

さらなる快適性と環境性をめざす 鉄道システム

横瀬 藤彦
Yokose Fujihiko

中澤 慶光
Nakazawa Yoshimitsu

岩村 重典
Iwamura Shigenori

鉄道システムの課題と求められる対応

近年、地球環境問題の深刻化や、少子高齢化の進展などにより、鉄道システムを取り巻く環境も変わってきている。鉄道は、自動車や飛行機に比べてエネルギー効率に優れた交通手段であるが、地球環境問題への対応のために、さらなる省エネルギー化が求められている。少子高齢化の進展により、高齢者などの移動をこれまで以上に優しくサポートする役割も求められている。鉄道事業者側でも、ベテラン技術者や継承者が減少するため、ICT (Information and Communication Technology) などの活用による

支援技術がいつそう必要となってきた。また、輸送機関の中で、鉄道の優位性を強化するためにも、快適性を向上することが継続的に求められている。

さらに、安全・安定輸送のために、たゆまぬ技術開発を推進していくことが重要である。

技術開発の概要と注力分野

日立は車両、駆動用制御装置をはじめ、**運行管理システム^(a)**や電力管理システム、情報サービスなども手がける鉄道総合システムインテグレーターとして、列車の高速

(a) 運行管理システム

列車ダイヤの計画作成から、列車の運行、信号機やポイントのリアルタイム自動制御、列車ダイヤ予測による運転整理支援、設備の監視制御・保守、さらに旅客案内システムなども含めて一括管理・リアルタイム制御を行うコンピュータシステム。

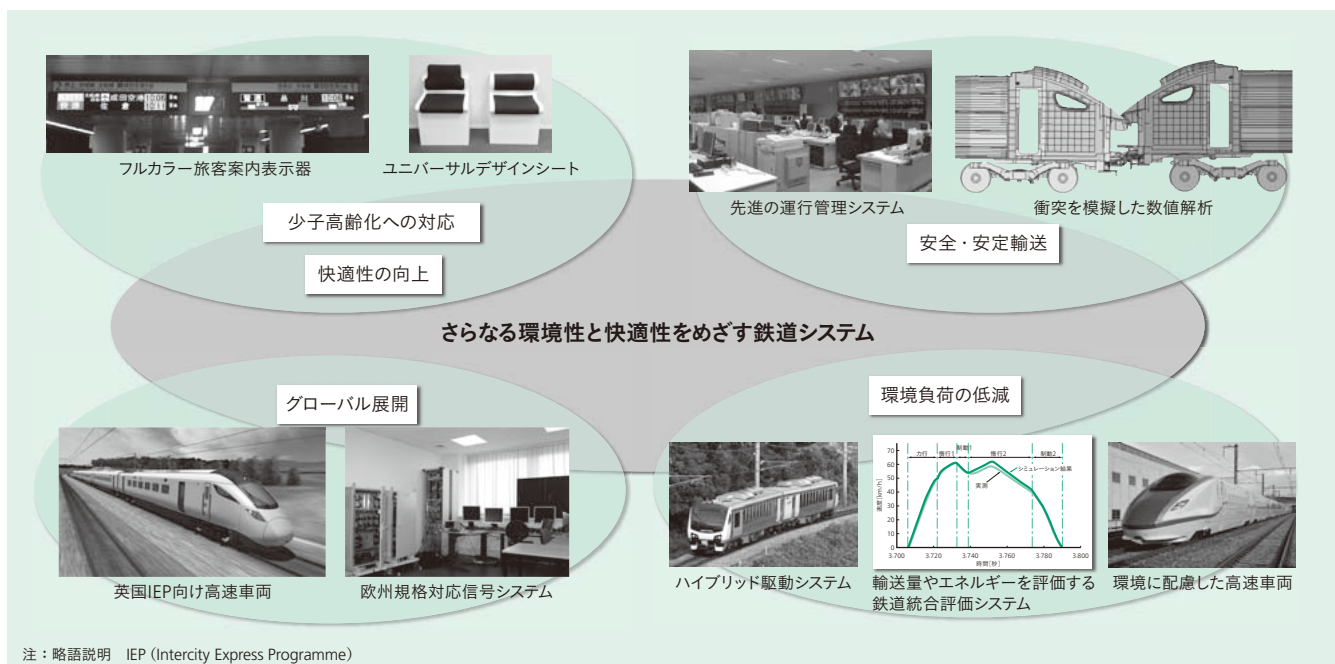


図1 | さらなる環境性と快適性をめざす鉄道システム

日立は鉄道総合システムインテグレーターとして、環境性と快適性を両立させる鉄道システムのための技術開発を行っている。

化・運転の高密度化・正確性の向上・安定輸送を実現し、その進化に貢献できるよう先端技術の開発を行っている。グローバルカンパニーとして、日本だけでなく英国・中国をはじめとした海外での鉄道システムの発展にも貢献できるよう、中高速車両や欧州規格に対応した信号システムなどのグローバル展開を進めている（[図1](#)参照）。

鉄道に求められている課題と、それに対する主な研究・開発での対応を[表1](#)に大別する。

1つ目の課題である省エネルギーについては、車両の軽量化による省エネルギーの推進、蓄電池を応用した省エネルギー技術などの開発を進めている。2つ目の快適性の向上については、車内案内表示器による乗客への情報案内サービスの提供や、バリアフリー対応製品の採用といった取り組みをしている。3つ目の安全・安定輸送の向上については、運行管理システムの高度化、回生電力貯蔵システムによる「緊急走行」技術の開発や、保守・点検作業における作業性向上などの取り組みを行っている。これらの技術開発を通して、今後ともさらなる鉄道システムの発展に貢献していきたいと考えている。

車両システムにおける技術開発

日立では、新幹線や在来線の車両を、アルミニウム合金を用いて製作することで軽量化を図り、環境負荷の低減をめざした車両を提供してきた。近年では快適性の向上が望まれており、最新の新幹線高速車両では、高速走行時の床下からの振動伝達を抑制し快適な客室空間を確保するために、**アクティブサスペンション**^(b)を採用している。

バリアフリー対応として、デッキ部に客室構成を示す点字銘板を掲示しているほか、東日本旅客鉄道株式会社のE7系新幹線高速車両、西日本旅客鉄道株式会社のW7系新幹線高速車両では、すべての腰掛け上部に座席番号を示す点字を表記している。また、電動車椅子に対応した多機能トイレを採用するなど、バリアフリーを意識

表1 | 課題と研究・開発での対応

各課題に対して、さまざまなアプローチで研究・開発を行っている。

課題	研究・開発での対応
省エネルギー	<ul style="list-style-type: none"> ● 車両の省エネルギー技術（軽量化、LED灯の採用など） ● 主回路システムの省エネルギー技術（SiC応用技術など） ● 蓄電池を応用した省エネルギー技術 ● 地上車上を連携したエネルギーマネジメントシステム技術
快適性の向上 少子高齢化	<ul style="list-style-type: none"> ● 乗客への情報案内サービスの充実（車内案内表示器、ホームでの旅客案内表示器など） ● 地域と調和した車両デザインの採用 ● エクスぺリエンスデザインの実践 ● バリアフリー対応、ユニバーサルデザイン
安全・安定輸送の向上	<ul style="list-style-type: none"> ● 回生電力貯蔵システムによる「緊急走行」技術 ● 車両の衝撃吸収構造の開発 ● 保守・点検作業の作業性向上

注：略語説明 LED (Light Emitting Diode), SiC (Silicon Carbide)

した部品の採用を進めている（[図2](#)参照）。

在来線でも、省エネルギーのための開発を進めている。近年では車両用照明の消費電力低減が重要となっており、車両用前照灯のLED (Light Emitting Diode) 化を推進している。LED前照灯は、従来のシールドビームやHID (High Intensity Discharge) ランプを採用した前照灯より視認性や照度が向上していることが確認されている。消費電力については、従来のHID前照灯より $\frac{1}{6}$ 程度に削減することが可能となった。

公共機関、医療機関では、ユニバーサルタイプのシート（以下、「UDシート」と記す。）として、身体的な負担が少なく、立ち座りに時間がかかる高齢者や足の不自由な人に優しいシートが普及しつつあるが、このUDシートの鉄道車両用としての開発を進めている。市場調査などの結果から「座面を少し高くし、奥行きを浅くすることで、立ち座り動作をスムーズにする」ことを基本としつつ、以下の効果をねらった

(b) アクティブサスペンション

車体の動揺を感知するセンサー、電動式アクチュエータ、制御装置などから成り、車体の揺れに応じてアクチュエータを動かして左右の振動を低減することにより、高速走行時にも快適な乗り心地を実現する。



図2 | 最新の新幹線高速車両の点字銘板と多機能トイレ

最新の新幹線車両には、バリアフリーを意識した車内設備が採用されている。



図3 | UDシートモックアップ

鉄道車両用のUDシートの開発を進めている。



図4 | TMK10000形モノレール車両外観

沿線との調和を図ったデザインとしている。

(c) PWM

Pulse Width Modulationの略で、パルス幅変調制御とも呼ばれる。パルス信号（オンとオフを繰り返す電気信号）のオンの時間幅を変化させることにより、出力電圧（電流）を制御する方式。制御性と効率に優れ、インバータ回路で広く採用されている。

(d) 鉄損、銅損、機械損、高調波損

鉄損は、変圧器・電動機などの鉄心中の磁束が時間的に変化するときが発生する損失、銅損は、変圧器・電動機などのコイルにおける抵抗によって発生する損失、機械損はモータの軸受部とブラシの間の摩擦や、回転部分の空気抵抗による損失で、これらがモータなどで発生する主要な損失となる。また、高調波損は、ある電気機器から発生した高調波（電流のひずみ）が他の機器に影響を及ぼすことで発生する。

シートとすることとした。(1) 座る際、膝を深く曲げないため、身体的な負担を少なくする。(2) 座面が高く、奥行きを浅くすることで、室内の空間を広く使う。このUDシートは、実際の使用環境での評価・検証を実施し、製品化をめざしている(図3参照)。

一方、モノレールでは、東京モノレール株式会社向けに「10000形車両」を開発した。この車両はA-train技術をベースにモ

ノレール用として最適化したものである。車両の構体材質には、軽量かつリサイクル性に優れたアルミ合金を用い、構体溶接には多くの実績があるFSW (Friction Stir Welding：摩擦かくはん接合)を用いることで溶接によるゆがみが極めて少ない構造としている。車両の外観は、沿線の特徴である「空・海・緑」をイメージしたデザインとなっている(図4参照)。

次世代の主回路システムの開発

主回路システムの省エネルギー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。次世代主回路システムへの取り組みを図5に示す。

インバータではSiC (Silicon Carbide) 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) を用い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^(c)制御におけるモータ損失低減技術を開発した。

主電動機の損失には、鉄損、銅損、機械損、高調波損^(d)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が行われている。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、主電動機の高調波磁束の分布を把握し、高調波損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。

グローバル展開

グローバルマーケットへの対応としては、日立はロンドンと英国の主要都市を結ぶ、IEP (Intercity Express Programme：都市間高速鉄道計画) 向けの鉄道車両Class 800/801を開発した。IEPは、英国の主要

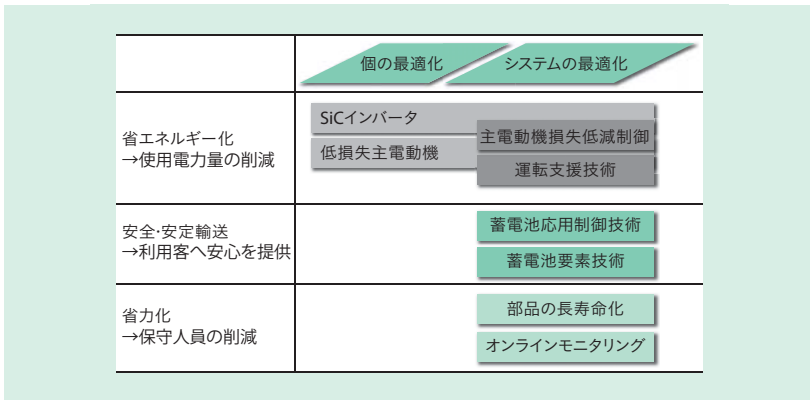


図5 | 次世代主回路システムへの取り組み

各機器の最適化からシステムの最適化をめざした開発を推進している。

幹線である East Coast Main Line と Great Western Main Line において、運行開始から30年以上を経過した車両を全面的に置き換えるプロジェクトである(図6参照)。

Class 800/801は、非電化区間を含む複数の路線、異なるインフラ条件、将来の電化計画や変動する旅客需要に柔軟に対応し、最新の欧州規格および英国鉄道規格に適合する必要がある。また、非電化区間における営業走行を実現するため、ディーゼルエンジン付き発電機[GU (Generator Unit)]を搭載し、さらに標準化された中間車を増減させることにより、最大12両編成まで拡張できるユニット構成にした。

また、欧州では衝突安全性に関する規格要求がある。それらの規格に適合するための衝撃吸収構造の開発においては、初めに、実物大車両先頭部の動的圧潰試験を行い、衝撃吸収構造の基本特性を確認した。併せて、数値解析によるシミュレーションで試験結果を再現できることを確認した。この数値解析手法を活用し、実際の試験では検証が難しい編成状態での衝突を模擬した評価もして衝突安全性を検証している。

一方、信号システムについてもグローバル市場展開を図るべく、欧州統一規格信号システムであるETCS^(e)の製品開発に成功した。今回開発したETCS車上装置は、欧州規格へ適合している。規格で定められた手法に従って設計・検証を実施していること、設定された信頼性(稼働率)および安全性(危険側故障率)の目標値を達成していることをNoBo (Notified Body)^(f)および、第三者のアセッサーであるISA (Independent Safety Assessor)の査定を受け、認証機関から認証を取得した。

今回開発したETCS車上装置は、欧州以外のサプライヤーが開発した保安装置として初めてSIL4^(g)安全性および欧州規格に適合する認証を取得した。日立は、英国をはじめとするグローバル市場にて、本製品の積極的な拡販を進めている。

運行管理システムの高度化と 分かりやすい案内サービス

首都圏の鉄道輸送を支える主要制御システムである東日本旅客鉄道の東京圏輸送管理システム[ATOS (Autonomous decentralized Transport Operation control System)]は、鉄道輸送だけでなく、乗客へのサービス向上や鉄道設備の保守・点検に従事する保守作業者の安全性向上を支援している。ATOSは使用開始から約18年が経過しており、現在、システム全体の大規模リニューアルを実施している。保守作業者が使用する保守作業用端末についても「エクスペリエンスデザイン」というアプローチを実践しながら大幅に刷新した。

エクスペリエンスデザインとは、ユーザーが顕在的・潜在的に求めていることを発見し、それをリアルに描き出すことで、ユーザーの豊かな経験の可能性を製品・サービスの中に織り込むことである。具体的には、その活動の基盤アプローチの一つである「人間中心設計プロセス」に基づき、(1)ユーザーの理解、(2)ユーザー要求の把握、(3)試作、(4)ユーザー要求に照らし合わせた評価というプロセスの反復的な実行をめざす。

次期保守作業用端末の開発では、まず、夜間の保守作業業務に従事する保守作業員に同行し、端末の使用に関する観察調査とヒアリング調査を実施した。次に、デザインコンセプトを設定し、ラフスケッチや実寸モックアップを作成しながら画面デザインを検討した。配色やボタンの配置変更な

(e) ETCS

European Train Control Systemの略。欧州で国境を越えた路線間の相互乗入を実現するために規格化された、都市間鉄道向けの列車制御システム。欧州指令(EU Directive)によって、欧州を中心に導入が義務づけられている。

(f) NoBo (Notified Body)

第三者認証機関。政府によってメンバーが指名され、欧州委員会に通知された組織。メンバーは、統一規格などの適合性評価を行うために必要な知識や独立性、要件を満たしているかどうかを基準に選考される。

(g) SIL4

SILはSafety Integrity Levelの略称。機能安全の国際規格IEC 61508において、プラントやシステムのリスクの大きさを基にした安全度水準を表す尺度。SIL1からSIL4まで4段階が定められ、SIL4が最高水準となる。



図6 | 英国IEP向け高速車両Class 800/801

日本で培った軽量化、高速化技術を英国鉄道システムに適用させて開発した。



図7 | 総合指令所の指令室

指令室に横並びに配置された各路線の運行表示盤，総合操作卓により，4路線，全列車の運行監視と自動制御が可能である。

どの意見・要望を端末にフィードバックすることを繰り返しながら，ユーザーにとって扱いやすい保守作業用端末を開発している。

一方，東京の地下鉄輸送を支える東京都交通局は，総合指令所の新設に伴い都営地下鉄三田線，浅草線，新宿線，大江戸線の

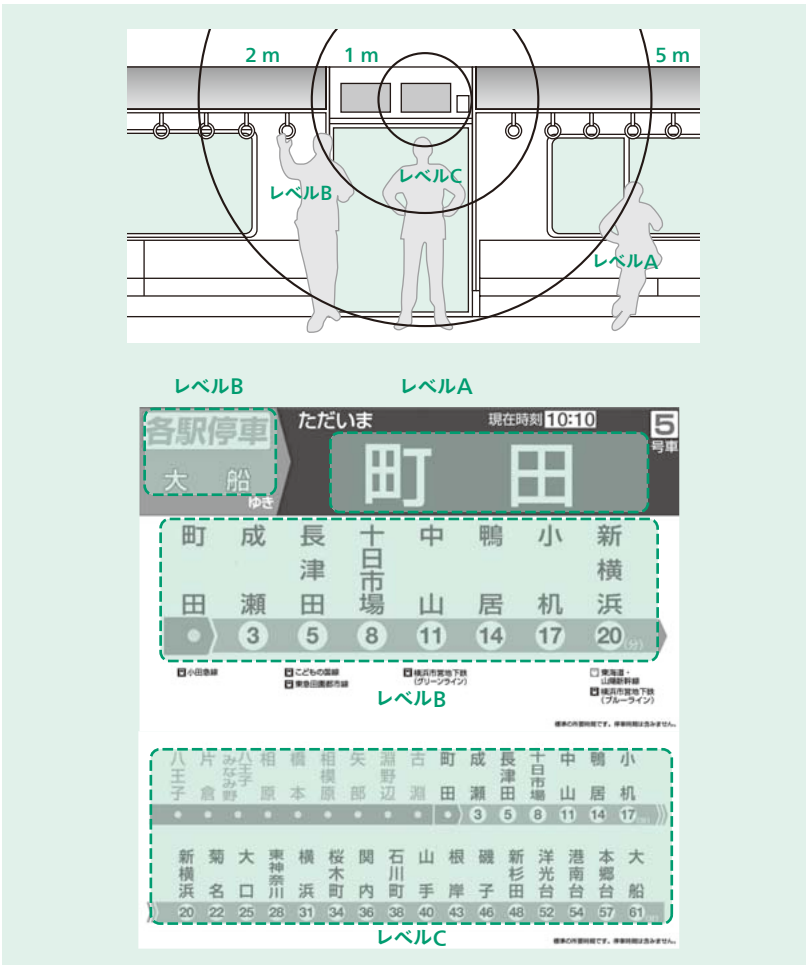


図8 | 視野角と文字サイズ

表示器と乗客の距離を3段階に分け，情報の優先順位に応じた文字サイズを規定している。

列車運行制御装置を2013年2月から順次路線ごとに更新し，2014年2月に全線の更新を完了した。

今回の更新では，すべての中央装置を新設の総合指令所に集約した。指令室に横並びに配置された各路線の運行表示盤，総合操作卓の画面や入力など，ユーザーインターフェースを統一することで，指令室内での指令業務を改善した（図7参照）。

安全・安定輸送への取り組みとして，運転告知器の新設や，乗務員／駅員への指令情報の新たな伝達手段を構築し，自動運転調整機能との連携により，乗務員／駅員への指令情報の迅速な伝達と遅延拡大軽減を可能とした。

また，案内サービスの充実として，浅草線旅客案内表示器をフルカラーLED表示器に更新した。この表示器により羽田空港（東京国際空港）と成田国際空港を結ぶ相互直通運転を支える浅草線の多種多様な列車案内を色付きで表現できるようになり，乗客への分かりやすい旅客案内表示を実現した。

車内の分かりやすい案内表示

近年，通勤車両においては，案内機能の向上を図るために，車内案内表示器の設置が増加している。日立では2006年から本格的な開発を開始し，通勤車両を利用するさまざまなユーザーの視点での情報デザイン（見やすく，分かりやすい）を行っている。案内画面に表示する情報については，ユニバーサルデザインを考慮した設計を行っている。例えば，視野角と文字サイズについて，LCD（Liquid Crystal Display）表示器を見る利用者との距離を3段階に分け，伝える情報の優先順位と文字のサイズを規定することで，より分かりやすいデザインとしている（図8参照）。

車内案内表示システムのアーキテクチャには，運行管理システムなどで実績のある自律分散方式を採用し，高い稼働率を実現するとともに，高速でコンテンツを配信することも可能とし，ニュース・天気予報な

どのリアルタイム性を求められるコンテンツ更新に強みを発揮している。

省エネルギーを実現する技術

鉄道システムには、地球環境問題への対応のために、さらなる省エネルギー化が求められている。日立では、リチウムイオン電池を適用した回生電力貯蔵システム(B-CHOPシステム)を2007年に実用化し、現在7サイトで稼働中である。電車のブレーキ時に生み出される回生電力は架線を介して力行する車両が利用することで省エネルギー化が図られているが、閑散時間帯など回生電力を消費する車両が少なくなると、回生ブレーキを使用することができなくなる。そこで、地上側に蓄電池を設置して回生電力を吸収するシステムがB-CHOPシステムである。

東日本大震災以降、大規模災害時などでの停電ならびに津波への対応が懸念されており、貯蔵した電力で停電時に電車を緊急走行させるというニーズは鉄道事業者の間で全国的な広がりを見せている。このニーズに対応するため、東京地下鉄株式会社と共同で緊急走行の実証実験を実施した。緊急走行実証試験では、B-CHOPで確立した技術の応用として計画、機器設計を行い、機器搬入、誘導障害試験(信号設備への影響確認)を経て、2014年1月26日に10両編成車両を用い、東京メトロ東西線の西葛西駅から南砂町駅間2.7 kmの自力走行に成功した。

リチウムイオン電池の応用は車両側でも進んでいる。日立は、気動車の燃料消費量削減、有害排出物低減を目的に、東日本旅客鉄道と共同でディーゼルエンジンとリチウムイオン電池を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^(h)**では実現できなかった、回生ブレーキ、エンジンのアイドリングストップや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9参照)は2010年10月より営業運転を開始している。

リチウムイオン電池の応用は電車にも適用が可能である。日立は、車上側での回生失効対策として、既存の駆動システムに蓄電池システムを追加し、回生エネルギーの有効利用による省電力化をめざしている。

地上システム、車上システムの個々の省エネルギー技術に加え、今後はICTの応用により、これらを統合・連携した技術が発展すると考えられる。日立では、変電所/電力管理/運行管理といった地上システムと車両システムの連携による省エネルギーをめざしたエネルギーマネジメントシステムを開発している。図10にエネルギーマネジメントシステムの概要を示す。車両、変電所、電力管理、運行管理の情報を連携させ、運行状況に応じて出発抑止や惰行運転指示などを行うことで、車両運行としての省エネルギー化を図ることを目的としている。

省エネルギーの検討のためには、高精度なシミュレータが必要である。日立は鉄道システムを模擬して輸送量やエネルギーを評価する鉄道統合評価システムの開発を進めている。このシステムは、共通のフレームワークの上に、列車運行に関わるサブシステムである車両、信号、運行管理、変電

(h) 液体式気動車

内燃機関から車輪への動力伝達にトルクコンバータを使用した気動車。トルクコンバータとは、流体(オイル)の力学的作用を利用し、入力側と出力側の回転差でトルクを増幅する変速機であり、自動車のオートマチックトランスミッションなどに広く利用されている。



図9 | 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。

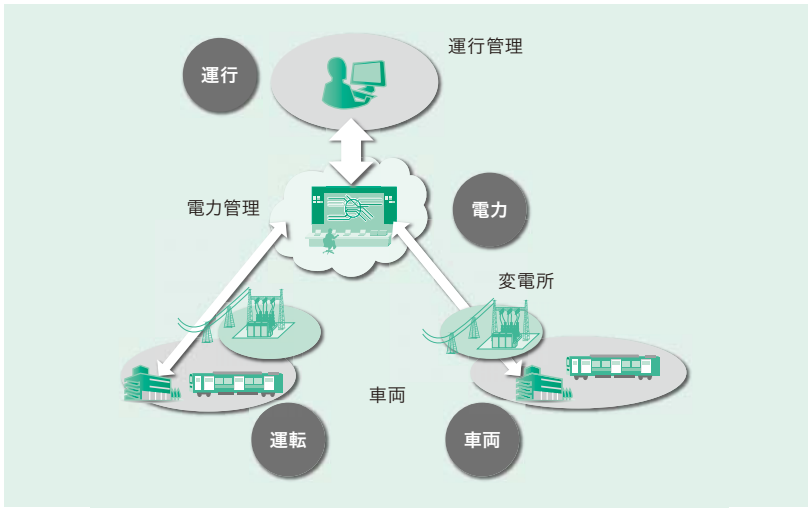


図10 | 日立が考える地上車上を連携したエネルギーマネジメントシステム

車両、変電所、電力を管理する電力管理システム、運行を管理する運行管理システムの情報を連携させ、運行状況から出発抑止や惰行運転指示などを行うことで車両運行の省エネルギー化を図る。

(i) き電システム

変電所から、架線などを通じて電車や電気機関車に電気を供給するシステム。架線を伝った電気はモータを駆動した後、レールなどの帰線を経て変電所に戻される。電源の交流・直流の違いなどによって、さまざまな方式がある。

所、電力管理を含めてき電システム⁽ⁱ⁾のモデルを有している。

これらのさまざまなモデルの組み合わせや制御の最適化により、路線に応じた省エネルギー提案を行うことが可能である。

また、省エネルギーの検討のためには、鉄道システムのエネルギー使用実態の把握が必要となる。そこで、沖縄都市モノレール株式会社と連携し、鉄道システムのエネルギー使用実態調査を実施した。定速運転を使用した走行と定速運転を使用せずノッチの入り切りによる走行(マニュアル運転)を実施し、消費電力量への影響を分析した結果では、マニュアル運転の方が、定速運転よりも5%省エネルギーとなった。同時力行および同時力行回避による走行試験では、変電所の供給電力量の比較で、10%

以上の違いが出る結果となった。これらの結果より、車両の走行パターンを工夫することで、さらなる省エネルギーの可能性があることが分かった。また、同時力行の回避により、省エネルギー化が図れるものと推測される。一方、走行試験結果(実測)を用いて鉄道統合評価システムの精度を評価した結果では、実測と4%のズレで車両としての電力量を評価可能であることを確認した。今後、鉄道統合評価システムを用いて、さまざまな省エネルギー施策を提案していく。

鉄道への期待に応える技術開発

地球環境問題の深刻化などから、世界的に見ても鉄道システムに対する期待はますます高まっている。持続可能な社会の実現に向けて、各種の輸送機関は、さまざまな技術開発を行っているが、鉄道も環境負荷がもともと小さいという優位性をいっそう強化するために、継続した技術開発が求められている。安全・安定輸送に加えてICTなどの活用による利用者にとっての魅力向上する技術の開発が重要である。

日立は、鉄道システムの総合インテグレーターとして、こうした期待に応えていくことをめざしている。グループ各社のさまざまな技術を結集し、さらなる快適性と環境性をめざす鉄道システムを実現していく考えである。

参考文献

1) 横須賀, 外: 社会ニーズに応える先端鉄道システム開発, 日立評論, 94, 6, 428~433 (2012, 6)

執筆者紹介



横瀬 藤彦
日立製作所 交通システム社 経営企画本部 研究開発企画室 兼 輸送システム本部 輸送システム部 所属
現在、鉄道技術開発の取りまとめ業務に従事



中澤 慶光
日立製作所 交通システム社 輸送システム本部 輸送システム部 所属
現在、鉄道輸送システムのエンジニアリングの取りまとめに従事



岩村 重典
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