

電動車両(HEV・EV)を支える コンポーネントとシステム

自動車においては燃費向上、排ガス規制対応、さらには地球環境保護への対応が必須となってきた。そのようなサステナブルなモビリティの進化に向け、ハイブリッド電気自動車(HEV)や電気自動車(EV)に対応する電動パワートレインを供給するシステムサプライヤーとして、日立オートモティブシステムズ株式会社はインバータ、モータ、バッテリーの製品およびその組み合わせのソリューション技術を提供し、自動車の環境対応に貢献している。

電動パワートレインは自動車の進化に対応して小型、高出力密度、軽量化を推進しており、地球環境に対応するモビリティの拡大に向けてさらなる進化を続ける。

山田 博之 | Yamada Hiroyuki

齋藤 隆一 | Saito Ryuichi

松延 豊 | Matsunobu Yutaka

石津 竹規 | Ishizu Takenori

宮崎 泰三 | Miyazaki Taizou

1. はじめに

自動車用パワートレインは長らく内燃機関が用いられその進化を続けてきたが、今世紀に入って地球環境保護のためのCO₂削減の取り組みが全世界的に推し進められ、2020~2025年ごろまでには現状の内燃機関のみの車両では規制への対応に限界がくると見られている。こうした背景から、環境へ対応する自動車として、ハイブリッド電気自動車(HEV: Hybrid Electric Vehicle)および電気自動車(EV: Electric Vehicle)の導入拡大が全世界的に進む見通しである。

日立オートモティブシステムズ株式会社では1990年代からこれらの電動車両に向けた電動パワートレインの開発と供給を進めており、今後の環境対応自動車の拡大に向けてさらなる技術開発と性能向上を推進している。

本稿では、これら電動車両の電動パワートレインを構成するインバータ、モータ、バッテリーの電動コンポーネントの技術および電動コンポーネントを迅速かつ最適に組み合わせるシミュレーション分析技術について述べる。

2. 小型インバータ技術

車載インバータは、駆動時は車載バッテリーに蓄積された直流電力をPWM(Pulse Width Modulation)制御により交流電力に変換してモータ駆動を行い、回生時はエネルギー回生動作によりバッテリー充電を行うが、搭載スペースの制約が厳しい車載用途においては常に小型化が求められている。このため、パワーモジュールを主体とする主回路の高パワー密度技術の開発が進められてきた。また、これと並行して、車両コントローラとの通

信により、駆動トルク制御、モータ回転数制御、エネルギー再生制御などにより、電動車両の基本的な動力性能に直結した機能を実現しつつ、異常検知、故障診断、ISO26262で規定された機能安全対応などを考慮した高機能制御回路技術も求められている。

こうした車載用途における要求の実現のために、高電圧主回路と高機能制御回路の革新、また、これらを小型パッケージに搭載し、車載用途の耐振、耐熱、耐環境耐久性を有する構造設計技術の進化が必要になっている。

2.1

高パワー密度高電圧主回路

通常の450 Vdcクラスのバッテリーが搭載された電動車両のインバータにおいては、高電圧主回路が体積の過半を占めるため、小型化のためには主回路構成部品の改良がポイントになる。日立オートモティブシステムズでは、最も発熱量が大きく、また、大型部品である高電圧パワーモジュールについて、グリースを介さず冷却水で直接冷却する両面冷却パワーモジュール技術(図1参照)を開発し、インバータの大幅な小型化を実現した。直接両面冷却構造により熱抵抗を大幅に低減し、これによって電流増加を可能とし、パワー密度が向上した。また、この両面冷却パワーモジュールは、搭載チップと実装の一部を変更することにより、車両重量クラスに応じた電流仕様のスケーラビリティが可能である。また、2in1構造とすることで小型化するとともに、主回路インダクタンスを低減して発生損失を低減でき、さらに、インバータパッケージ内のレイアウトの自由度を確保できる構成となっている。

2.2

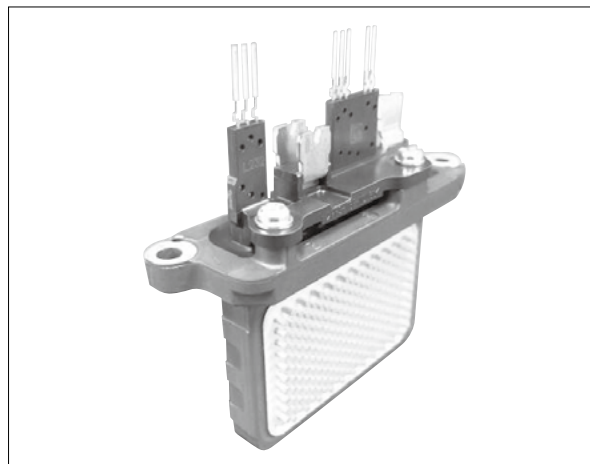
高機能制御回路

車載インバータでは、電動車両の始動、加減速、停止の基本動作に応じて、電圧電流、動作周波数を可変とした高機能ベクトル制御動作が求められる。また、CAN(Contoller Area Network)やFlex-Rayによる大容量高速通信、異常検知、トルクセキュリティ、故障診断、機能安全などへの対応が必要である。

このような要求に対応するため、高性能CPU(Central Processing Unit)を搭載し、機能回路を小型化した高機能モータ制御回路技術を開発した。また、制御回路の駆動信号に応じて主回路パワーモジュールを動作させるゲート制御回路は、パワーデバイスの進化に対応した高速大電流動作と保護動作の確保を両立させることが求め

図1 両面冷却パワーモジュール

パワー半導体を冷却水で直接両面冷却する構造とすることで熱抵抗を低減し、パワー密度を向上させている。



られる。このため、高性能IC(Integrated Circuit)を採用し、小型化したゲート制御回路を開発した。

2.3

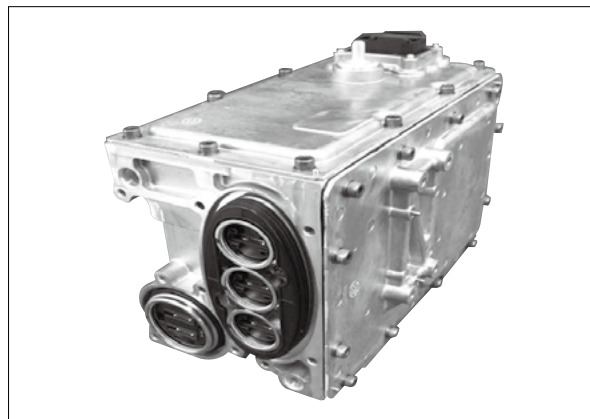
小型高信頼パッケージ構造

これらの技術を採用し、さらに、車載搭載要求に合致しつつ、高信頼性、高耐久性を実現した小型高信頼パッケージ構造技術を開発して製品に適用している。図2は製品の一例であり、当社従来比40%の小型高出力化が実現されている。なお、この製品では最大効率94%の高効率DC(Direct Current)-DCコンバータも同時開発している。

今後、パワーモジュールの一層の進化や、次世代低損失SiCパワー素子の搭載の実現、また、駆動方式の進化を図ることで、インバータのさらなる小型化、電動車両のバリエーションの拡大、加えて、EV走行距離の拡大も可能となる。

図2 環境対応車両向けトラクションインバータ

車載インバータとして求められる機能を搭載しつつ、小型高信頼パッケージにより従来比40%の小型高出力化を実現している。



3. 高効率モータ技術と要素技術

標準モータ構想は、高性能（小型・軽量，高出力，高効率，低騒音・低振動）ながらも，HEV，EV，PHEV（Plug-in HEV）など複数の電動車方式や，さまざまな車格に共通して適用可能なモータ仕様を設定することで，複数案件に対応する場合の開発工数低減と，構成部品，生産設備およびモノづくりの共通化により開発効率を向上させつつ，低価格なモータを開発するというコンセプトである。これを可能にするためには，さまざまな車格で共通的に車両レイアウトが可能なモータ寸法，広範囲な要求出力をカバーできる出力特性，電動車方式の

特性に応じた時間定格など，幅広い使われ方に対応できるバリエーションの設定が必要となってくる。

3.1

標準モータのステータ巻線方式

標準モータのステータ巻線方式は，小型・高トルク密度化を図るため，電線に角線を用いた波巻方式とした。従来の丸線分布巻方式に比べ占積率（導体面積／スロット面積）を20%向上可能で，モータの出力トルク密度（出力トルク／ステータコア $D^2 \times L$ ）を15%程度向上できる。なお，波巻のセグメントコイルはコイルの直線部の長さを変えることで，ステータ積厚バリエーションにフレキシブルに対応できる。

図3|ステータ外径と1スロットあたりのコイル本数

ステータ内径を固定としスロット内のコイル本数とステータ外径のバリエーションによりさまざまな特性のモータに対応可能とする。

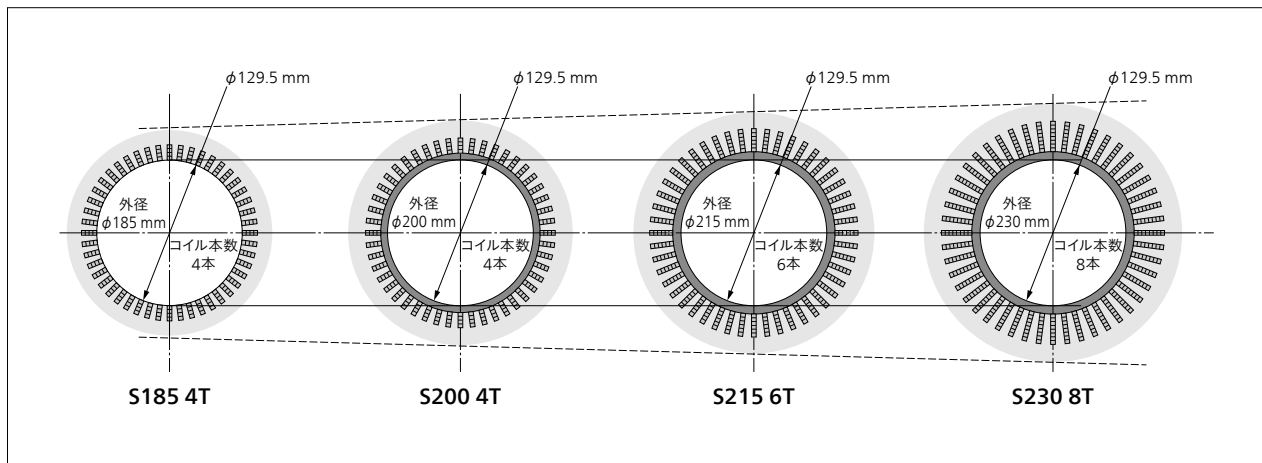
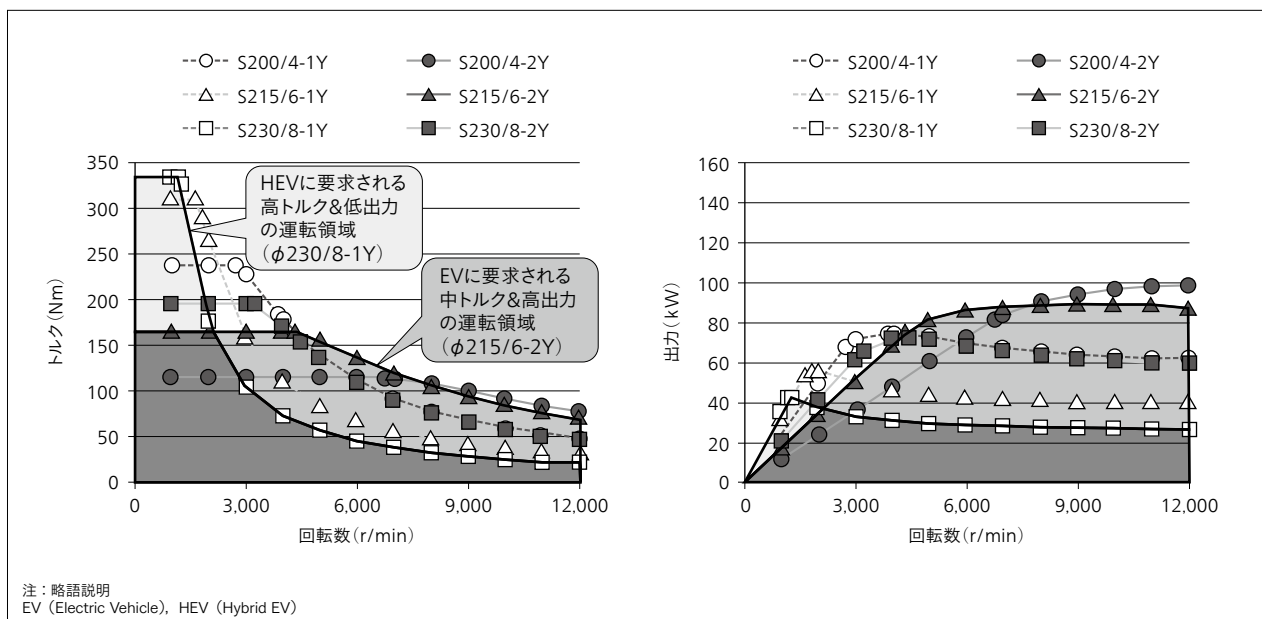


図4|φ200, 215, 230の場合のトルク/出力特性

外径，積厚を可変にすることによりさまざまな特性のモータに対応可能となる。



3.2

モータ外径サイズの選定

HEV, EV, PHEVなど複数の電動車方式, およびさまざまな車格に共通して適用できるモータ仕様を波巻方式にて対応可能にするため, 4種類の外径と1スロット当たりのコイル本数の設定を行った。

図3にステータ外径と1スロット当たりのコイル本数を示す。ステータ外径 $\phi 200$ mmで1スロット当たり4本を基準とし, 外径側に2本加えて, 1スロット当たり6本とし, ステータ外径 $\phi 215$ mmとしたもの, 外径側に4本加えて, 1スロット当たり8本とし, ステータ外径 $\phi 230$ mmとしたもの, $\phi 200$ に対し, 内径側に2本加え, 外径側の2本を減らして, 1スロット当たり4本とし, ステータ外径 $\phi 185$ mmとしたものがある。

ステータ内径は最も小さい $\phi 185$ の内径である $\phi 129.5$ を基準とし, 外径 $\phi 200$, $\phi 215$, $\phi 230$ のステータを生産する場合はコイル2本分のコア内径側治具を用いることで, 設備の共用化を可能としている。

これら4種類のステータは, 同一設備での生産が可能であり, 長尺円筒タイプのEV用モータからHEV用としての扁(へん)平円筒タイプまで, さまざまな出力特性およびモータ外径寸法に対応可能である(図4参照)。

上述の工夫により外径を可変にすることが可能で, また波巻の採用により, 積厚も可変にできるので, さまざまな電動車用モータの要求仕様に, 同一生産設備で対応可能となった。

4. 次世代リチウムイオン電池パック

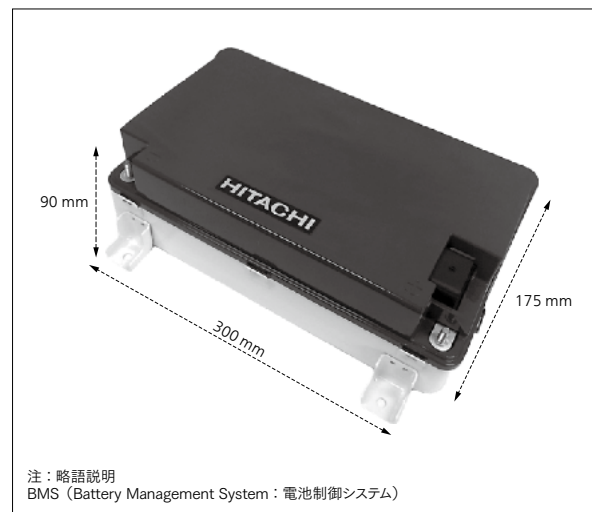
4.1

電動車両の市場予測と取り組み

近年, 乗用車の燃費改善技術として, 電池とモータのパワーを使用して, ガソリンエンジンによる走行をアシストすることを目的としたマイルドハイブリッドシステムが注目されている。マイルドハイブリッド車両の生産台数は, グローバルで2016年の約45万台から2023年には1,280万台を越えると予想⁷⁾されており, 特に欧州や中国では, 比較的安価に燃費を改善できる技術として48 Vリチウムイオン電池によるマイルドハイブリッドシステムが急速に普及すると見込まれている。こうした動向を踏まえ, ハイブリッド車両向けリチウムイオン電池セルの製造技術と, BMS (Battery Management System)技術を結集し, 2016年3月にマイルドハイブリッ

図5|マイルドハイブリッド車両向け48 Vリチウムイオン電池パック

今回開発した電池パックは, 電池モジュール, BMS, ジャンクションボックスなどから成る。



ド車両向け48 Vリチウムイオン電池パックを開発発表した。

4.2

マイルドハイブリッド車両向け 48 Vリチウムイオン電池パックの開発

リチウムイオン電池は, リチウムイオンが電極の材料に出入りすることで充放電する。これまでは, 電池の出力密度を高める方法として, 電極の膜厚を薄くして抵抗を減らすことが一般的であった。しかし, 出力密度が高まる代わりに, 蓄えられるエネルギーが減ってしまうという課題があった。新しいリチウムイオン電池パックは, セルの電極の構造をミクロンレベルで改良し, リチウムイオンが流れやすい構造にすることで, 薄くしなくても抵抗を低減し, 出力密度を高めた。さらに, 正極, 負極それぞれの材料組成を改良し, 単位重量当たり蓄えられるリチウム量を増加させることでエネルギー密度を高めた。これらの技術により, 従来比⁸⁾ 1.25倍の出力密度と, 従来比⁸⁾ 1.5倍のエネルギー密度を同時に実現している。

また, セルの内部抵抗を抑え, 発熱量を低減したことに加えて, リチウムイオン電池パックの筐(きょう)体に熱伝導性や放熱性の高い金属を採用したことにより, 冷却用ファンを不要とし, 設置の自由度を高める薄型化を実現するとともに, 静粛性の向上を図っている(図5参照)。

出力密度の向上により, モータの加速アシストにおけるトルク特性の向上が図れ, 最大出力12 kWを実現することができ, 発進時の力強い走りを可能にしている。ま

表1| マイルドハイブリッド車両向け48 Vリチウムイオン電池パックの主な仕様

今回開発した電池パックの仕様一覧を示す。

項目	仕様
サイズ (mm) (W×L×H)	300×175×90
セル数	12
重量 (kg)	8
容量 (Ah)	8
最大入力 (kW) (10s, 50% SOC, 25°C)	15
最大出力 (kW) (10s, 50% SOC, 25°C)	12
冷却方式	自然空冷

注：略語説明
SOC (State Of Charge)

た、最大入力についても15 kWを可能とし、急減速時に生じる瞬間的に大きな回生エネルギーも回収可能とし、エネルギーの損失も低減している。こうした入出力特性の向上に加え、エネルギー密度の増大により、燃費向上に貢献する (表1参照)。

また、日立オートモティブシステムズのリチウムイオン電池は、優れた耐久性、環境性、安全性を有している。これらの特徴を生かし、日立建機株式会社との共同開発により、ハイブリッド油圧ショベルZH200-6用リチウム

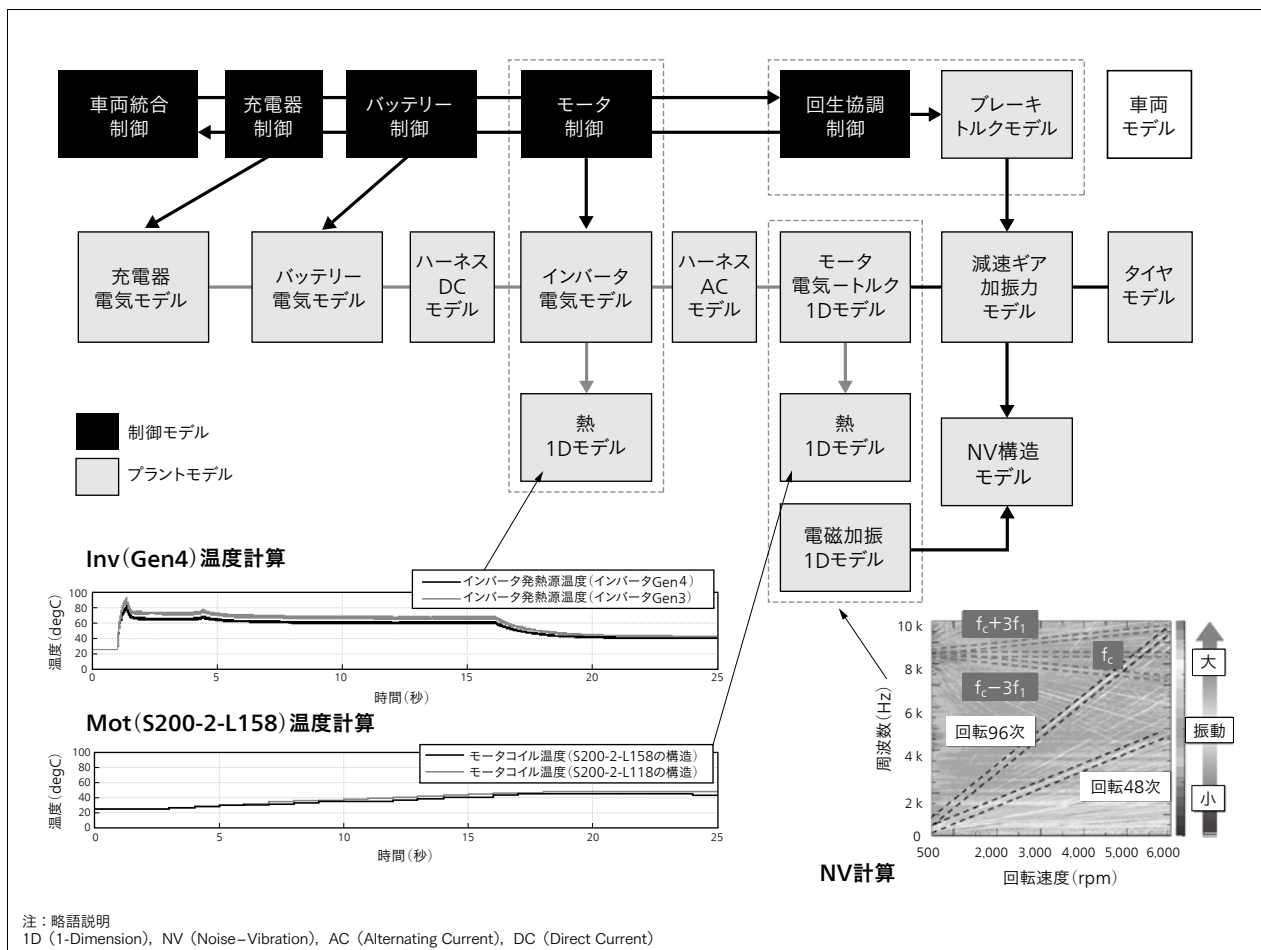
イオン電池モジュールを開発し提供している。

5. 電動パワートレインのシミュレーション技術

電動コンポーネントは個々の性能はもとより、最終的には組み合わせでいかに所望の性能を達成するかが重要なポイントである。さまざまな製品の集約体である自動車において、部分最適のみでは高性能な車両とは成り難

図6| エネルギー+NV連成シミュレータ

バッテリー→インバータ→モータと流れるエネルギーフローの分析および、その際に発生するメカ的な現象 (騒音/振動, 熱) までをすべて連成してシミュレーション分析し、製品設計に反映する。



注：略語説明
1D (1-Dimension), NV (Noise-Vibration), AC (Alternating Current), DC (Direct Current)

い。日立オートモティブシステムズでは、これら電動コンポーネントの組み合わせにおいて、シミュレーションを用いた解析により、組み合わせについてより適している製品仕様および制御技術について検討を行っている。

5.1

エネルギー+NV連成シミュレータ

電動パワートレインシステムは、電気によるエネルギーを用いた動力発生源であるとともに、システム内でトルクを発生し回転体などが動作する部分を含むメカトロニクス製品でもある。

そのため、そのシステムの最適化においては、動力性能のみならず、車両に搭載した際のメカトロニクス領域であるNV (Noise-Vibration: ノイズ/振動) まで含めた分析と検証が必要である。高い動力性能を発揮していても、高騒音では自動車としての商品性が成立しない。

日立オートモティブシステムズでは、先に述べたエネルギーとNVまでをシミュレータ上で連成したシステムシミュレータを開発し、開発段階での電動コンポーネントの性能検証、および現物試作前でのNV評価と必要なメカ設計の改良などを行えるような開発を行っている。

従来のシミュレーションではエネルギーとNVは個別の分析であることが多かったが、その際にメカトロニクス製品として連成したときに実機が発生する振動、騒音、熱については実機を試作し評価するしかなく、これが時に大きな設計手戻りを生じさせる要因となっていた。これに対し、連成シミュレータを適用することにより、試作レスの段階で振動、騒音、熱に関する事前検討と改善策の織り込みが可能となり、製品段階での検証と性能確保がより確実となった (図6参照)。

6. おわりに

本稿では、電動車両を構成する電動パワートレインのコンポーネントであるインバータ、モータ、バッテリーおよびそれらの組み合わせのシミュレーション技術について述べた。

パワーエレクトロニクスとマイコンの進化に支えられた電動コンポーネントは自動車用パワーユニットとしてさらに進化を続ける。日立は、今後拡大していく環境対応自動車のニーズに応える製品開発を推進することによって地球環境保護へも貢献していく。

参考文献など

- 1) 吉原重之, 外: ハイブリッド電気自動車用パワートレインの電動化技術開発, 日立評論, 91, 10, 768~771 (2009.10)
- 2) 濱野宏, 外: 電動車駆動用標準モータの開発, 日立評論, 95, 11, 747~751 (2013.11)
- 3) 中津欣也, 外: 環境対応自動車を支える次世代インバータ技術, 日立評論, 94, 4, 330~333 (2012.4)
- 4) 木村隆志, 外: ハイブリッド電気自動車向け高電力密度インバータ, 日立評論, 95, 11, 752~757 (2013.11)
- 5) R. Saito et al.: "Enhanced flexibility of inverter design by applying 2 in 1 double side power module," Automotive Power Electronics, April 2015 Paris (APE 2015).
- 6) A. Matsushita et al.: "An experimental study on the thermal performance of double-side direct-cooling power module structure," PCIM Europe 2016, May 10-12, 2016, Nuremberg, Germany
- 7) IHS Markit社, (2017.5)
- 8) マイルド・ハイブリッド車両用48Vリチウムイオン電池パック, 日立評論, (2017.1)

執筆者紹介



山田 博之

日立オートモティブシステムズ株式会社
パワートレイン&電子事業部 制御システム設計本部
電動制御システム設計部 所属
現在, 電動パワートレインのシステム制御設計に従事
自動車技術会会員



齋藤 隆一

日立オートモティブシステムズ株式会社
パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 所属
現在, 自動車用インバータ開発に従事



松延 豊

日立オートモティブシステムズ株式会社
パワートレイン&電子事業部 パワートレイン設計本部
EP機器設計部 所属
現在, EV/HEV用モータの設計開発に従事
電気学会技術調査専門委員
国際規格ISO/TC22/SC37WG4モータWG委員



石津 竹規

日立オートモティブシステムズ株式会社
パワートレイン&電子事業部 電池事業推進本部
LIB開発部 所属
現在, リチウムイオン電池の設計開発に従事
電気化学会会員



宮崎 泰三

日立製作所 研究開発グループ 制御イノベーションセンタ
システム制御研究部 所属
現在, 電動車両の設計技術に関する研究に従事
技術士(電気電子部門)
電気学会会員, 計測自動制御学会会員