

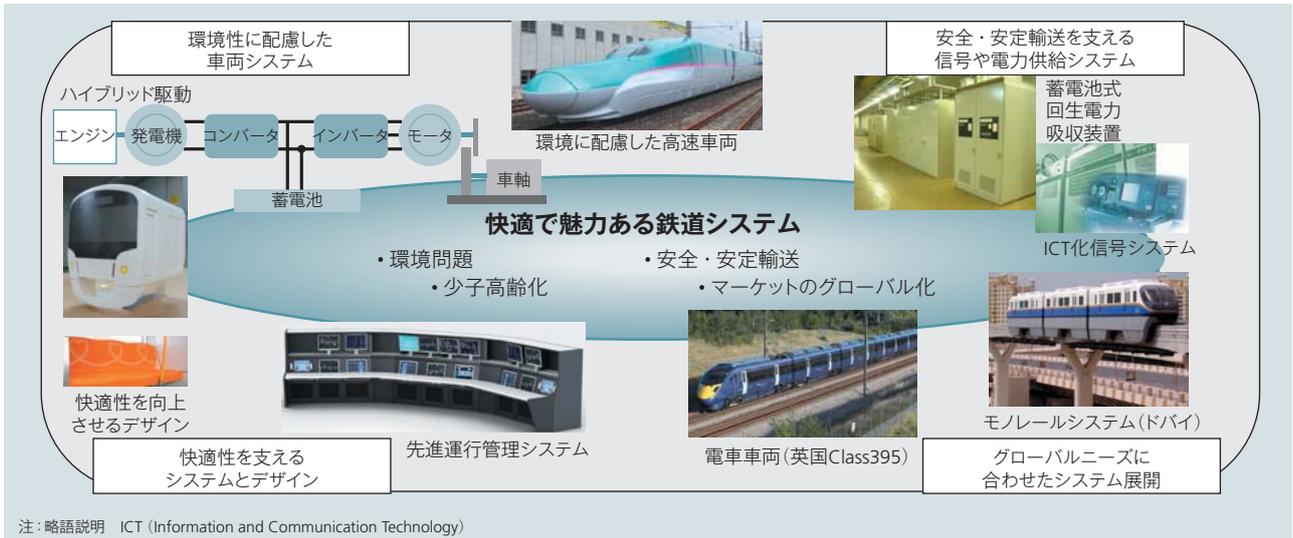
より快適で魅力ある鉄道サービスを実現するシステム技術

System Technologies for More Comfortable and Attractive Railway Services

横須賀 靖 Yasushi Yokosuka
阿部 行伸 Yukinobu Abe

檜垣 博 Hiroshi Higaki
石川 勝美 Katsumi Ishikawa

長洲 正浩 Masahiro Nagasu



注：略語説明 ICT (Information and Communication Technology)

図1 より快適で魅力ある鉄道システム開発

日立グループは、安全制御はもちろん、環境性や快適性に優れた魅力ある鉄道システムのための技術開発を行っている。

鉄道へ求められる役割と機能

近年、地球環境問題のクローズアップ、あるいは、鉄道輸送には関係が薄いと思われていた米国発の経済危機や国内の政権交代などにも影響され、鉄道を取り巻く環境はこれまでにない動きを見せているように思われる。

米国では、国内経済危機に対する雇用対策と環境問題への対応をねらい、高速鉄道網建設計画が複数発表されている。環境問題が大きく取り扱われるようになったのは、1997年の京都議定書議決の前後からと思われるが、それからすでに10年以上が経過し、鳩山政権は、前提条件付きではあるものの、CO₂排出量を2020年までに1990年比で25%削減するという目標を表明した。これらは、鉄道ビジネスにとっては追い風と考えられる。

一方では、国際貿易開放の流れで、鉄道ビジネスもグローバル化し、日本市場への海外メーカーの参入意欲が高まっている。

規格の面では、欧州勢が主導する国際標準規格への適合が要求されるようになり、これまでの日本のやり方の見直しが迫られかねない。さらに、少子高齢化の進展による国内輸送の減少や、高速道路無料化計画による自動車交通への旅行者のシフトなど、鉄道輸送に対する懸念材料も出てきている。

安全・安定輸送のための技術開発は当然として、さらに環境負荷の低減と同時に運用コストを削減する技術や、鉄道輸送をさらに活性化するために、鉄道旅行の快適性や魅力をいっそう高める技術開発がメーカーにとって重要な課題となってきた。

快適で魅力ある鉄道システム

日立製作所は、トータルシステムメーカーとして、環境性を意識した車両システム、質の高い運行を支える運行管理システム、安全を支える信号や安定した電力を供給するシステムなど、鉄道に関係する広範なシステム開発を行っている。また、国内

表1 課題と研究開発技術

各課題に対して、最先端のソリューションを提供するためのさまざまな技術分野で研究開発を行っている。

課題	主な研究開発
環境負荷低減	<ul style="list-style-type: none"> ●高効率回生電力貯蔵システム技術 ●走行特性解析（空気抵抗、騒音解析） ●高効率・超寿命電池と制御技術 ●新材料技術（SiCや代替フロン）
快適性の向上	<ul style="list-style-type: none"> ●高速高品質ITとタイムリーな情報提供システム技術 ●振動制御や人間工学的なアプローチ ●人に優しいユニバーサルデザイン
高安全高機能化・グローバル対応	<ul style="list-style-type: none"> ●高安全電子通信技術（LSIやネットワーク） ●システム関連系やアシュアランス技術 ●RAMS対応や強度解析技術

注：略語説明 SiC（炭化ケイ素）、IT（Information Technology）、LSI（Large-scale Integration）、RAMS（Reliability, Availability, Maintainability and Safety）

で培った技術を基にして、世界の鉄道システムの発展に貢献すべく、中高速車両やモノレールシステムなどのグローバル展開を進めている（図1参照）。

これらのシステムを実現する技術開発として、大別すると、表1に示すように、(1) 環境負荷を低減する材料や二次電池技術、空気抵抗や車外騒音を軽減する解析技術、(2) 快適な情報通信サービスを実現するための技術や快適空間を提供するための技術、(3) 高安全・高機能制御を実現する制御技術、あるいは、これらをグローバル展開するための技術となり、鋭意開発に取り組んでいる。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る。

快適で魅力ある車両システムとグローバル対応技術

国内向け車両に対する取り組みでは、新幹線の高速化がまず挙げられる。東日本旅客鉄道株式会社ではE5系新幹線電車（以下、E5系と記す。）において国内初の営業

運転速度320 km/hを予定しており、現在量産先行車（図2参照）で走行試験を実施中である。新青森開業後、東京圏内との大幅な時間短縮が可能となる。

E5系では走行性能向上、環境性能への配慮、快適性向上のための種々の施策がなされている。特に居住空間の快適化のために、車内静粛性、左右振動低減施策の採用、スーパーグリーン車（仮称）の導入が予定されており、魅力ある車内空間を創生している。

また、通勤電車では、「A-train次世代アルミ車両システム」を、さらにデザイン面から進化させた車両を開発した（図2参照）。エクステリアデザインでは、沿線や利用者との一体感、鉄道事業者のブランドイメージと合致するデザインを提案し、インテリアデザインにおいても清潔感・開放感の創出、バリアフリーに配慮した配色を施し、つり手・腰掛けなどにおいてもユニバーサルデザインの視点から提案を行ってきた。

一方、海外向けには、グローバル展開の一つとして、モノレールシステムの海外展開を継続中である。今回、ドバイ向けモノレールシステム（図3参照）を製品化し、2009年4月の開業後、順調に稼働している。日立グループは大型・標準型・小型モノレールと輸送需要に応じたバリエーションを有しており、このシステムの受注は、国内外に納入してきたモノレールシステム製品の長年の稼働実績が評価されたものである。今回のドバイ向けモノレールは、モノレール車両としては初の、ダブルスキン構造^(a)・FSW^(b)を採用した構体構造であ



図2 東日本旅客鉄道株式会社のE5系新幹線（左）と西武鉄道株式会社の30000系電車（右）

高速車両対応先進技術の開発と、次世代通勤車両では人に優しい新規デザインコンセプトなどを提案し技術開発を行っている。



図3 トバイのPalm Jumeirah Transit System向けモノレール車両(左)と英国向けClass395高速車両(右)
A-trainコンセプトを基にして英国仕様に対応した技術開発と、自動運転に対応したモノレールシステムを製品化している。



る。また、NFPA^(c)耐火規則を満たすべく、耐火床構造および車両間貫通路への耐火扉を採用した。さらに、運転手や指令員による手動操作の必要がない完全自動運転システムとなっている。

さらに、鉄道発祥の地である英国市場参入の第一弾として、高速車両Class395(図3参照)を29編成174両納入し、2009年12月から正式に営業運転を開始した。この車両はA-trainのコンセプトの下、顧客仕様、英国や欧州規格、運用、インフラなどの現地の仕様に合わせて開発・設計を行ったものであり、英国での走行試験による信頼性・快適性の確認と、納入後のメンテナンスサービスも日立グループが担当している。特に、衝突、強度、耐火、騒音などの分野で日本と規格が大きく異なる点、在来線区間には静的車両限界がなく車両メーカーがゲー징(車両限界)を設定・立証しなければならない点、さらには英国特有の車両ダイナミクスの確認などが課題となったが、これらに対応する技術開発・設計製作を行って、英国認証機関による審査・規格適合の承認を得た。

主回路には新たに開発した新型のIGBTモジュール(HiGT: High Conductivity IGBT)と、この性能を最大限に引き出すアクティブゲート制御を適用し、低損失性と低ノイズ性を両立させている。解析主導設計やプログラムの自動生成ツールを活用することで設計段階からの品質向上を図っている。また、制御論理部についても、1CPU(Central Processing Unit)化を図るとともに、低電圧部品の適用によりファンレス化を達成している。

制御についても新しい技術を適用している。カスケードベクトル制御^(e)は、家電などで幅広く使用されている永久磁石モータの制御のために開発された技術である。この技術を鉄道で幅広く使われている誘導電動機に適用することで、制御の安定性とトルク応答性を大幅に向上している。この制御は、制御の難易度が高まる低損失な誘導電動機で大きな効果を発揮すると考えている。

制御機器間のインタフェースについても、鉄道分野で主流になりつつあるイーサネット^(*)を採用した。

(a) ダブルスキン構造

2枚の板の間にトラス構造のリブ(補強材)のある中空押し出し型材を用いた、鉄道車両の車体構造。二重構造の型材は軽量で強度が高いことから、従来のシングルスキン構造に用いられていた柱やはりなどの骨組みが不要となる。そのため、車体のシンプル化が図れ、部材点数の減少や溶接コストの低減といった効果が得られるだけでなく、車内空間の拡大、均一な二重構造による遮音性の向上なども可能にする。

(b) FSW

Friction Stir Weldingの略。摩擦かくはん接合。回転ツールと呼ばれる円柱状の工具を回転させながら接合材料に挿入し、摩擦熱を発生させながら移動させることにより接合する方法。材料を溶かさないうえ、溶融溶接の場合よりも接合部のゆがみや変形が少ない、接合面および裏面が平滑、気泡・割れなどの欠陥が生じない、接合強度が高いなどの特長を持つ。

(c) NFPA

National Fire Protection Associationの略。全米防火協会。1896年に設立され、1930年に法人化された非営利民間団体で、防火基準の制定、技術指導、火災安全調査などの事業を行っている。建築物から火災用具、各種業務用具、消火設備、電気設備など、さまざまな分野で防火安全規格を制定しており、その規格は全米で広く認知され、準拠・参照規格として採用されている。

(d) IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistorの略。絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ。バイポーラトランジスタとMOS-FET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)を組み合わせた半導体素子。高耐圧でありながら導通損失を低減でき、大容量インバータ機器の主力デバイスとなっている。

(e) カスケードベクトル制御

日立製作所が独自に開発した交流モータの制御技術。交流電流を、モータのトルク成分と、その直行成分に分け、それぞれの成分を制御する技術をベクトル制御と呼ぶが、日立製作所では、スマートベクトル制御とカスケードベクトル制御という特徴の異なる二つの制御方式を開発した。カスケードベクトル制御では、電流制御器と非干渉制御器の構成を見直し、高速回転領域まで理想的な電流制御応答を実現している。

コンパクトで効率を高める駆動技術

次世代小型高性能インバータ技術

日立グループは、世界に先駆けて耐圧2 kVの高耐圧IGBT^(d)と、これを使用した鉄道用のIGBTインバータを実用化した。今回開発した次世代小型高性能インバータ(図4参照)は、これまで日立グループが家電から産業機器、さらには自動車機器分野で開発したパワーエレクトロニクス技術を余すことなく適用している。

(*) イーサネットは、富士ゼロックス株式会社の登録商標である。



図4 次世代小型高性能インバータ装置

新たに開発したHiGT(High Conductivity Insulated Gate Bipolar Transistor)や最適な制御技術を開発し、小型高性能化を実現した。

高効率回生システム

日立グループは、世界に先駆けてリチウムイオン電池を使用した鉄道ハイブリッドシステムを実用化した。この蓄電池技術を電車においても活用し、ブレーキ時に生み出される回生電力を有効に活用する技術の開発も進めている。

回生電力は架線を介して力行(りきこう)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「B-CHOPシステム」、または車上に設置して吸収する「連続回生システム」の開発を進めている。

さらに、画期的な回生システムの開発も進めている。これは、蓄電池でインバータ装置の直流部電圧を昇圧して、回生ブレーキの動作速度域を高速域へ拡大する「高速域電気ブレーキ装置」である。B-CHOPシステム、あるいは連続回生システムは、既存の回生システムの範囲で回生電力のむだ

を防止する装置であるのに対し、高速域電気ブレーキは、回生可能な速度領域範囲を拡大する装置であり、新領域の省エネルギー効果を実現するシステムである(図5参照)。

高品質情報サービスとスマートな列車制御システム

新幹線輸送における列車無線の果たす役割が高まり、東海旅客鉄道株式会社の東海道新幹線向けにデジタル化した列車無線の開発を行った。このシステムの開発により、車内インターネット接続サービスの提供も2009年3月14日から開始されている。このサービスの実現のためには、高品質な通信環境を実現しなければならず、モバイルネットワーク技術を用い、さらに高速で移動する列車に対応した高速ハンドオーバ技術や、無線ネットワーク帯域を効率よく使用するためのパケット流量制御技術などの開発を行った(図6参照)。現在、全線を通して安定したサービスを提供しており、好評を得ている。

一方、首都圏の安定輸送を支える主要制御システムであるATOS (Autonomous Decentralized Transport Operation Control System) はたゆみなく進化している。横須賀線延伸に対応し、従来のATOS線区の新規延伸手法や、単線区間へ対応した新たな制御機能を追加した。具体的には、延伸システムの段階的構築手法(図7参照)や単線区間でのデッドロックを防止するための機能開発、さらに、保守作業の設定状況をWebベースのビジュアルな画像で表示

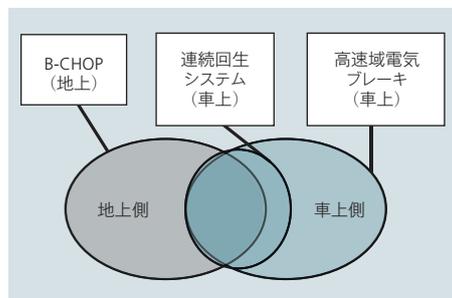


図5 高効率回生システム
B-CHOP(日立グループが開発した地上に蓄電池を設置する回生電力吸収装置)と連続回生システムは、二次電池で蓄電し、回生失効を防止する。高速域電気ブレーキは、回生可能な速度領域を拡大し、新領域の省エネルギー効果を実現する。

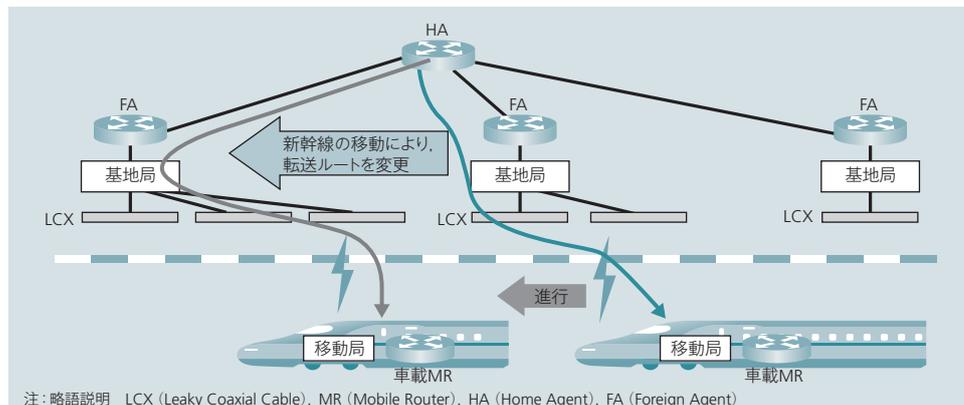


図6 モバイルネットワーク技術を用いた東海道新幹線用列車無線システム
高速ハンドオーバ技術やパケット流量制限技術なども開発し、高効率な無線通信システムを実現している。

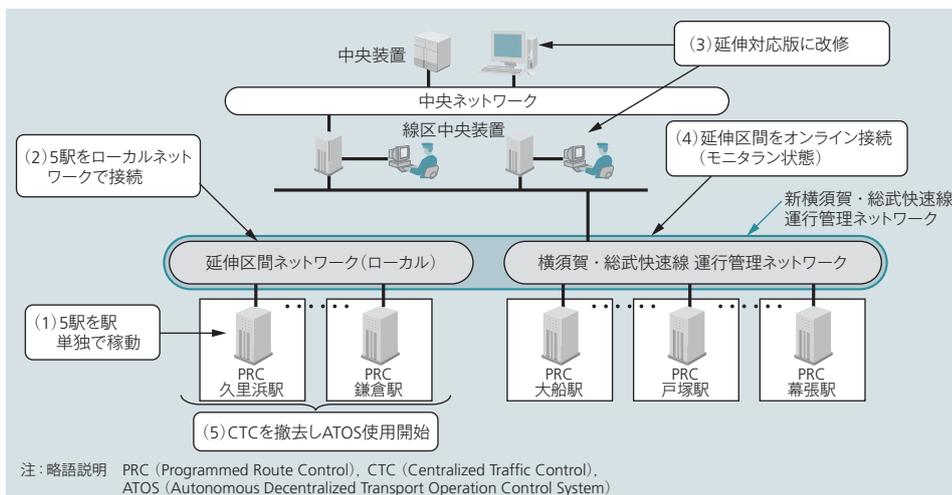


図7 横須賀線延伸区間の段階的構築手順
 駅単独稼動から延伸対応中央装置とのモニタランを経て運用開始する。

可能なモニタ機能 (Web モニタ機能) も開発した。今後も多様化するニーズに応えるべく開発に注力していく。

また、安全な列車制御を支える信号システムに、エレクトロニクス技術やデジタル技術、さらにネットワーク技術 (図8参照) をいち早く取り入れ、先進の信号システムを開発してきた。現在、東日本旅客鉄道株式会社が開発している ATACS (Advanced Train Administration and Communications System) の地上システムの開発を担当し、先端の無線列車制御システムを開発中である。今後も信号システムの技術革新を続け、装置の小型軽量化はもちろん、ダウンタイムの最小化や地上設備の削減による保守作業の軽減などに取り組んでいく。

鉄道システムの発展を支える次世代技術

流体特性解析技術

日立グループは、スーパーコンピュータ

などの計算機を用いた解析によって、これまでも多くの製品開発を行ってきた。ここでは、熱流体関連技術について紹介する。計算機能力の増大に伴い、これまでは実施するのに多大な計算資源や時間を要していた解析に対しても、最近は比較的容易に短時間での解析が可能となってきている。

日立グループは、小さな部品も含んだ製品筐 (きょう) 体全体に対する熱流体解析を実施し、性能を評価する技術開発を行っている。図9は液晶プロジェクタに対して、製品筐体をまるごと用いて熱流体解析を実施した例である。複雑な内部構造を持つ液晶プロジェクタであるが、三次元CADデータを用いて解析格子を自動的に生成し、従来の手法では困難であった筐体全体での熱流体解析を実施することを可能とした。図9 (b) は、液晶プロジェクタ内部の温度の分布を示しており、赤い部分では高温、青い部分では低温になっていることを示し、図中の白線で筐体外部からの冷

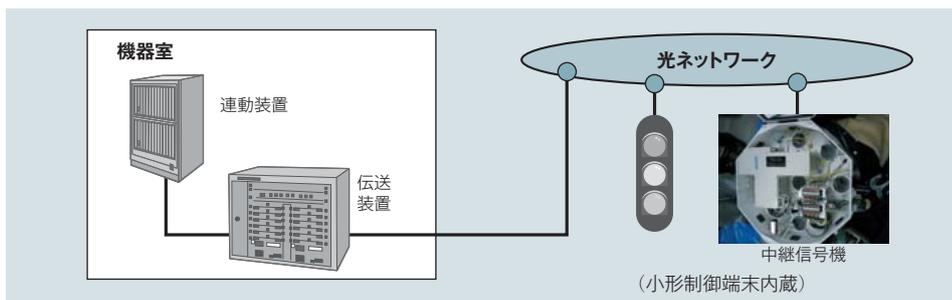


図8 ネットワーク信号システム
 高安全ネットワーク技術を開発し、ネットワークを通して駅での信号制御などを接続可能とすることで、ケーブル本数の大幅な削減を可能にする。

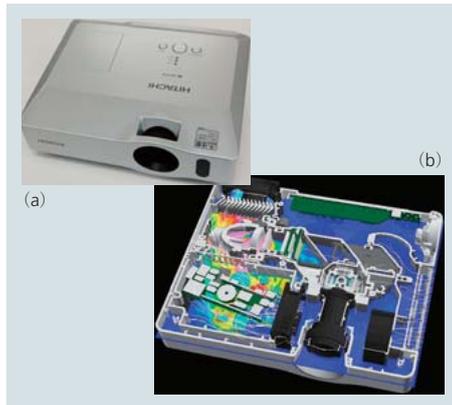


図9 液晶プロジェクタへの熱流体解析の適用
 液晶プロジェクタを (a) に、液晶プロジェクタ内部における温度分布と冷却風の流れを (b) に示す。複雑な形状の内部空間における熱や空気の流れを再現することが可能である。

却風の流れを示している。このような解析を用いて製品の性能・信頼性向上に役立っている。

一方、鉄道に対しても、さまざまな流体解析を実施し製品開発を行っている。解析の一例を **図10** に示す。ここでは、車両がトンネルに突入する際に発生する微気圧波を解析している。この解析においても、三次元CADデータを用いて車両の複雑な先頭形状を忠実に再現し、トンネルの前縁に設置される開口部を設けた複雑な形状の緩衝工〔**図10** (a) 参照〕が設置された場合についても、解析が実施できるようになってきている。**図10** (b) は、解析の結果得られる、車両がトンネルに突入した瞬間の車両壁面およびトンネル壁面における圧力の分布を示している。このような解析により、設計段階での車両の性能評価が可能となっている。

このような解析技術を用いることにより、高速車両がトンネルに突入する際やト

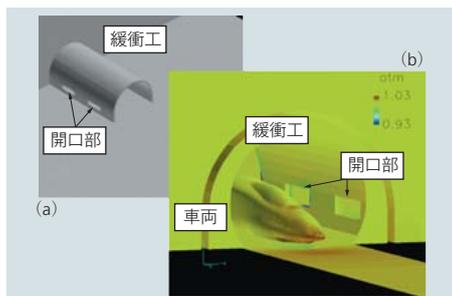


図10 緩衝工が設置されたトンネルへの車両突入解析
 緩衝工を含んだ解析モデルを (a) に、車両がトンネルに突入した瞬間の圧力分布 (トンネル内部より入り口方向を見た図) を (b) に示す。空力特性解析技術の進歩により、設計段階での性能評価が可能になってきている。

ネル内部における車両どうしがすれ違う場合の車両壁面、およびトンネル壁面に発生する圧力変動をより正確に解析することができる。これによって、車体の強度評価やトンネルなどの鉄道インフラに与える影響を評価することが可能となる。

SiCデバイスを用いた駆動技術

インバータ用パワーモジュールに搭載するスイッチング素子やダイオードなどのパワーデバイスの材料には、従来Si (シリコン) が用いられているが、効率向上に物理的な限界が見えてきたことから、次世代の材料としてSiC (炭化ケイ素) などの化合物が注目されている。SiCの特性は、高耐圧で、破壊電界強度がSiよりも10倍近く高いことである。この特性により、Siデバイスの約半にまでチップを薄くでき、その分だけ導通時の抵抗損失を低減し、結果としてデバイスの小型化や冷却系の簡素化、高効率化が期待されている。

SiC適用範囲と最適デバイスを**表2**に示す。スイッチング素子としては、SiC-MOSFET^(f) や、SiC-JFET^(g) が注目されているが、数千ボルトを超える高耐圧では、Si-IGBTが有利である。一方、IGBTに並列に接続するダイオードは、SiCのSBD^(h) が注目されている。SiC-SBDは、電子電流のみで動作するユニポーラデバイスであるため、リカバリ電流がなく、リカバリ損失を大幅に低減できると期待される。

今回、このSiC-SBDに着目し、Si-IGBTと組み合わせたハイブリッドモジュール (**図11**参照) を試作・評価し、鉄道車両インバータに搭載した場合の効果を検証した。開発したダイオードSiC-SBDは、SiC

表2 SiC適用の電圧範囲と最適デバイス

SiC適用範囲と最適デバイスを示す。

デバイス	スイッチング素子		ダイオード素子	
	~2 kV	2 kV~	~数kV	数kV~
SiC適用	○	×	○	△
備考	SiC-MOSFETやSiC-JFET	Si-IGBT	SiC-SBD	SiC-PNダイオード

注：略語説明 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), JFET (Junction Field Effect Transistor), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), SBD (Schottky Barrier Diode)

(f) MOSFET

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistorの略。FET (電界効果トランジスタ)はゲート、ドレイン、ソースの3端子から成り、ゲート端子に電圧をかけることで、ソース、ドレイン間の電流を制御する。その中で、ゲート端子がMetal (金属)、絶縁体となるOxide (半導体酸化物)、Semiconductor (半導体) の三層構造を持つものがMOSFETである。小型化が容易なため、集積回路の論理素子やセンサーの素子など、幅広く用いられる。

(g) JFET

Junction Field Effect Transistorの略。接合型FET。FETの中で、ゲート電極が絶縁されているタイプがMOSFETと呼ばれるのに対し、接合されているタイプがJFETである。高入力インピーダンス、低ノイズを特長とする。

(h) SBD

Schottky Barrier Diodeの略。一般的なダイオードは、半導体中のp型層とn型層との接合 (pn接合) により整流作用を示すが、SBDは金属と半導体との接合面で生じる整流作用 (Schottky Barrier) を利用する。pn接合ダイオードに比べ、順方向電圧が低く、スイッチング動作が速いという特長を持つ。さらに、周波数応答がよく、高周波用途にも適している。

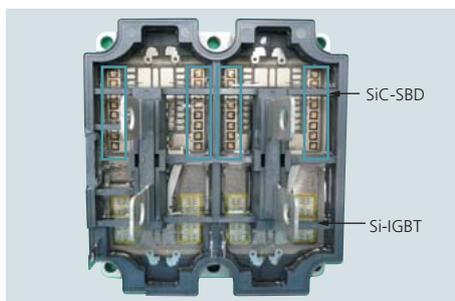


図11 ハイブリッドモジュール (3 kV/400 A)
SiC-SBDとSi-IGBTを組み合わせ、交流架線向けの主変換装置の電力変換損失を全体で約3割低減できることを検証した。

ブリッドモジュールと高速駆動技術を適用することで、Siダイオードを適用していた従来のインバータと比較して、ターンオン損失を約 $\frac{1}{5}$ 、リカバリ損失を約 $\frac{1}{10}$ に低減でき、交流架線向けの主変換装置の電力変換損失を全体で約3割低減できることを検証した。これによりインバータの発熱量も低減するため、冷却装置を含めたインバータの小型・軽量化が期待できる。

の特性を最大限に生かす、pn接合とショットキー接合を組み合わせたJBS (Junction Barrier Schottky) 構造を採用している。ショットキー接合のみを利用する従来のSBDは、pn接合ダイオードよりも高速でスイッチングできるものの、導通時の損失を低減するために抵抗を減らそうとすると、電流を流す向きと逆方向に電圧がかかった際の漏れ電流が大きくなるという問題があった。JBSはその課題を解決し、低導通損失と漏れ電流抑制の両立を可能にする構造で、これによって最大3.3 kVという高い逆方向耐圧と2 Vの低導通電圧を実現した。

今回開発したSiC-SBDを搭載したハイ

鉄道への期待に応える技術開発を

地球環境問題などから、国内に限らず世界的に見ても鉄道システムに対する期待はますます大きくなっており、安全・安定輸送に加え、より環境に配慮した技術の開発や、鉄道を輸送手段として選択してもらうための技術開発が重要になっている。日立グループは、鉄道システムの総合インテグレータとして、こうした期待に応えていくことをめざしている。

そのために、グループ各社のさまざまな技術力を結集し、より快適で魅力ある鉄道システムを実現していく考えである。

参考文献など

- 1) 横須賀, 外: 多様なニーズに応え、環境負荷がより低く快適な鉄道システムをめざして, 日立評論, 89, 11, 819~825 (2007.11)
- 2) Hitachi Transportation Systems Website, <http://www.hitachi-rail.com/>
- 3) 磯島, 外: 高エネルギー線CT装置を用いた現物融合ボクセル流体解析技術の開発と液晶プロジェクタへの適用, 日本機械学会第21回計算力学講演会CD-ROM論文集, p.758~759, 441 (2008.11)
- 4) 阿部, 外: 圧縮性流体解析を用いたトンネル微気圧波解析, 日本機械学会年次大会講演論文集, 2009 (2), S0503-3-2, p.157~158 (2009)
- 5) 石川, 外: SiCダイオードを搭載した鉄道インバータ, 第46回鉄道サイバネ・シンポジウム, 506 (2009.11)

執筆者紹介



横須賀 靖
1984年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 交通システム事業部 所属
現在, 鉄道の国際標準化活動や鉄道技術の取りまとめ業務に従事
電気学会会員, 電子情報通信学会会員



槍垣 博
1976年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 交通システム事業部 笠戸交通システム本部 所属
現在, 鉄道車両の開発設計取りまとめに従事



長洲 正浩
1992年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 交通システム事業部 水戸交通システム本部 交通システム開発センタ 所属
現在, 鉄道駆動システムおよび信号システムの研究開発業務に従事
博士 (工学)
電気学会会員



阿部 行伸
1999年日立製作所入社, 機械研究所 車両システム研究部 所属
現在, 鉄道車両の空力問題に従事
工学博士
日本機械学会会員, 可視化情報学会会員



石川 勝美
1993年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センタ インバータインベションセンタ 輸送インバータシステムユニット 所属
現在, SiC応用インバータ, 鉄道インバータの研究開発に従事
電気学会会員