



家庭から宇宙まで、エコチエンジ  
eco Changes

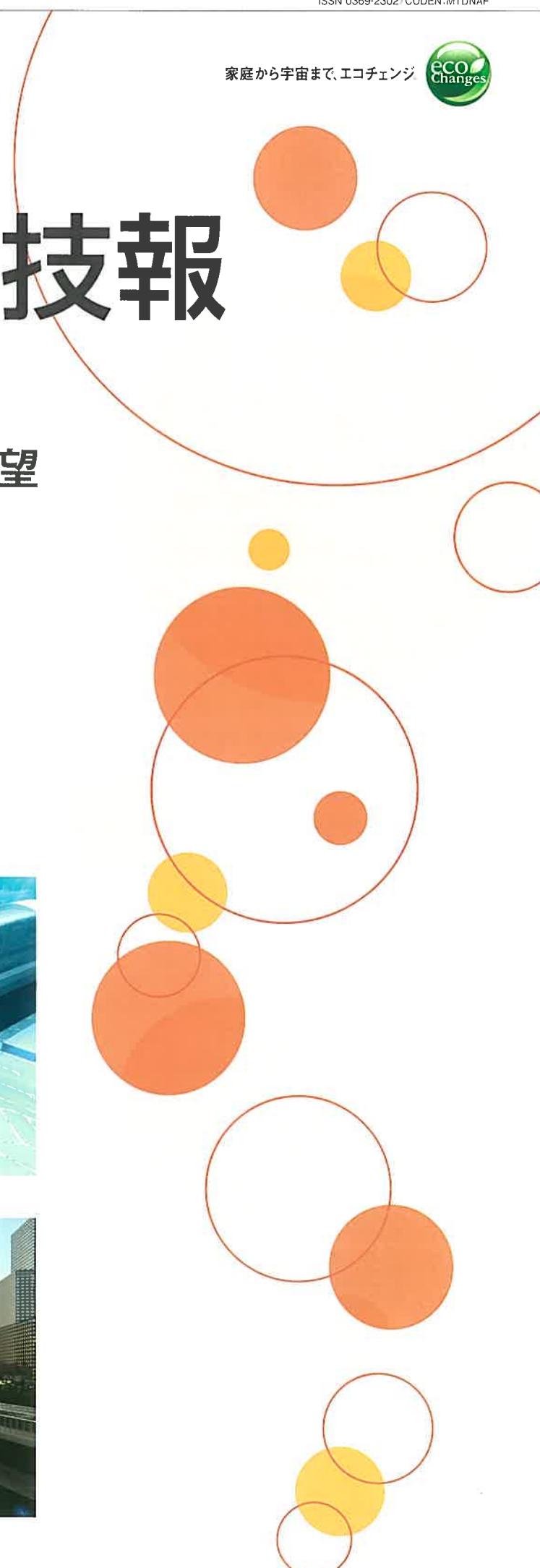
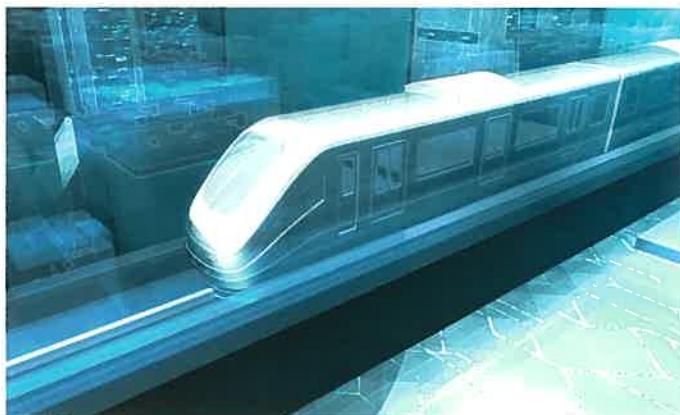
# 三菱電機技報

9

2016

Vol.90 No.9

## 交通システムの将来展望



## 目 次

### 特集「交通システムの将来展望」

将来の私たちの生活と文化を担う “知恵”としての交通システム技術.....	<b>卷頭言   1</b>
古閑隆章	
交通システムの将来展望.....	<b>卷頭論文   2</b>
福嶋秀樹	
無線列車制御システムの最新技術と今後の展望.....	7
明日香 昌・小篠大輔・河野博行・小崎元嗣・田原一浩	
鉄道車両保守支援システムの最新技術と今後の展望.....	11
甲村哲朗・竹内丈志・辻本典弘・瓜田直美・平田知行	
低炭素社会を支える鉄道エネルギー・環境ソリューション .....	15
堀内謙二・宮川雅彦・岡田万基	
列車統合管理システムの最新技術と今後の展望.....	19
甲村哲朗・安東永昇・岡田万基・瀧川義史	
トレインビジョンの最新技術と今後の展望.....	23
知平雅仁・稲葉行俊	
鉄道車両用永久磁石同期電動機の 駆動制御技術の開発と今後の展望.....	27
山崎尚徳・加藤 將・山下良範・寺本晃大	
SiCパワーモジュールの主回路素子への適用技術 .....	31
吉原徹大・山下良範・中嶋幸夫	
全閉形主電動機の環境配慮型社会への適用技術.....	35
金子健太・味岡作史・大津一晃	
列車運行管理の高度化を支えるシミュレーション技術.....	39
立石大輔・田中雅也・古林三郎	
欧州向け鉄道車両用空調装置の最新技術と今後の展望.....	43
井上武志・山村彰紀・新宮和平	
交通変電システムの最新技術と今後の展望.....	47
西川孝雄・田中 優・上田達也	
可動式ホーム柵の最新技術と今後の展望.....	51
竹村文吾	

### Future Prospects of Transportation Systems

Technology of Transport Systems as Wisdom for Our Life and Culture in Future
Takafumi Koseki

Future Prospects of Transportation Systems
Hideki Fukushima

Latest Technologies and Future Prospects of CBTC System
---

Masashi Asuka, Daisuke Koshino, Hiroyuki Kono, Mototsugu Kozaki, Kazuhiro Tahara

Recent Technologies and Future Prospects about Maintenance Supporting System for Railway Vehicle
Tetsuo Komura, Takeshi Takeuchi, Norihiro Tsujimoto, Naomi Urata, Tomoyuki Hirata

Energy and Environment Solutions for Railroad Supporting Progress Toward Low-carbon Society
Kenji Horiuchi, Masahiko Miyakawa, Yuruki Okada

Latest Technologies and Future Prospects of Train Control and Monitoring System
---

Tetsuo Komura, Eisho Ando, Yuruki Okada, Yoshihito Takigawa

Latest Technologies and Future Prospects of Train Vision System
---

Masahiro Chihira, Yukitoshi Inaba

Development and Future Prospects of PMSM Drive Control Technologies for Railway Rolling Stock
---

Hisanori Yamasaki, Sho Kato, Yoshinori Yamashita, Kota Teramoto

Application Technologies of SiC Power Module for Railcar Inverter
---

Tetsuo Sugahara, Yoshinori Yamashita, Yukio Nakashima

Totally Enclosed Traction Motor Technologies for Environmentally Conscious Society
--

Yoshifumi Ajioka, Kenta Kaneko, Kazuaki Otsu

Simulation Technologies for Advanced Train Supervision
--

Daisuke Tateishi, Masaya Tanaka, Saburo Kobayashi

Latest Technologies and Future Prospects for Railcar Heating, Ventilation and Air Conditioning Unit for European Railway
--

Takeshi Inoue, Akinori Yamamura, Wahei Shingu

Latest Technologies and Future Outlook of Transportation Substation System
--

Takao Nishikawa, Ken Tanaka, Tatsuya Ueda

Latest Technologies and Future Prospects for Automatic Platform Safety Door
---

Bungo Takemura

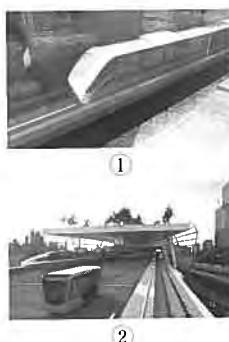
### 特許と新案

#### 「車両内情報提供システムおよび

車両内情報提供システムの映像コンテンツ提供方法」

「回転電機および軸受交換方法」.....

「地上子情報読取装置」.....



### 表紙：次世代交通ソリューション

交通システムは、車両システムと電力・交通情報システムの地上システム、更に車両と地上を有機的に接続する移動体通信システムで構成される社会インフラである。表紙の①は未来車両のイメージ図、②は未来ステーションのイメージ図である。

次世代の交通システムでは、エネルギーの制約、移動制約者を含めた利用者の利便性・満足度向上などニーズの多様化への対応として、ICT(Information and Communication Technology), IoT(Internet of Things)を活用し各種システムを結合して全体最適化を図り、“安全・安心”と“快適空間”的実現が課題と捉える。三菱電機は交通システムインテグレーターとして、これまでに蓄積してきた幅広い技術と今後の研究開発による新技術を展開、“次世代交通ソリューション”を打ち出して、交通システムメーカーNo.1を目指している。

## 巻/頭/言

## 将来の私たちの生活と文化を担う“知恵”としての交通システム技術

Technology of Transport Systems as Wisdom for Our Life and Culture in Future

古関 隆章  
Takafumi Koseki



筆者も人生半ば、50年のスケールで6年、12年、24年、48年前と過去を振り返ってみよう。6年前の2010年には東北新幹線が新青森まで全線開業した。12年前の2004年にはみなとみらい21線や新八代駅から鹿児島中央駅までの九州新幹線の開通が実現した。バブル最末期、筆者が大学院を卒業して就職をした24年前の1992年は、交流モータによる高速車であるのぞみ300系の導入で東海道新幹線の270km/h運転が開始され、山形新幹線も開業したという、日本の鉄道の歴史に残る重要な年となった。

一方“巨人・大鵬・卵焼き”を皆が愛した、48年前の1968年には、アメリカでニクソン大統領が就任し、小笠原諸島が日本に返還され、また東京の高層ビルとして注目された霞が関ビルが完成した。3億円事件が起きたのもこの年である。このころ東京や大阪で地下鉄の整備が進み、東海道新幹線は1時間6本の運行で、国鉄が初めて自動券売機を導入した。

では時間軸を逆にたどって2064年はどのような景色になるだろう。国立人口問題研究所の中位予測によれば、48年後、日本の総人口は8,600万人、老齢人口が40%となる。一方、このときには、リニア鉄道によって東京－大阪は1時間で結ばれているであろうし、新幹線網が全国を覆い、各主要都市の経済及び文化活動には、情報ネットワークと高速鉄道によってより密接な相互作用が生じているだろう。ヨルゲン・ランダースのまとめた“今後40年のグローバル予想”によれば、人口減少が必ずしも国の力の衰弱につながるものではなく、“知恵”があれば個の豊かさを追求することが可能と考えられる。

これらの将来環境では、社会インフラ整備のターゲットも、ビジネス中心から個人の豊かさ実現の支援に重点が移る。したがって、都市鉄道は、通勤のピークに合わせ長大列車を数多く走らせる現在の姿から、将来は、需要の時間的・季節的変動に柔軟に対応し、短編成列車を高頻度運転する形態に向かうであろう。そして軌道系都市交通と(電

気化の進んだ)自動車は、自然な姿として、相互に近い存在となるだろう。

そのためには、駆動装置の高効率化・小型軽量化とともに、回生ブレーキ有効活用を核とする電力マネジメントの高度化と、省エネルギーを陽に考慮した自動運転の積極的導入が重要である。これによって運行に柔軟性を持たせ、省エネルギーを通じた運行費用の削減を図ることが可能となる。さらに、柔軟な運行管理を容易にするドライバーレス運転技術が、現時点では技術水準のわりに導入が遅れている我が国でも、今後重要性を増す。これらの技術によって多様性に富むようになる公共交通サービスを、乗客が安心して便利に利用するには、きめ細かく運行情報をリアルタイムに提供する個別案内技術の高度化が望まれる。さらに地上設備の保守を容易にするため、無線に基づく信号保安技術を確立し、保守の自動化・合理化を促進する支援システムを普及させることができ、地味ながら、持続可能な交通事業の運営に不可欠な基盤を提供することとなろう。

1975年に突如現れその後の芸能史に偉大な足跡を残しているエンターテイナー“タモリ”誕生のきっかけは、山下洋輔らがその奇抜な芸を見たがり、同年3月に全通した山陽新幹線の切符代をカンパし、森田という変わった男を福岡から夜の新宿のバーに呼びよせたことにある、という興味深い事実を『タモリと戦後もニッポン』という書籍から最近知った。これは、様々な偶然を新しい交通技術がもたらし、世の中の文化の流れに、誰も意図しなかった大きな影響を与えることを示す1つの好例だと思う。

情報通信技術の果実を生かしつつ、安全で便利な交通網を整備し、経済的に持続可能な運営を支援する技術は、前述の“知恵”的重要な要素であり、交通に関わる優秀な技術者の役割が重要となる。したがって、鉄道を中心とする公共交通に資する層の厚い技術を扱うこの特集号には、今日多くの人々の関心が集まるだろう。

# 卷頭論文



福嶋秀樹\*

# 交通システムの将来展望

*Future Prospects of Transportation Systems*

Hideki Fukushima

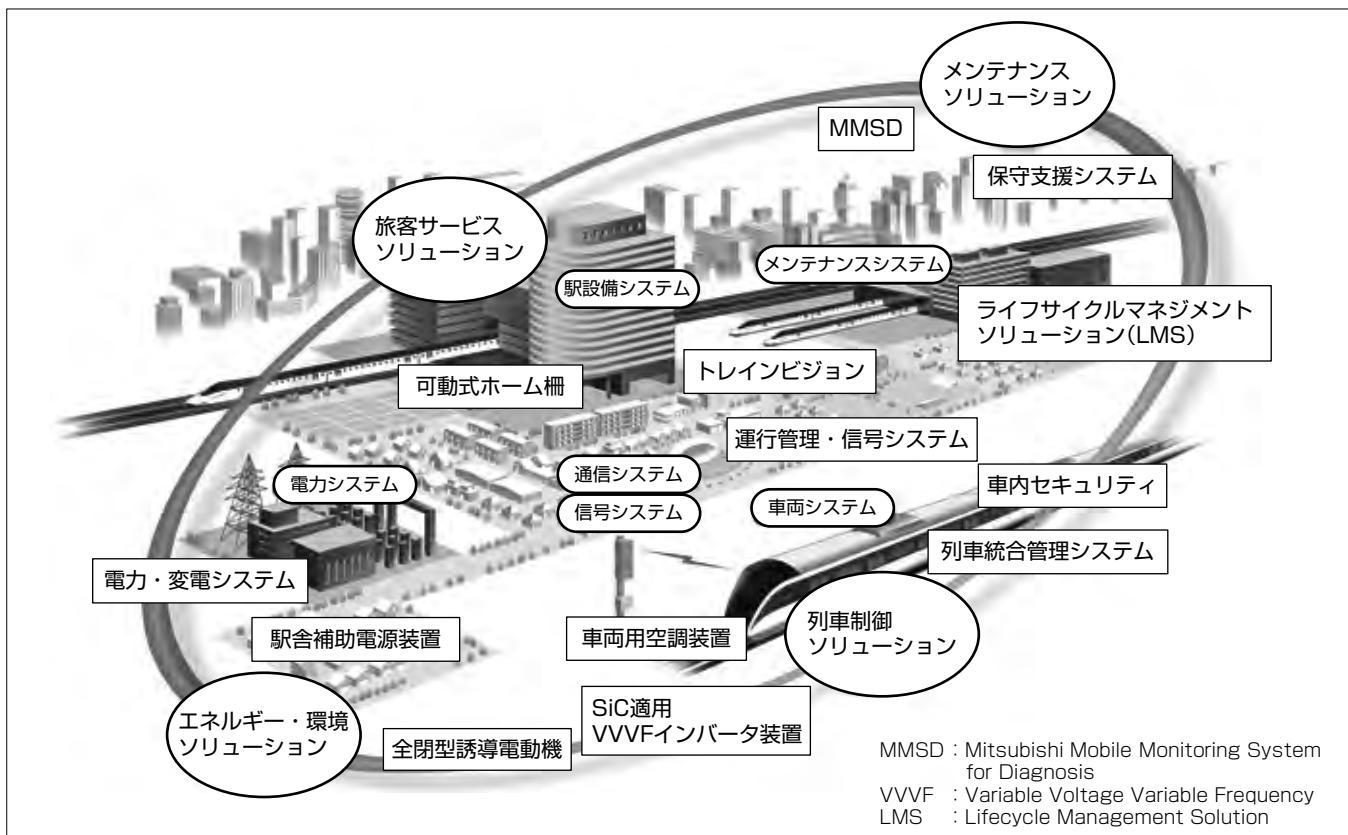
## 要旨

鉄道は、環境負荷が少なく、安全で安定した大量輸送を可能とする極めて重要な社会インフラである。その基本となる安全性・信頼性の更なる追求とともに、人口減少・少子高齢化、震災を契機としたエネルギーの制約、シニア層や訪日外国人を含む利用者利便性の一層の向上など、現代社会が求めるニーズは多様化し、様々な分野の技術を統合したシステム技術が求められている<sup>(1)</sup>。

三菱電機では、このようなニーズに応えるため情報通信技術やパワーエレクトロニクス技術を用いて、各種製品・システムの開発を行ってきた。基幹製品である車両システムでは、小型・軽量化、省エネルギー化やメンテナンス性の向上を図った。また、地上システムでは、スマート

コミュニティなどのエネルギー有効活用の取組みや実績ある技術を融合したシステムを提供してきた。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”を打ち出し、交通システムメーカー世界No.1を目指している。

この特集号は、“交通システムの将来展望”をテーマに、“次世代交通ソリューション”を構成する列車制御、メンテナンス、エネルギー・環境、旅客サービスの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。



## 次世代交通ソリューション

当社は、安全で安定した鉄道輸送の実現に向け、基幹製品の車上システムや地上システムで、高品質な製品を提供してきた。さらに、ICTによって、列車制御、メンテナンス、エネルギー・環境、旅客サービスの分野で、各々のシステムをシームレスに連携した次世代交通ソリューションを提供する。それによって、鉄道システムの全体最適化を実現し、社会の課題・ニーズに対応する。

## 1. まえがき

鉄道は、土木、建築、軌道、車両、電力、信号・通信など、各種インフラで構成される。各々は、“安全・安心”と“安定性・高信頼性”が要求される重要な社会インフラであり、電力・制御・通信など各分野の技術を統合したシステム技術が常に要求されている。また、近年では人口減少・少子高齢化社会の到来による生産人口の減少、シニア層の社会進出への対応、震災以降のエネルギー政策の見直しや電力供給事情の変化、訪日外国人旅行者の増加など、鉄道における課題やニーズは多様化してきている<sup>(1)</sup>。当社は、これまでこれらの課題・ニーズに対し、鉄道車両用電機品やこれらを統合する車上システム、電力・変電、信号・運行の監視・制御や情報系システムなどの地上システム、地上と車上を結ぶ無線通信システムなどの製品を提供してきた。さらに、これからはICTやスマートコミュニティ関連技術などを用い、車上から地上までトータルなソリューションの提供を目指している。

本稿では、鉄道システムの全体最適化を実現する次世代交通ソリューションに関する当社の取組みと将来展望について述べる。

## 2. 交通事業を構成する各種システム

交通事業を構成するシステムは、車両システムと地上の電力・交通情報システム、さらに、車両と地上を有機的に接続する移動体通信システムで構成される(図1)。

### 2.1 車両システム

当社は、鉄道の必須機能の“走る・止まる・制御する”だけでなく、旅客への“快適・サービス”まで含めて1社で実現できるメーカーで、これまで多くの鉄道車両用電機品を開発・納入してきた。車両システムは、“走る”ための推進制御・駆動装置、“止まる”ための“ブレーキ・保安装置”，これらを統括的に管理・制御する“列車統合管理システム(TCMS)”で構成される。また、空調装置、車内情報提供装置、車内防犯用カメラも提供している。

鉄道の基本サービスとされる“安全・安心”を実現するた

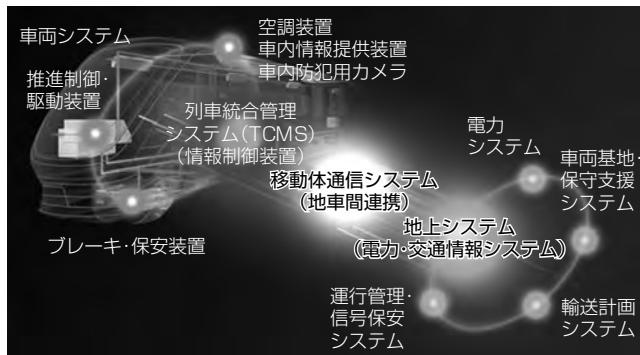


図1. 交通事業を構成する各種システム

めに、各製品で品質を追求し、最近の社会ニーズを踏まえて、小型・軽量化、高性能・高効率化を図り、省資源・省電力化による環境負荷低減を実現してきた。

### 2.2 電力システム

電力システムは、列車や駅などへ電力を安定的に供給する重要なシステムである。電力会社からの受電後に変電し、中央から列車や駅設備にスケジュール運転やピークカット制御など、使用状況に基づいた電力供給制御を行う。また、最近では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変化を背景に、スマートグリッド、スマートメータと呼ばれる新たな取組みが加速化している。

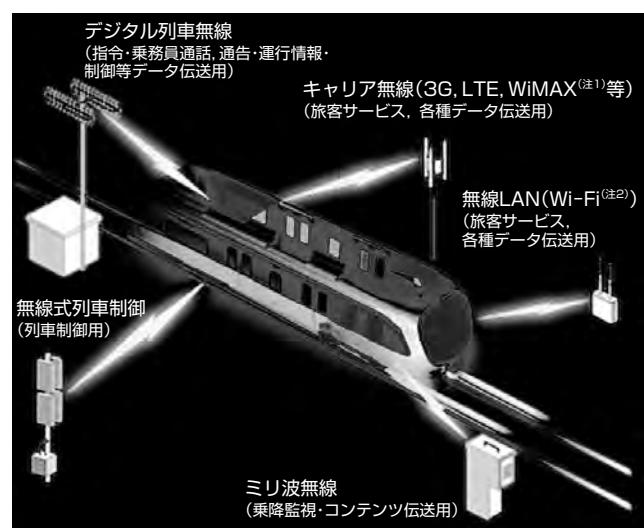
### 2.3 交通情報システム

電力システムとともに、“安全・安定”輸送を実現するのに欠くことのできないのが交通情報システムである。運行管理・信号保安／輸送計画／車両基地・保守支援など幅広いシステムで構成されている。

当社は、信号保安システムで電子連動装置やデジタルATC(Automatic Train Control)システム等を手掛け、ダイヤ作成や乗務員運用計画などの計画系機能を含めた運行管理システムとともに、列車の安全・安定運行や計画・指令業務の負荷軽減、効率化を図ってきた。車両基地では、車両システムの各種試験装置や後に述べる地車間連携システムを活用し、保守員の業務効率化を目指した保守支援システムの提供を行っている。

### 2.4 移動体通信システム

鉄道での移動体通信システムで、代表的かつ重要なシステムに列車無線がある。列車無線は指令員と乗務員間の通話機能から始まり、当社は、新幹線LCXデジタル列車無線システムや在来線デジタル列車無線システムなど数多く



LTE : Long Term Evolution  
WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access  
Wi-Fi : Wireless Fidelity  
(注1) WiMAXは、WiMAX Forumの登録商標である。  
(注2) Wi-Fiは、Wi-Fi Allianceの登録商標である。

図2. 各種移動体通信システム

の納入実績を持つ。また、2000年以降デジタル化による周波数を有効に活用し、通話機能以外に通告伝達や旅客への運行状況提供など、データ伝送アプリケーションを実現している。さらに、ワンマン運転を支援するホーム画像伝送やトレインビジョンシステムの広告コンテンツの配信用にミリ波通信システムやISM(Industry Science Medical)帯無線システムを開発して提供するなど多くの無線システムを持っていている(図2)。

### 3. 鉄道トータルソリューションの取組み

2章で述べた各種システムをICT, IoT(Internet of Things)を活用して結合し、鉄道システムの全体最適化を目指すため、当社では、車両と地上を移動体通信で連携した地車間連携システムとして、列車制御、メンテナンス、エネルギー・環境、旅客サービスの4つのソリューションを推進している(図3)。

#### 3.1 列車制御ソリューション

安全・安定輸送を目指す列車制御ソリューションとして、従来の地上設備を中心としたシステムから、無線を活用した先進システムまで幅広く取り組んでいる。

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列車制御システム(Communications-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。

無線列車制御システムは、列車が自ら位置を検知しその位置を無線で送信、地上では各列車の在線位置から、列車個々の停止限界位置を算出し各列車へ配信する。列車は停止限界位置を受信し、その位置までの防護パターンを生成し走行するシステムである。既にCBTCとして、多くの国・地域で稼働している。国内では、2011年秋に東日本旅客鉄道(株)の仙石線でATACS(Advanced Train Administration and Communications System)が使用開始された。ATACSは、使用する無線周波数帯がCBTCと異なる無線列車制御システムで、運行管理システムを含ま

ない等の違いがある。当社は、このATACSの車両制御装置、無線装置の開発を担当した。2014年には、世界初<sup>(注3)</sup>となる無線による踏切制御を実用化し、使用開始以来、安定稼働している。

当社は、無線列車制御システムの優位性を更に向上させるため、非接触速度センサやCBTC専用無線などの技術開発にも積極的に取り組んでいる。非接触速度センサは、従来のセンサに比べ滑走空転による誤差が小さく、低速域での精度が高く、制御性能の向上や位置補正用地上子の削減等の効果が期待できる。当社のCBTC専用無線は、ISM帯無線でありながら、都市圏の劣悪な電波環境でも耐干渉性に優れており、高い安定性と通信品質を実現している(図4)。

(注3) 2014年12月11日現在、当社調べ

#### 3.2 メンテナンスソリューション<sup>(2)</sup>

“安全・安心”輸送を行うには、土木・軌道・構造建築物設備の状態変化を把握し、維持管理に努める必要がある。当社は、計測車両で鉄道沿線設備の状態を計測・解析する“MMSD”を開発した。計測車両を軌陸車に搭載し、走行するだけで、短時間で高精度な三次元データを計測し、高精度な三次元デジタルマップを生成するサービスを提供している。これによって、土木・建築等の設備の形状変化を詳細に捉えることができる。地上子や信号機など信号設備の自動検出機能を活用し、無線列車制御システム導入前に必要となる線路データ作成の効率化にも寄与できる。

また、鉄道分野ではIoT、センサネットワークやビッグデータを活用した状態監視保全(Condition Based Maintenance : CBM)の取組みが加速化している。当社では、車両の状態変化を、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の研究開発に取り組んでいる。これまで鉄道車両の保守はBM(Breakdown Maintenance)／TBM(Time Based Maintenance)という事後保全／予防保全が主流であった。定期点検で車両搭載機器の不具合を未然に防ぐのがTBM、不具合が発生した後に修理を行うのがBMであるのに対し、車両搭載機器の状態を監視し、不具合の予兆を事前に検出して、修理・修繕を行うのがLMS(CBM)である。列車統合管理システム(TCMS)が収集する各種車両電機品の動作・状態情報を、無線で地上システムへ伝送し活用するシステム基盤の構築を目指している(図5)。

これらによって、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することで、安定した輸送の提供に貢献できると考えている。

#### 3.3 エネルギー・環境ソリューション

鉄道は、環境に優しい公共交通機関であるが、東日本大震災後の電力使用制限などによって、省・創エネルギー化のニーズが増大し、ますます鉄道への期待が高まっている。当社は、製品単体での環境配慮への取組みとともに、低炭



図3. 鉄道トータルソリューション

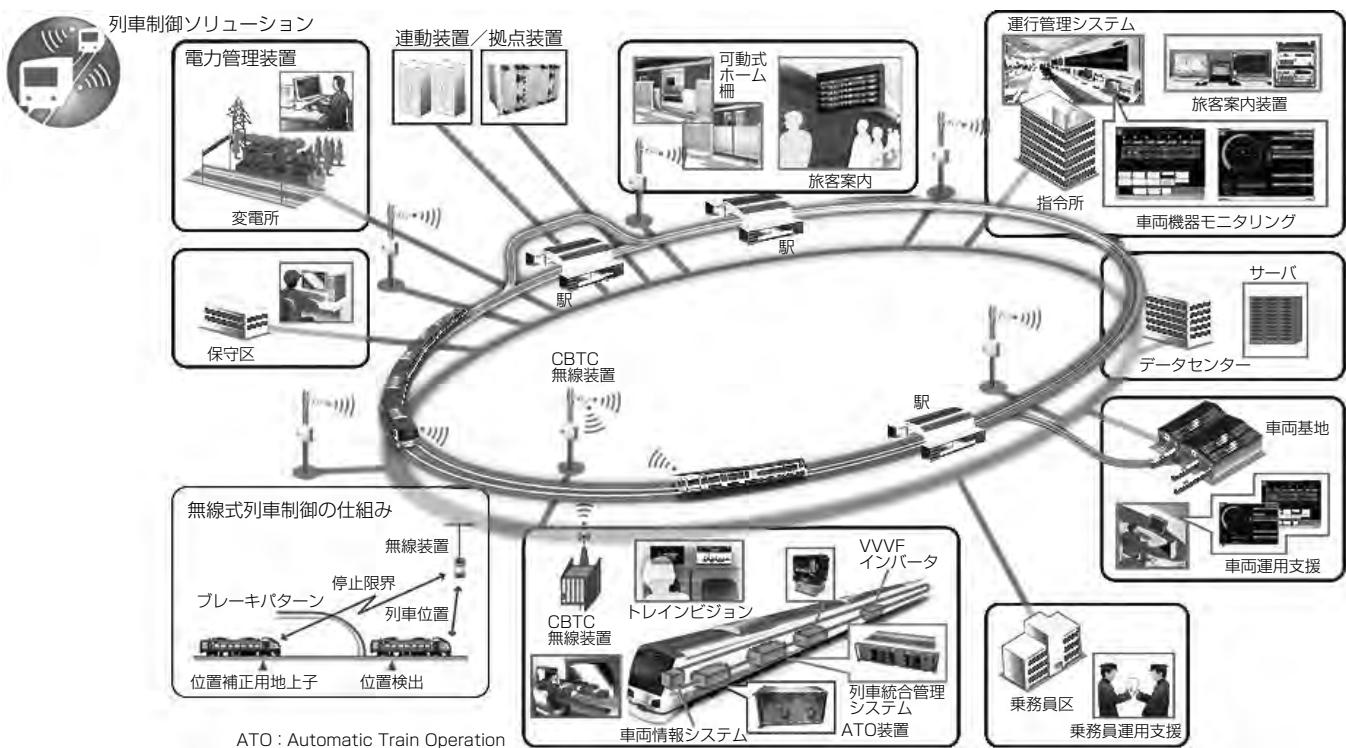


図4. 安全・安定輸送を目指す列車制御ソリューション



図5. LMSのイメージ

素社会のけん引役を担う鉄道のエネルギー全体最適化を目指し、車両・駅・車両基地などで個々の製品が連携したエネルギー管理システム(EMS)や、ICTを活用した路線全体でのエネルギー管理システムを追求している。

車両システムでの機器の効率改善・機能向上の取組みの1つは、推進制御装置や補助電源装置の主回路素子への次世代パワーデバイス、SiC(シリコンカーバイト)の適用である。2014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4)</sup>製品化し、装置の小型・軽量化及び全速

新設・更新計画  
度域での電力回生ブレーキの実現によって、従来製品比40%以上の省エネルギー化を実現した。

また、複数機器の連携制御による改善では、TCMSを活用した編成ブレーキブレンディング制御や、機器稼働タイミング制御の最適化によ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、車両と駅の間での電力融通を実現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を近くの駅負荷で効率的に消費することを狙ったもので、

小容量のコンパクトな装置であるが、高価な回生インバータと同等のメリットを実現する。

さらに、当社では路線全体での電力最適化制御を行うシステムの開発を推進している。省エネルギーを優先したダイヤ作成システムはその一例である。また、先に述べた列車制御ソリューションと連携し、列車の位置や運転状態に応じて変電所の出力電圧をリアルタイムに制御することによって、電車線損失を低減するとともに、車両回生絞込みをなくし、回生エネルギーの有効活用を図るき電力最適化制御

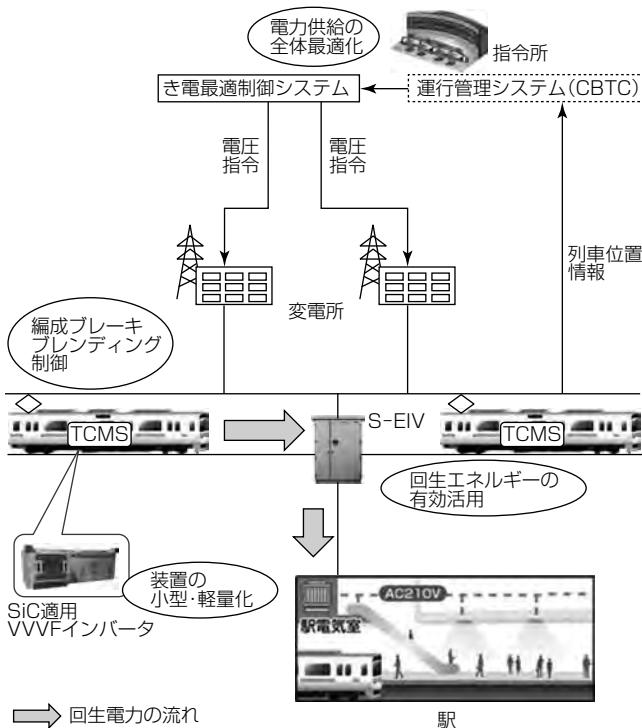


図6. 環境・エネルギー・ソリューションのイメージ

システムを開発している(図6)。

(注4) 2014年4月30日現在、当社調べ

### 3.4 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トレインビジョンである。乗務員の車内放送やLEDによるテキスト表示の案内システムに液晶モニタを用い、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、万人に分かりやすい情報提供を目指している。

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、首都圏における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できていることから、2画面一体メディア表示器の開発を行い、情報の多様化や情報の詳細化に対応している。

最近ではスマートフォンの普及によって、車両内で旅客自らがスマートフォンで様々な情報を入手している。また、トレインビジョンによる情報提供サービスとして、列車の運行情報や広告など、地上からの情報配信を行っている。そこでトレインビジョンとスマートフォンを連携させ、各個人に対してより必要とされる情報を提供する仕組みなど、将来の情報提供についての研究開発にも取り組んでいる。

また、安全サービスとしては可動式ホーム柵の開発や、単なるカメラ監視から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・滞留を検知するセキュリティサービスの開発にも取り組んでいる。

## 4. 今後の展望

今後も、経済成長と環境保全の両立した社会の発展に向け、環境負荷の少ない輸送手段である鉄道の貢献度は、世界規模でますます高まると考える。当社では伸びていく市場に対して、次のような世界各地域の市場戦略と機種戦略の実行に取り組んでいる。

### 4.1 海外市場の攻略

海外市場で欧州は大きな市場でありながら、これまで欧州企業などに参入を阻まれてきた。2014年度に参入を果たしたドイツ鉄道の更新案件を通じ、車両用電機品を中心に、客先の信頼を得てシェアを拡大していくことが重要と捉えている。欧州の次世代型列車制御(Next Generation Train Control : NGTC)への対応や、堅実な需要が見込まれるLRV(Light Rail Vehicle)等戦略機種の開発、東欧を中心に補助電源や推進制御装置を展開するMEDCOM社との協業のほか、欧州でのエンジニアリング拠点の強化も進めしていく。

### 4.2 信号システムの拡大

列車制御ソリューションを構成する信号システムは、成長が期待される分野で、世界各国で注目されている。市場の大きい海外での信号システムを展開するに当たり、鉄道国際安全規格SIL4(Safety Integrity Level 4)に準拠した安全性と信頼性の高いシステムを開発し、NYCTA(New York City Transit Authority)のCBTC 3rdサプライヤー認定に向けてのプロジェクトに取り組んでいる。また、特に都市圏ではモバイルの増大などによって、電波環境はますます厳しくなる。そのため、無線システムには耐干渉性の強化が求められる。当社は、独自技術によって環境に強い無線システムを構築し、高い信頼性を確保している。

## 5. むすび

安全で安定したシステム及び上質な旅客サービスの提供という基本的な要請のほか、環境・省エネルギー化への取組みや設備の削減を含めたメンテナンス性の向上、防犯への期待など、顧客ニーズや社会環境の変化を背景に、鉄道システムへの要請は今後ますます多様化していくと思われる。こうした状況のもと、長い歴史の中で培ってきた技術と最新技術を巧みに融合し、当社製品を世界中の鉄道に拡販して、世界No.1の交通システムメーカーを目指すという強い信念のもと、最新技術を活用した研究開発や製品化を推進し、業界の発展に貢献していく。

## 参考文献

- (1) 国交省ホームページ：鉄道  
<http://www.mlit.go.jp/tetudo/index.html>
- (2) 中島 募：感じる鉄道、日経エレクトロニクス2016年3月号、29~42 (2016)

# 無線列車制御システムの最新技術と今後の展望

明日香 昌\* 小崎元嗣\*\*  
小篠大輔\* 田原一浩\*\*  
河野博行\*\*

Latest Technologies and Future Prospects of CBTC System

Masashi Asuka, Daisuke Koshino, Hiroyuki Kono, Mototsugu Kozaiki, Kazuhiro Tahara

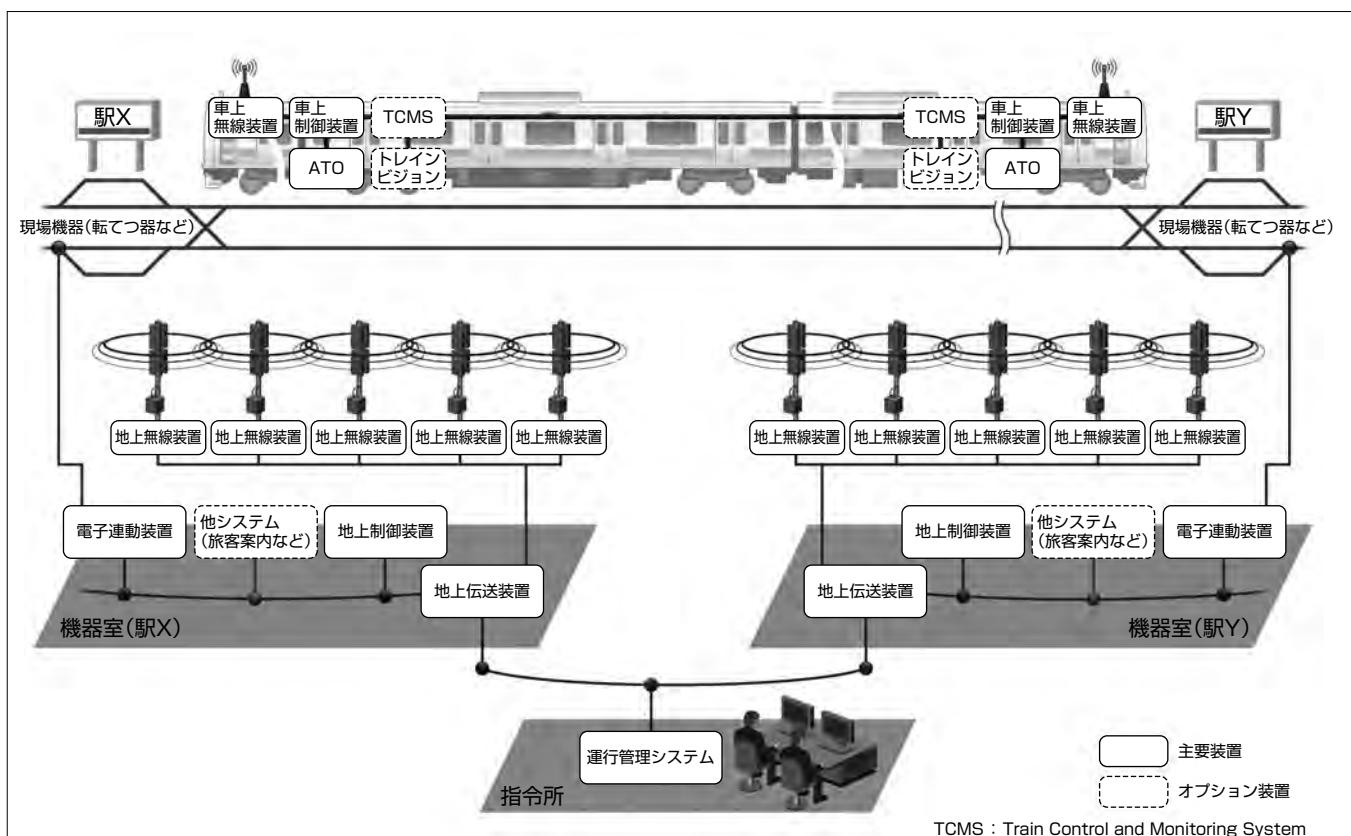
## 要旨

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、無線伝送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列車制御システムの実用化が進んでいる。無線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ため、これまで地上にあった列車在線検知器(軌道回路)が不要となる。このため、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。さらに、従来システムに比べ列車の詳細な位置が管理できるため、列車間隔短縮によって運行高密度化を実現する移動閉そくと呼ばれる列車制御方式を導入できる。

無線列車制御システムは海外ではCBTC(Communications-Based Train Control)と呼ばれ、保安機能に加え、自動列車運転装置(Automatic Train Operation : ATO)や運行管理

システムを統合したシステムとして、IEEEで規格化<sup>(1)</sup>されている。三菱電機はIEEE規格に準拠し、さらに、様々な事業者からの要求に柔軟に対応できるCBTCシステムを開発して市場展開を進めている。当社CBTCシステムの制御装置は、鉄道システム設計で最も高い安全レベルを意味するSIL4(Safety Integrity Level 4)の安全認証を取得済みである。無線装置については、2.4GHz帯における耐干渉性を向上させる独自技術を適用し、都市部の劣悪な電波環境でも、地上・車上制御装置間の伝送品質を確保している。

当社CBTCシステムの市場展開事例として、ニューヨーク市交通局が管理するニューヨーク地下鉄向けのシステムがあるが、現在、その地上制御装置、車上制御装置、電子運動装置の開発を行っている。



## CBTCシステムの標準構成

CBTCシステムの基本構成要素である保安装置(地上制御装置、車上制御装置、電子運動装置)、無線装置、ATO、運行管理システム、地上伝送装置の全てで、当社は実績とノウハウを持っている。これらの融合によって、高機能・高品質なCBTCシステムを提供する。

## 1. まえがき

CBTCシステムは、ロンドンや北京など世界中で約60システムが稼働中である<sup>(2)</sup>。メンテナンス効率化、ライフサイクルコスト削減や運転高密度化の観点から、今後CBTCシステムが世界的に主要な列車制御システムになっていくと考えられる。

本稿では、2章でCBTCシステムの列車制御方式と導入効果を述べる。無線によって列車の状態が確認できることと地上設備による制約が少なくなることから、従来に比べ柔軟で効率的な列車運行が実現できる。3章では、地上・車上制御装置等の保安装置に採用した安全設計について述べる。当社は鉄道安全規格<sup>(3)(4)(5)(6)</sup>に準拠して保安装置を開発し、海外の第三者機関から安全認証を取得した。4章では、CBTC無線装置について述べる。当社CBTC無線装置は、免許不要で運用でき、利便性が高いISM(Industry Science Medical)帯の中でも、2.4GHz帯を採用した。2.4GHz帯は、広い周波数帯域幅と十分な伝搬距離を確保できる一方で、同周波数帯を用いる無線LAN等による列車制御への影響が課題である。そこで、当社独自の技術で情報伝送の信頼性と安定性を確保した。5章では、製品展開の一例を述べる。当社は、3章で述べる保安装置を利用し、ニューヨーク市交通局向けの開発を行っている。

## 2. CBTCシステム

### 2.1 CBTCシステムの列車制御方式

- CBTCシステムで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：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測定によって、車上制御装置が自列車位置を計算する。
  - ②データ伝送(列車位置)：車上無線装置が列車位置情報を地上に伝送する。
  - ③列車在線管理・停止限界作成：車上からの列車位置情報に基づき、地上制御装置が列車位置を管理し、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)：地上無線装置が停止限界を車上無線装置に伝送する。

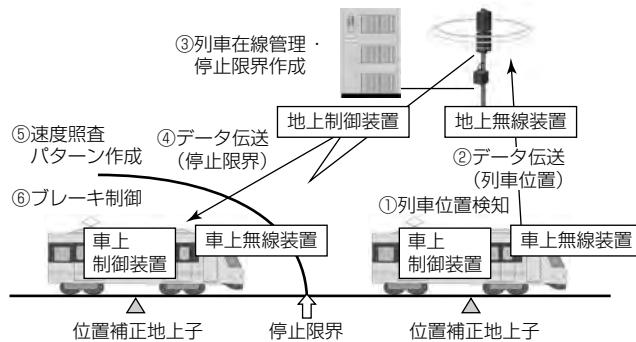


図1. CBTCシステムでの列車制御

- 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。
- ⑥ブレーキ制御：列車速度が速度照査パターンを超えたことを車上制御装置が検知すれば、ブレーキ制御を行う。

### 2.2 CBTCシステム導入の効果

#### (1) 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に設置した軌道回路を維持管理する必要があったが、CBTCシステム導入で軌道回路が不要になり、メンテナンスの効率化を図ることができる。

#### (2) 列車運行の高密度化

従来の列車制御システムでは、停止限界を列車在線検知の単位である軌道回路の境界にしか設定できなかった。これに対し、CBTCシステムでは停止限界を先行列車の後方に設定できるので、従来に比べ列車間隔を短縮できる(移動閉そく方式)。

#### (3) 進路設定・解除の効率化

従来の列車制御システムでは、列車接近時に進路の引き戻しを行った場合、列車が停止するまでの十分な時間は進路の解除を待つ必要があった(接近鎖錠)。これに対し、CBTCシステムでは、車上制御装置からの情報によって列車が停止していることを地上制御装置が検知できるので、短時間で進路の解除が可能となる。

#### (4) 障害発生時の縮退運転の充実

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等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。これに対し、CBTCシステムでは地上設備の制約がない。したがって、複線区間の一方の線路で障害が発生した場合、他方の線路のみを利用して上り・下りの列車運行を続行する単線運転が容易に実現可能となる。

## 3. 保安装置の安全設計

### 3.1 設計手順

当社保安装置は、2014年に海外の第三者機関から鉄道システム設計で最も高い安全レベルを意味するSIL4の安全認証を取得した。その際に適用した、鉄道安全規格に基づく保安装置の設計手順を図2に示す。

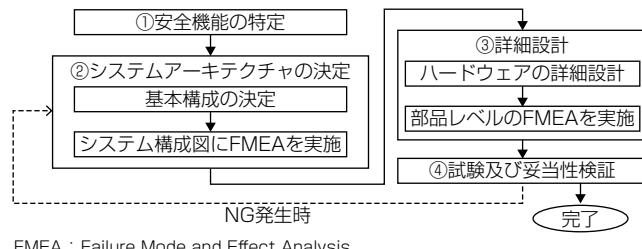


図2. 保安装置の設計手順

- ①安全機能の特定：システムに要求される機能を分類し、安全に関わる機能を特定する。
- ②システムアーキテクチャの決定：鉄道安全規格の手法に基づいて基本構成を決定し、機能ブロックレベルのシステム構成図を作成する。システム構成図に対してFMEAを実施する。
- ③詳細設計：システム構成図をハードウェアの詳細設計に展開し、部品レベルのFMEAを実施する。
- ④試験及び妥当性検証：FMEAで特定した故障に対する診断機能が設計通りに動作することを検証する。

### 3.2 システムアーキテクチャ

当社で採用した保安装置のシステムアーキテクチャの概念を図3に示す。このアーキテクチャでは、A系とB系で並行して同一の安全機能を実行し、最終出力部で両系の制御出力を統合する。各系の処理状態は診断部で比較しており、両系での同時故障が起こる前に、出力を安全側に固定することができる。

### 3.3 情報伝送の安全設計

地上・車上制御装置と無線装置の情報伝送に関する機能配置を図4に示す。図で、保安装置(地上・車上制御装置)は、無線装置を含む通信路で接続されており、伝送する情報の安全性確保のため、制御装置は保安伝送機能、無線装置はアクセス保護機能を持っている。これらは、鉄道保安伝送規格<sup>(6)</sup>に規定された機能である。保安伝送機能は伝送異常(情報の重複、削除、挿入、順序誤り、破損、遅延)に対する防護機能であり、これを実施する装置には安全性が要求される。一方、アクセス保護機能は不正な情報操作に対する防護機能であり、安全性は必ずしも要求されない。

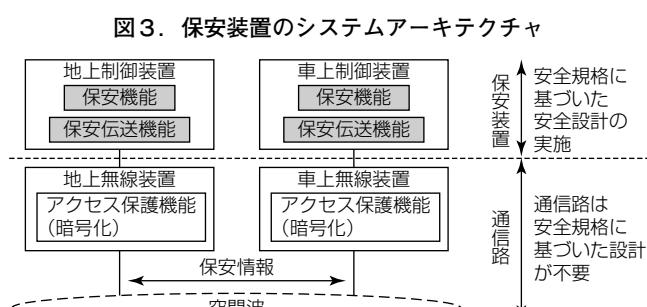
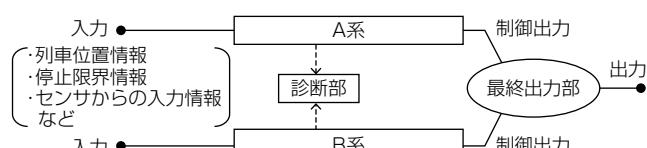


図5. 地上制御装置



図6. 車上制御装置

そこで当社は規格に基づき、保安伝送機能を制御装置で、アクセス保護機能を無線装置で実現した。これによって保安装置の処理負荷を軽減し、保安機能を充実させた。

### 3.4 保安装置

#### 3.4.1 地上制御装置

偶発故障発生時に、システム稼働状態で故障が発生した系の基板交換が可能である。また、他機器とのインターフェースにはEthernet<sup>(注1)</sup>を採用し、汎用性を高めている。地上制御装置の外観を図5に示す。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス株の登録商標である。

#### 3.4.2 車上制御装置

車両への搭載スペースを削減できるコンパクト標準3Uラックを採用した。さらに、相互直通運転やシステムエンジンを容易に実現するため、CBTCシステムに加えて既存列車制御システムにも対応可能なアーキテクチャとした。車上制御装置の外観を図6に示す。

### 4. CBTC無線装置

CBTC無線装置で利用する2.4GHz帯は、免許不要で運用できるため利便性が高い。一方、無線LANやBluetooth<sup>(注2)</sup>といった様々な干渉波の影響が課題である。また、新たな設備の設置、無線サービスの開始、一般無線機器の増加によって変化する電波環境への対処も重要である。当社は、これらの課題に対処するため、耐干渉性を向上させた通信方式を開発するとともに、無線装置に電波環境監視機能を搭載した。

(注2) Bluetoothは、Bluetooth SGI Inc.の登録商標である。

#### 4.1 耐干渉性を向上させた通信方式

##### 4.1.1 干渉回避機能

従来方式と、当社干渉回避機能の概念を図7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、受信側で干渉波と衝突していない信号を選択することで、安定したデータ伝送を行う方式を開発した。

##### 4.1.2 干渉抑圧機能

干渉源が多数存在する電波環境の場合、4.1.1項で述べた干渉回避機能だけでは全ての信号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8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(図の①)。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(図の②)。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、受信信号に係数を掛け合わせて合成することで、受信信号のS/N比を改善する(図の③)。

#### 4.2 電波環境監視機能

当社のCBTC無線装置では、電波環境監視機能を搭載し

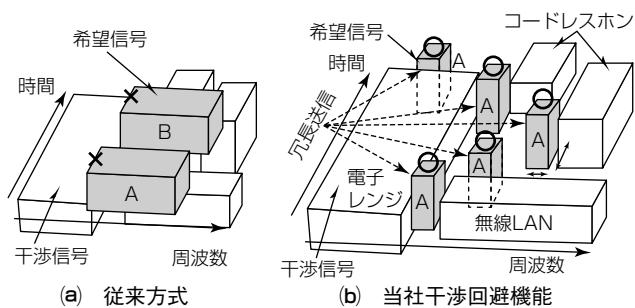


図7. 干渉回避機能の概念図

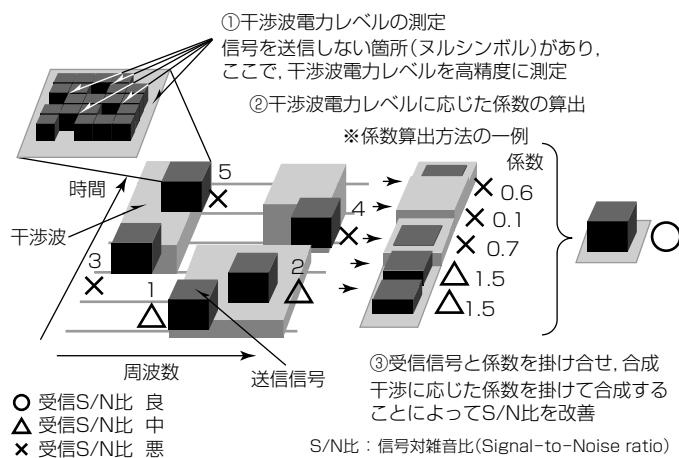


図8. 干渉抑圧機能の概念図

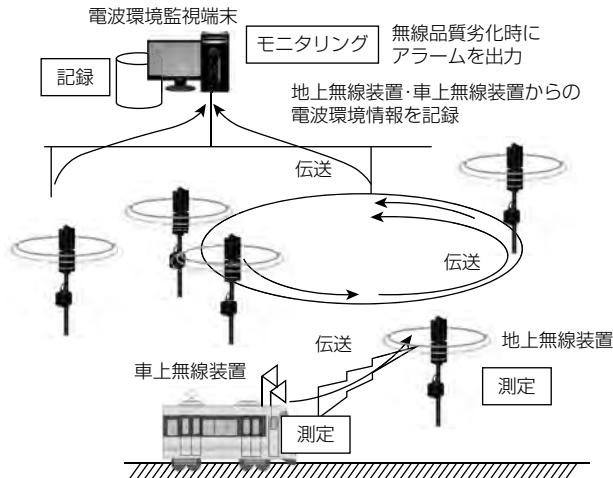


図9. 電波環境監視機能

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、事前対策を可能とする(図9)。

## 5. ニューヨーク市交通局向けCBTCシステムの開発

ニューヨーク市交通局(New York City Transit Authority : NYCTA)が管理するニューヨーク地下鉄は路線長375km規模の路線であり、今後35年間で全線にCBTCシステムを導入することが計画されている。NYCTAでは、競争

促進・長期安定調達を目的として、複数メーカーからのCBTCシステム調達を目指している。調達先として現在2社を認定済みであり、2015年に第3のメーカー候補として当社を選定した。現在、3章で述べた保安装置を適用して、地上制御装置及び車上制御装置を開発中であり、NYCTAの試験設備で要求仕様や安全性への適合性を実証する予定である。また、NYCTAは、CBTCシステムの導入と並行して信号設備の更新を進めており、その中には電子連動装置が含まれている。当社は電子連動装置を2013年に受注し、この製品についても3章で述べた保安装置を適用して開発を進めている。

## 6. むすび

今後の主要な列車制御システムになっていくと考えられるCBTCシステムの最新技術について述べた。さらに、CBTCシステムは、本稿で述べた機能向上以外にも、無線による地上・車上間情報伝送を利用した様々な機能を向上させることができる。例えば、地上から各列車のATO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を実現できる<sup>(7)</sup>。また、海外ではCBTCシステムを利用した無人運転(Unattended Train Operation : UTO)列車の導入が進んでいくことが予想される。今後もCBTC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を提供していくために開発を進める。

## 参考文献

- (1) IEEE STANDARDS ASSOCIATION : 1474.1-2004-IEEE Standard for Communications-Based Train Control(CBTC) Performance and Functional Requirements (2009)
- (2) UNIFE : WORLD RAIL MARKET study forecast 2014 to 2019, Eurailpress (2014)
- (3) EN 50126 : Railway applications - The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety(RAMS) (1999)
- (4) EN 50128 : Railway applications - Communication, signalling and processing systems - Software for railway control and protection systems (2001)
- (5) EN 50129 : Railway applications - Communication, signalling and processing systems - Safety related electronic systems for signalling (2003)
- (6) EN 50159 : Railway applications - Communication, signalling and processing systems - Safety-related communication in transmission systems (2010)
- (7) 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)

# 鉄道車両保守支援システムの最新技術と今後の展望

甲村哲朗\* 瓜田直美\*  
竹内丈志\* 平田知行\*  
辻本典弘\*

Recent Technologies and Future Prospects about Maintenance Supporting System for Railway Vehicle  
Tetsuo Komura, Takeshi Takeuchi, Norihiro Tsujimoto, Naomi Urita, Tomoyuki Hirata

## 要旨

鉄道車両の保守は、これまで事後保全(Breakdown Maintenance : BM)と予防保全(Time Based Maintenance : TBM)の両輪で運用されてきたが、近年は状態監視保全(Condition Based Maintenance : CBM)の導入が検討されている。これら3つの保全の目的は、次のとおりである。

### (1) 事後保全

車両搭載機器の故障発生後に実施する保守を指し、輸送サービス低下の抑止を目的としている。

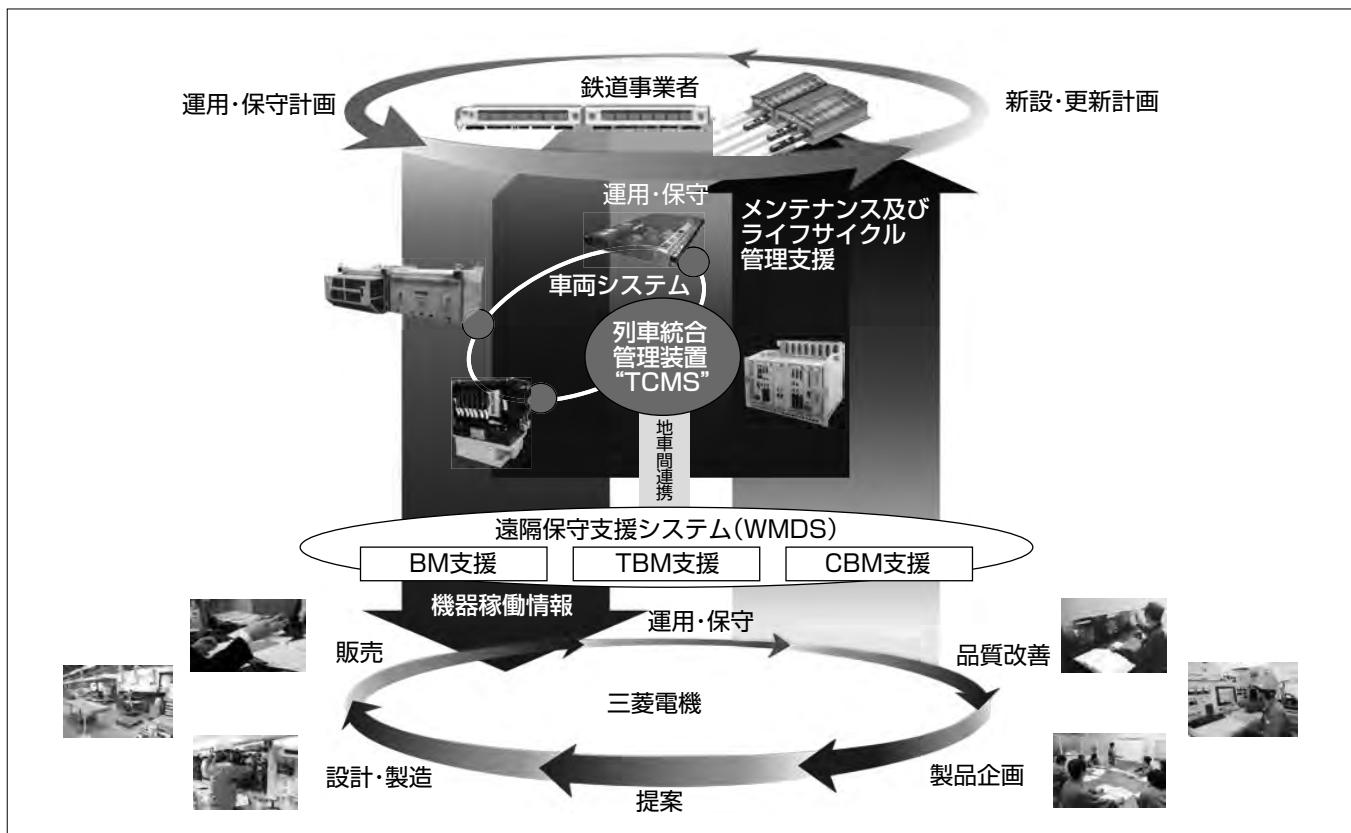
### (2) 予防保全

車両基地における定期点検に相当する保守を指し、故障発生頻度の抑制を目的としている。

### (3) 状態監視保全

車両搭載機器の稼働状態に合わせた保守を指し、機器ごとに保守実施の最適な時期と適切な処置内容を決定することを目的としている。

三菱電機は、乗務員、指令員、検修員に対するBM/TBM支援を、列車統合管理装置(Train Control and Monitoring System : TCMS)の機能として提供してきた。近年は、遠隔保守支援システム(Wayside Monitoring and Diagnostic System : WMDS)を活用した、CBMに向けた取組みも進めている。



## 遠隔保守支援システム

当社は、これまでTCMSを活用した車両搭載機器のBM/TBMの保守支援機能を提供してきた。近年は、無線通信の発達を背景に、TCMSと地車間連携を活用した遠隔保守支援システム(WMDS)を製品化した。今後は、WMDSを用いて車両搭載機器のCBMの保守支援機能を提供し、更なる安全・安定輸送への貢献を目指す。

## 1. まえがき

当初、鉄道車両の保守は、機器の故障発生後に対応するBMで運用されていた。その後、故障発生の抑止を目的に、故障発生前に機器や部品を交換するTBMが導入され、現在ではBMとTBMを併用している。

近年、鉄道車両の高度化に伴い、乗務員、指令員、検修員に対するBM/TBMへの処置も複雑・煩雑化が進んでいる。乗務員や指令員の対応の遅れは、輸送障害発生時の遅延拡大、サービス低下につながる。これに対し、当社はTCMSの機能として、ICT(Information and Communication Technology)を活用した鉄道車両保守支援システムの高度化を進め、BM/TBMで乗務員、指令員、検修員を支援する機能を開発してきた<sup>(1)</sup>。

本稿では、TCMSを活用した鉄道車両保守支援システムの技術変遷と機能例を示すとともに、TCMSとWMDSを活用したCBMに向けた今後の取組みについて述べる。

## 2. 保守支援システムにおける技術変遷

TCMSを活用した鉄道車両搭載機器の保守支援システムは、モニタリング、地車間連携システム、列車統合制御、伝送の大容量・高速化の技術変遷を経て、様々なBM/TBM支援機能を実現してきた(図1)。

この章では、BM/TBM支援機能の実現における技術変遷を述べるとともに、その機能概要を示す。

### 2.1 モニタリング

モニタリングは、車両搭載機器の故障・稼働状況を監視する機能である。

TCMSと伝送可能な車両搭載機器が拡大したこと、編成全体の搭載機器に対して故障・稼働状況を把握できるようになった。これによって、乗務員に対する状態監視機能や故障発生通知機能といったBM支援機能を提供している。

### 2.2 地車間連携システム

モニタリングによって、故障部位の特定と発生事象の把握は容易になった。一方で、車両システムの高度化によって取得可能な情報量が増え、車上の乗務員と地上の指令員の間で音声だけでは正確に情報交換をすることが難しくなった。そこで、地上でも車両モニタリング情報を参照したいというニーズが高まった。

これに対し、携帯電話網やデジタル列車無線等の無線通信を用いて、車両モニタリング情報を地上サーバへ伝送する地車間連携システムを開発し、指令員に対するモニタ画面伝送や故障処置支援といったBM支援機能を提供している。

地車間連携システムを活用することで、地上の指令員、検修員も、車両搭載機器の故障・稼働状況を即時に参照できるようになり、故障復旧の早期化に寄与している。

### 2.3 列車統合制御

TCMSは、機器のモニタリングから制御伝送機能に加え、列車全体の統合制御へと役割が拡大し、鉄道事業者及び車両メーカーからの車両最適制御の要望に対応してきた。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いる。

これによって、乗務員が出区点検時に要する時間の短縮及び検修員が車両定期点検時に要する時間の短縮に寄与している。

### 2.4 伝送の大容量・高速化

最新のTCMSでは、車両内に高速のEthernet<sup>(注1)</sup>伝送を適用し、車両機器の状態情報のリアルタイム収集、故障時の詳細情報の収集が可能となった。さらに、地車間連携に用いる無線通信ネットワークは、通信事業者によるLTE(Long Term Evolution)やWiMAX(Worldwide interoperability for Microwave Access)などの高速な汎用公衆無線サービスが充実し、自営で無線通信ネットワークを構築する必要がなくなった。ただし、使用が容易な反面、セキュリティ面での

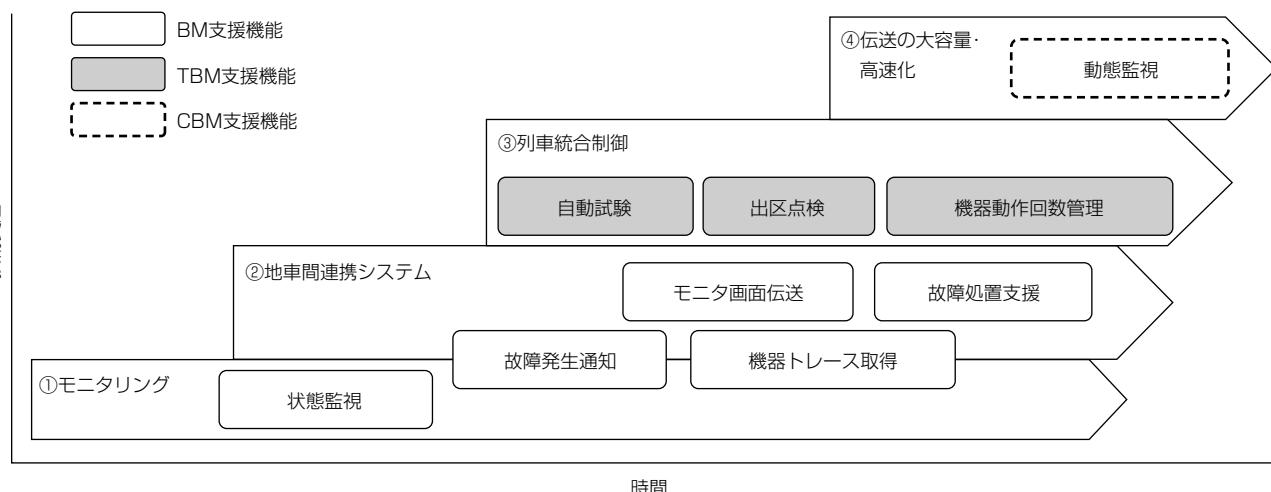


図1. TCMSを活用した保守支援システムの技術変遷

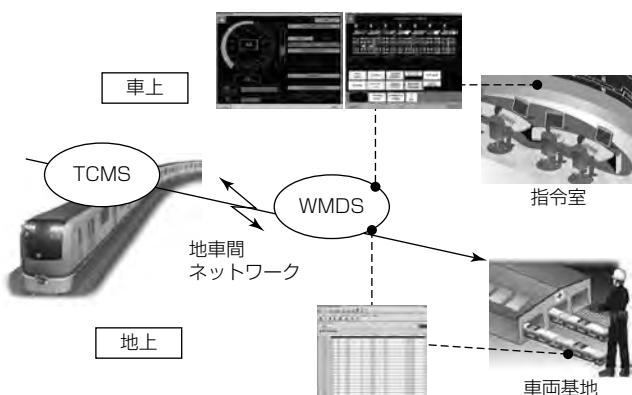


図2. WMDSを活用した保守支援イメージ

課題がある。この課題については、地車間連携部分にVPN (Virtual Private Network)通信機能を適用し、セキュリティ対策を行っている。

これらの技術を活用し、近年、TCMSと地車間連携を活用したWMDSを製品化した(図2)。WMDSは、モニタ画面伝送や故障処置支援に加え、地上で車両搭載機器の詳細稼働データを取得可能としている。これによって、機器の状態分析・故障解析を高度化する。また、地上からTCMSを経由することで、車両搭載機器のパラメータ変更が可能となり、パラメータ変更作業の省力化につながる。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。

### 3. 保守業務を支援する機能

当社がTCMSやWMDSを用いてこれまでに提供してきたBM/TBM支援機能について述べる。

#### 3.1 故障発生通知機能

TCMSでは、車両搭載機器の稼働状況を監視し、機器の動作状態、故障有無を運転台モニタへ表示している。故障発生を検知した際は、運転台モニタに警告表示、アラーム鳴動することで乗務員に故障発生を通知している。さらに、地車間連携システムを用いて自動的に地上システムへ故障発生を通知する機能を実現している。

これによって、乗務員からの申告を待たず、指令員、検修員が故障内容を確認し、障害復旧作業の迅速化に寄与している。

#### 3.2 モニタ画面伝送機能

地車間連携によって、運転台モニタ画面に表示している各機器の動作状態等の情報を地上システムでも参照できる。運転台モニタ画面を構成する各種機器データを地上システムへ送信することで、地上に居ながら運転台モニタ画面と同じ情報を確認できる(図3)。

従来は、乗務員と指令員の通話で車両情報の確認が必要であったが、指令員が同じ運転台モニタ画面を見ながら故障部位の特定、復旧支援が可能となり、故障の早期復旧、ダウンタイムの短縮に寄与している。

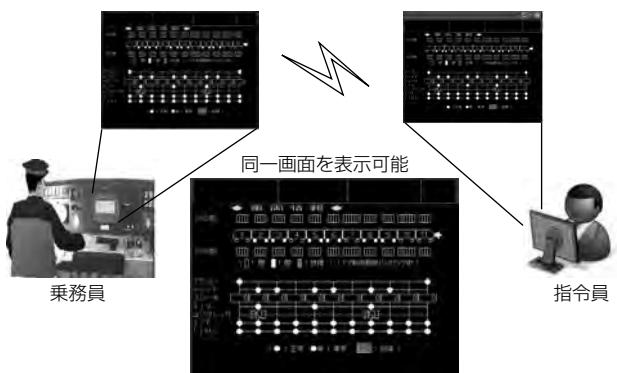


図3. モニタ画面伝送機能の動作イメージ

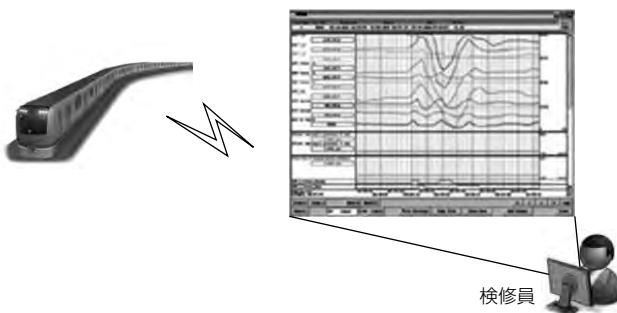


図4. 機器トレース取得機能の動作イメージ

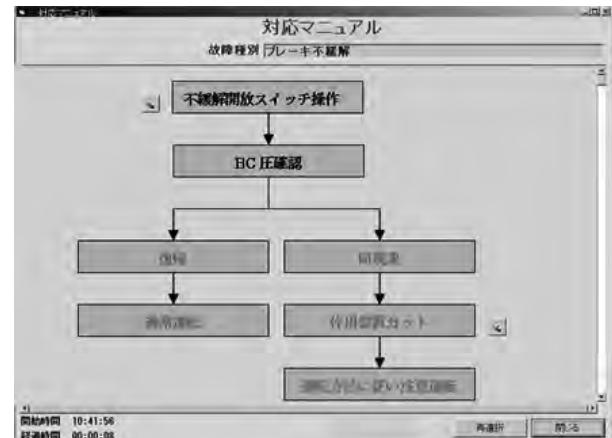


図5. 故障処置支援機能の動作イメージ

#### 3.3 機器トレース取得機能

車両搭載機器が記録している故障発生前後の動作データを、TCMSが車両搭載機器から収集し、地上システムから遠隔で取得可能としている(図4)。

従来、故障発生原因を解析するためには、車両が車両センターに戻るのを待ち、検修員が車両に行って直接、記録データを取得する必要があった。これに対し、故障発生時に遠隔で記録データが取得でき、故障解析の早期着手、故障原因の早期究明に寄与している。

#### 3.4 故障処置支援機能

故障発生時に故障発生通知(3.1節)と連動し、復旧対応マニュアルを運転台モニタ画面に加え、地上システムに表



図6. 機器動作回数管理機能の動作イメージ

示する。これによって、故障内容に応じた復旧方法を指令員が乗務員への的確な指示できるよう支援し、早期復旧、ダウンタイムの短縮に寄与している(図5)。

### 3.5 機器動作回数管理機能

TCMSでは、車両搭載機器との伝送によって、車両搭載機器(ドア、ブレーキ、コンプレッサ等)の動作回数を積算・表示している(図6)。動作回数があらかじめ設定された回数以上となった場合は、運転台モニタ画面に警告表示し、機器交換を促す機能を実現している。

将来的には、機器動作回数を地上システムへ伝送して管理することでTBMの効率化、その先にはCBMにも活用可能であると想定している。

## 4. 今後の展望

鉄道車両保守支援システムは、収集・蓄積可能な機器稼働データの大規模化を背景に、鉄道車両保守の更なる省力化・効率化に向けた、機器の状態分析・故障解析の高度化のニーズが高まると想定している<sup>(2)(3)</sup>。

WMDSに対しては、車両のメンテナンス及びライフサイクルの最適管理を支援する機能が求められる。これによって、TBMにおける検査効率化、機器ごとに最適なタイミングで適切な処置を実施できるCBMを実現することができる。

### 4.1 動態監視によるCBMの実現

2.4節で述べた伝送の大容量・高速化の拡大によって、機器ごとの稼働状態を常時監視する動態監視が可能となった。

現在主流のTBMでは、稼働中の機器に対して一律に検査周期を設け、点検・交換を実施している。これに対しCBMでは、機器ごとに適切なタイミングで交換可能となる(図7)。これによって、機器寿命を最大化しつつ、故障発生によるダウンタイムを最小化できると考える。

今後は、CBMの実現に向け、WMDSが収集した車両搭載機器の稼働情報等を統計的に解析し、故障の特性や故障

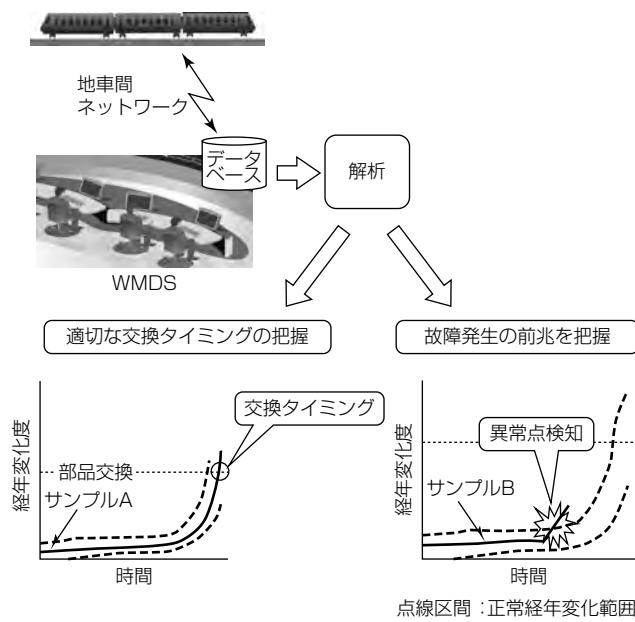


図7. CBMの実現イメージ

の前兆を把握する取組みを進める。

### 4.2 検査業務の省力化

動態監視の活用によって、CBM以外にもTBMで定期点検業務の省力化に寄与できる。機器ごとの動態監視で蓄積したデータから、定期点検時に似通った負荷状況又は環境下のデータを抽出し、このデータの健全性を確認することで、定期点検結果として代用していくことを検討する。

## 5. むすび

地車間連携の拡大を背景に、TCMSとWMDSを活用した鉄道車両保守支援システムの最新技術と今後の展望について述べた。

CBMの活用によって、車両のメンテナンス及び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できると考える。“走る・止まる・制御する”を1社で実現できる当社の強みを活用し、推進装置やブレーキ制御装置などを含めた車両システム全体として、CBMの実用化に向けた技術開発に取り組んでいく。

## 参考文献

- (1) 竹山雅之, ほか: 車上 - 地上間連携による情報システムの動向, 三菱電機技報, 80, No.12, 797~800 (2006)
- (2) 木村尚史: 交通システムの変遷と将来展望, 三菱電機技報, 88, No.9, 518~521 (2014)
- (3) 中島 募: 感じる鉄道, 日経エレクトロニクス2016年3月号, 29~42 (2016)

# 低炭素社会を支える 鉄道エネルギー・環境ソリューション

堀内謙二\*  
宮川雅彦\*\*  
岡田万基\*\*\*

*Energy and Environment Solutions for Railroad Supporting Progress Toward Low-carbon Society*  
Kenji Horiuchi, Masahiko Miyakawa, Yuruki Okada

## 要旨

2015年末、パリで開催されたCOP21<sup>(注1)</sup>では、世界の気温上昇を抑える取組みに多くの国が合意し、パリ協定が採択された。従来にも増して地球環境負荷低減の努力が求められつつある中、三菱電機は、“鉄道エネルギー・環境ソリューション”の実現に取り組んでいる<sup>(1)</sup>。これは、鉄道のエネルギー管理を構成する4つの分野を次のとおり設定し、個別機器の高効率化に加えて、ICT技術の活用と機器・設備間の協調・連携によって、鉄道システム全体でエネルギー活用の最適化と消費低減を目指す取組みである。

### (1) 車両エネルギー管理(TEMS)

業界に先駆けて開発を進めてきたSiCパワーモジュール適用による車両用電機品の効率改善・機能向上、蓄電池駆動電車及び複数機器の連携制御によるエネルギー効率改善

など、列車を対象とした取組みを実施している。

### (2) 路線エネルギー管理(REMS)

列車が発生する回生エネルギーを路線全体で更に有効活用することを目指した取組みとして、駅舎補助電源装置“S-EIV”，及び、き電最適制御システムがある。

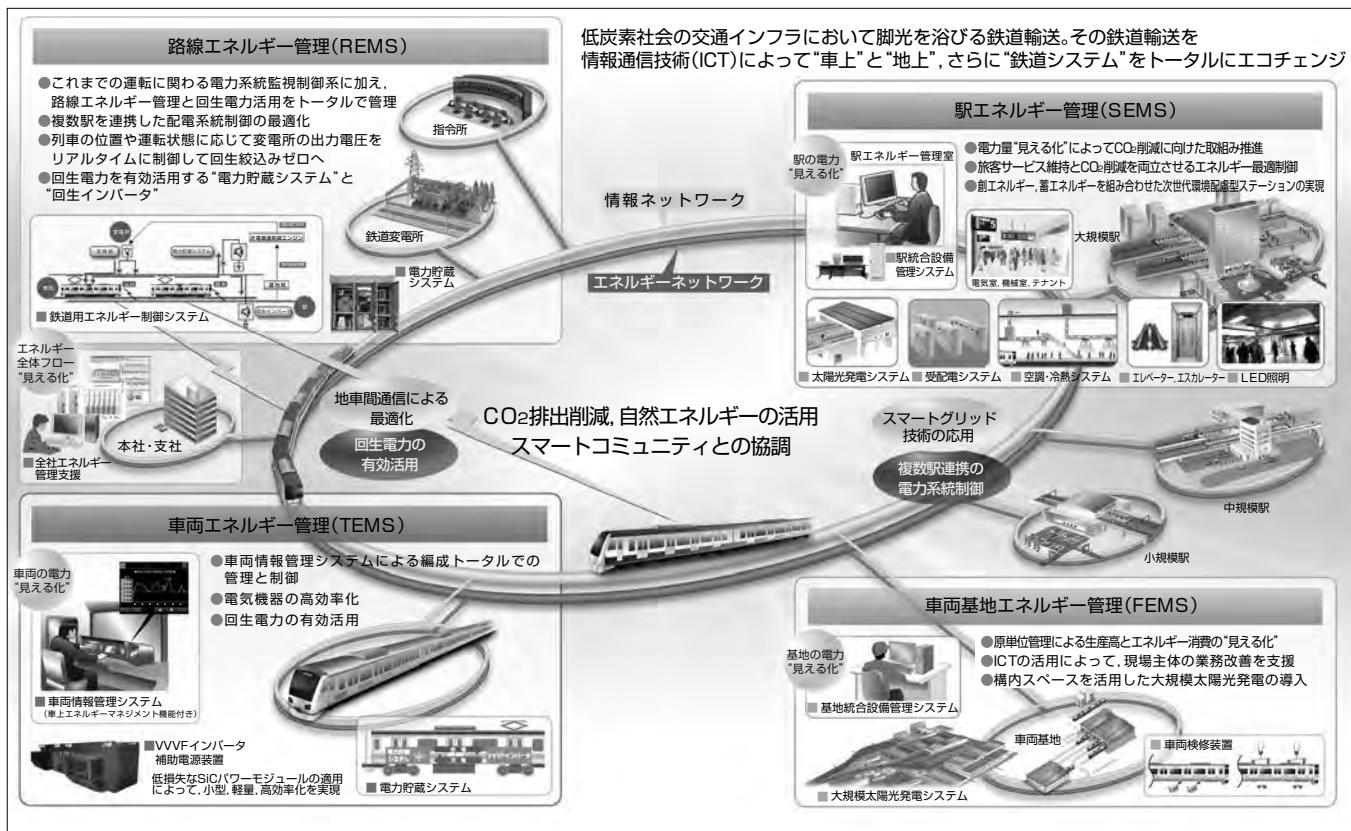
### (3) 駅エネルギー管理(SEMS)

エネルギー管理システム導入による駅のエネルギーの見える化、デマンド制御等に取り組んでいる。

### (4) 車両基地エネルギー管理(FEMS)

車両基地の検査装置・機器など、検修ライン全体を対象としたエネルギー管理の取組みを実施している。

(注1) 国連気候変動枠組条約第21回締約国会議



## 鉄道エネルギー・環境ソリューション

当社は、低炭素社会の牽引(けんいん)役を担う鉄道のエネルギー全体最適化を目指し、車両エネルギー管理、路線エネルギー管理、駅エネルギー管理、車両基地エネルギー管理の各分野で、創エネルギーと蓄エネルギーを実現する新たなエネルギー技術とICT技術を活用したトータルソリューションを提供していく。

## 1. まえがき

鉄道は、輸送量当たりのCO<sub>2</sub>排出量が少なく元来環境に優しい輸送機関であるが、高まる社会からの環境負荷低減要求を受け、よりエコで将来にわたって持続可能な鉄道を目指す研究開発が進んでいる。当社は、鉄道エネルギー・環境ソリューションとして、列車、駅、車両基地それぞれとその組合せである路線全体の4つのエネルギー管理分野で、並行して取組みを進めている。

本稿では、当社が取り組んでいる鉄道エネルギー・環境ソリューションの取組みについて述べる。

## 2. 鉄道エネルギー・環境ソリューション

鉄道における電力需要は、車両を走行させるための運転エネルギーと地上施設を運営するための付帯エネルギーで構成される。総需要の多くを占める運転エネルギーの低減は古くからの課題であり、当社は、基幹製品である車両機器の高効率化・制御の高度化、回生ブレーキシステムの高度化、それらを全体制御する列車統合管理システムの開発によって省エネルギー化を進めてきた。また、地上設備では、回生電力の有効活用のため、余剰回生電力を地上側で吸収するための回生インバータを開発し、エネルギー利用率の向上を図ってきた。

これらの省エネルギー技術・製品は、その時々のエネルギー消費低減に寄与してきたが、鉄道システム全体から見ると部分的な取組みにとどまっていた。一方、このソリューションが目指すのは、電力システムにおけるスマートグリッドと同様に、鉄道システム全体でエネルギーの需要と供給の最適化を実現することである。近年急速に発展するIoT(Internet of Things)やM2M(Machine To Machine)と呼ばれるICT(Information and Communication Technology)技術を活用し、時々刻々変化する需要と供給の関係をリアルタイムに把握し、協調連係させることで、鉄道システム全体の最適化を実現する新たなエネルギー管理システムの構築が可能となる。

このコンセプトに基づき、図1に示すように4つのエネ

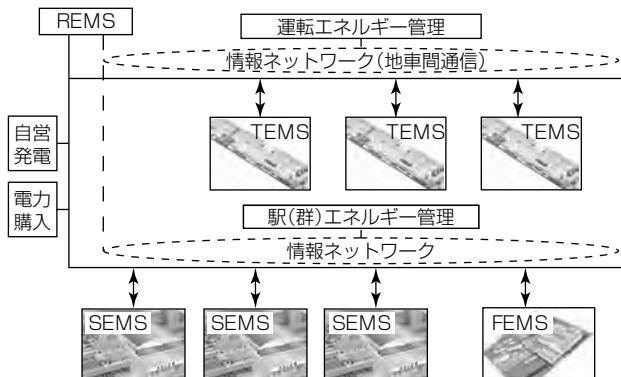


図1. エネルギー管理の4分野

ルギー管理の分野で研究開発を進めてきた。

## 3. エネルギー管理システムへの取組み

この章では4つのエネルギー管理分野(システム)での研究開発の取組み状況及び市場への適用状況や得られた成果等について述べる。

### 3.1 車両エネルギー管理システム(TEMS)

TEMS(Train Energy Management System)は、列車のエネルギー最適化を行うシステムである。このシステムでの取組みは、主に、電気機器の効率改善・機能向上と、複数機器を連携制御することによる改善の2方向から進めている。

電気機器の効率改善・機能向上として、2つのデバイスの適用システムを営業車両に適用している。1点目はSiC(シリコンカーバイド)パワーモジュール適用推進制御装置と高効率全閉形誘導電動機を組み合わせた主回路システムであり、2点目は、蓄電デバイス適用による回生電力の利用拡大や、非電化区間における低騒音化、低排ガス化である。

SiCパワーモジュール適用推進制御装置と高効率全閉形誘導電動機を組み合わせた主回路システムの事例としては、小田急電鉄株での1000形更新車両への投入がある<sup>(2)</sup>。図2に示すとおり、1000形更新車両(1編成4両)に、当社製の直流1,500V架線対応の“フルSiCパワーモジュール適用VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ装置”が採用され、2015年1月から投入された。3.3kV/1,500A定格対応の大容量フルSiCパワーモジュールを適用した鉄道車両用インバータ装置の採用は世界初<sup>(注2)</sup>であり、低損失の特長を活用し、従来車両比で消費電力量40%の低減、従来装置比で体積・質量とも約80%の低減を実現した。なお、これらの詳細は、この特集号の論文“SiCパワーモジュールの主回路素子への適用技術”(本号31ページ)で述べる。

また、蓄電デバイス適用システムの事例は、東日本旅客鉄道(株)でのEV-E301系車両への投入である<sup>(3)</sup>。図3に、EV-E301系車両及び電力変換装置の外観を示す。EV-E301は、2008年から開発を実施した蓄電池駆動電車試験



図2. 1000形更新車両とVVVFインバータ装置



図3. EV-E301系車両と電力変換装置

車両“NE-Train”の成果に基づき、2014年3月に投入されたもので、これによるメリットは次のとおりである。

- (1) 図4で示すように、電化区間では架線から、非電化区間では蓄電池からの給電で走行するため、直通運転が可能となり、乗客の利便性が向上する。
- (2) 非電化区間でも電車と同性能になることから、従来気動車比で加速性能が向上する。
- (3) 非電化区間でも回生エネルギーの回収と再利用、低騒音化と排ガスレス化が可能となる。

複数機器を連携制御した改善では、列車統合管理システム(TCMS)を活用した編成ブレーキブレンディング制御や機器稼働タイミング制御最適化による省エネルギー機器制御の提供に加え、地車間連携ネットワーク(無線通信)を活用して編成ごとの電力データ等を取得し、“車両エネルギーの見える化”にも取り組んでいる。複数機器を連携制御した新たな取組みについては、この特集号の論文“列車統合管理システムの最新技術と今後の展望”(本号19ページ)で述べる。

(注2) 2014年4月30日現在、当社調べ

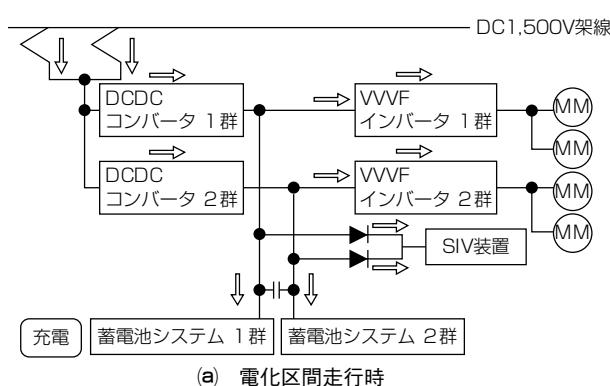
### 3.2 路線エネルギー管理システム(REMS)

REMS(Railway Energy Management System)は、路線全体のエネルギー最適化を行うシステムである。列車の回生エネルギーは、VVVF車の普及と車両用インバータのSiCパワーモジュール適用とともに年々増加する傾向にある。これに伴い、直流電車線を通じて加速中の列車に融

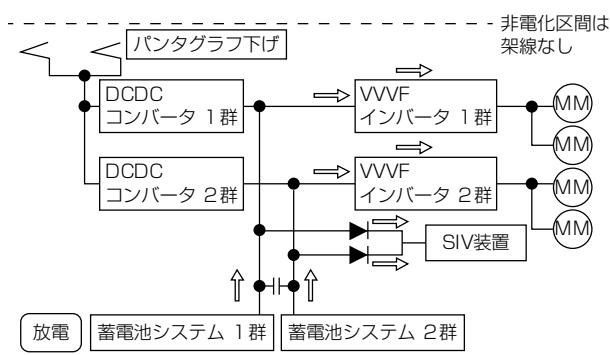
通できずに破棄されるエネルギーも増加している。したがって、この列車間で融通できずに余剰となる回生エネルギーを有効活用することが、路線全体の更なる省エネルギー化を実現するための課題となる。ここでは、列車の運動エネルギーを供給する、き電系統におけるエネルギーの最小化・最適化を目的とする代表的な装置とシステムについて述べる。

#### 3.2.1 駅舎補助電源装置S-EIV

S-EIV(Station Energy Saving Inverter)は、列車が駅に停止する際に発生する回生エネルギーの余剰分を交流電力に変換し、駅舎の電気設備に供給することで省エネルギー化を図る装置である。S-EIVによる余剰回生エネルギーフローを図5に、製品仕様を表1に示す。列車がブレーキをかけて回生エネルギーが発生する直近場所の駅舎に設置し、交流電力に変換して活用するため、送電損失が少なく効率よく余剰回生エネルギーの地産地消が可能となる。次にS-EIVの製品化の歩みを表2に示す。製品開発に当たり、プロトタイプ機によるフィールド検証を2012年8月から12月まで実施した。ここで得た知見を、製品開発にフィードバックするとともに装置の機能と省エネルギー効果の確認を行った<sup>(4)</sup>。その後、2014年6月に製品1号機を納入し、1日当たり約600kWhの省エネルギー効果を確認している<sup>(5)</sup>。その後、複数の鉄道事業者に納入して実績を重ねるとともに製品開発を継続し、2016年2月には従来比で設置面積を約40%削減し、地絡検出回路の搭載など



(a) 電化区間走行時



(b) 非電化区間走行時

DC : Direct Current, SIV : Static Inverter, MM : Main Motor

図4. 走行時の主回路動作

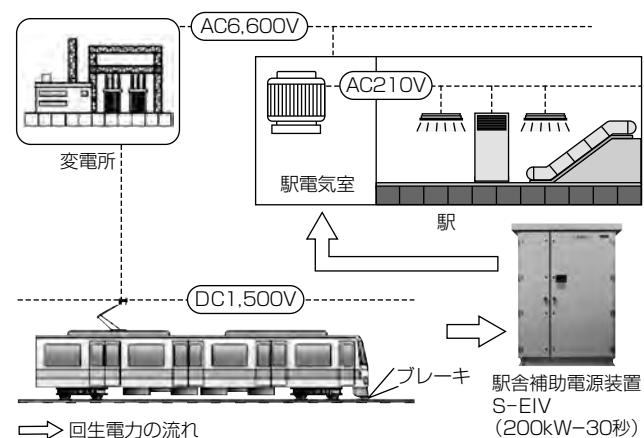


図5. S-EIVによる余剰回生エネルギーフロー

表1. S-EIVの仕様

定格容量	200kW 30秒通電, 2分30秒休止
入力電圧	DC1,500V DC750V DC600V
出力電圧	AC210V, 3相, 50/60Hz
冷却方式	自冷

表2. S-EIV製品化の歩み

時期	主な事柄
2012年8～12月	プロトタイプ機によるフィールド検証
2014年6月	製品1号機納入
2016年2月	小型高機能タイプ製品納入

の機能を強化した小型高機能タイプの製品を納入した。今後も、製品ラインアップの拡充を進めるとともに広く国内外の鉄道事業者にS-EIVの導入を促進し、地球環境負荷低減に貢献していく。

### 3.2.2 き電最適制御システム

現在、開発を進めているき電最適制御システムは、列車の位置や運転状態に応じて変電所の出力電圧をリアルタイムに制御し、電車線損失の低減と回生エネルギーの有効活用を図るものである<sup>(6)</sup>。き電最適制御システムの全体像を図6に示す。列車統合管理システムから現在の走行位置や電力需給(必要電力量又は回生可能電力量)に関する情報を情報通信ネットワークを介し、き電最適制御システムに伝送する。き電最適制御システムは、列車間の回生電力融通を最大限に活用し、変電所の供給電力量を削減する最適な出力電圧になるよう電圧制御変電所を制御する。この電力シミュレーションを、大都市圏の過密線区を想定した路線モデルで実施した。その結果、従来は回生電力の融通先がないことによって熱として破棄されていた回生絞込み電力量を最大80%削減し、変電所からの供給電力量を最大5%削減できることを確認した<sup>(7)</sup>。今後も、ICT技術の活用による車両側の技術開発と連携し、き電最適制御システムとその関連機器の技術開発を進め、路線全体の更なる省エネルギー化の実現に向けて貢献していく。

### 3.3 駅エネルギー管理システム(SEMS)

SEMS(Station Energy Management System)は、駅のエネルギー最適化を行うシステムである。最近の駅ナカ施設の増加や地下鉄冷暖房設備などで、駅の照明、空調設備などの付帯用電力は増加の傾向にあり、これらの省エネルギー化も重要課題である。空調・照明等の諸設備を最新省エネルギー機器(高効率空調、LED照明など)に更新することに加え、駅設備ごとの最適制御を実施することで、快適なサービスと省エネルギーの両立を図る駅設備管理システムを納入している。また、駅の規模、立地条件に適した太陽光発電の導入が進められており、これらの再生可能エネルギーを安定的・効果的に利用するために、電力貯蔵

などの新たなエネルギー機器を含めた各種スマートグリッド技術を適用することで、エネルギー最適化を進めている。

最近では、駅ごとのエネルギー最適化から発展させ、各駅のデマンドレベルを監視して複数駅全体で協調することで、全体最適にするシステムにも取り組んでいる。

### 3.4 車両基地エネルギー管理システム(FEMS)

FEMS(Factory Energy Management System)は、車両基地(車両工場等を含む)のエネルギー最適化を行うシステムである。車両基地で稼働している多くの装置・機器設備をPLC(Programmable Logic Controller)及びネットワークを活用することで設備管理を高度化し、メンテナンスの度合い高、消費エネルギー等を管理することで、車両基地全体のエネルギー最適化に貢献することができる。各装置・設備の稼働状態、検修業務の進捗、消費エネルギー等の情報を収集してデータベース化し、エネルギー原単位管理を導入することによって、検修業務の効率化を図っている。

## 4. むすび

鉄道システム全体のエネルギー最適化に向けて、当社が取り組んでいる鉄道エネルギー・環境ソリューションへの取組みについて述べた。

地球温暖化防止に向けた、活発な国際動向及び東日本大震災以降厳しさを増したエネルギー供給事情を背景に、低炭素社会の実現に向けた努力がますます重要になると考えられる。当社は、これまで蓄積した幅広い技術力を活用し、今後の低炭素社会を支えるインフラとしてますます重要性を高める鉄道システムの発展に貢献するため、引き続き開発に取り組んでいく。

## 参考文献

- (1) 四方 進：鉄道トータルエネルギー・環境ソリューションへの取組み、三菱電機技報、86、No.9、507～510 (2012)
- (2) 白木直樹、ほか：蓄電池駆動電車主回路システム、鉄道サイバネ・シンポジウム論文集、51、536 (2014)
- (3) 中口勝己、ほか：DC1500V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、No.225、10～14 (2015)
- (4) 奥田 亘、ほか：駅舎補助電源装置(S-EIV)の開発－プロト機によるフィールド検証－、JREA、56、No.4、50～53 (2013)
- (5) 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)
- (6) 松村 寧、ほか：路線全体の回生エネルギー有効活用、三菱電機技報、86、No.9、528～531 (2012)
- (7) 列車回生電力融通技術、三菱電機技報、88、No.1、31 (2014)

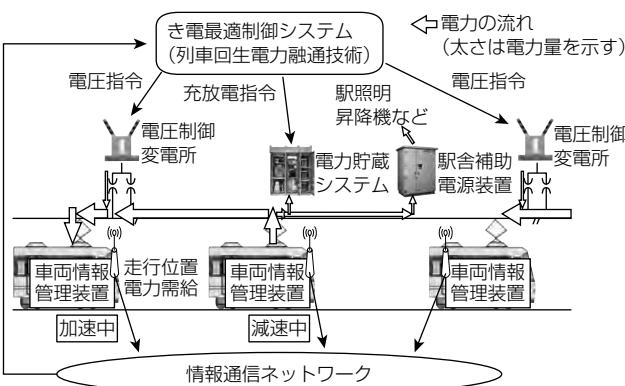


図6. き電最適制御システムの全体像

# 列車統合管理システムの最新技術と今後の展望

甲村哲朗\* 瀧川義史\*  
安東永昇\*  
岡田万基\*

Latest Technologies and Future Prospects of Train Control and Monitoring System

Tetsuo Komura, Eisho Ando, Yuruki Okada, Yoshihito Takigawa

## 要旨

鉄道車両における列車統合管理システム(Train Control and Monitoring System : TCMS)は、安全性向上と乗客サービス向上のために、機器の監視や制御だけでなく、省エネルギー走行を実現する機能、地上設備との通信(地車間通信)を活用した保守支援機能など、多岐にわたる機能が求められている。近年では、これらの機能要求に加え、鉄道事業者からTCMSに対して、次の要求事項がある。

### (1) 國際規格への準拠

車両伝送方式として、固定編成内通信にはIEC 61375-3-4で標準化されるECN(Ethernet Consist Network)、固定編成間通信にはIEC 61375-2-5で標準化されるETB(Ethernet Train Backbone)に適用すること。

### (2) 機能安全認証の取得

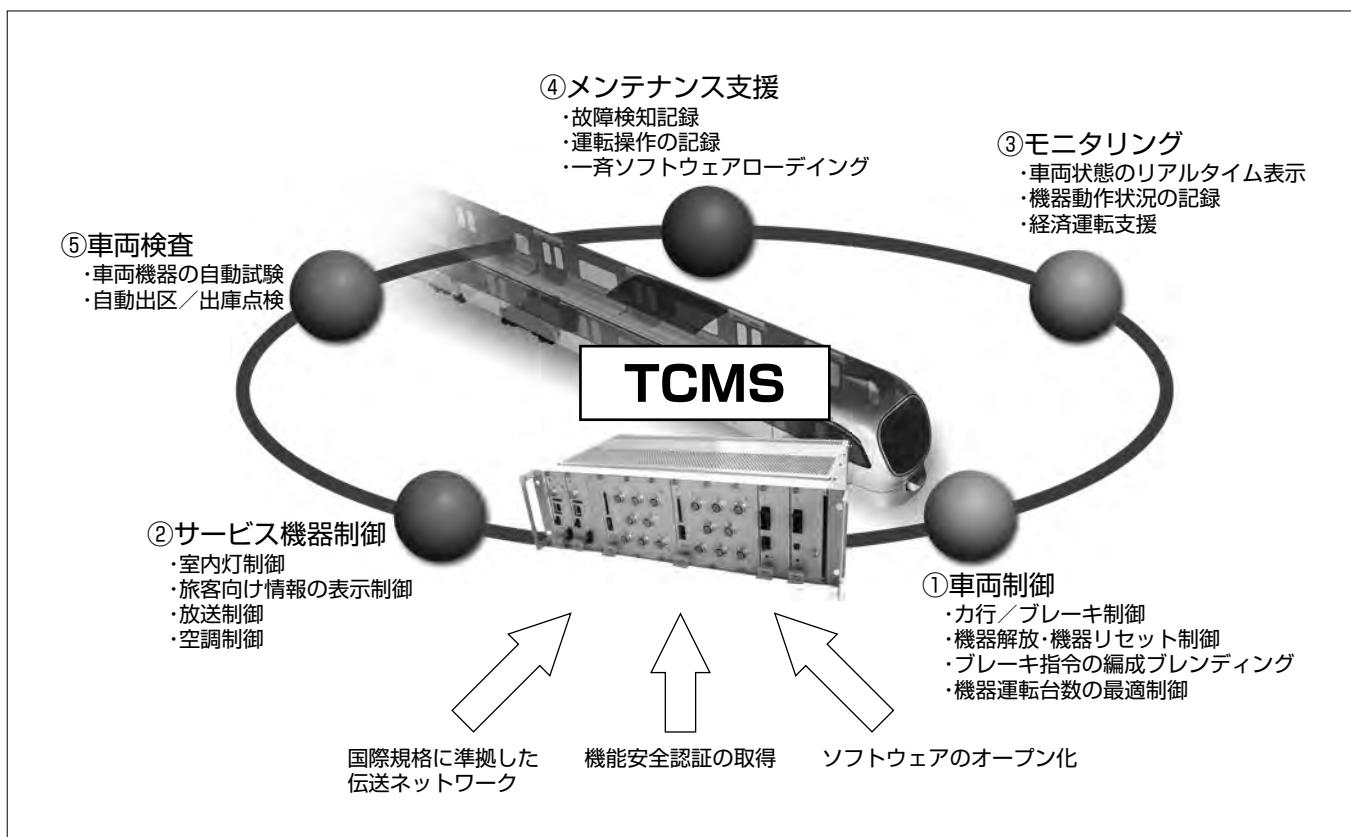
力行やブレーキ制御など車両制御に対して適正な安全レベルを確保するため、機能安全認証レベルSIL2(Safety Integrity Level 2)を取得すること。

### (3) ソフトウェアのオープン化

TCMSのソフトウェア変更が鉄道事業者自身で実施可能な仕組みを提供すること。

三菱電機では、これらの要求を満足するTCMSとして、普及・標準化されたEthernet<sup>(注1)</sup>をTCN(Train Communication Network)に適用したTCMSを開発した。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。



## 三菱電機のTCMS

当社では、TCMSのパイオニアとして第1世代のモニタ装置以降、市場ニーズに応えるTCMSを開発、進化させてきた。最新のTCMSでは、近年の鉄道事業者からの様々な要求に応える機能を提供し、安全・安定輸送への貢献を目指す。

## 1. まえがき

当社は、1979年に鉄道車両向けTCMSを京都市交通局に納入以降、市場ニーズに応じてシステムを進化させてきた。これまでに国内市場で多数の納入実績を持ち、海外市場でも積極的にビジネスを展開している。

本稿では、当社のTCMSの技術変遷、最新技術、今後の展望について述べる。

## 2. TCMSの技術変遷

### 2.1 第1世代(1980年～)：モニタシステム

モニタシステムは、各車に搭載された伝送端末装置によって、車両内の各機器の動作監視、車内案内表示装置や空調装置等の乗客サービス機器の遠隔制御などの機能を実現している。これらの機能によって、乗務員と検修係員への業務支援及び車両運用と検修作業の効率化を実現した。

### 2.2 第2世代(1990年～)：車両情報制御システム

車両情報制御システム(Train control Information management System : TIS)は、モニタシステムに制御指令伝送機能(運転台から各車への制御指令の伝送機能)を追加し、これまで制御指令信号ごとに列車内に引き通していたケーブルを伝送化することで、車両間配線の削減による車両軽量化と自動車上試験による保守の省力化を実現した。

### 2.3 第3世代(1995年～)：車両情報統合管理システム

車両情報統合管理システム(Train Integrated Management System : TIMS)は、従来、リレーや車両配線による車両回路で各装置が独立して実現していた制御機能(コンプレッサ制御、パンタ制御など)をマイクロプロセッサ上のソフトウェア論理とシリアル伝送に置き換え、車両全体として機能の統合・向上を図った。これによって、車両の部品数や配線数の削減による車両軽量化を実現するとともに、車両システムとして機能の最適化を行った。

### 2.4 第4世代(2015年～)：列車統合管理システム

列車統合管理システム(TCMS)は、情報技術の進展によって高性能化・高機能化が進み、車両全体の情報を統括し、車両単独でなく列車としての制御、省エネルギー化、地上装置との連携など車両に不可欠なものとなっている。このため、国内外の鉄道事業者、鉄道車両メーカーはTCMSを車両の核となる重要なシステムと位置付けており、次に挙げる要求事項の重要性が高まっている。

- (1) 海外市場展開に向けたTCN国際規格(IEC 61375)への準拠
- (2) 制御機能の安全性確保を掲示するための機能安全認証レベルSIL 2の認証取得
- (3) 製品出荷後の仕様変更をユーザー自身で対応可能とするためのソフトウェアオープン化

当社では、これらを基本的な装置要求仕様とし、車両シ

ステム設計の短納期化要求への対応や、地車間ネットワークを活用した地上からの列車運用支援機能に対応した最新のTCMSを開発した。

## 3. TCMSの最新技術

### 3.1 TCMSのシステム構成

Ethernet(100BASE-TX)の高速伝送を活用し、分散制御方式から中央集約制御方式にシステム変更を行い、リアルタイム性を損なわず列車全体制御を実現した。システムの特徴を次に示す。

- (1) 演算機能を中央装置(CCU)に集約し、編成内で冗長化
- (2) 伝送ネットワークにEthernetを採用し、さらに、リンクネットワーク及びデュアルホーミング構成として冗長化

従来システムでは車両間伝送はアーケネット伝送(～10Mbps)を用い、狭い伝送帯域で効率的にリアルタイム伝送可能なプロトコルを適用し、中央装置及び端末装置のCPU基板で処理していた。一方、中央装置及び端末装置の機器伝送は主にRS485伝送を使用しているため、中央装置及び端末装置にプロトコル変換機能が必要であり、RS485基板でプロトコル変換を行っていた。このため、アプリケーション演算は、車両間の伝送帯域制約及び車両間伝送と機器伝送のプロトコル変換による伝送遅延が発生する。このような環境下でも制御指令のリアルタイム性を確保するために、先頭車両の中央装置と各車両の端末装置で機能分担する分散制御方式を採用していた。

TCMSでは車両間伝送と機器伝送をEthernet化(100Mbps)することでプロトコル変換をなくした。また、伝送速度が速いため端末装置から先頭車両の中央装置に制御機能を移しても、車両制御や機器制御は運用上問題ない。このため、各車両の端末装置はパケット転送機能等と伝送機能に特化したCN(Communication Node)とし、全車両の制御機能、演算機能は、中央装置に集約した。なお、機器伝送でRS485伝送が必要な場合、CNではEthernet伝送とRS485伝送のプロトコル変換を行う(図1)。

システムを構成する各装置は、国内／海外を問わず鉄道事業者からの小型化要求に応え、3Uサイズ・フロントアクセスの装置として開発した。特に海外では、運転室及び客室内ロッカールーム19インチラックに3Uサイズで機器を収容する方式が主流である(図2)。

### 3.2 ネットワークの国際規格への準拠

TCMSによるモニタリング機能、制御機能の多様化及び地車間通信機能によって、伝送速度の高速化・大容量化が必要であり、国際規格IEC 61375に準拠し、グローバルスタンダードとなっているEthernet伝送(100BASE-TX 100Mbps)を採用した。

国際規格で列車用データ伝送TCNのアーキテクチャは

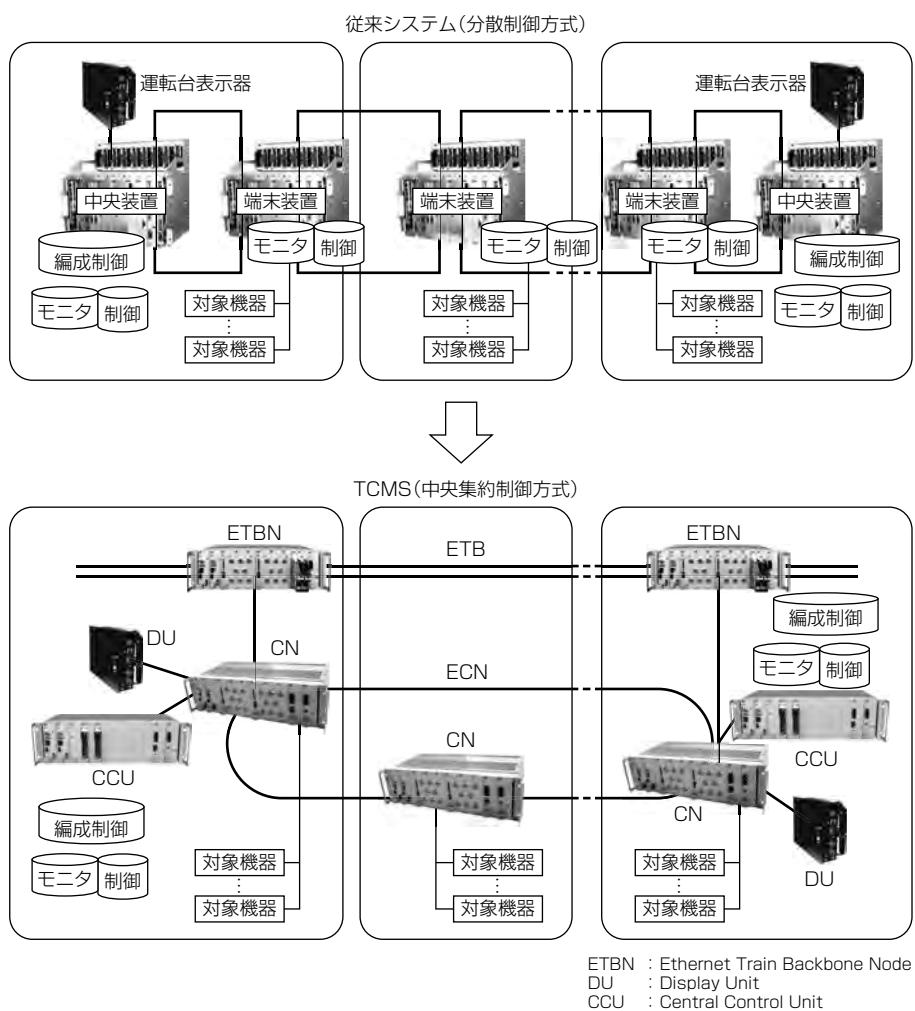


図1. 従来システムとTCMSの比較

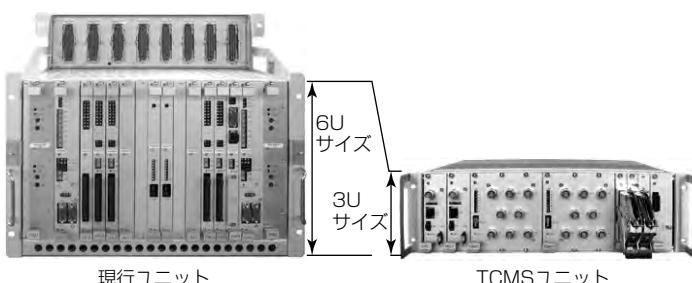


図2. 現行ユニットとTCMSユニットの比較

固定編成間伝送であるETBと固定編成内伝送であるECNの2階層構造となっている(図3)。国際規格IEC 61375と当社仕様の対比を表1に示す。当社TCMSのTCNは、IEC 61375で標準化されるETBとECNを適用した。伝送プロトコル(フォーマットを含む)については、ETB及びECN双方に、IEC 61375-2-3で標準化されるTRDP(Train Real time Data Protocol)を適用した。本来、ECNにTRDPの適用は必須ではないが、ETBで採用するTRDPをECNにも水平展開する流れがあり、市場動向に対応して汎用性を確保した。

### 3.3 機能安全認証レベルSIL 2への適合

IEC 62425で、システムの安全度水準を表す指標SILはレベル1からレベル4までの4段階で定められている。ソフトウェアの比重が高まってきた列車制御に対して、近年、特に海外の鉄道事業者は機能安全を要求する傾向があり、TCMSに対して適正な安全レベルが求められている。このため、当社は第三者認証機関による審査を受け、TCMSの機能安全評価を実施してSIL 2認証を取得した。

#### 3.4 ソフトウェアのオープン化

製品出荷後の機能変更は、基本的には有償での対応となるため、ソフトウェア変更も鉄道事業者自身で対応する場合が多い。ソフトウェアオーブン化要求に対しては、1998年に故障データベース機能を開発し、それ以降の海外向けシステムに標準で搭載している。故障データベースは、故障に関する機能をプログラムから切り離してデータベース化したもので、地上端末上でのパラメータ設定によって次の変更が可能である。

- (1) 故障検知論理
- (2) トレースデータに記録する信号の種類
- (3) 故障名称
- (4) 運転台画面に表示する故障処置ガイダンスの内容
- (5) 故障レベル(記録のみ、故障画面表示など、検知後の処理レベル)

TCMSでも、これらの考えを踏襲し、地上端末上でのパラメータ設定による変更を可能としている。さらに、TCMSではこれまでのプログラミング言語を使用したソフトウェア開発に加え、PLC(Programmable Logic Controller)ツールを使用した開発環境を適用した。PLCツールを適用して開発する対象は、リレーや車両配線による車両回路で実現していた車両制御論理及び従来はデータベースで変更していた故障検知論理とした。

従来、車両回路によって実現していた車両制御論理をTCMSのソフトウェアに置き換えることで、車両配線や部品数が削減され、車両の軽量化につながる。そのため、TCMSへの車両制御論理の取り込みが積極的に行われている。これらの車両制御論理の置き換えに、親和性が高く等価的な論理を作成することができるPLCツールを使用することで、ソフトウェアのホワイトボックス化にもなる。

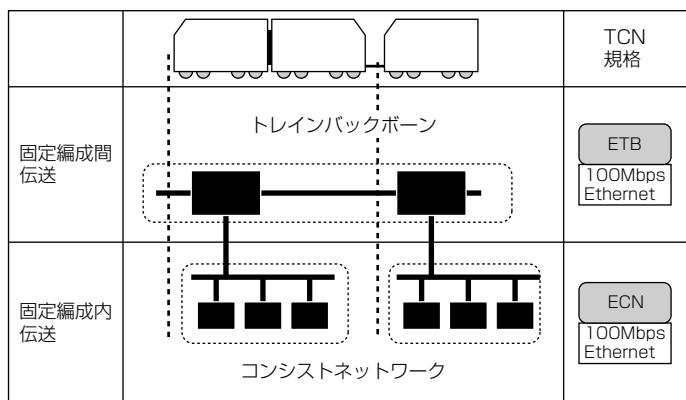


図3. TCNのアーキテクチャ

表1. 国際規格と当社仕様の比較

階層	IEC 61375の規定		当社仕様	
	固定編成間	固定編成内	固定編成間	固定編成内
アプリケーション	事業者ごと	IEC 61375-2-4で制定予定	ユーザー開放を考慮したアプリケーション	
アプリケーションプロファイル		規格化なし		
コミュニケーションプロファイル	IEC 61375-2-3		IEC 61375-2-3 TRDP準拠	
OSIモデル7～5層/アプリケーション層/プレゼンテーション層/セッション層				
OSIモデル4層/トランスポート層	IEC 61375-2-5 ETB	IEC 61375-3-4 ECN	IEC 61375-2-5 ETB準拠	IEC 61375-3-4 ECN準拠
OSIモデル3層/ネットワーク層				
OSIモデル2層/データリンク層				
OSIモデル1層/物理層				

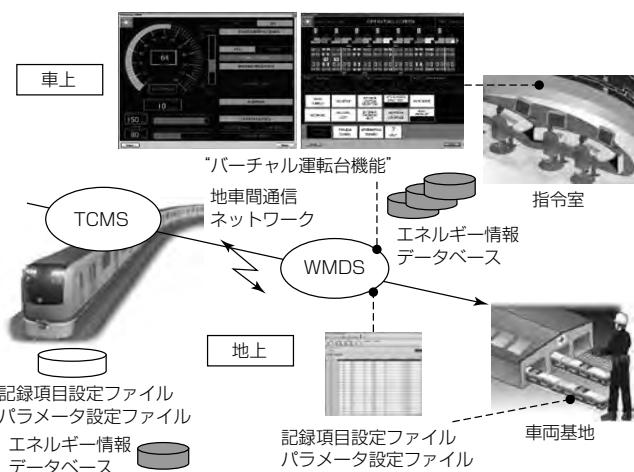


図4. WMDSを活用した列車運用支援機能イメージ

故障検知論理についても、PLCツールを適用することで、鉄道事業者による故障検知論理の変更を容易に可能としている。

### 3.5 地車間ネットワークを活用した列車運用支援

TCMSと地上側のWMDS(Wayside Monitoring and Diagnostic System)の連携によって、今後、更なる列車運用支援機能が可能になる。地上で運転台表示器の状態を再現する“バーチャル運転台機能”や、地上から車両のパラメータを設定する“リモート設定機能”に加え、列車ごとのエネルギー情

報データベースを基に実績ランカーブと計画ランカーブの評価を行い、新たな計画ランカーブを作成する“省エネルギー走行支援機能”への活用等が挙げられる(図4)<sup>(1)(2)</sup>。

### 4. TCMSを中心としたネットワークによる統括管理

鉄道車両に搭載する主要電機品(TCMS、推進制御装置、ブレーキ装置、保安装置等)を1社で担当できる当社の強みを最大限に活用し、各車載機器が持つ情報をネットワークでTCMSに集約し、統括管理して制御に活用することで、次のような附加価値を提供する。

#### (1) 省エネルギー化

- ①推進制御装置、ブレーキ装置との連携を活用したモーター高効率運転及び回生ブレーキの性能向上
- ②自動運転装置、推進制御装置、主電動機のノウハウを活用し、運転士に対して省エネルギー運転を支援。TCMSが走行位置に応じて、省エネルギーランカーブ、目標速度を運転台表示器に表示
- ③補助電源装置の特性を活用し、並列同期運転の軽負荷時の休止制御を用いた補助電源装置の高効率化

#### (2) 保守性の向上

- ①TCMSから複数の機器の車上試験を同時に実施することによる保守時間の短縮
- ②TCMSに機器の長期的な状態情報(漏れ電流、接触器の動作回数、ブロワーの動作回数等)を蓄積し、そのデータを基に各機器の交換アラームを表示する等の予防保全

### 5. 今後の展望

今後は、ネットワークによる統括管理に加え、各電機品の機能分担を見直し、編成全体としてTCMSを中心とした電機品の機能分担の最適化を進めていく。さらに、電機品間の機能融合、統括制御による機種開発を推進する。

### 6. むすび

列車統合管理システムの技術変遷、最新技術と今後の展望について述べた。今後は、主要電機品を全て製造できる当社の強みを最大限に活用し、市場ニーズに対して最適かつコストパフォーマンスの高いシステムに進化させ、更なる鉄道の安全・安定輸送に貢献していく。

### 参考文献

- (1) 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)
- (2) 木村尚史:交通システムの変遷と将来展望, 三菱電機技報, 88, No.9, 518~521 (2014)

# トレインビジョンの最新技術と今後の展望

知平雅仁\*  
稻葉行俊\*

Latest Technologies and Future Prospects of Train Vision System

Masahito Chihira, Yukitoshi Inaba

## 要旨

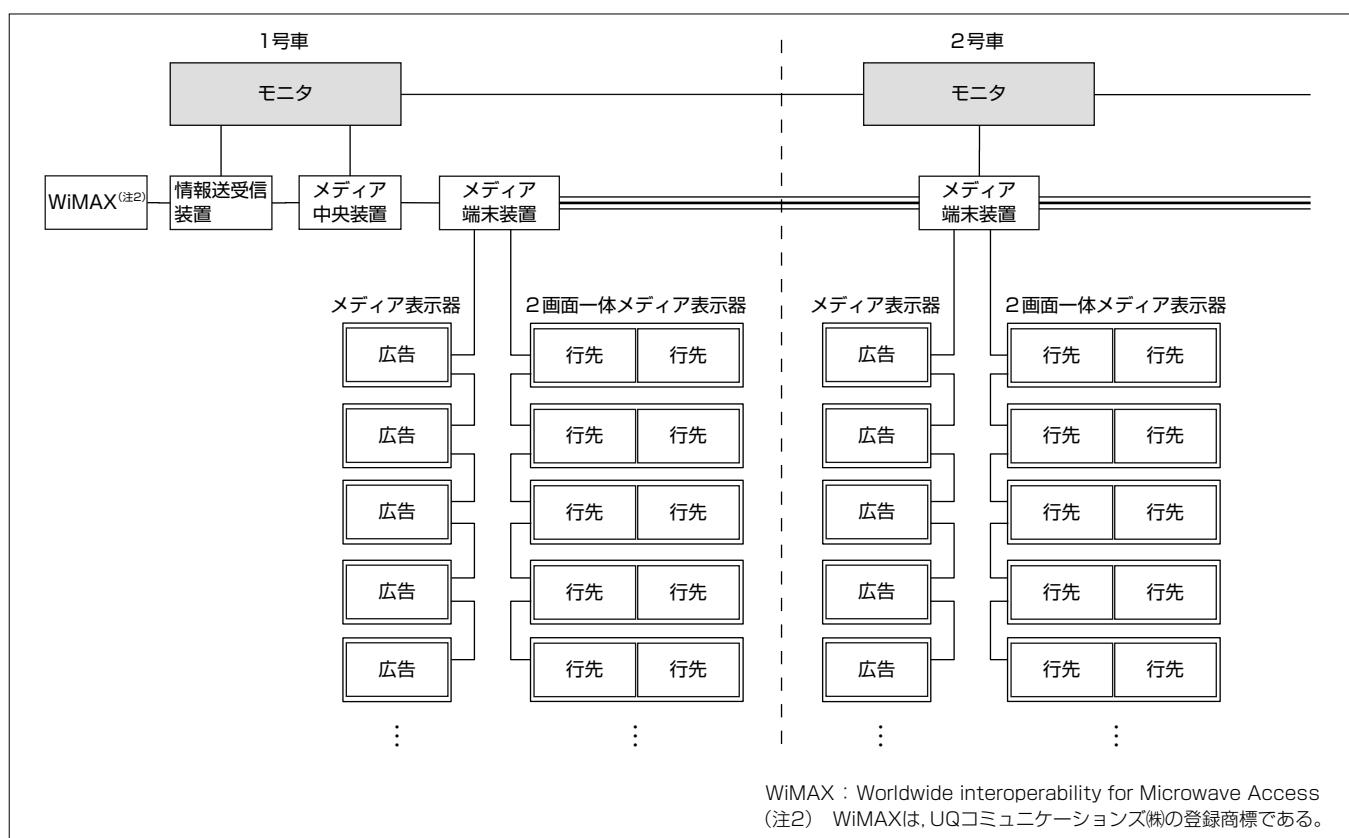
トレインビジョンシステム(Train Vision System : TVS)は、車両扉上に設置したLCD(Liquid Crystal Display)表示器に運行に関する情報や広告コンテンツ等を表示する車内情報提供システムとして、2002年にJR東日本・山手線E231系へ採用されて以来、首都圏を中心に全国の鉄道事業者で広く導入されてきた。

TVSは、現在までに第1世代TVSから第4世代TVSへと発展してきた。第1世代TVS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ある。第2世代TVSは車両間のメタル線にEthernet<sup>(注1)</sup>を使用することで実現したデジタル映像システムである。第3世代TVSは第2世代TVSをベース

に、広告表示は地上デジタル放送に合わせてハイビジョン化を行い、行先案内はより乗客に見やすい案内を目的にアニメーション表示を可能にした。行先案内では、分かりやすい画面デザインと継続したユニバーサルデザインへの取組みが評価され、国際ユニバーサルデザイン協議会(International Association for Universal Design : IAUD)が主催する“IAUDアワード2013”で、金賞を受賞した<sup>(1)</sup>。

第4世代TVSについては2014年から開発に着手し、2015年10月以降出荷の新規案件に対して順次適用している。行先案内は2画面一体表示が可能となり、広告表示は複数画面連動表示などの多様な構成が可能になっている<sup>(2)</sup>。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス株の登録商標である。



## 第4世代TVSのシステム構成

情報送受信装置は、地上装置からWiMAXを経由して行先・広告コンテンツをダウンロードする。メディア中央装置は、編成に必要な行先・広告コンテンツを保持する。メディア端末装置は、車両に必要な行先・広告コンテンツを保持する。また、モニタから受信する車両情報に基づき、メディア表示器へ行先・広告の表示を指令する。メディア表示器は、行先・広告コンテンツを保持し、メディア端末装置からの表示指令に従つてコンテンツを表示する。

## 1. まえがき

第4世代TVSは、東京2020オリンピック・パラリンピックに向けて、多言語案内の拡張と多様化するデジタルサイネージへの対応を目的に開発した。

行先案内は、メディア表示器、2画面一体メディア表示器から選択できる。また、広告表示(デジタルサイネージ)は、従来の画面ごとの表示だけでなく、複数画面を使用した多画面連動表示も可能である。さらに、駅間に依存した広告や企業PRなどを、2画面一体メディア表示器のうちの片側へ、行先案内の合間に表示することが可能である。

本稿では、第4世代TVSの特長である、表示器のバリエーション、行先案内、広告表示、省エネルギー・省スペース化について述べ、最後にTVSの今後の展望を述べる。

## 2. 第4世代TVSの特長

### 2.1 表示器のバリエーション

第3世代TVSでは、表示器のバリエーションは17インチワイドのみとなっていた。第4世代TVSでは、従来品のWXGA(Wide eXtended Graphics Array) 17インチワイド表示器(図1)に加え、17インチワイドの外形及び取付け寸法はそのままに、LCDパネルだけを大型化・FullHD(High Definition)化した18インチワイド表示器(図2)や、LCDパネルを2つ並べてパネル間の距離を可能な限り縮めた2画面一体メディア表示器(図3)などのバリエーションがある。さらに、21インチワイド、23インチワイドパネルへの対応も可能である。

### 2.2 行先案内

メディア表示器の行先案内は、第3世代TVS向けのア



図1. 17インチワイド表示器



図2. 18インチワイド表示器



図3. 2画面一体メディア表示器

ニメーションコンテンツが使用可能である。これによって、第3世代TVSを既に導入済みの鉄道事業者は行先コンテンツを共用することができるため、コンテンツの開発コストを削減できる。

2画面一体メディア表示器の行先案内では、左右の画面の表示切替えタイミングを合わせることによって、2画面が一体となった表現を行う。2画面を用いて1つの情報を表示する場合、広範囲の情報をより適切な文字サイズで表示できるため、路線案内(図4)や駅設備案内(図5)が1画面表示よりも見やすくなる。また、表示領域が大きくなるため、複数言語並記の案内も可能である。2画面にそれぞれ異なる情報を表示することも可能である。例えば、運行情報では、図6のように運行情報に合わせた地図を表示できる。また、図7のように、片側の表示器には行先案内を表示させ、もう一方の表示器には行先案内と連動させて走行位置に応じた駅周辺や沿線の見所や駅ナカ情報、街ナカ広告、ニュース、天気予報を表示することもできる。

### 2.3 広告表示

第4世代TVSは、第3世代TVSから次の点を変更した。

- (1) 広告放映方式
- (2) 広告放映スケジュール



図4. 路線案内



図5. 駅設備案内



図6. 運行情報と地図



図7. 天気予報と行先案内

(3) 広告コンテンツのファイル形式

(4) 多画面連動表示

### 2.3.1 広告放映方式

第3世代TVSまでは、メディア中央装置内の記憶デバイスからストリーミング方式で映像データを送信することによって、各表示器に広告を表示していた(図8)。

第4世代TVSでは、全ての表示器で異なる広告を表示することを目的に、ストリーミング方式からメディア表示器での蓄積再生方式に変更した。メディア表示器内の記憶デバイスに映像データを蓄積し、メディア端末装置からの再生指令によって広告を表示する(図9)。

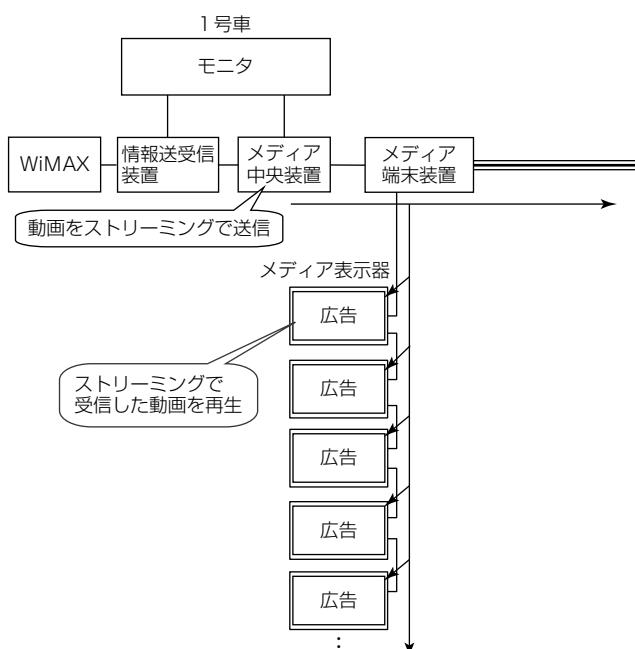


図8. ストリーミング方式

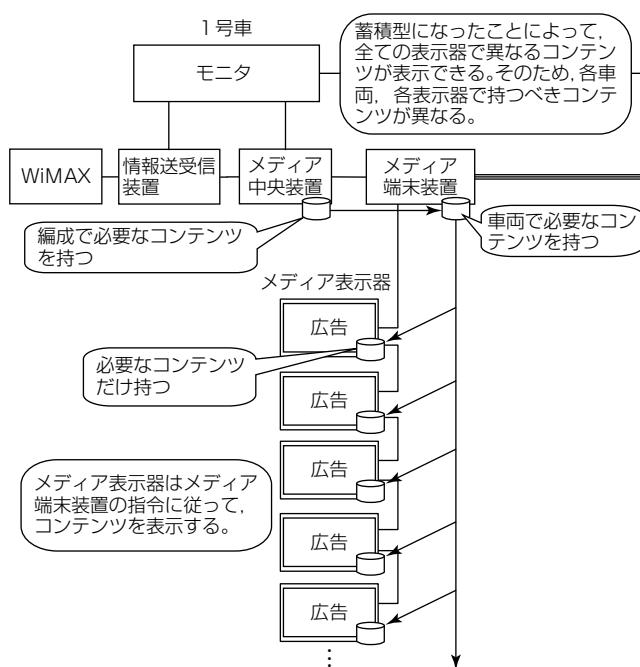


図9. 蓄積再生方式

### 2.3.2 広告放映スケジュール

第3世代TVSまでの広告スケジュールはロール方式で、同一のスケジュールを繰り返し表示していた(図10)。ただし、ニュースや天気予報に関しては、1日に数回更新しながら表示できるようになっていた。

第4世代TVSからは、ロール方式だけでなく、全ての広告に対して放映時刻を指定して表示させるという、駅デジタルサイネージと同一の方式を選択することも可能である。これによって、車両と駅で同時に同じ広告を表示できる。例えば、東京オリンピックの決勝戦の放映時刻1時間前を狙って、第4世代TVS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11)。

### 2.3.3 広告コンテンツのファイル形式

第3世代TVSで扱える広告コンテンツの動画ファイル形式は、H.264又はMPEG2(Moving Picture Experts Group phase 2)のうち1形式のみであった。第4世代TVSからは、ワンソースマルチユースの考え方から、動画・静止画のファイル形式が混在してもシームレスに表示できるようになっている。サポートしている動画ファイル形式は、H.264、WMV(Windows Media Video)、MPEG2、静止画ファイル形式は、JPEG(Joint Photographic Expert

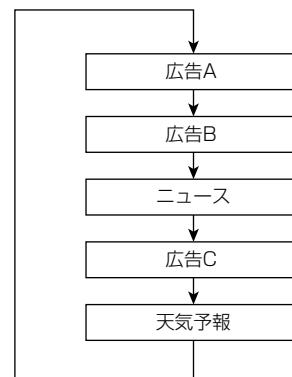


図10. ロール方式

12:00:00	広告A
12:00:30	広告B
12:01:00	ニュース
12:01:30	広告C
12:02:00	天気予報
12:02:30	広告D
12:03:00	広告A
12:03:30	広告B
12:04:00	ニュース
12:04:30	広告C
12:05:00	天気予報
12:05:30	広告D
:	
17:55:00	天気予報
17:55:30	広告D
18:00:00	オリンピック決勝戦
18:01:00	広告A
:	

図11. 時刻指定表示スケジュール

Group), PNG(Portable Network Graphics), BMPである。

### 2.3.4 多画面連動表示

多画面を連動させて表示するために、メディア端末装置と各メディア表示器間で高精度に時刻を同期させ、垂直同期信号(Vertical SYNChronizing signal : VSYNC)情報をメディア表示器間で共有することによって、フレーム単位で表示するタイミングを合わせている。VSYNCはフレームを更新する際に出力される信号であり、表示器間の同期誤差は1フレーム未満である(図12)。

### 2.4 省エネルギー・省スペース化

第3世代TVS以降のメディア表示器ではLEDバックライトを採用し、消費電力を45Wから35Wに省電力化している。バックライトの輝度半減までの期間は5万時間から10万時間に延びており、長寿命化を実現している。

また、第4世代TVSのメディア端末装置は、第3世代TVSに比べ体積を約60%減(図13)とし、消費電力を150Wから55Wに省電力化している。

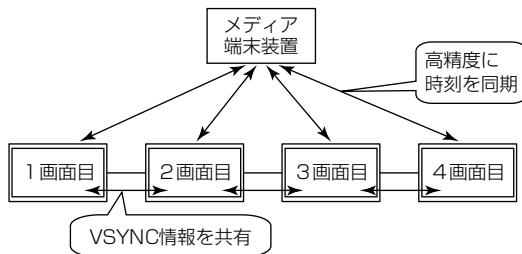


図12. 多画面連動表示

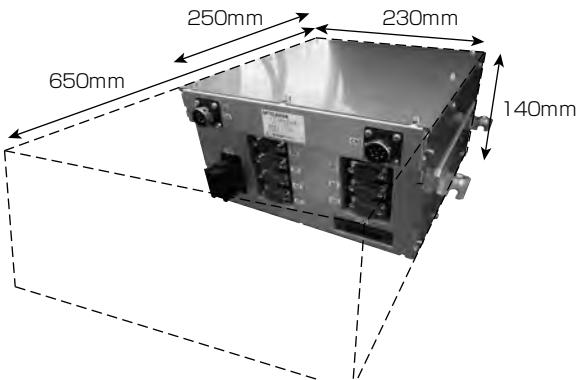


図13. メディア端末

### 3. TVSの今後の展望

列車内での行先案内はLEDによる文字の提供からLCDを使用した画像の提供に、また、広告表示は紙媒体から電子媒体に変わり、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、首都圏の列車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。この傾向は今後も継続するものと思われる。しかし、表示器の設置台数を増やすためには次の課題があり、これらを解決することによって更にTVSが発展すると考えている。

- (1) ケーブル数の削減(車両の軽量化), 配線工程短縮を目的としたメディア表示器, メディア端末装置の無線化
- (2) 車両質量の増加を抑えることを目的とした表示器の軽量化

(1)の無線化は既に取り組んでおり、製品化を進めている。(2)の表示器の軽量化では、有機EL(Electro Luminescence)などの軽量デバイスの採用や設置場所である鴨居(かもい)部の構造検討に取り組んでいる。

また、東京2020オリンピック・パラリンピックを見据え、訪日外国人向けサービスを向上させるため、TVSとスマートフォンの連携にも取り組んでいる。

### 4. むすび

2002年に初導入されて以降、適用車両数の増加に伴って、LCDを使用した行先案内や広告の表示は、乗客にとって身近な存在になってきている。今後のTVSは、スマートフォンなどの乗客所有の端末と連携することで、より分かりやすい情報を提供する。

### 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, 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, 513 (2015)

# 鉄道車両用永久磁石同期電動機の駆動制御技術の開発と今後の展望

山崎尚徳\* 寺本晃大\*\*  
加藤 将\*  
山下良範\*\*

*Development and Future Prospects of PMSM Drive Control Technologies for Railway Rolling Stock*  
Hisanori Yamasaki, Sho Kato, Yoshinori Yamashita, Kota Teramoto

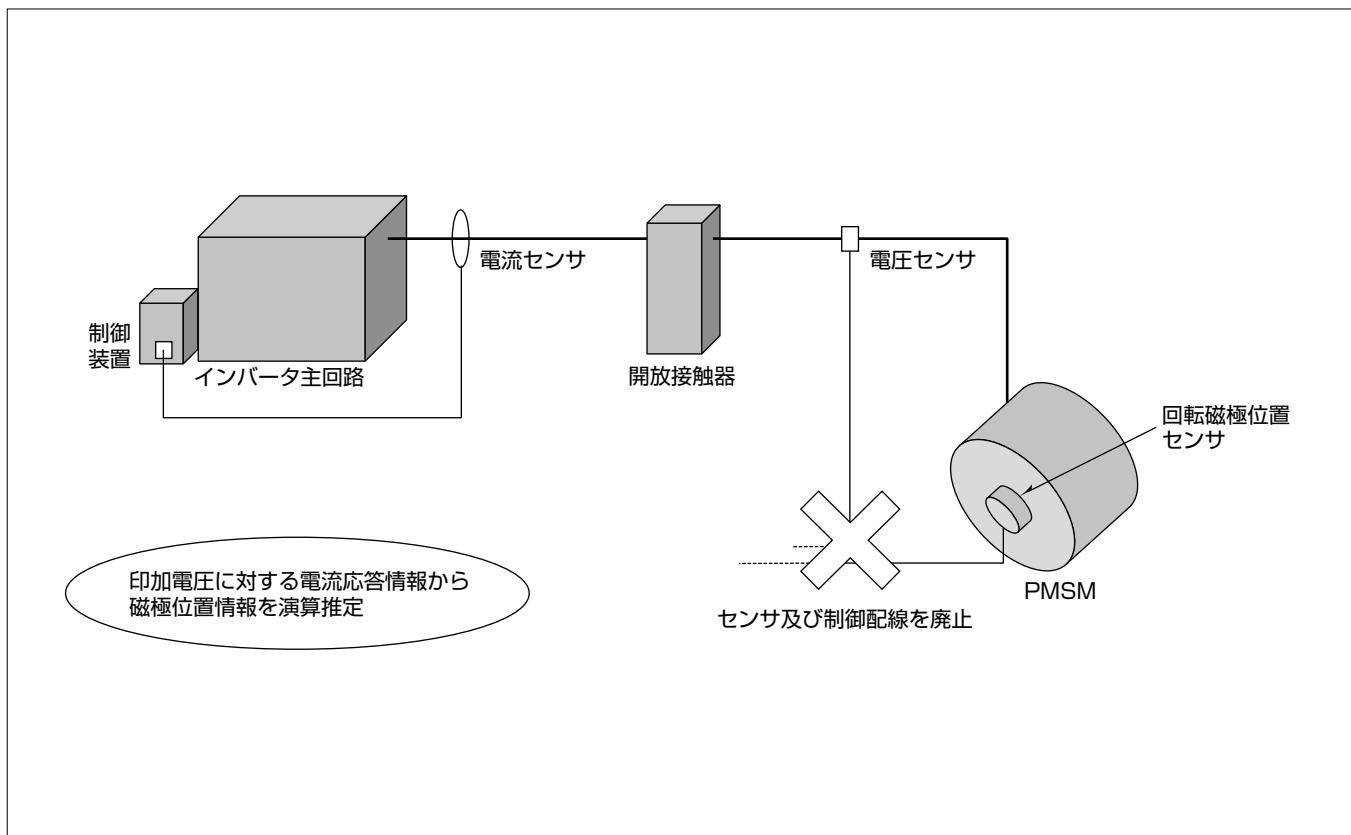
## 要旨

鉄道車両駆動用の電動機は、1980年代後半からのインバータ化によって、交流電動機である誘導電動機(Induction Motor)が用いられている。プラシレス化による保守性向上を実現しただけでなく、省エネルギー化のニーズに応える形で、高効率化が年々進んできている<sup>(1)</sup>。

一方、交流電動機としては同期電動機、中でも永久磁石を回転子に用いた、低損失化が可能な永久磁石同期電動機(Permanent Magnet Synchronous Motor : PMSM)がFA(Factory Automation)業界や自動車業界に広く適用されてきた<sup>(2)</sup>。鉄道車両駆動用途では、複数のモータを1台のインバータで並列一括駆動可能なことから、誘導電動機を採用することが一般的である。しかし、近年、省エネルギー性に注目し、PMSMを採用する例が見られるようになっ

なっている<sup>(3)(4)</sup>。そこで、三菱電機の交通事業でも製品ラインアップ化を図るため、主にFA業界のPMSM制御技術<sup>(5)</sup>の実績をベースに、鉄道車両用特有の駆動制御機能に適合させる開発を行った。

特に鉄道車両では、電動機の設置環境の制約及び設置台数の多さから、各軸の回転センサとその配線を排するニーズが強く、PMSMでも回転磁極位置センサレス制御への対応が必要である。停止状態から高速域まで広い速度範囲での安定性確保、空転再粘着制御のための適切な速度推定応答確保、架線電圧変動に対するロバスト性確保、PMSMセンサレス制御特有の騒音の低減など、鉄道車両駆動用途を考慮して各制御機能を構築した。



## PMSM駆動制御システムの回転磁極位置センサレス化

鉄道車両駆動システムでは、劣悪な車両床下・台車内環境にモータを複数配置するため、回転センサやその配線を極力排したいというニーズが強く、回転磁極位置センサレス制御が望まれる。日本国内の一般的な通勤形車両をターゲットとし、250kW級PMSM及びその駆動制御用インバータを開発試作し、各種駆動制御機能の検証評価を行った。

## 1. まえがき

可変速ドライブ製品に用いられる交流モータは、誘導電動機と同期電動機に大別される。高性能の磁石材料が開発されて以降、省エネルギーのニーズに応える形で、回転子に永久磁石を用いて回転子損失を削減したPMSMが普及してきた。一方、鉄道車両駆動システムでは、1台のインバータで複数台並列駆動が可能な誘導電動機の採用が一般的であり、誘導電動機の高効率化が進められてきたが、PMSM駆動システムを採用する例も見られるようになっている。

これらの背景から、当社の交通事業における製品ラインアップ拡充のため、鉄道車両用PMSM駆動制御システムを開発した。

本稿では、PMSM駆動制御技術の開発と今後の展望について述べる。

## 2. PMSMの駆動制御システム

### 2.1 鉄道車両用PMSMの駆動主回路構成

図1に、鉄道車両用PMSMの駆動主回路構成例を示す。直流架線から高速度遮断器、主接触器を介してフィルタリクトル(FL)，そしてフィルタコンデンサ(FC)とインバータ回路へ直流電力が供給され、インバータの交流出力側がPMSMに接続される。現状のシステムでは、インバータ故障時の回路保護のため、PMSMの回転誘起電圧を切り離す開放接触器が設けられている。また、PMSMは同期電動機であるため、各モータに対し個別のインバータ回路が必要となる。

### 2.2 駆動制御システムの基本構成

鉄道車両用PMSMの回転磁極位置センサレスベクトル制御系の基本構成を図2に示す。運転台の各レバー操作によって生成されるトルク指令が電流指令生成部に入力され、PMSMの回転数条件やインバータの出力電圧制限を考慮して、電流ベクトル指令値( $Id^*$ ,  $Iq^*$ )が出力される。その後段の、電流制御部や座標変換、PWM(Pulse Width Modulation)インバータ、PMSM、電流センサからなる電流制御ループによって、電流値、トルク出力が指令値に追従するように制御される。座標変換の基準はPMSMの回転磁極位置であり、レゾルバ等の回転センサがモータ回

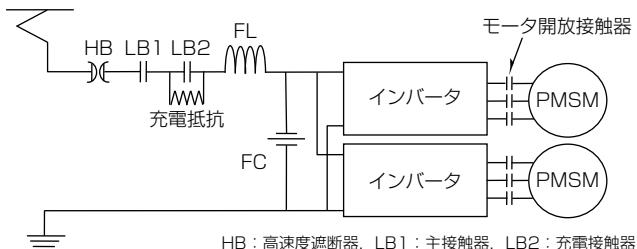


図1. 鉄道車両用PMSMの駆動主回路構成例

転子に設置できる場合には、その回転位置情報に基づいて座標変換される。

今回開発した回転磁極位置センサレス制御系では、PMSMの回路方程式及び適応磁束オブザーバー理論に基づいた回転速度・位置推定部を備え、推定演算によって取得した回転磁極位置推定値を座標変換器に出力している。なお、ここで得られる回転速度推定値については、モータ軸の速度情報として図2の系の外部にも出力され、空転再粘着制御系等にも用いられる。したがって、回転速度推定部の推定応答としては、空転検知の感度に必要な数10ms程度を確保するように制御応答設定を施している。

### 2.3 高周波重畠による極低速センサレス制御<sup>(6)</sup>

2.2節で述べた回転速度・磁極位置推定部の演算は、基本的にはPMSMの誘起電圧情報の推定であり、PMSMの誘起電圧が低下する極低速域では推定精度が劣化する。そこで低速域では、PMSMの突極性(インダクタンスの磁極位置依存性)を検出することで磁極位置推定演算を並列に実施し、推定精度を確保している。このための高周波電圧指令の印加部及びその結果発生する高調波電流からの磁極位置推定部を、図2に低速用として示している。

### 2.4 停止時からの起動での磁極位置検出機能

2.3節で述べた突極性情報は、電気角1周期中に2周期の変化であるため、電気角360°の情報にするには、磁極のN, S極方向情報を2.2節で述べたオブザーバー演算から補完する必要がある。しかし、停止時には誘起電圧がないため、オブザーバー演算でもN, S極位置は推定できない。そこで、停止時からの制御開始時には、数10msの短時間内に、電気角180°差の電圧パルス対を複数方向に印加し、N, S極の磁気飽和特性の違いに起因した電流信号を検出することで磁極位置検出を行う。これを初期磁極位置として、2.2節、2.3節のセンサレス制御を起動させる。

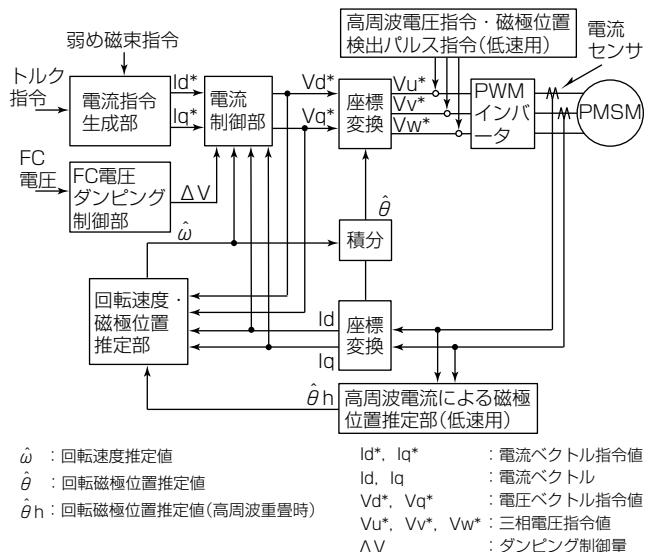


図2. 鉄道車両用PMSMの回転磁極位置センサレスベクトル制御系

電圧パルスの大きさと磁極位置検出精度には強い相関があるため、今回のシステムでは、インバータの入力である架線電圧の大きさに応じてパルス幅を適切に調整する機能を付加し、磁極位置検出精度を確保した。

## 2.5 惰行からの再起動機能

鉄道車両駆動用のインバータは、加速後の惰行期間には動作を止めることが一般的である。このとき電流値も電圧指令値も0となるため、図2の回転速度・磁極位置推定部の演算結果も0出力となる。したがって、センサレス制御での惰行期間からのインバータ再起動時には、すみやかに速度及び磁極位置の初期値を検出し、トルクや電流のショックなく定常制御機能に移行させることが必要である。今回は、誘導電動機向けに実績のある初期速度検出機能<sup>(7)(8)</sup>を、PMSM用に一部を修正する形で再起動機能を構築した。具体的には、惰行中に力行／回生の指令値が入力された直後約100ms間を初期速度検出期間とし、トルク0での高速電流制御をしつつ、高応答推定に特化したモータモデル演算によって回転速度・磁極位置推定演算を行い、これらの出力結果を座標変換に用いる。約100ms間内で真値に収束されて得られる回転速度・磁極位置推定値を、2.2節の定常制御系の各部初期値に反映させ、定常トルク制御に移行することで、スムーズなインバータ起動を実現している。

## 3. 鉄道車両駆動用制御機能への対応

### 3.1 フィルタコンデンサ電圧安定化制御

図1に示したように、直流架線用の鉄道車両のインバータ入力には、変電所との保護協調、また、架線電流の高調波抑制への対応として、FLが挿入され、インバータのFC

とでLCフィルタが構成される。インバータが理想電源(力行時に負性抵抗特性)として振る舞う結果、LCフィルタの共振周波数近傍でインバータ入力電圧・電流が不安定発振する挙動が内在し、これを抑制するダンピング制御系が実装される。

今回、PMSMの駆動制御システムに対しては、基本的には従来の誘導電動機の制御システムの場合と同様のダンピング制御機能を実装した。すなわち、入力電圧の脈動周波数成分を含む信号を抽出し、これにゲイン・フィルタ処理を施してモータへの電圧指令やトルク指令を操作することで入力電力を補償してシステムの安定化を行う。ただし、従来の誘導電動機の駆動制御システムと比べ、PMSMの駆動制御システムでは、電圧指令やトルク指令から実際の電力までの応答や固有振動の発生の仕方が異なるため、これに対応してゲインの値やフィルタの形態を調整している。

### 3.2 評価試験結果

図3に、評価試験設備でのPMSMセンサレス駆動試験の結果を示す。力行、回生とも、全速度域で安定な速度推定演算、所望のトルク制御が行われている。回生ブレーキの立ち上げは、インバータ停止中の惰行期間から行っているが、回転磁極位置センサレス制御の再起動によってスムーズに電流、トルクを立ち上げている。

また、架線電圧を急変させる試験等でも、ダンピング制御によってフィルタコンデンサ電圧を安定化できることを確認した。

### 3.3 高周波重畠機能での低騒音化対策

PMSMセンサレス制御の極低速域では、電圧高周波重畠による磁歪(じわい)騒音がインバータ装置やモータから発生する。評価試験でインバータ装置近傍の騒音を測定し

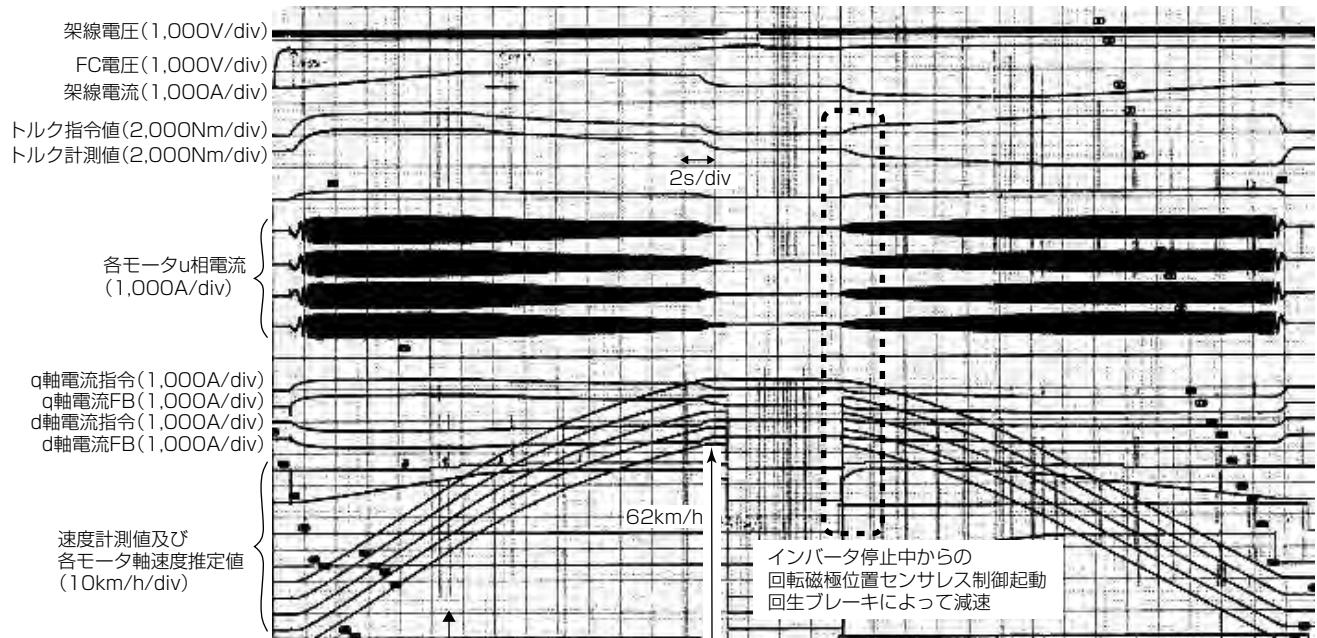


図3. 鉄道車両用PMSM駆動制御システムの評価試験結果

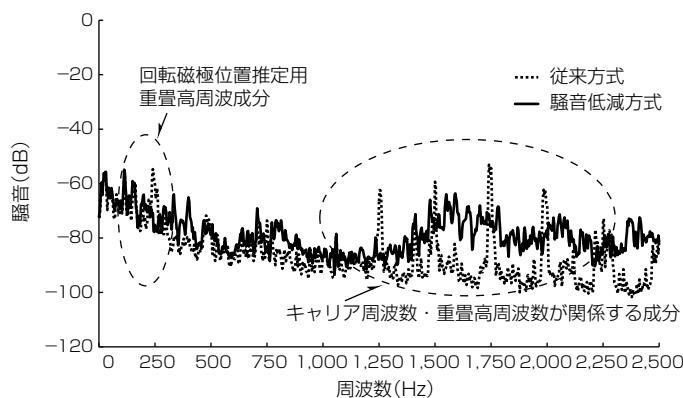


図4. 極低速センサレス制御の高周波重畠機能の低騒音化

た結果が図4である。

鉄道車両用インバータの場合、インバータのスイッチング周波数(キャリア周波数:fc)は数百~約1kHzであり、センサレス制御用の重畠高周波周波数(fh)はその数分の1のオーダーとなる。この重畠高周波の波形精度を確保するためには、fcとfhは整数倍の関係を固定維持することが望ましいが、図4の点線曲線で示すように、特にfcとfhが相互に関係した成分のピュアトーン騒音が発生することになる。

そこで今回、回転磁極位置推定精度と印加高周波電圧のS/N(Signal-to-Noise)比に注意して印加高周波電圧の振幅を下げ、かつインバータPWM電圧波形をランダム操作する制御系を試行した。その結果を図4の実線曲線で示す。これによってセンサレス制御の機能を維持しつつ、1~2kHzの帯域でのPWM起因の騒音を10dB程度低減でき、聴感も大幅に改善されることを確認した。

#### 4. む す び

鉄道車両駆動システムの省エネルギー化の一方策として、PMSM化に対応し、鉄道車両用PMSM駆動制御システムを開発した。駆動制御技術開発では、FA用PMSMの回転磁極位置センサレス制御技術を鉄道車両駆動用途の仕様に適合させ、駆動制御機能による低騒音化にも取り組んだ。これらによって、鉄道車両用途への製品適用の目処を付けた。

PMSM駆動制御システムは、鉄道車両用途に特有の幾つかの課題があり、今後の取組みについて次に述べる。

鉄道車両の電機品製造・納入では、インバータとモータの製造担当メーカーがしばしば別となり、情報共有に制約があることも多い。PMSMのトルク制御・センサレス制御では、誘導電動機の場合よりも詳細な回路定数情報が必要となるため、インバータの機能設計の観点からは、より

高度な定数測定技術・調整技術を蓄積していくことが求められる。また、インバータ故障時の回路保護用の開放接触器の選定や開放シーケンスの在り方については、実績の積み上げと並行して更なる改善の余地を検討していく。

既に述べたとおり、PMSMは同期電動機であり、モータ1台ごとにインバータを設置する必要がある。誘導電動機複数台を1台のインバータで駆動するシステムと比べ、部品点数(コスト)が増加するデメリットがある。ただし、回路異常時の運転停止波及範囲が狭まるメリットもあり、得失のバランスを車両の用途ごとに吟味することが必要である。

これらを踏まえ、鉄道業界の省エネルギー化に資する製品ラインアップの拡充に対応していく。

#### 参 考 文 献

- (1) 大橋 聰, ほか: DC1500V架線対応SiC適用鉄道車両用主回路システム, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 50, 511 (2013)
- (2) 佐竹 彰, ほか: 最新のモータ制御技術, 三菱電機技報, 76, No.6, 421~425 (2002)
- (3) 田坂洋祐, ほか: 省エネと環境性能に寄与する鉄道車両用PMSMドライブシステム, 東芝レビュー, 69, No.6, 28~32 (2014)
- (4) 谷口 峻, ほか: PMSM低速域位置センサレス制御における高周波電圧重畠可変制御による騒音低減法, 電気学会論文誌D, 129, No.4, 382~387 (2009)
- (5) 西島大輔, ほか: 三菱センサレスサーボ“FR-E720EX・MM-GKRシリーズ”, 三菱電機技報, 88, No.4, 253~256 (2014)
- (6) 伊藤正人, ほか: 高周波電圧を用いた突極形PMモータの直接位置推定法, 電気学会論文誌D, 131, No.6, 785~792 (2011)
- (7) 河野雅樹, ほか: 適応磁束オブザーバによる電車用速度センサレスベクトル制御に適した短時間再起動方法, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, 347~352 (2009)
- (8) 根來秀人, ほか: 速度センサレス制御の実機適用, 三菱電機技報, 78, No.12, 813~816 (2004)
- (9) 中嶋幸夫, ほか: 環境配慮型鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器の最新動向~SiC適用インバタシステム補助電源装置~, 三菱電機技報, 86, No.9, 511~515 (2012)

# SiCパワーモジュールの主回路素子への適用技術

菅原徹大\*  
山下良範\*  
中嶋幸夫\*

*Application Technologies of SiC Power Module for Railcar Inverter*

Tetsuo Sugahara, Yoshinori Yamashita, Yukio Nakashima

## 要旨

近年、環境負荷の少ない移動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。

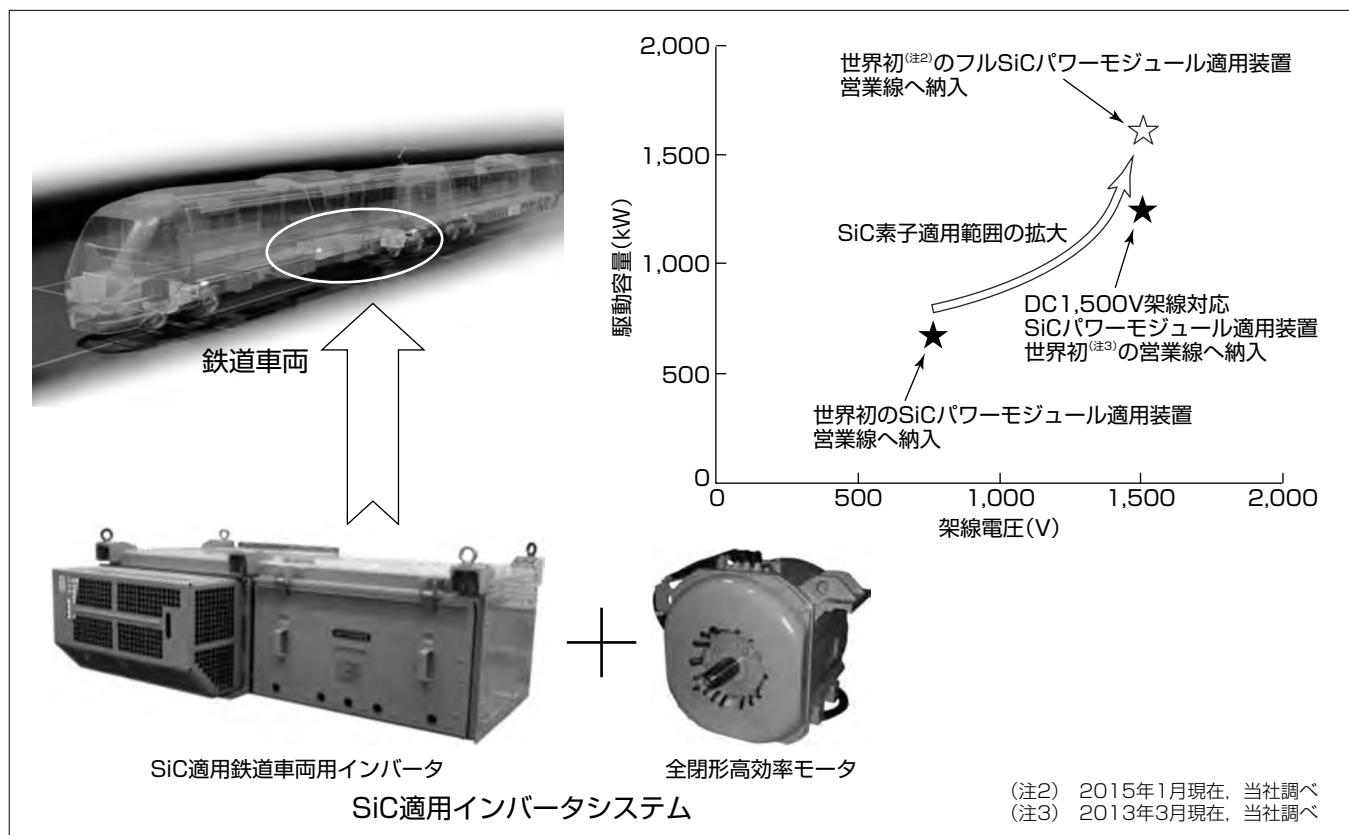
三菱電機は、2012年2月に世界初<sup>(注1)</sup>のハイブリッドSiC(シリコンカーバイド)パワーモジュールを適用した推進制御装置を営業線に納入したことを皮切りに、国内外の推進制御装置・補助電源装置に多数適用している<sup>(1)(2)(3)</sup>。ハイブリッドSiCパワーモジュールの適用によって、電力回生ブレーキ領域の拡大、高周波スイッチングによるモータ損失の低減など、主回路システム全体としての省エネルギー化や、小型化に寄与している。

SiC素子は低損失・高温動作の特長を持ったSi素子に変わるキーデバイスであるが、従来のハイブリッドSiCパワーモジュールでSiC化したダイオードに加え、スイッチング素子もSiC化した。具体的には、従来の“Si-IGBT”か

ら“SiC-MOSFET”化したフルSiCパワーモジュールを開発し、更なる省エネルギー化、装置の小型化を実現した。フルSiCパワーモジュールは3.3kV定格のパワーモジュールであり、1.7kVハイブリッドSiCパワーモジュールで実現できなかった1,500V架線システムでの2レベルインバータを実現できた。

鉄道車両用主回路システムのインバータ、モータ、空気ブレーキ等の機器に対して、フルSiCパワーモジュール適用などの省エネルギー施策を適用した最適設計によって、従来の主回路システムに対して約30%の消費電力低減を実現した。また、交流架線システム向け補助電源装置にフルSiCパワーモジュールを適用することで高効率化・小型軽量化を実現した。

(注1) 2012年2月現在、当社調べ



## フルSiCパワーモジュール適用インバータシステム

3.3kV/1.5kAの大容量SiCパワーモジュールの適用によって、回生ブレーキ性能が向上した。SiCパワーモジュール適用従来装置と比較してインバータ損失が低減した。SiCパワーモジュールの高周波スイッチング駆動によってSiC対応のモータの発生損失を低減した結果、主回路システム全体として、従来型インバータシステムに対し約30%の省エネルギーを実現した。

## 1. まえがき<sup>(4)</sup>

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1つとして環境負荷の少ない移動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月に世界初のハイブリッドSiC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により、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。

今回、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鉄道車両用インバータシステムの開発を行い、世界に先駆けて製品化した。

本稿では、フルSiCパワーモジュールの特長を述べるとともに、SiC素子を適用した鉄道車両用インバータシステムの省エネルギー技術・装置の小型化について述べる。また、補助電源装置についても、フルSiCパワーモジュールの適用事例について述べる。

## 2. フルSiCパワーモジュールの特長<sup>(5)</sup>

図1に、Si-MOSFET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、その結果、導通損失の低減が可能となる。

また、従来のSi-SBD(ショットキーバリアダイオード)では漏れ電流が大きく、高耐圧化ができなかった。しかし、SiC-SBDを採用することで高耐圧化が可能となり、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となった(図2、図3)。さらに、スイッチング素子にSiC-MOSFETを採用することで、従来のSiダイオードでの逆回復が存在せず、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となり(図4)、従来比55%のインバータ損失を低減できる(図5)。

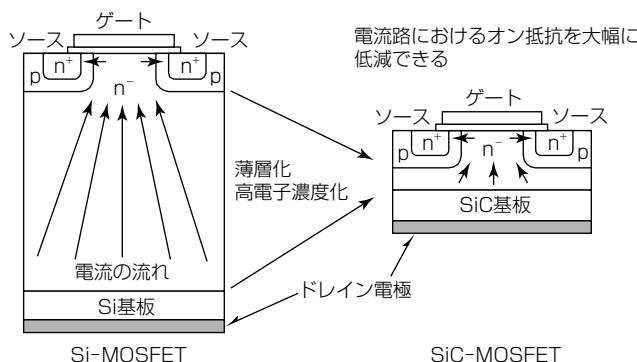


図1. MOSFET構造の比較

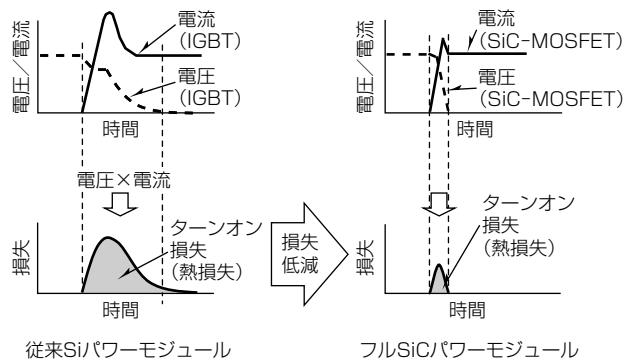


図2. トランジスタターンオン波形比較

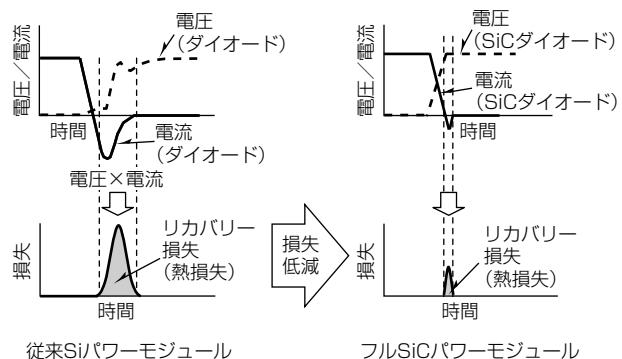


図3. ダイオードターンオフ波形比較

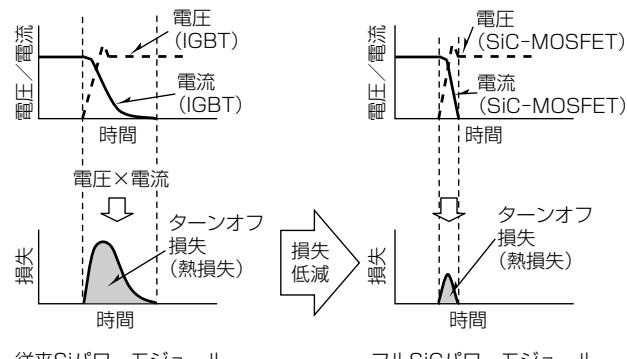


図4. トランジスタターンオフ波形比較

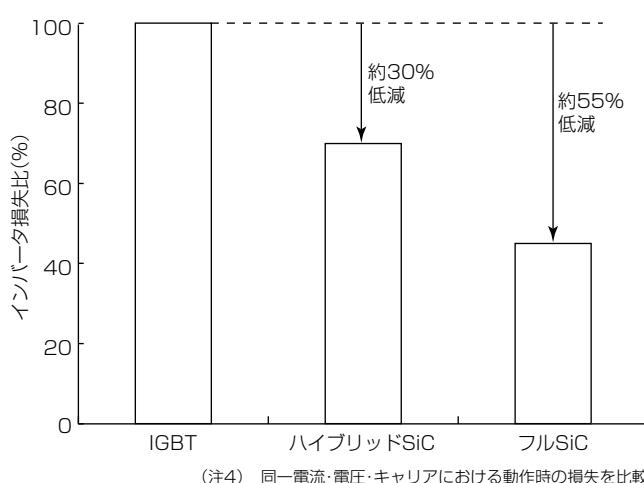


図5. インバータ損失比較

### 3. フルSiCパワーモジュール適用の効果

#### 3.1 鉄道車両における消費電力の分析

2章で述べたとおり、フルSiCパワーモジュールを適用することによって、従来のSiパワーモジュール適用と比較して、インバータ電力損失が約55%低減することが分かった。

しかし、従来の鉄道車両用主回路システムでの入力電力量に対する発生損失の内訳によると、図6に示すように、インバータの電力損失は、主回路システム全体での発生損失に対して占める割合が低いことが分かる。このことから、従来の主回路システムでSi素子からSiC素子に変更しても、フルSiCパワーモジュールの本来の機能が十分に活用できない。むしろ、モータ及び空気ブレーキで多くの電力消費が見られる。当社は、フルSiCパワーモジュールを適用したときのこれらの電力消費の低減に着目して機器の開発・設計を進めた。

#### 3.2 省エネルギー化の方策と設計

インバータへのフルSiCパワーモジュール適用に当たり、主回路消費電力の分析を行い、機器ごとに次の項目をターゲットにして省エネルギー施策を適用することにした。

- (1) インバータ：スイッチング損失低減によるインバータ損失を低減させる。
- (2) モータ：高周波スイッチング、及びモータ構造最適化によるモータ損失を低減させる。
- (3) 空気ブレーキ：回生ブレーキ領域の拡大による回生性能を向上させる。

モータ高調波損失の観点からは、非同期パルスモードの適用速度域拡大による高周波スイッチングでの正弦波駆動が適している。しかし、主回路システム全体の損失を最小化する施策を検討した結果、モータの基本波損失も無視できない大きさになることが判明した。そこで、同期多パルス変調を適用することでモータの電圧利用率を向上させて、従来の変調方式と比較してモータ電流を低減し、インバータ損失の低減とモータ基本波損失の低減を両立させることに成功した(図7)。さらに、回生ブレーキ領域の拡大も図

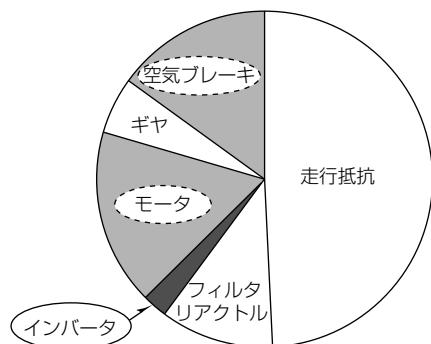


図6. 入力電力量に対する発生損失の内訳例

ることで、モータ、空気ブレーキを含めた主回路システム全体の最適設計によって、シミュレーション上で既存の主回路システムと比較して約30%の消費電力低減効果が見込めることが確認した。

#### 3.3 実案件への適用

フルSiCパワーモジュールを適用したインバータ(図8)の開発後、多くの鉄道事業者に採用された(表1)。その結果、既存車に対し、装置の体積・質量を40%以上低減することに成功した。車両全体の消費電力についても、現車試験の結果、既存車に対して約40%改善することを確認した。

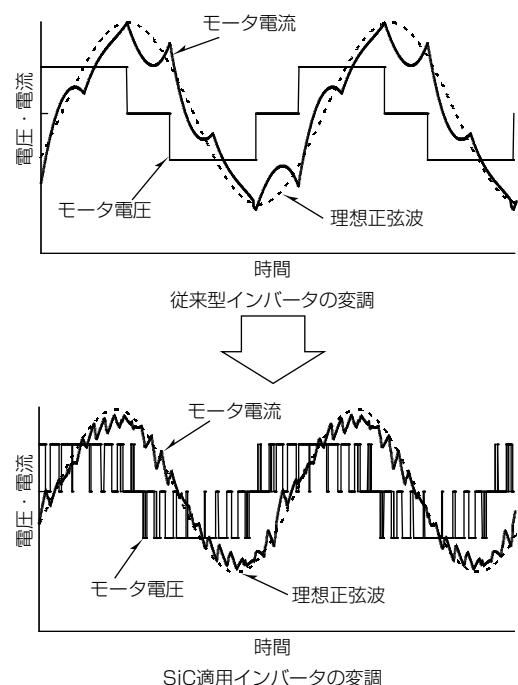


図7. 従来型とSiC適用時のモータ電圧・電流の比較



図8. フルSiC適用インバータ

表1. フルSiCインバータ納入実績

事業者	納入台数(台)
A社	3
B社	6 (80)
C社	3 (18)
D社	3 (72)
E社	2 (4)
F社	2 (16)
G社	3 (9)

( )内は出荷予定数

#### 4. 補助電源装置の最新技術とSiC適用時の期待

図9に交流架線システム向け補助電源装置の回路構成を示す。電力変換部であるコンバータ・インバータ部と交流入力リアクトル、正弦波を出力するための交流出力リアクトル及び交流フィルタコンデンサから構成される。このコンバータ・インバータ部にフルSiCパワーモジュールを適用して電力損失の低減を図った。低損失の1.2kV定格フルSiCパワーモジュールを適用するため、中間リンク回路構成の最適化を行い、中間リンク電圧をDC700Vに設定している。また、各回路のスイッチング周波数を従来装置に対し各々で約5倍、約2倍に高周波化することで、交流リアクトルのインダクタンス値と交流フィルタコンデンサ容量の低減と、高調波電流の低減による出力フィルタ回路の損失低減によって出力フィルタ回路の小型・軽量化を図った。図10にフルSiCパワーモジュールを適用した補助電源装置の外観を示す。

ハイブリッドSiCパワーモジュールを適用した類似の補助電源装置に対し、フルSiCパワーモジュールを適用することで、次の改善を確認できた。

- (1) 装置損失を装置全体で40%低減
- (2) 装置効率を95%から97%に向上
- (3) フィルタ回路外形を70%小型化

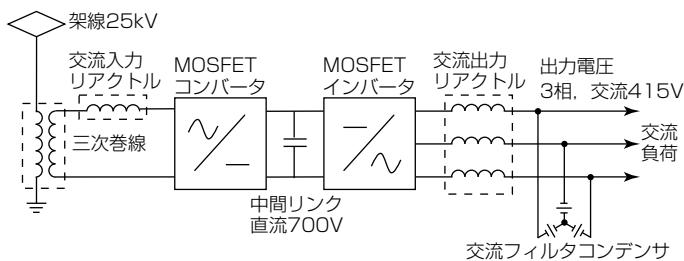


図9. 交流架線システム向け補助電源装置の回路構成



図10. フルSiC適用の補助電源装置

これらのとおり、交流架線システム向けの補助電源装置に対してフルSiCパワーモジュールを適用し、装置の高効率化・小型軽量化を実現した。今後、更なる大容量の補助電源装置や直流架線システム向けの補助電源装置にもフルSiCパワーモジュールの適用を拡大していく。

#### 5. む す び

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モータとの組合せによる主回路システム全体の省エネルギーを実現するための技術、及び補助電源システムの最新技術とSiC適用時への期待について述べた。

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、鉄道車両用インバータシステム及び補助電源装置の適用拡大が考えられる。

当社としては、鉄道という高効率大量輸送手段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モータを組み合わせた主回路システム、SiCパワーモジュールによって小型化した鉄道車両用インバータ装置及び補助電源装置の製品化を展開していく。

なお、この内容は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究の成果の一部を活用している。

#### 参 考 文 献

- (1) 根来秀人, 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, 平成24年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 65~68 (2012)
- (2) 山下良範: SiCパワーモジュールを用いた鉄道車両用インバータシステムの開発, 鉄道車両工業, No.462 (2012)
- (3) 山下良範, ほか: SiCパワーモジュールを用いた鉄道車両用主回路システムの開発, 日本鉄道技術協会誌, 55, No.9, 37146~37149 (2012)
- (4) 山下良範, ほか: SiCパワーモジュール適用鉄道車両用インバータシステムの省エネルギー運転について, 平成24年電気学会全国大会論文集, 5-0778 (2012)
- (5) 中山 靖, ほか: SiC-SBD適用インバータによる鉄道車両用電動機駆動評価, 平成22年電気学会全国大会論文集, 4-139 (2010)

# 全閉形主電動機の 環境配慮型社会への適用技術

金子健太\*  
味岡佳史\*  
大津一晃\*

*Totally Enclosed Traction Motor Technologies for Environmentally Conscious Society*

Yoshifumi Ajioka, Kenta Kaneko, Kazuaki Otsu

## 要旨

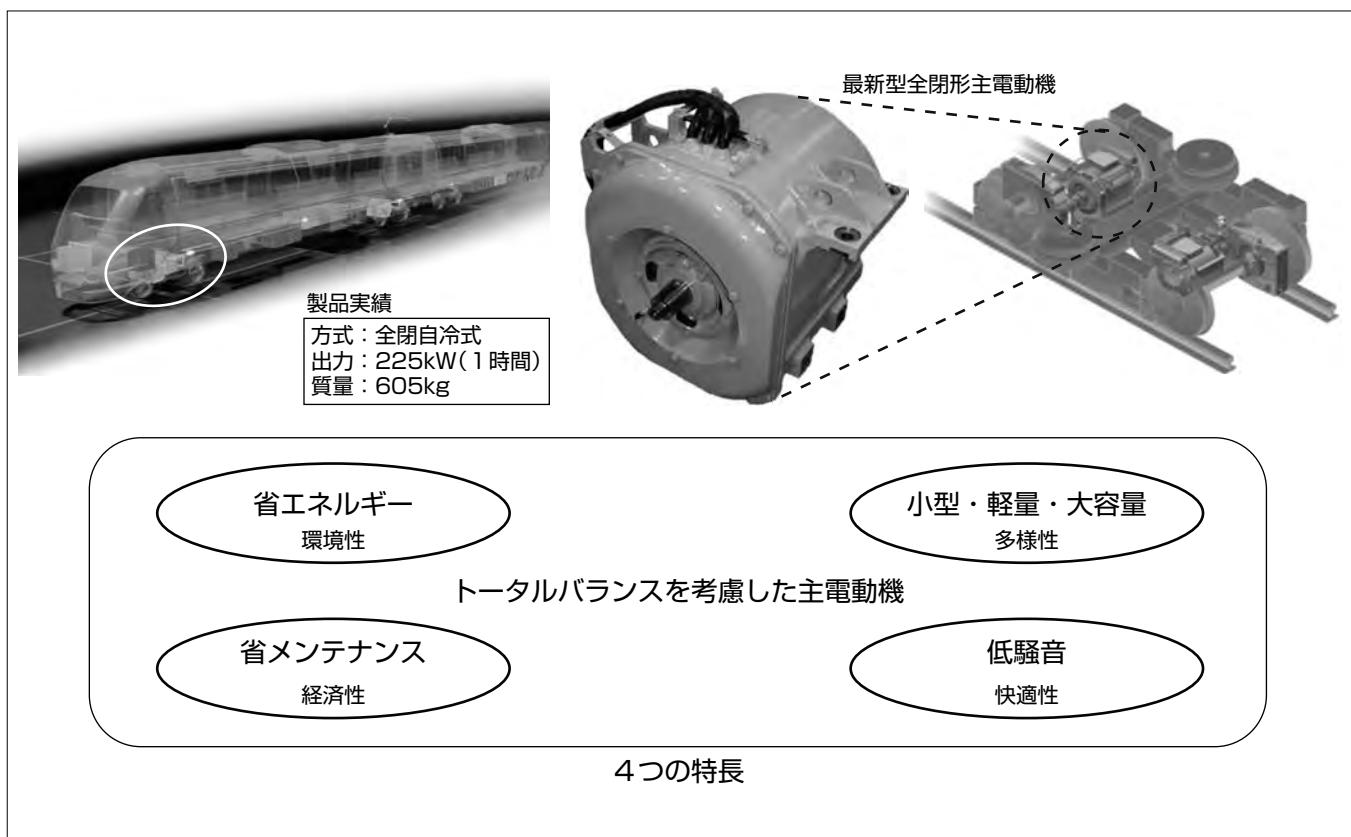
地球環境に配慮した輸送システムである鉄道車両で、その駆動源となる主電動機に求められる性能は、鉄道車両の省エネルギー化に寄与する高効率化を始め、小型軽量化、大容量化、低騒音化、省メンテナンス化などがある。鉄道分野では、これら全ての要求を高い次元で満たした鉄道環境配慮型社会への適合技術が求められている。これらの背景から、トータルバランスを考慮した全閉形主電動機を開発した。

鉄道車両の省エネルギー化で、車両が走行する際に発生する損失を詳細に分析し、主電動機の発生損失の大幅低減に加え、回生出力の向上(高出力化)を同時に実現した。さらに、主電動機を始め、主回路システム全体での徹底的な

各機器の損失低減を行うことで、鉄道車両の大幅な消費電力量低減を実現した。

さらに、主電動機の大幅な発熱損失の削減に併せ、全閉形の冷却構造をより熱交換効率の高い構造へと進化させることで、従来では困難であった全閉形主電動機の大容量化と軽量化を同時に実現した。これによって、小型の開放形主電動機を前提とした台車への搭載も実現し、幅広く全閉形主電動機の適用が可能となった。

また、全閉形主電動機の適用による主電動機の分解清掃作業の削減に加え、新たな軸受保守構造の適用、保守周期の見直し等によって、大幅な省メンテナンス化を実現した。



## 高効率全閉形主電動機

高度な低損失設計と冷却設計によって、発熱損失51%低減(車両全体で10%の省エネルギー化)を実現するとともに、開放形主電動機と同程度までの小型軽量化と、大幅な高出力化(回生出力向上によって車両全体で25%の省エネルギー化)を達成した(在来線向け1時間225kW, 605kg, 狹軌台車対応)。省エネルギー、小型・軽量・大容量、省メンテナンス、低騒音の4つの特長を兼ね備えたトータルバランス設計の最新型全閉形主電動機である。

## 1. まえがき

地球環境に配慮した輸送システムが求められる中、鉄道車両用主電動機に求められる高効率化要求を始めとし、小型・大容量、省メンテナンス及び低騒音などの高い設計要求性能に対してトータルバランスを考慮した全閉形主電動機を開発した。

本稿では、全閉形主電動機へのこれら最新の適用技術について述べる。

## 2. 省エネルギー化<sup>(1)(2)(3)</sup>

### 2.1 鉄道車両の消費電力量分析と発生損失低減への取組み

鉄道車両は、電力変換装置及び主電動機(以下“モータ”という。)によって電気エネルギーを運動エネルギーに変換して走行する輸送機関である。電力変換装置及びモータは、鉄道車両に搭載される機器で、加速時は電気エネルギーから運動エネルギーへ変換し、減速時は運動エネルギーから電気エネルギーへ変換(回生)して車両を走行させる。鉄道車両における消費電力量とは、これらのエネルギー変換の際に発生する機器損失及び車両が走行することで発生する走行抵抗や摩擦抵抗のことを指す。

図1にエネルギー変換フローと車両の発生損失を示す。発生損失とは、エネルギー変換時に各機器で発生する発熱損失に加え、走行時に運動エネルギーを消失させる走行抵抗及び減速時に電気エネルギーに変換されない運動エネルギーの一部を、摩擦ブレーキで熱エネルギーとして消失さ

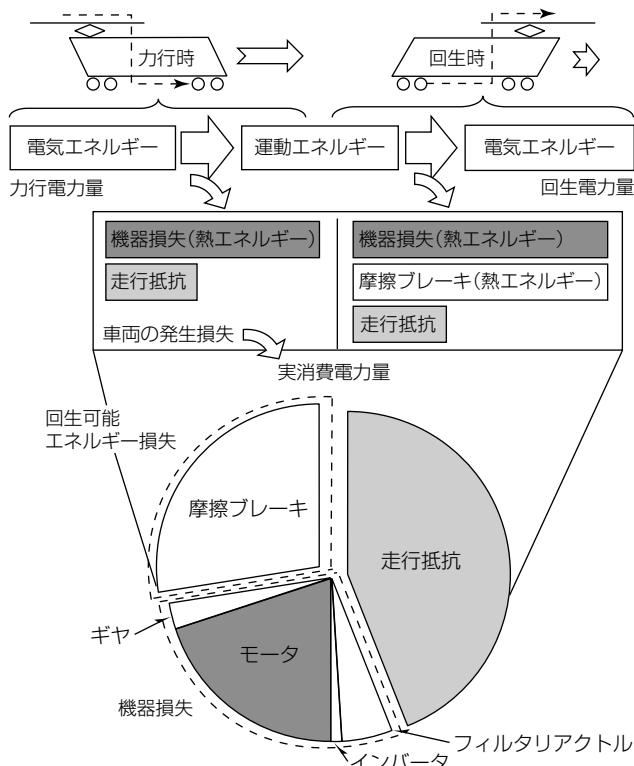


図1. 鉄道車両の発生損失(消費電力量)とその内訳

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1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、モータで発生する熱損失及び回生できずに消失した摩擦(空気)ブレーキでの熱損失など、回生可能なエネルギー損失が多くを占める。そこで、この2つの損失を同時に削減するための、モータの高効率化及び高出力化を実施した。

### 2.2 発熱損失低減によるモータの高効率化

モータの発生損失は、車両全体の発生損失の約20%を占める。図2に示すモータ設計の①～④の改良によって、図3に示すように、モータで発生する発熱損失を51%削減し、インバータによる実負荷時の効率95.1%を達成した。

また、モータの発熱損失の低減には、モータにパルス電圧を印加して制御するインバータ装置との連携が必要不可欠であり、SiC(シリコンカーバイド)素子適用インバータ装置の特徴も活用し、システムで最適な機器構成でモータの発生損失の最小化を実現した。これらによって、車両の発生損失を10%低減した。

### 2.3 モータの高出力化(回生性能の向上)

次に、摩擦(空気)ブレーキ損失を削減するため、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、モータの回生出力を向上させた。

車両の減速力は通常、加速時よりもトルクが高く設定されており、かつ高速域から一定の高い減速力が必要とされる。そのため、モータが搭載されていない車両の減速力は、モータの回生性能で負担できない分を摩擦ブレーキによって補足していた。しかし、先に述べた発生損失の低減に

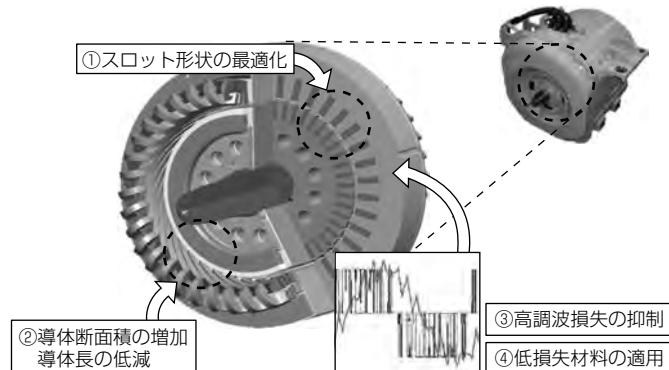


図2. 電磁界解析技術を活用した発熱損失の低減

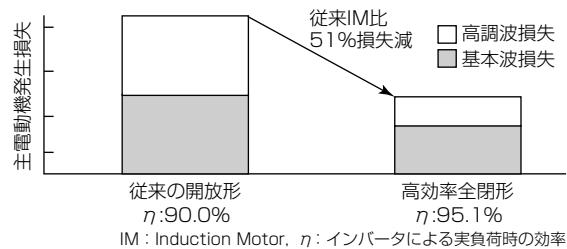


図3. 発生損失割合比較

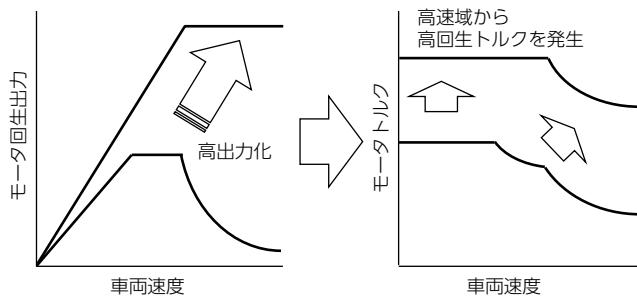


図4. モータの発生出力向上と高トルク化イメージ

よってモータの高出力化が可能となるため、停動トルクを増加させ、モータが搭載されていない車両の減速力分全てをモータの回生性能だけで負担可能となった(図4)。

このような回生性能の向上でも、モータを制御するインバータ装置との連携が必要となるため、機器全体での取組みによって、これまで回生できずに消失していた回生可能な運動エネルギーを全て回生し、車両の発生損失を約25%低減した(車両の構成によって低減割合は前後する。)。

これらから、モータの低損失化並びに高出力化によって車両の発生損失を約35%低減した。また、SiC素子適用インバータ装置や、フィルタリアクトル等各機器の発生損失低減効果も含めると車両の発生損失は約40%の低減を実現した。

### 3. 小型・大容量化

従来、全閉形モータは、開放形に比べ外部の空気(外気)で直接固定子コイルや回転子バー等の発熱部を冷却できないため、複雑な熱交換器や走行風によって放熱を促進させるフィン等が設けられ、大型化かつ重量化する欠点があった。そのため、国内在来線向けモータでは主に150~200kWの出力に対し、質量は700~800kg以上となり、更新工事への置き換えや、軽量開放形モータを前提として設計された台車への搭載は困難となっていた。これら課題に対し、最新の高効率全閉形モータでは、2.2節で述べた大幅な発熱損失の削減に併せ、全閉形の冷却構造をより熱交換効率の高い構造へと進化させた。これによって、同一容量のモータで開放形モータの質量と同等となる500~650kg程度への軽量化に成功した。

最新の全閉形モータの冷却構造を図5に示す。断面図に示すとおり、内部の空気(内気)が循環する経路と、外気が通り抜ける構造を持っている。この全閉形モータでは発熱部を間接的に冷却するため、この通風構造を最適化することで冷却効率を高めた。具体的には、回転子鉄心の両側に設けたファンによって内気と外気を熱交換し、さらに、フレーム内部でも、内気・外気の通風路を交互に設けることで、効率的に熱交換させている。この冷却構造は、全閉外扇形の特徴である外気通風による熱交換構造と、全閉内扇形の特徴である内気循環による熱交換構造の両方の利点を

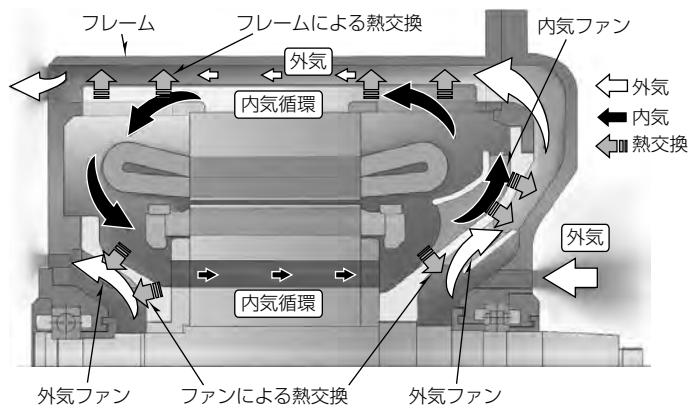


図5. 最新の全閉形モータの冷却構造

組み合わせた構造である。さらに、このような冷却構造を、従来の開放形モータ同様に、コイル・鉄心で構成される電気部分を、フレーム内に嵌(は)め込むフレームタイプとすることで、台車への装着(ぎそう)に柔軟性を持たせている。これによって先に述べた軽量化と併せ、更新車両から新車まで、幅広い台車装着条件に対応している。

### 4. 低騒音化

モータの低騒音化は、モータ自体の体格及び質量とトレードオフの要素を持つ。一般的に全閉形では軸端に冷却ファンを構成する外扇形よりも、内部に冷却ファンを持つ内扇形の方が低騒音であるが、体格・質量面では相反する。

そこで、この全閉形モータでは、騒音の遮蔽性を高めるために、内扇形同様に冷却ファンを内部に構成する構造を基本とした。さらに、内部の冷却ファンの外側にもガイド付の羽を設けることで、外気を冷却ファンの背面全体に通風させ、内気の熱交換性能を向上させた。また、開口部を必要最小限とすることで機外に漏れる騒音量を低減した。これによって、モータの質量増加なく、内扇形相当の低騒音化を実現した。

### 5. 省メンテナンス化

#### 5.1 全閉形によるメンテナンス時間の削減

モータの省メンテナンス化に向け、より効果的に作業時間を削減するために、各定期検査のメンテナンス作業時間を分析した。表1に各種モータの作業時間を示す。

全閉形モータは、外部の冷却風を直接機内に取り込む開放形モータとは異なり、吸気フィルタが不要となるため、短い周期で頻繁に発生する吸気フィルタの清掃作業が不要となる。また、全閉形モータ内部は長期間クリーンな状態が維持されるため、定期検査ごとの大型設備を使用したモータの分解や機内清掃についても不要となる。さらに、全閉形モータで定期検査ごとの分解が不要となることから、軸受のメンテナンスはモータ外部から潤滑グリースを給油する“中間給油方式”を標準採用した。これによって、重要部検査での台車からのモータの取り外しが不要となり、中

表1. メンテナンス項目・時間比較(時間は当社試算)

	メンテナンス項目	所要時間(h)		
		従来開放	従来全閉	最新全閉
月検査	吸気カバー清掃(フィルタ)	0.17	—	—
	外観検査	0.17	0.17	0.17
	合計	0.34	0.17	0.17
	台車付外し・継手付外し	10.00	—	—
	モータ分解・組立て	10.00	—	—
	吸気カバー清掃(全体)	2.00	—	—
	機内清掃	1.00	—	—
	各部点検	2.00	0.17	0.17
	軸受・グリース交換	4.00	—	—
重要部検査	中間給油	—	0.17	0.17
	センサ分解・調整組立て	1.00	—	—
	回転試験	5.00	—	—
	合計	35.00	0.34	0.34
	台車付外し・継手付外し	10.00	10.00	10.00
	モータ分解・組立て	10.00	10.00(—)	—
	吸気カバー清掃(全体)	2.00	—	—
	機内清掃	1.00	—	—
	各部点検	2.00	1.00	1.00
全般検査	軸受・グリース交換 <sup>(注1)</sup>	4.00	4.00(2.00)	0.25(0.17)
	センサ分解・調整組立て	1.00	1.00	—
	回転試験	5.00	5.00(—)	5.00(—)
	合計	35.00	31.00 (14.00)	16.25 (11.17)
	全般検査(2回目)までの合計時間(月検査60回／重要部検査2回／全般検査2回)	160.00	56.00	38.00

(注1) 全般検査1回目は端ふた内グリースだけ交換  
( ) 内は全般検査1回目の作業時間

間給油以外の保守作業は月検査と同等にまで軽減された。

## 5.2 軸受交換作業の軽減

モータの軸受交換作業は、モータ本体から回転子を取り出す必要があるため、全閉化によって機内清掃が不要となつても、軸受交換のためにモータの分解・再組立て作業が必要であった。特に、モータの台車からの脱着作業や、モータ自体の分解組立て作業は、重量物であるモータを取り扱うため、大型設備での作業となり、全体作業時間に占める割合は大きい。そのため、軸受交換の作業性には課題が残っていた。特に、従来の全閉形では、開放形と異なる複雑な構造部材を分解する特殊性が課題であった。

そこで、モータの軸受分解作業で回転子を引き抜かず、軸受部品だけを分解することで分解作業を簡略化する回転子非分解軸受交換構造(図6)を開発した。この構造によつて、軸受交換作業が軽減されるだけでなく、重量物である回転子の分解作業が不要となり、クレーン等の設備の待ち時間や作業場所の制約がなくなる。さらに、軸受部品の構造は従来と同様とすることで、長年培ってきた潤滑構造を維持し、その分解要領も開放形とほぼ同等とすることで、作業に特殊性を要さない構造を実現した。

これらの軸受交換作業の軽減によって、この全閉形モータでは、2回目の全般検査までの合計作業時間は、開放形と比較して約1/4以下にまで短縮され、1台当たり160時間から38時間程度となる(作業時間は当社試算)(図7)。

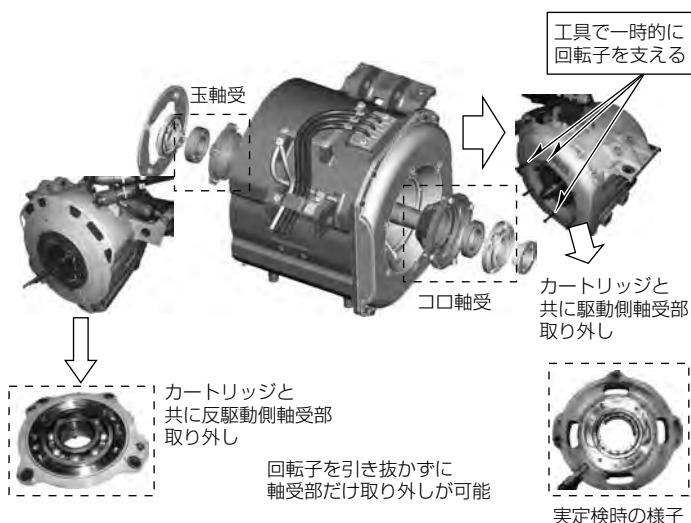


図6. 回転子非分解軸受交換構造

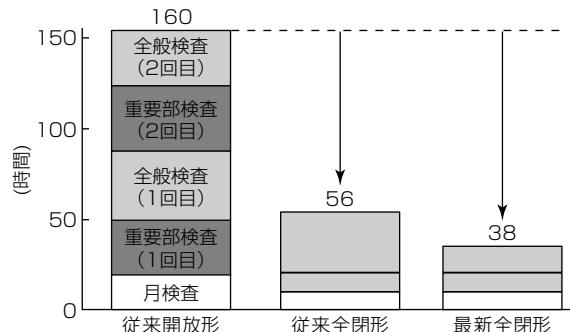


図7. メンテナンス時間の比較

## 6. む す び

鉄道車両は30年以上使用され、長いものでは50年以上使われるものもある。当社が扱う電気機器も同様で、メンテナンスを繰り返し30年以上の使用期間を想定している。このような鉄道車両での省エネルギー化や機器の高性能化、省メンテナンス化は、長年使い続ける鉄道車両の環境負荷軽減に大きな影響を与えるものとなる。

当社ではモータのみならず、モータを制御する主回路システム全体を含め、このような環境配慮型社会への適用技術を各製品へ展開していく。

## 参 考 文 献

- 山下良範, ほか: SiCパワーモジュール適用鉄道車両用インバータシステムの省エネルギー運転について, 電気学会全国大会論文集, 5-078, 128~129 (2012)
- 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, 1~4 (2012)
- 山下良範, ほか: SiCパワーモジュールを用いた鉄道車両用主回路システムの開発, 鉄道車両と技術, No.190, 6~11 (2012)

# 列車運行管理の高度化を支える シミュレーション技術

立石大輔\*  
田中雅也\*  
古林三郎\*

*Simulation Technologies for Advanced Train Supervision*

Daisuke Tateishi, Masaya Tanaka, Saburo Kobayashi

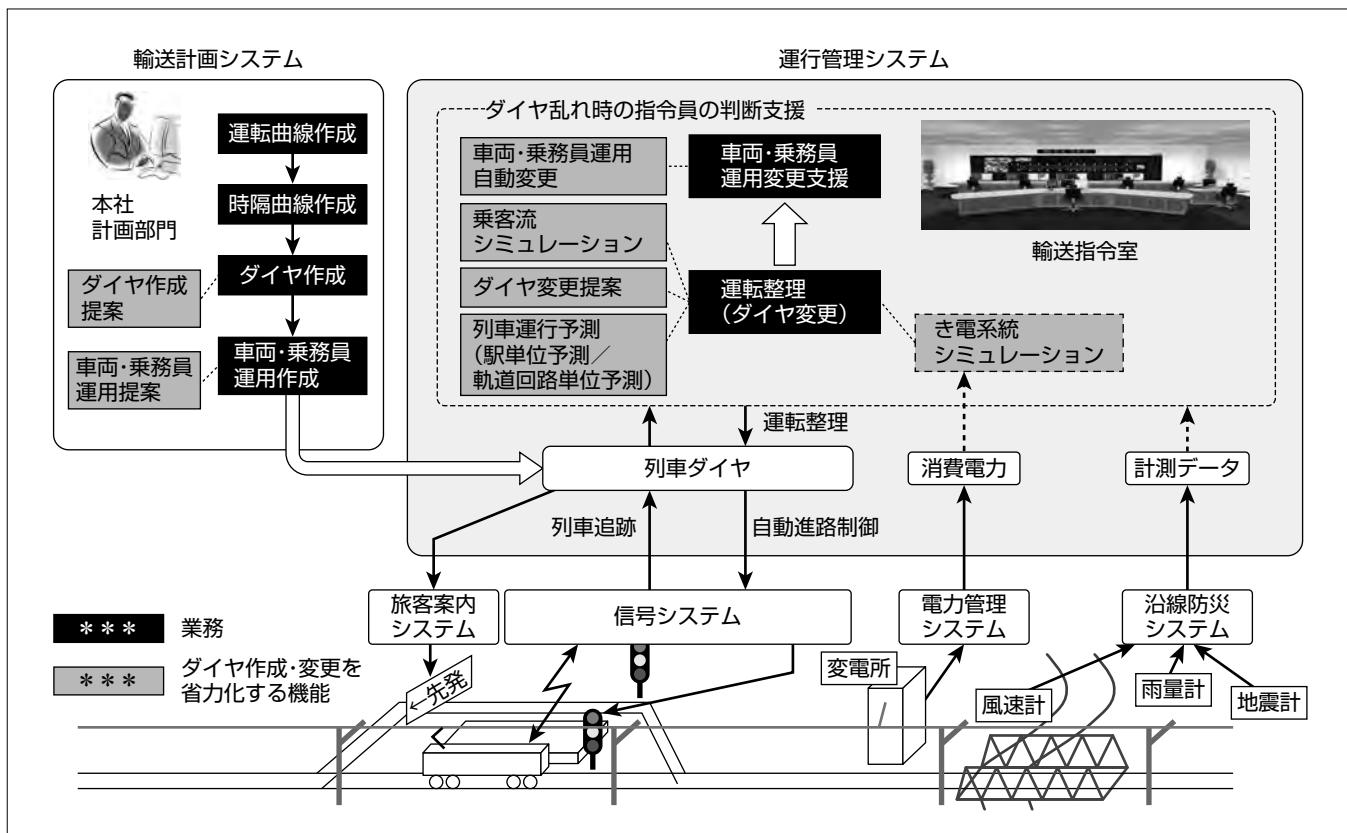
## 要旨

列車運行管理システムは、列車の位置を把握するとともに、運行計画(以下“ダイヤ”という。)に基づいて信号機を自動制御し、列車の運行をコントロールするシステムである。

1990年代、ワークステーションの普及によって、ダイヤをダイヤ図形式で入力し、関連する帳票を作成する輸送計画システムが開発され、ダイヤの電子データを基に、信号機の自動制御を行う現在の運行管理システムの形態が確立された。これに、気象情報を収集する沿線防災システム、電車への電力の供給状況を監視する電力管理システム、列車のダイヤを旅客に伝える旅客案内システムを組み合わせて、安定輸送の実現に大いに貢献している。

東京・大阪の大都市圏の通勤路線では、これまで、路線単位で独立して運行する路線が多くたが、近年、幹線同士を接続する新ルートの建設が行われた結果、様々な行先の列車がお互いに乗り入れて複雑な運行を行う路線が増加している。このため、ある路線での遅延が、他の路線に影響するケースが増え、輸送計画業務及び運行乱れ時に列車の運行を調整する運転整理業務の難易度が高まっている。

三菱電機では、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、輸送指令室の運転整理業務を支援している。



## 列車運行管理の業務フローとシミュレーション技術

列車運行管理の業務は、①列車のダイヤを作成する輸送計画業務、②現在の列車運行状況と、列車追跡・自動進路制御機能の動作を監視し、列車運行乱れ時にダイヤを調整する運転整理業務の2つに大別される。列車運行管理を支援する要素技術を各業務にマッピングした全体像を示す。

## 1. まえがき

列車の運行管理におけるシミュレーション技術は、まずは輸送計画システムで、ダイヤ作成提案機能、車両・乗務員運用提案機能として応用された。これらは、ベテラン社員の計画作成プロセスを分析し、手数が多い工程をアルゴリズム化して省力化したものであった。

一方、運行管理システムでは、運行乱れ時に行う運転整理案の検討の支援が求められたため、ダイヤ作成提案手法を応用して列車運行予測機能を開発した。そして現在は、指令員が整理案を評価・選択するノウハウを取り込み、車両・乗務員運用自動変更や乗客流シミュレーションの機能を追加し、発展を続けている。

本稿では、列車運行管理におけるシミュレーション技術の発展と今後の展望について述べる。

## 2. ダイヤ・運用計画作成の提案機能

### 2.1 ダイヤ作成提案

鉄道事業者では、線路や車両等のハードウェアに対して、ソフトウェアに相当するものがいわゆるダイヤである。

輸送計画の根幹となる“ダイヤグラム”は、横軸に時間を、縦軸に距離をとって1日の列車運行を表した図表である。かつてダイヤグラムは、時間帯ごとの旅客需要と設備の制約を勘案して、紙と鉛筆で試行錯誤しながら作成していた。これがCAD化されただけでも省力化の効果はあるが、大量の駅着発時刻のデータを入力する手間が残る。そこで、図1のように、列車の運転本数・運行区間・始発時刻といった初期条件を入力することで、設備制約を考慮したダイヤを自動作成する機能を1990年代に開発した<sup>(1)</sup>。これによって、輸送計画部門の担当者は初期条件を何パターンか用意し、それぞれに対してこの機能が提案する結果を見比べて、最良と思うダイヤを選択するだけでダイヤを作成できるようになった。初期条件のパターンは、輸送計画部門の担当者が用意する必要があるため、“半自動”的機能である。

### 2.2 車両・乗務員運用提案

個々の列車の時刻が定まれば、それに対して、車両・乗務員のやりくりを定める必要がある。車両運用と乗務員運用は一見似ており、列車が終点に到達したら別の列車に乗り継ぎを繰り返して終電まで走行する(乗務員の場合は1日の就労可能時間まで乗務する)のが基本であるが、乗務員運用の方が制約が多い。

乗務員運用の例を図2に示す。2時間に1回程度は休憩を入れるために、車両は直通するが、乗務員をH駅で交代している列車が存在する。また、図中の1番の乗務員は、日勤であれば6~7時間程度乗務し、11~12時頃乗務終了でも構わないが、そうすると列車本数が増加する朝のラッシュ時(7~9時)だけ乗務する乗務員が発生し、勤務時間

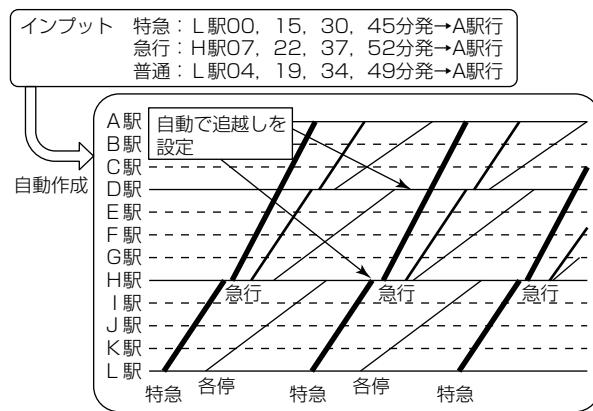


図1. ダイヤ自動作成の例

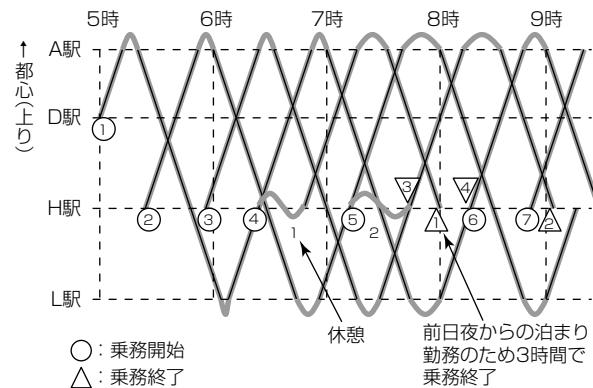


図2. 乗務員運用の例

が不公平になる。このため、始発列車を担当する乗務員は、前日夜に3時間程度、次の日の朝に3時間程度乗務する泊まり勤務とすることも行われる。

このような制約を考慮して、乗り継ぎ列車を自動で検索し、車両・乗務員運用を作成する機能を開発した<sup>(2)</sup>。これも、乗務開始時刻などの初期条件は輸送計画部門の担当者が手入力し、対応する車両・乗務員運用を生成する半自動の機能である。ダイヤ作成提案とともに、今では一般的な機能となっている。

## 3. ダイヤ乱れ時の指令員の判断支援

### 3.1 運転整理支援

#### 3.1.1 駅単位予測とダイヤ自動変更提案

計画部門で、ダイヤや車両・乗務員運用の作成を支援する輸送計画システムに対し、輸送指令室で日々の列車運行をつかさどるのが運行管理システムである。そのオペレータ(指令員)は、車両故障、事故、大雨など列車の運転見合せが発生すると、各列車への運転見合せの指示に引き続き、“運転整理”と呼ばれる作業に入る。運転整理は、運転再開時刻の見当をつけた上で、再開後にいかに通常運行に戻すかを検討する作業である。その方法は、運転見合せ範囲にかかる列車を紙のダイヤグラム上で後方に移動し、その列車と接続待ちの列車を後方に移動する作業の繰り返しであ

る。しかし、運転再開見込み時刻は目まぐるしく変わることが多く、そのたびに整理案が書き直しとなる。場合によっては、運転再開までに整理案が間に合わず、通常運行への復帰がままならない事態に陥ることもあった。

紙のダイヤグラム上で検討する方法は、輸送計画でのダイヤ作成とほぼ同じである。そこで、運転見合せ時点での各列車の位置を初期値として、運転再開後のダイヤを自動計算することによって、指令員の運転整理案の検討を迅速化する列車運行予測機能を開発した。駅の着発単位で計算するため、“駅単位予測”と呼ばれている。

列車運行予測機能を用いた運転整理の流れを図3に示す。乗務員からの列車非常停止の一報を受けた指令員が、端末に遅延発生列車と運転再開見込み時刻を入力すると、計画ダイヤ上での順序を守った上で後続列車が順次遅れていく予測結果を表示する。このとき、遅れている各停の後追いとなり徐行運転を強いられる特急列車に、赤丸(警報マーク)が表示される(図3(b))。この警報マークをクリックすると、特急と各停の順序変更を行った予測結果を表示する(図3(c))。

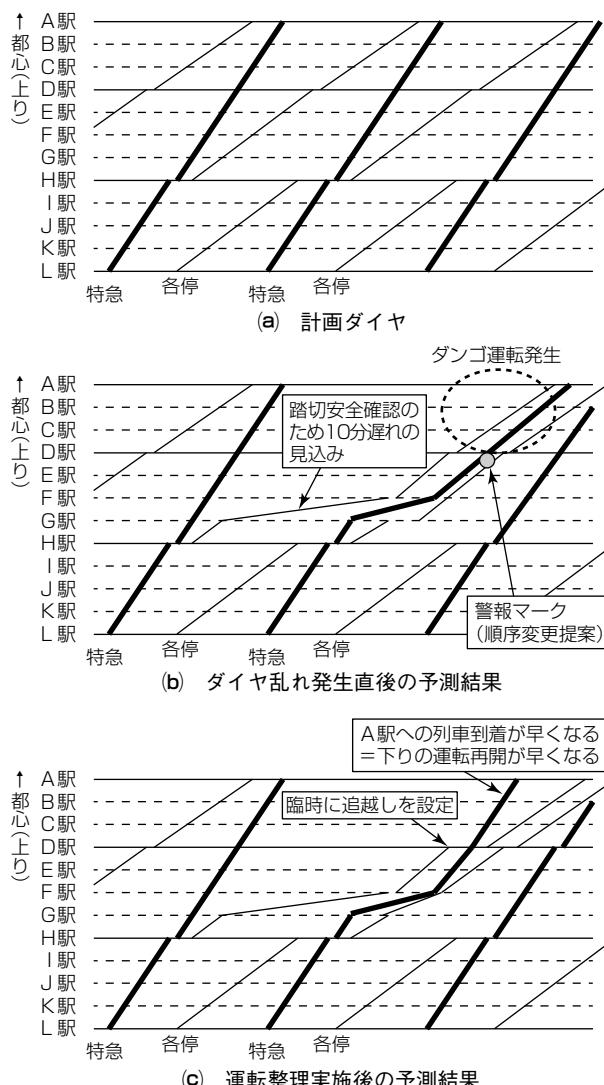


図3. 列車運行予測(駅単位予測)と運転整理提案

### 3.1.2 軌道回路単位予測

駅単位予測は、運転整理の迅速化に役立ったが、指令員が列車運行予測に慣れると、今度は、予測結果と運行実績の差が大きいという指摘が出るようになった。駅単位予測は、ダイヤ作成の技術をベースにしているため、一旦出発した列車は線路がすいている限りは、次駅まで計画の駅間走行時分で走行する前提である(図4(a))。しかし、列車運行が乱れて列車の間隔が短くなると、駅の手前で信号待ちが発生するため所要時間が長くなり、さらに、後続列車の信号待ちを誘発するという悪循環に陥ることがある(図4(b))。このため、駅単位予測では、実際よりも早く到着する予測となることが多い。

そこで、計算機内で数秒ごとに列車の位置・速度、運動装置や自動進路制御機能の振る舞いを計算し、未来の列車運行をシミュレートすることによって抜本的解決を図った。これを、“軌道回路単位予測”と呼ぶ。駅単位予測は、数分ごとに駅を通過するイベントを処理すればよいが、軌道回路単位予測は、数秒ごとに列車の位置等を計算するので、格段に計算量が増大する。しかし、計算機の高速化もあり、現在では100列車超の動きを1時間先まで数秒でシミュレーションできるようになった。高精度な予測が必要な範囲は、現在時刻から30分～1時間程度でよいため、1時間先以降は駅単位予測に切り替えるハイブリッド型としている。

### 3.1.3 乗客流シミュレーションによるダイヤの評価

ここまでダイヤ作成提案や列車運行予測は、いずれも、列車本数などのダイヤの大枠は人間が決め、計算機はその枠内でシミュレーションするものであった。更に一步進めて計画ダイヤ作成や運転整理を全自動化するためには、何が“良いダイヤ”か評価する手法が必要になる。

ベテランのダイヤ作成担当者や指令員は、時間帯ごとにどういった利用が多いかを考慮しながら、特定の列車に乗客が偏らないよう、或いは特定の駅に乗客が滞留しないようダイヤを調整している。この過程を可視化するのが、乗客流シミュレーションである。

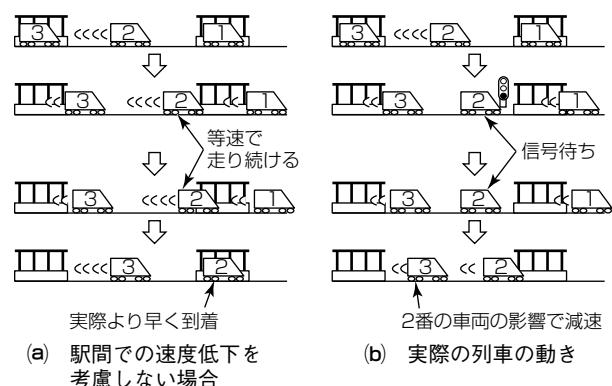
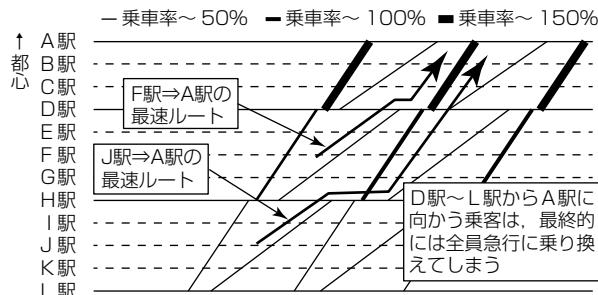


図4. 駅単位予測の制約と軌道回路単位予測の必要性



(a) 特定の列車に乗客が集中する例

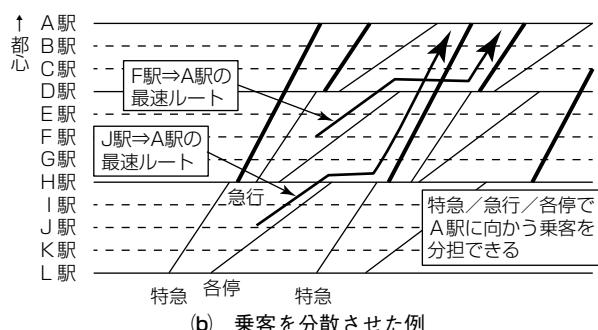


図5. 乗客流シミュレーション

今日、ICカード乗車券の普及によって、時間帯ごとに、発駅／着駅の組合せごとの利用者数(OD(Origin-Destination)データ)を詳細に取れるようになった。一方、都市近郊鉄道では、乗客が列車を選ぶ基準は、次の2パターンに大別されるといわれている。

パターン1：いつでも最速経路を選択する

パターン2：急行列車の混雑度が上昇すると、多少時間がかかるとしても混雑度が低い各停を選択する

そこで、与えられたダイヤに対してこれら2パターンの経路を検索し、ODデータに当てはめて、各経路・各列車の利用人数を求める乗客流シミュレーション機能を開発した。

図5に、乗客流シミュレーションの実施例を示す。図の(a)では、D駅～L駅からA駅に向かう乗客が全て急行に乗車するため乗車率が高くなっているが、図の(b)では、H駅～L駅からA駅に向かう乗客は特急を利用するため、列車間の混雑度のばらつきを抑えることができている。

### 3.2 車両・乗務員運用自動変更

運転整理によってダイヤを修正すると、それに応じて車両・乗務員運用も見直しが必要になる。しかし、2.2節述べた乗務員運用作成の手法は、計画段階用のため、前回の運用割当て結果は考慮していない。このため、そのまま運用変更に適用しようとすると、軽微な運行乱れに対して、乗務員全員の運用が変わってしまうような運用変更案を作成する可能性がある。

そこで、運用変更の支援用に、計画時点での運用からの変更を少なくすることを重視した運用整理アルゴリズムを開発した<sup>(3)</sup>。列車の遅延や運休などによって、計画通り乗

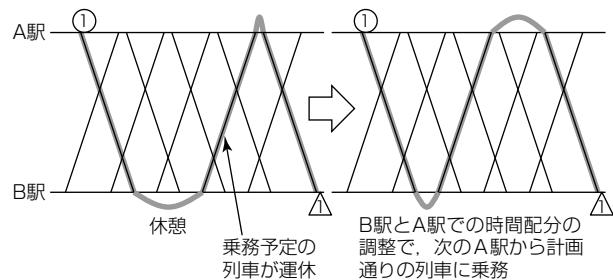


図6. 乗務員運用変更の例

り継ぎができなくなった時刻以降の運用を一旦消去し、再作成するときに、計画時点で担当予定であった列車へ優先的に乗り継ぐようにしている。ただし、乗り継ぎ待ち時間が最短の列車を選択しない箇所が増え、予備の乗務員が大量に必要になる場合は、再計算し、現実的な運用整理案を提示する(図6)。

### 3.3 き電系統シミュレーション

電気鉄道には、車両が加速するときは電力を消費するが、ブレーキをかけるときは発電するというように、使用電力の変動が激しいという特性がある。このため、加速中の列車の近傍で別の列車がブレーキをかけると省エネルギーになるが、運転見合せ発生によって停車させた列車を一斉に出発させると、変電所の容量オーバーとなる可能性がある。そこで、列車運行予測結果を基に変電所の負荷分担を求め、変電所の容量オーバーのおそれがある場合には警報を出す機能を開発している。

## 4. む す び

輸送計画作成及び輸送指令室の指令員向けの支援機能について述べた。今後は、これらを更に強化して、鉄道の安定輸送に貢献していく。

また、信号システムの分野で進行している技術革新(CBTC(Communication-Based Train Control)などの無線技術を応用した信号システム)に対応した運行管理システム、省エネルギーを考慮した輸送計画／運転整理支援の開発にも取り組んでいく。

## 参 考 文 献

- (1) 北川英裕美, ほか: 多様な路線形態を対象とした列車ダイヤ作成支援システム - DIAPLAN-II -, 電気学会論文誌D, 116, No.8, 874~882 (1996)
- (2) 中桐慶之, ほか: 時刻改正支援システムの開発～乗務員行路シミュレーション機能を備えた支援システム～, 第37回鉄道におけるサイバネティックス利用国内シンポジウム論文集, 29~32 (2000)
- (3) 片岡健司, ほか: 乗務員運用整理支援システムの検証試験, 第43回鉄道におけるサイバネティックス利用国内シンポジウム論文集, No.407 (2006)

# 欧洲向け鉄道車両用空調装置の最新技術と今後の展望

井上武志\*  
山村彰紀\*  
新宮和平\*

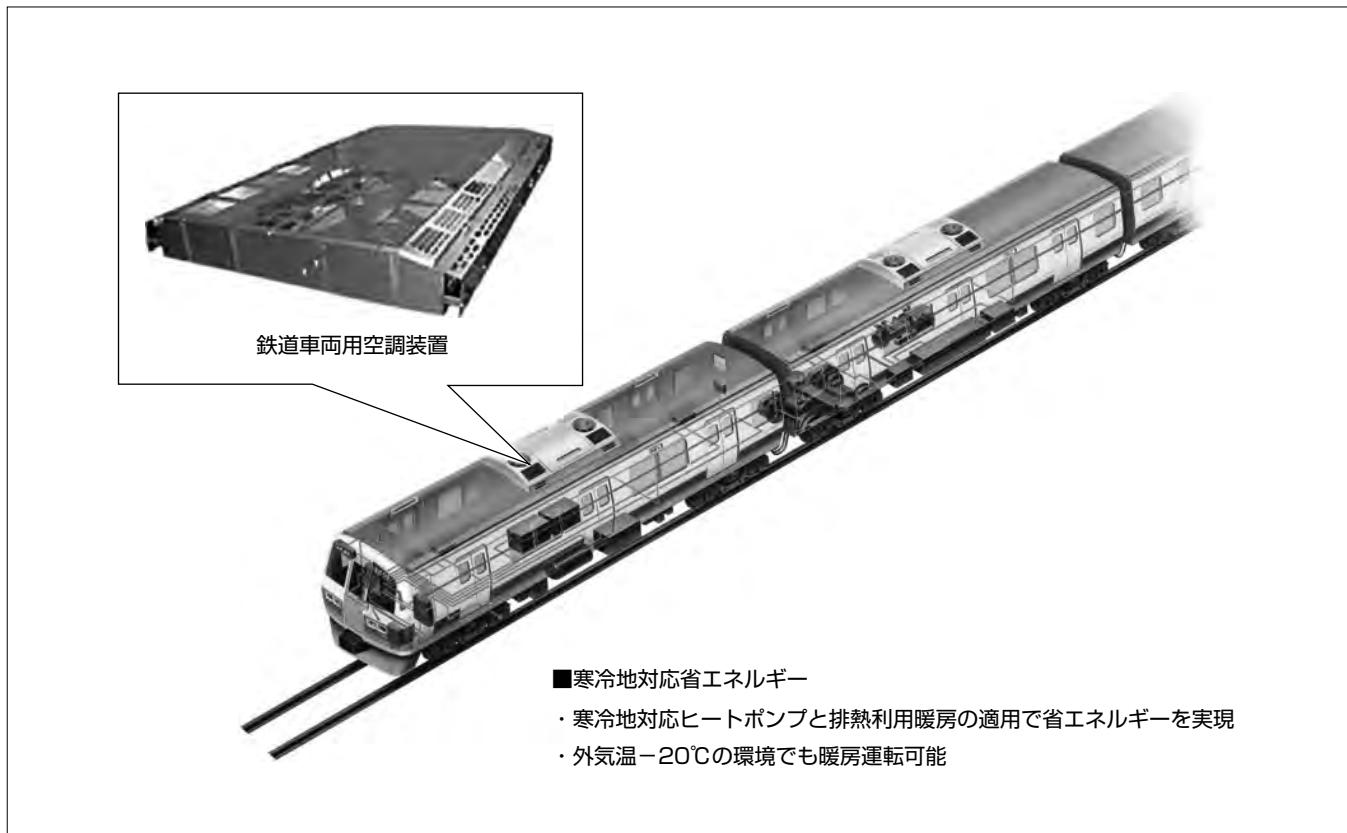
Latest Technologies and Future Prospects for Railcar Heating, Ventilation and Air Conditioning Unit for European Railway  
Takeshi Inoue, Akinori Yamamura, Wahei Shingu

## 要旨

鉄道車両用空調装置は、近年の地球温暖化の影響で、欧洲地域でも需要が増えつつある。欧洲地域の鉄道車両用空調装置は、従来は冷房が搭載されておらず、暖房は座席下電気ヒーターによる方式が採用されていた。

省エネルギーの需要も高まってきており、消費電力の削減のためにヒートポンプや車両から排出される排熱を利用した暖房などの省エネルギー技術を採用するケースが増えつつある。また、欧洲地域には氷点下数十度の極寒の環境もあるが、そのような寒冷地でも車両の冷房化が進みつつある。

このような背景から、三菱電機は寒冷地対応のヒートポンプ機能、排熱利用暖房機能及び電気ヒーター機能を搭載した空調装置を開発した。新開発の空調装置は暖房を常に運転可能とするため、排熱利用暖房、ヒートポンプ、電気ヒーターの3つの暖房機能を採用し、これらを併用することで冗長性のある暖房システムを構築した。さらに、外気温-20°Cという低外気温の環境下でも快適性を保つことができるヒートポンプによる暖房性能を実現するため、冷媒サイクルに冷媒循環量を増加させるインジェクション回路とHIC(Heat Inter Changer)を採用した。



## 欧洲向け鉄道車両用空調装置

欧洲向け鉄道車両用空調装置は、寒冷地での暖房運転と省エネルギーが要求されている。当社は、外気温-20°Cでも運転可能な寒冷地対応ヒートポンプ機能、排熱利用暖房機能及び電気ヒーター機能を搭載した空調装置を開発した。

## 1. まえがき

鉄道車両用空調装置は、近年の地球温暖化の影響で、欧洲地域でも需要が増えつつある。欧洲地域の鉄道車両用空調機能は、従来は冷房が搭載されておらず、暖房は座席下電気ヒーターによる方式が採用されていた。当社は、2003年にアテネメトロ向けに欧洲地域へ初めて空調装置を納入してから、数々の国へ空調装置を納入している。近年は、省エネルギーの需要も高まってきており、消費電力の削減のためにヒートポンプや車両から排出される排熱を利用した暖房などの省エネルギー技術を採用するケースが増えつつある。また、欧洲地域には氷点下数十度の極寒の環境もあるが、そのような寒冷地でも車両の冷房化が進みつつある。このような背景から、当社は寒冷地対応のヒートポンプ機能、排熱利用暖房機能及び電気ヒーター機能を搭載した空調装置を開発した。

本稿では、寒冷地対応のヒートポンプ機能、排熱利用暖房機能及び電気ヒーター機能を搭載した空調装置の開発の課題と対策について、ヒートポンプ機能に焦点をあてて述べる。

## 2. 寒冷地対応省エネルギー空調システム

図1に、寒冷地対応省エネルギー空調システムを示す。欧洲地域では、鉄道車両への冷房の需要が増えつつあるが、空調装置として求められる仕様は暖房機能が重視されている。寒冷地対応省エネルギー空調システムは、ヒートポンプ、排熱利用暖房、電気ヒーターの3つの暖房機能を搭載している。仮に、車両からの排熱が十分に利用できず、空調装置の圧縮機が故障した場合でも、電気ヒーターで暖房することができる冗長性のあるシステムとなっている。

この空調システムでは3つの暖房機能を併用しており、排熱利用暖房>ヒートポンプ>電気ヒーターの優先順位で暖房運転が制御され、省エネルギー運転ができる。この省エネルギー暖房システムを図2に示す。排熱利用暖房では、車両側のトラクションモータやトラクションインバータ等の冷却液を空調装置に引き込み、排熱を暖房の熱源として再利用する。

## 3. 空調装置に求められる要求仕様

欧洲向けの寒冷地対応空調装置に求められる仕様とその実現方法は、次のとおりである。

### (1) 省エネルギーの実現

空調装置の省エネルギーはヒートポンプ及び排熱利用暖房の省エネルギー技術の採用によって実現できる。

### (2) 寒冷地でも暖房運転可能

寒冷地(低外気温度)における暖房運転は、冷媒循環量を増加するためのインジェクション回路とHICの採用によっ

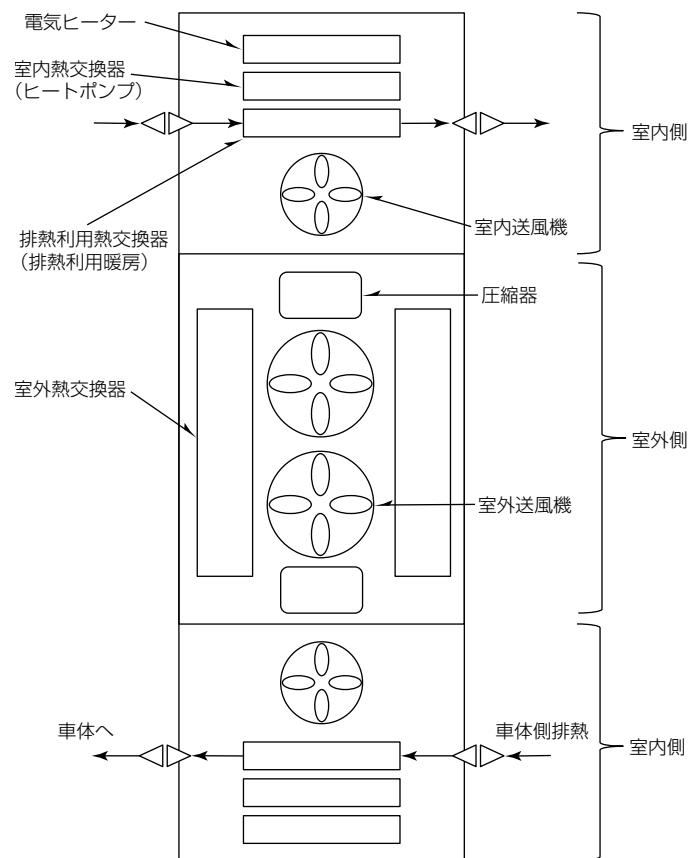


図1. 寒冷地対応省エネルギー空調システム

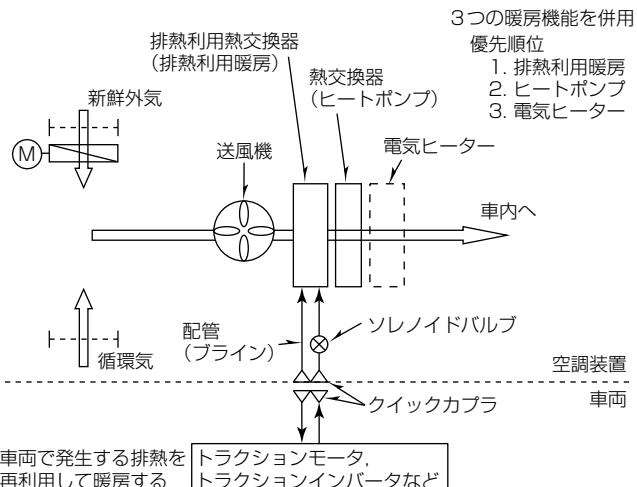


図2. 省エネルギー暖房システム

表1. 開発目標仕様

項目	仕様
暖房能力(ヒートポンプ)	現行から20%改善
車内温度	7.8°C
車外温度	-20°C
使用冷媒	R407C

て実現できる。

これらを踏まえて、当社では寒冷地対応ヒートポンプ暖房の開発目標を設定した。表1に当社が開発した空調装置の目標仕様を示す。

## 4. 開発の課題と対策

### 4.1 低外気温環境下でのヒートポンプ暖房の課題

ヒートポンプ暖房では、冷媒の特性上、外気温が低温になると暖房能力が低下する。それは、冷媒循環量が低下するからである。暖房能力の算出式を式(1)に示す。

$$Q_c = G_r \times \Delta h \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $Q_c$ =暖房能力(kW),  $G_r$ =冷媒循環量(kg/s),  $\Delta h$ =比エンタルピー差(kJ/kg)である。外気温が低温になると熱交換される冷媒も温度が低下し、圧縮機吸入の冷媒圧力が低下する。すなわち、冷媒ガス密度が低下する。冷媒ガス密度は式(2)のとおりで、冷凍サイクル内を循環する冷媒循環量を決める要素の1つである。

$$G_r = V_{st} \times \rho_s \times H_z \times \eta_v \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $V_{st}$ =圧縮機押しのけ量(m<sup>3</sup>),  $\rho_s$ =圧縮機吸入の冷媒ガス密度(kg/m<sup>3</sup>),  $H_z$ =圧縮機周波数(1/s),  $\eta_v$ =圧縮機体積効率(%)である。すなわち、外気が低温になると冷媒ガス密度が低下し、冷媒循環量が低下することで暖房能力が低下する。したがって、外気温が低い環境下でも一定の暖房能力を得るために、冷媒循環量を増やすことが課題となる。

### 4.2 インジェクション回路とHICによる対策

外気温が低い環境下で冷媒循環量を増やす方法として、インジェクションとHICを用いて冷媒循環量を増加させる技術を採用した。**図3**に、寒冷地対応車冷ヒートポンプ回路を示す。主な構成要素は、圧縮機、室外熱交換器、室内熱交換器、HICなどである。新開発の空調装置は、冷媒循環量を増加させるために、インジェクション回路を追加した。それに伴い、圧縮機はインジェクション機構付き横型スクロール圧縮機を採用した。インジェクションとは、圧縮機途中に冷媒を注入する中間圧バイパスのことである。**図4(a)**に示すとおり、インジェクション量を増やしていくと、高圧側の冷媒循環量が増加するため暖房能力は増加す

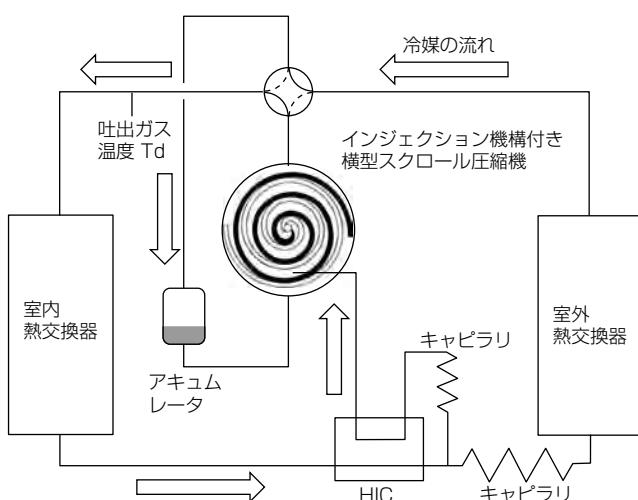
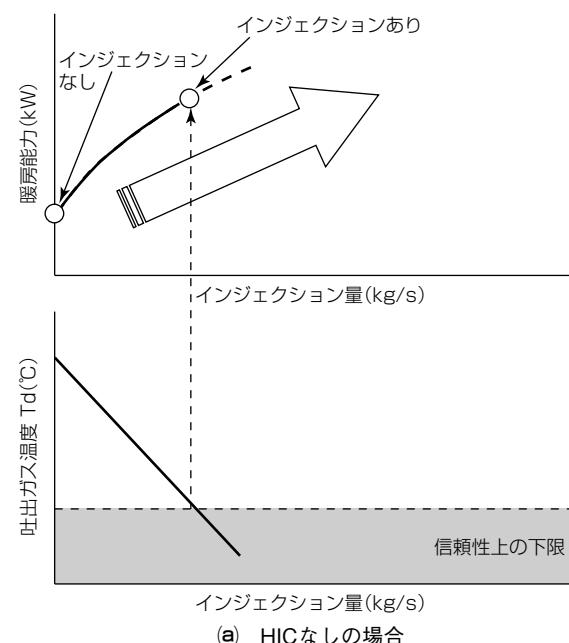


図3. 寒冷地対応車冷ヒートポンプ回路

る。しかし、インジェクションされる冷媒は気液二相の冷媒であり、圧縮機吐出ガス温度を低下させてしまうため、吐出ガス温度の信頼性における下限値前でインジェクション量は頭打ちとなる。

吐出ガス温度を極力低下させずにインジェクション量を増やすために、**図5**に示すHICを追加した。HICは、二重管構造となっており外配管に高温な液冷媒を流し、内配管にインジェクション冷媒である気液二相の低温冷媒を流すことによって、外配管と内配管で熱交換をさせる。したがって、インジェクション冷媒を加熱して乾き度を大きくすることで、**図4(b)**に示すとおり吐出ガス温度の低下を抑制し、インジェクション量を最大化して暖房能力を増大させることができる。



(a) HICなしの場合

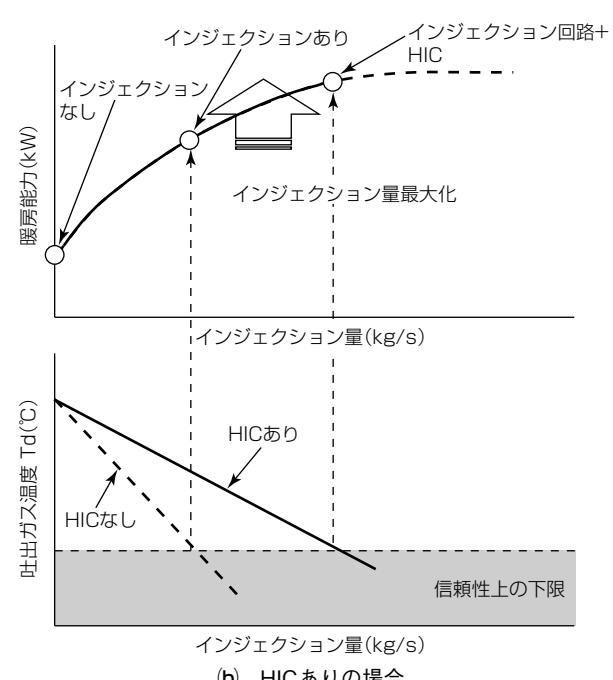


図4. インジェクション量増加の影響

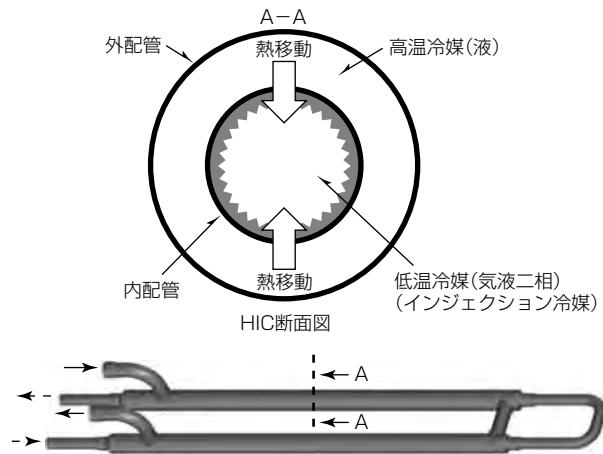


図5. HIC

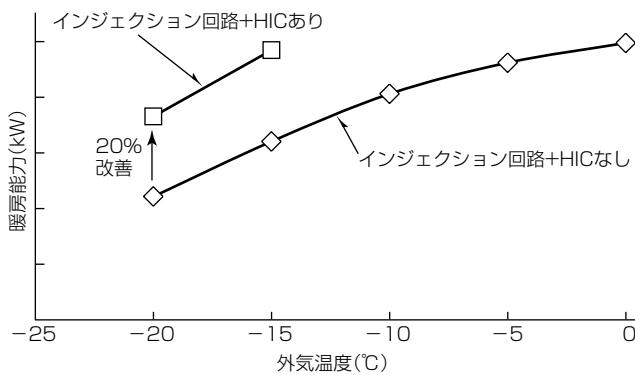


図6. 外気温度と暖房能力の関係

欧州向け鉄道車両用空調装置にインジェクション回路とHICを用い、図6に示すとおり外気温-20°Cで暖房能力を20%改善できた。なお、当社はこの技術を適用した空調装置を、2015年7月に欧州向けに出荷を開始した。

## 5. む す び

欧州向け鉄道車両用として、寒冷地対応ヒートポンプ回路を搭載した空調装置を開発した。この空調装置は、低外気温(-20°C)環境下での暖房能力を20%改善しており、今後の欧州向け空調装置の主要技術として採用する計画である。本稿で述べた寒冷地対応ヒートポンプ暖房を搭載した空調装置を採用する車両は、今後増加していくことが予想される。また、欧州市場では環境負荷低減の思想の下、2015年から欧州内の冷媒流通量規制(HFC(ハイドロフルオロカーボン)フェーズダウン)が開始される。流通量は、CO<sub>2</sub>換算質量(地球温暖化係数(Global Warming Potential : GWP) × 冷媒量)で管理され、2015年を100として段階的に引き下げてゆき、2030年に21まで引き下げることが計画されている。現在、車両用空調装置で使用している冷媒はR407Cであり、そのGWPはCO<sub>2</sub>を1とすると1,774で、環境への負荷が大きいことが懸念される。今後は市場動向を注視しつつ、市場のニーズに沿った新冷媒の検討を進めていく。

西川孝雄\*  
田中 憲\*  
上田達也\*

# 交通変電システムの最新技術と今後の展望

Latest Technologies and Future Outlook of Transportation Substation System

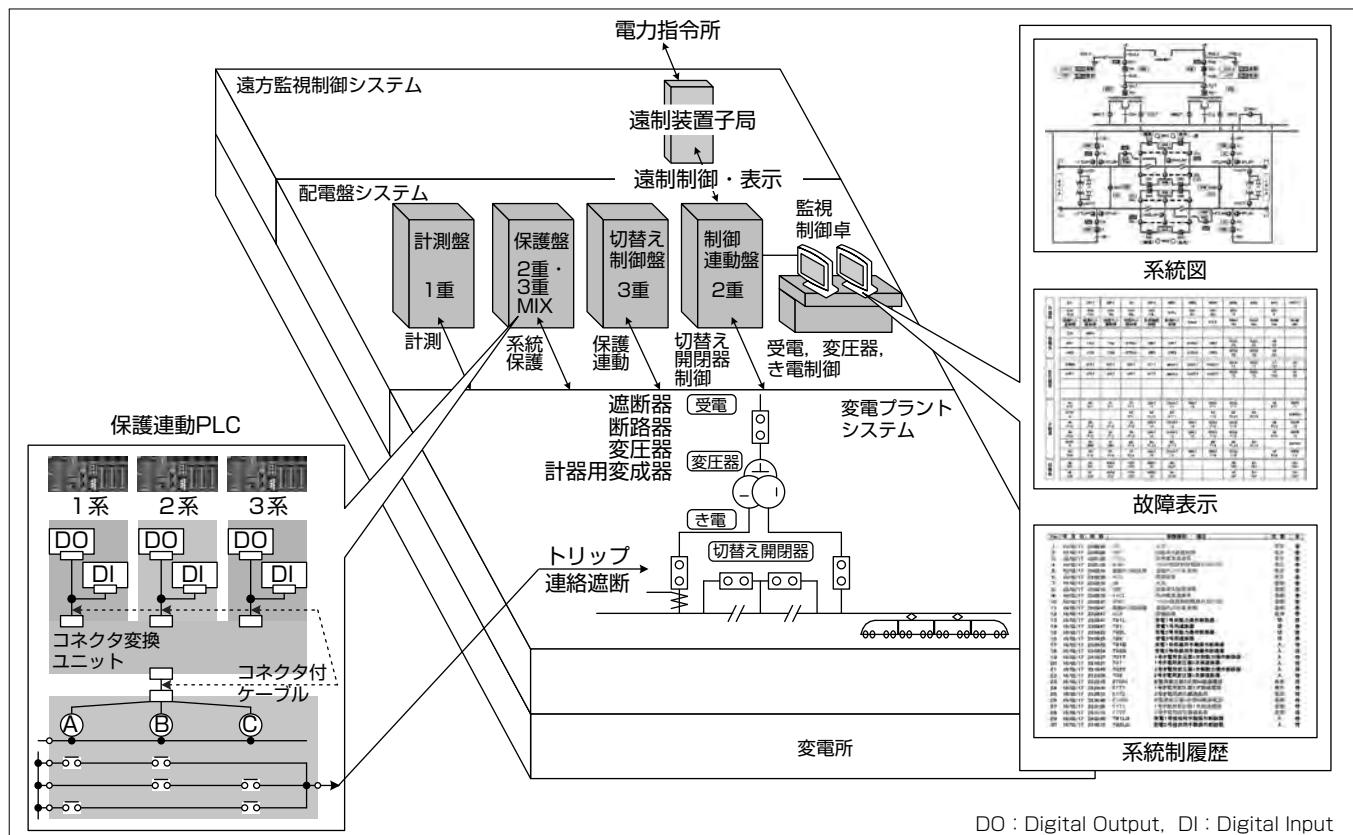
Takao Nishikawa, Ken Tanaka, Tatsuya Ueda

## 要旨

社会インフラとして重要度がますます高まっている鉄道で、交通変電システムは安全・安定輸送を支えるために、電車へ安定した電力を供給するという重要な役割を担っている。近年、多数の最新技術を応用した変電設備が導入されている。

特に進化している新幹線の変電所配電盤は、静止形装置を主部品として採用したマイクロエレクトロニクス(Micro Electronics : ME)配電盤の導入が進められており、近年の鉄道事業者のニーズとして、更なる高信頼性、省スペース化、高機能化が求められている。

三菱電機のME配電盤は、制御の中核となるプログラマブルロジックコントローラ(Programmable Logic Controller : PLC)を、機能の重要度や目的に応じた最適な多重化方式にすることで、信頼性と性能を各々高いレベルで両立させている。特に、複数部品のユニット化や、PLCの機能集約を行うことによって、構造のコンパクト化と同時にシステムのシンプル化を実現している。さらに、高性能のPLCを適用するとともに、必要に応じてマルチCPU構成にすることで、制御・保護の高速化を実現している。



## 新幹線向け変電所配電盤

変電所配電盤は、遮断器、断路器、変圧器などから構成される変電所内の各機器の監視・制御・保護を行う機能を持つ。新幹線の変電所配電盤は、制御運動盤、切替え制御盤、保護盤、計測盤などの機能単位で分割された複数の盤で構成される。配電盤は、遠方監視制御装置を介して、電力指令所からの情報受渡しを行っている。

## 1. まえがき

交通変電所配電盤として、最新のME技術を採用したME配電盤が導入されている。日本の大動脈である新幹線では、更なる電力安定供給を実現する上で、配電盤の高い信頼性が必要とされる。さらに、近年の鉄道事業者のニーズとして、保守性が高く、よりシンプルな構成の配電盤システムが求められている。当社は、これらの要求に応えるため、信頼性向上を図りつつコンパクト化、高機能化を実現したME配電盤を製品化している。

本稿では、新幹線向けME配電盤の標準的な機能、構成について述べる。また、当社配電盤システムの特長である高信頼性・コンパクト化・高機能化の面を中心に、配電盤の最新の技術動向と今後の展望について述べる。

## 2. ME配電盤システム

### 2.1 ME配電盤

新幹線の変電所は、電力会社から送られてきた電力を変圧器で電圧・相の変換を行い、電車に供給する設備である。配電盤は、変電所の変圧器や遮断器などの機器の監視・制御や、主回路の故障を検出し、異常部分を切り離すなどの機能を持っている。監視・制御・保護を確実に行い、電車への安定した電力供給と事故波及防止を行うという重要な責務がある。

従来は、補助リレーなどの機械式の主部品を用いたメカ型の配電盤が採用されていた。近年導入が進んでいるME配電盤は、静止形装置を主部品として採用しており、制御にPLCを、保護にデジタル式の保護継電器を用いている。

### 2.2 ME配電盤の機能及びシステム構成

新幹線の変電所配電盤は、機能単位で分割された複数の盤から構成されている。変電所の各機器の監視・制御をつ

かさどる制御連動盤及び切替え開閉器の制御を行う切替え制御盤には、連動PLC及び切替えPLCを実装する。また、主回路の異常時に遮断器を開放する系統保護及び断路器開放などの保護連動を行なう保護盤には、保護継電器及び保護連動PLCを実装する。ME配電盤の構成を表1に、ME配電盤の外観を図1に示す。

ME配電盤の各PLC間、遠方監視制御装置間など、各装置間の接続を容易にするために、ネットワークにLANを用いている。制御用、計測保全用といった機能ごとにLANを分離することで、LANトラフィック増大による制御遅延を排除し、システムの安定性と応答性を向上させている。ME配電盤のシステム構成を図2に示す。

### 2.3 ME配電盤の付帯機能

ME配電盤は、2.2節で述べた基本的な機能以外にも、多くの付帯機能を具備している。その例を次に示す。

表1. ME配電盤の構成

種別	主な機能	多重化構成
制御連動盤	受電、変圧器、き電の各機器の制御	2重(PLC)
切替え制御盤	切替え開閉器の制御	3重(PLC)
保護盤	系統保護、保護連動、インタロック	2重(保護継電器) + 3重(PLC)



図1. ME配電盤

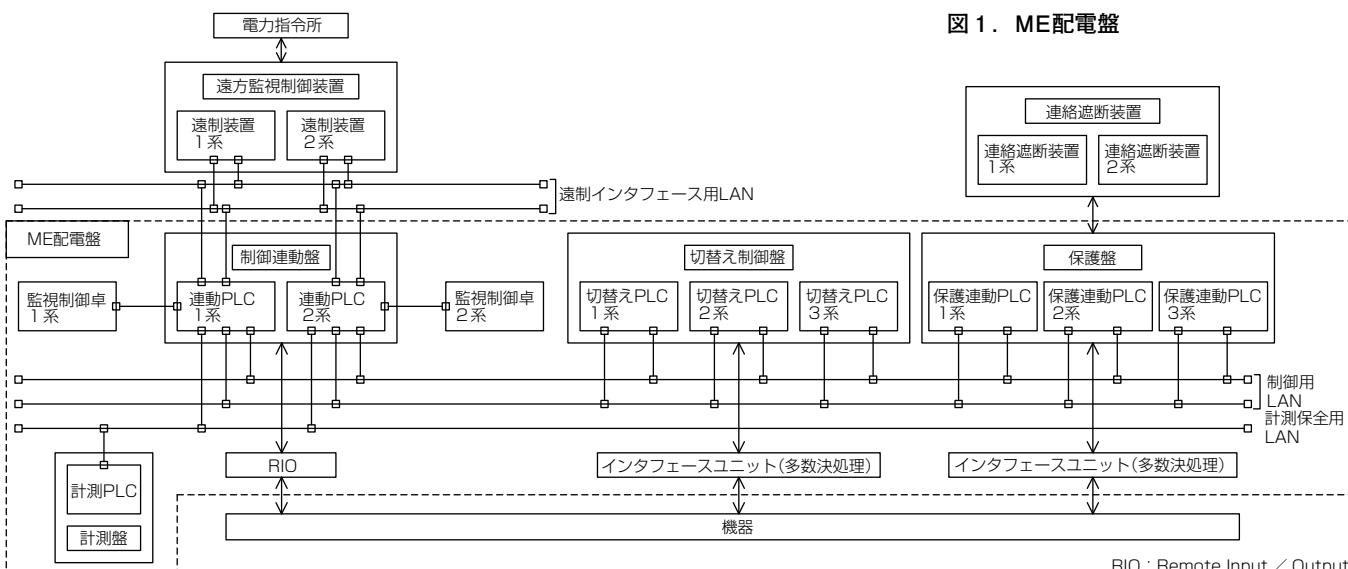


図2. ME配電盤のシステム構成

故障名	整定値		
	現在値	変更値	整定範囲
51R1 短絡遮断(1)	動作電流(A) 4.0	Lock (0.01~1~12A (0.1A Step)) 0.25~0.5~50 (0.5 Step)	
	動作時間(ダイヤル) 反復時1 反復時2 反復時3	超反復時1 超反復時2 超反復時3	長反復時1 長反復時2 長反復時3
	復帰特性 動作電流(A) 動作時間(ダイヤル)	反復時 99.9 0.25	定復時1 Lock (0.01~1~12A (0.1A Step)) 0.25~0.5~50 (0.5 Step)
短絡遮断(2)	動作特性 動作電流(A) 動作時間(ダイヤル)	反復時1 反復時2 反復時3	超反復時1 超反復時2 超反復時3
	復帰特性 動作電流(A) 動作時間(ダイヤル)	反復時 10.0 0.0	定復時1 Lock (0.01~0.1~1~1.5A (0.1 Step)) INST(0.01~0.1~1~5A (0.1 Step))
	地電位遮断 動作電流(Sec) 第2高調波抑制(f2/f1) (%)	99 0.0 10	INST(0.01~0.1~1~5A (0.1 Step)) NO(0.01~10~25% (5% Step))

図3. 整定値表示・変更の画面イメージ

### (1) 保全データ収集機能

機器の動作時間や動作回数などの計測、事故波形記録、系統事象のログ収集、計測値をもとにした帳票作成などを可能にした。

### (2) 保護継電器の整定値表示・変更機能

保護継電器に搭載された通信機能を活用し、配電盤の監視画面への保護継電器の整定値一覧表示及び画面操作による整定値変更を可能にした(図3)。

## 3. システムの特長

### 3.1 高信頼性

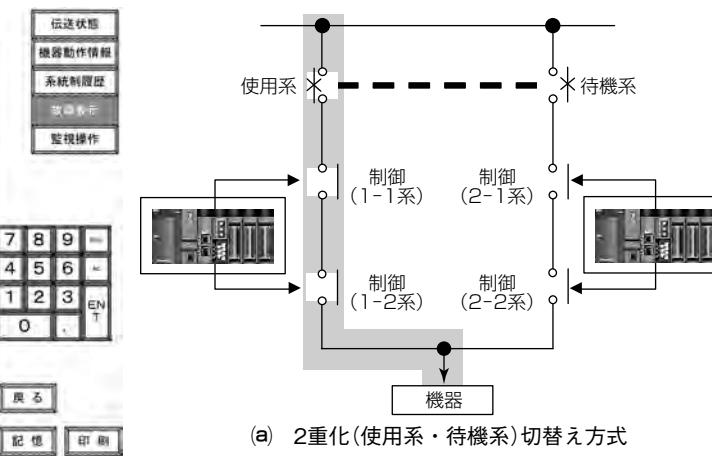
配電盤のPLCは、信頼性・大きさ・性能などを総合的に考慮し、それぞれの機能に応じた最適な多重化方式を用いていている。連動PLCは2台のPLCによる2重化(使用系・待機系)切替え方式に、切替えPLC及び保護連動PLCはより信頼性を高めるために、3台のPLCによる3重化多数決論理方式にしている。多重化方式を図4に示す。

#### (1) 2重化(使用系・待機系)切替え方式

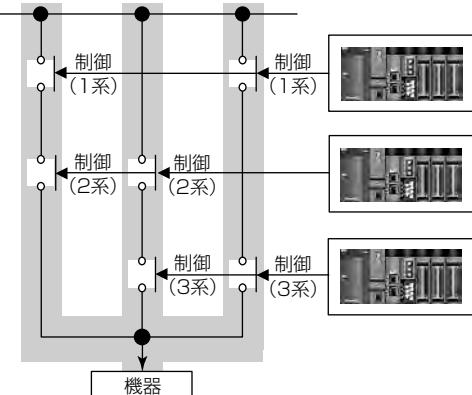
2重化(使用系・待機系)切替え方式とは、使用系の異常が発生した場合、自動で待機系からの出力に切り替わる方式である。使用系PLCの正常時でも、内部の演算は使用系・待機系PLCの両方で行うが、出力は使用系PLCだけで行うホットスタンバイ方式を採用することで、使用系PLC故障時の制御不応動を防止し、信頼性を確保する。また、PLCの制御出力は、信頼性を確保しつつ制御遅れを最小とするために、出力接点を2重化している。

#### (2) 3重化多数決論理方式

2重化(使用系・待機系)切替え方式では、使用系の異常が発生した場合、待機系への切替えに数百ms程度の時間を要するため、切替え処理中の制御出力に遅れが生じる。切替えPLCと保護連動PLCで行う処理は、出力の遅れをできるだけ少なくする必要があるため、PLCを3重化構成とし、完全に独立して動作する3台の出力の多数決論理(2 out of 3)で制御する。これによって、PLC 1台の故



(a) 2重化(使用系・待機系)切替え方式



(b) 3重化多数決論理方式

障時でも他の2台のPLCで、切替えによる処理の遅れがないように出力でき、処理の信頼性の向上を実現した。

### 3.2 コンパクト化

配電盤の更新工事では、限られた余剰スペースで行う必要があるため、配電盤の面数削減などのコンパクト化が必要である。一方、一定の性能と信頼性を確保するために、PLCの多重化や機能ごとのPLCを配置することで使用部品数量が増え、盤面数が増加することになる。そこで当社は、次に示すような複数部品のユニット化やPLCの機能集約を行った。その結果、標準的な変電所では専有面積を当社従来比約75%(盤幅計5,800mm)、き電区分所・補助き電区分所では約40%(盤幅計3,150mm・1,500mm)にするコンパクト化を実現した。

#### (1) RIO内蔵型インターフェースユニット

RIOは、PLCと外部装置や機器との信号の取り合いに用いる装置である。また、インターフェース(IF)ユニットは、リレー出力と電圧変換を行う装置である。従来、PLCで入出力処理を行う場合、RIO入力ユニット、RIO出力ユニット及びIFユニットの3つのユニットから構成し、相互間はコネクタ付きケーブルで接続していた。これらを一体化するとともに、従来IFユニットと同サイズで実現したRIO内蔵型IFユニットを開発した。RIO内蔵型IFユニットの外形・構成を図5に示す。RIO内蔵型IFユニットを制

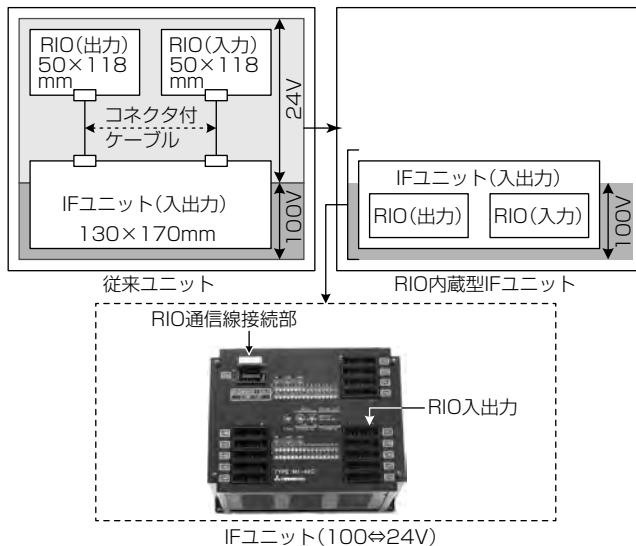


図5. RIO内蔵型IFユニット

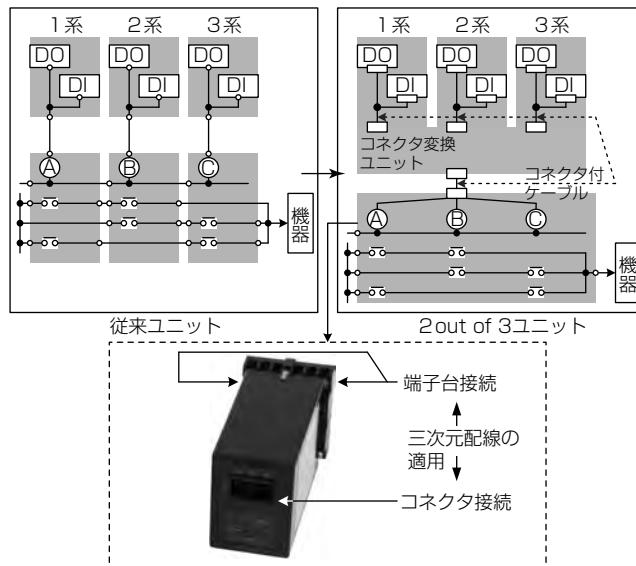


図6. 2 out of 3ユニット

御運動盤に使用することで、従来の制御運動盤と比較して約50%のコンパクト化を実現した。

### (2) 2 out of 3ユニット

保護盤・切替え制御盤の3重化多数決論理回路は、従来、3個の補助リレーで構成していたが、この回路を基板化することによって、1つのユニットに内蔵した専用の出力、入力ユニットを開発した。さらに、このユニットは三次元配線を適用することによって、面積当たりの配線量を増やしてユニットの実装高密度化を行うことで、専有面積を従来比約30%にするコンパクト化を実現した。2 out of 3ユニットの外形・構成を図6に示す。

### 3.3 高機能化

高性能(基本演算処理速度: 9.5ns)のPLC“MELSEC Qシリーズ”を採用することで、制御・保護の高速化を実現している。これによって、将来のシステム拡張にも対応可能な余裕のある性能としている。また、運動PLCにマルチCPU



図7. 監視制御卓の外観

を導入することで、高度な変電所保全情報機能を実現した。

機器操作機能を持つ監視制御ヒューマンインターフェースは、従来は監視制御盤方式で、制御は照光式押し釦(ボタン)、情報表示はLCDタッチパネルの組合せであった。当社は、大型LCDタッチパネルを新たに適用し、系統図や制御釦などを容易に操作・表示可能とした。さらに、監視制御卓方式にも対応できるように、産業用パソコンでの監視制御ヒューマンインターフェースを実現した。また、産業用パソコンはディスクレス、シャットダウン不要とすることで、信頼性、運用性も向上させている。監視制御卓の外観を図7に示す。

### 4. 今後の展望

鉄道事業者向けの変電所ME配電盤は、基本機能自体は成熟領域にあるが、ユーザーごとのニーズが多様化している。そこで、これらの多様なニーズに応えるため、新たなシステムの検討を行っている。その例について、次に述べる。

#### (1) 制御・保護機能の集約

配電盤の更なるコンパクト化を行いつつ、高性能・高信頼化を実現することを目的に、運動PLCと保護運動PLCの機能集約を行い、3重化多数決論理方式で出力するシステム構成にする。PLCは、従来に比べ約10倍の処理速度を持つ新型PLC“MELSEC iQ-Rシリーズ”を導入することによって、PLCの機能集約による処理の遅れがない制御・保護を行うことができる。

#### (2) システムラインアップの充実化

特に在来線などで、配電盤として信頼性を維持しつつシンプル化を図るために、PLCのCPU部だけを2重化して、RIOは1重化の構成にする。このシステムは、CPUの1台の故障時にも、正常側CPUにRIOが切り替わることで、信頼性と省スペース化を両立できる。

### 5. むすび

鉄道の運行を支える交通変電システムの中から、新幹線向けの変電所配電盤を中心に、最新技術と今後の展望について述べた。このシステムの導入によって、配電盤の信頼性の向上とコンパクト化、高機能化を実現し、新幹線の安定大量輸送に貢献している。今後も更なる客先ニーズを満たした交通変電システムを構築するために、絶えず開発に取り組み、機能向上・拡張を図っていく。

# 可動式ホーム柵の最新技術と今後の展望

竹村文吾\*

Latest Technologies and Future Prospects for Automatic Platform Safety Door

Bungo Takemura

## 要旨

可動式ホーム柵は、鉄道事業者と鉄道利用客の安全に対する意識の高まりと、人身事故の削減という安定輸送に及ぼす導入効果が広く認識されたことによって、整備が加速している。三菱電機は、2003年から可動式ホーム柵の製造に携わっており、2016年3月までに全国155駅、318ホーム、6,242開口を納入している。納入当初は、ドア位置の異なる車種がホームに乗り入れることが少なく、また、列車の定位置停止装置(Train Automatic Stop-position Controller : TASC)が整備されたホームが主流であったため、ホーム柵の扉が形成する開口に求められる開口幅が狭く、導入が容易であった。しかし、広く導入が進むにつれてホームの条件も多様化しており、扉位置が異なる異種車両が乗り入れるホームでの“開口幅の長大化”と“戸袋の

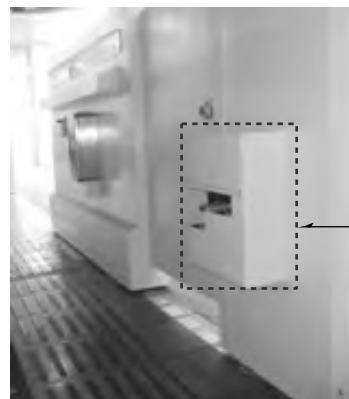
短尺(たんざく)化”及びTASC未整備ホームでの“列車の定位置停止検知への対応”が、可動式ホーム柵導入の課題になっていた。

当社は、異種車両の乗り入れホームへの対応として、扉の長尺化と2段扉化、TASC未整備ホームへの対応として、列車の定位置停止検知支援システムを開発し、これまでに東海旅客鉄道株、西日本旅客鉄道株、九州旅客鉄道株の新幹線向けの長尺扉、東武鉄道株の船橋駅向けの定位置停止検知支援システム等を納入してきた。

今後の展望として、可動式ホーム柵に求められる更なる安全対策としての扉の衝突エネルギーの削減と、高付加価値化としてのデジタルサイネージの搭載が挙げられる。



扉の長尺化(東海道新幹線向け扉長3,400mmの可動式ホーム柵)



列車定位置停止検知支援システム



2段扉式ホーム柵

## 可動式ホーム柵のレポートリー

扉の長尺化では、開口幅の拡大要求に応じて最大3,400mmの扉長を実現した。列車定位置停止検知支援システムは、TASCを整備しなくても地上設備だけで列車の定位置停止を検知し、可動柵を開制御する。2段扉式ホーム柵では、扉を2段でスライド化することによって、戸袋の短尺化を実現した。扉の衝撃吸収構造では、扉に連結しない中間バーに扉荷重を持たせることで、衝突荷重の軽減を図る。

## 1. まえがき

可動式ホーム柵は、鉄道事業者と鉄道利用客の安全に対する意識の高まりと、人身事故の削減という安定輸送に及ぼす導入効果が広く認識されたことによって、整備が加速している。納入当初は、ホームに求められる条件として可動柵の扉が形成する必要開口幅が狭かったが、導入が進むにつれてホームの条件も多様化し、“開口幅の長大化”, “戸袋の短尺化”, “TASC未整備ホームへの対応”が導入の課題となっていた。当社は、異種車両の乗り入れホームへの対応として扉の長尺化と2段扉化、TASC未整備ホームへの対応として列車の定位置停止検知支援システムを開発した。

本稿では、当社のこれまでの取組みを述べるとともに、今後の展望として、可動式ホーム柵に求められる更なる安全対策としての扉の衝突エネルギーの削減と、高付加価値化としてのデジタルサイネージの搭載について述べる。

## 2. 扉の長尺化

従来、扉の位置が異なる車両が乗り入れるホームに可動式ホーム柵を導入する場合、図1のように車両から離隔して設置していたが、近年はホームのスペース確保のため、ホーム端への近接設置が求められる。

可動式ホーム柵の開口幅は、車両の扉幅に車両の停止誤差を加味するが、近接設置では、可動式ホーム柵と車両の扉の間には離隔設置時のような移動可能なスペースがなく、開口幅が長大化する。当社は、可動式ホーム柵の扉の長尺化に取り組んでいるが、扉が長尺化するほど扉支持部の強化だけでなく、扉自身の軽量化に加えて長尺構造物特有の課題に対して、多岐にわたる対策が必要となる。

当社の可動式ホーム柵は、長尺扉の支持構造を強化するとともにアルミハニカム構造を採用して扉を軽量化している。さらに、列車の走行風や屋外設置時の熱、風に対する対策を実施している。これらの施策によって、現在、東海旅客鉄道(株)の東海道新幹線に最長3,400mm、九州旅客鉄道(株)の九州新幹線に最長2,800mm(図2)、西日本旅客鉄道(株)の北陸新幹線に最長2,700mmと、それぞれ長尺扉式の可動式ホーム柵を納入している。

## 3. 扉の2段化

長尺扉は、扉を格納する戸袋も合わせて長尺化する必要があるが、ホームによっては、図3のように戸袋の設置場所が、ホーム柵の扉よりも短いスペースしか確保できない場合がある。

図4は、当社が開発した2段扉式の可動式ホーム柵である。長さ1,680mmの戸袋に2,030mmの扉を格納する。扉は、1段目と2段目の2つの扉で構成され、1台のモータで駆動される。2段目の扉を1段目の扉に収納することで、1つ

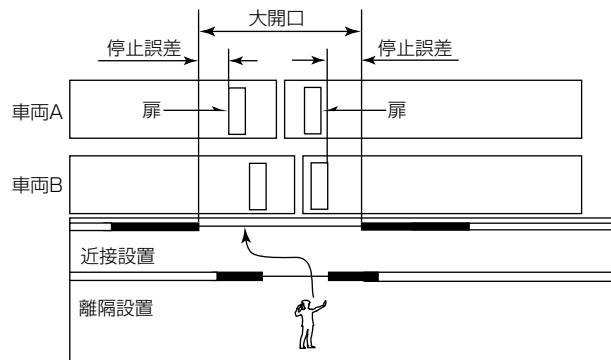


図1. 近接設置化による開口幅の長大化



図2. 九州新幹線の長尺扉式可動式ホーム柵

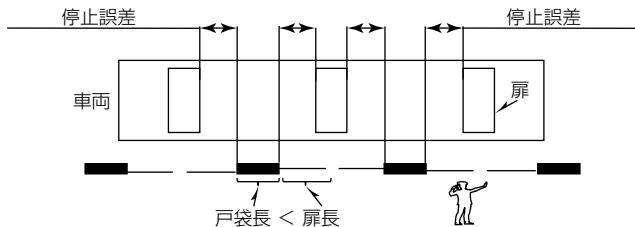


図3. 戸袋長より扉長が長い配置例

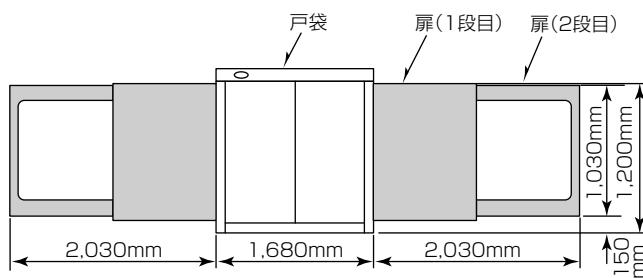


図4. 2段扉式の可動式ホーム柵

の戸袋に2枚の扉を格納する構造を実現している。

## 4. 列車定位置停止検知支援システム

可動式ホーム柵は、車両の扉位置が開口と一致したことを条件に開扉する。TASCが整備されているホームでは、TASCから定位置停止信号を受信するが、TASCが整備されていない場合、可動式ホーム柵で車両の定位置停止を識別することが求められる。当社は、TASCが未整備のホームに可動式ホーム柵を納入する際に、列車の定位置停止を

識別する“列車定位置停止検知支援システム”を合わせて導入している。

#### 4.1 システム構成

当社が東武鉄道(株)船橋駅に納入した列車定位置停止検知支援システムのシステム構成を図5に、列車入線時の動作イメージを図6に示す。

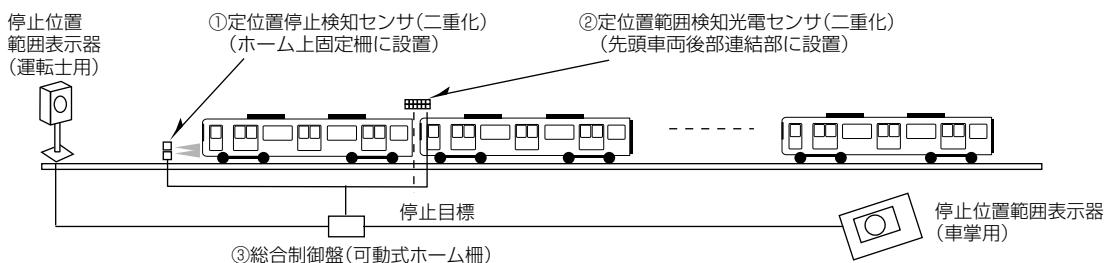
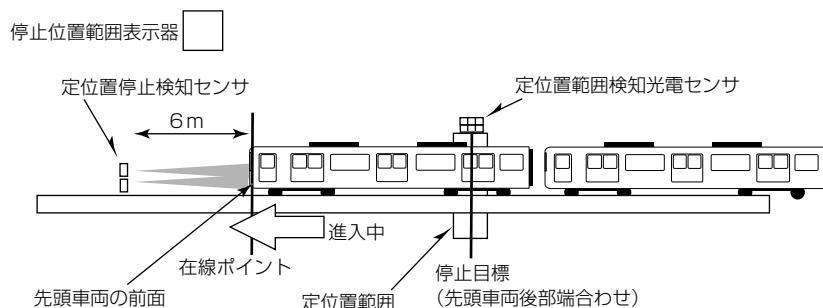


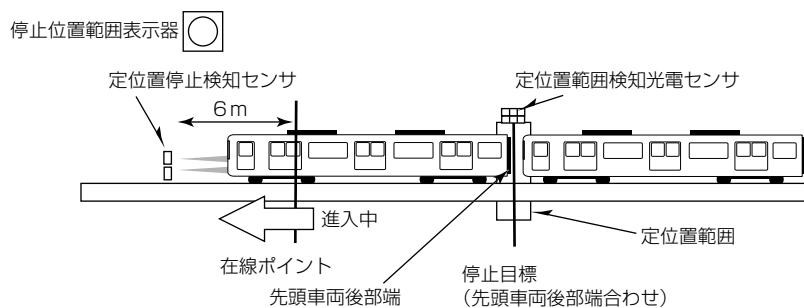
図5. 列車定位置停止検知支援システムのシステム構成

(1) 列車在線範囲内進入(在線範囲内)



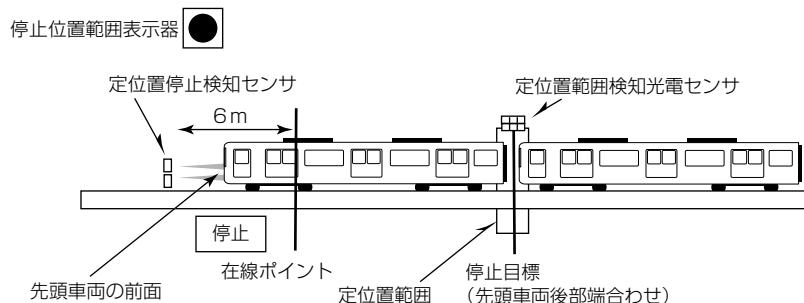
定位置停止検知センサで、先頭車両の前面が在線ポイントに到達したことを検知する。  
在線範囲内に入ると、監視対象(停止判定及び定位置範囲内判定の処理を開始)とする。

(2) 列車定位置範囲内進入(定位置範囲内)



定位置範囲検知光電センサで先頭車両後部が定位置範囲内に到達したことを検知する。

(3) 列車停止



定位置停止検知センサから先頭車両の前面までの距離の変位によって停止と判定する。

図6. 列車入線時の動作イメージ

列車定位置停止検知支援システムの構成機器は次のとおりである。

#### (1) 定位置停止検知センサ

レーザ式測域センサで、列車までの距離を測定し、その変化量を基に列車までの距離と列車の停止を判定する。また、距離6m以内を在線中と判定する。

## (2) 定位置範囲検知光電センサ

反射型の光電センサで、先頭車両後部端と2両目車両先頭部をセンシングしており、定位置範囲内における照射ライン上の対象(列車の車体)の有無を判定する。また、6軸ある光電センサの検知結果によって、対象が定位置範囲内であることを判定する。

## (3) 総合制御盤

定位置停止検知センサの停止判定、定位置範囲検知光電センサの定位置範囲内の判定情報を、停止位置範囲表示器に表示するとともに、可動式ホーム柵の開閉指令を行う。

## (4) 停止位置範囲表示器

列車の入線中・定位置停止・扉開状態を、運転士と車掌に通知する。

## 4.2 定位置停止判定

定位置範囲検知光電センサは、反射型光電センサで、照射ラインの対象物(列車の車体)検知結果を出力する。6か所に設置された各々のセンサ出力の組合せによって、総合制御盤が定位置範囲内にある車体を判定する。先頭車両の後部端を識別するためには、車両連結部の検出がキーになる。6か所に設置する各光電センサの検知結果として、次のパターンがあり、これらの結果の組合せによって車体が定位置範囲内にあることを判断する。

## (1) センサが先頭車両の車体を検知

## (2) センサが車両連結部を検知(車体を検知しない)

## (3) センサが2両目車両の車体を検知

図7では、目標停止精度 $\pm 750\text{mm}$ となるように配置した定位置範囲検知光電センサの検知結果によって、定位置範

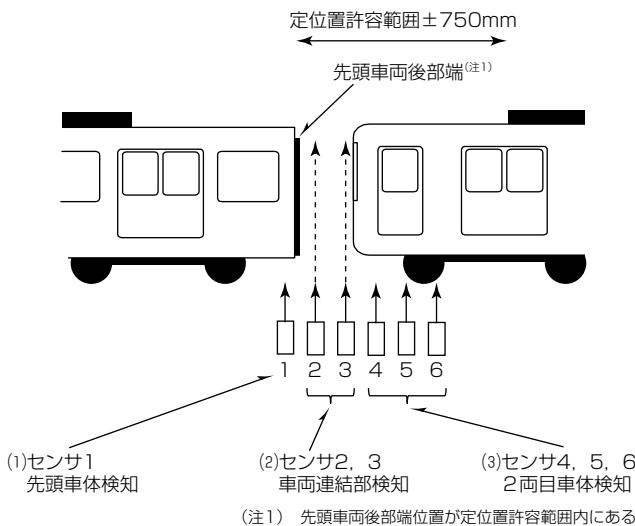


図7. 車体が定位置範囲内の事例

囲内にあることを判定できる。

全ての車両が、先頭車両後部端をそろえて停車するよう整備されたホームでは、目標とする位置に先頭車両後部端が停止誤差範囲内にあることを定位置範囲内と判定する。

## 5. 今後の展望

可動式ホーム柵はこれまで、軌道への転落事故及び触車事故を未然に防ぐことによるホーム上の安全確保、また、定時運行、安定輸送に寄与することを求められてきた。今後は、更なる安全対策と付加価値の創出の2つが求められると考える。

## 5.1 更なる安全対策

閉扉動作中の駆け込み乗車によって、扉の動線上に乗客が居ると、扉は乗客との衝突を検知して反転動作(開扉動作)する。このとき、乗客に与える衝突エネルギーは扉が重くなるほど、また、閉扉速度が速い程大きくなる。扉の長尺化による扉の重量化、開口幅が広がることによる戸閉速度の高速化によって、衝突エネルギーは増加傾向にあるので、更なる安全を実現するためには、扉の重量化・高速化と衝突エネルギーの削減を両立させることが求められる。

今後、扉の重量化・高速化に伴って増加する扉の衝突エネルギーの削減方法を、扉自体の構造と扉の制御の両面から検討する必要がある。

## 5.2 付加価値の創出

可動式ホーム柵にポスター、広告などの紙媒体を貼る事例は多い。近年、薄型モニタなどの電子媒体を可動式ホーム柵に搭載する要望が増えている。ホーム対向壁にある広告が見えなくなる対策だけではなく、ホーム上に鎮座した壁を更に有効活用しようとする動きが、本来安全装置であった可動式ホーム柵に新たな付加価値を与えることになる。

今後、デジタルサイネージを実現するため、薄型モニタなどの電子媒体の搭載を検討する。

## 6. むすび

当社は、市場のニーズに合わせ、長尺扉からスタートして2段扉化による短尺戸袋への対応、TASCのないホームへの対応に取り組んできた。今後、東京2020オリンピック・パラリンピックに向けて、衝突エネルギーの削減等による更なる安全への取組みを続けていく。また、安全面だけでなく可動式ホーム柵を有効活用した付加価値の創出に対しても、ユーザーの要望にできる限り対応し、可動式ホーム柵の更なる普及に寄与していく。