

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り組み

Advanced Technologies Supporting Drive Systems for HEVs and EVs

荒木 邦行 大野 基晴 結城 和明

■ ARAKI Kuniyuki ■ ONO Motoharu ■ YUKI Kazuaki

地球温暖化対策の一環として、自動車からの二酸化炭素(CO₂)排出量抑制に対する要望がいつそう高まりつつある。現在、ハイブリッド電気自動車(HEV)や電気自動車(EV)は、環境対応車としてもっとも期待されている。

東芝は、1991年に世界で初めて商用車用のHEVドライブシステムを製品化しており、モータとインバータを、モータ制御技術とともに開発し、製品化してきた。その後、インバータの重要部品であるパワーモジュールをチップから開発してきた。また、バッテリーについても製品化し、システムのキーになるモータ、インバータ、及びバッテリーを全てそろえた。更に、次世代ドライブシステムに向けた開発にも取り組んでおり、ドライブシステム全体の最適化を目指している。

In recent years, hybrid electric vehicles (HEVs) and electric vehicles (EVs) have become a focus of expectations as energy-efficient and environmentally friendly vehicles that can play a significant role in reducing carbon dioxide emissions.

Toshiba has been developing and releasing motors and inverters for automotive use as well as motor control technologies since its introduction of the world's first commercialized HEV electric drive system in 1991. We are now expanding our product lineup to key devices that form the heart of the electric drive system with the addition of power modules for the inverters, and batteries. We are also engaged in the research and development of core technologies to realize the next-generation electric drive system, with the aim of optimizing the entire system.

1 まえがき

東芝は、1991年に大型バスを対象にHEV用ドライブシステム(モータ、インバータ、及びモータ制御システム)を世界で初めて製品化しており、約20年に及び車載ドライブシステムを開発してきた実績がある。この間、車載に適した小型・高効率化を可能にした当社独自の永久磁石リラクタン্সモータ(PRM: Permanent-Magnet Reluctance Motor)を開発するとともに、PRMの機能を最大限に発揮できるモータ制御システムも開発してきた。

ここでは、当社のHEVドライブシステムの実績と特長、将来のHEV・EVドライブシステムへ向けて開発中の新技術、及びHEV・EVドライブシステムのキーコンポーネントになるモータ、インバータ、及びバッテリーに当社技術を組み合わせる適用した場合の性能向上について述べる。

2 HEV・EVドライブシステムの主要コンポーネント

EVシステムはガソリンエンジン自動車のエンジンをモータに置き換えたシステムであり、HEVシステムはエンジンとモータが協調するシステムである。

これらのシステムを構成する主要なコンポーネントに適用されている当社技術の特長を、以下に述べる。

2.1 モータ

HEV・EV用モータは、一般の家電・産業用モータとは異なり、自動車の運転状況に応じてトルクと出力が変化する。このためモータには、走行中に起こりうる全ての運転条件で最適な特性が要求される。また、車両に搭載するために小型化が要求されるとともに、環境条件や振動条件などにも制約があるため、家電・産業用モータに比べ難易度が非常に高い。

HEV・EV用モータには、次のような特性が要求される。

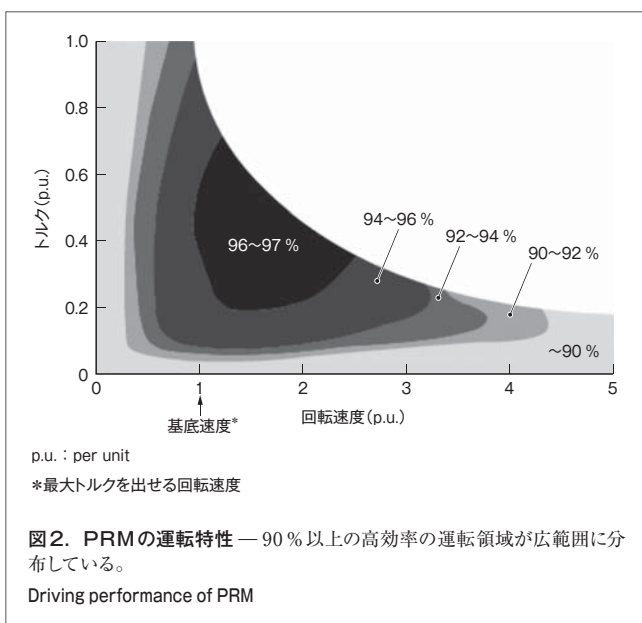
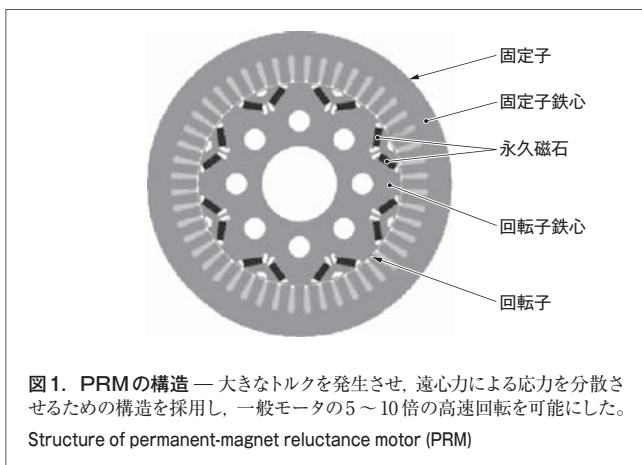
- (1) 小型で、かつ産業用モータの10倍以上の高出力
- (2) 低速域では、短時間で最大トルクに到達
- (3) 中・高速域では、従来の可変速モータの2～3倍という広い範囲にわたり、最大出力での可変速運転が可能
- (4) 無負荷・軽負荷時においても低損失

車載システムとしての視点から各種モータを検討した結果、PRMは小型、高出力、及び高効率で、広い範囲で可変速運転が可能である。

更に、車載用モータには高トルクも要求される。PRMは、リラクタン্সモータと永久磁石モータを同一断面上に複合したモータであり、リラクタンストルク、及び永久磁石と電流によるトルク(PMトルク)の両方を発生することができる。

以上の特長から、PRMは車載用途にもっとも適したモータと言える。

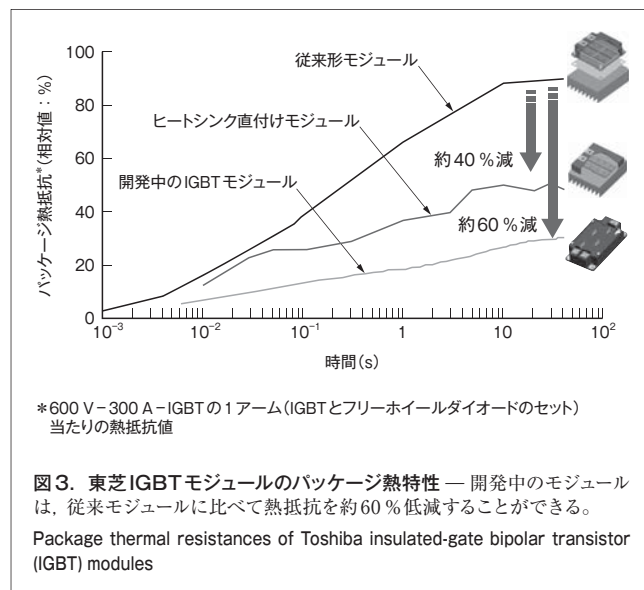
当社が開発したPRMの構造を図1に示す。大きなリラクタンストルクを発生させるため、永久磁石を回転子鉄心内にV



字状に配置し、磁気異方性の強い形状にしている。また、回転時に回転子鉄心に作用する、永久磁石及び鉄心の遠心力による応力を分散して、応力集中を緩和する鉄心形状にしている。これによって、一般モータの5～10倍の高速回転を可能にした。当社製PRMの運転特性を図2に示す。最高効率は97%であり、90%以上の高効率の運転領域が広範囲に分布している。

2.2 インバータ

車載用インバータは、車両に搭載するために小型化が必須である。更に、HEVのようにエンジンルームに搭載されるインバータは高温仕様を満足する必要がある、難易度が高い。このため当社は、車載に適したIGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ）モジュールをチップから自主開発している。各種IGBTモジュールのパッケージ熱抵抗を図3に示す。開発中のモジュールは、従来のモジュールに比べて熱抵抗を約60%低減することができる。これによって、従来のモジュール



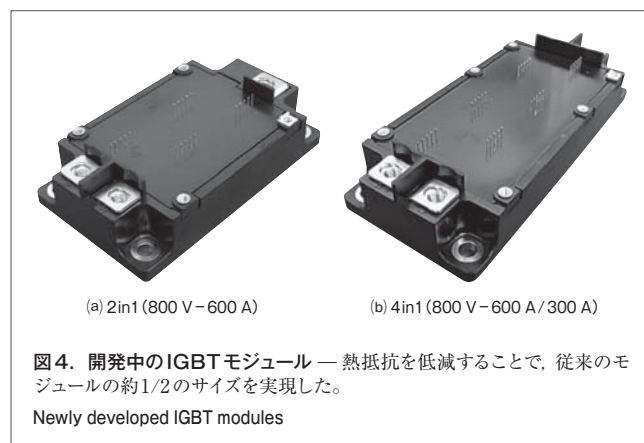
に比べて約1/2のサイズになり、インバータを小型化することができる。

開発中のモジュールを図4に、このモジュールを搭載したインバータを図5に示す。図5(a)は2モータ用インバータ^(注1)であり、ストロングHEV^(注2)に適用され、容積は9Lである。(b)は1モータ用インバータ^(注3)であり、マイルドHEV^(注4)とEVに適用され、容積は4.7L（コネクタ部を除く）である。

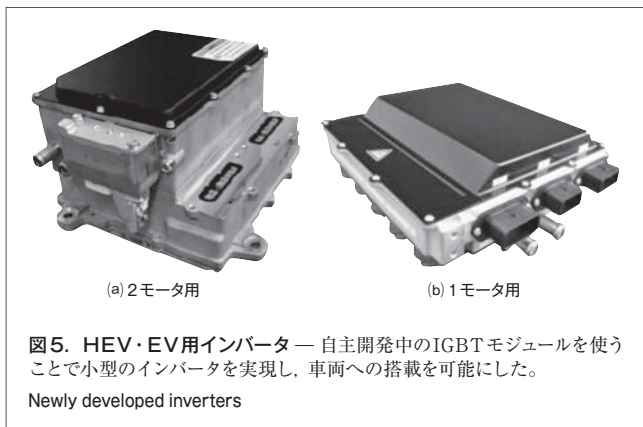
これら小型のインバータを開発することで、車両への搭載が可能になった。

2.3 バッテリー

車載用バッテリーには、安全性、高信頼性、及び長寿命が要求される。当社は、車載に適したバッテリーとして、二次電



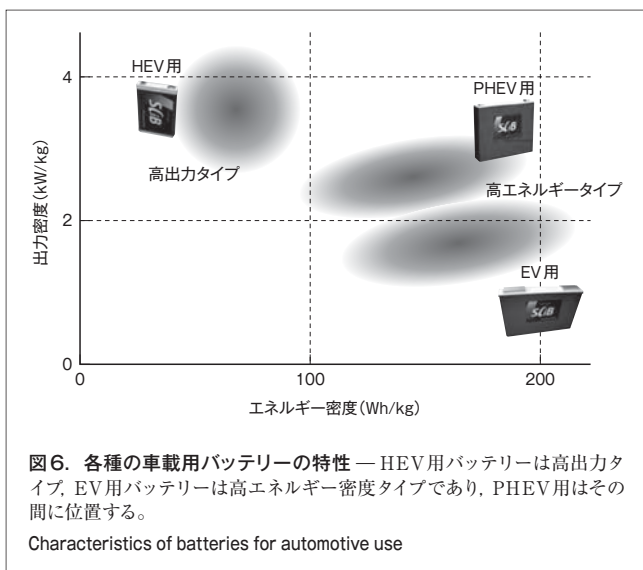
- (注1) 1台でモータ及び発電機を駆動するインバータ。
- (注2) ガソリン消費が大きい発進時の動力をモータだけで担い、車が動き始めてからエンジンを始動するシステム。EV走行が可能で、マイルドHEVに比べ燃費が良い。
- (注3) 1台でモータ又は発電機のどちらか一方だけを駆動するインバータ。
- (注4) モータはエンジンを補助するだけのシステム。モータだけでは走行できないが、最近ではEV走行可能なシステムもある。



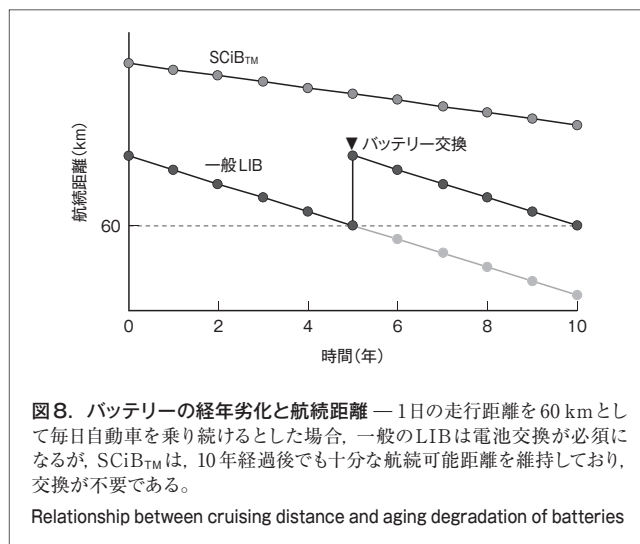
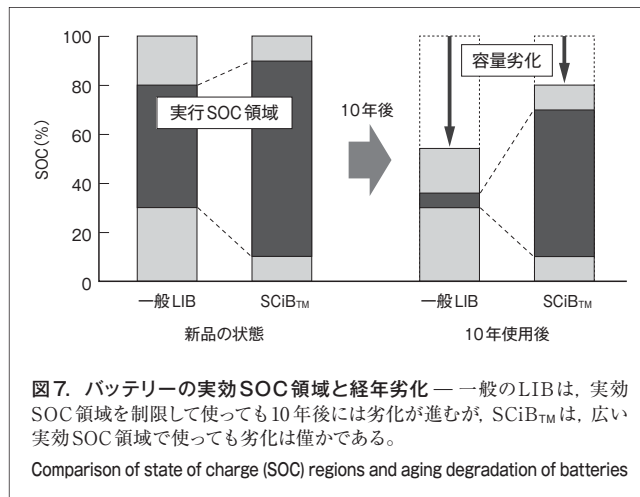
池 SCiB_{TM}を開発し、製品化している。HEV、プラグインHEV (PHEV)^(注5)、及びEVに適したバッテリーの特性を図6に示す。当社は、HEVのラインアップに加えて、EV及びPHEV用に高エネルギー密度タイプのバッテリーを開発中である。

SCiB_{TM}の特長の一つに、実効SOC (State of Charge) 領域^(注6)を広くとれることが挙げられる。実効SOC領域と経年劣化の関係について、SCiB_{TM}と一般のリチウムイオン電池 (LIB) を比較した結果を、図7に示す。一般のLIBでは、バッテリーの容量劣化を小さくするために実効SOC領域を制限して使っても、10年後には劣化が進み、車両には使用できなくなる可能性がある。一方SCiB_{TM}は、長寿命特性を持つため、広い実効SOC領域で使っても10年後の容量劣化は僅かであり、一般のLIBよりも実効SOC領域が広いバッテリーと言える。

バッテリーの経年変化と航続距離の関係を図8に示す。この図は、一般のLIBとSCiB_{TM}の容量劣化を、1日の走行距離



(注5) 外部からバッテリーへ充電可能なHEV。
(注6) SOCは実際の充電量の満充電容量に対する比で、実効SOC領域とはバッテリーを実際に使用する際のSOCの範囲。



を60 kmと仮定してシミュレーションした結果である。10年間で、毎日自動車を乗り続けるとした場合、一般のLIBは容量が劣化して航続可能距離が60 kmを下回るため、電池交換が必須になる。一方SCiB_{TM}は、10年経過後にも十分な航続可能距離を維持しており、交換が不要である。

更に、SCiB_{TM}は出力特性に優れたバッテリーであり、特に低温下でもその特性を維持できるため、EVの低温環境での走行距離を拡大することも可能である。

3 次世代HEV・EV用可変磁力モータドライブ

3.1 可変磁力モータ

HEVやEVでは燃費や電費がポイントであり、適用されるコンポーネントには、更なる小型・高効率化が要求され、特に、モータの効率は燃費及び電費に大きく影響する。このため、次世代モータとして有力視されている可変磁力モータについて、多くの企業や大学などで高効率化を目指した研究が進め

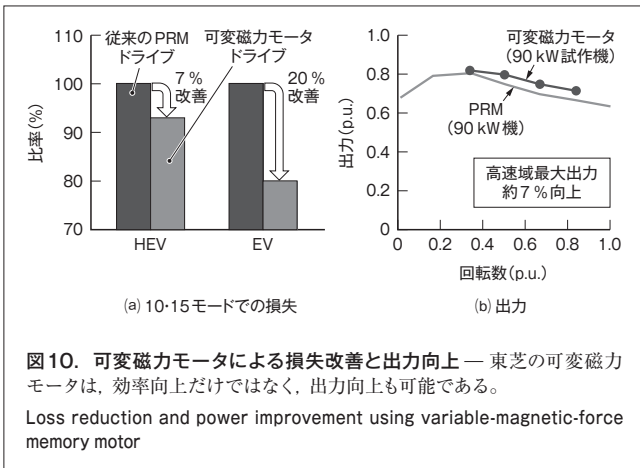
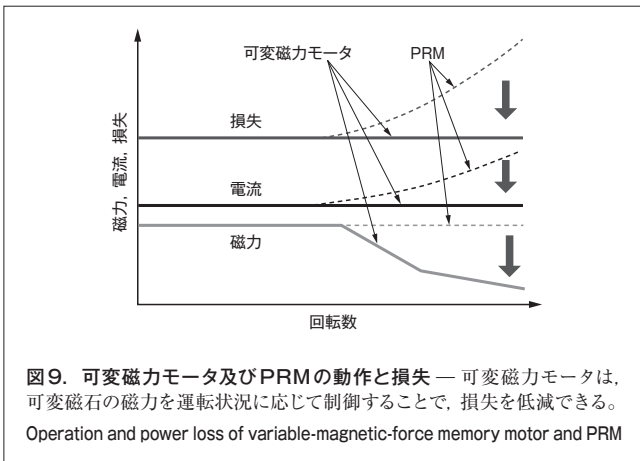
られている。可変磁力モータには、電気方式や、機械方式、巻線切替方式などがあるが、当社は機構部が不要な電気方式の開発を進めている。

当社が開発を進めている可変磁力モータでは、保磁力の強い固定磁石と弱い可変磁石を組み合わせ、可変磁石の磁力を運転状況に応じて制御することで、銅損や鉄損を低減できる(図9)。図2に示したPRMの効率に対して、平均効率で2%の向上を目指している。この可変磁力モータを用いたドライブシステムを適用することで、10・15モードでのHEVモードで約7%、EVモードで約20%の損失低減が期待できる(図10(a))。

また、90 kWの可変磁力モータを試作して、出力特性を測定した結果を図10(b)に示す。中・高速域での出力がPRMに比較して約7%向上しており、当社の可変磁力モータは、効率向上だけではなく、出力向上も可能であることが示された。

3.2 可変磁力モータの最適制御

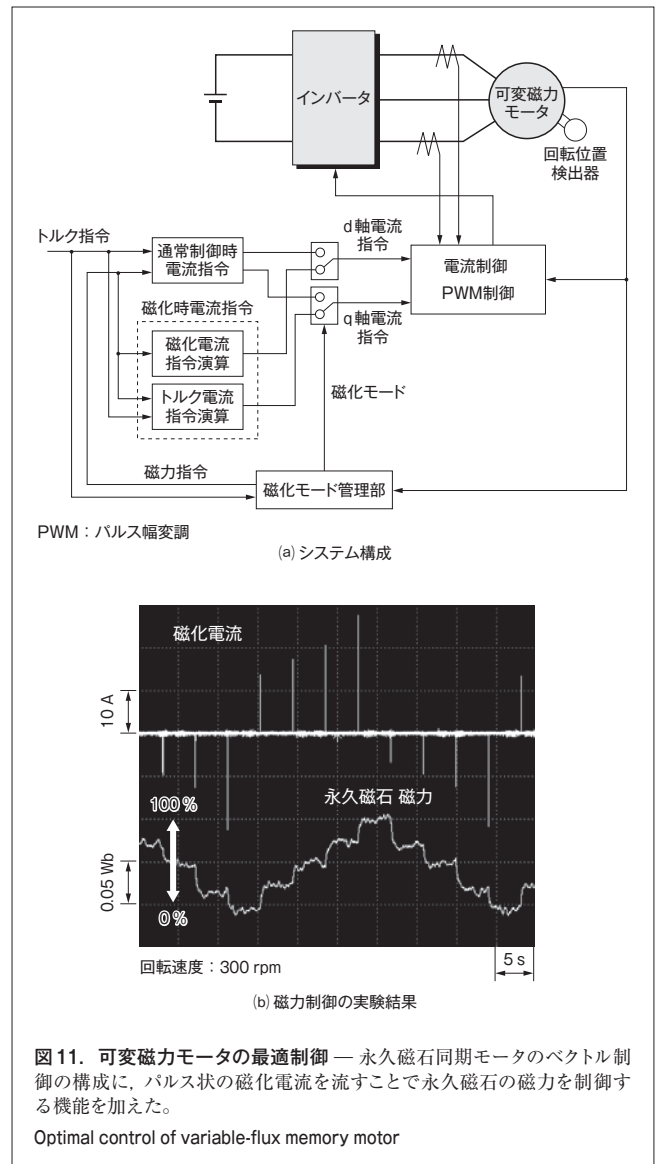
可変磁力モータのシステム構成を図11(a)に示す。制御部の基本的構成は、永久磁石同期モータのベクトル制御の構成と同一であるが、永久磁石の磁力を制御する機能が加わっている。



原理検証機を用いて、この制御方法で磁力を制御した結果を図11(b)に示す。これは、300 rpmで無負荷運転している状態で、永久磁石の磁力を段階的に減少及び増加させる制御を繰り返したときの、磁化電流と、永久磁石の磁力を示している。約10 ms幅のパルス状の磁化電流を流すことによって、永久磁石の磁力を制御できることを確認した。

また可変磁力モータは、着磁・減磁時にごく短時間、過大な電流を流す必要がある。当社は、これを行うために高速応答が可能な電流制御方式(HiPWM)を開発した。これによって、従来の制御方式に比べ約1/10の電流応答時間を実現した。

今後は、小型化を目的とした集中巻き永久磁石モータの適用が進むと予想される。集中巻き永久磁石モータの問題点はトルクリップルや、振動、騒音などが大きいことであるが、HiPWM制御を適用することによってこれらの問題点を克服することが可能である。



4 将来へ向けての取組み

今後、環境対応車が普及していくうえで、(1)小型・軽量化、(2)燃費・電費向上、(3)低コスト化、が必要不可欠である。

(1)については、自動車への搭載性も考慮する必要があり、実車を用いた検討を行っている(図12)。

(2)については、EVに適用することを前提にしたシミュレー

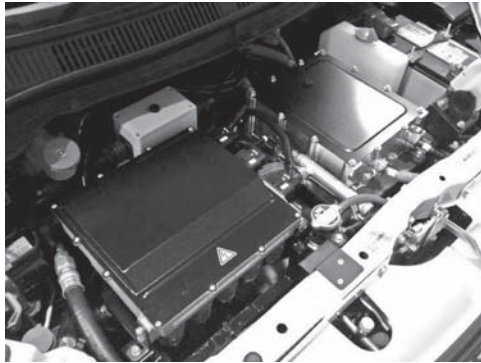
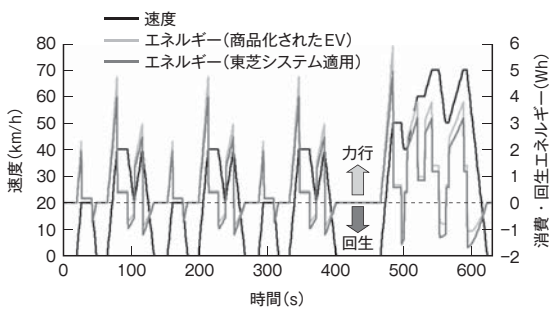
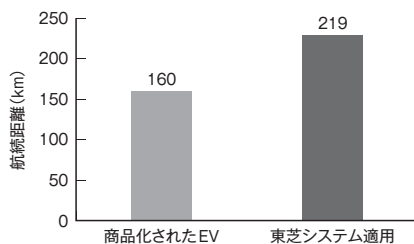


図12. 実車への搭載性の検討 — ドライブシステムの小型・軽量化を進めるため、実車への搭載性も検討している。

Feasibility study of installation in actual vehicle



(a) 消費・回生エネルギー



(b) 航続距離

図13. 東芝ドライブシステムの効果のシミュレーション結果 — EVのコンポーネントを当社製に置き換えた場合の特性をシミュレーションした結果、力行時の消費エネルギーを少なく、減速時の回生エネルギーを多くできることから、航続距離が約1.4倍になった。

Results of simulation of effectiveness of Toshiba electric drive system

(注7) 減速時にモータが発電機となって運動エネルギーを電気エネルギーに変換(回生)したエネルギーのこと。

ションを行っている。商品化されたEVに搭載されているモータ、インバータ、及びバッテリーを当社製に置き換えた場合の特性をシミュレーションした結果を図13に示す。バッテリーの重量、エネルギー密度、及び搭載エネルギーは同じ条件である。図13(a)は、10・15モードのパターンで走行したときの消費エネルギーと回生エネルギー^(注7)であり、当社システムを適用することで、力行(加速)時の消費エネルギーを少なく、減速時の回生エネルギーを多くできる。この結果、図13(b)に示すように航続距離は1回の充電で219 kmと推定され、置換え前の約1.4倍になった。

(3)については、商用車向けのシステムで約1/2のコスト削減を実現しており、今後も更なる低コスト・高性能化を目指す。

5 あとがき

当社のHEV・EVドライブシステムの現状と将来技術について述べた。今後、環境対応車への期待はますます高まり、特に、HEVやEVへの期待は大きい。当社は、20年以上にわたってHEVドライブシステムの開発及び製造に取り組んでおり、モータ、インバータだけでなく、バッテリーも製品化した。これらは、HEVやEVの性能を左右する重要なコンポーネントである。今後は、これらのコンポーネントの能力を最大限に引き出す制御技術も必要になる。

当社は、これまでの実績を基に、車両側の視点に立った、ドライブシステムとしてのあるべき姿を訴求していき、車載ドライブシステム技術を通して、社会に貢献していく。



荒木 邦行 ARAKI Kuniyuki

自動車システム事業統括部 eドライブシステム技術開発部グループ長。HEV・EVドライブシステムのエンジニアリング業務に従事。

e Driving Systems Technology Development Dept.



大野 基晴 ONO Motoharu

電力流通・産業システム社 SCiB事業推進統括部 SCiB技術部参事。車載用電池システムのエンジニアリング業務に従事。

Super Charge Battery Div.



結城 和明 YUKI Kazuaki

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機応用・パワエレシステム開発部主務。パワーエレクトロニクスの研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center