

次世代鉄道を支える車両システム技術

徳山 和男
Tokuyama Kazuo

金子 貴志
Kaneko Takashi

藤原 正弘
Fujiwara Masahiro

鈴木 啓史
Suzuki Keishi

日立は、次世代鉄道システムの多様なニーズに応えるため、技術開発に注力している。「蓄電池応用システム」では、蓄電池に蓄えたエネルギーで走行する蓄電池駆動システムをはじめ、さまざまなシステムを開発した。「主回路システム」では、SiCハイブリッドモジュールの特徴を生かし、主回路システムの省エネルギー化を図った。また、「車両制御システム」では、省エネルギー運転などの乗務員支援

システムを開発している。「保安装置」では安全・安定輸送の向上をめざし、定点停止制御の自動学習機能やミリ波速度センサの開発に取り組んでいる。

これらのシステムを連携することで、環境価値（省エネルギー）、社会価値（安定輸送）、業務価値（保守メンテナンス）の向上をめざしている。

1. はじめに

次世代の鉄道システムを取り巻く課題には、(1) エネルギー問題、(2) 少子高齢化、(3) 安全・安定輸送の向上の3つが挙げられる。(1) エネルギー問題では、電気料金の高騰、化石燃料の枯渇、地球温暖化防止に向けた省電力技術が求められる。(2) 少子高齢化では、ベテラン技術者や継承者の減少が予想されることから、ICT (Information and Communication Technology) を活用した運用保守メンテナンスや運転技術の継承が求められる。(3) 安全・安定輸送の向上では、駅の安全性向上を目的としてホーム柵が導入されている。ブレーキ条件（性能、天候など）が編成により異なる場合でも定位置停車を正確に制御する必要がある。

日立は、このような課題に応えるため、さまざまな技術開発に取り組んでいる。

2. 蓄電池応用システム

近年、大容量・高出力の蓄電池を鉄道車両に応用して気動車の省エネルギー化や電車のさらなる省エネルギー化を図る技術への期待が高まっている。日立は非電化路線を走行する車両に蓄電池を適用して動力システムを電動化し、消費エネルギーコストを低減する技術や、電車の主回路に蓄電池を追加して回生余剰電力の回収や回生電力を増大し

て消費電力量を低減するシステムの開発に取り組んでいる。

2.1 ハイブリッド駆動システム

気動車の燃料消費量削減、有害排出物低減を目的に、東日本旅客鉄道株式会社と共同でディーゼルエンジン発電機とリチウムイオン電池をエネルギー源として組み合わせたシリーズハイブリッドシステムを開発した。このシステムは、動力・補機を電動化し、主回路にハイブリッド自動車向けの高出力のリチウムイオン電池を追加することで、従来の液体式気動車では実現できなかった、回生ブレーキ、エンジンのアイドルストップや高効率点での定回転運転を可能にし、燃料消費量削減、騒音低減を図っている。このシステムを搭載したキハE200形は、2007年7月よりハイブリッド鉄道車両として世界初の営業運転を開始し、HB-E300系リゾートトレイン（[図1](#)参照）は2010年10月より営業運転を開始している。いずれの車両に搭載したハイブリッドシステムも順調に稼働中であり、リチウムイオン電池も所期の安定稼働となっている。

2.2 蓄電池電車

非電化区間を走行する車両の他の省エネルギー化技術として、車両に大容量の蓄電池を搭載し、あらかじめ電化区間で充電した蓄電エネルギーのみで非電化区間を走行する



図1 | リゾートトレインHB-E300系

各車両の屋根上にリチウムイオン電池 (15.2 kWh) を搭載している。

蓄電池電車 (架線レス電車) への注目が高まっている。蓄電池電車が実用化できれば、エンジンが不要となり、大幅な省保守化、エネルギーコスト削減が実現できるだけでなく、電化・非電化の直通運転による乗客の利便性・車両運用効率の向上、非電化区間沿線の活性化も期待できる。

日立は、九州旅客鉄道株式会社、公益財団法人鉄道総合技術研究所、株式会社GSユアサと共同で交流電化区間での充電に対応した蓄電池電車用主回路システムを開発し、試験車両に搭載した^{1), 2)}。

図2に開発した主回路システムの構成を示す。車両に極力多くの走行用蓄電池を搭載するため、蓄電池周辺機器の追加は最小限にとどめ、既存の交流電圧用主回路を最大限利用する構成とした。

開発した試験電車で本線走行を実施し蓄電池電車の基本

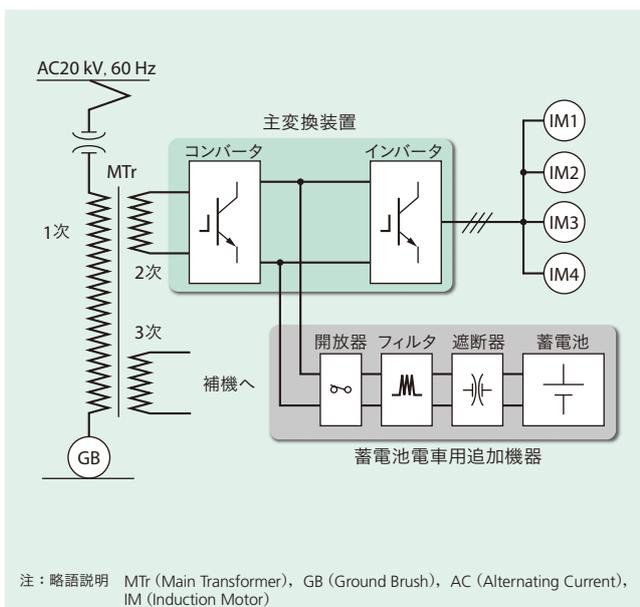


図2 | 交流電化区間対応の蓄電池電車用主回路システム

高電圧化した蓄電池を遮断器などを介して主変換装置の直流部に接続することで、蓄電池の充電専用の機器を不要としたシンプルな主回路構成を実現している。



図3 | 蓄電池試験電車の外観

車両の床下に搭載した大容量のリチウムイオン電池 (83 kWh) に電化区間でエネルギーを蓄え、その電力を用いて非電化区間を走行する。

性能を確認した。なお、本開発は九州旅客鉄道が国土交通省の鉄道技術開発費補助金の交付を受けて実施した。図3に試験電車の外観を示す。

2.3 電車への蓄電池応用技術

日立は蓄電池技術を電車に応用した次世代の駆動システムについても開発に取り組んでおり、すでに、高速度域での安定回生を支える蓄電池応用技術を開発している³⁾。

近年の電車の省エネルギー化は、車両の軽量化、回生ブレーキの有効活用によって進化してきたが、作り出した回生エネルギーを架線に戻せないケースや、戻しても架線などの抵抗負荷で消費され、回生能力を十分に活用していないという課題がある。

これらの課題を解決するために日立は2007年より蓄電池技術を電車に応用した蓄電池システムの開発を進めてきた。今回製品適用に向けた取り組みの中で、(1)蓄電池システムの床下(ぎ)装、(2)乗客・乗員の安全性の2点について解決策の一部を紹介する。

(1)に関しては、蓄電池の床下搭載を実現するため、充放電時に発生する熱の冷却方式を抜本的に見直し、高密度実装を実現した。また、従来のインバータ部と蓄電池の充放電制御のためのチョッパ部を一体型のパワーユニットで構成することで部品点数を削減しシステムの小型化を実現している。図4に主回路ツナギを示す。(2)については、各種規格や関係省庁の安全基準を満たし、乗客・乗員の安全性を考慮した設計としている。

以上により2013年より西武鉄道株式会社20000系電車(20105編成)に開発したシステムを搭載して営業運転にて評価試験を実施している。本試験で得られたデータ・知見を基に製品化に向けたさらなる開発を進めていく。

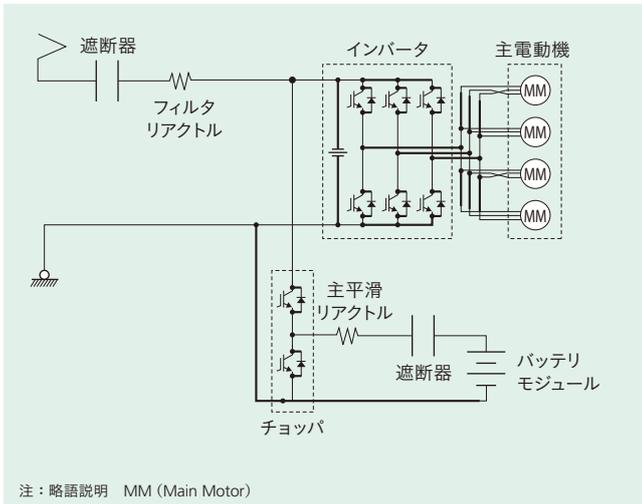


図4 | 蓄電池システム主回路ツナギ

蓄電池システムの床下艙（ぎ）装を実現した。各種規格、関係省庁の安全基準を満たし営業運転にて評価を実施している。

3. 次世代主回路システム

主回路システムのエネルギー問題への取り組みとして、インバータと主電動機など個々の機器の損失低減を図るとともに、システム制御による省電力化の開発を行っている。(1) 高精度化した磁界解析ツールを用いて、主電動機の損失発生状態を把握し、(2) さらに、高調波損失を低減するためにインバータのPWM (Pulse Width Modulation) 制御パターンを新たに開発し省電力化した⁴⁾。これらの技術は2章で述べている蓄電池応用システムへ適用し段階的成長を狙った開発としている。図5に次世代主回路システムへの取り組みを示す。

3.1 次世代インバータ

インバータではSiC (Silicon Carbide：炭化ケイ素) ハイブリッドモジュールの開発など、個々の部品の高効率化を進めることで、現在主流のSi (Silicon：ケイ素) を用いた

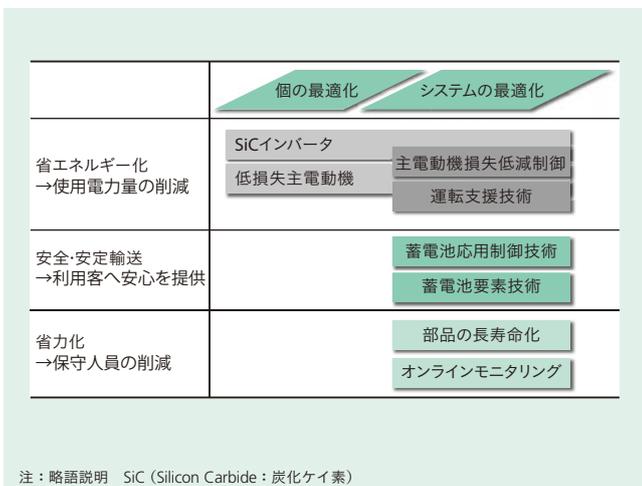


図5 | 次世代主回路システムへの取り組み

個の最適化からシステムの最適化を図る。

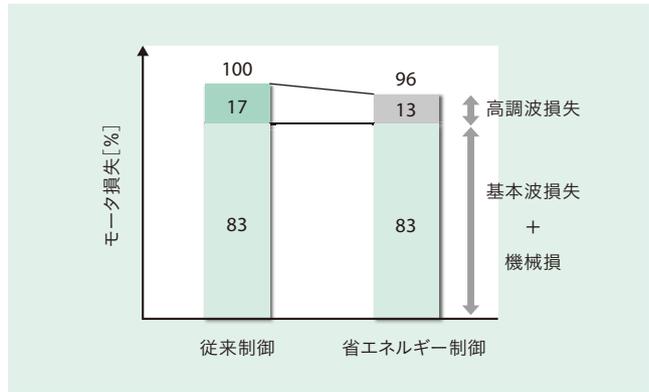


図6 | 省エネルギーPWM制御適用時のモータ損失低減効果

省エネルギーPWM (Pulse Width Modulation) 制御適用時のモータ損失低減効果について、起動から最高速度までの力行積算値で評価している。従来制御下でのモータ損失を100%とした。

インバータに比べ容積と質量を40%、電力損失を35%低減した。

さらなる省エネルギー化に向け、PWM制御におけるモータ損失低減技術を開発し、モータ損失を4%低減した。

図6に主電動機損失[1MM(Main Motor)分]の比較を示す。

また、少子高齢化社会ではメンテナンスの省力化が必要とされている。特殊技能を必要としない、誰にでも簡単に部品の交換を行える構造や、使用部品の長寿命化による保守期間の長期化を行う。接触器などの稼働部については、車両制御装置と連携することで、動作時間の監視を行い状態変化時に保守員へ部品交換を知らせるシステムを開発した。

3.2 高効率主電動機

主電動機の損失には、鉄損、銅損、機械損、高調波損があり主電動機の高効率化においてこれらの損失を低減する技術開発を行っている。鉄損、銅損の低減のため、新幹線用主電動機などに用いられている低損失材料の在来線への適用が進んでいる。また、詳細な磁界解析を行うことで、

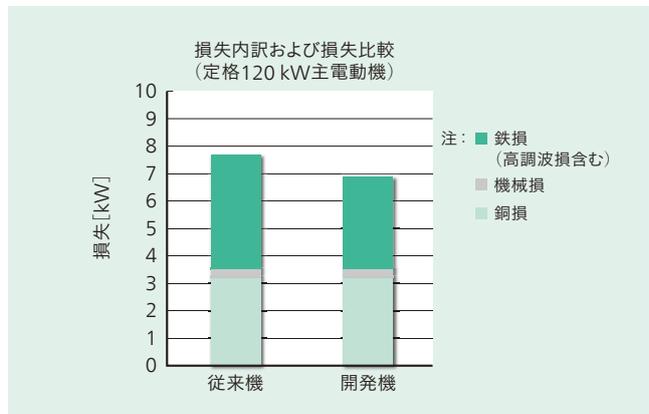


図7 | 従来機と開発機の損失比

インバータ制御と低損失材料を使用した主電動機の組み合わせで全損失を低減させた。

主電動機の高調波磁束の分布を把握し、高調波損失低減を図ったインバータ制御と低損失材料を使用した主電動機の開発により全損失を従来機より約11%低減させた。図7に従来機と開発機の損失比を示す。これら高効率主電動機の性能を最大限生かせるよう、VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータ装置と連携した開発を進めている。

4. 車両制御システム

次世代鉄道システムは標準化されたオープンネットワークで構成することで、運行管理システムや電力管理システムなどの他システムとの情報連携が容易なアーキテクチャとしている。このため車両制御システムにオープンネットワークを取り入れることで、利便性の向上、サービス向上を図ることができる。運用で必要となる情報、保守で必要となる情報、状態情報など車両制御システムと車上装置をつないで情報のリアルタイム性を高めることで、乗務員や検修員の業務効率を向上させるとともに、旅客に対する細やかな情報提供を可能としている。

4.1 次世代の車両制御システム

次世代の鉄道システムに対応するためには、車両制御システムは標準化されたオープンネットワークで構成する必要がある。図8に次世代の車両制御システムのコンセプトを、図9にシステム構成の概要を示す。

大きな特徴は3つある。(1) 標準化されたオープンネットワークを採用し処理と伝送を分離したシンプルなシステム構成、(2) 洗練されたGUI (Graphical User Interface) デザイン、(3) プラグインユニット構造を採用し、保守性の

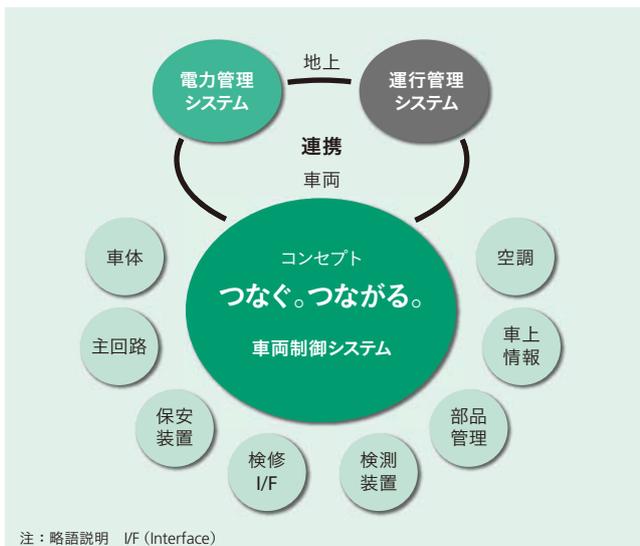


図8 | 次世代の車両制御システムのコンセプト

「つなぐ。つながる。」をコンセプトにした車両制御システムの実現により、鉄道事業者の課題解決をめざす。

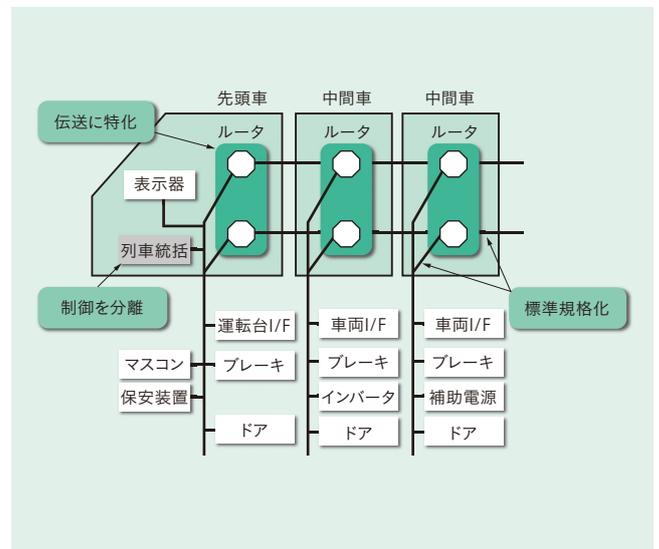


図9 | 次世代の車両制御システム構成の概要

標準化されたオープンネットワークを採用し処理と伝送を分離したシンプルなシステム構成となっている。

向上を実現したこと、である。

図10に装置外観と運転台表示の一例を示す。表示器のメニュー表示はポップアップ表示形式を採用し、情報表示時の検索の操作性向上を図った。また装置のメンテナンス性向上を図るため、これまで採用していたトレイ方式から取り扱いのしやすいユニット方式とし、誰にでも簡単に交換が行える構成とした。

単純な機能を足し合わせることで必要な機能を実現していくというシンプルな設計思想により、信頼性と拡張性の向上を図っている。近年の車両使用期間は30年～40年となっているが、その間に車両の価値向上として機能を追加する際、車両制御システムの一式を更新する費用を抑えることを狙った工夫である。

また、機能追加となる新技術もそろえており、省エネルギー運転支援機能やオンラインモニタリングにて省保守を実現させることも可能である。

日立は東日本旅客鉄道と試験電車にて開発・現車試験を行い、制御の安定性の確認などに取り組んできた⁵⁾。

このたび、その基本構成を適用した東京モノレール株式



図10 | 装置外観および運転台表示

プラグインユニット方式を採用した装置と視認性を向上させた表示器で、乗務員や保守員の操作負担軽減を図る。



図11 | 東京モノレール10000形運転台外観
 運転台に2台のモニターを設置している。操作性向上のため、ポップアップ表示形式を採用した。

会社10000形向け車両制御システムを製作し納入した。

図11に10000形運転台外観を示す⁶⁾。

5. 保安装置、運転支援システム

列車のさらなる安全・安定輸送をめざし、既存装置と同等以上の信頼性・安全性を確保しつつ将来の拡張性を有した車上主体の列車制御システムの導入が増えつつある。また、ホームからの転落事故や列車との接触事故を防止する目的としてホーム柵の導入が進められている。ホーム柵システムでは、ホーム柵と車両ドアの位置を一致させるための高い停止精度が必要である。日立では、これらのニーズに対応する技術開発に取り組んでいる。

5.1 保安装置

日立では西日本旅客鉄道株式会社とともに既存ATS (Automatic Train Stop) 装置に換わる新保安システム^{※)}の開発に取り組んでいる。この新保安システムは、信号機や曲線などの地上設備情報をデータベース化してあらかじめ車上装置に登録し、車上装置に列車位置検知の機能を持たせることで線路の固定情報に関して車上装置主体で連続的な速度制限制御を実現している(車上主体制御)。

車上装置は、送受信・データベース処理部と制御部に大別され、日立は制御部の開発・設計・製作を担当した。制御部の制御を司るCPU (Central Processing Unit) 基板は、従来の10倍の処理能力を有する最新の制御基板シリーズを採用し、新保安システム(車上主体制御)と既設のATS-P (Pattern) システムの両方の制御機能の搭載を可能としている。また、運転扱いに関わる幅広い運転支援機能も搭載している。本装置は、今後、西日本旅客鉄道の広島

※) 新保安システム
 西日本旅客鉄道株式会社では、鉄道輸送のさらなる安全性、安定性の向上をめざすために2008年から本システムの開発を始めた。

地区に順次投入される新造車両に搭載される。

5.2 ミリ波速度センサ⁷⁾

車上主体による列車制御システムでは、車上装置の速度検知、位置認識が重要となってくる。これまで速度検知や距離積算は、車輪の回転により駆動する速度発電機によるものが一般的であったが、空転や滑走時の精度向上に課題がある。

この課題を解決する方法として、対地との速度を非接触で計測する非接触式速度センサ(ミリ波速度センサ)がある。ミリ波速度センサを使用すれば、空転・滑走の影響がなくなり安定した速度検知が可能となることや、車輪径の設定が不要となるなどの効果がある。

日立は西日本旅客鉄道と共に小型・軽量のミリ波速度センサを新たに開発した。図12にミリ波速度センサの試作機を示す。西日本旅客鉄道の路線で走行試験を実施し良好な計測結果が得られている。図13に走行試験チャートを示す。

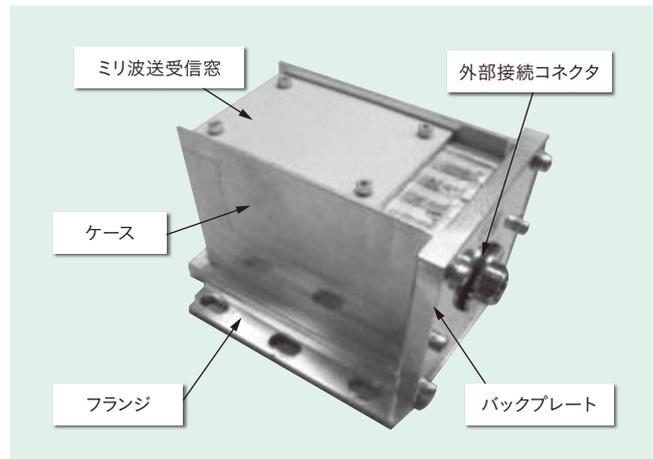


図12 | ミリ波速度センサ試作機
 鉄道分野での実用化をめざし、小型、軽量のミリ波速度センサを開発、試作した。

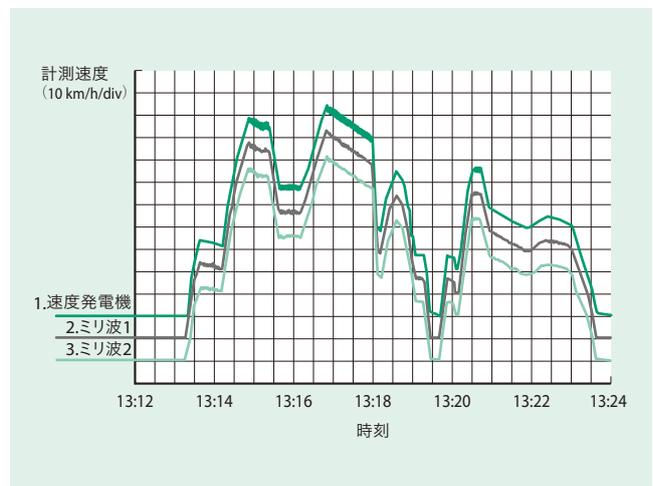


図13 | 走行試験チャート(営業線)
 ミリ波速度センサと速度発電機の数値計測値は、ほぼ同値となっている。

5.3 運転支援システム(定位置停止制御)

ホーム柵の導入に伴い、駅定位置に停止させるため、運転支援システムであるATO (Automatic Train Operation) / TASC (Train Automatic Stop Control) 装置のニーズが高まっている。これまでのATO/TASC初期調整では、走行試験時に車両性能(設計値)と実際の車両性能の乖(かい)離から試行錯誤的に制御パラメータを調整していたため作業工数が多くなり、結果的に鉄道事業者の試験日数の確保や調整が必要となっていた。

日立では、ATO/TASC制御の自動調整機能の開発に取り組んでいる。この自動調整機能では、通常の走行実績をデータとして蓄積し、オンラインで統計処理を行い車両性能を把握する。その結果を走行制御指令に反映させ、車両に適したブレーキ指令を出力するものである。この自動調整機能を適用することで、初期調整の工数低減(現車試験日数の低減)が図れるとともに、営業線投入後もその車両に合った自動調整(学習)を行うので停止精度維持に貢献できると考えている。

6. おわりに

日立は個々に進化したシステムの提供を行い、多様化されたニーズに応え、次世代の鉄道システムに向け、技術開発を行っている。

将来はICTの発展により他システムとの連携が実現し、情報提供だけでなく制御まで可能になる。個々のシステムが接続することで、相乗効果によりユーザーの経済性向上へつながるよう、さらなる技術革新を進めていく所存である。

謝辞

最後に、各種開発において各鉄道事業者ならびに関係各位に多大なご尽力・ご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 畠田, 外: 交流電車の改造による蓄電池電車化, 第20回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2013) 論文集53-3-5 (2013.12)
- 2) 金子, 外: 交流電化区間に対応した蓄電池電車用主回路システムの開発, 第50回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 524 (2013.11)
- 3) 嶋田, 外: 車上搭載蓄電池を使用した駆動システムの省エネルギー化技術, 日立評論, 94, 6, 447~451 (2012.6)
- 4) 坂井, 外: PWM制御におけるモータ損失低減技術, 第50回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 502 (2013.11)
- 5) 祖父江, 外: 次世代車両制御システム (INTEROS) の開発, 第49回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集 (2012.11)
- 6) 樋口, 外: 東京モノレール 殿納め10000形ATIの概要, 鉄道車両と技術 No.212 (2014.4)
- 7) 岩尾: 日立製作所による鉄道車両用ミリ波速度センサの開発と応用について, 鉄道車両と技術 No.208 (2013.12)

執筆者紹介



徳山 和男

日立製作所 交通システム社 営業統括本部 国内車両システム部 所属
現在, 在来線車両全般のシステム取りまとめに従事



金子 貴志

日立製作所 交通システム社 水戸交通システム本部 車両電気システム設計部 所属
現在, 鉄道車両駆動用電力変換装置の開発・設計に従事
電気学会会員



藤原 正弘

日立製作所 交通システム社 輸送システム本部 関西システム部 所属
現在, 車両システムのエンジニアリング取りまとめに従事



鈴木 啓史

日立製作所 交通システム社 営業統括本部 国内車両システム部 所属
現在, 車両システムのエンジニアリング業務に従事