も負荷を繋いでいない状態における電圧のこと。電池の種類によって異なり、SOCに依存して変化する。

### ※3 シャシダイナモメータ

モータ兼発電機となるローラ状の装置。ローラ上に車両を載せ、シャシダイナモメータからタイヤを駆動する、あるいはタイヤに抵抗を与えることで、走行状態を模擬することができる。これによって、公道やサーキットでは難しい、走行しながらの実験や、一定のパターン走行を再現することが可能である。

#### ※4 減速時フューエルカット

燃料消費量を抑えるため、エンジンが一定の回転数以上でアクセルが踏まれていない場合、燃料噴射をカットする機能。

#### ※5 EGR

Exhaust Gas Recirculationの略。エンジンで燃焼後の排気ガスの一部を吸気側に戻す技術。主に排ガス中の規制物質の低減や、低・中負荷時の燃費低減のために用いられる。

#### ※6 発電制御

バッテリーの残電力を監視し、残電力が少なくなった時に発電を行う制御。従来、バッテリーの残電力に関係なく常に発電していたのに比べて、エンジンにかかる負荷が減るため、燃料消費量を低減することができる。

#### 参 考 文 献

- (1) 神頭卓司 他、「リアクトル開発における電磁気/熱設計技術」、SEIテクニカルレビュー第175号、P.78 (2009)
- (2) 高橋正好 他、「減速エネルギー回生システム“i-ELOOP”のデバイス開発」、マツダ技報第30号、P.43 (2012)
- (3) 矢野経済研究所、「新世代アイドルストップシステム市場の徹底分析2015」(2015)
- (4) 小原歯車工業(株)、「歯車技術資料 1 歯車の種類と用語 1.1 歯車の種類」[http://www.khkgears.co.jp/gear\\_technology/basic\\_guide/KHK347.html](http://www.khkgears.co.jp/gear_technology/basic_guide/KHK347.html)
- (5) ダイハツ工業(株)、特開2009-148090「車両用発電制御装置」

#### 執 筆 者

荒井 光司\* : 自動車新領域研究開発センター



佐野 佑樹 : 自動車新領域研究開発センター



畑中 健一 : 自動車新領域研究開発センター  
グループ長



高山 浩一 : 自動車新領域研究開発センター 部長



\*主執筆者