



家庭から宇宙まで、エコチェンジ 

# 三菱電機技報

7

2018

Vol.92 No.7

## 交通システム



### 目 次

#### 特集「交通システム」

IoTを活かし日本から列車制御のイノベーションを … **卷頭言** 1  
中村英夫

交通システムの将来展望 … **卷頭論文** 2  
漆間 啓

列車制御ソリューション … 6

車両制御システム技術の進化と展望 … 8  
柿崎庸泰

最新の列車制御システム … 12  
七田勝紀

耐環境型高機能ERPスイッチ … 16  
若菜理枝・川手竜介・谷口幸子・中安俊行・山形卓矢

メンテナンスソリューション … 20

鉄道車両向け保守支援システムの最新動向 … 22  
堀江一司

東日本旅客鉄道(株)向けE235系車両用空調装置の特長と

メンテナンス性向上 … 26  
吉賀知樹

三次元モデルARを用いた保守点検作業支援技術 … 30  
相川勇之・川浦健央・岡登洋平・塚原 整

旅客サービスソリューション … 34

将来の駅・車両の円滑で快適な  
交通システムのコンセプト提案 … 36  
泉福 剛・齊川義則・木津久貴

鉄道車両向けデジタルサイネージの最新動向 … 40  
福井行俊

エネルギー・環境ソリューション … 44

鉄道車両用推進制御システムの最新動向 … 46  
村端章浩・田中孝典

駅舎補助電源装置“S-EIV”的  
ラインアップ充実と運用実績 … 50  
松村 寧・藤田敬喜・川野 聰・石倉修司

関連拠点紹介 … 54

#### 特許と新案

「路線映像管理システムおよび映像管理方法」 … 56

#### Transportation Systems

From Japan to the World : the Innovation of Train Control System Based on IoT  
Hideo Nakamura

Future Prospects of Transportation Systems  
Kei Uruma

Evolution and Prospect of Rolling Stock System Technologies  
Tsuneyasu Kakizaki

The Latest Train Control System  
Katsunori Tsuchida

Environmentally-resistant and High-functional ERP Switch  
Rie Wakana, Ryusuke Kawate, Sachiko Taniguchi, Toshiyuki Nakayasu, Takuya Yamagata

Recent Technological Trends about Maintenance Supporting System for Railway Vehicle  
Kazushi Horie

Features and Maintainability Improvement of Railcar Air Conditioning Unit  
for JR EAST E235 Series  
Tomoki Koga

Maintenance and Inspection Support Technologies Using 3D-model Augmented Reality  
Takeyuki Aikawa, Takeo Kawaura, Youhei Okato, Osamu Tsukahara

Conceptual Solutions of Advanced Transportation System for More Convenient  
and Comfortable Rail Stations and Train Cars  
Tsuyoshi Sempuku, Yoshinori Saikawa, Hisataka Kizu

Latest Trend of Digital Signage for Train Cars  
Yukitoshi Inaba

Latest Trend of Propulsion Control System for Railway Vehicle  
Akihiro Murahashi, Takanori Tanaka

Lineup Enhancement and Operational Results of Station Energy Saving Inverter "S-EIV"  
Yasushi Matsumura, Keiki Fujita, Satoshi Kawano, Shuji Ishikura

#### 表紙：街と融合する未来の駅

表紙のイラストは、街に融合した未来の駅のイメージ図である。

鉄道と、自動車などの他の交通機関、さらにはエレベーターなどのビル内移動設備を有機的に接続し、シームレスな移動を実現する、人の交差点としての未来の“駅”を構想している。AI(Artificial Intelligence)やビッグデータを活用し、事故や犯罪の抑止による安心・安全の確保、バリアフリー化や混雑解消による旅客サポート、省電力化・低炭素化された交通インフラの構築を実現していくことが、未来に向けて交通システムインテグレータが取り組むべき課題であると考える。

三菱電機は、これまでに積み重ねた幅広い技術と交通システムの知識・経験、これらのことによって、次世代の交通ソリューションの実現を目指す。



## 巻/頭/言

## IoTを活かし日本から列車制御のイノベーションを

From Japan to the World : the Innovation of Train Control System  
Based on IoT

中村英夫  
Hideo Nakamura



ドイツ政府が主導する“Industrie4.0(第四次産業革命)”は、IoTにより製造業の生産形態を大きく変えるものとして捉えられた。しかし、今日では単なる生産形態の進化にとどまらず、IoTを通じて収集・蓄積されるビッグデータを人工知能により分析し、新たな商品やサービスを生み出すなど概念も発展しつつある。経済産業省の2017年版ものづくり白書では、産業タイプ(“最終製品”, “部品・部材”, “素材”, “設備”)別に多様な第四次産業革命への対応について紹介している。その中の“設備”では、顧客への遠隔保守・予知保全サービスの提供を中心として、法人顧客が設備の調達及び利用時に要する労務的コストの削減に向けた取組み事例を多く取り上げている。

各産業界が、IoTを核に新たな取り組み・イノベーションにチャレンジしている。確かに、鉄道界でも、ビッグデータやAIを利用した業務改善や保全性向上へのチャレンジが精力的になされている。ただ、既存の業務の改善や改良にとどまっていては、もったいない。岩瀬忠篤氏は“第四次産業革命”を科学技術イノベーションの視点で論じている(国土交通政策研究所報第66号2017年秋季)が、イノベーションの重要な点として、“企業家が既存の価値を破壊して新しい価値を創造していくことを経済発展の源泉としたことである。”というシュンペーターのイノベーション論を披露している。

シュンペーター的に、既存の価値を破壊した鉄道システムのイノベーションを考えると、その最たるものは安全の仕組みの再構築であろう。鉄道の安全にとって、最も基本の概念として閉そくがある。“列車の安全確保には、運転方向の制御と列車の間隔制御が必要”として、その任を閉そく装置が担ってきた。しかし、実際には閉そく装置の下でも事故は多発したし、ATSやATCの助けを得て安全を確保しているのが実情である。

列車には、走行可能な地点(走行許可地点)を情報として与えることにし、その先の保安は列車に任せること。そうすれば、ATSやATCなどの論理装置は不要になる。この方式を駅中間・駅構内の区別をせずに共通に適用する。次世代列車制御システムとして鉄道総研が開発していたCARATの基本思想である。この研究開発の中で、運動装置もポイ

ント制御という名称に置換され技術開発がなされた。運動装置には、過去の苦い事故の教訓に学んだ、様々な鎖錠論理や“赤羽対策”“尻内対策”といった安全論理を組み込んできた。見方を変えれば、運動装置は人間の誤扱いに起因する事故防止装置でもあり、今日の鉄道の安全には不可欠な装置として認識されている。しかし、人間の操作ではなく処理装置が車上装置と協調して一元的に進路の取り扱いをすれば、進路相互の排他制御やもろもろの鎖錠も不要になる。運動装置は、列車の走行路確保のために転てつ機を転換させる単純な機能に縮退できる。CARAT開発時に“ポイント制御”という名称が付与された理由もある。同様に、踏切も列車の走行路を確保する装置となり、それらの状態が走行許可地点情報に反映されれば、地上からの列車制御は、走行許可地点としてブロック番号とブロック内の位置情報が車上装置に与えられる形態に一元化できる。実はCARATのみならずJR東日本が実用化した無線式列車制御システムATACSも、駅中間・駅構内の区別なく走行許可地点情報を与える仕組みとなっている。究極の無線式列車制御システムの姿は、転てつ機制御、踏切制御はいずれも走行路の確保のための装置になる。

この次世代の列車制御を目指したイノベーションは、センター処理装置、車上装置、転てつ機、踏切装置をそれぞれIoTで結ぶことで実現する。まさに第四次産業革命の鉄道版である。現場に論理装置を配置しないこの列車制御システムは、信頼性、安全性、保全性に有利となるほか、速度向上など鉄道システムの機能向上を低コストで実現する。さらに、軌道の保守管理のためのデータ計測も走行時の車両の動搖計測といった本質的なものに置換される。

固定閉そくからの脱却により、速度向上はもとより、輸送乱れにも強い、低コストで強靭(きょうじん)な鉄道システムへの再生が期待できる。まさに、交通システムとしての鉄道の地位を向上させる鉄道再生の処方箋でもある。欧州がUNIFEの支援の下、国ごとの設備の多様性を統合するための(改良)策をShift2Railとして全力投球している今日、IoTに依拠した鉄道の第四次産業革命のイノベーションを日本から生み出す。魅力ある課題だと思う。

## 巻頭論文



## 交通システムの将来展望

Future Prospects of Transportation Systems

Kei Uruma

## 要 旨

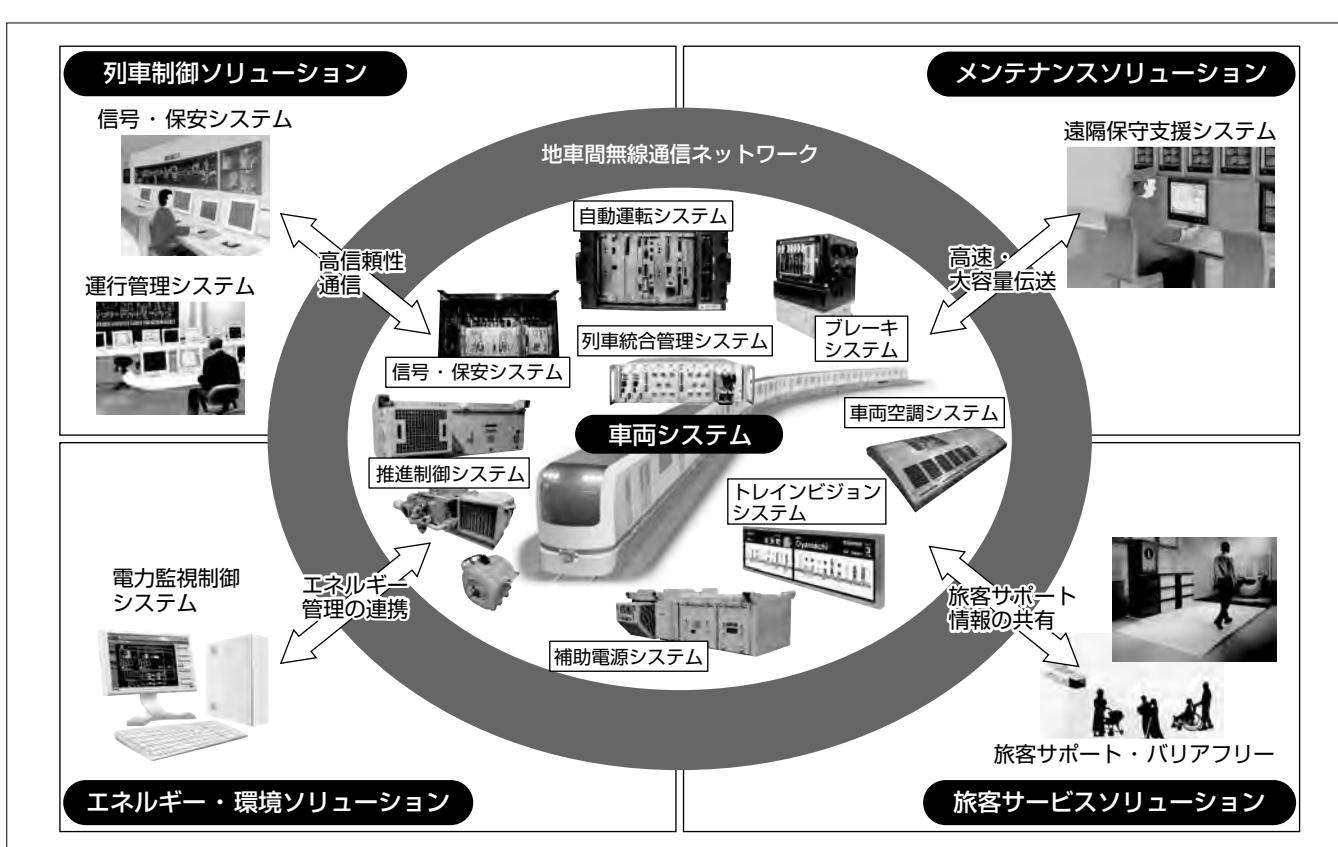
近年の環境意識の高まりから、鉄道は環境負荷の少ない移動・輸送手段として世界的にも注目を集めており、多くの国々で鉄道プロジェクトが進められている。

日本の鉄道は、極めて正確なダイヤと膨大な輸送人員、安全性・稼働率の高さや案内の丁寧さ、さらには省エネルギー、省メンテナンスなど、高性能・高品質が大きな特長で、三菱電機も車両用電機品を中心に、電力・信号・通信などの分野で各種製品・システムの開発を行ってきた。さらに、ICT(Information and Communication Technology)を用いた車上・地上システムのシームレスな連携によって、鉄道システム全体の最適化を図る“次世代交通ソリューション”的技術開発に取り組んでいる。

無線式列車制御システム(CBTC)を中心に、自動運転な

どの将来的鉄道輸送の姿を追求する“列車制御”，IoT(Internet of Things)やAI(Artificial Intelligence)を活用し、故障の予兆検知や保守作業支援を行う“メンテナンス”，列車と駅が連携し、さらに他の交通機関ともつながり、旅客が目的地までシームレスに安心して移動できる“旅客サービス”，鉄道のエネルギー全体最適化を目指し、車両、駅、車両基地・工場、路線全体で創エネルギーと蓄エネルギーを実現する“エネルギー・環境”的ソリューションで、交通システムを革新する。

この特集号は、“交通システムの将来展望”をテーマに、各ソリューションを実現する当社の車上・地上システムの最新技術の特集である。



## 車両システムを中心とした次世代交通ソリューション

当社は、“安心”“安全”“快適”な鉄道輸送を目指し、高性能・高品質の交通システムを提供してきた。これからは車上と地上が当社の高い無線・通信技術によってつながり、全体がシームレスに連携した鉄道システムを提供することで、鉄道に関わる全ての人に優しいソリューションを追求していく。

## 1. まえがき

鉄道システムで、顧客を運ぶ“車両”，顧客が乗降する“駅”，及び、車両が走行する“軌道”は必要不可欠な要素であり、さらに安心・安全・快適な運行を支えるために、電力・信号・通信などの各種電気設備や機械設備が設けられている。

当社では、車両・電力・信号通信などの各種製品とともに、ICTを用いた車上・地上システムのシームレスな連携によって、鉄道システム全体の最適化を図る“次世代交通ソリューション”として、列車制御、メンテナンス、旅客サービス、エネルギー・環境の四つの分野で技術開発に取り組んでいる。

本稿では、これら四つの分野のソリューションの概要と、その中で、車両システムや駅設備などが将来的にどのように変化していくかを展望する(図1)。

## 2. 次世代交通ソリューション

### 2.1 列車制御ソリューション

列車制御は、これまで軌道回路による方式が主流であったが、近年では設備点数が少なくメンテナンス性に優れた無線式列車制御システム(Communication-Based Train Control: CBTC)が注目されており、国内でも導入検討が進んでいる。

無線式列車制御システムは、列車が自ら位置を検知してその位置を無線で地上へ送信、地上では各列車の列車位置から列車個々の停止限界位置を算出して各列車へ配信、列

車は受信した停止限界位置に基づき速度照査パターンを作成して走行するというシステムである。

無人運転は高架構造の新交通システムでは1980年代から実用化されている。地上からの指令によって、列車自動運転装置(ATO)が定められたランカーブに基づいて走行制御を行う。ATOはワンマン運転を支援するために地下鉄等にも導入されており、最近では、路線条件に応じて安全性や定時性を確保しつつ、乗り心地や省エネルギーを考慮した最適な運転の実現が可能になっている。

現在の列車制御・自動運転システムは、自動車分野に例えるとインフラ協調型のシステムであるが、将来的には無線通信の高速大容量化や列車-列車間通信の実現によって、自律型の列車制御・自動運転が可能であると考える。各列車は、運転に必要な路線条件や運転ダイヤなどの情報をあらかじめデータベースとして保存するとともに、路線全体の列車情報(位置・速度など)をリアルタイムに受信し、自ら走行パターンを算出して走行する。

指令所では全線の列車を総合的に管理し、列車運行の全体最適化と運用の効率化を図る。当社では、列車の運行や乗客の行動をシミュレーションする技術を応用して、ダイヤの作成・変更を省力化する様々な機能を開発し、輸送計画部門の業務や指令所の運転整理業務を支援しており、遅延などの運行乱れ発生時にも指令所から列車へ変更情報などの包括的な指示を行うことで自律的な列車制御を継続できる。

新交通システムだけでなく、地下鉄ほか都市鉄道一般への自動(無人)運転導入のためには、前方障害物の検知、踏

	列車制御ソリューション	メンテナンスソリューション	旅客サービスソリューション	エネルギー・環境ソリューション
指令所など	CBTC型運行管理システム ・輸送総合シミュレーション技術 ・列車群管理の高度化	状態監視／モニタリングシステム ・車両システム(車体／台車／電機品など) ・地上システム(架線／軌道／沿線構造物など) ・自動計測装置(パンタグラフ／屋根上／車輪) ・データ解析による予防保全	旅客案内システム (表示／放送／インタホンなど) 遠隔監視システム(CCTV) ・旅客流動の把握 ・避難誘導シミュレーション技術	電力管理システム ・電力消費予測シミュレーション ・電力制御アルゴリズム  電力機器 ・リアルタイム制御可能な電力機器
駅・沿線	CBTC地上装置 電子連動装置 踏切保安設備  ATO駅装置 ホームドア	状態監視／モニタリングシステム ・各種電気設備・機械設備にセンサ設置	旅客案内システム (表示／放送／インタホンなど) 高機能セキュリティ ・画像処理／危険物検知など 出改札システム ・チケットレス／ゲートレス	駅エネルギー管理システム 太陽光発電システム 駅舎補助電源装置  急速充電設備 ・非接触充電システム
無線通信システム(公衆網／専用網) 列車無線 ミリ波無線 5G(第5世代移動通信システム) ほか				
車両	<ul style="list-style-type: none"> <li>・制御表示情報伝送</li> </ul> <p>CBTC車上装置 ATO装置 ・車上データベース(路線条件／運転ダイヤなど)による自律運転 ・全線の列車位置・運転状態把握による自車の走行パターン算出  前方監視装置 ・画像処理／各種センシング</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リアルタイムモニタリング／データ収集 ・出庫点検／自動試験</li> </ul> <p>状態監視／データ収集装置(各種センサ) ・車両システムを対象としたセンサ ・地上システム(架線／軌道／沿線構造物など)を対象としたセンサ</p>	<p>列車統合管理システム(TCMS)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・旅客案内データ管理</li> </ul> <p>旅客案内システム (表示／放送／インタホンなど) トレインビジョン パーソナル情報提供システム 車内防犯装置(車内CCTV)</p> <p>空調装置 ・次世代冷媒 ・省エネルギー／最適制御</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・編成制御による省エネルギー</li> </ul> <p>推進制御システム ・SIC適用VVVF／SIVシステム ・高効率全閉型モータ ・蓄電デバイス応用  ・次世代パワーデバイス</p>

太字は、今後の検討事項を示す。

CCTV : Closed Circuit TeleVision. VVVF : Variable Voltage Variable Frequency Inverter. SIV : Static Inverter

図1. 四つのソリューションを実現する各種システム・装置と技術(例)

切の安全確保、異常時の避難誘導など解決すべき課題は多いが、自動車の自動運転向けに検討している各種センシング技術(前方監視カメラ・ミリ波レーダ・超音波コーナーセンサなど)や準天頂衛星を活用した高精度位置把握技術の応用などによる対策が期待できる。

## 2.2 メンテナンスソリューション

安心かつ安全な鉄道輸送を行うためには、車両や設備の状態を把握し、維持管理することが重要である。一方、少子高齢化による輸送需要減少や熟練技術者の大量退職、人手不足等への懸念の高まりも背景に、これまでの時間基準保全(Time-Based Maintenance: TBM)に代わり、IoT、センサネットワークやビッグデータを活用した状態基準保全(Condition-Based Maintenance: CBM)によるメンテナンスの変革を目指す取組みが加速化している。

当社は、鉄道の“走る”“止まる”“制御する”を1社で実現できるメーカーとして国内外に幅広く車両用電機品を供給してきた。この経験を活用し、車両用電機品の状態変化を管理・保守部門でリアルタイムに把握する仕組みとしてLMS(Lifecycle Management Solution)の開発に取り組んでいる。列車統合管理システム(TCMS)が収集する各種車両用電機品の動態データを無線で伝送し、機器に関する知見と時系列分析、相関分析などの各種データ分析手法を用いて劣化や故障の予兆を検知する。これによって、故障発生頻度を抑制しつつ鉄道事業者のメンテナンスに要する負荷を軽減し、持続可能で安定した輸送の提供に貢献できると考えている。

また、車両に各種のセンサを設置すれば、営業運転をしながら架線の状態、軌道変位、沿線構造物の状態などメンテナンスに必要な情報も収集できる。車両に限らずトンネルや橋梁(きょうりょう)、電力・信号・通信の各設備機器についてもIoTを利用したモニタリング・ビッグデータ分析・AI活用によるCBMが可能である。

現場の人手不足対策も念頭に、保守点検作業を支援するシステムにも取り組んでおり、AR(Augmented Reality)を活用してウェアラブル端末上に設備の点検手順を表示し、点検結果を音声入力することで、保守作業のペーパーレス化・効率化・確実化を実現した。

車両基地などへの入区時に、地上設備を用いて、走行しながら屋根上、パンタグラフ及び車輪の状態を自動計測するシステムも開発し、検査データの見える化と分析による事故の未然防止と作業の安全性向上を図っている。

## 2.3 旅客サービスソリューション

旅客サービスには情報提供サービスと安全サービスがある。情報提供サービスの当社の代表的なシステムが液晶ディスプレイ(LCD)を用いた案内表示、“トレインビジョン”である。初期のトレインビジョンは車両の扉上に2面のLCDを設置し、運行案内と広告を表示していた。現在は、

首都圏での相互直通運転への対応や訪日旅客増加対策としての多言語表示など、旅客へ提供すべき情報が多様化していることから、大型液晶パネルを採用した2画面一体型トレインビジョンを開発した。コンテンツにはユニバーサルデザインを採用することで、全ての人に分かりやすい情報提供を目指している。また、スマートフォンの普及に伴い、トレインビジョンと連動させ、各個人に対してより必要とされる情報を提供するパーソナル情報提供システムも開発し、多様化するニーズに応えている。

駅での情報提供サービスも、従来の案内放送や発車標に加え、大型ディスプレイや双方向デジタルサイネージを用いて運行情報やサービス情報などを提供するシステムが導入されている。

安全サービスとしては、車内セキュリティカメラの導入が進み、車内トラブルへの迅速な対応が可能になっている。駅にも多数のカメラが設置され、ホームやコンコースなど駅構内の監視が可能となっているが、最近では、映像解析技術やセンサ技術を応用したリアルタイムでの危険・異常や旅客の流動・滞留を検知する高度なセキュリティサービスの研究に取り組んでいる。

鉄道を利用する顧客に対して、駅の入場から退場まで、情報提供と安全の両面でシームレスなサービスをするために、車上・地上で連携したシステムの開発を目指している。さらに、将来の駅・車両で円滑で快適な移動を実現するため、ゲートのない平坦(へいたん)な改札などのコンセプトを構築し技術開発を進めている(図2)。

顧客に快適空間を提供するための空調装置については、季節・時間帯・車両ごとの温度設定や乗車率を考慮した制御、ファンと圧縮機のインバータによる可変速化、寒冷地でも暖房性能を確保できるヒートポンプの導入などによって、更なる快適性の向上に取り組んでいる。

## 2.4 エネルギー・環境ソリューション

鉄道は、航空機や自動車に比べてエネルギー効率が良く環境に優しい交通機関であるが、東日本大震災以降のエネルギー政策の見直しや電力供給事情の激変によって、更なる省エネルギーの必要性が高まっている。



図2. ゲートのない平坦な改札のプロトタイプ

当社では、鉄道のエネルギー・マネジメントシステムに四つの視点(車両、駅、車両基地・工場、路線全体)で取り組んでいるが、その中でも鉄道の消費電力量の大部分を占める車両の運転電力量に関しては、これまで推進制御装置を中心に省エネルギー化を進めてきた。最近の取組みの一つが、低損失かつ高温動作が可能なSiC(シリコンカーバイド)素子の推進制御装置・補助電源装置への適用である。当社は2013年にフルSiC適用のVVVFインバータ装置を世界で初めて<sup>(注1)</sup>製品化し、装置の小型・軽量化及び電力回生ブレーキ性能の大幅な拡大によって、従来製品比40%の省エネルギー化を実現した。また、TCMSを利用して、編成単位で電気／空気ブレーキ力を最適に配分し、回生ブレーキを最大限に活用して回生率を向上させる編成ブレーキ制御や、回生ブレーキ使用時にタイミング良く負荷機器を稼働させる省エネルギー機器制御などによって、車両エネルギー全体の最適化を実現している。

SiC適用によって増大した車両回生エネルギーの活用として、これを駅で利用する駅舎補助電源装置S-EIV(Station Energy saving Inverter)を開発した。これは、車両停止時に発生する回生エネルギーのうち、他の車両で消費しきれなかった分を近くの駅負荷で効率的に消費することを目的としたもので、小容量のコンパクトな装置であるが、大規模な回生インバータと同等の機能を得ることができる。

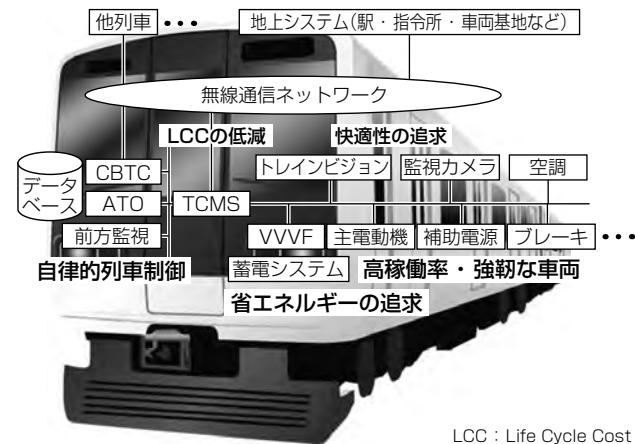
駅の照明、空調設備などの付帯用電力も増加の傾向にあり、これらの省エネルギーも重要な課題である。各設備を最新の省エネルギー機器(LED照明、高効率空調など)に更新するとともに、快適なサービスと省エネルギーを両立させる最適な制御を行う。また、駅の規模や立地条件に適した太陽光発電の導入が進められており、安定的で効果的な利用のために、電力貯蔵を含めた各種のスマートグリッド技術を適用し、エネルギーの最適化を進めている。

近年、リチウムイオン電池を始めとする電力貯蔵デバイスの性能が向上し、自動車分野はもとより鉄道分野でも回生電力の吸収や架線電圧の補完用途など実用化が進んでいる。既存の推進制御装置に電力貯蔵デバイスを追設し、余剰回生電力を吸収して力行時に使用することで回生率が向上する。また、架線停電時に最寄り駅までの走行を可能にする緊急走行システム、非電化区間を走行する蓄電池電車なども導入されている。将来的には、電池の小型・大容量化が更に進み、都市交通などの駅間距離が短い路線では、駅での急速充電によって蓄電池による走行が可能になると考えられる。

(注1) 2013年12月25日現在、当社調べ

### 3. 車両システムの将来展望

四つのソリューションを実現するための、車両システムの将来展望をまとめると次のとおりである(図3)。



LCC : Life Cycle Cost

図3. 車両システムの将来展望

- (1) 路線条件や運転ダイヤなどの情報をデータベースとして保存し、変更情報を地上からリアルタイムに受け取ることで、車両が自ら考え走行する“自律的列車制御”
- (2) 列車統合管理システム(TCMS)が収集する各種車両用電機品の動作・状態情報を無線で伝送し、蓄積されたビッグデータを分析することによる“LCCの低減”
- (3) 多様化するニーズに応える情報提供システム、映像解析などによる高度なセキュリティ、季節・時間帯・乗車率を考慮した最適空調制御による“快適性の追求”
- (4) SiCを適用した推進制御装置、TCMSを利用した編成全体の車両エネルギー最適化、電力貯蔵デバイスの応用による“省エネルギーの追求”
- (5) 各電機品の小型・軽量化、品質・信頼性の向上、主要部の冗長構成などによる“高稼働率・強靭(きょうじん)な車両”

### 4. む す び

当社は家庭から宇宙まで、重電・産業メカトロニクス・情報通信・電子デバイス・家庭機器の五つの分野、10の事業本部で総合電機メーカーとして事業を展開しているが、最近の技術革新の加速化や事業環境の急激な変化、顧客ニーズの多様化に対応するためには、事業本部の枠を越えた部門横断的な活動を推進することが重要となっている。

鉄道システムでも、本稿にも述べたように、自動車分野の自動運転技術との連携、AIを活用した映像解析技術の車内・駅セキュリティへの展開、ZEB(net Zero Energy Building)技術の駅エネルギー・マネジメントへの適用、さらには、“e-F@ctory”コンセプトに基づく工場のスマート化・生産性向上など、技術シナジー・事業シナジーによって顧客に新たな価値を提供することで、今後も鉄道事業の発展に貢献していく。

### 参考文献

- (1) 福嶋秀樹：交通システムの将来展望、三菱電機技報、90、No.9、488～492 (2016)

# 列車制御ソリューション

列車の安全・安定輸送は、高品質・高性能な機器で構成された車両システム及び地上システム、そして、これらをつなぐ信頼性の高い通信・ネットワークによって支えられている。三菱電機は、これまで培ってきた車両機器技術や無線技術を基に、列車制御のインテグレータを目指す。そして、将来の自動運転による鉄道輸送を見据えて、更なる研究・開発に取り組む。

## 車両システム の目指す姿

- 高品質・高性能の更なる追求
- 安全性・定時性の確保
- 運転の省人化・自動化

## 車両制御システム (本誌 p8)

三菱電機は列車の“走る”“止まる”“制御する”を1社で実現。車両制御システムの技術は、パワー・エレクトロニクス技術や情報伝送技術の技術革新を応用して、常に進化を続けている。この章では、三菱電機が考える車両制御システム技術の進化と展望について紹介する。



走る・止まる・制御する

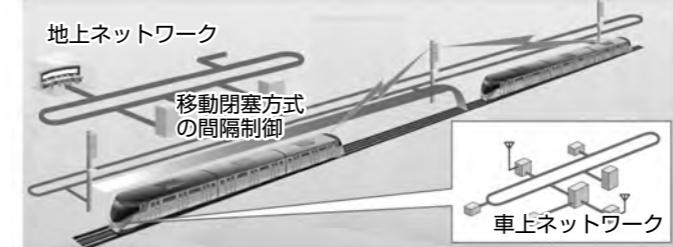
## 地上システム の目指す姿

- 車両システムとの連携
- 安全かつ高効率の列車運行
- 自然災害への早期対応

## 信号・保安システム (本誌 p12)

高信頼性の無線通信を地車間\*の通信に適用することで、最適な列車間隔制御による、より高密度な列車運行を実現。この章では、最新の無線式列車制御システムについて紹介する。

(\* 地上-車上間)



## 地車間連携による列車制御

## 通信・ネットワーク の目指す姿

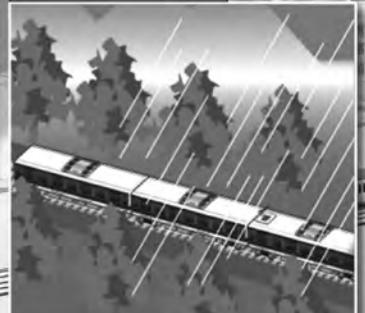
- 高信頼性の安定した無線通信
- 環境・障害に強い通信設備
- 暗号化技術による堅牢性確保

## 運行管理システム



列車の定時運行を管理

## 沿線情報システム



沿線情報の収集

## 地上ネットワーク (本誌 p16)

トラブルによる通信の遮断・寸断を極小化することで、機器間やシステム間をつなぐネットワークの信頼性を向上。この章では、鉄道向けに開発した耐環境型高性能ERPスイッチについて紹介する。



安全・安定輸送を支える基盤

# 車両制御システム技術の進化と展望

柿崎庸泰\*

Evolution and Prospect of Rolling Stock System Technologies

Tsuneyasu Kakizaki

## 要 旨

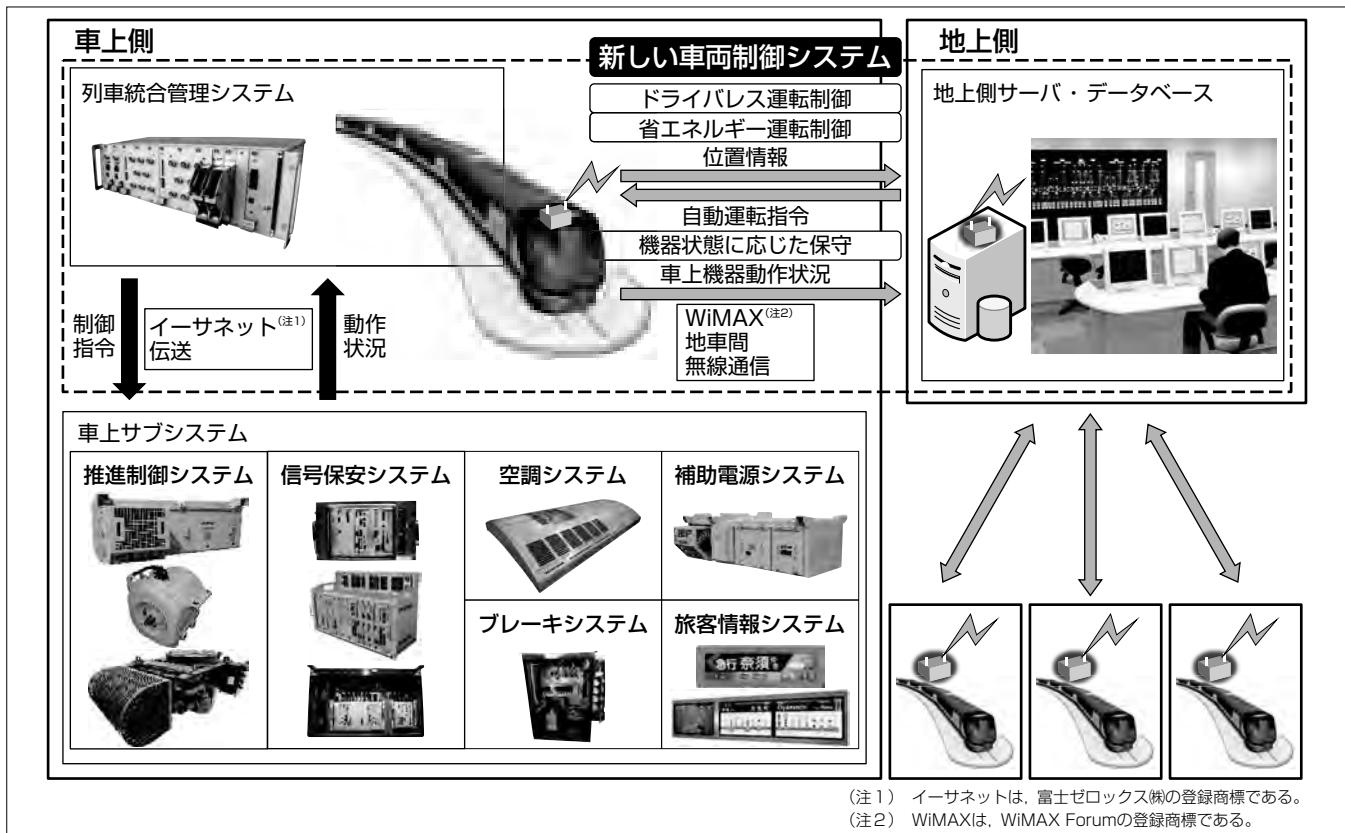
鉄道車両に適用される車両システムの技術は、パワーエレクトロニクス技術や情報伝送技術の技術革新を応用して、常に進化を続けてきた。

車両システムは、情報伝送、推進制御、信号保安、車両制御、空調、ブレーキ、補助電源、旅客情報など、多くのサブシステムで構成され、技術の進歩によって省エネルギー性能、保守性、信頼性・耐久性の向上や高機能化が図られている。また、情報伝送の高速化・大容量化に伴い、これらのサブシステムを列車統合管理システムで統括制御し、編成全体での協調・最適制御を実現している。

さらに、地車間の情報伝送によって、地上の信号シス

ムやき電システムと連携し、自動運転、高密度運行や、エネルギー需給の最適化など、より高度な協調制御が実現できる。また、列車統合管理システムから各車上機器の稼働状態データを地上に伝送し、膨大なデータを解析して編成・機器間などの精緻な差異分析を行い、早期異常検知や寿命予測も可能となる。

本稿では、最新技術を適用した車両システムの進化について概観し、さらに、列車統合管理システム、地車間の情報伝送、無線式列車制御などの新技術を応用した鉄道システムの利便性向上やコスト低減など、最新の車両制御システムの発展と展望について述べる。



## 車両システムでの新しい車両制御システム

列車統合管理システムが車上機器のデータを一元管理して地上側サーバと通信することによって、ドライバレスかつ省エネルギー効果に優れた車両の運行を実現する。また、車上機器の稼働データは地上側データベースに蓄積し、分析された情報によって車上機器の劣化傾向を把握し、機器の状態に応じたメンテナンスが可能になり、ダウンタイムやライフサイクルコストが低減できる。

## 1. まえがき

車両システムは、情報伝送、推進制御、信号保安、車両制御、空調、ブレーキ、補助電源、旅客情報など、多くのサブシステムから構成され、パワーエレクトロニクス技術や情報伝送技術の進歩を応用して高機能化が図られてきた。また、これらのサブシステムを列車統合管理システムで統括制御し、編成全体での協調・最適制御を実現している。

さらに、地車間の情報伝送によって、地上の信号システムやき電システムと連携し、自動運転、列車運行密度の向上や、エネルギー需給の最適化など、より高度な協調制御が実現できる。また、車上機器の稼働状態データを地上に伝送し、膨大なデータを解析して編成・機器間などの差異分析を行うことで、早期異常検知や寿命予測も可能となる。

本稿では、最新技術を応用した車両システムの進化について概観し、さらに、列車統合管理システムを活用した、最新の車両制御システム技術の発展と展望について述べる。

## 2. 車両システムの技術革新

### 2.1 情報伝送システム

#### 2.1.1 列車統合管理システムへの進化

情報伝送技術の進歩によって、車上に情報ネットワークを構築することで、各機器の稼働状態を運転台モニタで遠隔監視して、車上機器の状態を一元管理できるようになった。さらに、双方向通信の導入によって、機器情報を収集するだけでなく、各車上機器へ指令を伝送する機能を持つ、列車統合管理システムとして進化した。

#### 2.1.2 地車間通信の実現

最新の列車統合管理システムでは、車上機器との通信を産業用途として普及しているイーサネット伝送で構成するシステムが増えている。これによって、車上の伝送システムに多様な機器を接続できるようになった。

さらに、地車間のデータ伝送に、高速な無線通信が可能なWiMAXを利用することで、地上システムと車両間で様々なデータを伝送することが可能になった。

### 2.2 推進制御システム

#### 2.2.1 パワーエレクトロニクス技術の進歩と推進制御への応用

鉄道車両は、鉄車輪・鉄レールで支持されるため、転がり抵抗が小さく、元来エネルギー消費の小さいシステムである。省エネルギーの観点では、昨今、パワーエレクトロニクス技術の進歩を背景とし、低損失で耐熱性に優れるSiC(シリコンカーバイド)を適用したパワー半導体によって、推進制御装置の更なる小型・軽量化と省エネルギー化が進められている。

### 2.2.2 推進制御技術の最新動向

従来のSi(シリコン)に比べて、低損失で耐熱性が良いSiCを適用したパワー半導体をVVVF(Variiable Voltage Variable Frequency)インバータに採用するとともに、制御方法を改善し、主電動機を含めた主回路システム全体として省エネルギー化を実現している。このシステムでの省エネルギー技術の特長は二つあり、一つがVVVFインバータのスイッチング高周波化による主電動機での高調波損失低減、もう一つが回生ブレーキを適用する速度域の拡大による回生電力量の増大である。

これらの技術を適用した東日本旅客鉄道株のE235系電車では、営業運転での消費電力量について、従来車両と比較して、車両重量比で換算した走行キロ当たり19.8%の削減を実現している<sup>(1)</sup>。

### 2.3 信号保安システム

#### 2.3.1 軌道回路を用いた従来の信号保安システム

列車の安全な運行には“一つの区間に二つの列車が入らない”ことが必要となる。列車の在線を検知する技術として、広く用いられているのが軌道回路である。これは、一定区間のレールを電気回路として利用し、車輪・車軸でレールを短絡することによって、列車の在線を検知する技術である。

軌道回路を利用した技術は、信頼性の高いシステムである反面、地上側の装置が大規模になることや、あらかじめ定められた軌道回路長単位での制御となるため、きめ細かな車両運行が難しいなどの課題がある。これらの課題を克服するため、無線を使った信号保安システムが実用化されている。

#### 2.3.2 無線式列車制御システム

##### (1) 日本国内の適用事例

日本国内での無線を使った信号保安システムにはATACS(Advanced Train Administration and Communications System)の例がある<sup>(2)</sup>。

ATACSは、車上装置が速度発電機の信号を積算して列車の位置を自己認識し、これを無線通信で地上側に知らせることによって、列車の在線を検知する機能を実現している。また、各車両の速度制限については、列車が安全に到達可能な停止限界位置情報を、地上側から車上側へ無線通信で伝送し、車上装置が最適な速度パターンを生成することで、機能を実現している(図1)。

ATACSでは、無線通信を用いて地車間の情報伝送をすることによって、地上設備を簡素化しつつ、よりきめ細かな車両運行が可能なシステムを実現している。

##### (2) 海外での適用事例

欧州では国境を越えて列車が相互直通運転する(インターチェンジ)ため、欧州統一の信号システムETCS(European Train Control System)が規格化されており、この中で無線伝送として、鉄道用無線通信GSM-R

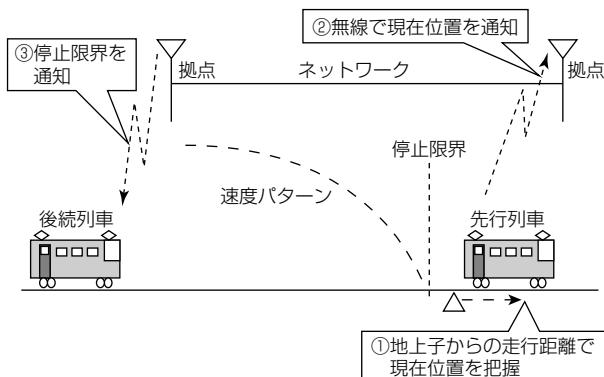
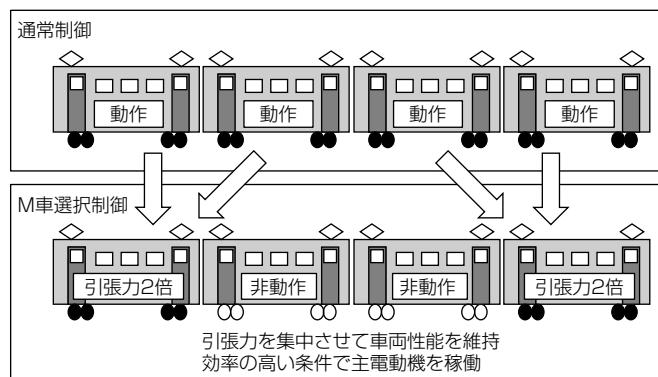


図1. ATACSの原理



(Global System for Mobile communications-Railway)が規定されている。ETCSは実現される機能によってレベルが定められており<sup>(3)</sup>、レベル2以上で地車間の情報伝送に無線が適用される。

レベル2では、列車検知は軌道回路などで行うが、信号現示に関する情報はGSM-Rを使って地上から車上に伝送される。レベル3では、軌道回路などはなくなり、車上の速度発電機によって算出された位置情報がGSM-Rによって地上に伝送され、これに基づいて列車制御が行われる。レベル3が、ATACSに相当する規格である。

車両の保安制御に必要となる本質的な情報は、前方列車の位置情報である。従来は軌道回路から複雑な地上装置を通じてこの情報を伝達していたが、無線通信による伝送によって、単純かつ本質的な姿に近づきつつある。軌道回路を必要としない信号保安システムは、路面電車やLRT (Light Rail Transit)などの道路を走るシステムにも応用が可能になり、保守性にも優れ、今後の展開が期待されている。

### 3. 車両制御システムの発展と展望

#### 3.1 列車統合管理システムを活用した高機能化

##### 3.1.1 高効率運転機能

車両を駆動する主電動機は、速度やトルクによって効率が大きく変動する。このため、車両全体に必要なトルクを把握している列車統合管理システムが、主電動機ごとに効率の高い領域にトルクを分配して省エネルギー効果を高め、車両全体として消費エネルギーを削減する制御が考えられる。

東日本旅客鉄道(株)の“M車(電動車)選択運転機能<sup>(4)</sup>”はこの例であり、編成全体に必要なトルクが低下した場合に、稼働M車数を減少させ、主電動機1台当たりの負担トルクを増加させて、効率の高い運転条件で稼働させる制御である(図2)。

##### 3.1.2 省エネルギー運転支援機能

力行速度の制限や回生ブレーキの有効活用によって、車

両の消費電力量を減少させる運転パターンの研究が進められている<sup>(5)</sup>。この運転パターンを、列車統合管理システムを通じて運転台に提示し、乗務員に省エネルギー運転を促す機能が考えられる。

回生エネルギーを吸収する周囲の車両の存在や、列車の遅延などによって、最適な運転パターンは常に変動する。したがって、実際の車両運用に適用するには、動的に運転パターンを算出する機能との融合が必要となる。

#### 3.1.3 地車間通信機能の活用

高速、大容量の通信方式であるWiMAXを用いて、地上側の専用サーバに車両の情報が蓄積されるシステムが実用化されている<sup>(6)</sup>。これによって、専用サーバへのアクセスによって、同時に複数の場所から車両のリアルタイムデータを確認することが可能になった。

このシステムでは、地上側の専用サーバから車上機器に対して、反対方向にデータを送信することも可能である。これによって、例えば、複数編成での旅客案内情報のコンテンツの一括更新や、更新結果の一元把握など、作業や管理の効率化を実現している。

#### 3.2 車両制御システムの今後の展望

##### 3.2.1 大規模・大量輸送への対応

日本国内では、大都市圏への人口集中と地方の過疎化が、同時に急激に進んでいる。人やモノを輸送する鉄道システムで、最新の車両制御システムを活用することによって、これらの環境の変化に柔軟に対応することが可能になる。

まず、大都市圏への人口集中に対しては、車両制御システムを大規模・大量輸送に適した形で適用できる。具体的には、従来からの列車の速度向上に加えて、先に述べたATACSなどの新しい無線式列車制御システムを旅客需要の多い線区に導入することで、安全性を維持しつつ、より高頻度な運行を実現できる。

また、大規模・大量輸送では多くの運転用電力が必要となるため、より省エネルギー効果の高い運行が求められる。具体的には、地上システムと車両間で、車両の運転に必要な電力量を互いに通信することによって、省エネルギー効

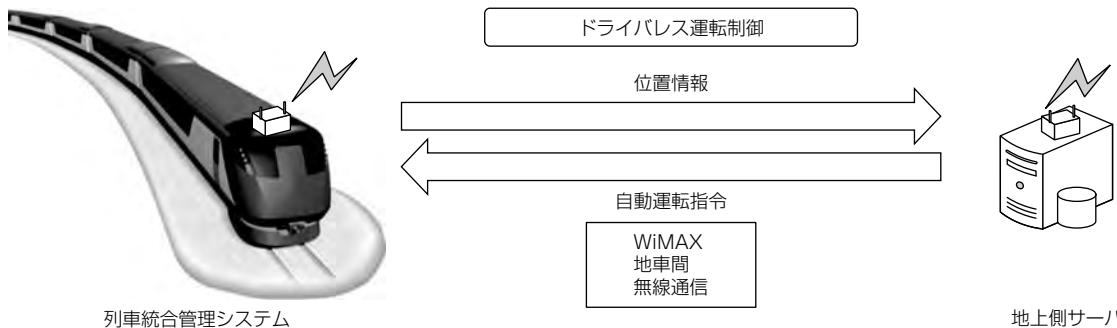


図3. 無線によるドライバレス運転制御のイメージ

果の高い運転パターンを算出して、運転用電力を低減できる。これに、先に述べた編成制御による高効率運転機能や、無線式列車制御システムを組み合わせることによって、変電所などの地上設備を含めた、高効率運転システムへ発展するものと考えられる。

### 3.2.2 小規模・低頻度輸送への対応

一方、地方の過疎地域では鉄道利用者が減少し、鉄道の存続が危ぶまれるケースもある。地方には鉄道の利用を希望する高齢者もあり、鉄道存続のためにも運行コストの低減は不可欠である。

この課題に対して、鉄道の自動運転による運行コストの低減も考えられる。自動運転は“独立した排他的軌道を自動で、自走する無人・自動運転交通システム”として、IEC(International Electrotechnical Commission)で規格化されており<sup>(7)</sup>、運転免許を持たない乗務員による運行(ライセンスレス運行)、又は乗務員自体を必要としない運行(ドライバレス運行)が想定されている(図3)。日本でも、新交通システムでドライバレス運行が実用化されているが、これは主に、隔離された専用軌道によって安全性を確保することで実現されている。

自動運転を適用するためには、様々な異常時を想定した安全性の確保が課題となる。例えば、走行中の前方監視や、車上機器不具合等の処置を可能な限り自動化できるシステムが必要となるが、車上機器のリアルタイムデータを収集・分析して、車上データベースを構築することで、車上機器のトラブルシューティングを自動化できる。自動運転の実現には、列車統合管理システムと各車上機器との密接な連携が、今まで以上に重要となる。

車両制御システムの進歩によって、完全な自動運転が実用化できれば、待ち時間が少なく、旅客の需要変化に応じたオンデマンド運転や、終夜運転などへの展開も容易になり、より利便性の高い鉄道システムを実現できる。

## 4. む す び

車両システムは、技術の進歩によって各車上機器の高機能化が進み、列車統合管理システムで編成制御が可能になり、さらに、地車間連携による高度な機能協調も実現している。

車両制御システムの進化によって、大都市圏ではより高頻度な運行による大量輸送を、地方では自動運転を活用したオンデマンド運行などを実現することで、鉄道システムが将来にわたり、事業者・利用者側双方にとって安心、安全、効率的で利便性が高い社会インフラとして発展し、活用していくものと期待している。

## 参 考 文 献

- (1) 渡邊浩司, ほか: E235系量産先行車の走行電力量削減効果一回生領域拡大による運転消費エネルギー削減効果の検証―, 第52回鉄道サイバネ・シンポジウム, No.511 (2015)
- (2) 中村英夫: 鉄道信号システムの革新, 情報処理, 55, No.3, 268~276 (2014)
- (3) 渡辺郁夫: 無線式列車制御の動向, 鉄道総研報告, 25, No.5, 1~4 (2011)
- (4) 加藤洋子, ほか: E235系の主回路システムの紹介, JR EAST Technical Review, No.51, 41~44 (2015)
- (5) 渡邊翔一郎, ほか: 直流電気鉄道の省エネルギー運転における電力制限回生ブレーキの効果と回生率の影響評価, 平成25年電気学会全国大会 (2013)
- (6) 山下雅徳, ほか: E235系~次世代列車情報管理装置(INTEROS)と車両メンテナンス~, デジタルプラクティス, 8, No.3, 230~235 (2017)
- (7) 水間毅: 鉄道における自動運転の歴史と今後, 計測と制御, 56, No.2, 93~98 (2017)

# 最新の列車制御システム

土田勝紀\*

The Latest Train Control System

Katsunori Tsuchida

## 要旨

地上設備が主体であった従来の列車制御システムに代わり、無線によって地上と車上を連携させて保安機能を実現する、無線式列車制御システムの実用化が進んでいる。

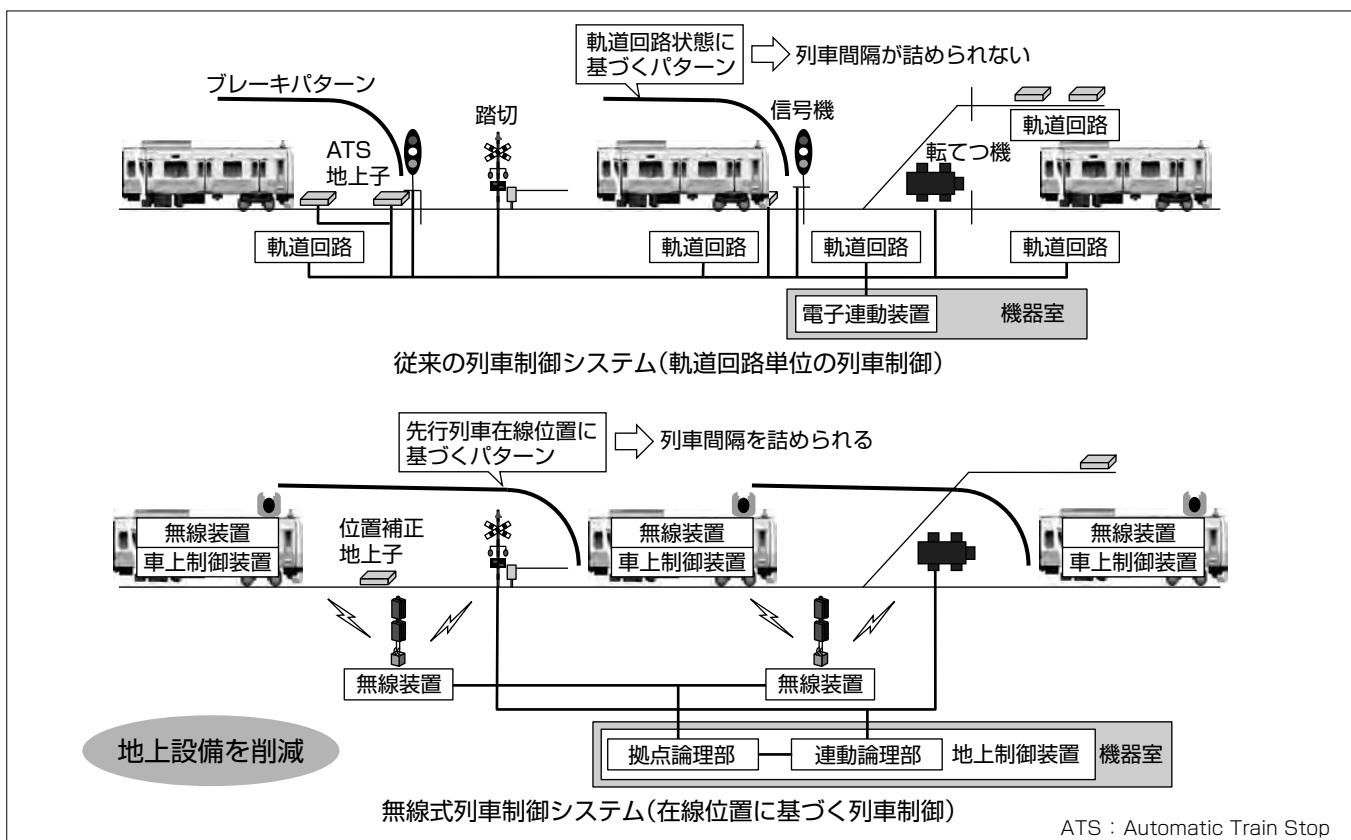
無線式列車制御システムでは車上で在線位置を検知して地上へ無線で伝送することによって、従来システムで在線検知に必要だった軌道回路が不要となる。軌道回路単位の位置管理に比べて詳細な列車位置の管理が可能なことから、列車間隔短縮によって運行の高密度化が実現可能となる。さらに、地上設備が削減でき、メンテナンスの効率化やライフサイクルコストの削減が見込める。

三菱電機は、無線式列車制御システムを構成する無線装置、車上制御装置、地上制御装置を製作している。無線式

列車制御システムに採用する無線装置には、安定した通信性能が求められる。そのため、干渉・妨害対策を強化した独自の耐干渉技術によって安定した通信を実現した。

車上制御装置には、ぎ装スペースの削減、位置検知精度の向上が求められる。そのため、複数の保安装置を統合して装置を小型化し、スペースの削減を図った。また、極低速域まで速度検知可能な速度センサを採用し、位置検知精度の向上を実現した。

地上制御装置には、無線で取得する位置情報を基にした列車在線管理によって無線通信断続時にも位置を記憶させ、安全性を確保する機能を組み込んだ。



## 無線式列車制御システム導入の利点

従来の列車制御システムから無線式列車制御システムへのシステム更新の実施によって、地上設備が削減できること、列車の走行間隔を詰めた制御が可能になる利点があることを示す。当社は、無線式列車制御システムを構成する無線装置、車上制御装置、地上制御装置(拠点論理部、運動論理部)を製作している。

## 1. まえがき

地上設備が主体であった従来の列車制御システムに代わり、無線によって地上と車上を連携させて保安機能を実現する、無線式列車制御システムの実用化が進んでいる。無線式列車制御システムの導入には、地上設備削減によるメンテナンスコストの削減、列車間隔を詰めることによる高密度運転の実現が期待されている。また、地車間で常時通信を行っていることから臨時速度制限や突発的な事象に関する情報を瞬時に車上へ通知できるため、更なる安全性向上が見込まれる。

本稿では、2章で無線式列車制御システムの列車制御方式と導入効果について述べ、3章では、無線式列車制御システムを構成する無線装置、車上制御装置、地上制御装置それぞれの導入時の課題、4章でその課題に対する対策について述べる。

## 2. 無線式列車制御システム

### 2.1 無線式列車制御システムの列車制御方式<sup>(1)</sup>

無線式列車制御システムの列車制御の基本的考え方を図1に示す。

#### (1) 列車位置検知

車上制御装置が、位置補正地上子からの位置情報と速度センサによる走行速度検出によって、自列車位置を計算する。

#### (2) データ伝送(列車位置)

無線を用いて列車位置情報を地上制御装置に伝送する。

#### (3) 列車在線管理・停止限界作成

地上制御装置が、車上制御装置からの列車位置情報に基づいて、列車位置を管理し、後続列車の停止限界(列車が走行できる限界位置)を作成する。

#### (4) データ伝送(停止限界)

無線を用いて停止限界情報を車上制御装置に伝送する。

#### (5) 速度照査パターン作成

車上制御装置が、停止限界を起点に速度照査パターン(停止限界までに停止可能な速度の上限値を列車位置ごとに示した曲線)を作成する。

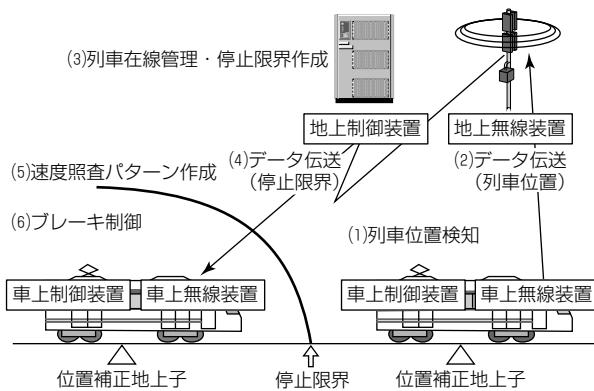


図1. 無線式列車制御システムでの列車制御

### (6) ブレーキ制御

車上制御装置は、列車速度が速度照査パターンを超えたことを検知すれば、ブレーキ制御を行う。

## 2.2 無線式列車制御システムの導入効果

### 2.2.1 列車運行の高密度化

従来の列車制御システムでは、列車在線検知の単位である軌道回路の境界にしか停止限界を設定できなかった。無線式列車制御システムの導入後は、先行列車の後方に停止限界を設定できるので、従来と比較して列車間隔の短縮が可能になる(移動閉塞方式)。

### 2.2.2 地上設備の削減

従来の列車制御システムは、列車在線検知のために線路上に設置した軌道回路や、列車に進行を指示する信号機を維持管理する必要があった。無線式列車制御システム導入後は、無線で情報を送受信することができるため、軌道回路や信号機などの地上設備が不要になり、メンテナンスの効率化が可能になる。

### 2.2.3 障害発生時の縮退運転の実現

従来の列車制御システムでは、列車の進行方向ごとに、ATC(Automatic Train Control)信号送信機やトランスポンダなどの列車制御用のハードウェアを軌道内に設置する必要があった。無線式列車制御システム導入後は、これらのハードウェアが不要になり、従来あった走行上の制約がなくなる。例えば、複線区間の一方の線路で障害が発生した場合、他方の線路だけを利用して上り・下りの列車運行を続行する単線運転が容易に実現可能になる。

## 3. 導入時の課題

国内で、無線式列車制御システムを導入する線区は、既設の保安装置からの老朽取り換えとなる。また、他線区への相互乗り入れを想定しなければならない。このような条件のもと、無線式列車制御システムを構成する各装置に求められる課題を述べる。

### 3.1 無線装置の課題

無線装置に求められる最も重要な事項は、安定した通信の実現である。安定した通信を行うためには、装置の信頼性を向上させるだけでなく、電波環境の変化に強いシステムでなければならない。さらに無線で列車制御に必要な安全性に関わる情報授受を行うことからセキュリティ面での対策が必要となる。

また、無線式列車制御システムの導入効果である地上設備を削減するため、できるかぎり地上無線装置の設置数を少なくする必要がある。さらに、地上無線装置は沿線に設置が必要であることから沿線環境に適合する仕様が求められる。

### 3.2 車上制御装置の課題

列車には、ぎ装スペースに余裕がない場合が多い。また、

複数線区を走行することや、老朽取り換え前の保安装置と共存する必要がある。そのため、無線式列車制御システムに対応する車上制御装置の導入だけでは対応ができない。走行する線区の複数の保安装置に対応可能であり、その切換えはスムーズに実現する必要がある。また、軌道回路に代わって、在線位置を地上制御装置へ送信し、列車間隔を詰めるためには、より正確な位置検知能力が求められる。

### 3.3 地上制御装置の課題

従来の信号システムは、軌道回路を用いた列車検知を行っていたため、軌道回路の故障時には、列車が在線側になる設計となっている。無線式列車制御システムの地上制御装置では、無線で列車の在線を把握することから、無線通信ができない状態になったとしても列車が在線中である認識を確保する必要がある。また、列車の移動に伴い通信する無線装置が切り替わるため、列車と通信を行っている地上無線装置の管理を行なうことが求められる。

## 4. 課題事項の対策

### 4.1 無線装置

列車制御に用いる無線には、免許不要で使用可能な周波数帯と免許が必要な周波数帯の2種類がある。ここでは、免許が必要な周波数帯である2.4GHz帯を用いた無線装置で実現した3.1節の課題事項への対策について述べる。

#### 4.1.1 高い耐干渉性能<sup>(1)</sup>

##### (1) 干渉回避機能

従来方式と当社開発方式干渉回避機能の概念を図2に示す。従来方式では、送信すべき信号(希望信号)の、時間や周波数帯の占有範囲が広いため、干渉信号との衝突が発生する。そこで当社は、占有時間を短く、占有周波数帯を狭くした信号を、周波数を変えながら複数回送信し、受信側で干渉信号と衝突していない信号を選択することで安定した通信を行う方式を開発した。

##### (2) 干渉抑圧機能

干渉源が多数存在する電波環境の場合、(1)で述べた干渉回避機能だけでは、複数回送信信号全てを正常に受信できない可能性がある。そのような環境下でも安定した伝送品質を維持するため、図3に示す干渉抑圧機能を開発した。干渉抑圧機能では、始めに干渉波電力レベルの測定を行う。次に、測定した干渉波電力レベルに応じた係数を算出する。この係数は、干渉波電力が小さい程大きくなるように重み付けを行う。その後、受信信号にその係数を掛け合わせて合成することで、受信信号のS/N(信号対雑音比)を改善する。

#### 4.1.2 セキュリティ確保

安全性に関わる列車の位置情報、走行を許可する範囲を無線で伝送している。無線で送受信するデータの改竄(かいざん)と誤りを検知するために、伝送データの健全性を通番、CRC(Cyclic Redundancy Check)でチェックする

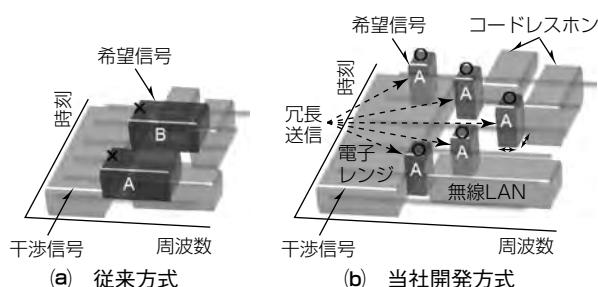


図2. 干渉回避機能の概念図

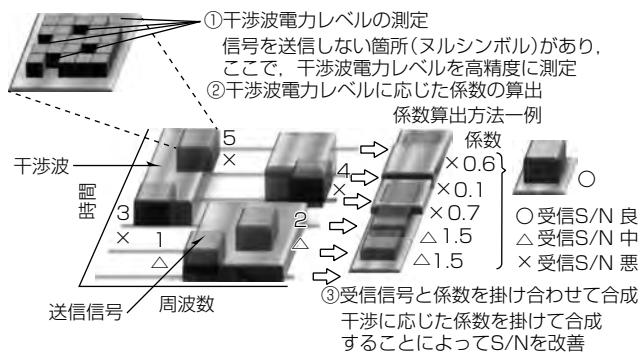


図3. 干渉抑圧機能の概念図

だけでなく、暗号化を施した通信を行い、セキュリティを確保している。さらに、認証機能を組み込むことによる不正アクセスへの対策も実現している。

#### 4.1.3 置局配置の最適化

地上無線装置の設置(置局)数の増加を防ぎ、設置コストを削減するためには、最適な置局配置を算出する必要がある。当社の電波伝搬シミュレーション技術では、線路図及びトンネル形状があれば電波伝搬のシミュレーションが可能である。シミュレーション後、シミュレーション誤差を考慮した、最低受信電力を満たす置局配置を決定する。

今後、実線区での電波伝搬のシミュレーション結果の評価を行い、その評価を踏まえて、シミュレーション精度の更なる向上を目指す予定である。

#### 4.1.4 電波環境監視機能<sup>(1)</sup>

当社の無線装置では、電波環境監視機能を搭載しており、地上無線装置と車上無線装置の双方で干渉波レベルや無線信号の受信レベルの測定を行う。これらを地上に設置する電波環境監視端末でモニタリングすることによって、列車運行に影響が出る前に無線品質の劣化を検出し、事前対策を可能にする(図4)。

#### 4.1.5 地上無線装置の設置環境への対応

東京地下鉄(株)丸ノ内線向けに開発した地上無線装置の外観を図5に示す。製作に当たり、トンネル内の環境条件を検討した結果、“柱取付け”と“壁取付け”的2か所へ対応することにした。さらに、車両接触限界を考慮した結果、柱取付けは幅、壁取付けは奥行きで厳しい条件を満たす必要があった。図に示す無線装置は、装置本体だけでなく、外部との伝送路の冗長化にも対応した構成となっている。

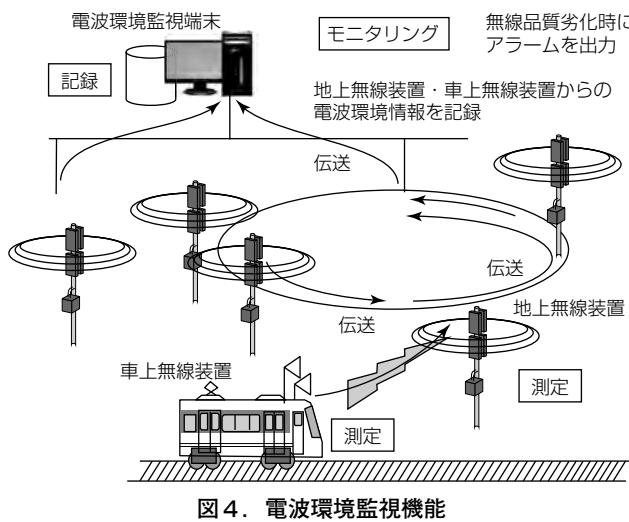


図4. 電波環境監視機能



図5. 地上無線装置

図6. 埼京線向け統合型車上制御装置

防護範囲は、列車の運用を考慮した設定とし、異常が発生した列車を退避させるまで地上制御装置で位置記憶管理を実現している。安全性を確保するためにも、列車在線管理機能が最も重要な機能である。

#### 4.3.2 無線装置管理機能

無線式列車制御システムでは、列車の走行に従って車上制御装置と通信可能な地上無線装置を切り替える必要がある。その切替え時に通信断を発生させないために、通信予定の地上無線装置から予約送信を行う機能を組み込んでいる。予約送信を開始する地上無線装置は、車上制御装置から受信する在線位置等の情報と走行予定範囲の情報を基に地上制御装置が決定している。また、地上無線装置が通信可能な列車本数が決まっているため、列車本数を超えないように、列車走行範囲を管理する機能を組み込んでいる。

## 5. む す び

無線式列車制御システムを構成する、無線装置、車上制御装置、地上制御装置それぞれの導入時の課題とその対策について述べた。さらに、本稿で述べた以外にも、無線による地車間情報伝送を利用した様々な機能向上が可能である。例えば、地上から各列車のATO(Automatic Train Operation)に先行列車の運行状況を送信することによって、状況に応じた省エネルギー運転が期待できる<sup>(3)</sup>。今後国内でも、無線式列車制御システムが主要な列車制御システムとなっていくことが考えられる。当社は今後も、無線式列車制御システムによる高機能かつ事業者のニーズに合わせたソリューションの開発を進めていく。

## 参 考 文 献

- (1) 明日香 昌, ほか: 無線列車制御システムの最新技術と今後の展望, 三菱電機技報, 90, No.9, 493~496 (2016)
- (2) 金井利喜, ほか: 埼京線向けATACS車上システムの開発, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 52, No.525 (2015)
- (3) 山本 律, ほか: 省エネルギー化に取り組む列車運転制御システムの最新動向, 三菱電機技報, 86, No.9, 520~523 (2012)

## 4.2 車上制御装置<sup>(2)</sup>

無線式列車制御システムであるATACS(Advanced Train Administration and Communications System)に対応した車上制御装置で実現した、3.2節で述べた課題の対策である小型化、位置検知精度の向上について述べる。

### 4.2.1 小型化について

ATC, ATS-P, 無線式列車制御システムに必要な機能を統合化した車上制御装置を製作した。この統合型車上制御装置は、ソフトウェアを切り替えることで複数の保安装置に対応した制御を実現し、他線区乗り入れ時及び新旧システム切替え時にスムーズな保安装置の切替えを実現している。図6に東日本旅客鉄道株埼京線向け統合型車上制御装置の外観を示す。

### 4.2.2 位置検知精度向上

従来は、速度発電機を用いて列車の移動距離の算出を行っていた。しかし、極低速域の速度を検出できないことが課題であった。そのため、停車直前まで速度検出が可能な速度センサを採用し、位置検知精度の向上を図った。

採用した速度センサは、車軸に取り付けた歯車の回転を磁界の変化によって非接触で検出することで高精度な速度検出を可能にしている。また、速度発電機と取り付け互換を持たせることで、容易な置き換えを実現している。

## 4.3 地上制御装置

無線式列車制御システムの地上制御装置を開発しており、主な機能であるとともに3.3節で述べた課題の対策である列車在線管理機能と無線装置管理機能について述べる。

### 4.3.1 列車在線管理機能

無線通信中の列車は、常時停止限界位置の変化を受信するため、列車の間隔を制御することが可能である。しかし、無線通信が断となった列車は停止限界位置の変化が受信できないため、地上制御装置は最後に列車から正常に受信した位置を記憶し、他列車との防護を行う必要がある。

## 耐環境型高機能ERPスイッチ

Environmentally-resistant and High-functional ERP Switch

Rie Wakana, Ryusuke Kawate, Sachiko Taniguchi, Toshiyuki Nakayasu, Takuya Yamagata

## 要旨

従来の鉄道用ネットワークは、運用分野に合わせ、異なる専用プロトコルを用いて独自のネットワークを構築する場合が多かった。しかし、デジタル通信技術の高度化、Ethernet<sup>(注1)</sup>の普及に伴い、鉄道用ネットワークでも汎用ネットワークを適用する動きが広がりつつある。

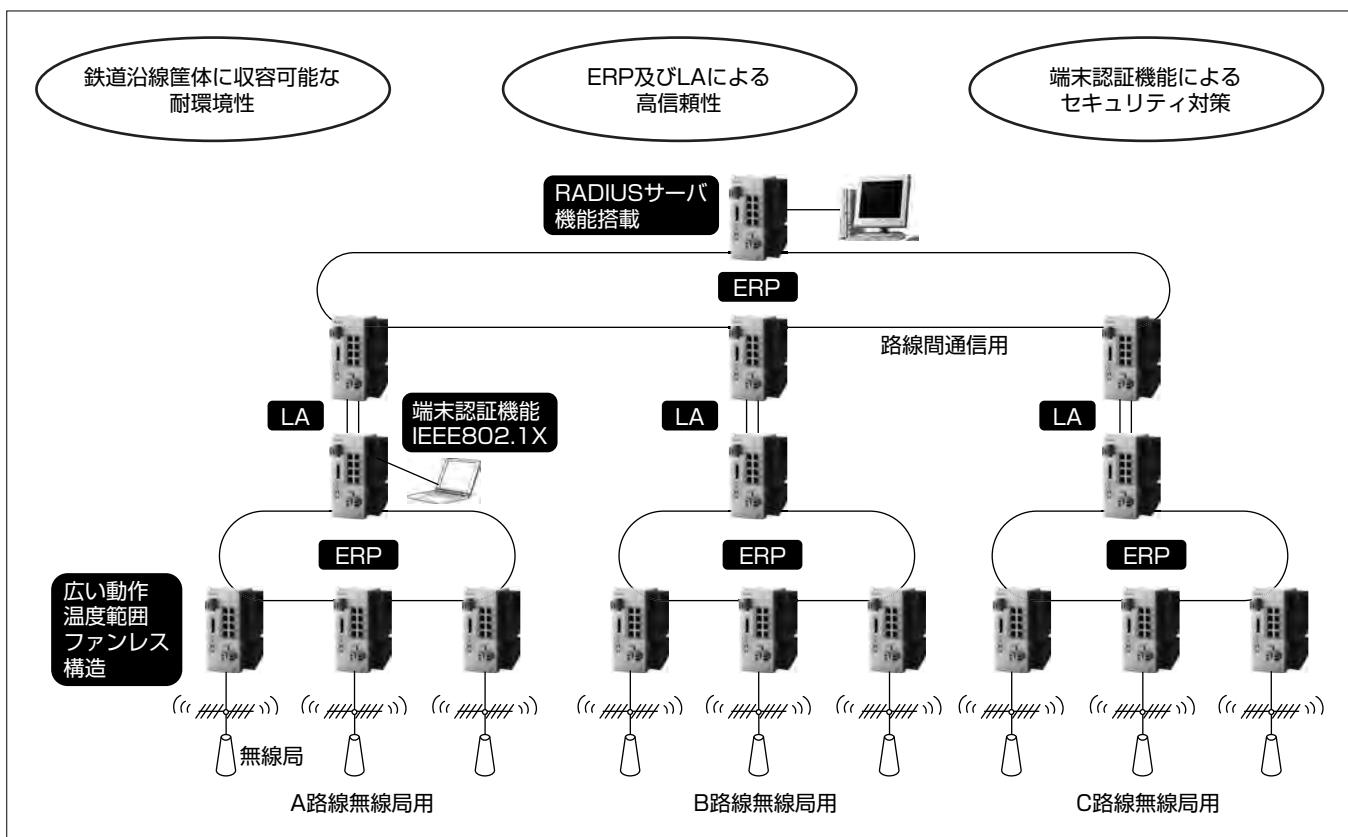
また、鉄道事業者は乗客の大量輸送や高齢化社会への対応の観点から、高密度運転や設備メンテナンスの省力化を実現するシステムの開発・導入に取り組んでいる。

三菱電機は、2016年にEthernet技術を用いた産業用のインテリジェントスイッチを開発しているが、今回は、鉄道信号分野への適用を考慮して、耐環境型高機能ERP(Ethernet Ring Protection)スイッチを開発した。この装置は鉄道沿線筐体(きょうたい)への収容を考慮し、広い動

作温度範囲(-20~65°C)に対応する耐環境性を保持している。また、ネットワークに障害が発生した場合でも通信を継続する高信頼性機能(ERP, LA(Link Aggregation))に加え、なりすまし等へのセキュリティ対策となる端末認証機能(IEEE802.1Xに準拠), RADIUS(Remote Authentication Dial In User Service)サーバ機能を実装している。

この装置の適用先は、運転間隔の最適化と地上設備のスリム化が可能な無線式列車制御システムなど、現場装置を収容するネットワークが挙げられる。今後は、システムの規模に適した装置選定を可能にするラインアップの拡充や保守性を向上させる機能の充実化を図り、この装置の適用範囲を拡大していく。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。



## 耐環境型高機能ERPスイッチの特長と無線式列車制御システムへの適用イメージ

鉄道用ネットワークは耐環境性とネットワークに障害が発生した場合でも通信を継続する高信頼性が求められる。耐環境型高機能ERPスイッチは広い温度範囲で動作し、ファンレス構造である。また、通信障害によるシステムダウンを防ぐERP機能とLA機能の搭載に加え、なりすまし等へのセキュリティ対策となる端末認証機能を実装している。この装置は無線局の収容や監視カメラ、信号設備などの現場装置の収容も可能である。

## 1. まえがき

従来の鉄道用ネットワークは、運用分野に合わせ、異なる専用プロトコルを用いて独自のネットワークを構築する場合が多かった。しかし、デジタル通信技術の高度化、Ethernetの普及に伴い、鉄道用ネットワークでも汎用ネットワークを適用する動きが広がりつつある。

当社は、2016年にEthernet技術を用いた産業用のインテリジェントスイッチを開発した。今回、この装置をベースに、鉄道信号分野への適用を考慮した、“耐環境型高機能ERPスイッチ”を開発した。

本稿では、開発したERPスイッチの主な機能と構成技術について述べる。

## 2. 開発の背景

鉄道事業者は乗客の大量輸送や高齢化社会への対応の観点から、高密度運転や設備メンテナンスの省力化を実現するシステムの開発・導入に取り組んでいる。開発するシステムのネットワークには汎用ネットワーク装置が求められているが、その要件は、広く普及しているオフィスや家庭向け用装置とは様々な差異がある。

今回、鉄道用ネットワークの要件を満たす耐環境型高機能ERPスイッチを開発した。このERPスイッチは、次のような鉄道用ネットワークに適用可能である。

- (1) 列車制御システム用ネットワーク
- (2) 監視カメラ用ネットワーク
- (3) 信号システム用ネットワーク

## 3. 鉄道用ネットワーク装置の要件

鉄道用ネットワーク装置の要件として、安定輸送を支える高信頼性機能、線路沿線などで使用可能な耐環境性、メンテナンス省力化につながる容易な保守性等がある。

### (1) 高信頼性機能

鉄道用ネットワークは様々な機器が周期的に制御信号を送受信しており、ネットワークに障害が発生した場合でも通信を継続する高信頼性が求められる。また、汎用ネットワーク技術の適用に伴い、なりすまし等のセキュリティ対策機能の実装要求も高まっている。

### (2) 耐環境性

沿線の屋外やトンネル内の筐体に収容可能なコンパクトな形状で、広い温度範囲での動作が必要である。

### (3) 保守機能

装置故障時の迅速な保守対応のため、故障装置の自動検出、故障予知の通知機能、及び保守作業員のスキルによらない装置交換が可能な仕組みが求められる。また、定期的な部品交換を不要とする装置構造も重要である。

## 4. 主要機能

3章で述べた要件を満たす鉄道用ネットワーク装置として、耐環境型高機能ERPスイッチを開発した。図1に装置の外観、表1に主要諸元を示す。

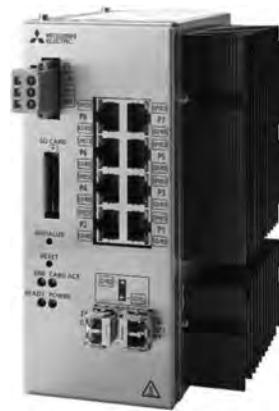


図1. 耐環境型高機能ERPスイッチ

表1. 耐環境型高機能ERPスイッチの主要諸元

項目	内容	
通信インターフェース	LANポート	10/100BASE-TX 4ポート
	光ポート	1000BASE-T 4ポート
伝送距離	LANケーブル	最大100m
	光ファイバケーブル	5~15km(LXの場合) <sup>(注2)</sup>
スイッチング速度	最大6.4Gbps	
転送方式	カットスルーモード ストア&フォワード方式	
MACアドレス学習数	最大2,048個	
VLAN機能	IEEE802.1Q (ポートVLAN・タグVLAN)	
ERP	ERP設定可能ポート数	2ポート
	ERP切替時間	障害発生から5ms以内 (ERPスイッチ16台接続時)
LA	LA設定可能グループ数	5グループ
	LA経路切替時間	障害発生から1s以内
ループ検出	ループ検出対象のVID指定可能数	最大8個
セキュリティ	MAC SA フィルタリング	最大32エントリ
	端末認証 (IEEE802.1x)	認証方式: PEAP-MS-CHAPv2 RADIUSサーバ機能実装
ハードウェア諸元	動作環境条件	-20~65°C 5~95%(結露がないこと)
	定格入力電圧	DC24V (許容電圧範囲DC18.0~31.2V)
	外形寸法	97.5(W)×121.0(D)×167.0(H)(mm)
	質量	1.5kg
	冷却方式	自然空冷 (ファンレス・メンテナンスフリー)
	プラットフォーム	FPGAによって実現
保守機能	故障予知の通知	光パワー異常を自動検出
	ログ管理	操作ログ、アラームログ
	遠隔保守	Telnet、SNMP、 遠隔バージョンアップ
	その他	SDカードメモリによる初期設定及び ログ保存

(注2) 光ファイバの最大伝送距離は実装する光モジュールによって変更可能  
MAC : Media Access Control, SA : Source Address,  
VLAN : Virtual LAN, VID : VLAN Identifier,  
FPGA : Field-Programmable Gate Array, Telnet : Teletype network,  
SNMP : Simple Network Management Protocol

この装置は広い温度範囲(-20~65°C)で動作し、ファンレス構造にした。また、通信障害(通信異常)によるシステムダウンを防ぐリング冗長機能(ERP)とLA機能の搭載に加え、なりすまし等のセキュリティ対策となる端末認証機能を実装している。

主要諸元のうち、この装置の特長であるERP機能と端末認証機能について述べる。

#### 4.1 ERP機能

ERP機能として、国際規格ITU-T G.8032に準拠したERPを実装している。ERPの経路切替えは、リングを構成するL2SW(Layer 2 SWitch)の1台をRPL(Ring Protection Link)オーナーに設定し、RPLオーナーがリング上の片側(RPL側)ポートを閉塞することでリング内にフレームが循環することを回避する。障害が発生した場合は、障害検出箇所を閉塞すると共にRPLオーナーの閉塞を解除し、リング内の閉塞箇所を切り替えることで通信の継続が可能である(図2)。

この装置は当社独自技術である高速切替えモードの実装によって、障害復旧時間を16台接続時5ms以内に短縮している(表2)。

#### 4.2 端末認証機能

汎用ネットワーク技術の導入に伴い、なりすまし等のセキュリティ機能の実装要求は高まっている。IEC(国際電気標準会議)では、2002年に鉄道の安全に関わる情報を伝送する通信システムに関する国際規格IEC62280を発行した。この規格にはオープンな伝送システムに対する脅威として、重複、削除、挿入、順序誤り、破壊、遅延、なりすましを挙げている(表3)。

鉄道向けネットワークに収容される装置は、無線局や信号装置などの現場端末と、汎用パソコンなどの保守端末がある。現場端末は運用開始後の接続先変更は基本的に発生しないが、保守端末は運用の状況に応じて任意のアクセスポイントに接続する。

この装置は保守端末のなりすましへの対策を強化するため、端末認証機能(IEEE802.1X)を実装した。これによって、悪意のある通信端末からのネットワークアクセスを回避することを可能にした。

##### 4.2.1 IEEE802.1X認証

端末認証では、一般的にIEEE 802.1Xで規定される認証方式が用いられる。IEEE802.1X認証では、認証プロトコルであるEAP(Extensible Authentication Protocol)が使用されるが、EAPには様々なものがあり、使用する認証キー(ユーザーID/パスワード、電子証明書等)や、セ

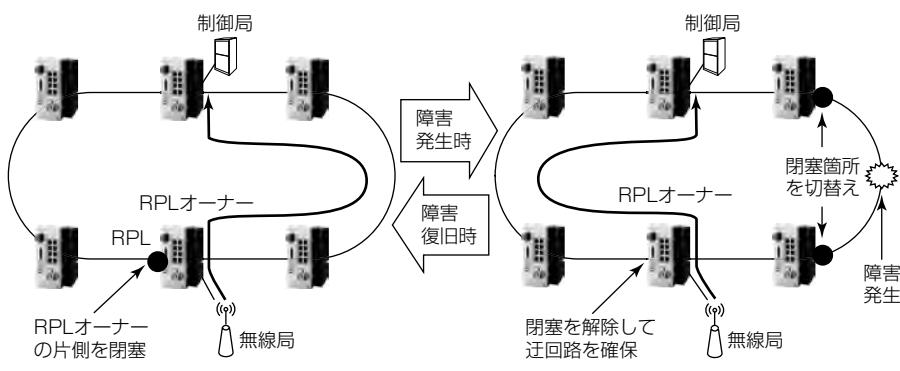


図2. ERPの経路切替え

表2. リング冗長方式と経路切替え時間の比較

	切替え時間 <sup>(注3)</sup> (障害復旧時間)	接続条件	規格
今回の装置	5 ms以内	16台接続	ITU-T G.8023+ 高速切替えモード
	8 ms以内	64台接続	
ERP	50ms以内	16台接続	ITU-T G.8023
RPR	50ms以内	50台接続	IEEE802.17
MRP	200ms以内	50台接続	IEC62439

(注3) 今回の装置の切替え時間は実測値、ERP・RPR・MRPは規格値  
RPR: Resilient Packet Ring, MRP: Media Redundancy Protocol, ITU-T: International Telecommunication Union Telecommunication standardization section, IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEC: International Electrotechnical Commission

表3. オープンな伝送システムに対する七つの脅威と定義

脅威	定義
重複	単一のメッセージが2回以上受信される
削除	メッセージがメッセージストリームから除去される
挿入	メッセージストリームにメッセージが追加される
順序誤り	メッセージストリーム中のメッセージの順番が変化する
破壊	メッセージが改変される
遅延	意図した時刻より遅れた時刻にメッセージが受信される
なりすまし	認証されていないメッセージ・ユーザーが認証されているかのように見える

セキュリティ強度がそれぞれ異なる。そのため、OSのサポート状況や使い勝手等を考慮して、適切なEAPを選択することが必要となる。

保守端末は、一般的にWindows<sup>(注4)</sup>又はLinux<sup>(注5)</sup>が搭載されている。EAPの方式を安全性と管理負担を中心に比較検討した結果、セキュリティ強度が高くWindowsパソコンに標準実装され、Linuxでも一般的にサポートされているPEAP-MS-CHAPv2(Protected EAP Microsoft Challenge Handshake Authentication Protocol version2)を採用した。

端末によるサーバの認証は認証局が発行する証明書を用い、端末の認証はID/パスワードで行われる。情報のやり取りはTLS(Transport Layer Security)トンネル内で行われるので、盗聴の可能性が低く、ID/パスワードを適切に管理することで、安全性が確保できる。

(注4) Windowsは、Microsoft Corp. の登録商標である。

(注5) Linuxは、Linus Torvalds氏の登録商標である。

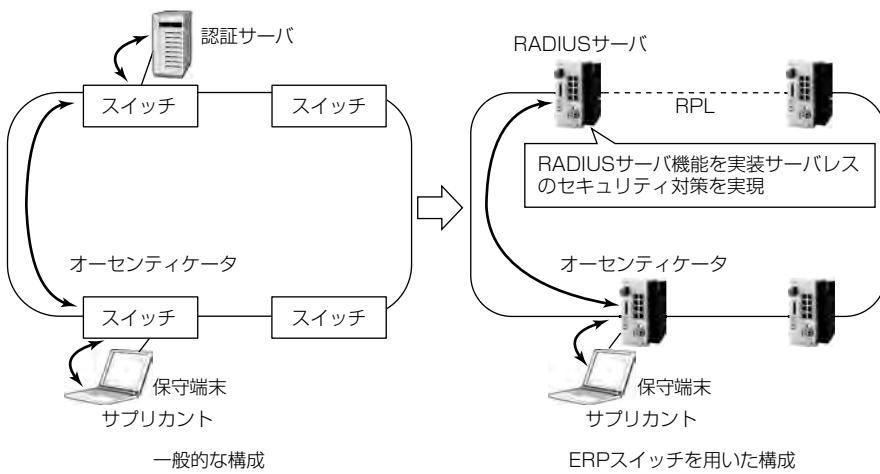


図3. 保守端末の接続イメージ

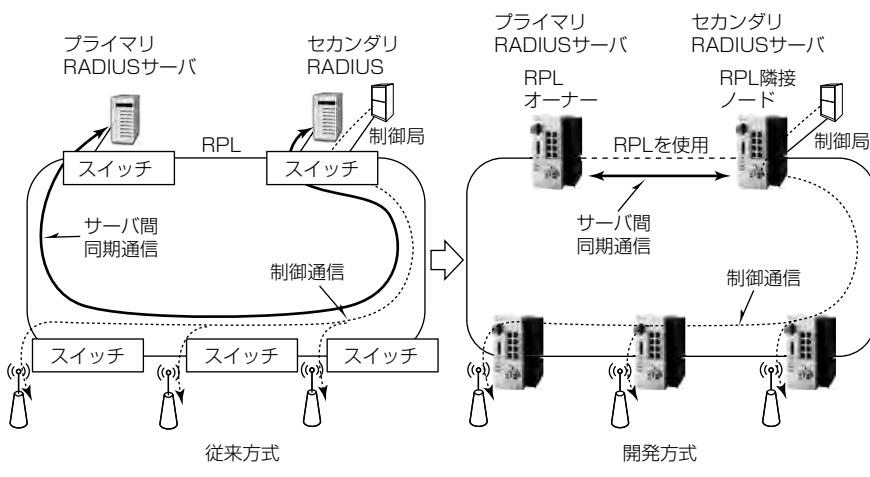


図4. RADIUSサーバ間のデータベースの同期方法

#### 4.2.2 RADIUSサーバ機能の実装

IEEE802.1Xによる端末認証には“サプリカント(Suplicant)”“認証サーバ”“オーセンティケータ(Authenticator)”の三つの構成要素が必要となる。サプリカントは認証を受ける機器(保守端末)であり、認証サーバはサプリカントの認証を行うRADIUSサーバである。オーセンティケータはアクセスポイント(ERPスイッチ)であり、サーバの認証結果を受けてネットワークのアクセス制御を行う。

図3は保守端末の接続イメージである。今回の開発ではオーセンティケータ機能だけでなくRADIUSサーバ機能もERPスイッチに実装することで、サーバレスのセキュリティ対策を可能にした。

保守端末は、あらかじめ認証局から証明書の発行を受けた後、オーセンティケータ機能が有効なERPスイッチに接続する。ERPスイッチはRADIUSサーバと保守端末間の認証結果を受け、保守端末にネットワークへのアクセス制御を行う。

#### 4.2.3 RADIUSサーバの冗長化

ネットワーク上のERPスイッチは2台までRADIUSサーバとして設定でき、冗長構成が可能である。

RADIUSサーバの認証データベースは、悪意ある端末のアクセス履歴などを調べるために有益な情報源となる。RADIUSサーバを冗長化した場合、プライマリRADIUSサーバは認証が完了するとセカンダリRADIUSサーバと認証データベースを同期することにした。また、ERPリングのRPLオーナーとRPLを介して接続するERPスイッチ(RPL隣接ノード)をRADIUSサーバとして設定した場合には、RPLを使用したRADIUSサーバ間の同期通信を可能にした。

このRPLの通信帯域を有効活用する方式によって、冗長サーバ間の同期通信の影響を受けずに、制御通信のリアルタイム性を確保できる(図4)。

## 5. むすび

今回開発した鉄道用耐環境型高機能ERPスイッチは、無線式列車制御システムの地上ネットワークの他、様々なネットワークへの適用が可能

である。今後は、システムの規模に適した装置選定を可能にするラインアップを拡充するため、ポート数の少ない製品を開発する予定である。さらに、ネットワークの接続情報、障害情報をERPスイッチ間で転送・集約して保守端末へ通知する、保守性を向上させる機能の充実化を図る開発も計画している。これらの開発によって、この装置の適用分野を拡大していく。

## 参考文献

- (1) 谷口幸子, ほか: ハードウェアベースのリングプロトコル機能評価, 電子情報通信学会総合大会, B-8-24 (2013)
- (2) 川崎邦弘: 安全関連伝送に関する国際規格IEC62280, 鉄道総研報告 (2013)
- (3) 中安俊行, ほか: CC-Link IEフィールドネットワーク対応インテリジェントHUB, 三菱電機技報, 90, No.6, 362~366 (2016)

# メンテナンスソリューション

安心・安全な鉄道輸送のため、車両や設備の状態を把握し、適切に維持管理することが重要である。車両や設備の異常・故障を未然に防止するため、従来は定期的な検査で対応してきたが、最近では、機器の寿命や故障の予兆をリアルタイムで検知する状態基準保全(CBM)が注目されている。三菱電機は、IoT(Internet of Things)やAI(Artificial Intelligence)を活用し、故障の予兆検知技術や保守作業支援技術の開発に取り組んでいる。

遠隔保守支援システム



乗務員への指示やサポート

指令での保守の向上

車両・施設の状態監視の高度化

車両手配業務の支援

トラブル時の乗務員サポート向上

車両での保守の向上

機器による自己診断

機器のメンテナンス性向上

車両のダウンタイム低減



車両機器 (本誌 p26)

状態監視機能の付加や、保守作業を考慮した構造設計を行うことで、車両機器のメンテナンス性の向上を図る。

この章では、車両用空調装置でのメンテナンス性向上の取組みを紹介する。



車両機器のメンテナンス

列車統合管理システム



車両・機器状態のモニタリング

車両遠隔保守支援 (本誌 p22)

車上で収集された機器の動態データと各種データ分析手法を用いて、故障の予兆を検知し、メンテナンス業務の負荷軽減を図る。この章では、三菱電機が考える車両保守支援技術について紹介する。



地車間連携による車両遠隔保守支援

沿線設備計測・解析システム



構造物の点検作業

基地・沿線での保守の向上

検修業務の効率化・確実化

構造物の点検作業効率化

定期検査の省力化・自動化

保守作業支援 (本誌 p30)

作業の精度向上や効率化のため、映像や音声を用いて、作業者へ指示・支援を行う。この章では、AR(Augmented Reality)を活用した保守点検作業支援技術について紹介する。



基地での保守作業

## 鉄道車両向け保守支援システムの最新動向

堀江一司\*

## Recent Technological Trends about Maintenance Supporting System for Railway Vehicle

Kazushi Horie

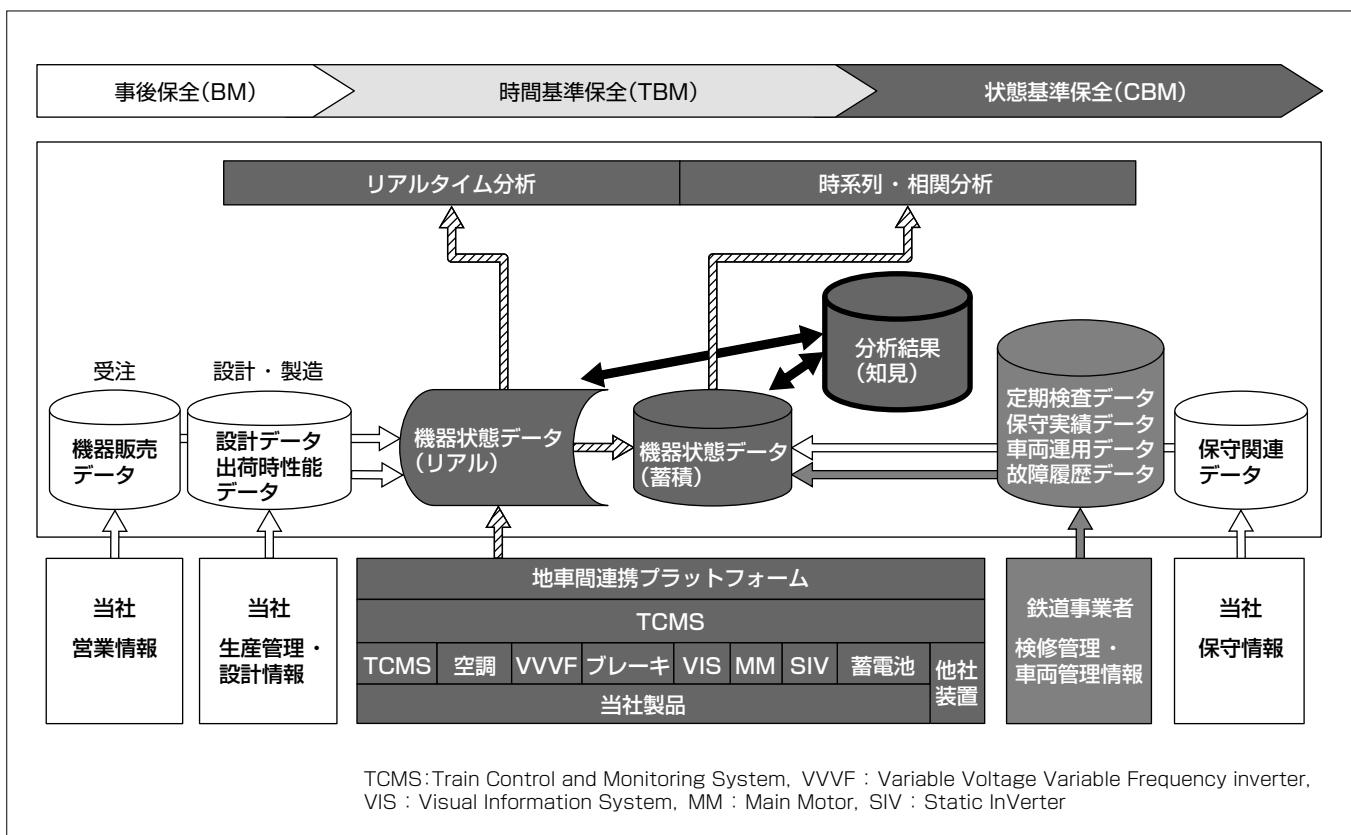
## 要旨

鉄道を取り巻く社会環境は大きく変化している。国内では、少子高齢化による輸送需要や運営要員の減少が予想されることから、鉄道事業者にとって、安全・安定・快適性の向上に加えて、より一層の経営効率化が喫緊の課題となっている。また、海外でも、競争自由化の拡大や航空・自動車といった、交通モード間での競争激化を背景に経営効率化の要求は高まっている。特に、保守業務は鉄道運営費用で大きな割合を占めることから、定期検査をベースとした時間基準保全(Time Based Maintenance : TBM)から、より自動化や効率化が可能となる状態監視をベースとした状態基準保全(Condition Based Maintenance : CBM)への保守体系の変革が期待されている。

一方、鉄道車両を取り巻く技術動向として、地車間の無

線通信環境の進化によって、車両や機器の状態・稼働データをリアルタイムに収集・活用できる条件が整ってきた。また、ビッグデータと呼ばれる大量の機器データを収集・蓄積するクラウドコンピューティング環境やデータ分析技術など、IoT(Internet of Things)と呼ばれる“モノ”を扱う情報技術の急速な進化・普及も保守体系の変革を後押ししている。

三菱電機はこれまで鉄道車両の保守業務を支援する装置やシステムを提供してきたが、これら社会環境の変化や最新技術の動向を踏まえ、鉄道事業の更なる経営効率化と持続的発展に貢献するため、機器メーカーとしての長年の経験や知見を活用して、新たな保守支援システムの開発に取り組んでいる。



## 保全業務支援システムの概念図

現在、鉄道車両の保守は機器故障発生後の事後保全(Breakdown Maintenance : BM)と車両基地での定期点検に相当する時間基準保全(TBM)の両輪で運用されているが、効率化に向けて機器稼働状態に合わせた状態基準保全(CBM)の導入に向かっている。当社は各種データの活用・分析によって、各保全を支援するシステムを開発している。

## 1. まえがき

鉄道を取り巻く社会環境は大きく変化しており、鉄道事業者にとって、安全・安定・快適性の向上に加えて、一層の経営効率化が喫緊の課題となっている。

特に、鉄道運営費用で大きな割合を占める保守業務では、定期検査をベースとした時間基準保全(TBM)から、より自動化や効率化が可能となる機器の動態監視をベースとした状態基準保全(CBM)へ保守体系の変革が期待されている。

本稿では、機器メーカーである当社がこれらの社会変化や鉄道事業での経営課題を踏まえ、鉄道車両向けに取り組んでいる保守支援システムの開発について述べる。

## 2. 鉄道車両保守の現状

鉄道車両の保守は他の鉄道設備と同様に鉄道の安全を確保する上で極めて重要な業務であり、最初に保守の現状について述べる。

現在の保守は、鉄道のダウンタイムを最小化するために、故障部位を発見してから修理する事後保全(BM)に加えて、車両や機器の稼働実績を基に検査周期を定めて行う定期検査を主体としたTBMを主流としている。

一般的な保全方式の分類を表1に示す。

ここで、TBMでは機器個別に一定の周期を決めて検査や修繕を行うため、機器が健全な状態であっても修繕・交換による一定の手間や資材費用が必要になってしまう場合がある。

一方、回生ブレーキの負担拡大によるブレーキシュー摩耗の低減や、全閉形主電動機の適用による清掃作業の低減等、機器側での保守軽減に向けた各種技術が適用されているとともに、各機器に対応する試験装置や列車統合管理シ

表1. 保全方式の分類

保全方式	内容
事後保全(BM)	機器故障発生後に補修や取替えをする方式
時間基準保全(TBM)	定期検査や修繕によって保守を行う方式
状態基準保全(CBM)	稼働中の機器での動態監視を基に検出した劣化や故障予兆に基づいて保守を行う方式

ステム(Train Control and Monitoring System: TCMS)による列車統合制御の導入等によって検査・修繕の効率化が図られてきた。しかし、現在でも保守要員の経験や技量に依存する作業割合は高く、高齢化によるベテランの退職や少子化による人手不足への対応が重要な経営課題となってきた。

これに対して将来的な保全方式と考えられているCBMは、稼働中の機器状態を連続的にリアルタイムに監視することで、データの時系列又は相関的な分析による知見から劣化や故障の兆候、残った寿命を判断して必要な保守を実施するものであり、TBMに比較して自動化や効率化を実現しやすく、定期検査に必要な費用や人の経験に依存した作業方法、保守工数の削減が期待できる。

## 3. 保守支援システム技術と課題

現在主流であるBMやTBMに対し、当社はTCMSを中心としてこれまでにも保守支援システムを提供してきた。ここではそれらを述べるとともに、CBM実現に向けた今後の課題について述べる。

### 3.1 モニタリングによるBM支援

モニタリングは、車両搭載機器の故障や稼働状況をリアルタイムに把握・監視するTCMSの機能である。

編成全体での機器の稼働状況を収集し、運転台モニタ画面に機器状態・故障発生等の通告や、復旧対応マニュアルの表示等によって、乗務員は列車上の異常発生を迅速に把握し、処置対応できるようになった。

### 3.2 各種試験機能によるTBM支援

図1のように、TCMSは機器のモニタリングに加えて列車全体の統合制御へと役割を拡大している。

例えば、営業運転前の出区点検や車両基地での定期点検を支援する機能を提供しており、乗務員や検修員の作業を支援し、時間短縮に貢献している。

### 3.3 CBM実現に向けた技術課題

先に述べたように、BMやTBMを支援するシステムを提供してきたが、更なる自動化や効率化に向けてCBMを導入するには次のような課題がある。

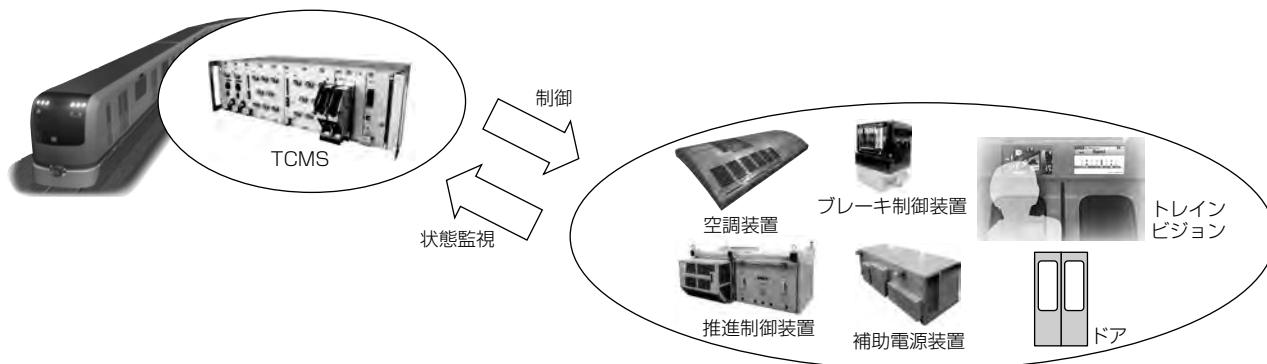


図1. TCMSによる列車統合制御

### 3.3.1 データ通信環境

従来のモニタリング機能に比較して、CBMでは時系列の動態データを始めとして、地車間で伝送する情報量が非常に多くなることから、従来よりも高速な伝送や無線通信を適用する必要がある。

### 3.3.2 製品トレーサビリティ

機器の動態データをCBMで活用するには、機器の製造から試験、出荷、稼働、保守といった製品ライフサイクルの各ステージでの情報と関係付ける必要があり、これらの各種データを統合するために製品トレーサビリティが必要となる。

### 3.3.3 データの共有・活用に向けた仕組み作り

監視対象である鉄道車両の大量データをセキュリティ面も含めて蓄積・管理し、鉄道事業者と機器メーカーがデータを共有し、活用できる情報基盤の構築が必要である。

### 3.3.4 機器動態データ分析技術と知見の蓄積

機器の動態データとして何を使用するのか、どのようにデータを取得・分析して劣化や故障の予兆を得るのか等、CBMの中核となる分析技術を高める必要がある。

## 4. 新たな保守支援システムに向けた取組み

ここでは3章で述べた現在の保守支援システムや今後の技術課題に対し、4.1節で新たな保守支援システム実現に向けた考え方を述べ、4.2節以降で現在の取組み状況について述べる。

### 4.1 新しい保守支援システムへのアプローチ

CBMを適用した新しい保守支援システムを目指して、機器の動態監視をベースとし、次のようにBM、TBMの更なる改善を起点として保守体系の変革を進めていく。

#### 4.1.1 BM(故障対応)の迅速化

従来のモニタリング機能(運転台モニタ画面表示)に加えて、機器の動態データの見える化を図るとともに、乗務員と地上側(司令員)でモニタ画面や動態データを共有できるようにする。

また、鉄道事業者の各部門に加えて当社も動態データを共有することによって、故障対応に際して鉄道事業者と機器メーカーとの連携を強化し、復旧の迅速化を図る。

#### 4.1.2 TBM(定期検査)への応用

地上側で見えるようになった動態データを活用して保守の省力化を図る。

例えば、現行の定期検査項目に関して、営業走行中の状態記録や動態データの処理による判定で置き換えることによって、検査の省力化を進めていく。

#### 4.1.3 機器メーカーの知見に基づくCBMの展開

BM、TBM支援で蓄積した動態データに対する分析

を継続し、順次CBM支援を導入していく。

CBM支援での重要な技術は、機器から収集したデータに基づいて異常やその予兆を抽出するデータ分析であるが、この分析には一般的な統計モデルやAI(Artificial Intelligence)手法、ビッグデータアプローチに加えて、対象機器の設計・製造での機器メーカー独自の知見に基づいた物理モデルや長年の経験による故障モード分析等を融合させて解を得ていく。

### 4.1.4 CBM支援でのデータ分析精度の向上

CBM支援に際しては、各機器で分析を実行する範囲(同一機器の台数)を適切に広げることによって、取得データ分析の精度向上を図る(図2)。

### 4.2 BM迅速化への取組み

#### 4.2.1 地車間通信システム

無線通信を使って車両モニタリング情報を地上サーバへ伝送する地車間通信システムを活用し、機器故障発生時のデータが地上側で遠隔取得できる等の利点も含め、車上と地上で同一モニタ画面を共有し、BM支援として運転士と司令員の正確な意思疎通、問題解決の迅速化を進めている。

### 4.3 TBM支援への取組み

#### 4.3.1 定期検査への応用

地車間通信の活用によって、従来手動で実施していた検査項目の一部を、営業走行中の車両搭載機器データを用いることで、車両基地での検査作業の省力化が可能になる(図3)。

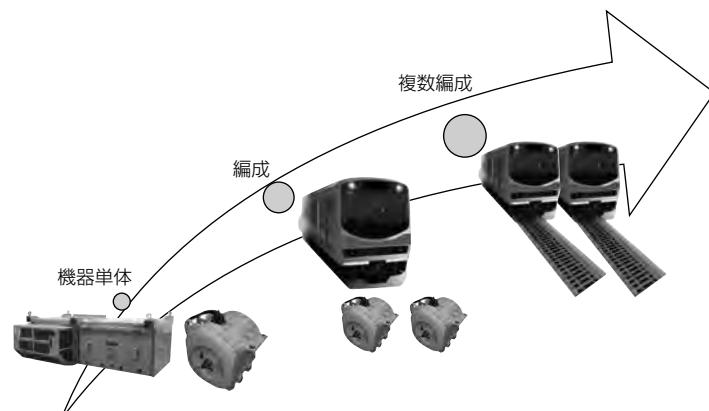


図2. 各機器のCBM支援での検討精度向上

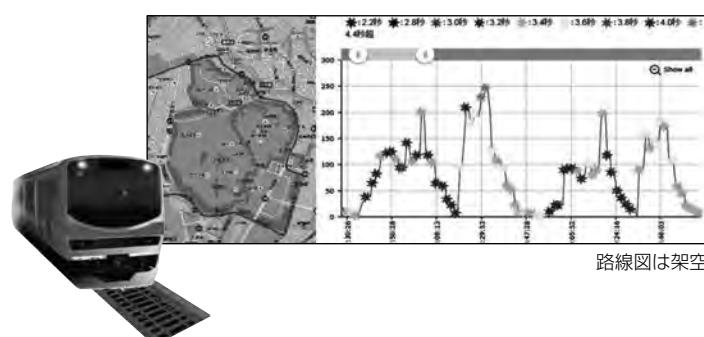


図3. 定期検査への応用

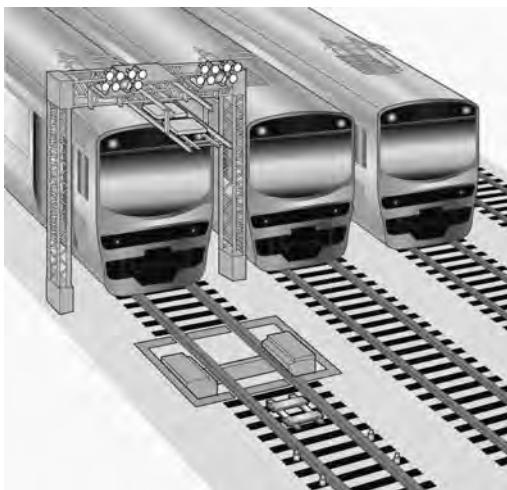


図4. TRIIシステム

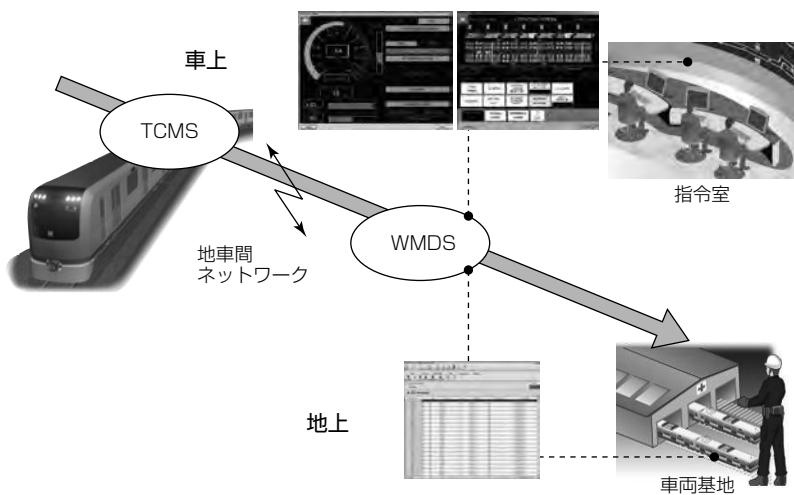


図5. WMDSを用いた保守支援イメージ

#### 4.3.2 TRIIシステム

地上設備であるTRIIシステム(TRain Integrated Inspection system : TRII)(図4)の導入によって、入区時に車両走行時での屋根上や足回りの状態を自動で測定・記録し、検査データを定量化することで、安心・安全な検修作業と作業時間の短縮が期待できる。

また検査データの“見える化と共有化”によって車両ごとにきめ細かな管理が可能になる。

#### 4.4 CBM支援への取組み

最新のTCMSでは、車両内に高速のEthernet<sup>(注1)</sup>伝送を適用し、大量なデータを扱えるようになっている。

また、通信事業者による高速な汎用公衆無線サービスも充実し、地車間での無線通信に適用可能であり、セキュリティ対策としては地車間通信部分にVPN(Virtual Private Network)通信機能が適用できる。

このような技術に加え、TCMSと地車間通信を活用し、遠隔保守支援システム(Wayside Monitoring and Diagnostic System : WMDS)を製品化した(図5)。

WMDSによって、車両機器の動態データを地上側で取得できるので、CBM支援に向けた機器データの分析・故障解析の一層の高度化が可能になる<sup>(1)</sup>。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス株の登録商標である。

### 5. 今後の展望

TCMSの機能アップや地車間通信システムの進化によって、BM迅速化やTBM支援への取組みが進んでいる。

また、これら技術の活用によるWMDSの製品化によって、収集・蓄積可能な機器動態データの大規模化も進み、

CBM導入に向けた基礎ができた。

今後、機器メーカーとしての知見を注(つ)ぎ込んで、CBM実現に向けた動態分析や故障解析の技術を高めていくとともに、当社の各製作所での製造から試験、出荷、稼働、保守までの製品トレーサビリティと連携することや、鉄道事業者と機器メーカーがデータを共有・活用できる情報基盤の構築を推進することによって、CBM支援の機能深化を図り、鉄道車両の保守支援システムの高度化を進めていく。

### 6. むすび

これまでの“ヒト”に依存した保守体系からの脱却を目指し、今後も保守業務に対する自動化や効率化のニーズは高まると考える。

当社は機器メーカーならではの設計・製造ノウハウや故障・復旧に対する知見を総動員し、車両全体に対する保守支援システムの技術開発に取り組んでいく。

引き続きBM、TBMを支援し、CBMを導入することによって、故障発生頻度を抑制しつつ鉄道事業者の保守に要する負荷を軽減することで、車両ライフサイクルの最適管理を実現し、更なる安定輸送の提供、輸送サービスの向上に貢献していく。

### 参考文献

- 甲村哲朗、ほか：鉄道車両保守支援システムの最新技術と今後の展望、三菱電機技報、90、No.9、497～500 (2016)

# 東日本旅客鉄道(株)向けE235系車両用空調装置の特長とメンテナンス性向上

古賀知樹\*

Features and Maintainability Improvement of Railcar Air Conditioning Unit for JR EAST E235 Series

Tomoki Koga

## 要 旨

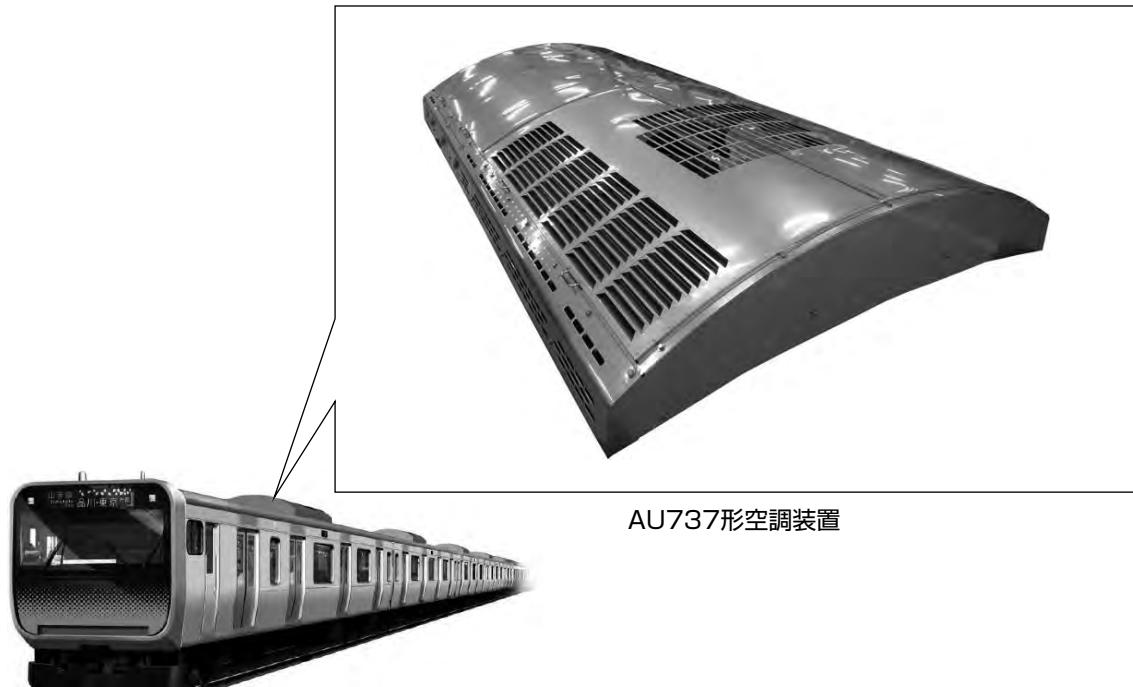
東日本旅客鉄道(株)(以下“JR東日本”という。)では、次世代の新型通勤車としてE235系一般形直流電車量産先行車の営業運転を2015年から開始した。この車両は、“顧客サービスの向上”“環境性能の向上”“更なる安全性・安定性の向上”を特長としており、JR東日本での今後の通勤車のスタンダードモデルである。2017年から量産車の生産が随時進められており、今後現行通勤車との置換が予定されている。

この車両に搭載されている三菱電機設計のAU737形空調装置は、2013年頃から本格的に開発を開始し、2014年末

に量産先行車向け空調装置の開発を完了した。この空調装置の特長は次のとおりである。

- (1) 主要部品の高性能化によって部品点数を削減
- (2) モジュール化によって組立て品質を向上
- (3) 定期保守での清掃性、メンテナンス性を向上
- (4) “状態監視”と“快適性制御”

メンテナンス性向上については、室内熱交換器洗浄、ドレンパン清掃及び送風機の軸受交換や羽根車清掃等でのメンテナンス性向上と状態監視強化に取り組んだ。



AU737形空調装置

**E235系車両用AU737形空調装置**

E235系車両用AU737形空調装置は、車両の屋根上に1両当たり1台搭載している。現行E231系、E233系用AU726A形空調装置と同等の外形サイズであるが、部品点数削減・メンテナンス性向上・状態監視強化など品質及び信頼性向上を図った空調装置を開発した。

## 1. まえがき

JR東日本では、次世代の新型通勤車としてE235系一般形直流電車量産先行車の営業運転を2015年から開始した。この車両は、“顧客のサービス向上”“環境性能の向上”“更なる安全性・安定性の向上”を特長としており、JR東日本での今後の通勤車のスタンダードモデルである。2017年から量産車の生産が随時進められており、今後現行通勤車との置換が予定されている。

この車両に搭載されている当社設計のAU737形空調装置(以下“AU737形”という。)は、2013年頃から本格的に開発を開始し、2014年末に量産先行車向け空調装置の開発を完了した。この空調装置の特長は次のとおりである。

- (1) 主要部品の高性能化によって部品点数を削減
- (2) モジュール化によって組立て品質を向上
- (3) 定期保守での清掃性、メンテナンス性を向上
- (4) “状態監視”と“快適性制御”

本稿では、この案件で開発した空調システム・空調装置・空調制御の特長について2章で述べる。また、量産先行車及び量産車で取り組んだメンテナンス性向上に着目し、現行E231、E233系向けAU726A形空調装置(以下“AU726A形”という。)からの改善点や新たな機能について3章で述べる。

## 2. E235系車両用空調システム

### 2.1 空調システム

E235系車両用空調システムの構成を図1、構成機器を表1に示す。空調装置は1両当たり1台車両屋根上に搭載され、空調接触器箱や空調制御装置は車両の天井裏に配置される。空調システムは、その他空調制御に使用するセンサ類やヒーター・ロールフィルタなどの空調制御対象機器で構成している。

### 2.2 AU737形

AU737形は電気ヒーター付き冷暖房用空調装置であり既存E231/E233系搭載のAU726A形をベースに開発した。車両屋根上に搭載された空調装置にはリターン口から車内の空気が吸い込まれ、室内熱交換器で熱交換を行い、冷やされた空気は車体ダクトを通り、車内に吹き出される。AU737形の特長を次の(1)~(4)で述べ、AU726A形との仕様の比較を表2に示す。

- (1) 主要部品の高性能化によって部品点数を削減

AU737形は基本的な電源仕様、冷暖房能力、外形寸法等はベースのAU726A形と同等であるが、圧縮機の大容量化や送風機の高静圧化など部品の高性能化によって主要機器点数を削減し、信頼性を向上させた。

- (2) モジュール化によって組立て品質を向上

交換可能な部品要素単位で組立てを行うモジュール設計を取り入れた。空調装置外でモジュールを組み立てることで組立て作業が容易になり、組立て品質が向上した。また、部品交換がモジュール単位で行えるため、容易にメンテナンス作業ができるようになった。

表1. E235系車両用空調システムの構成機器

No.	機器名称	員数	設置場所	備考
	空調装置	1	車両屋根上	AU737形
①	室内送風機	(1)	空調装置に内蔵	
	室外送風機	(1)		
	圧縮機	(2)		
	ヒーター	(1)		
	リターン温度センサ	(2)		
	外気温度センサ	(2)		
②	空調接触器箱	1	天井裏	SRB98形
③	空調制御装置	1	天井裏	HS156形
④	温湿度センサ箱	1	壁部	
⑤	座席下ヒーター	一式	座席下	
⑥	壁掛けヒーター	1	車椅子スペース	
⑦	ラインフローファン	6	天井部	
⑧	ロールフィルタ	2	天井部	

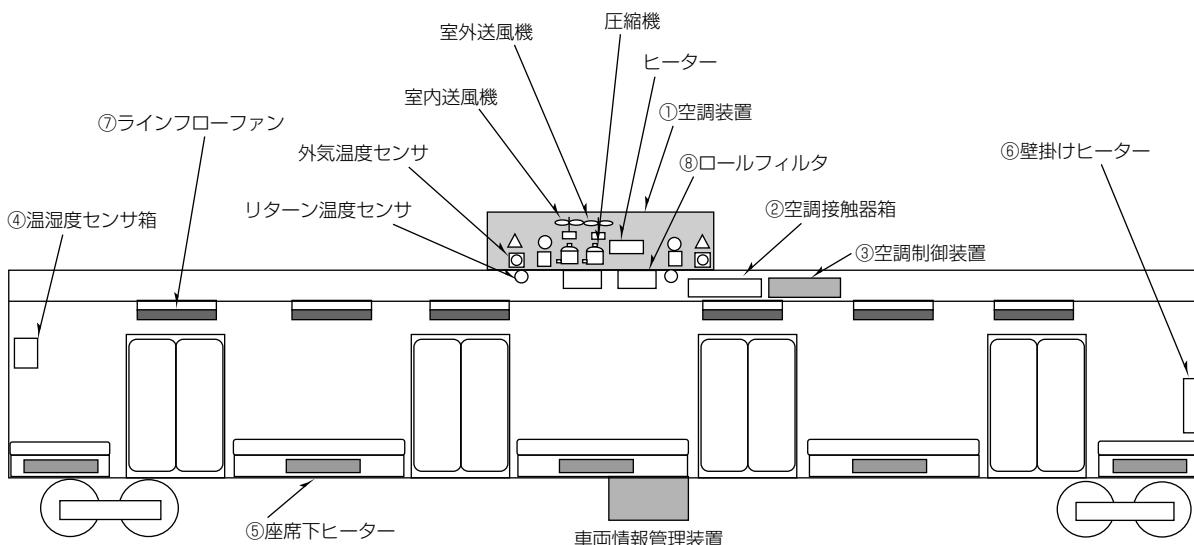


図1. E235系車両用空調システムの構成

表2. AU726A形とAU737形の仕様比較

空調装置形名	AU726A形	AU737形
電源	主回路	3相 440V 60Hz
	制御回路	単相 100V 60Hz
冷房能力		58.14kW
暖房能力(電気ヒーター)		6kW
循環風量		約120m <sup>3</sup> /min
		(新鮮外気量 26m <sup>3</sup> /min)
冷媒		R407C
外形寸法(L×W×H)	4,092.0×2,140.0×369.6 (mm)	4,092.0×2,140.0×376.0 (mm)
質量	約660kg	約670kg
機器構成	圧縮機	4台
	室内送風機	1台
	室外送風機	2台
	電気ヒーター	1台
	新鮮外気用 ダンバ	2台
センサ類	高/低圧力 センサ	4系統
	リターン温度 センサ	2個
	外気温度センサ	2個
	冷媒温度センサ	なし
		6個

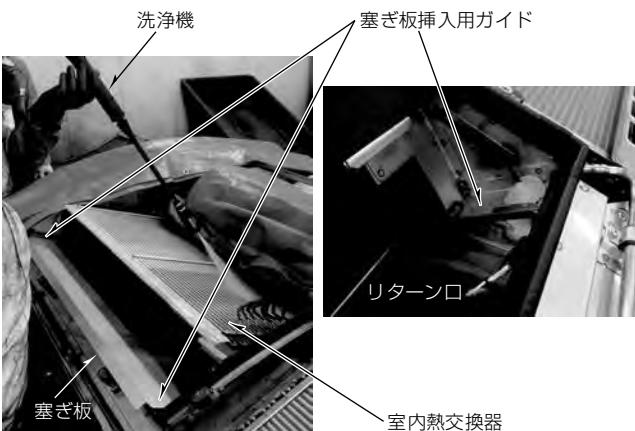


図2. リターン口養生塞ぎ板

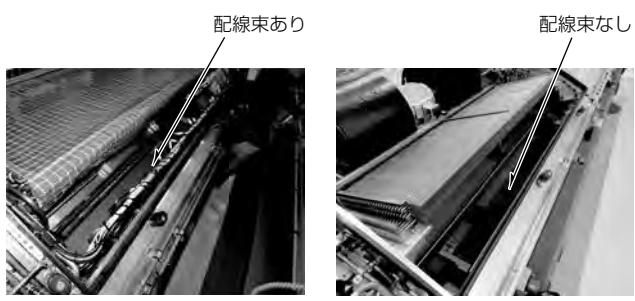


図3. リターン口配線束レス構造

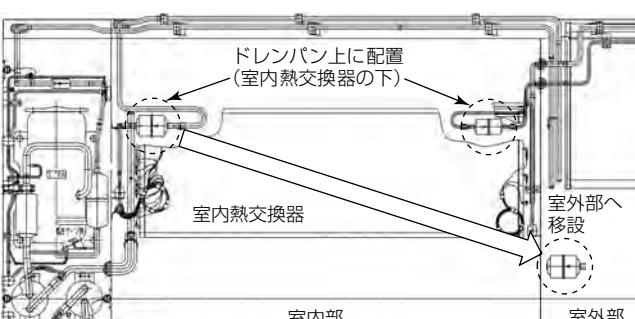


図4. ドライヤー配置変更

- (3) 電気ヒーターの形状を一部切り欠いて室内熱交換器下部の洗浄性を向上
- (4) その他配線ループ追加、コネクタ箱裏面へのパッキン追加、保護チューブ径拡大など追加改善を量産車から適用

### 3.2 ドレンパン清掃でのメンテナンス性向上

JR東日本では熱交換器の洗浄と同様に1年に1回のペースでドレンパンと呼ばれるドレン水(冷房運転時に発生する結露水)の受け皿を清掃している。AU737形では次のとおり清掃性を改善した。

- (1) AU726A形でドレンパン上に配置していたドライヤー4個の設置場所を室外部に移動して清掃性を向上(図4)

(3) 定期保守での清掃性、メンテナンス性を向上  
室内熱交換器洗浄、ドレンパン清掃及び送風機の軸受交換や羽根車清掃等の清掃性、メンテナンス性を向上させた。

### 4. 状態監視と快適制御

AU726形で既に設置していた圧力センサに加え、各種センサを追加し、状態監視を強化した。また、“ファジー制御”と“領域制御”的ハイブリッド制御を適用するなどして、車内快適性を向上させた。

### 2.3 空調制御

E235系で使用するHS156形空調制御装置は、新規開発の基板を採用しており、車両情報管理装置(INTEROS)との高速伝送方式に対応している。また、車内温度の安定性や外乱に対する応答性が高い“ファジー制御”と即応性の高い“領域制御”的ハイブリッド制御を適用するなど、機能向上の要素を多く取り込んでおり、その中でもJR東日本と共同で取り組んだ冷房運転制御は、車内快適性向上に寄与している。

## 3. メンテナンス性向上の取組み

AU737形でのメンテナンス性向上の取組み事例を次に述べる。

### 3.1 室内熱交換器洗浄でのメンテナンス性向上

JR東日本では1年に1回のペースで熱交換器を洗浄している。その多くは車両屋根上で行われるため、洗浄時の作業性改善は安全性及びメンテナンス時間削減に大きく寄与する。AU737形では次のとおり改善した。

- (1) リターン口養生塞ぎ板挿入用のガイドを具備(図2)
- (2) AU726A形でリターン口に配置された配線束を底板裏面に移行して養生作業を簡易化(図3)

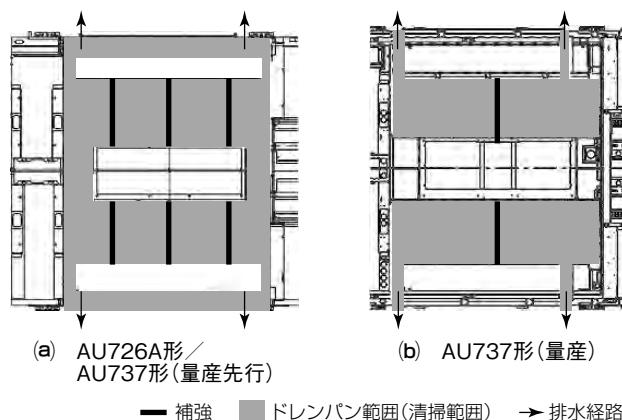


図5. ドレンパンの補強及びドレンパン範囲の削減

- (2) AU726A形/AU737形(量産先行)からAU737形(量産)ではドレンパン上の補強6本を2本に削減して清掃性を向上(リブ追加によってベコつき防止)(図5)
- (3) ドレン水の排水構造に排水管を採用してドレンパン清掃範囲を削減(図5)

### 3.3 送風機のメンテナンス性向上

JR東日本では指定保全時(4年に1回程度)に室内/外送風機を取り外し、軸受交換や羽根車清掃等のメンテナンスを行っている。E235系では、送風機を10年間メンテナンス不要にする要求があり、次のとおり設計に反映した。

- (1) 長寿命グリースを採用(フィールド試験で効果確認中)
- (2) 室内送風機材質にステンレスを採用(表3、図6)
- (3) 室外送風機台数を2台から1台に削減(メンテナンス部品削減)

### 3.4 状態監視強化

現在、各鉄道事業者で状態監視のニーズが高まっており、様々な取組みが行われている。JR東日本では、定期検査をベースにしたTBM(Time Based Maintenance)から状態監視をベースにしたCBM(Condition Based Maintenance)へと保守体系の見直しを推進している。状態監視強化他、E235系の空調システムとして新たに採用した機能は次のとおりである。なお、次の機能の一部は車両情報管理装置の仕様による。

表3. 室内送風機仕様比較

	従来仕様	新仕様(AU737形量産)
羽根車材質	鋼板(塗装)	ステンレス(無塗装)
ベース材質	ZAM <sup>(注1)</sup> 鋼板	ステンレス(無塗装)
ケーシング材質	ZAM鋼板	ステンレス(無塗装)
メンテナンス時間(割合) <sup>(注2)</sup>	100%	55%

(注1) ZAMは、日新製鋼(株)の登録商標である。

(注2) 当社実施の場合(メンテナンス作業内容:分解、ペアリング交換、洗浄、錆とり、再塗装、バランス調整、組立て、動作試験等)

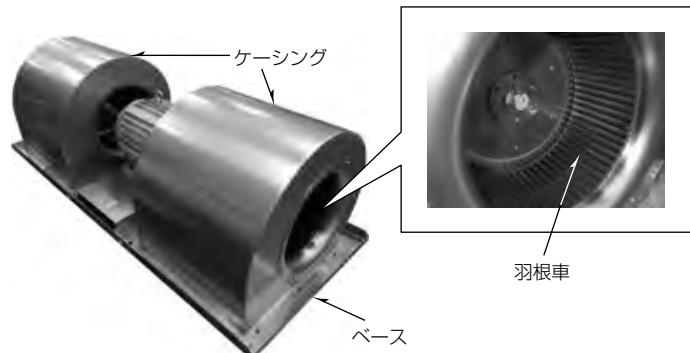


図6. 室内送風機(ステンレス)

- (1) AU726形で既に設置していた圧力センサに加え、各種センサを追加し、状態監視を強化。
- (2) 制御装置にメモリを設けて、通常稼働時及び故障発生前後のトレンドデータ(各機器稼働状況、車内温度等)を一定期間保存可能とし、トラブルシューティングに活用。
- (3) 編成一括でソフトウェアローディング可能なりモートローディング機能の採用によってローディング作業を省人化。

### 4. む す び

E235系車両用空調装置AU737形について、主要部品の高性能化による部品点数削減とモジュール化による組立品質向上について述べるとともに、空調システムとして実施したメンテナンス性向上策を具体的な例を示しながら述べた。また、新たな機能として状態監視強化についても述べた。

今後、この開発で培った技術及びメンテナンス性向上の考え方を他の空調装置及び空調システムへの展開を図り、長く愛用される製品づくりに取り組んでいく。

# 三次元モデルARを用いた保守点検作業支援技術

相川勇之\* 塚原 整\*  
川浦健央\*  
岡登洋平\*\*

Maintenance and Inspection Support Technologies Using 3D-model Augmented Reality

Takeyuki Aikawa, Takeo Kawaura, Youhei Okato, Osamu Tsukahara

## 要 旨

保守点検の現場では作業員の高齢化が進み、人手不足や技能伝承などが問題となっている。そこで、点検手順等をタブレットパソコンやスマートグラス上に拡張現実(Augmented Reality: AR)表示する作業支援システムの実用化が進んでいる。しかし、従来システムには、AR表示の精度向上、点検結果の記録作業の効率化、点検手順データベース構築の簡易化などの課題があった。

これらの課題に対し、三菱電機では次のような特長を持つ保守点検作業支援技術を開発した。

### (1) 三次元モデルAR

点検対象機器の三次元モデルを用いてAR表示の位置を計算する三次元モデルARによって、写真データを用いる

従来方式と異なり、点検対象との距離や角度にかかわらず正確な位置にAR表示できる。

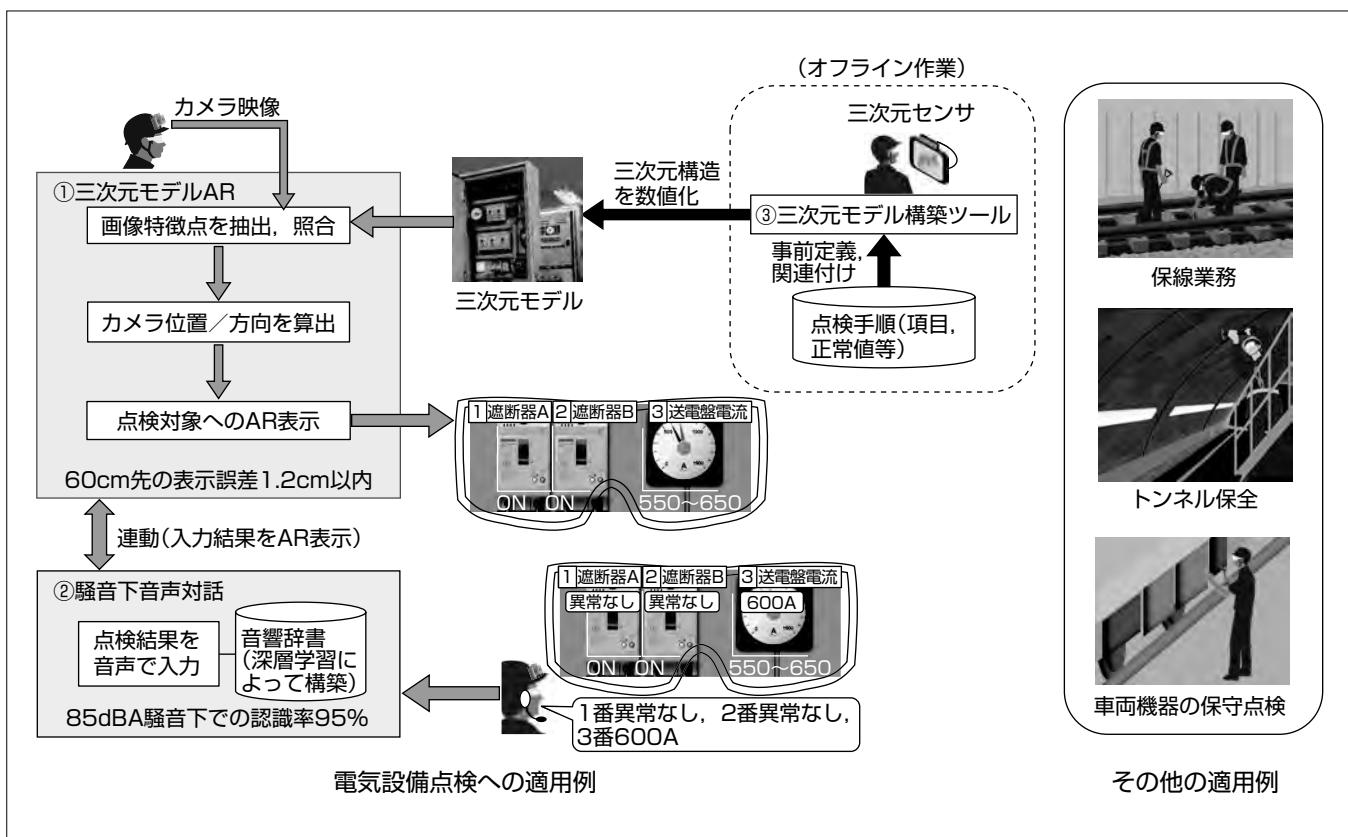
### (2) 騒音下音声対話

非定常騒音下であっても音声区間を正しく検出し、多様な騒音を考慮した深層学習に基づいて構築した音響辞書を用いる騒音下音声対話によって、現場の高騒音下でもAR表示と連動した音声対話で点検結果を正確に入力できる。

### (3) 三次元モデル構築ツール

三次元モデル構築ツールによって、点検対象の撮影、点検手順との関連付けなどの事前準備が容易になる。

今後はこれらの技術の実用化を進め、地上設備や車両機器などの保守点検作業への適用を目指す。



## 三次元モデルARを用いた保守点検作業支援技術の適用例

三次元モデルAR(図中の①)では、事前に構築した点検対象機器の三次元モデルとの照合によって点検対象との距離や角度にかかわらず正確な位置にAR表示できる。また、騒音下音声対話(図中の②)では、深層学習に基づき構築した音響辞書を用いることで、現場の高騒音下でもAR表示と連動した音声対話で点検結果を正確に入力できる。さらに、三次元モデル構築ツール(図中の③)によって、点検対象の撮影、点検手順との関連付けなどの事前準備が容易になる。

## 1. まえがき

保守点検の現場では作業員の高齢化が進み、人手不足や技能伝承などが問題となっている。そこで、点検手順等をタブレットパソコンやスマートグラス上にAR表示する作業支援システムの実用化が進んでいる。しかし、従来のシステムは写真データなどの二次元画像をもとにAR表示する方式であるため、大規模な施設の点検に対しては大量の写真データが必要という問題があった。また、両手が自由な状態で点検結果を記録できる音声入力も期待されているが、入力結果を確認する手順の効率化や現場の騒音下での認識精度向上などに課題があった。

そこで当社は今回、作業員と点検対象の相対的な位置関係によらず正確な位置にAR表示できる三次元モデルARと、現場の騒音下でもAR表示と連動した音声対話によって点検結果を漏れなく正確に入力できる騒音下音声対話技術に基づく“三次元モデルARを用いた保守点検作業支援技術”を開発した。

本稿では、開発した三次元モデルAR、騒音下音声対話技術、及び三次元モデル構築ツールについて述べる。

## 2. 三次元モデルAR

### 2.1 従来のAR表示方式

AR表示とは、作業員が必要とするアノテーション情報(以下“アノテーション”という。)を現実の物体に重ね合わせて表示することによって、対象物の内容や位置などを分かりやすく表示する技術である。ARは、技術的な特性から、大きくロケーションベースARとビジョンベースARの二つに、またビジョンベースARはマーカ型とマーカレス型の二つに分類される(表1)<sup>(1)</sup>。当社では、屋外や商業施設内などのマーカ設置困難な場所へも適用可能とするため、マーカレス型ARを開発している。作業員が装着したスマートグラスのカメラ(以下“カメラ”という。)の位置及び姿勢(以下“自己位置”という。)を推定し、対象物との相対的な位置関係を求める必要があることは全てのAR表示方式に共通している。

### 2.2 提案方式

従来のビジョンベースARは、マーカ又は写真データ等の二次元画像をユーザーが装着したカメラで認識し、自己位置と対象物の相対的な位置関係を推定してAR表示しているため、機器が前後に並んでいた場合等に、後ろの機器との相対的な位置関係を推定できない。

当社は、この課題を解決するため、対象物の三次元モデルとカメラで撮影した二次元画像の照合によって自己位置

表1. AR表示方式の分類

方式	特徴	課題
ロケーションベースAR	GPS(Global Positioning System)、ジャイロ、コンパス等を組み合わせ、カメラの自己位置を推定	位置推定の精度向上が困難
ビジョンベースAR	マーカ型 特定の図形(マーカ)を認識することで、カメラの自己位置を推定	点検対象へのマーカ設置が必要
	マーカレス型 マーカの代わりに写真データなどと照合することで、カメラの自己位置を推定	光の当たり方など、環境によっては精度が劣化

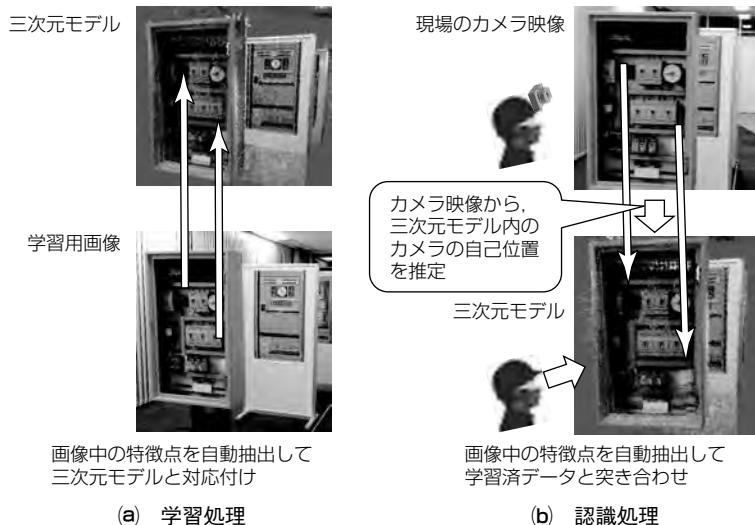


図1. 三次元モデルARの原理

を推定する方式を提案した<sup>(2)</sup>。

この方式では、事前の学習処理によって点検対象の三次元モデルを構築する。その際、学習用画像から特徴点を自動抽出し、構築した三次元モデルと対応付けて格納する(図1(a))。学習用処理で使用する三次元モデル構築ツールについては4章で述べる。

実際の点検作業時には、カメラで撮影した二次元画像から特徴点を抽出し、事前に学習した三次元モデル上の特徴点と照合して自己位置を推定する(図1(b))。

さらに、自己位置と対象物の三次元モデル上に配置したアノテーションの相対的な位置関係を推定してスマートグラス上に投影変換を行ってアノテーションをAR表示する。

二次元画像の代わりに三次元モデルを用いて自己位置を推定するので、点検対象との機器が前後に並んでいた場合でも正確にAR表示できる。点検対象との距離が60cmの場合の表示誤差を従来方式と比較すると、相対的な位置関係に依存せずAR表示の誤差を4.0cmから1.2cmに低減できる。

## 3. 騒音下音声対話技術

### 3.1 高騒音下音声認識

保守点検の作業現場は、周囲の機械が発生する騒音や、点検対象そのものが発する騒音など、騒音が大きい環境で

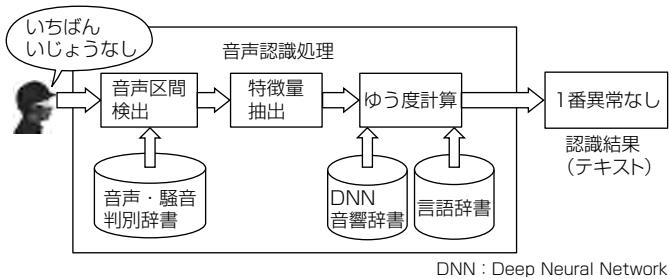


図2. 高騒音下音声認識処理

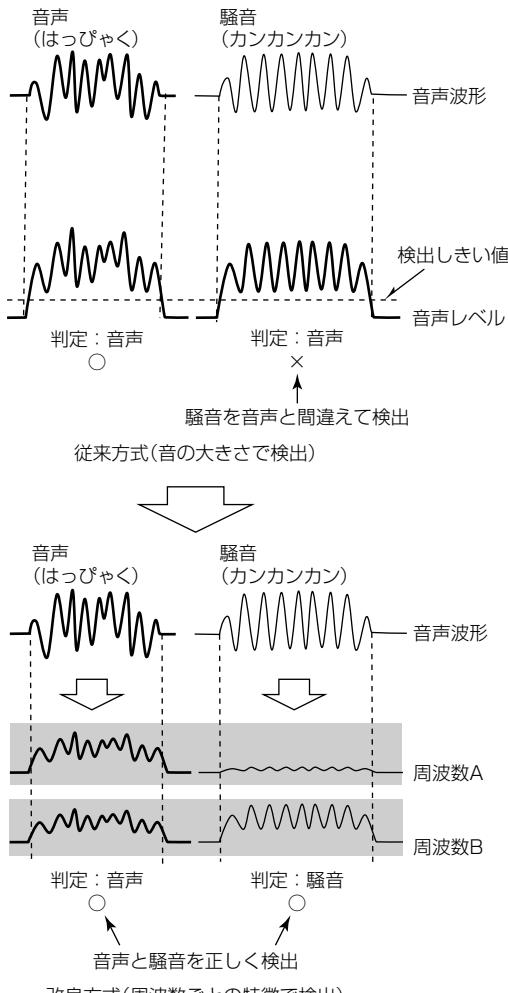


図3 騒音らしさを考慮した章音区間検出処理

あることが多い。そこで、現場の騒音下での使用に耐える高い認識精度を実現するための高騒音下音声認識技術を開発した(図2)。

まず、騒音と音声の特徴を周波数ごとに捉えて音声区間を検出することによって、従来は誤って音声として検出していた部分を正しく騒音と判定できるようにした(図3)<sup>(3)</sup>。これによって、非定常騒音下であっても音声区間を正しく検出できる。さらに、多様な騒音を考慮した深層学習に基づく音響辞書を構築し、基本的な認識性能を向上させた。これらの改良によって、85dBAの騒音下で数字の認識率95%以上という実用的な性能が得られた。

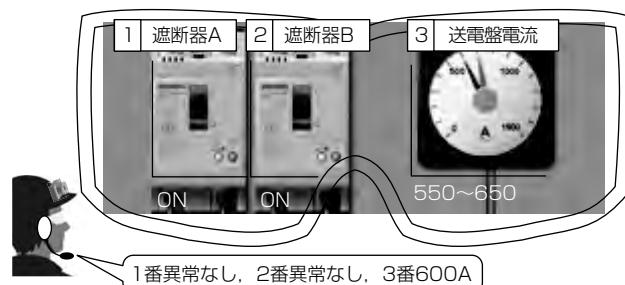


図4. 音声認識とAR表示との連動処理

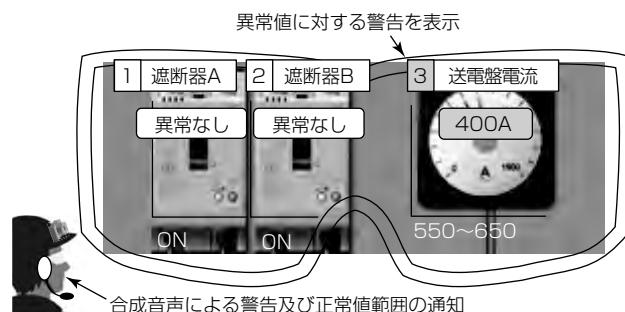


図5. 異常値入力時の応答

### 3.2 AR表示との連動

3. 1節では音声認識精度の向上について述べたが、認識率は100%ではないため、発声どおり正しく入力できたかどうかの確認が必要である。当社では、入力結果を合成音声によって作業者に音で伝えるとともに、スマートグラス上にもAR表示することで、より確実な入力を可能にしている(図4)。

また、異常値が入力された場合には、図5のように警告を表示し、作業員に再入力を促す。これらの対話手順は、4章で述べる三次元モデル構築時に点検手順データベースから自動生成する。

#### 4. 三次元モデル構築ツール

点検対象の撮影、点検手順との関連付けなどの事前準備を容易にするために三次元モデル構築ツールを開発した(図6)。

このツールによって、タブレットパソコンに接続した三次元センサで撮影するだけで、点検対象の三次元座標を数

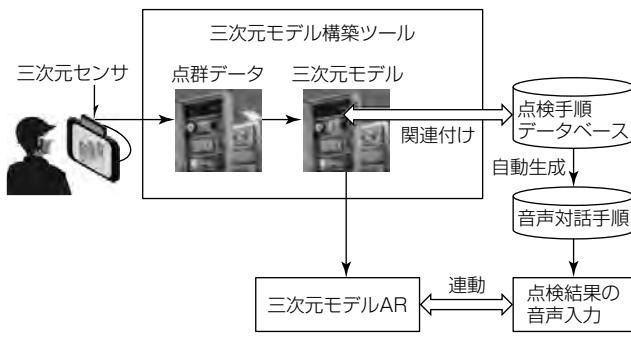


図6. 三次元モデル構築処理の流れ

点検対象 項目名	表示ページ	詳細項目名	項目 番号	入力値 種類	単位	入力値域	正常値
第1電源盤	ページ1	遮断器A	1	選択肢		ON/OFF	ON
		遮断器B	2	選択肢		ON/OFF	ON
		送電盤電源	3	数値	V	0/800	15/25

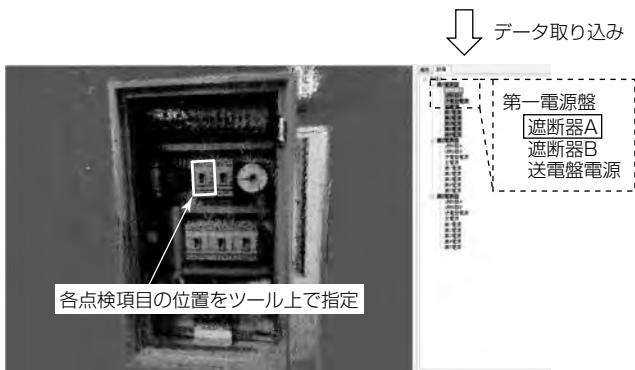


図7. モデル構築ツールの画面例

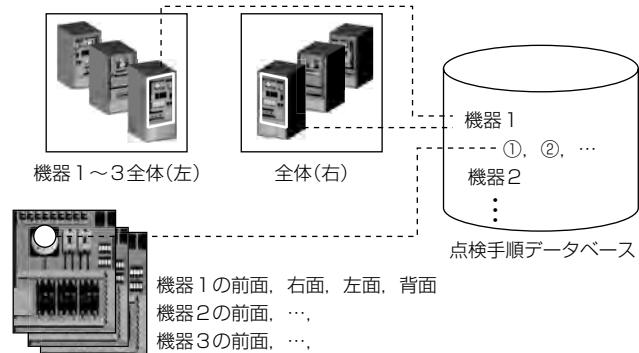
値化した点群データを簡単に構築できる<sup>(4)</sup>。また、同ツール上で点検対象の点群データと点検手順との関連付けを指定する(図7)。

マーカ又は写真データ等の二次元画像をもとにAR表示する従来方式では、多数の点検対象がある大規模な設備では、各点検対象に対してAR表示すべき点検手順を関連付けた大量の二次元画像を準備する必要があった。しかし、提案方式ではこのツールによって、点検対象の点群データと点検手順との関連付けを一括で構築できるという利点がある(図8)。

## 5. む す び

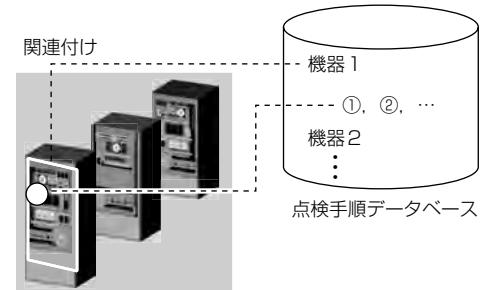
点検対象との距離や角度にかかわらず正確な位置にAR表示できる三次元モデルARと、現場の騒音下でもAR表示と連動した音声対話によって点検結果を漏れなく正確に入力できる騒音下音声対話技術に基づく三次元モデルAR

[大量の写真に対して個別に関連付け]



従来: 二次元画像を用いたAR

[三次元モデルに対し一括で関連付け]



今回: 三次元モデルAR

図8. 三次元モデル構築ツールの利点

を用いた保守点検作業支援技術について述べた。

今後はこれらの技術の実用化を進め、地上設備や車両機器などの保守点検作業への適用を目指す。

## 参 考 文 献

- (1) 蔵田武志, ほか:「実世界と仮想世界」を繋ぎ「人と人」を結ぶ拡張現実インタラクション, ウエアラブルコンピューティング研究会研究報告, 1, No.2, 34~39 (2005)
- (2) 三次元モデルを用いた拡張現実技術, 三菱電機技報, 90, No.1, 4 (2016)
- (3) 花沢利行, ほか: ボトルネック特徴量を用いた尤度補正によるニューラルネット音声区間検出の頑健性改善, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-14-7 (2018)
- (4) Taguchi, Y., et al.: Point-Plane SLAM for Hand-Held 3D Sensors, ICRA (2013)

# 旅客サービスソリューション

全ての人が、安全に、快適に利用できる鉄道の実現に向けて、三菱電機は旅客一人一人に適応したサービスの向上に取り組んでいる。

また、列車と駅が連携し、さらに将来は他の交通機関ともつながり、旅客が目的地までシームレスに、安心して移動できる輸送サービスを目指し、研究・開発に取り組む。



旅客への列車案内表示

## 情報提供サービス の向上

多様化するニーズに合った情報提供

ユニバーサルデザインによる視認性向上

地上と車上の情報連携でサービス向上

## トレインビジョン (本誌 p40)

情報提供力が高い“トレインビジョン”は、より多様な旅客のニーズに応えるため、見やすさや情報量の向上が求められている。

この章では、三菱電機の最新のトレインビジョンについて紹介する。



旅客への情報提供サービス

ホームドア



ホームでの安全確保

監視カメラシステム



カメラによる旅客の見守り

## 安全性 の向上

旅客へのセキュリティサポート充実

乗務員と駅員が連携したサポート

ホームでの旅客の安全確保

## 将来の交通システム (本誌 p36)

全ての人が安全に、安心して利用できる駅であるために、駅構内のバリアフリー化や旅客サポート向上は重要なテーマである。

この章では、三菱電機が考える将来の交通システムのコンセプトについて紹介する。



バリアフリーでスムーズな移動

車両空調システム



快適な車内空間の提供

## 快適空間の提供 の向上

バリアフリーでスムーズな旅客の移動

快適な空気調和

人流改善による混雑解消

# 将来の駅・車両の円滑で快適な交通システムのコンセプト提案

泉福 剛\*  
齊川義則\*  
木津久貴\*

Conceptual Solutions of Advanced Transportation System for More Convenient and Comfortable Rail Stations and Train Cars  
Tsuyoshi Sempuku, Yoshinori Saikawa, Hisataka Kizu

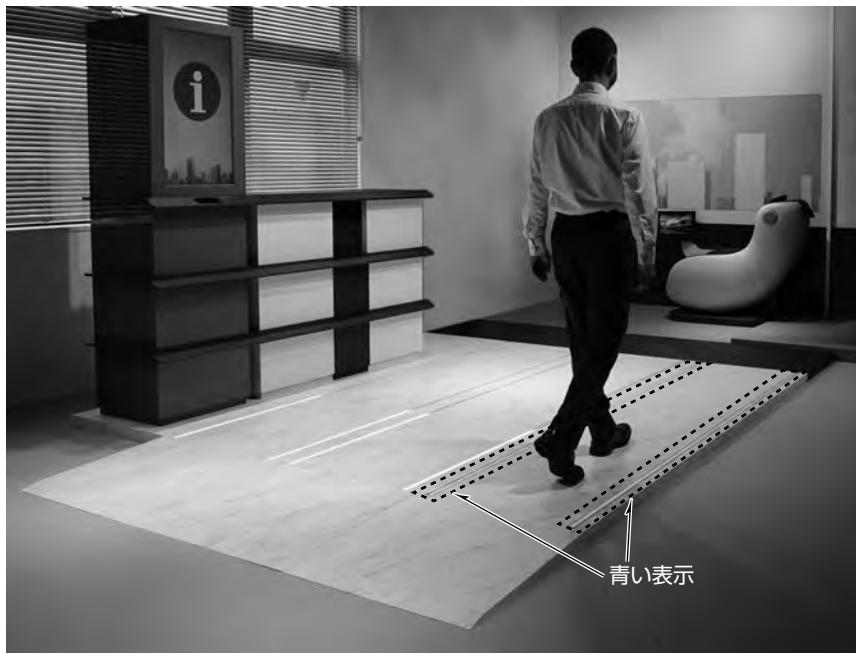
## 要 旨

誰もが快適に移動できるシームレスな交通社会の実現が期待されている。駅は様々な交通手段をつなぐ接点となり、鉄道の車両は多くの利用者を運び、それらはシームレスな交通社会で重要な役割を果たす。しかし現状は、多くの課題が存在していると考えられる。自動改札は円滑な入退場を実現しているが、手荷物を持った人や、車椅子やベビーカー利用者には、ICカードをかざすことや狭いゲートを通り抜ける点に負担もある。また、介助が必要な人への支援や、車内での多様なニーズに対応することも求められている。

そこで、将来の駅や車両で、円滑で快適な移動を実現する交通システムのコンセプトの構築に取り組んだ。一つ目

は、ゲートのない平坦(へいたん)な改札である。通過するだけで認証できる通信技術を活用し、ICカードをかざす操作をなくした。また、通過しやすいよう平坦にし、床面のLEDで認証結果を通知する。二つ目は、駅員向け駅舎内見守り支援ツールである。介助が必要な人や改札の不正通過者など、確認すべき人物の居場所を姿とともに駅員に通知する。三つ目は、ICカード情報を活用した車内サービス提供ツールである。降車駅で鳴動する目覚ましなど、一人一人に合わせたサービスを提供する。

今後は、このコンセプトの実現に向け技術開発を進め、シームレスな交通社会の実現に貢献していく。



ゲートのない平坦な改札



駅員向け駅舎内見守り支援ツール



車内サービス提供ツール

## 将来の駅・車両での交通システムのコンセプトプロトタイプ

ゲートのない平坦な改札では、白い床面が改札エリアとなる。プロトタイプでは三つのレーンを設置した。床面の青い表示(点線部)は“通行可能”の認証結果を通知している。駅員向け駅舎内見守り支援ツールでは、駅員が使用するタブレット端末上に車椅子利用者の姿と居場所(駅舎地図上の青い丸マーク)等を表示する。車内サービス提供ツールでは、車両内の座席に設置したモニタ上にICカードから取得した情報を応じて通過する駅を表示し、利用者は降車する駅を選択する。

## 1. まえがき

世界中の多くの国や地域で、人口変化や設備等の老朽化など、様々な要因によって新たな街づくりが進められている。それらの街づくりでは、誰もが快適に移動できるシームレスな交通の実現が期待されている。移動に不自由を感じている様々な人を考慮すると、従来以上に一人一人に寄り添った配慮が必要になると考えられる。

そのシームレスな交通社会で、鉄道は重要な役割を果たしている。駅は様々な交通手段をつなぐ接点となり、鉄道の車両は多くの利用者を運んでくれる。しかし、様々な利用シーンを想定すると、鉄道利用者の一連の移動には多くの課題が存在していると考えられる。そこで、鉄道に着目し、円滑で快適な移動を実現する交通システムのコンセプトの構築に取り組むことにした。

## 2. 円滑で快適な交通システムのコンセプト

### 2.1 ゲートのない平坦な改札

従来の自動改札は円滑な入退場を実現しているが、手荷物を持った人や、車椅子やベビーカー利用者には、ICカードをかざすことや狭いゲートを通り抜ける点に負担もある。より多くの人が快適に利用できるようにする観点で、将来の改札のコンセプトを検討した。図1はそのコンセプトを体感・検証するために製作したプロトタイプである。

#### 2.1.1 ICカードをかざさない操作

カードホルダ(図2)に、通過するだけで認証できる通信機能を搭載することで、ICカードをかざす操作をなくした。

カードホルダに従来の交通ICカードを差し込むと、カードホルダ内のカード情報読み取り部がICカードの情報を読み取り、その情報をカードホルダ内の通信部が発信する。床面には、通信部からの情報を受け取る受信部が備えられ、利用者がカードホルダを携帯して通過すると、認証が行われるよう構成している。

これによって、手を怪我している人、傘や大きな手荷物を持った人、上肢に不自由を抱えている人など、様々な人の利便性を向上させることができると期待できる。

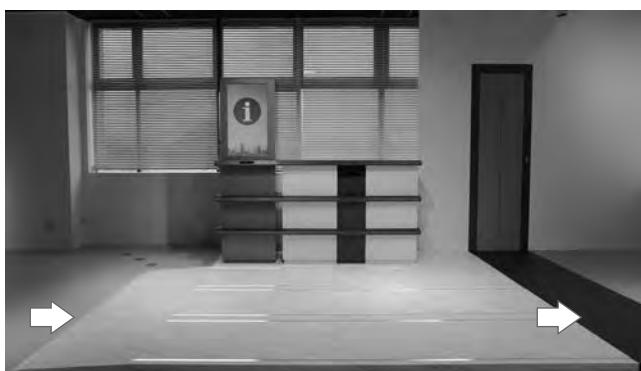


図1. ゲートのない平坦な改札のプロトタイプ

### 2.1.2 ゲートのない平坦な構造

図1のように、不正者などの進入を抑制するフラッパー やゲートそのものをなくし、平坦な改札としている。

これによって、ベビーカーや車椅子の利用者だけでなく、将来的に普及が期待される自走式のパーソナルモビリティや駅舎内を巡回する業務ロボットなど、多くの通行を容易にすることができます。

### 2.1.3 認証結果の表示方法

床面に埋め込んだLEDで利用者が通行するレーンを示すとともに、LEDのアニメーションによって、進行方向や認証結果を表示している。

通行前は、白色のアニメーションで進む方向を誘導する。通行時は、認証結果に応じて青色や赤色で結果を表示するようにした(図3)。



図2. カードホルダ

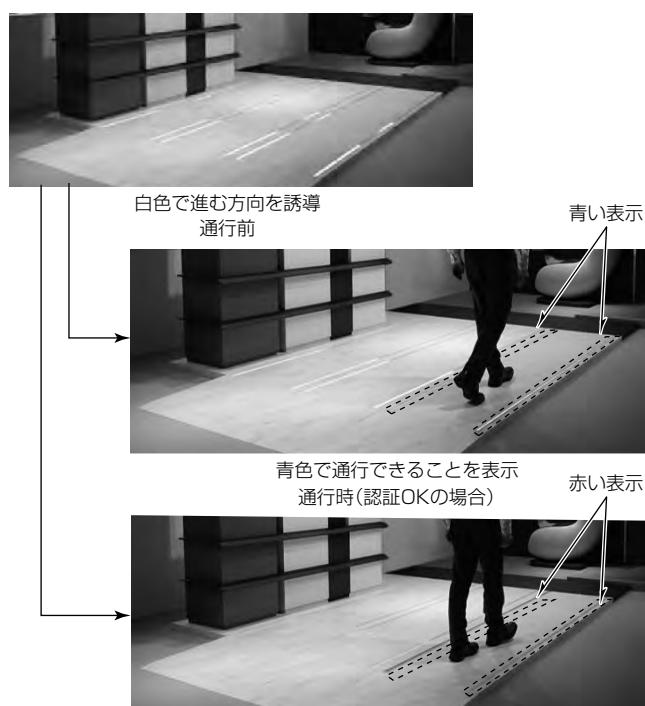


図3. 床面LEDの表示

これらによって、利用者が状況を把握しやすくなるとともに、床面のレーンによるガイドによって、混雑時の円滑な移動を図っている。また、不正者に対しては、床面の赤いLED表示の警告によって、周囲の利用者の目を抑止力として活用、不正の防止を狙っている。

## 2.2 駅員向け駅舎内見守り支援ツール

2.1節で述べた“ゲートのない平坦な改札”は、多くの利用者の利便性向上が期待できる。しかし、従来の改札ゲートと比較すると、不正者などの進入を抑制する効果は薄い。また、近年は事業者による交通弱者への介助対応も増加している。

これらのことから、駅舎内の安全性を高める業務を容易にするため、駅員向け駅舎内見守り支援ツールを考案した。図4はそのコンセプトを体感・検証するために製作したプロトタイプで、駅員が持つ業務用の携帯タブレットで使用する想定となっている。

### 2.2.1 利用者の追跡と確認すべき人物の強調表示

図4に示すように、画面上部の追跡表示エリアに駅構内の地図を表示し、その地図上に駅構内にいる利用者の位置を追跡して表示している。また、駅構内だけでなく、間もなく駅に到着する車両にいる利用者も表示可能にしている。これらは、駅構内や車両内に設置した監視カメラなどによって位置を追跡する技術で実現する。

そして、安全面で確認すべき人物(介助が必要な車椅子利用者や視覚障がい者、不正入場したおそれのある人物など)には、赤や青の丸いマークによって強調表示する機能を設けた。そのマークを駅員が押下すると、その人物の容姿が画面下部に表示される。これは改札通過時に監視カメラで撮影し、介助の要否は、白杖(はくじょう)や車椅子の形態を認識するAI(Artificial Intelligence)技術を用いて判定する。そして、安全面で確認すべき人物と判定された場合には、その人物の容姿を表示するために撮影画像を利用する。

これらによって、駅員は確認すべき人物を特定することが容易となる。およその位置と容姿が分かるため、駅員が現場に駆けつけた際にも発見が容易となる。

### 2.2.2 駅員の情報共有支援

図4に示すように、画面右下のコミュニケーションエリアで介助活動などの業務状況を駅員間で共有し、重複対応などを回避する機能を設けた。画面下部の“確認にいく”というボタンを駅員が押下すると、他の駅員に介助に向かったことが通知される。

これによって、駅員が状況を容易に共有することができるので、重複対応をなくし、必要に応じて応援を頼むこともできるので、効率的な業務が期待できる。

## 2.3 車内サービス提供ツール

車内でも、誰もが快適に移動できるように、一人一人に

寄り添ったサービスが求められる。そこで、“ゲートのない平坦な改札”で利用した認証技術を活用し、車両のシートに座るとICカードの情報を読み取り、その人に合わせたサービスを提供することにした。図5は、そのコンセプトを体感・検証するために製作したプロトタイプである。カードホルダの通信部からICカードの情報を受け取る受信部は、シートの足下に設置している。そして、座席に備えたモニタで、利用者に合わせた様々なサービスを提供している。

### 2.3.1 目覚まし機能

利用者がシートに座ると、ICカード情報(定期区間等)が取得される。その情報に基づき、利用者が通過する駅を並べて表示する(図6)。利用者は降車する駅を選択するだけで目覚ましを設定することができる。降車駅の到着になると、シートの振動やアラーム音によって利用者を起こしている。



図4. プロトタイプの表示画面



図5. 車内サービス提供ツールのプロトタイプ



図6. 目覚まし機能の表示画面



図7. 車内販売サービス機能の表示画面

してくれる。さらに、車両の制御を行う列車統合管理システムと連携することで、仮に列車の遅延が発生しても、早めに起こされることなく、設定した駅の到着前に確実に起こしてくれる。

これらによって、列車の到着時刻を調べた上で時刻を入力するという手間がなくなり、容易に目覚ましを設定することが可能になる。また、遅延発生時でも継続的に眠ることができるので、快適な睡眠を提供できる。

### 2.3.2 車内販売サービス機能

先に述べた“目覚まし機能”と同様に、利用者のICカード情報に基づき、利用者を特定する。そして、購入頻度の高い商品などを、推奨メニューボタン(いつものボタン)として画面内に大きく提示する(図7)。そのボタンを押下すると、よく購入している商品が表示される。複数の商品をよく購入している場合には、例えば、ビールとナッツなどの組合せで表示される。利用者が購入を確定する操作をすると、“ゲートのない平坦な改札”で利用した認証技術を活用し、座ったままで課金が行われる。さらに、画面右上には、商品を運ぶカートの位置を示すようにした。

これらによって、利用者はいつも購入する商品を容易に選ぶことができる。また、支払いも座ったままで済ませることができ、利便性の高い販売サービスが可能になる。さらに、カートの位置が分かるため、利用者の不安や不満を軽減することができる。

### 2.3.3 動画の視聴機能

この機能も利用者のICカード情報に基づき、利用者の乗車時間を推定する。そして、乗車時間内に見終わる動画だけを選定して表示する(図8)。例えば、40分乗車する利用者には、長さが40分以内の動画だけが提示される。また、動画視聴中に遅延等が発生すると、画面を分割して動画とともに運行情報を合わせて表示する。



図8. 動画の視聴機能の表示画面

これによって、動画を楽しんでいる途中で降車しなければならないといった事態を回避できる。また、遅延などが発生したら、手軽に状況を確認でき、利便性の向上が期待できる。

## 3. むすび

このコンセプトは、2017年11月に広報発表を行うとともに、第5回鉄道技術展に出演した。その中で、多くの来場者からの期待を確認できた。今後は、それぞれのコンセプトの検証を進め、コンセプトの課題抽出と改善を進める。また、実現に向けた技術開発を合わせて推進していく。

そして、今回の取組みは、改札、駅舎内の安全確認、車両の座席に注力したが、利用者の一連の移動を考えれば、他にも見直すべきことが残されている。引き続きコンセプトの拡充を進めていく。

これらを推進し、誰もが快適に移動できるシームレスな交通社会の実現に向け、一人一人に寄り添ったサービスを多くの人に提供し、社会に貢献していく。

# 鉄道車両向けデジタルサイネージの最新動向

稻葉行俊\*

Latest Trend of Digital Signage for Train Cars

Yukitoshi Inaba

## 要 旨

三菱電機の“トレインビジョン”は、客室に設置したLCD(Liquid Crystal Display)表示器に運行に関する情報や広告等を表示する鉄道車両向けデジタルサイネージとして、2002年から首都圏を中心に、全国の鉄道事業者で広く導入されてきた。

トレインビジョンは、現在までに第1世代から第4世代へと進化してきた。第1世代はRF(Radio Frequency)信号とVGA(Video Graphics Array)を使用したアナログ映像システムで、第2世代は車両間のメタル線にイーサネット<sup>(注1)</sup>を使用することによって実現したデジタル映像システムである。第3世代は第2世代をベースとし、広告表示は地上デジタル放送に合わせてハイビジョンに対応した。第4世代は行き先案内の2画面一体表示、広告の多画面一

体表示など多様な構成が可能になっている。

これまでの鉄道車両向けデジタルサイネージは、鉄道車両のドアの上に設置するのが一般的であったが、当社はトレインビジョンの新製品として、ドアの横に設置可能な新型表示器の提供を開始した。この新型表示器は、東京地下鉄株(以下“東京メトロ”という。)銀座線1000系特別仕様車に初めて導入され、2017年12月から運用されている。鉄道車両のドア横にデジタルサイネージ(電子広告)が設置されるのは日本で初めて<sup>(注2)</sup>であり、大型のデジタルサイネージを乗客の注目率が高い場所に設置することによって、広告価値の向上が期待される。

(注1) イーサネットは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。

(注2) 2017年11月21日現在、当社調べ



## ドア横デジタルサイネージの設置イメージ

ポスターサイズ(B3サイズ相当)で薄型の大画面表示器を開発したことによって、広告到達率の高いドア横部への表示器の設置を実現した。ドア上のトレインビジョンは、左が広告用表示器、右が行き先表示用2画面一体表示器である。

## 1. まえがき

トレインビジョンは、導入数の増加に伴い広告価値が向上し、デジタルサイネージ(電子広告)の成功例として広く認知されている。新型表示器は、ドア横にも設置可能な薄さを実現した。

本稿では、トレインビジョン新型表示器の特長、導入事例、新たな広告の表現方法について述べる。

## 2. トレインビジョン新型表示器の特長

トレインビジョンは、ドア上に行き先用と広告用の表示器を2台設置するのが、一般的な設置構成となっている(図1)。2台を並べて設置することによって、駅名や行き先を確認する際に自然と広告が目に入ることや、1週間以上同じ広告を繰り返し表示して接触機会を増やすことによって、多くの広告で広告到達率が高くなっている。広告到達率とは広告を見た人の割合であり、鉄道車両広告の中でドア横ポスターが最も広告到達率の高い媒体である。

新型表示器は、この広告到達率の高いドア横ポスターをデジタルサイネージ化することによって、広告価値の更なる向上を目的としている。

### 2.1 外形と設置方法

表示器のサイズは、ドア横ポスターサイズ(B3)と同サイズに設計している。多くの場合、表示器は壁の内部に設置されるが、ドア横の壁内にはドアを開く際にドアが収納されるため、表示器の設置スペースは制限される。そのため壁面に取り付けても車内に突出しにくいように、表示器の厚さは30mm以下としている。

さらに、ドア横は配線スペースにも余裕がないため、最短経路で表示器に配線する必要がある。そのため、新型表示器では上下を180°回転させて設置することを可能にしている。

また、混雑時の乗客の荷重や、かばんなどの突起物での圧迫によって表示器が割れないように十分な強度を確保している。

### 2.2 新型表示器の仕様と表示仕様

新型表示器の仕様を表1に示す。

LCDパネルは、フルハイビジョン(1920×1080ピクセル)、高視野角、高輝度タイプを採用している。これによって、視認性が高く高精細で多彩な情報が提供可能である。

MPEG(Moving Picture Experts Group) 2, H.264, WMV(Windows Media Video), JPEG(Joint Photographic Experts Group), BMP(Basic Multilingual Plane)などマルチフォーマットに対応しており、駅構内のデジタルサイネージなどに使用している広告データをそのまま使用できる。

全ての表示器に記憶デバイスを搭載しているため、全表



図1. ドア上表示器の設置イメージ

表1. 新型表示器の仕様

画面サイズ	B3サイズ相当
解像度	1920×1080ピクセル
バックライト	LED(交換可能)
視野角	高視野角対応
フォーマット	MPEG2, H.264, WMV, JPEG, BMPなど

示器で異なる広告を表示可能である。例えば、ドア上とドア横で異なる広告を表示することができる。

### 2.3 メンテナンス

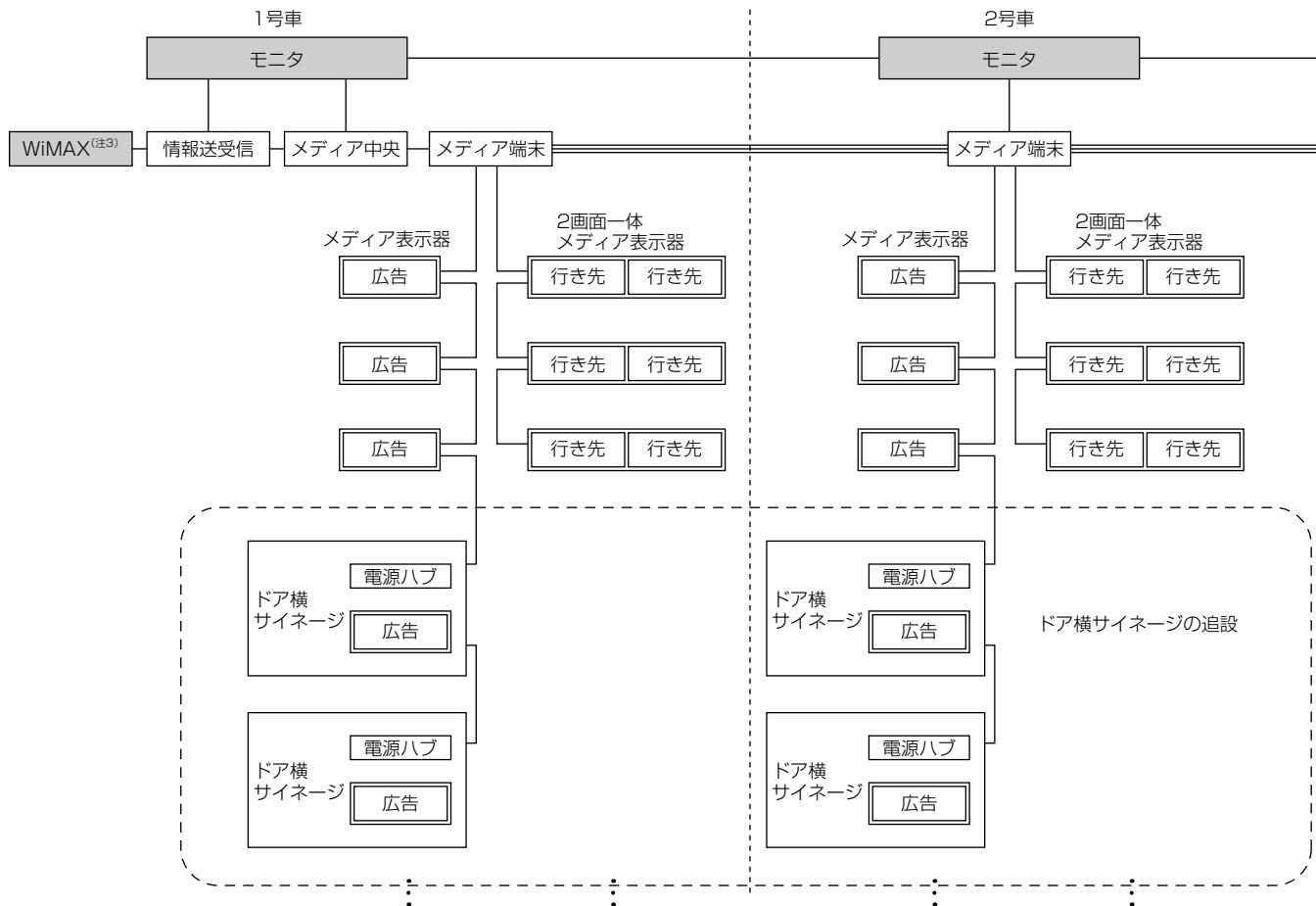
表示器を構成する部品のうち、最も寿命の短い部品はバックライトである。新型表示器では、LCDパネルの高精細化とコントラスト制御によって、バックライトの明るさを下げても見やすい表示を可能にし、長寿命化を実現している。さらに、バックライトと電源を交換することによって、システムをより長期間維持することを可能にしている。

## 3. ドア横サイネージの導入事例

### 3.1 システム構成

第4世代トレインビジョンでは、先頭の1車両に送受信装置及びメディア中央装置を設置し、全ての車両にメディア端末装置、メディア表示器を設置する。各装置の機能は、次のとおりである。

- (1) 送受信装置：地上装置からの動画・静止画コンテンツの受信
- (2) メディア中央装置：編成に必要なコンテンツの保持
- (3) メディア端末装置：車両に必要なコンテンツの保持、メディア表示器への表示指令



(注3) WiMAXは、WiMAX Forumの登録商標である。

図2. ドア横サイネージ追設時のシステム構成



図3. ドア横表示器の設置例



図4. 妻部表示器の設置例

(4) メディア表示器：表示するコンテンツの保持・表示  
第4世代トレインビジョンを既に納入しており、ドア横サイネージを追加設置(追設)する場合のシステム構成図を図2に示す。既存のメディア表示器に、ドア横サイネージを接続するだけで表示が可能である。

### 3.2 東京メトロ銀座線1000系特別仕様車

東京メトロ銀座線1000系特別仕様車では、ドア横と妻部(車両の連結面)に表示器を設置している(図3、図4)。

### 4. 新たな表現方法

ドア横サイネージは、第4世代トレインビジョンと同じ表示制御ソフトウェアを採用している。第4世代トレインビジョンの広告表示方法の特長は次のとおりである。

- (1) 表示するコンテンツのスケジュールは、日本標準時で指定
- (2) 全表示器で異なるスケジュール、コンテンツを保有可能



図5. 同時放映



図6. 2画面一体型23インチワイド表示器



図7. 18インチワイド表示器

- (3) 当社独自技術によるコンテンツの高速な更新  
 (4) 多画面一体表示

これによって、車両と駅とで同時刻に同じ広告を表示することが可能になる。例えば、東京2020オリンピック・パラリンピックでの決勝戦の放映時刻1時間前を狙って、第4世代トレインビジョン搭載の全車両及び駅デジタルサイネージに一斉に同じ広告を放映させることができる(図5)。

ドア横以外に設置する新型表示器として、2画面一体型23インチワイド表示器(図6)と東京メトロ銀座線1000系特別仕様車の妻部に採用した18インチワイド表示器(図7)があり、いずれも第4世代トレインビジョンへの追設を可能にしている。

## 5. む す び

行き先案内はLEDによる文字情報提供からLCDを使用した画像提供へ、広告表示は紙媒体から動画提供へ変わり、

LCDパネルを採用した表示器を車両に設置することが一般的になっている。さらに、首都圏ではデジタルサイネージが拡大しており、車両に設置する表示器台数が増加している。新型表示器によって、ドア横でもデジタルサイネージが可能になり、表示器台数の増加は今後も継続するものと思われる。

## 参考文献

- (1) 澤田久美子, ほか: トレインビジョンへのユニバーサルデザイン導入, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 51, No.517 (2014)
- (2) 永井 衆, ほか: 東京地下鉄13000系/東武鉄道70000系3画面トレインビジョンの導入, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 52, No.513 (2015)
- (3) 知平雅仁, ほか: トレインビジョンの最新技術と今後の展望, 三菱電機技報, 90, No.9, 509~512 (2016)

# エネルギー・環境ソリューション

鉄道輸送に求められる要求は高まっている。

三菱電機は、鉄道のエネルギー全体最適化を目指し、車上、駅、基地、路線全体で、“省”“創”“蓄”的三つのエネルギーをトータルで管理する、環境に優しい技術の開発に取り組んでいる。

電力監視制御システム



路線全体のエネルギー管理

列車統合管理システム



列車全体のエネルギー管理

車両 での環境への取組み

装置の  
小型化・  
軽量化

車両電機品  
の省電力化

列車全体の  
エネルギー  
削減

路線全体 での環境への取組み

設備の  
小型化・  
省スペース化

エネルギー  
効率の向上

路線全体の  
エネルギー  
最適化

受電開閉設備



設備の小型化・省スペース化

太陽光発電システム



再生可能エネルギーの活用

推進制御システム (本誌 p46)

推進制御システムは、車両で最もエネルギーを消費するため、ここでの消費電力削減は鉄道システム全体の省エネルギー化に大きく貢献する。

この章では、三菱電機の推進制御システムでの取組みについて紹介する。



車両の消費電力削減

駅・基地 での環境への取組み

設備・機器  
の省電力化

回生電力  
の有効活用

再生可能  
エネルギー  
の活用

駅舎補助電源装置 (本誌 p50)

駅舎補助電源装置は、車両のブレーキによる回生電力を、駅のエスカレーター・照明等の設備で有効に活用するための装置である。

この章では、駅舎補助電源装置の運用実績について紹介する。



回生電力の有効活用

# 鉄道車両用推進制御システムの最新動向

村端章浩\*  
田中孝典\*

Latest Trend of Propulsion Control System for Railway Vehicle

Akihiro Murahashi, Takanori Tanaka

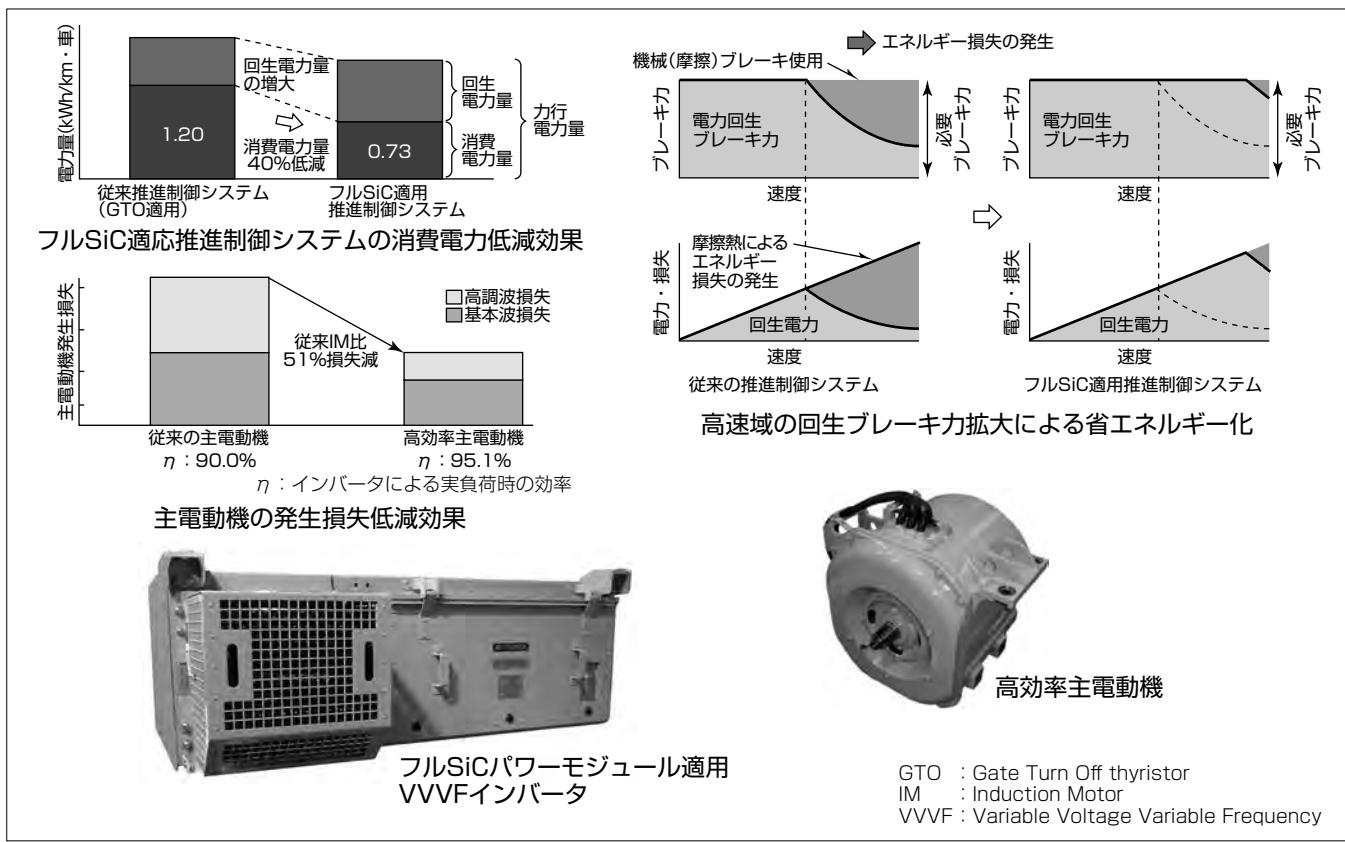
## 要旨

近年、地球温暖化対策として、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量の削減が求められており、環境負荷の少ない輸送手段である鉄道の重要性が高まっている。その需要に対応するため、国内外で鉄道インフラの整備が進んでいる。

三菱電機は、SiC(シリコンカーバイド)パワーモジュールを鉄道車両用推進制御システムに適用することによって推進制御システム全体として省エネルギー化に取り組み、

環境負荷の低減に寄与してきた。

当社のSiCパワーモジュールを適用した鉄道車両用推進制御システムは、フルSiC(ダイオード、スイッチング素子ともSiC化)パワーモジュールの適用によって、電力回生ブレーキ領域の拡大、高周波スイッチングによる主電動機の高効率化など、既存システムに対して約40%の消費電力低減を達成した。



## 従来の推進制御システムとフルSiCパワーモジュール適用推進制御システムの比較

フルSiCパワーモジュールをVVVFインバータに適用し、フルSiCの特長に合わせて設計した主電動機と組み合わせて用いることによって、推進制御システムとして既存システムに対して約40%の消費電力低減を達成した。

## 1. まえがき

近年、地球温暖化対策として、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量の削減が求められている。その対策の一つとして、環境負荷の少ない輸送手段である鉄道の重要性が高まり、国内外で鉄道インフラの整備が進んでいる。

その中で、当社は2012年2月に世界初<sup>(注1)</sup>のハイブリッドSiC(ダイオード素子をSiC化)パワーモジュールを適用した推進制御装置を営業線に納入したことを皮切りに、国内外の推進制御装置・補助電源装置に多数適用し、環境負荷の低減に寄与してきた。

本稿では、当社のSiCパワーモジュールを適用した推進制御システムの進展及び最新技術であるフルSiCパワーモジュールの特長を述べるとともに既存システムに対して約40%の消費電力低減を達成した、フルSiCパワーモジュール適用鉄道車両用推進制御システムの省エネルギー技術について述べる。

(注1) 2012年2月現在、当社調べ

## 2. SiC適用推進制御システムの進展<sup>(1)</sup>

低損失を特長とするSiCパワーモジュールを使用することで、従来よりもインバータ電流と変調周波数を増加させることができ、これまで鉄道車両用推進制御システムの省エネルギー化に寄与してきた。図1に、当社のSiCパワーモジュール適用推進制御システムの進展を示す。

2012年2月から、ハイブリッドSiCパワーモジュールを適用した推進制御システムが直流750/600V架線対応のシステムとして世界で初めて営業運転に適用され、Si(シリコン)パワーモジュールを適用した従来のシステムと比較し、ブレーキ方式の変更と合わせて38%の省エネルギー効果を上げている。

さらに、2013年3月から直流1,500V架線に適用対象を拡大し、従来のSiパワーモジュールを適用したシステムと

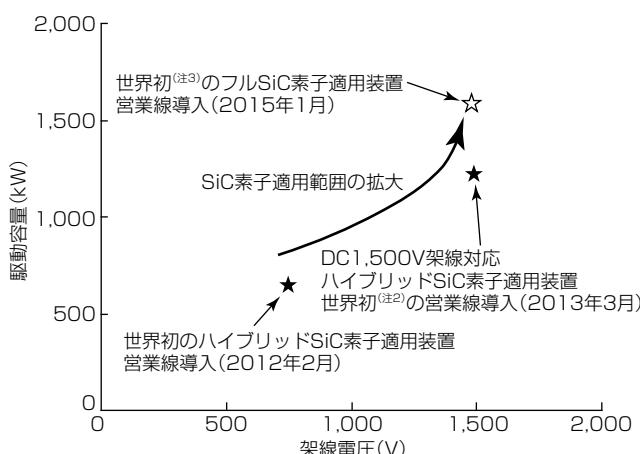


図1. SiCパワーモジュール適用推進制御システムの進展

比較し、ハイブリッドSiCパワーモジュールを適用したシステムとして24%の省エネルギー効果を上げている。

また、更なる省エネルギー化や環境負荷低減への取組みとしてフルSiCパワーモジュールを適用した直流1,500V架線対応の推進制御システムを開発し、2015年1月から営業運転に適用され、約40%の省エネルギー効果が得られるることを確認した。

以上のように、当社製品はSiCパワーモジュールの適用範囲を拡大させており、環境負荷の低減に寄与している。

## 3. フルSiCパワーモジュールの特長

図2に、Si-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)とSiC-MOSFETの構造を示す。SiCはSiと比較して高温動作が可能で、さらに、絶縁破壊電界強度が約10倍となるため、半導体(ドリフト層)を薄くすることができる。これによって、従来のSiに比べ大幅なオン抵抗低減を実現でき、導通損失の低減が可能になる。

また、バンドキャップの広いSiCでは、ショットキー接合のエネルギー障壁を大きくとれるため、高耐圧のSi-SBD(Schottky Barrier Diode)が実現できる。これによって、ダイオードのリカバリー損失が低減され、スイッチング素子のターンオン損失の低減が可能になった。さらに、スイッチング素子にSiC-MOSFETを採用することで、従

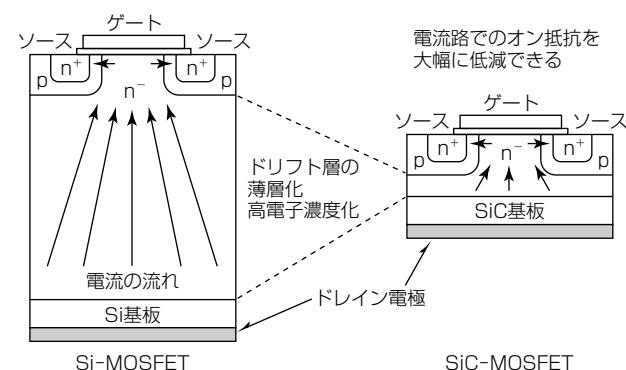


図2. MOSFET構造の比較

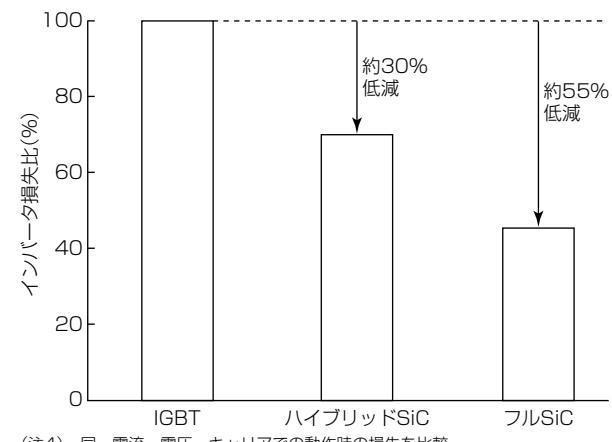


図3. インバータ装置発生損失比較

来のIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)デバイスでの少数キャリアが存在せず、ターンオフ時のテール電流がなくなることでターンオフ損失の大幅な低減が可能になり、インバータ損失を従来比で55%低減できる(図3)。

#### 4. フルSiC適用推進制御システム

##### 4.1 消費電力の分析

図4に、車両が走行する場合のエネルギー変換フローと車両の発生損失を示す。

発生損失は、エネルギー変換時に各機器で発生する発熱損失に加え、走行抵抗及び減速時での摩擦ブレーキで熱エネルギーとして消失させる損失に分類される。鉄道車両の消費電力量を低減させるには、これら全ての損失に着目する必要がある。

図4の円グラフに、発生損失の内訳例を示す。走行機器に関する発生損失のうち、回生できずに消失した摩擦(空気)ブレーキでの熱損失及び主電動機で発生する熱損失など、回生可能なエネルギー損失が多くを占める。

一方、インバータ装置のエネルギー損失は、鉄道車両全体の発生損失に対して占める割合が低いことから、単にSi素子からSiC素子に変更するだけでは、車両全体として、大幅な発生損失低減は期待できない。そこで、インバータ装置の損失低減に加えて、回生ブレーキ性能の拡大による

摩擦ブレーキの動作領域の縮小及び主電動機の高効率化に取り組んだ。

##### 4.2 省エネルギー化の方策<sup>(2)</sup>

###### 4.2.1 回生ブレーキ領域の拡大

回生ブレーキ性能を増加させて摩擦ブレーキの動作領域を減らすために、推進制御システムとして次の二つの取組みを行った。

###### (1) VVVFインバータ装置

従来のSiパワーモジュールを適用したインバータ装置では、素子損失の制約で、高速領域では、主電動機電流を増加させることが困難なため、回生ブレーキ性能が特に速度の高い領域で制限され、摩擦ブレーキを補足することによって車両としての減速度を確保していた。

一方、SiCパワーモジュールを適用したインバータ装置では、先に述べたように素子損失が大幅に低減されるので、図5に示すように、高速領域でも従来以上に主電動機電流を高く設定することができ、回生ブレーキ性能を増加させることができになる。

###### (2) 主電動機

インバータ装置で実現できる高速領域の大電流化に対応し、主電動機については、回生可能な運動エネルギーを回生できるように最大出力(停動トルク)を増加させ、回生ブレーキ性能を向上させる設計を行った(図6)。

このように、これまで回生できずに熱エネルギーとして消失していた運動エネルギーを回生することによって、車両の発生損失を約25%低減させることができた(車両の構成によって低減割合は前後する)。

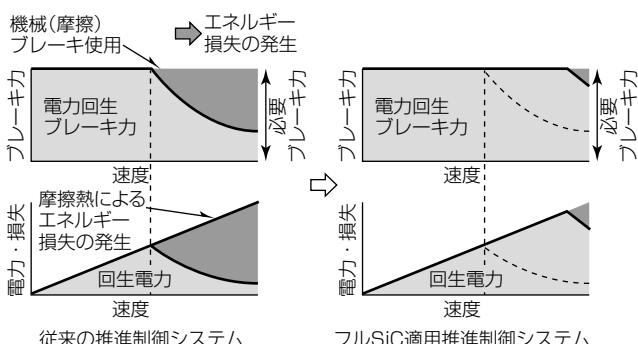


図5. 高速域の回生ブレーキ力拡大による省エネルギー化<sup>(2)</sup>

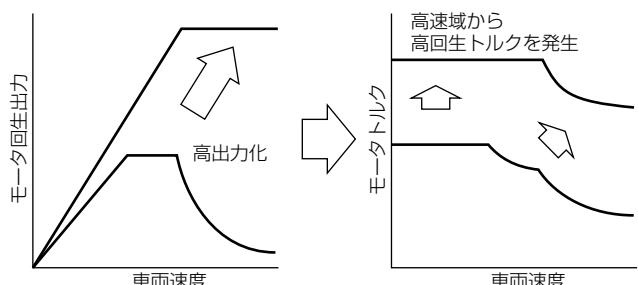


図6. 主電動機の発生出力向上と高トルク化イメージ

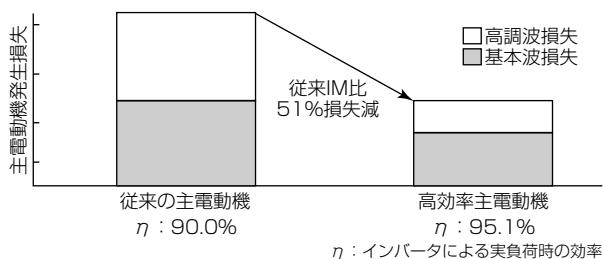


図7. 主電動機の発生損失低減効果

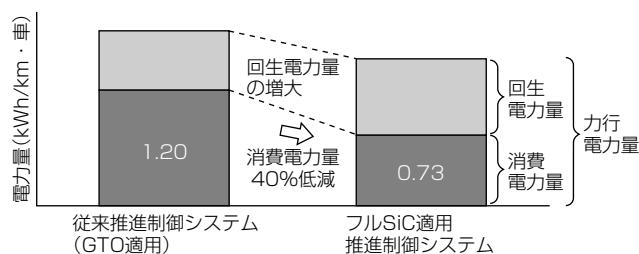
図10. 営業運用での消費電力低減効果<sup>(1)</sup>

図8. フルSiCパワーモジュール適用VVVFインバータ



図9. 高効率主電動機

#### 4.2.2 主電動機の高効率化

インバータ装置にSiC素子を適用することによって、主電動機電流を高く設定できるだけでなく、低損失の特性を活用して、スイッチング周波数を高く設定できる。その特性を踏まえた上で、主電動機設計として、次の(1)~(4)に着目して最適設計を実施した。

- (1) 回転子スロット形状の最適化
- (2) 導体断面積の増加
- (3) 高調波損失の抑制
- (4) 低損失材料の適用

その結果、図7に示すように、基本波損失及び高調波損失とも低減し、主電動機の発生損失を51%削減した。

主電動機の発熱損失の低減には、主電動機を駆動するインバータ装置との連携が不可欠であり、SiC素子の特性を活用した最適な電流・電圧制御によって、推進制御システムとして、発生損失を10%低減した。

#### 4.3 実案件への適用<sup>(1)</sup>

フルSiCパワーモジュールを適用した直流1,500V架線対応のVVVFインバータ(図8)と高効率主電動機(図9)は、開発後、多くの鉄道事業者に採用された。実車による走行試験の結果、既存車のGTOインバータ制御装置搭載推進制御システムに対し、車両全体の消費電力が約40%低減されることを確認した(図10)。

### 5. むすび

SiCパワーモジュール適用鉄道車両用推進制御システムの進展を述べるとともに、最新のパワーモジュールであるフルSiCパワーモジュールの特長を述べた。また、それを適用した鉄道車両用インバータと高効率主電動機との組合せによる、推進制御システムの省エネルギー化を実現するための技術と実案件への適用結果について述べた。

地球規模での更なる環境負荷低減及び省エネルギー化が求められる中、鉄道システムに対する期待は大きく、鉄道車両用推進制御システムの適用拡大が考えられる。当社としては、高効率大量輸送手段である鉄道システムをこれまで以上に環境に優しいものとするために、SiCパワーモジュールの更なる高性能化を進め、それを適用した鉄道車両用インバータと高効率主電動機を組み合わせた推進制御システムの製品化を展開していく。

なお、SiCパワーモジュールの開発には国立研究法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究成果の一部を活用している。

### 参考文献

- (1) 中口勝己, ほか: DC1,500V架線対応フルSiC適用VVVFインバータ装置実証結果について、鉄道車両と技術, 21, No.5, 10~14 (2015)
- (2) 大橋聰, ほか: SiCパワーモジュール適用鉄道車両用の高効率インバータシステム、第49回鉄道サイバネシンポジウム, No.505 (2012)

# 駅舎補助電源装置“S-EIV”の ラインアップ充実と運用実績

松村 寧\* 石倉修司\*\*  
藤田敬喜\*  
川野 聰\*

Lineup Enhancement and Operational Results of Station Energy Saving Inverter "S-EIV"

Yasushi Matsumura, Keiki Fujita, Satoshi Kawano, Shuji Ishikura

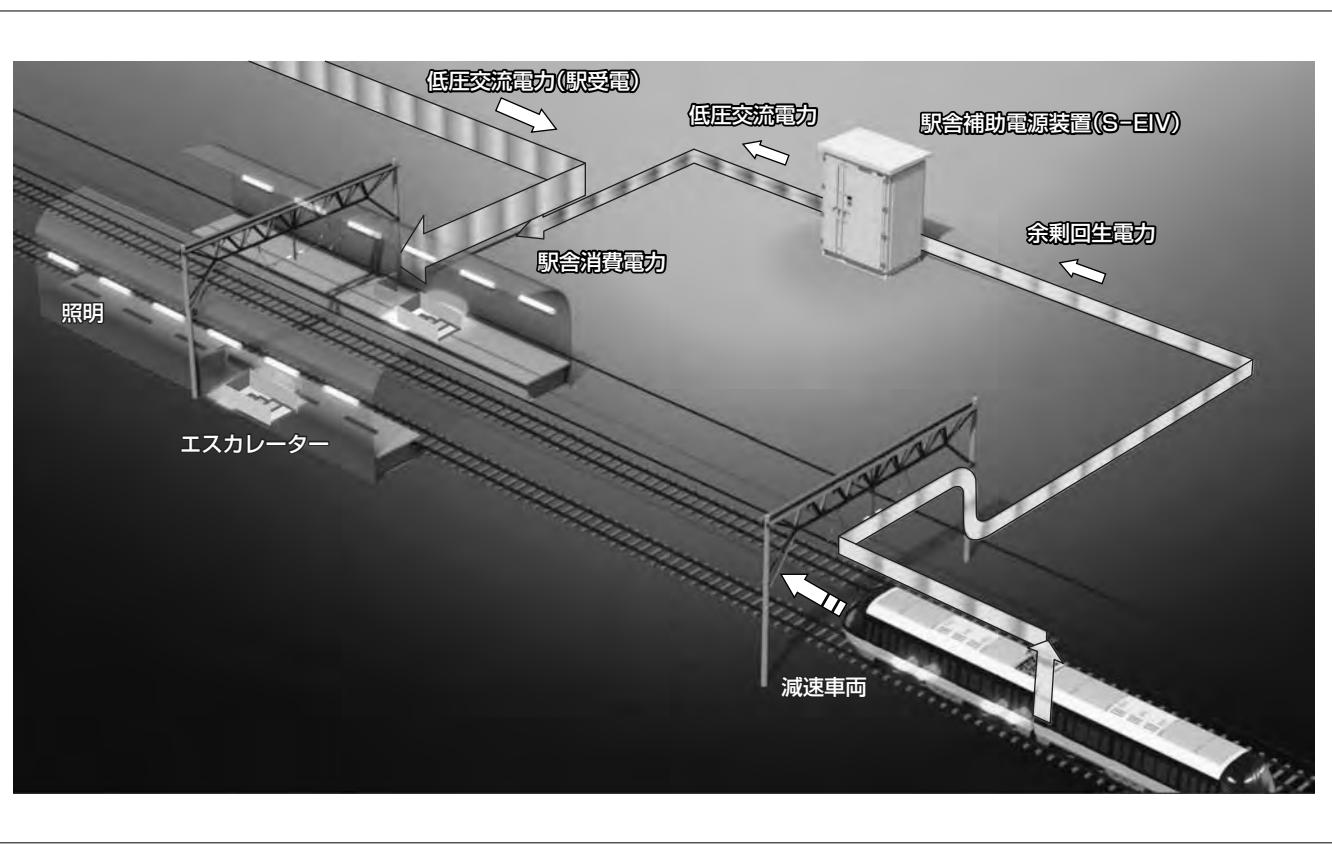
## 要 旨

鉄道はエネルギー効率に優れ、環境負荷の小さい輸送手段であるが、低炭素社会の実現に向けて更なる効率化・省電力化が求められている。

これまでも、電車がブレーキをかけたときに発生する回生電力を電車線に戻すことで、他の車両の起動・加速や車両内の電気設備に用いる電力として活用することが図られてきたが、近くを走行する車両がない時は発生した回生電力を電車線に戻すことができず、熱として廃棄されている。一方で、VVVF(可変電圧可変周波数)車の普及とSiC(シリコンカーバイド)素子導入とともに、車両の回生電力は年々増大する傾向にあり、結果、熱として廃棄されるエネルギーもまた増加している。三菱電機は、この車両間で融通できずに余剰となる回生電力に着目し、これを駅舎の

照明・空調・エスカレーター等の電源として利用する駅舎補助電源装置“S-EIV(Station Energy saving Inverter)”を製品化している。

この装置は2014年に初号機を市場投入して以降、2015年に地絡保護回路を追加し、更に筐体(きょうたい)のコンパクト化を図った小型高機能タイプを、2016年に蓄電池を併用した小型高機能蓄電タイプを製品化した。また2017年にこれまでの200V出力機に加え、400V出力機をそろえ、現在までに約30台を出荷した。この装置は、き電と駅舎低圧交流電源とを連系するという従来にない装置のため、導入には設置駅の選定と電力削減効果の試算といった新たな手順が必要となる。これまでの運用実績では、計画どおりの電力削減効果が得られている。



## 駅舎補助電源装置“S-EIV”による余剰回生電力フロー

車両は駅停車時に回生ブレーキによる回生電力を発生し、直流電車線に電力を返還する。S-EIVは、この回生電力の内、他の車両で消費できなかった余剰分を低圧交流電力に変換し、駅の他の電力負荷に利用することで回生電力の有効活用を図る。

## 1. まえがき

三菱電機ではS-EIVを2014年の初号機以降、現在までに約30台を出荷している。

本稿ではS-EIVの機能、ラインアップ充実、導入の手順、運用実績について述べる。

## 2. S-EIVの機能

走行する車両によって電車線に戻された回生電力が余剰となった場合、電車線電圧が上昇する。S-EIVはこれを監視し、あらかじめ設定した回生電力吸収開始電圧(以下“回生開始電圧”という。)よりも上昇した場合、余剰回生電力が発生したものとみてこれを取り込み、低圧交流電力に変換して駅の負荷に供給する。逆に電車線電圧が回生開始電圧より下降すると負荷への電力供給を止め、待機状態となる。

S-EIVは駅舎の低圧交流電源との連系を行うため、次のような機能を備えている<sup>(1)</sup>。

- (1) 出力を駅舎の交流位相に同期させる機能。
- (2) 電力供給による交流電圧の上昇を抑制するための、無効電力制御・出力制御機能。
- (3) 駅舎での受電電源停電時にもS-EIVが動作継続した場合、感電等の事故が発生することを防ぐための単独運転防止機能。

S-EIVは図1に示すように電源盤と監視操作盤とで構成される。

電源盤では、電車線から入力された直流電力は、HSCB(直流高速度遮断器)による過電流保護、入力フィルタによる誘導障害対策を行った後、トランスでの絶縁を行うため交流へ変換する。この時、トランスを小型化する目的で高周波インバータによって一旦高周波交流に変換後、再び整流器によって直流に変換し、改めてインバータによって駅舎電源として必要な周波数・電圧の交流に変換する<sup>(2)</sup>。その後交流フィルタ、MCCB(配線保護用遮断器)を通して電気室へ出力する。

監視操作盤は、制御装置、液晶タッチパネルから構成され、運転監視制御機能、制御パラメータ設定機能、運転・計測データ記録機能を備えている<sup>(2)</sup>。監視操作盤は、電源盤と離れた駅事務室や電気室等に設置されることを前提としており、周辺ノイズによる影響を排除するため電源盤とは光ケーブルで接続している<sup>(1)</sup>。

## 3. S-EIVのラインアップ充実

### 3.1 ラインアップ充実の目的

S-EIV初号機を2014年に製品化した。2015年には小型化した上に地絡検出機能等を内蔵した小型高機能タイプを標準機種とした。出力電圧については200V、400V出力をメニュー化した。さらに2016年には負荷容量が比較的小さな駅(50kW以下)にも適した、蓄電池の併用による小型高機能蓄電タイプを製品化した。これらラインアップの充実によって、海外も視野に入れた多くの鉄道線区への対応を可能にしている。

表1に小型高機能タイプと小型高機能蓄電タイプの機器仕様を示す。

### 3.2 蓄電タイプの動作

蓄電タイプの動作を次に述べる(図2)。

蓄電タイプは駅に200kWの負荷がなく、電車線から取り込んだ200kWの余剰回生電力を消費しきれないような

表1. S-EIVの機器仕様

	小型高機能タイプ	小型高機能蓄電タイプ
入力電圧	直流1,500V, 750V/600V	
出力電圧	交流210V 3相 50Hz/60Hz	交流210V 3相 50Hz/60Hz
定格容量	入力：200kW-30秒、 2分30秒休止 出力：200kW-30秒、 2分30秒休止	入力：200kW-30秒、 2分30秒休止 出力：50kW-120秒、 60秒休止
蓄電池	なし	蓄電池種類：リチウムイオン 電池 容量：50Ah (150kW-30秒充電)
冷却方式	自冷	電源盤：自冷 蓄電池盤：強制風冷
設置場所	電源盤：屋外(駅のホーム端、 線路脇等) 監視操作盤：屋内	電源盤：屋外(駅のホーム端、 線路脇等) 監視操作盤：屋内 蓄電池盤：屋内又は屋外

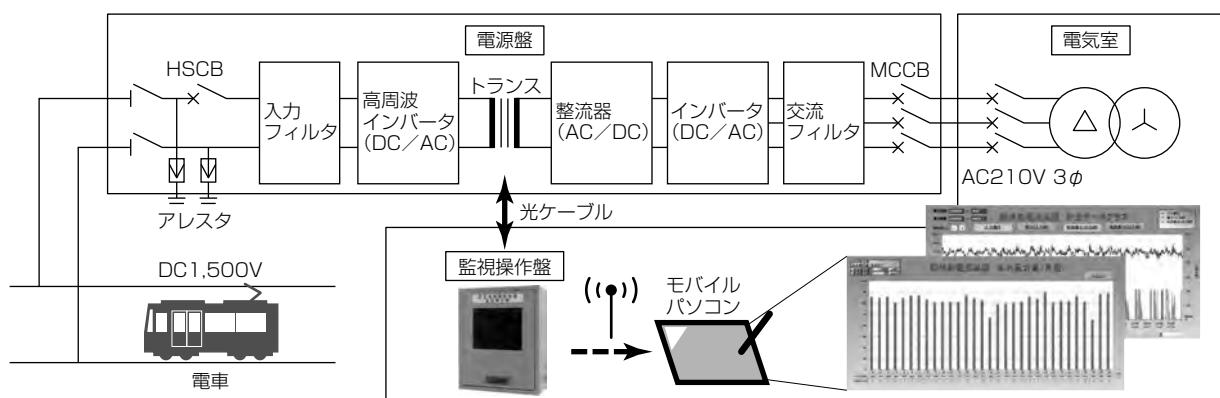


図1. S-EIVの装置構成

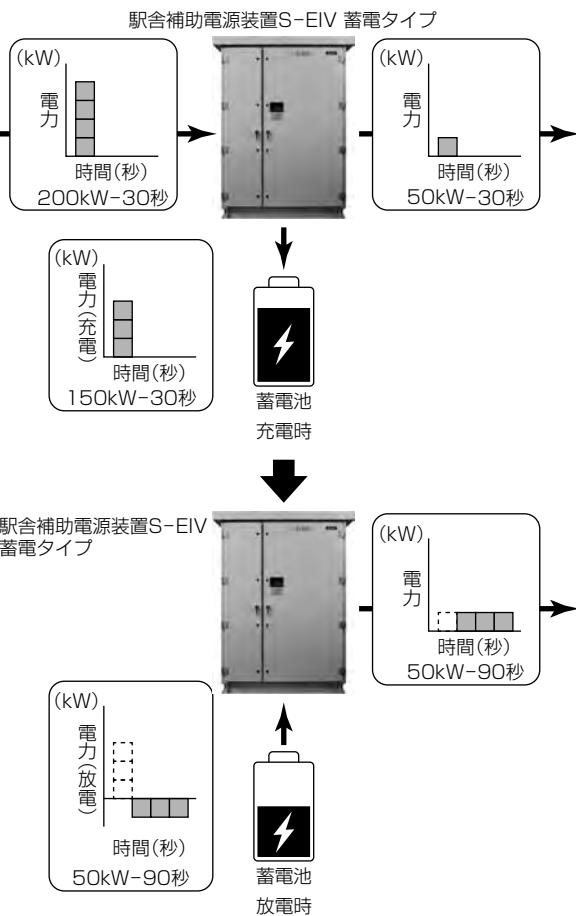


図2. S-EIV蓄電タイプの動作

小規模駅向けに製品化したもので、出力を50kWに絞り、これを超えた電力(最大150kW)は一旦蓄電池に蓄えた後に使用することで余剩回生電力を余すことなく消費できるようにしたものである。

#### 4. S-EIVの導入手順

##### 4.1 導入手順

S-EIVの導入手順は次のとおりである(図3)。

###### (1) 設置駅の選定

路線形態、ダイヤから余剩回生電力の発生頻度を推定し、さらに駅の設備容量から、これが消費できる駅を候補として選定。

###### (2) 導入効果の試算

選定した駅での電車線電圧測定によって導入効果を試算し、十分な効果が得られることを確認。

###### (3) 駅設置計画

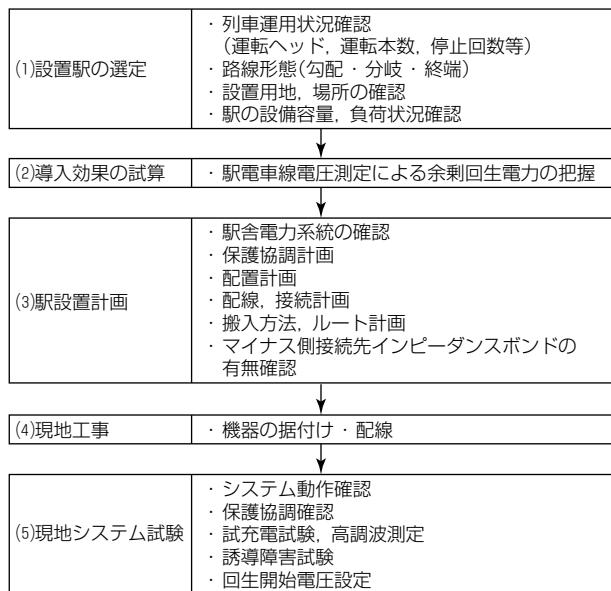
直流マイナス側の線路への接続方法の確認も含め、候補駅の接続先電力系統、搬入方法・ルートを確認して、設置駅を決定の上、設置計画を立案。

###### (4) 現地工事

機器の据付け・配線等の現地工事。

###### (5) 現地システム試験

システム動作確認等の現地システム試験。

図3. S-EIVの導入手順<sup>(3)</sup>

これらの手順を経て実運用に入る。

導入効果の試算は、候補駅で電車線電圧を実測し、次の式によって省エネルギー効果を求める<sup>(3)</sup>。

$$P[kWh] = \sum_{r=1}^n \frac{t_r[s] \times P_r[kW]}{3600[s]} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

(n = 余剩回生電力取込み回数)

ここで $t_r$ は余剩回生電力によって電車線電圧がS-EIVの回生開始電圧より上昇する時間であり、 $P_r$ はその際に得られる回生電力を示す。なお、 $P_r$ は簡易的に毎回200kWが得られるものとして計算している。

#### 4.2 システム試験

S-EIV特有の次の項目について述べる。なお(1)～(3)は<sup>(2)</sup>、終電後、S-EIVの回生開始電圧を変電所整流器無負荷電圧以下に設定することで、回生電力ではなく、変電所出力を常時直接入力する状態とした上で実施する。

##### (1) 試充電試験

駅の低圧交流系統にS-EIVを接続して、S-EIVが異常なく動作することを確認する。

##### (2) 高調波測定

S-EIVの出力に含まれる高調波電流成分が駅舎設備に悪影響を与えることがないよう、40次までの高調波成分を測定し、各歪(ひず)み率が3%以内、総合で5%以内であることを確認する。

##### (3) 誘導障害試験

S-EIVで取り込んだ余剩回生電力が線路を通じて車両に還流する際に、その経路にある軌道回路を用いた信号設備に影響を与えないことを確認する。

##### (4) 回生開始電圧設定

電車線電圧を約1週間程度測定した上で、回生開始電圧の最適値を求める。

## 5. S-EIVの運用実績

### 5.1 駅舎削減電力量の実績

S-EIVが電車線から取り込み、低圧交流電力に変換して駅舎に供給した電力を駅舎削減電力量として、その実績について述べる。

図4はS-EIVの運用実績データが取得されている23台について、平日及び土休日の平均削減電力量をそれぞれ軸にしてプロットしたものである。この図によると、平日・土休日共に400~600kWh/日に実績が集中しており、想定した電力削減効果が得られていることが分かる。また平日・土休日で比較すると、大半のケースで土休日=平日を表す破線より上部にプロットされていることから、土休日の削減電力量が多くなる傾向が分かる。これは平日ではラッシュ時間帯で回生電力が車両間で融通されやすく、余剰分が減少しているためと考えられる<sup>(3)</sup>。

### 5.2 削減電力量の変化と気温との関係

図5に外気温(気象庁ホームページのデータ)と平日の削減電力量の関係を示す。

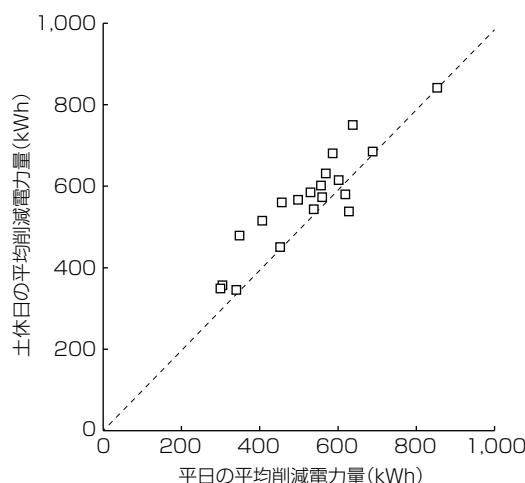


図4. 日平均削減電力量

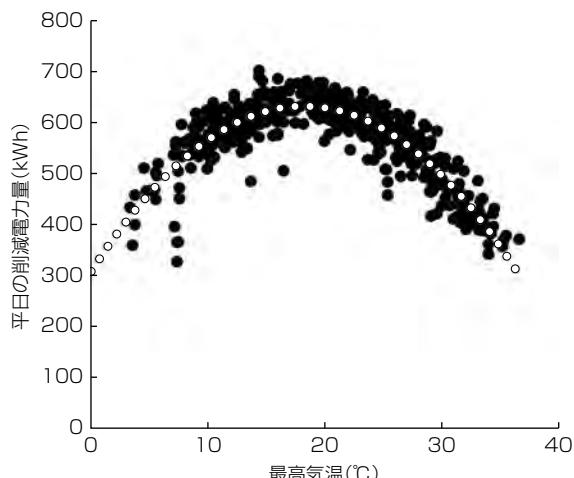


図5. 気温と平日の削減電力量の関係

平日の削減電力量と外気温には相関がみられ、15~20°C付近で削減電力量が最大となり、30°C以上又は10°C以下になると減少している<sup>(3)</sup>。

これは、夏季及び冬季は車両の空調(冷暖房)負荷の増加によって回生電力の自車両及び他車両での消費量が増えたことで余剰回生電力が減少し、電車線電圧が上昇する頻度が少なくなるためと考えられる<sup>(4)(5)</sup>。

### 6. S-EIV導入によって期待される付随効果

近年、ホーム柵設置駅の増加とともに定点停止精度の向上が課題となってきており、このためのブレーキの安定動作が求められている。

一方、車両が減速する際には回生ブレーキを優先的に用いるが、電車線に戻された回生電力が消費しきれず余剰となつた時には、通常の機械ブレーキに切り替わることになる。この時、減速力が不連続になりブレーキ操作を難しくしている。

S-EIVはブレーキが動作する駅近傍(きんぼう)で余剰回生電力を消費することに寄与するため、車両の回生ブレーキの安定動作につながるとともに、機械ブレーキの使用頻度を下げ、ブレーキシュー摩耗低減につながることも期待できる。

今後、運用実績を積み重ねることで、これら効果の定量化を図っていく。

### 7. むすび

2014年のS-EIV初号機の出荷以降のラインアップ充実、S-EIVの導入手順、及び運用実績について述べた。

今後、導入手順での削減電力量試算精度の向上を始めとした、設置駅選定方法の改善を行うとともに、消費電力削減以外の付随効果についても定量化を行う等、S-EIVの導入促進に取り組んでいく。

### 参考文献

- (1) 松村 寧, ほか:駅舎補助電源装置“S-EIV”, 三菱電機技報, 89, No.2, 113~116 (2015)
- (2) 万谷航太, ほか:駅補助電源装置による省エネルギーの取り組み, JREA, 57, No.9, 38889~38892 (2014)
- (3) 藤田敬喜:駅舎補助電源装置(S-EIV)の運用実績, 平成29年度電気学会産業応用部門大会, 5-S8-5 (2017)
- (4) 万谷航太:駅補助電源装置による省エネルギーの取組み, 鉄道と電気技術, 27, No.1, 38~42 (2016)
- (5) 上西純一, ほか:駅における回生電力の有効活用について, J.IEIE Jpn, 37, No.2, 103~106 (2017)