

三菱電機技報

12

2020
Vol.94 No.12

交通システム —SDGsへの取組み—



**SUSTAINABLE
DEVELOPMENT
GOALS**



目次

特集「交通システム —SDGsへの取組み—」

Transportation Systems: Approaches to SDGs	巻頭言 1
Carsten Thomas	
未来を創造する三菱交通システムの歩み	巻頭論文 3
福島秀樹	
車両メンテナンスの効率化と安定運行 に貢献する“鉄道LMS on INFOPRISM”	9
吉本剛生・佐藤尚也	
“MMSD”を活用した鉄道沿線設備・施設 の計測・解析サービス	14
須合健一・柚山武郎・森 大輔	
指令業務を効率化し柔軟な列車運行 を支援するスマート列車運行オペレーション	18
中村慶之	
鉄道の安全・安心を支える映像解析技術	23
古畑貴司・岸下整明・菅谷元典・原田綾子	
持続可能な社会での駅への取組み	29
清水英弘・西澤浩樹・上杉知弘	
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	34
菅原徹大・石田貴仁・山下良範	
鉄道車両用空調装置の技術動向	38
湯浅裕行	
海外交通事業でのSDGs実現に向けた取組み	42
関根久美子・藤田泰貴・甲村哲朗・山下良範・松本剛嗣	
コロナ禍以降における新しい社会での鉄道の考察	46
吉田和史	

Transportation Systems: Approaches to SDGs

交通システム —SDGsへの取組み—

Carsten Thomas
Progress of Mitsubishi Transportation System to Create Future Advancement
Hideki Fukushima
"LMS on INFOPRISM" Contributing to Efficient Train Maintenance Work and Stable Operation
Koki Yoshimoto, Naoya Sato
Measurement and Analysis Service of Railroad Trackside Facilities using "MMSD"
Kenichi Sugo, Takeo Yuyama, Taisuke Mori
Smart Train Operation for Efficient Command Work and Flexible Train Operation
Yoshiyuki Nakagiri
Video Content Analysis Technologies Supporting Safety and Security of Railway
Takashi Furuhashi, Nariaki Kishishita, Motonori Sugaya, Ayako Harada
Initiatives for Stations in Sustainable Society
Hidehiro Shimizu, Hiroki Nishizawa, Tomohiro Uesugi
Traction Inverter System with SiC Power Module for Railway Vehicle
Tetsuo Sugahara, Takahito Ishida, Yoshinori Yamashita
Technology Trend of Air Conditioning System for Railway Car
Hiroaki Yuasa
Activities in Overseas Transportation Business Field to Realize SDGs
Kumiko Sekine, Yasuki Fujita, Tetsuo Komura, Yoshinori Yamashita, Taketsugu Matsumoto
Impact and Consideration on Railway for New Society Brought by COVID-19
Kazufumi Yoshida

関連拠点紹介

特許と新案

「旅客案内システム」「モータ制御装置」	54
「監視カメラシステム」	55

三菱電機技報94巻総目次

新型コロナウイルス感染症で亡くなられた方々に謹んでお悔やみを申し上げますとともに、罹患(りかん)された皆さまとご家族及び関係者の皆さまに心よりお見舞い申し上げます。

表紙：三菱交通システムの SDGs への取組み

三菱電機は現在から未来へと続く鉄道事業の社会課題の解決と価値創出に向けて、100年培った技術・事業基盤とグループ内外のあらゆる連携を強化し、次世代鉄道輸送システムを実現する六つの統合ソリューションを提供して、世界共通の目標であるSDGs(Sustainable Development Goals)の達成にも貢献していく。

SUSTAINABLE
DEVELOPMENT
GOALS



Transportation Systems: Approaches to SDGs

交通システム—SDGs への取り組み—



Carsten Thomas

Professor, HTW Berlin, University of Applied Sciences

Megatrends are fundamental changes over an extended period that reflect on the whole society. Some of the key megatrends are in direct contradiction to each other—like population growth, urbanization and megacities on one side, and climate change and resource scarcity on the other. Such conflicting megatrends induce huge challenges for the whole society. Global transport demand is expected to more than double until 2050, and at the same time transportation accounts for a very large share of greenhouse gas emissions (e.g., for 22.3% in the EU). Examples like this illustrate that sustainable growth can only be achieved if megatrends are holistically understood, and if the challenges arising in their context are mastered.

In 2015, the United Nations General Assembly adopted the Sustainable Development Goals (SDGs). This set of universal goals describe the objectives that must be met to master the urgent environmental, political and economic challenges facing our world. They serve as a universal framework to enable countries to better target and monitor progress across all three dimensions of sustainable development (social, environmental and economic) in a coordinated and holistic way. In the years since 2015, the SDGs have been steadily growing in importance, with now 193 nations in the world having endorsed this policy framework.

The transport domain contributes directly to several SDG targets, including road safety (target 3.6), energy efficiency (target 7.3), sustainable infrastructure (target 9.1) urban access (target 11.2) and fossil fuel subsidies (target 12.c). All organizational stakeholders in the transport domain—for the railway sector of governments and municipalities, infrastructure providers, operators, rolling stock manufacturers and subsystem suppliers—are invited and obliged to foster the evolution of the domain such that the SDGs can be progressively implemented.

The railway sector plays a very important role in this context. Railway transport for both, passengers and freight, is considerably safer and more energy-efficient than road transport, allows much higher traffic densities, and is already today largely independent from fossil fuels. Clearly, a strong shift from road-bound transport towards railway transport would serve the SDGs objectives very well. However, whilst

such a shift has been discussed for many years, it has not happened so far. In the EU in 2017, road transport was used for 80% of all passenger kilometers and 51.7% of all (freight) ton kilometers, compared with only 8.3% and 11.6%, respectively, for railway transport¹. What would be required to change this picture?

To date, road-bound transport is considered more flexible and individualized than railway transport. On roads, freight can be delivered directly door-to-door, and passengers have many choices to individualize their journey, considering starting time, routes, breaks and deviations. Sometimes this flexibility may be only a perceived advantage, not a real one. Nevertheless, for many use cases, flexibility and individualization result in road transport being currently more attractive and more economical than railway transport. In consequence, the railway sector must find ways to provide the same flexibility and individualization to its customers to be able to pull transport demand towards railway. This requires major changes on today's railway transport system. Railway transport needs to connect seamlessly with other transport modes, thereby becoming part of "mobility-as-a-service" solutions spanning several transport sectors. Train sequence densities should be improved by orders of magnitude, and freight transport must be made attractive for small volumes through routing flexibility and coverage of last miles to sender or receiver. In addition to such conceptual and systemic changes, further improvements are required on energy efficiency, automation, maintenance optimization and other areas, to decrease life-cycle cost and contribute to the attractiveness of railway transport.

Under its corporate mission, Mitsubishi Electric is continually striving to improve its technologies and services, thereby supporting to achieve the SDGs objectives with the railway transport system solutions for the next generation. This special issue focusses on specific challenges that Mitsubishi Electric faces as a major global subsystem manufacturer in the railway sector, and introduces concrete examples of contributions that Mitsubishi Electric makes in its mission of supporting the SDGs implementation.

¹ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/passenger-and-freight-transport-demand/assessment-1>

＜和訳＞

メガトレンドとは、社会全体に影響する長期にわたる根本的な変化のことである。主要なメガトレンドの幾つかは、一方では、人口増加、都市化、巨大都市、他方では、気候変動、資源不足のように互いに直接矛盾した関係にある。こうした相反するメガトレンドは、社会全体に大きな課題をもたらしている。世界の輸送需要は2050年までに2倍以上になると予想されており、同時に輸送は温室効果ガス排出量の非常に大きな割合を占めている(例えば、EU(European Union)では22.3%)。このような例は、メガトレンドが統合的に理解され、そうした状況の中で発生する課題が克服された場合にだけ、持続可能な成長を達成できることを示している。

2015年、国連総会は持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals: SDGs)を採択した。この一連の普遍的な目標は、世界が直面している緊急の環境的、政治的、経済的課題を克服するために満たすべき目標について説明している。SDGsは、各国が協動的で統合的な方法によって、持続可能な開発の三つの側面(社会、環境、経済)の全ての進捗状況に対して、より適切なターゲットを決めて監視できるようにするための普遍的な枠組みとして機能する。2015年以降、SDGsの重要性は着実に高まっており、現在、世界の193か国が、この政治的枠組みを承認している。

輸送分野は、道路交通の安全性(ターゲット3.6)、エネルギー効率(ターゲット7.3)、持続可能なインフラ(ターゲット9.1)、都市アクセス(ターゲット11.2)、化石燃料補助金の適正化(ターゲット12.c)など、幾つかのSDGターゲットに直接貢献している。輸送分野の全ての組織のステークホルダー(政府や自治体の鉄道部門、インフラプロバイダー、オペレーター、車両メーカー、及びサブシステムサプライヤー)は、SDGsを漸進的に実施できるように、輸送分野の進展を促進するよう求められ、義務付けられている。

こうした状況で、鉄道部門は非常に重要な役割を果たしている。旅客と貨物の両方の鉄道輸送は、道路輸送よりも安全でエネルギー効率が良く、はるかに高い輸送密度を可能にし、今では、既に化石燃料にほとんど依存していない。道路輸送から鉄道輸送への強力なシフトは、SDGsの目標達成に大いに役に立つことは明らかである。しかし、長年

そうしたシフトが議論されてきたが、今までのところ実現には至っていない。2017年のEUでは、道路輸送は全旅客数・キロメートルの80%、また全(貨物)重量トン・キロメートルの51.7%に使用され、これに対して鉄道輸送はそれぞれ8.3%と11.6%にとどまっている^(注1)。この現状を変えるには何が必要だろうか。

今日に至るまで、道路輸送は、鉄道輸送よりも柔軟で個別化されていると考えられている。道路では、貨物は直接ドアツードアで配達でき、旅客は旅行を個別化するための多くの選択肢を持ち、出発時間、ルート、休憩、経路変更を考慮に入れる。往々にして、この柔軟性は、本当の利点ではなく、感覚的な利点にすぎない場合がある。それでも、多くのケースでは、柔軟性と個別化によって、現在、道路輸送は鉄道輸送よりも魅力的で経済的と考えられている。したがって、鉄道部門は、顧客に対して道路輸送と同じ柔軟性と個別化を提供する方法を探り、輸送需要を鉄道の方へ引き寄せられるようにしなければならない。これには、現状の鉄道輸送システムの大きな変革が必要である。鉄道輸送は、他の輸送モードとシームレスに接続する必要がある、それによって複数の輸送部門にまたがる“モビリティ・アズ・ア・サービス(MaaS)”のソリューションの一部になる。列車頻度は桁違いに向上させるべきであり、貨物輸送は、ルート設定の柔軟性や送り主と受取人への配送網の整備を通じて、少量貨物の場合にも魅力的なものにする必要がある。こうした概念的及び体系的な変革に加えて、ライフサイクルコストを低減し、鉄道輸送の魅力向上に貢献するために、エネルギー効率、自動化、メンテナンスの最適化などの分野で更なる改善が必要である。

三菱電機は、その企業理念の下、技術とサービスの向上に絶えず努めており、次世代鉄道輸送システムソリューションによってSDGsの目標達成を目指している。この特集号では、鉄道部門の主要なグローバルサブシステムメーカーとして直面している具体的な課題に焦点を当て、SDGsの目標を実現するという使命の下で三菱電機が行っている具体的な取組みを紹介する。

(注1) <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/passenger-and-freight-transport-demand/assessment-1>

未来を創造する三菱交通システムの歩み

Progress of Mitsubishi Transportation System to Create Future Advancement



福嶋秀樹*
Hideki Fukushima

要 旨

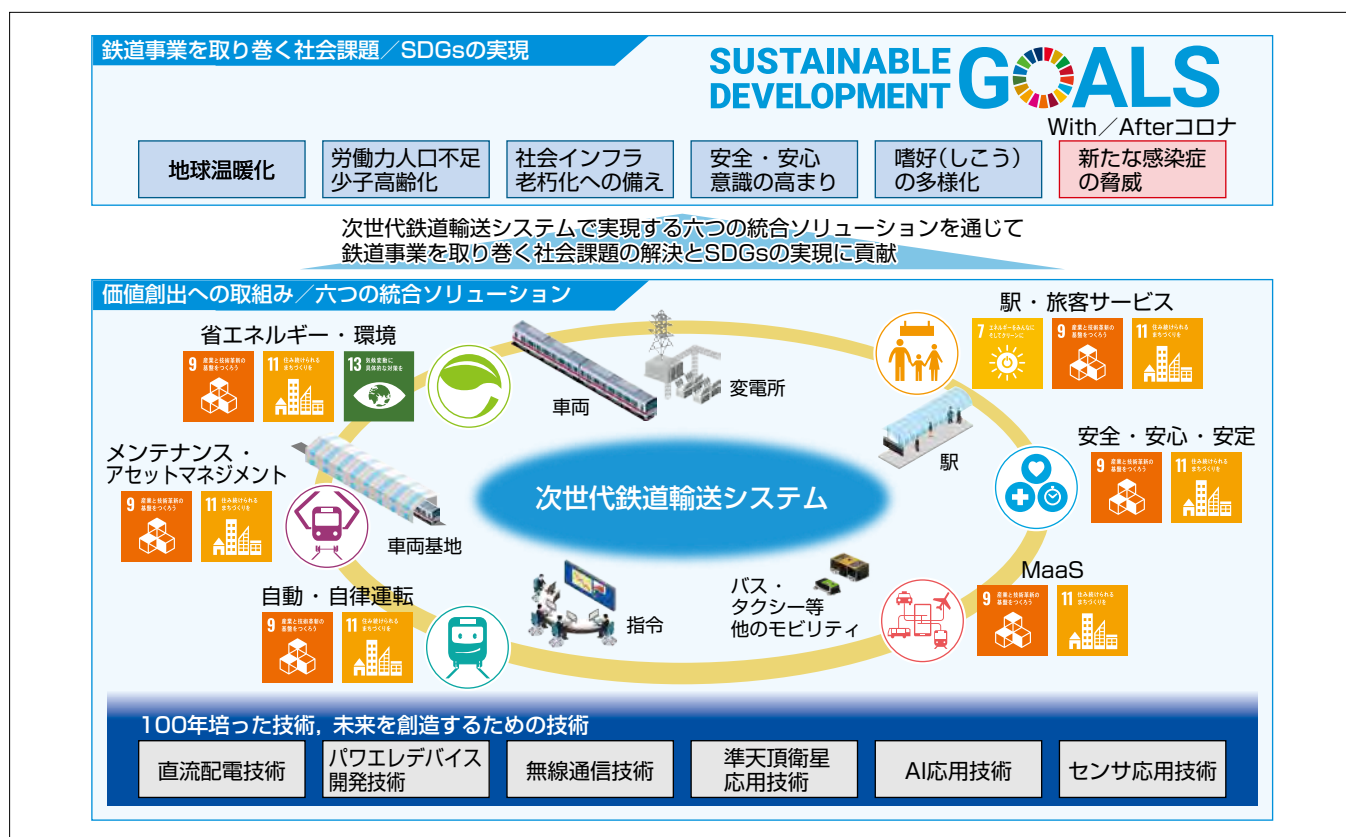
三菱電機の交通事業は、会社創業の1921年に始まる。1960年代から多くの海外プロジェクトにも参画するなど、国内外で100年の歴史を持つ。この100年で培ってきた技術を基盤として、現在では、車両用機器から地上設備まで鉄道システム全般に幅広く製品やシステムを提供し、鉄道の安全・安定輸送に貢献してきた。

鉄道は、環境負荷が少ない大量・高速輸送機関である。経済成長を支える社会インフラであり、過密化する都市の問題や地球環境問題への対策として、すなわち持続可能な社会の実現を目的として国連で採択された開発目標SDGs (Sustainable Development Goals)の実現に関わるシステムとして、重要な位置付けにある。

こうした鉄道は、従来、安全で信頼性が高く、エネル

ギー効率の高い輸送網として整備することが求められてきた。近年では、少子高齢化や産業構造の変化に伴う、構造的な鉄道輸送量の減少や、乗務員や保守人員の確保、技術継承の問題など様々な課題に直面し、経営の効率化や新たな価値創出が急務になっている。新型コロナウイルスを契機にしたりモータワークの拡大など働き方の変化によって、このような改革の加速が一層望まれるものにもなった。

当社はSDGsが掲げる持続可能な社会の実現に向けて、鉄道事業を取り巻く社会課題を解決するため、創業から100年で培ってきた技術・事業基盤を活用し、次世代鉄道輸送システムを実現する六つのソリューションを提供していく。



鉄道事業での持続可能な社会の実現に向けた取組み

当社はSDGsが掲げる持続可能な社会の実現に向けて、鉄道事業を取り巻く社会課題を解決するため、創業から100年で培ってきた技術・事業基盤を活用し、次世代鉄道輸送システムとして、①省エネルギー・環境、②メンテナンス・アセットマネジメント、③自動・自律運転、④駅・旅客サービス、⑤安全・安心・安定、⑥MaaS(Mobility as a Service)の六つの領域にわたる統合ソリューションを提供していく。

1. ま え が き

当社の交通事業は会社創業の1921年に始まり、100年の歴史を持つ。現在ではパワーエレクトロニクス(以下“パワエレ”という。)や制御、無線、映像技術を中心に車両用機器(走る、止まる、制御する)から地上設備まで鉄道システム全般に幅広く事業を展開している(図1)⁽¹⁾⁽²⁾。鉄道は環境負荷が少ない大量・高速輸送機関であり、都市問題や地球環境問題への対策として各国で建設プロジェクトが計画、推進されている。

SDGsは2015年に国連総会で採択され、持続可能な社会の実現を目指して2030年12月までに達成予定の開発目標であり、環境問題や経営効率化など、昨今の鉄道事業の社会環境変化への対応と方向性が合致していると考えられる。

そこで、本稿では、鉄道の事業環境の変化や当社が100年培った技術・事業基盤を俯瞰(ふかん)した上で、SDGsの実現に向かう新しい価値創出の取組みとして、次世代鉄道輸送システムを実現する六つのソリューションを提案し、当社の技術や製品開発について述べる。

2. 鉄道事業を取り巻く課題

鉄道は安全で信頼性が高く、都市鉄道や新幹線などは今日の社会生活に欠くことができない社会インフラシステムである。日本の鉄道は、明治初期の開業以来、貨物輸送とともに旅客輸送を中心に発展してきた。

戦後の高度経済成長期には、労働力人口が増加し、所得向上と沿線開発に伴って郊外に住宅地が広がり、都市部では地下鉄建設や輸送力の増強が図られてきた。一方、経済成長に伴い、都市や地球環境、エネルギー問題への対応として、CO₂削減や省エネルギーへの取組みが進められている。

1990年代のバブル崩壊以降、日本は低成長期に入り、日本の人口は2008年をピークに減少に転じており、2045年

までに全国で2割近い人口が減少すると推計され、東京圏でも2025年以降緩やかな人口減少が予測されている⁽³⁾。社会の成熟化とともに進む人口減少や、三次産業へ重心を移す産業構造の変化など、構造的な鉄道輸送量の減少に加えて、ネット社会の進展、昨今の新型コロナウイルス感染防止を契機としたリモートワークの拡大など、働き方の変化によっても移動ニーズの減少が想定される。

このような社会環境の変化を踏まえて、鉄道事業でも、更なるデジタル化の推進や運行コスト削減のほか、乗務員や保守作業者の確保、技術継承にも課題があり、経営効率化が急務になっている。先に述べたエネルギー・環境問題への対応に加え、社会セキュリティとしてのテロ対策、インフラの維持管理、地球規模での温暖化や気候変動に伴う大規模災害への備えなど、鉄道を取り巻く社会課題は複雑かつ大規模になっている。

また、海外の鉄道事業は、国によって多種多様であるが、経営の効率化や都市問題に対する取組みが進められている。例えば、鉄道の技術や制度の中心である欧州では1990年代以降、EU(European Union)指令による鉄道運行とインフラの上下分離の方針が展開され、競争原理による経営効率化を進めている。また、アジアを中心とした新興国では都市部の開発が進み、人口集中や交通渋滞、大気汚染などの都市問題への解決策として、2000年代から都市鉄道の建設・整備が急速に広まっている。新線建設に伴い、CBTC(Communications-Based Train Control)や自動運転などの技術が採用され、また、CBM(Condition Based Maintenance)やアセットマネジメントなどの新しい保守体系や考え方も導入されている。

これらの国内外の鉄道事業を取り巻く事業環境の変化に対して、新技術の適用によって社会課題を解決できる可能性がある。

3. 100年培った技術・事業基盤

鉄道の発祥は1825年に英国のストックトン〜ダーリントン間でのスティーブンスンの蒸気機関車による鉄道輸送とされている。また、電気鉄道は1881年にドイツ・ベルリン郊外でのシーメンス・ハルスケ社の旅客輸送に始まる⁽⁴⁾。

国内の鉄道は、1872年に新橋〜横浜間で営業運転を開始した。電気鉄道は世界から約10年後の1895年に京都市で営業運転を開始し、約120年の歴史がある。

当社は創業の1921年から交通事業を手掛け、交流電化や新幹線技術、誘導電動機駆動など、電気鉄道を変革した技術に先駆けとして関わり、日本の電気鉄道の歴史とともに歩んできた。次に、各時代の当社交通ビジネスのトピックから鉄道技術の歴史的な流れを俯瞰する。



図1. 当社の交通事業の製品・システム

(1) 当社創業(1921年)～戦前：海外との技術提携

当社創業の大正後期は日本の工業化推進の草分けの時代であり、創業年から、鉄道省大船変電所の変圧器(1921年)、鉄道省電車用標準型主電動機(1936年)、EF53やED42(アプト式)電気機関車の電機品などを納入して実績を積み重ねていった。また、米国のウェスティングハウス社と1923年に、ウェスティングハウス・エア・ブレーキ社と1924年に技術提携し、新しい設計・図面方式、工作技術、工場管理手法などを学んで近代化を図り、新しい技術を鉄道製品に展開して技術力を高めた⁽⁵⁾。

(2) 戦後～1950年代：交流電化の始まり、機器の高性能化

戦後の新日本復興の時代、輸送力増強のため日本国有鉄道(以下“国鉄”という。)が交流電化を決定した。当社は鹿児島本線に交流電化変電設備を納入し(1956年)、水銀整流器式の試作機であるED45 1交流電気機関車の電機品を開発・納入して(1955年)、高い粘着性能が評価され、北陸本線の交流電化用にED70交流電気機関車の電機品を納入した(1956年)。交流電化の技術は1960年代の海外向け機関車や東海道新幹線の技術につながっていく。また、この時期にWN(Westinghouse-Natal)駆動方式や主電動機の軽量化、加減速度向上などの性能向上が図られ、国鉄の寝台車用空調装置(1950年)、DD50ディーゼル機関車の電機品(1953年)を初めて開発・納入している。

(3) 1960年代：東海道新幹線開業、無線・列車制御の先駆け、海外展開の始まり

戦後復興を遂げ、東京オリンピックが開催された高度経済成長の時代である。東海道新幹線の開業に当たり、主要な車両用電機品(主変圧器、主電動機、ATC(Automatic Train Control)装置、WN継手、空調、遮断器、照明設備など)の設計を担当し、納入した(1963年)。また、列車無線(特急“こだま”向け、1960年)や自動列車制御装置(帝都高速度交通営団(以下“営団”という。)・日比谷線、1961年)などの情報・制御系の機器の展開が始まった。交流電気機関車の傑作であるED75を完成させ(1963年)、初の海外進出としてインド国鉄向けにイグナイトロン整流器式の交流電気機関車(1960年)や、欧州初となるスペイン国鉄向け直流電気機関車の電機品を輸出した(1966年)。

(4) 1970年代：オイルショックと省エネルギー化、コンピュータ制御、パワエレ応用、チョッパの展開

オイルショック後の安定成長期に入り、コンピュータ制御の高度化とパワエレの進歩、省エネルギー化が進んだ。チョッパ制御車両(阪神電気鉄道株、1970年)や、サイリスタを用いた世界初の回生付きチョッパ制御車両用にチョッパ装置を開発し、営業運転を開始した(営団・千代田線、1971年)⁽⁶⁾。逆導通サイリスタ、自動可変界磁チョッパ、沸騰冷却方式、4象限チョッパなどの技術が開

発され、国内各都市の地下鉄を中心にチョッパ装置が採用された。当社は“都市交通用チョッパ制御装置メーカー”として一時代を築き、メキシコ(1979年、1,521両の大量受注)など海外にも展開した。

地上設備では、神戸市交通局向けに電力回生用インバータ装置を初めて開発・納入した。また、1981年に国内初の新交通システムとして神戸に“ポートライナー”が開業し、ATO(Automatic Train Operation)による無人運転を実用化した。

(5) 1980～2000年代：パワーデバイスの進歩、インバータ・誘導電動機駆動方式の開発、海外展開の本格化

オイルショックから日本経済は蘇生(そせい)し、輸出拡大、プラザ合意後の円高・金融緩和によるバブル経済とその崩壊に至る。1980年に“三菱交通システム展”を開催し、新しいインバータ技術を内外顧客に訴求して開発を加速させた。1982年に熊本市交通局にインバータ装置を納入後、GTO(Gate Turn-Off)サイリスタの高耐圧化(定格電圧4,500V)を図り、1,500V用のVVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ(近畿日本鉄道株、1984年)を初めて開発した。新幹線でも国鉄民営化後、1989年から東海旅客鉄道株と共同で誘導電動機駆動システムの開発を進め、300系新幹線電車“のぞみ”として実用化した。現在では、地下鉄、在来線電車、電気機関車から新幹線までインバータ車両が標準になっている。

海外でも、都市問題への対応として都市交通の整備が進み、メキシコ、スペイン、シンガポール、オーストラリア、香港、中国、韓国、米国、インド向けに電車用電機品の輸出が本格化した。

1989年に大阪市交通局の長堀鶴見緑地線用にLIM(Linear Induction Motor)用電機品を開発し、当社敷地内にLIM試験線を敷設して実験を行った。また、2002年には東北・上越新幹線のデジタル列車無線が運用を開始した。

(6) 2010年代～現在：SiCインバータ、地車間連携、鉄道LMSの展開、海外生産拠点の整備

パワエレ技術の進歩として、他社に先駆けて^(注1)SiC(シリコンカーバイド)を適用した車両用インバータを製品化(2012年)し、世界初^(注2)のSiC補助電源装置を実用化(2013年)して省エネルギーと機器の小型・軽量化を図った。情報伝送技術を応用した無線式列車制御システム、地車間連携による機器の稼働状態監視、自動運転などを開発し、実用化を図った。また、当社のIoT(Internet of Things)プラットフォーム“INFOPRISM”を活用した、保守省力化、CBM、アセットマネジメントのサービスとして鉄道LMS(Lifecycle Management Solution)の展開を開始した(2019年)。加えて、鉄道沿線の機器やトンネルを詳細に計測する計測車両“MMSD(Mitsubishi Mobile

Monitoring System for Diagnosis)”を開発するなど、鉄道事業の経営効率向上に寄与する技術の開発を続けている。また、海外事業では、既存のメキシコ、オーストラリア、米国、中国に加え、イタリア、インド、ポーランド、フィンランドで海外生産拠点の整備や協業を進め、現地化を推進した。

このように、1921年の当社創業から100年の鉄道技術の流れを俯瞰した。パワエレ、無線通信、送配電技術など、いずれの時代にも顧客との強い連携によって、その時代の最新の技術を鉄道インフラに適用して鉄道事業の発展に取り組んできた。さらに、最新のAI(Artificial Intelligence)、センサ、準天頂衛星の技術なども応用して次の100年に向けて前進していく。

(注1) 2011年10月3日現在、当社調べ
(注2) 2013年3月26日現在、当社調べ

4. 価値創出への取り組み

当社は企業理念にのっとり、これまで同様、技術、サービス、創造力の向上を図り、活力とゆとりある社会の実現に貢献していく。現在から未来へと続く鉄道事業の社会課題の解決と価値創出に向けて、100年培った技術・事業基盤とグループ内外のあらゆる連携を強化し、次世代鉄道輸送システムを実現する六つの統合ソリューションを提供して、世界共通の目標であるSDGsの達成にも貢献していく。

5. 次世代鉄道輸送システムを実現する六つのソリューション

2章で述べた社会環境変化に対して、当社はグループ内外の力を結集し、鉄道事業の社会課題の解決を通じて持続可能な社会を実現する“次世代鉄道輸送システム”を提案する。図2に示す次世代鉄道輸送システムは、様々な社会課題に対応する次の六つのソリューションから構成される。

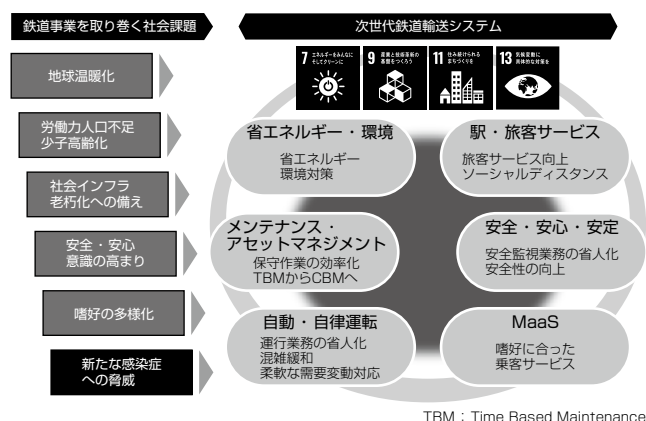


図2. 次世代鉄道輸送システムの概念図

- (1) 省エネルギー・環境
- (2) メンテナンス・アセットマネジメント
- (3) 自動・自律運転
- (4) 駅・旅客サービス
- (5) 安全・安心・安定
- (6) MaaS

5.1 省エネルギー・環境

鉄道はエネルギー効率がが高く、環境負荷が少ない輸送機関であるが、更なるエネルギー有効活用への取り組みが期待されている。以前から、パワエレ技術の進歩が省エネルギー化を促進してきたが、インバータなどの電力変換器に用いられる新しい半導体パワーデバイスとしてSiCが実用化されている。SiCは低損失で高周波化や大電流化ができ、高温動作も実現できるなどの特長を持つ。

当社は社内にパワーデバイスの研究開発・製造部門を持っており、機器の開発・設計部門とも連携して効率的にデバイス開発を進めている。開発成果として、世界に先駆けて^(注3)フルSiCを適用した車両駆動用のインバータ装置を2014年から市場投入し、多くの鉄道事業者採用されている。装置の小型・軽量化とともに従来車両と比較して約40%の省エネルギー効果を実現し、消費電力とCO₂の削減に貢献している。SiCを適用したインバータ装置は優秀な省エネルギー機器として評価され、2015年度に“優秀省エネルギー機器表彰 経済産業大臣賞”及び“第48回 市村産業賞 功績賞”を受賞した。

海外向けにもSiCを適用した補助電源装置などを供給しており、2015年に資本提携したポーランドのMEDCOM (MEDCOM Sp. z o.o.)社と連携して開発を進め、海外展開を図っている。

また、鉄道車両用空調装置では、配管の細径管化や材料の見直しによる機器の小型・軽量化とともに、快適性評価手法を用いた車内快適性の向上、ヒートポンプやインバータの改良など省エネルギー技術の開発も進めている。さらに温室効果ガスである冷媒を低GWP(Global Warming Potential)の代替冷媒に転換することで環境負荷の低減を図っている。欧州ではCO₂などの自然冷媒を適用した空調装置の要求もあり、欧州の車両用空調装置の拠点であるイタリアのMEKT(Mitsubishi Electric Klimat Transportation Systems S.p.A.)社と連携して、より環境負荷の少ない空調システムの開発にも取り組んでいる。

エネルギーの有効活用の観点では、駅舎補助電源装置によって余剰回生電力を駅の電気設備に供給し、また、5.4節で述べる駅周辺での電力配電系統の連携技術によって、駅の省エネルギー化や電力利活用に寄与している。

(注3) 2014年4月30日現在、当社調べ

5.2 メンテナンス・アセットマネジメント

安全・安定輸送が求められる鉄道では、日々のメンテナンスは重要な業務である。鉄道システムには車両、電力、信号など多くの機器や設備があり、メンテナンスに多大な労力が必要である。さらに、少子高齢化による労働力不足や技術継承の難しさも懸念されている。

当社はこれまで多くの車両用電機品を供給し、設計・製造情報など製品に関する豊富なノウハウを持つ。これら車両用電機品の稼働データを列車統合管理装置(Train Control and Management System: TCMS)を経由して、当社独自のIoTプラットフォーム“INFOPRISM”に収集・分析可能とする“鉄道LMS on INFOPRISM”の運用を開始した(図3)。これによって鉄道事業者のメンテナンス業務の効率化とメーカーも含めたデータの共有・活用を図り、安全・安定な鉄道運行への貢献を目指している。

また車両基地では各種センサによる車両の外観検査・計測を自動化する車両統合検査システムTRII (TRain Integrated Inspection system)を実用化した。TRIIのデータをINFOPRISMと連携させることで、より精度の高いメンテナンスを実現し、保守・点検作業の省力化と安全性向上にも寄与するものと考えている。

地上側の保守・点検業務の軽減には、高精度高密度レーザスキャナと8Kラインカメラを搭載した計測車両で沿線の三次元点群やトンネル壁面映像を取得・解析し、各種レポートや変状展開図を作成するMMSDシステムを実用化した。MMSDは建築限界計測や鉄道沿線設備の計測、及びトンネルのひび等の変状を抽出でき、従来の目視による沿線の点検作業の効率化に貢献できる。

5.3 自動・自律運転

悪天候や突発的な輸送需要増大等が発生した場合、列車遅延、沿線状況、列車・駅での混雑状況などに応じた柔軟な列車運行による輸送力の確保が求められる。このため、指令員は、様々な情報を収集の上、車両や乗務員の運用計

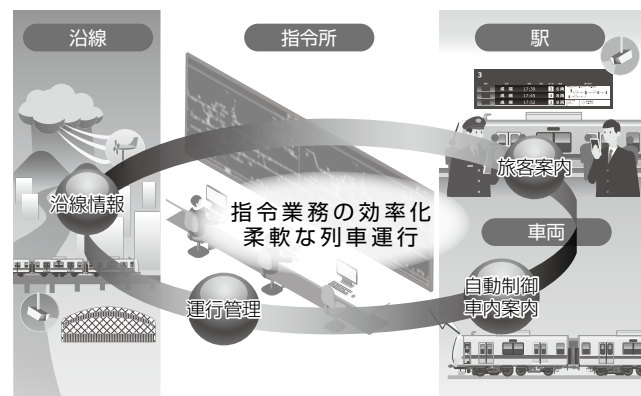


図4. 自動・自律運転の概念図

画を踏まえて運行計画を見直し、関係各所、乗務員へ手配する必要がある、大きな負担になっている。

当社はこのような異常時での輸送力の確保と指令員の負荷軽減を目的に乗務員の有無に制約されない柔軟な列車運行を可能にする自動・自律運転システムの開発に取り組んでいる(図4)。このシステムは多くの納入実績を持つ車上保安装置と列車無線を始め各種無線装置で獲得した技術に基づいて開発した無線式列車制御システムをベースにして、無線を使って地上・車上システムが連携する。地上システムには、列車の遅延時分と駅や列車内での混雑状況を踏まえ、列車の運転間隔を自動調整する機能と、大きなダイヤ乱れが生じた場合には、臨時列車による増発や運転支障区間を回避する折り返しダイヤを自動で作成する機能を新たに開発する。車上システムには、これらの運転計画の変更の指令に基づき、乗務員なしでも自動運転する機能や乗客に案内する機能を新たに開発する。

なお、無線式列車制御の実用化では東京地下鉄(株)・丸ノ内線に国内の地下鉄では初(注4)になるCBTCシステムの無線装置を納入し、現在評価試験を実施している。海外では2015年に米国のニューヨーク市都市交通局からCBTCの実証試験を受注し、海外の信号システム事業にも参入している。

(注4) 2018年2月22日現在、当社調べ

5.4 駅・旅客サービス

駅の役割が多様化される中、障がい者や高齢者等も含めて誰もが安全で安心して利用できる快適な駅を構想している。この構想では、スムーズな“人の流れ”と、これをサポートする鉄道事業者の“仕事の流れ”に着目するとともに、人の流れを生み出すために駅に往来する列車、バス、自家用車、駅設備が使用・発生する“エネルギーの流れ”にも着目し、この三つの流れをサポートするシステムを提案する。

“人の流れ”、“仕事の流れ”では、人工知能・映像解析技術によって駅・列車内の混雑や障がい者など人の介添え

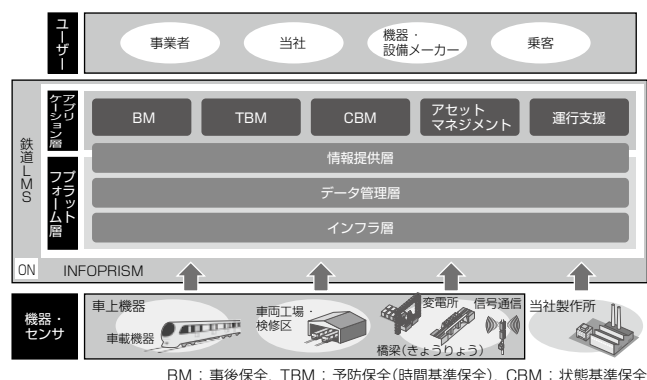


図3. 鉄道LMS on INFOPRISMの概念

を必要とする人々をリアルタイムに検知し、フルカラーLEDを採用した案内表示や床面の空きスペースにプロジェクションによる動的案内(ダイナミックサイン)を行うなど、人の属性に応じた案内方法の高度化によって、あらゆる人が利用しやすい環境の提供を目指す。さらに駅の混雑状況や障がい者の利用情報などを駅員間で共有することで、適切かつ迅速に乗客をサポートし、次の行動を推測・共有して安全性の向上と駅業務の省人化への寄与を目指す。

また、“エネルギーの流れ”では、電力配電系統技術によって駅に設置された太陽光発電や電気自動車などの分散型電源の充放電制御を最適化し、エネルギーの創出・有効活用に寄与する。

5.5 安全・安心・安定

安全・安心は先に述べたメンテナンス・アセットマネジメント、自動・自律運転、駅・乗客サービスに共通の目標であり、安全が確保されることで旅客は安心して鉄道を利用でき、鉄道の安定輸送にも寄与している。昨今、街中では監視カメラが普及し、駅構内や列車の中にも監視カメラが設置されており、多くの映像が記録・監視されている。

監視カメラの増加とともに監視員の負荷が高まっており、人工知能・映像解析技術によって乗客の事象や行動をリアルタイムに検知する技術が開発されている(図5)。

当社は人工知能・映像解析技術によって車椅子やベビーカーなどの属性や不審物を検知し、駅員の業務効率化や犯罪の未然防止を行い、更にAI技術をコンパクト化して列車内でも同様の検知を行い、乗客に安全・安心を提供する。

また映像解析技術を用いて、混雑の状況を高い精度で検出できる。新型コロナ禍での鉄道施設内での“密”を検知し、鉄道事業者や乗客自身が次の行動を判断するために正確な情報を早急に提供することで、より安心して利用できる鉄道の空間づくりにも取り組んでいる。

5.6 MaaS

MaaSは、嗜好(しこう)の多様化、高齢化社会、地域格差、インバウンド需要の拡大などを背景として、利用者が

目的地に到達するために必要な複数の交通手段や経路を一括して比較表示し、選択された複数の組合せからなる交通手段の予約や決済、移動・利用ができるサービスである。鉄道事業者、自治体ではMaaSの実現に向けた実証実験等の取組みを始めており、今後、段階的に普及していくと考えられている。

当社がこれまで提供してきた車両用機器、地上設備は、より多くの利用者を安全かつ短時間に輸送するサービスを支えてきた。当社は未来に向けて新たな輸送サービスを創造し、INFOPRISMをプラットフォームとして先に述べた五つのソリューションと連携し、センサ、映像解析、無線通信、運行予測、人流予測などの技術を組み合わせ、利用者一人ひとりの嗜好に合った行動を支援するものとして移動時間の短縮、輸送障害による遅れの回避、混雑の緩和など時代に合ったソリューション、サービスの提供に取り組む。

6. む す び

当社の創業から100年にわたる交通システムの技術進歩を振り返り、未来を創造する当社の交通システムの将来構想を展望した。昨今の交通事業を取り巻く社会環境の変化を考察し、最近の感染症対策も含むSDGsの取組みと整合した“次世代鉄道輸送システム”として、①省エネルギー・環境、②メンテナンス・アセットマネジメント、③自動・自律運転、④駅・旅客サービス、⑤安全・安心・安定、⑥MaaSの六つの領域でソリューションを提案し、その具体的な取組みについて述べた。

持続可能な社会に向けた次世代鉄道輸送システムの実現には、当社の持つ技術シナジーの活用や今後の研究開発による新技術の適用とともに、顧客を中心としたステークホルダーとの連携が極めて重要である。IoTプラットフォームであるINFOPRISMも活用して、鉄道事業者、鉄道産業界、官公庁、大学、研究機関とも協調した新しいエコシステムを構築し、これまでの100年から、これからの100年に向けてたゆまぬ努力を続けていく。

参 考 文 献

- (1) 漆間 啓：交通システムの将来展望，三菱電機技報，92，No.7，386～389（2018）
- (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) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の地域別将来推計人口（平成30年推計）（2018）
- (4) 電気鉄道ハンドブック編集委員会：電気鉄道ハンドブック，2～4（2007）
- (5) 酒井 潔，ほか：創刊号から1000号までの軌跡，三菱電機技報，88，No.9，488～495（2014）
- (6) Kitaoka, T., et al.: Automatic Variable Field Chopper Control System for Electric Railcars, IEEE Transactions on Industry Applications, 1A-13, No.1, 18～25（1977）

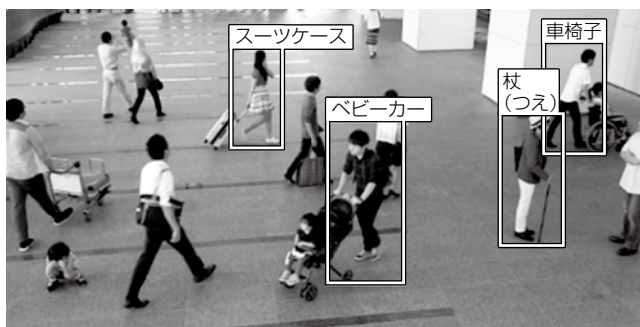


図5. 列車内・駅での検知対象モデル

車両メンテナンスの効率化と安定運行に貢献する“鉄道LMS on INFOPRISM”

吉本剛生*
Koki Yoshimoto
佐藤尚也†
Naoya Sato

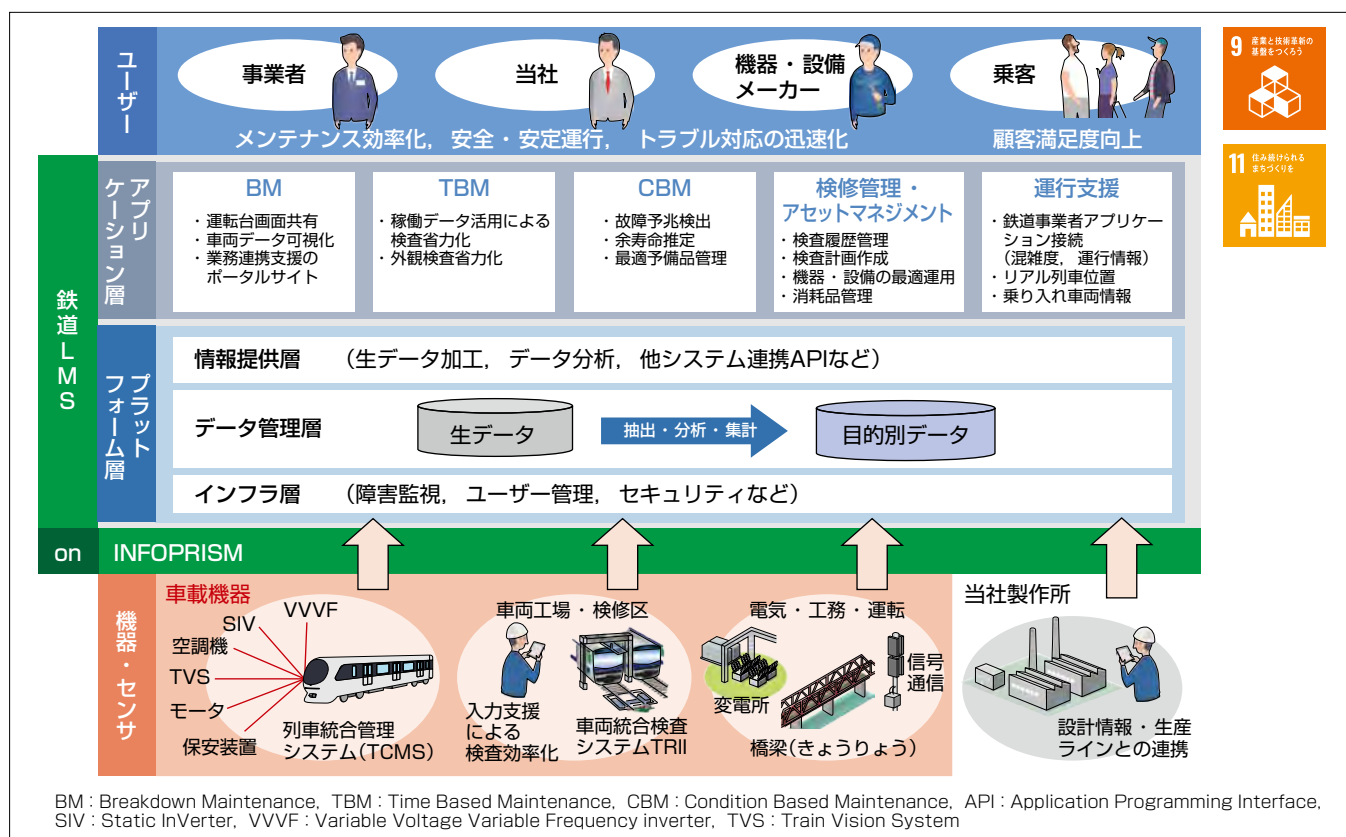
"LMS on INFOPRISM" Contributing to Efficient Train Maintenance Work and Stable Operation

要 旨

国連SDGs(Sustainable Development Goals)の17の目標の中で、“産業と技術革新の基盤をつくろう”と“住み続けられるまちづくりを”では、交通インフラ整備や安全性改善と持続可能な輸送システムの提供をターゲットの一つにしている。日本では鉄道輸送網が発達し、公共交通機関の柱として運営されている。それを支えている重要な業務の一つが、メンテナンスである。一方で、少子高齢化によってメンテナンスを支える人員の不足や技術継承の困難さが懸念されている。このため、メンテナンス精度を高めることで、メンテナンスを省力化しつつ、安定輸送を維持する取組みが期待されている。

一方、鉄道事業を取り巻く技術動向として、地上と列車間の無線通信環境の発展、クラウド、AI(Artificial Intel-

ligence)技術の急速な浸透があり、車両機器が生成する大量の稼働データを地上で蓄積・解析することで、メンテナンスに寄与できるようになってきた。三菱電機はこれまで、様々な車両機器に加え、それらを束ねる列車統合管理システム(Train Control and Management System: TCMS)、それらに連なる機器検査装置、無線システム、車両統合検査システム“TRII(TRain Integrated Inspection system)”などを提供してきた。それらをクラウド上の当社独自のIoT(Internet of Things)プラットフォームである“INFO-PRISM”と連携させることで、車両メンテナンスの高度化・運行安定化、関連する業務の効率化、さらにはデータ利活用を支援する“鉄道LMS(Lifecycle Management Solution) on INFOPRISM”の開発・提供に取り組んでいる。



“鉄道LMS on INFOPRISM”の全体構成

車両機器の稼働データをTCMS経由で収集し、無線を経由してクラウド上のプラットフォームであるINFOPRISMで管理する。地上から車両機器の稼働データの確認を始め、故障監視、運転台画面の共有を実現する。さらに、車両基地での外観検査を遠隔実施し、それらの検査情報と当社の機器設計情報などの情報も統合して、故障対応の迅速化とメンテナンス省力化を始めとして、鉄道システム全体の業務効率化を支援する。

1. ま え が き

国連SDGsの17の目標の中で、“産業と技術革新の基盤をつくろう”と“住み続けられるまちづくりを”では、交通インフラ整備や安全性改善と持続可能な輸送システムの提供をターゲットの一つに挙げている。公共交通の大きな柱である鉄道で、安定した運行を支える極めて重要な業務が、メンテナンスである。日々のたゆまぬメンテナンスによって、運行中の故障・事故を削減し、安全性向上や運行安定化を実現している。

しかし、そのコストは鉄道事業者の大きな負担になっている。また、少子高齢化による輸送需要の低下とメンテナンス要員の減少、さらに働き方改革、コロナ禍などで進む様々な社会環境の変化も相まって、メンテナンスの一層の効率化は、鉄道を持続可能とする上で重要課題の一つになっている。

鉄道事業でのメンテナンスの効率化、故障発生時の対応迅速化などを支援するため、当社は鉄道事業者との共同研究を通じて、メンテナンス支援システムを開発した。このシステムは、IoTプラットフォームINFOPRISM上に構築し、鉄道車両メンテナンスソリューション“鉄道LMS on INFOPRISM”として2019年10月に提供を開始し、複数の鉄道事業者を採用されている。

本稿では、鉄道LMS on INFOPRISMで実現されるアプリケーションや、その土台になるINFOPRISM、さらには将来の展望について述べる。

2. 鉄道車両のメンテナンスの現状と期待

国内で、鉄道車両のメンテナンスは鉄道事業者主体で実施されている。その主流である時間基準保全(TBM)は、故障や劣化、損傷の可能性のある部位を定期的に検査・補修して事故や運行障害の発生を未然に防ごうとするもので、鉄道車両では国の定めた省令及び告示に従った月(交番)検査、重要部検査、全般検査といった定期検査がある。車両基地や車両工場などで行われるこれらの業務は、かつて3Kとも言われた労働環境や作業品質の改善のため、自動試験装置やメンテナンス支援システムによる省力化や自動化がなされてきた。しかしながら依然として人の経験・スキルへの依存や、高所作業、狭所作業など負担になる作業が残っているのが実態である。

メンテナンスの更なる効率化と、深刻化が懸念される要員不足に対する一つの解決策として期待されているのが、近年発展著しいICT(Information and Communication Technology)やデジタル技術の活用である。鉄道車両は、

TCMSによる車上ネットワークと地上システムとの常時接続によって、営業運転中の各機器の詳細データを地上指令員や保守員が取得し、状態を連続的に監視できるようになってきた。さらに、2001年度に行われた省令改正によって、鉄道事業者が証明すれば、検査の実施基準を改定し、独自にメンテナンス体系を定めることが可能になった。これらを背景に、一部の鉄道事業者では、既定の定期検査の項目を営業運転中の機能確認で代替するようなメンテナンス実施基準等の見直しも検討されている。また機器の連続的な監視によって、故障や劣化の正確な実態把握ができれば検査周期延伸にも貢献が期待される。このように車上からの車両状態監視によるTBM省力化の検討が進む一方、地上で鉄道車両外部からの目視や計測を伴う検査ではカメラやレーザ等を用いた画像認識や3D自動計測の技術が高所・狭所での人作業を代替するソリューションとして期待されている。

また、新たなメンテナンス方式として状態基準保全(CBM)の検討・施行が進みつつある⁽¹⁾。CBMは稼働中の個々の機器状態をリアルタイムに監視し、時系列データや相関分析による分析・判定結果に基づいて最適な処置を行う方式である。検知した故障予兆に基づいて臨時メンテナンスを実施する、又は寿命予測によって計画された定期検査を延ばすなど、機器ごとにメンテナンスのタイミングを最適化することで、ダウンタイムの低減と同時に、過剰なメンテナンス作業や部品交換等の抑制によるコスト削減が期待できる。鉄道車両のCBM適用の取組みは比較的早くからあったが、大量データの収集・処理のためのICTの性能やコストが障壁になっていた。現在ではクラウドサービスやセンサ、無線通信の高速化・低廉化、IoT・AIなど近年の急速なデジタル技術の進化がCBM実現の追い風になっている。

3. 鉄道LMS on INFOPRISMの機能

この章では、鉄道LMS on INFOPRISMで実現されるメンテナンス支援と省力化のためのアプリケーションについて述べる。

3.1 運転台画面の共有と車両データの可視化

車両機器が生成する稼働データは、TCMSによって一旦集約された後、地上と列車間の無線を通じてリアルタイムにINFOPRISM上に送信・蓄積される。このとき、車両機器の稼働データに加えて、列車の在線位置・乗車率や、故障の有無などの情報も収集し、地上の指令員からリアルタイムに確認可能にしている。

さらに、図1に示すように、運転士が見ている運転台画

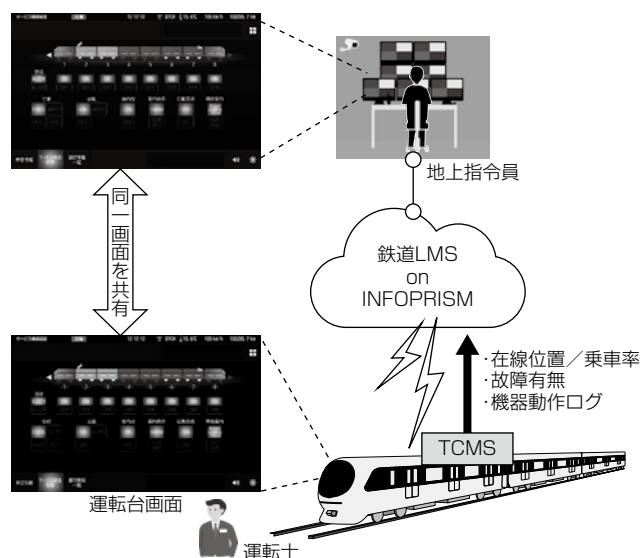


図1. 運転台画面の共有と車両データの可視化

面を地上指令員がそのまま確認することも可能である。これらの機能によって、車両機器故障の発生を地上から即時把握できることに加え、地上の指令員と車上の運転士が連携した適切かつ迅速な故障対応が実現できる。

3.2 稼働データ活用による故障予兆検出

INFOPRISM上に蓄積した、電流値や電圧値など詳細な機器稼働データを、INFOPRISM上のデータ分析サーバが常時監視としきい値判定を行うことで自動的に故障予兆を検出する。故障予兆を検出した場合は、原因追究を可能にするグラフや帳票を出力するとともに、アラームを表示することが可能になる。これによって、いち早く故障予兆をとらえ、営業運転中に故障が発生する前に対処することで、旅客サービス低下を回避し、安定輸送に貢献する。また、これらの情報は車両機器メーカーへ簡単に展開可能であり、問題発生後の初動開始を迅速化できる。

現在、ブレーキ制御装置及び電動空気圧縮機を対象にしたシステムが稼働中である。今後は対象機器を拡大し、更なる鉄道輸送安定化に貢献する。

3.3 外観検査の省力化

現状のメンテナンスで中心に位置付けられているのは、車両基地や車両工場で実施される各種定期検査である。車両統合検査システムTRIIは、その定期検査項目を中心に、車両構成機器の摩耗度や形状を非接触で自動計測し、目視による外観検査などを代替することで、事務所などから遠隔で鉄道車両全体を一括して検査するシステムである。現在、図2に示す各項目の自動検査・遠隔検査が、3D自動計測や画像によって実用化されている。屋根上の点検や車輪に関する計測の自動化などによって、メンテナンスの効率化とともに作業の安全性向上と負担軽減に寄与している。

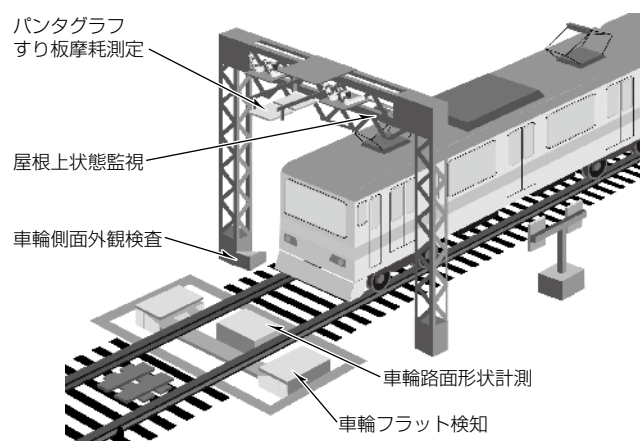


図2. 車両統合検査システムTRII

さらにTRIIでは、通常では一定周期ごとに検査される機器状態を入区ごとに計測・蓄積でき、よりきめ細かな時間間隔で摩耗度や形状等の変化を把握できる。各機器の状態変化・兆候を早期に発見して分析することで、通常の期間や走行キロに依存した検査業務(TBM)から、状態基準保全(CBM)に発展させることができる。

また、現状のTRIIは特定の基地に閉じたシステムであり、他の基地とデータ連携等はしていない。しかしTRIIによって収集したデータをINFOPRISM上に蓄積して相互にデータ連携することで、より精度の高いCBMの実現が可能である。例えば、複数の基地に出入りする編成に対して、複数の基地の検査結果を共有し、連続的に観察・分析できる。また、装置の状態変化は、編成の走行距離や期間に依存することはもちろんだが、その走行環境や運行状況、例えば、乗車率、気温、地域(カーブや勾配の多少)等と因果関係があると考えられる。さらに、例えば車輪摩耗の傾向などであれば、力行やブレーキ回数の多少とも因果関係があると考えられるので、今後の走行環境(カーブが多い地域かどうか等)の情報を付加することによって、車輪摩耗の状態予測精度は上がると考えられる。

今後はTRIIによって計測できる項目の拡充を図るとともに、INFOPRISM上でより様々な情報(走行環境や運行状況など)と組み合わせて分析を進めることでより精度の高いCBMを目指していく。

3.4 検修管理

鉄道車両の機能性能を維持するための定期及び臨時の検査・修繕業務を総じて“検修”と呼ぶ。検修管理システムは、車両とその構成機器の台帳情報を中心に、検査の年間計画・月間計画・日々の作業計画、要員計画、必要設備割当ての立案と計画に基づいた検査実施結果及びそのエビデンスになる測定データのほか、故障、部品交換実績や予備品などの資材情報を管理するシステムである。

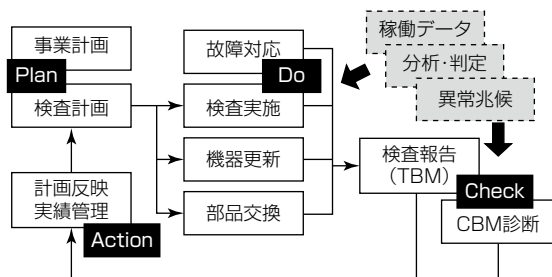


図3. 検修管理システムの対応業務

計画立案のベースになる前回検査日等の検査情報や、故障履歴や設計図面等、機器個体に関する全ての情報を検修管理システムが一元管理することによって、過去事例からの故障原因類推や水平展開処置対象機器抽出等、故障発生時対応の迅速化が可能になる。

この検修管理システムをINFOPRISM上に構築することで、図3に示すように、走行時の機器稼働データと当該機器の過去の検査・修繕・故障履歴や将来の定期検査予定など検修管理データの連携が容易になる。これによって、これまで車両基地で実施していた検査項目の一部を、TCMSが持っている自動検査の結果や機器稼働データを基に分析・状態判定した結果を用いて代替することが可能になり、車両基地での検査作業を軽減でき、TBM省力化に貢献できる。

また、稼働データを用いた故障や劣化検知に基づいて発生する臨時検査、修繕の計画への反映や、機器ごとの検査周期最適化、それらを含めた全体計画を再策定する機能の提供によってCBMに基づく新たなメンテナンス体系の実現にも貢献できる。さらには、鉄道LMSで用いる様々なデータを検修管理システムと連携させることで、メンテナンス省力化に貢献する統合システムの実現を目指す。

4. IoTプラットフォーム INFOPRISM

4.1 概要

3章で述べた鉄道LMS on INFOPRISMのアプリケーションを実現するには、列車の運行情報、列車に搭載された機器の稼働情報、検査情報等、様々なデータが必要になる。INFOPRISMは、これらのデータを蓄積・活用するためのプラットフォームである。

INFOPRISMの大きな特長として、クラウドの活用が挙げられる。従来のオンプレミスのシステムでは、サービス開始時から高性能かつ大容量のサーバを用意する必要があった。一方、クラウドではスモールスタートが可能であり、性能や容量を必要に応じて拡張できる。

4.2 プラットフォーム階層

INFOPRISMのプラットフォームは主に、情報提供層、データ管理層、インフラ層で構成される(図4)。

4.2.1 情報提供層

プラットフォームの情報提供層の稼働情報基盤では、TCMS経由で機器から集められた生データ群から必要な情報を抽出、値として扱うためのデータ変換、時刻キーで再配置して時系列データにする。データ分析基盤では、稼働情報基盤が生成した機器稼働データを用いて、機器設計者のノウハウを生かした判定ロジックに基づき、異常判定に最適な条件で稼働データを抽出、判定処理を行う。検修管理基盤では、日々の検修計画・実績に加えて、データ分析基盤が作成した機器異常兆候判定結果を定期的に集計することで、定期検査の一部項目を営業走行時の機器稼働データで代替することを可能にする。連携API基盤には、他システムと連携するためのAPIを備えている。インターネット上の情報の取り込みや、運行管理などとの連携によって、分析高度化や運行支援への貢献が期待できる。さらには、鉄道事業者間で提供可能な範囲を定めて、相互提供することで、相互直通運転を行う鉄道事業者間で、自路線に乗り入れ走行している他鉄道事業者の列車情報等を共有することが可能になり、より高度な運行支援に貢献できる。

4.2.2 データ管理層

プラットフォームのデータ管理層は、収集された生データと、情報提供層の各基盤によって目的に応じて整形された目的別データを管理する。

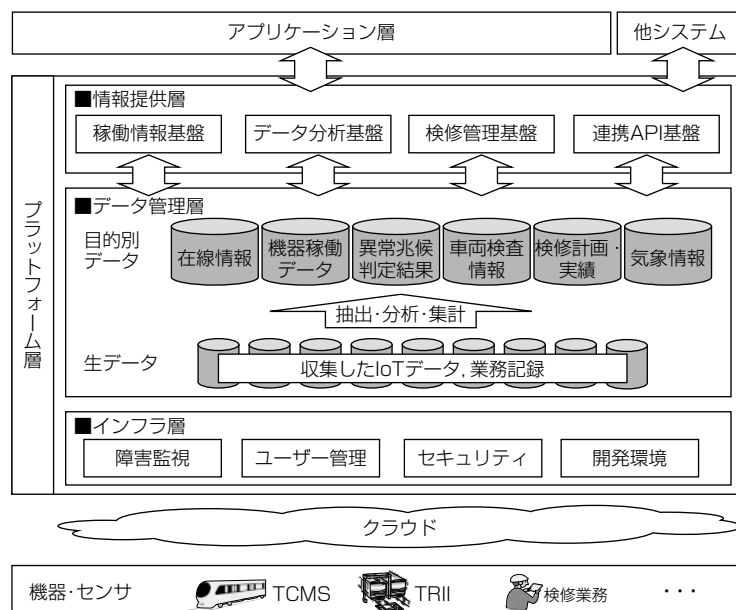


図4. INFOPRISMの構成

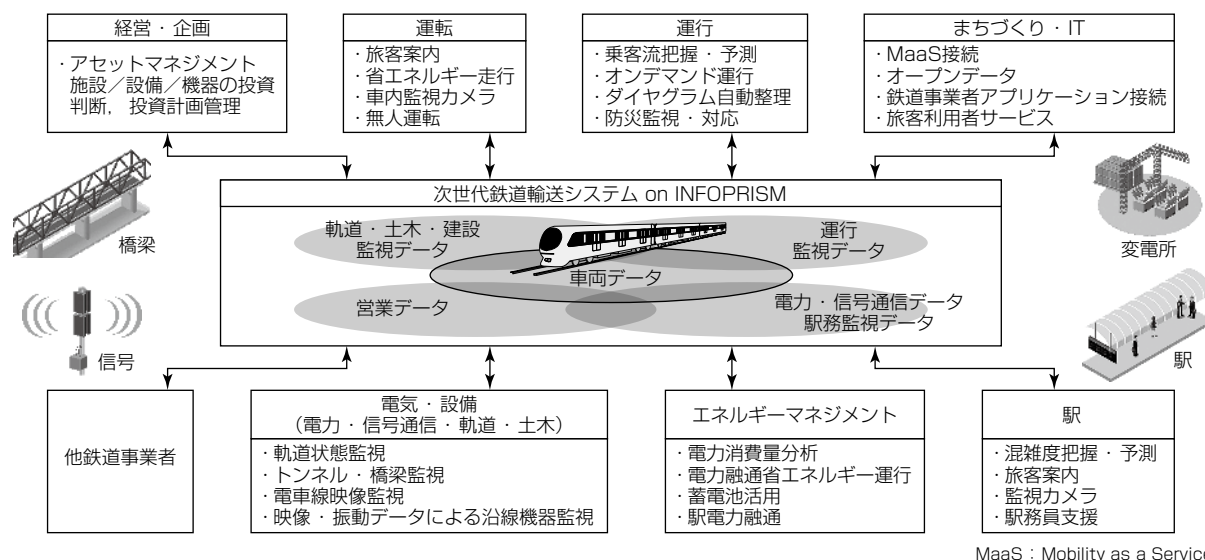


図5.次世代鉄道輸送システム on INFOPRISM

4.2.3 インフラ層

プラットフォームのインフラ層は、システムの継続的な開発・運用管理を行うための共通的な機能を提供している。インフラ層の障害監視機能では、アプリケーションやプラットフォームの稼働状況を一元的に集約監視する。ユーザー管理機能では、アプリケーションで認証処理を行うためのアカウント情報や、アクセス範囲を制御するため役割情報等を管理するとともに、通信制御、暗号化、脆弱(ぜいじゃく)性対策等のセキュリティ機能や、バックアップ管理を行い、安全で効率的なシステム運用を行う。また、開発・運用サイクルを高めるために、クラウド上での開発環境や、各種支援ツールも提供する。

4.3 INFOPRISMの適用拡大

現在、鉄道LMS on INFOPRISMは、主に鉄道事業者の車両部門で活用されているが、このIoTプラットフォームとしてのINFOPRISMは、鉄道事業全般で活用可能である。さらには、公共施設、道路、上下水道、電力などの社会設備の運用・保全業務を効率化するためのプラットフォームとしても活用可能である。各分野の最新技術を反映させ、相乗効果を高めることが可能であり、鉄道事業者の様々な部門間、また他分野の事業者とのコラボレーションも可能になる。

5. 鉄道LMSから次世代鉄道輸送システムへ

ここまで、鉄道LMS on INFOPRISMとして鉄道車両及び基地を中心としたメンテナンスの改善について述べてきたが、収集したデータは、メンテナンス以外の分野での活用も可能である。在線位置・乗車率・空調温度など、近

年鉄道事業者が旅客向けスマートフォンアプリケーションで積極的に公開しているデータも、INFOPRISMを活用すると簡単に収集可能である。

図5に示すように、鉄道車両や基地のメンテナンス関連データに加えて、運行監視データ、電力・信号通信データ、駅務監視データ、軌道・土木・建設監視データ、営業データなどを統合し、さらには他鉄道事業者のデータとも連携させることを目指す。これによって、鉄道システム全体の業務効率化に加え、省エネルギー、自動・自律運転、旅客サービス向上、MaaS連携といった次世代鉄道輸送システムのプラットフォームへの発展を目指す。

6. む す び

鉄道車両メンテナンスソリューション“鉄道LMS on INFOPRISM”の機能と将来展望について述べた。

安定・安全な公共交通機関である鉄道を今後も持続し、“住み続けられるまち”を実現するためにはメンテナンスの効率化・自動化と、それによる運行の安定化は不可欠である。

当社は、車両機器メーカーならではの設計・製造ノウハウを生かしたメンテナンス支援アプリケーション、及びそれに対応した機器やTCMSの開発に引き続き尽力していく。さらに、総合電機メーカーとしてそれらを統合するICTプラットフォームを整備し、メンテナンスだけでなく、鉄道システム全体を改革・効率化することで、鉄道の魅力と安定性を向上させて、公共交通としての地位を高め、ひいてはまちづくりに貢献できるような技術開発に取り組んでいく。

参 考 文 献

- (1) 奥石逸樹：鉄道メンテナンスの課題と今後の展望，JR東日本テクニカルレビュー，No.48，5～8（2014）

“MMSD”を活用した鉄道沿線設備・施設の計測・解析サービス

須合健一*
Kenichi Sugo
柚山武郎*
Takeo Yuyama
森 大輔*
Taisuke Mori

Measurement and Analysis Service of Railroad Trackside Facilities using "MMSD"

要 旨

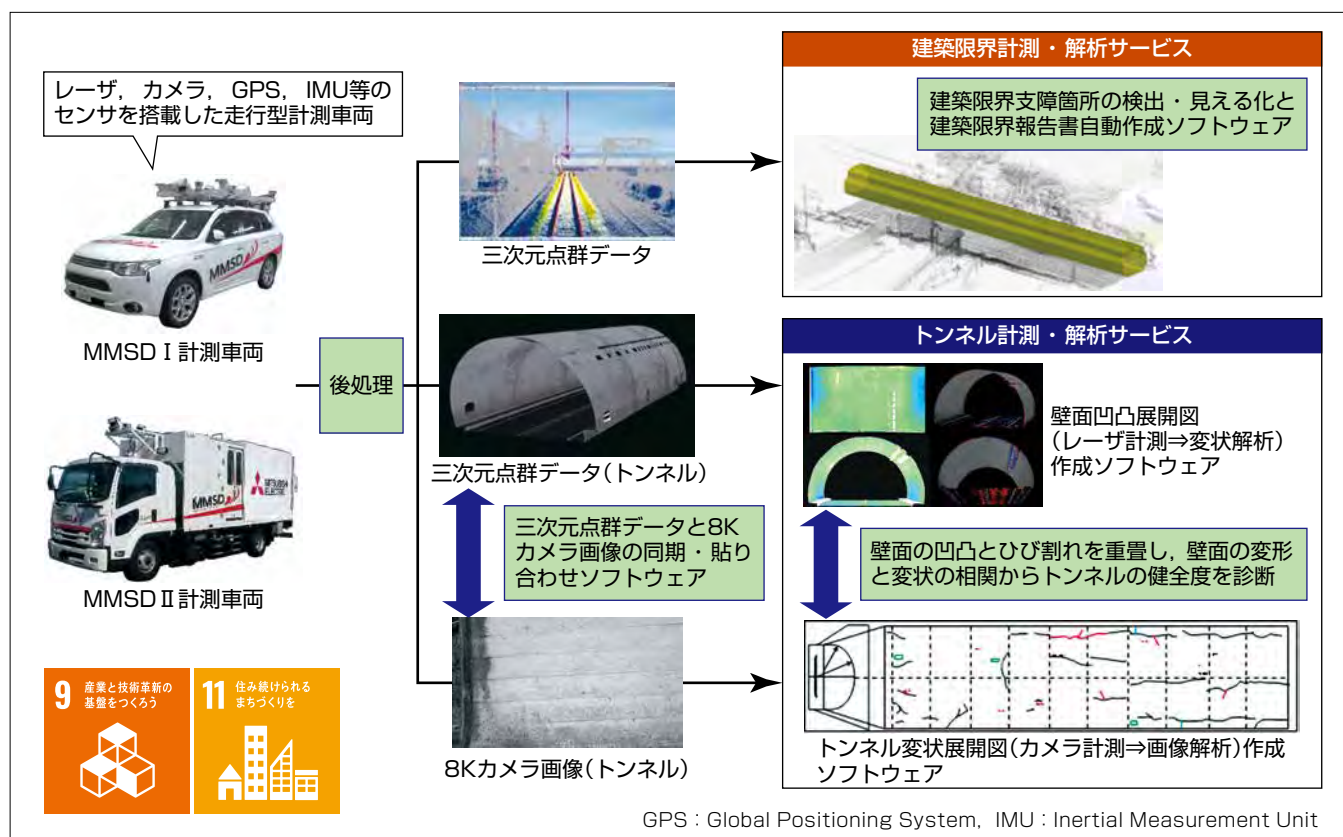
150年にわたって整備が進められてきた日本の鉄道は“建設の時代”から“維持管理の時代”に突入した。

SDGsの目標の一つである“住み続けられるまちづくり”を実現するためにも、鉄道沿線設備・施設の適切な維持管理を通じて鉄道の安全・安心を確保することが重要である。

そのような中、トンネルや橋梁(きょうりょう)等でのコンクリートやモルタルの剥落、建築限界支障、電化柱倒壊等の維持管理に関連する事象が発生している。また、設計耐用年数を超えた構造物も今後増加が見込まれる。これらの背景から、維持管理の必要性・重要性は増大しているが、昨今の少子高齢化等による労働力人口減少に伴う維持管理要員の確保が大きな課題になっており、効率的な維持管理が求められている。

三菱電機では、鉄道を始めとした重要社会インフラの維持管理効率化を支援するため、2010年度から“MMSD (Mitsubishi Mobile Monitoring System for Diagnosis)”の開発に着手した。この開発では、計測車両というハードウェアだけでなく、取得したデータを解析するためのアルゴリズムやソフトウェア等の研究開発も並行して進めてきた。その結果、2015年度にMMSD I 計測車両、2017年度にMMSD II 計測車両による計測・解析サービスを開始し、鉄道分野では、建築限界計測やトンネル検査等の各種計測・解析サービスが活用されている。

今後も様々な機能拡充を図ることでイノベーションを進め、鉄道事業者の維持管理業務の効率化に貢献していく。



“MMSD”による計測・解析サービス

MMSD計測車両で軌道上を走行することで、正確な位置情報を持った三次元点群データと高精細でゆがみの少ない8Kカメラ画像を取得可能である。取得したデータを解析することで、鉄道沿線設備・施設の維持管理に必要な建築限界報告書やトンネル検査に必要な管理データを作成可能である。

1. ま え が き

2012年12月に発生した中央自動車道笹子トンネルの天井板崩落事故後、国土交通省が鉄道事業者を対象に調査した結果、2013年4月から2014年8月までの17か月にトンネルや橋梁等で発生した1kg以上のコンクリートやモルタルの剥落事象は63件に及んだ⁽¹⁾。その他、建築限界^(注1)支障による列車損傷事故や電化柱の倒壊事故等も発生している。このような背景もあり、維持管理の重要性は更に増しているが、その作業は最終電車終了後の限られた時間で行われることが多く、更なる効率化が求められている。

本稿では、これら鉄道での維持管理の課題解決の一助にするために開発したMMSDの概要と特長、及び計測・解析事例について述べる。

(注1) 交通の安全を確保するための道路、軌道、鉄道上で障害になる工作物や構造物の設置が許されない空間範囲のことである。

2. MMSDの概要と特長

2.1 MMSDの概要

MMSD計測車両は、“高密度・高精度レーザスキャナ”と“8Kラインカメラ”等を搭載し、軌道内を走行することで、正確な位置情報を持った三次元点群データと、高精細な8Kカメラ画像を取得できる。これらのデータを当社が独自に開発したアルゴリズムで構築したソフトウェアで解析することで、鉄道事業者の維持管理に必要な情報を提供する。

鉄道事業者はMMSD計測車両を購入する必要はなく、当社のMMSDによる計測・解析サービスを利用可能である。

MMSD計測車両には現在、主にレーザスキャナによる計測のための乗用車タイプのMMSD I 計測車両と、レーザスキャナに加えて8Kラインカメラを搭載したトラック

タイプのMMSD II 計測車両の2種類がある。それぞれの仕様を表1に、軌道走行中の様子を図1、図2に示す。MMSD計測車両の軌道への投入は、MMSD I 計測車両は軌陸車に搭載した後に、MMSD II 計測車両は自身の軌軸装置を利用して、踏切や車両基地等から実施する。計測開始・終了地点付近の入出線可能な踏切や車両基地を利用する運用が可能であるため、限られた線路閉鎖時間を有効に利用した計測が可能である。軌陸車の軌間は、狭軌、標準軌、馬車軌等の様々な軌間に対応可能である。

2.2 MMSDの特長

2.2.1 計測車両の特長

MMSD計測車両は、当社が2007年度から測量会社等に販売しているMMS(Mobile Mapping System)計測車両を鉄道計測用に高機能・高性能化したシステムである。

計測車両の特長として、GPS不可視状態で計測走行開始可能、計測前初期化走行不要等、MMS計測車両からの高機能・高性能化を図った。これらは計測車両を構成するGPS、慣性計測装置(IMU)^(注3)、速度計、レーザスキャナ、カメラ等の各種機器を統合制御する心臓部である“中央処理部”を独自開発することで可能にしている。また、鉄道では計測のし直しを容易には実施できないため、中央処理部やセンサ等次に示す装置等の多重化を図っている。

(1) 高密度・高精度レーザスキャナ

100万点/秒のレーザスキャナを2台搭載

(2) GPS

3台のGPSアンテナをトライアングル配置し、これらを2式搭載

表1. MMSD計測車両の仕様

		MMSD I 計測車両	MMSD II 計測車両
用途		形状・位置等の鉄道沿線計測	形状・位置等の鉄道沿線計測 トンネルひび割れ等の変状計測
車両	ベース	乗用車 (OUTLANDER PHEV ^(注2))	6t車 (軌陸車として改造)
	電源	PHEV AC100V, 1,500W	発電機 AC100V, 12kVA
レーザ計測機能		高密度・高精度レーザスキャナ	
壁面撮像機能	カメラ	—	8Kラインカメラ
	照明	—	レーザ照明
軌道撮像機能	カメラ	—	8Kラインカメラ
	照明	—	レーザ照明
座標取得機能	GPS	多重化	
	IMU	多重化	
	速度・距離	オドメータ、レーザドップラ等多重化	

(注2) OUTLANDERは、三菱自動車工業㈱の登録商標である。



図1. 軌道走行中のMMSD I 計測車両 (軌陸車に搭載)



図2. 軌道走行中のMMSD II 計測車両

表2. 主な解析ソフトウェア

機能	概要
レール検出	三次元点群データからレール位置をmm精度で検出
建築限界測定	場所ごとに適切な限界枠を適用して三次元点群データから建築限界支障を検出
トンネル展開図自動生成	8Kカメラ画像から変状展開図の基礎になる展開図の自動生成
トンネル変状検出	8Kカメラ画像からひび割れ等各種変状を検出
トンネル変状の変化点検出	前回のトンネル全般検査と今回との変化点を検出
トンネル変状等のCADデータ生成	三次元点群データからのCADデータ生成

2.2.2 解析ソフトウェアの特長

当社では、MMSD計測車両で取得したデータを解析するためのソフトウェア、三次元点群データ・8Kカメラ画像の大容量データと解析結果のデータ管理システム等、様々な機能を独自に開発し、ホワイトボックス化している。これによって鉄道事業者が長年の実績と経験から積み上げてきた事業者ごとに異なる計測方法、例えば“建築限界の“はなれ”は、重力方向か、レールに対して直角か”といった微妙に異なる計測方法に容易に対応できる。

開発した主な解析ソフトウェアは表2のとおりで、その他も計画的に拡充している。

(注3) 車両の姿勢情報を検出する装置である。

3. MMSDによる計測・解析事例

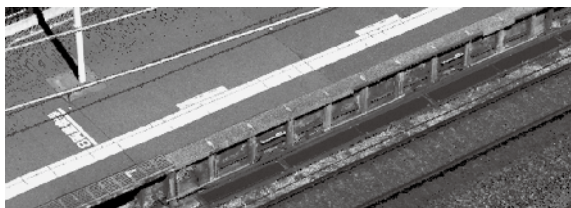
3.1 MMSD計測車両で計測できるデータ

(1) 三次元点群データ

高密度・高精度レーザスキャナ2台で1秒間に200万点取得するデータであり、その相対精度は3mmである(図3)。また、国土地理院設置の電子基準点での測位データ等と合わせて処理することで、正確な位置情報(緯度、経度、標高)を付与できる。



(a) トンネル部



(b) ホーム部

図3. 三次元点群データ

(2) 8Kカメラ画像

点検に必要な0.3mm以上のひび割れを自動検出するために、8Kラインカメラで高精度に撮像する。トンネル壁面用として14台、軌道面用として2台の8Kラインカメラを搭載しており、これらの8Kラインカメラで撮影した高精細画像は、解析ソフトウェアによって自動で貼り合わせることができる(図4)。

3.2 建築限界計測

三次元点群データで建築限界計測を高精度に実施可能である。取得した三次元点群データから左右のレール位置を正確に抽出し、そこに建築限界枠を重ねて測定する。

建築限界枠は、箇所ごとに決められた枠を適用する。具体的には、ホーム部建築限界枠、跨線(こせん)橋部建築限界枠をそれぞれの部分に適用し、曲線部ではその曲線半径に基づいて計算した拡大建築限界枠を適用する。

その他、鉄道事業者ごとの要望に沿った解析、例えば“スラックがある場所での左レール又は右レール寄せした判定”も可能である。

結果は建築限界報告書としてまとめる。

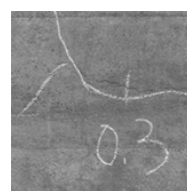
3.3 トンネル検査

鉄道のトンネル検査は、2年ごとの通常全般検査と20年ごと(新幹線は10年)の特別全般検査に分類される。通常全般検査は遠方目視を中心とした検査で、特別全般検査は、近接目視と打音を中心とした検査である。

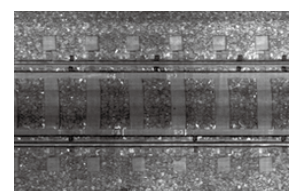
一方、道路トンネルは、中央自動車道笹子トンネル天井板崩落事故を受けて、5年ごとの検査が義務化された。この検査内容は、鉄道トンネルの特別全般検査と同等である。

当社のMMSD II計測車両は、道路トンネル検査ロボットとして国土交通省に認められた装置で、従来の近接目視の代替としての性能を持っている。

14台の8Kラインカメラで撮影した画像を使って、トンネル展開図を作成する際、そのまま貼り合わせると縮尺がまちまちな展開図になる。そこで当社では計測したトンネルの形状を作成し、その形状に合わせて自動で貼り合わせる処理を開発した。これによって抽出したひび割れの長さの確からしさが向上する。先に述べた道路トンネル検査ロボットとして国土交通省がホームページ上で掲載している

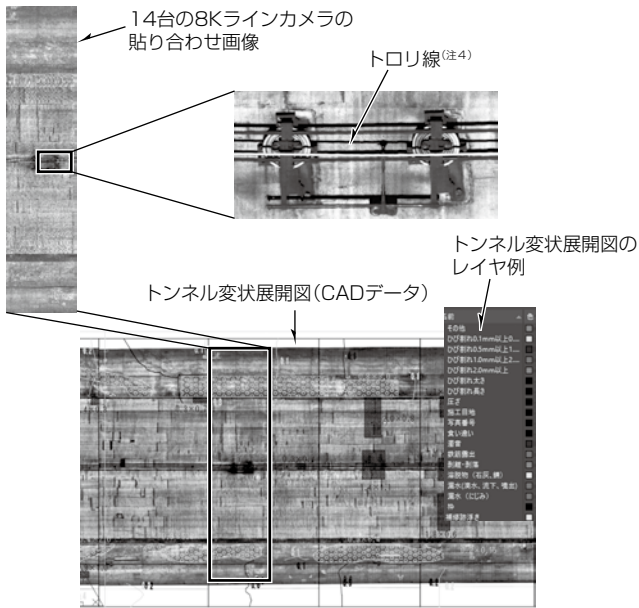


(a) トンネル壁面



(b) 軌道面

図4. 8Kカメラ画像



(注4) パンタグラフを介して鉄道車両へ給電する接触電線のことである。

図5. トンネル変状展開図の作成

点検支援技術性能カタログでもこれが評価されている。

このように作成した貼り合わせ画像であるトンネル展開図から、ひび割れ等の変状を抽出し、さらに点検に必要な打音検査の結果も含めて、トンネル変状展開図を作成する。変状展開図は、従来は紙で管理されていたため、様々な局面での利活用が困難であった。当社は変状展開図をCADデータで納品するため、電子データで共有できることから、必要な人が必要ときに参照することが容易になる(図5)。また、変状展開図はレイヤ構造にしているため、必要な主題図、例えば“ひび割れだけの図面”“漏水だけの図面”が自席で容易に作成可能である。あわせて、“見上げ図”“見下げ図”双方とも作成可能であり、設計用途や維持管理用途に使い分けことが可能である。

3.4 特殊信号発光機の見通し確認

踏切で自動車が立ち往生した場合には、踏切に設置してある緊急ボタンを押下することで、特殊信号発光機が点滅し、接近してくる列車の運転士に異常を知らせる。そのため、この特殊信号発光機を、運転士が所定距離から視認できるかの検査が必要になる。

当社では取得した三次元点群データに“運転士視点位置”と“特殊信号発光機位置”を設定し、運転士視点から特殊信号発光機間に視界を遮る樹木等の有無を検出するアルゴリズムを開発した。運転士視点と特殊信号発光機の位置は自由に設定でき、その正確な軌道上の距離算出も可能であるため、現地確認に比べて作業効率化が可能である(図6)。

3.5 その他

MMSDは、先に述べた用途以外でも次の用途で活用可

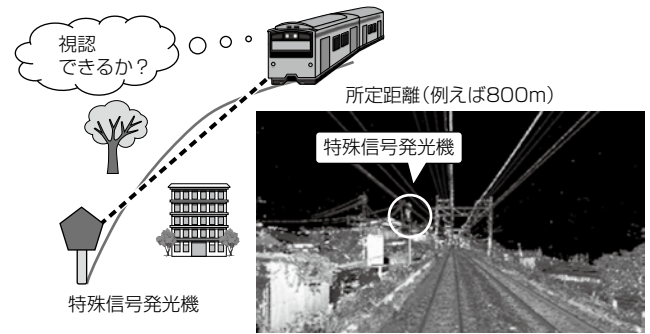


図6. 確認イメージと運転士視点からの特殊信号発光機

能である。

- (1) エアセクション(注5)部や渡り線部のトロリ線計測
- (2) 三次元点群データの三次元CAD化による設備設置設計支援
- (3) 信号機と地上子等の設備間距離計測
- (4) 定位置停止装置用地上子の設置設計や無線式列車制御のための各種沿線設備・施設の計測
- (5) ホーム上屋(注6)部の離れと高さ計測

(注5) トロリ線を電氣的に区分するために設ける箇所のことである。

(注6) 屋根に相当する構造物のことである。

4. 今後の展望

現在MMSDⅢ計測車両を製作中である。MMSDⅢ計測車両は、基本的な機能項目はMMSDⅡ計測車両を踏襲するものの、様々なプラットフォームへの搭載を可能にするとともに、更に高機能・高性能化している。

なお、既存のMMSDⅠ・Ⅱ計測車両についても、MMSDⅢ計測車両で開発した新機能を順次搭載していく予定である。あわせて、新たなセンサの搭載、AI(Artificial Intelligence)を含めた新たな解析メニューの追加による拡充を計画的に進めていく。

5. む す び

MMSDの概要と特長、及び計測・解析事例について述べた。今後とも人手に依存した維持管理手法からの脱却は加速し続けると考えられる。ロボットやAIに任せられる部分は任せて、人は人らしく人にしかできない部分を担うことで、更なる維持管理の高度化を進めていく必要がある。当社は、これからも鉄道を始めとした重要社会インフラの維持管理効率化を推進し、安全安心に貢献していく。

参考文献

- (1) 国土交通省：鉄道構造物における剥落事象について(2014)
https://www.mlit.go.jp/common/001055583.pdf

指令業務を効率化し柔軟な列車運行を支援するスマート列車運行オペレーション

中桐慶之*
Yoshiyuki Nakagiri

Smart Train Operation for Efficient Command Work and Flexible Train Operation

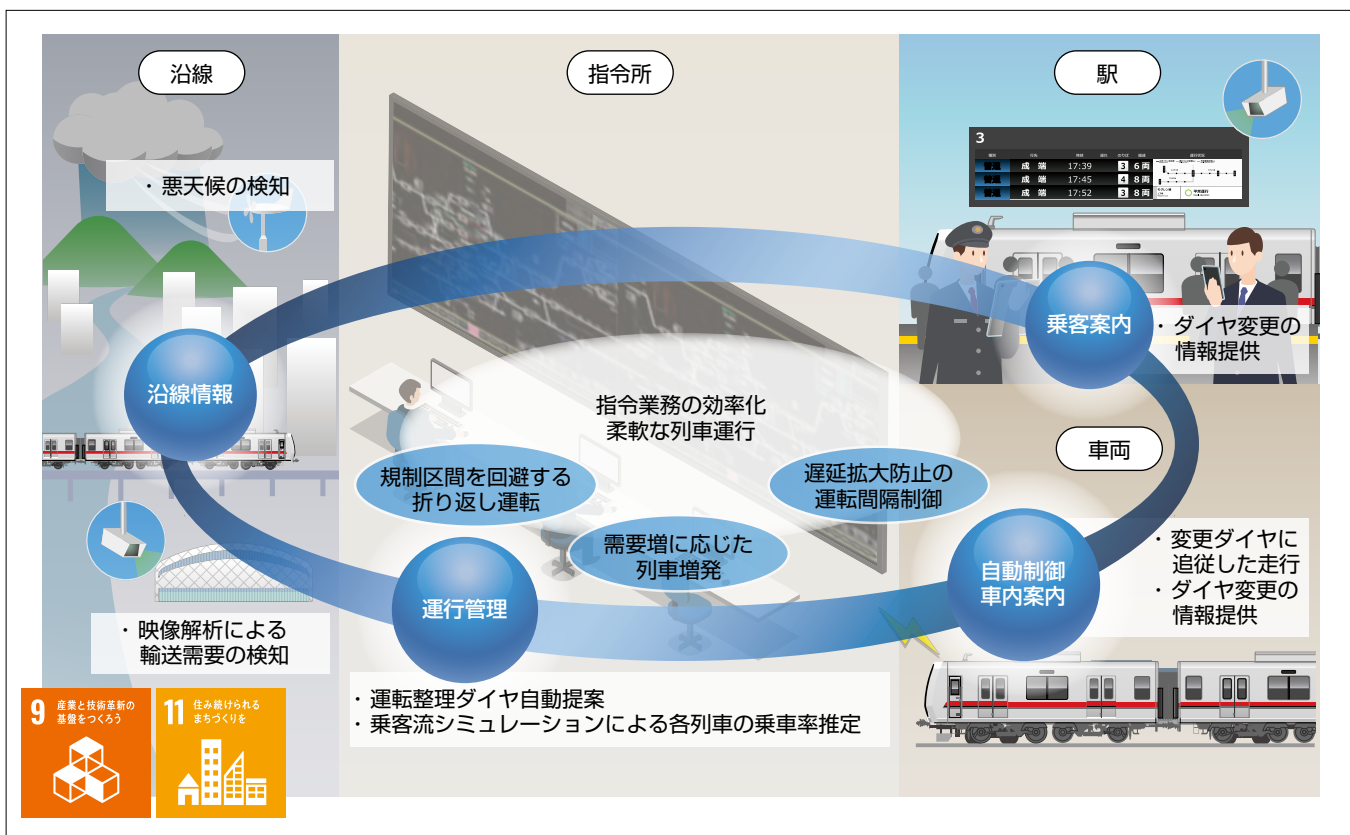
要 旨

悪天候や突発的な輸送需要増大等によって計画どおりの列車運行ができない場合、状況に応じた輸送力の確保や運転調整などの柔軟な列車運行をすみやかに行うことが求められる。指令員はこの要求に応えるため、支障箇所の状況把握、各列車の運転状況の把握とそれを踏まえた各列車への運転指示、車両や乗務員の状況を踏まえたダイヤの変更、駅や関係部門、運転中の乗務員への連絡等を行う必要があり、大きな負担になっている。

三菱電機はこのような指令員の業務負担を軽減し、柔軟な列車運行を支援するスマート列車運行オペレーションの開発を進めている。スマート列車運行オペレーションは、

列車運行に関わる地上／車上の各システムの情報連携や様々な自動化技術の導入によって指令業務を効率化し、気象条件や輸送需要変動、各列車の運行状況等に応じた列車増発や列車間の運転間隔調整など、駅での乗客の滞留抑制を目的としたものである。

上記の実現に向け、スマート列車運行オペレーションを構成する速度規制指令の自動化、規制に応じた折返しダイヤ自動提案、各駅・各列車の混雑状況を加味した増発ダイヤ自動提案、ダイヤ変更時の各列車の乗車率推定、自動運転による運転間隔の自動調整等の機能の開発に取り組んでいる。



スマート列車運行オペレーションによる指令業務の効率化及び柔軟な列車運行

地上／車上の各システムを相互に連携させ、かつ様々な自動化技術の導入によって指令業務を効率化し、悪天候等の輸送障害からの早期復旧・需要増加に応じた迅速な列車増発・タイムリーな情報提供など、乗客にも事業者にも優しい列車運行を支援することで、国連SDGs (Sustainable Development Goals)の目標9と目標11が目指す持続可能な社会の実現にも貢献する。

1. ま え が き

悪天候や突発的な輸送需要増大等によって計画どおりの運行ができない場合、状況に応じた輸送力の確保や運転調整などの柔軟な列車運行をすみやかに行うことが求められるため、指令員に大きな負担がかかっている。

当社は指令員の業務負担を軽減し、柔軟な列車運行を支援するスマート列車運行オペレーションの開発を進めている。スマート列車運行オペレーションは列車運行に関わる地上／車上の各システムを連携させ、かつ様々な自動化技術の適用によって、悪天候や混雑状況など状況に応じて必要になる指令業務の効率化を図るとともに、適正な輸送力確保や迅速・的確な情報提供によって乗客サービスの向上を目的としたものである。

本稿では、スマート列車運行オペレーションと、それを構成する機能について述べる。

2. スマート列車運行オペレーションによる指令業務の効率化と柔軟な列車運行

スマート列車運行オペレーションによる指令業務の効率化と柔軟な列車運行について、指令員が多大な労力を要している悪天候による運行支障発生時と大量輸送需要発生時の輸送力の適正化を例に述べる。

2.1 運行支障発生時の例

悪天候等によって運行支障が発生した場合、(a)規制対象

列車の抽出、(b)規制対象列車への規制通知、(c)規制区間を回避して運行を継続するためのダイヤ変更、(d)ダイヤ変更情報や運行状況等の乗客や駅員への情報提供などの各業務は指令員が経験やノウハウを駆使して複数システムの操作や音声連絡によって遂行してきた。

図1にスマート列車運行オペレーションでの運行支障発生時の指令業務フローを示す。沿線に設置されている風速計で強風を検知すると沿線情報システムが規制情報を指令所に通知する(図1①、以下、図1中の番号だけ示す)。指令員が規制を発令すると(②)、運行管理システムが規制情報から停止すべき列車を自動的に抽出して当該列車に停止指示を出す(③)。当該列車は受信した停止指示を基に自動的に停止する(④)。また、運行管理システムは規制発令に伴う運転見合せ区間の情報や運行状況を、駅の案内表示や車両案内、スマートフォン、駅員のタブレット等に自動で通知する(⑤)。さらに、運行管理システムが規制区間を回避して輸送力を確保するための折り返しダイヤを提案する(⑥)。提案ダイヤを指令員が承認することによって、運行管理システムが当該列車に行き先変更を指示し(⑦)、当該列車は行き先を変更して運行を行う(⑧)。行き先変更情報は瞬時に運行管理システムが車内案内システムや旅客案内システムを通じて乗客や駅員に提供する(⑧、⑨)。

このようにスマート列車運行オペレーションでは、指令員の業務ノウハウをアルゴリズム化してシステムに組み込むことで規制対象列車やダイヤ変更案をシステムが自動提案する。指令員が提案内容を確認して承認することで、運行管理システムが対象列車への規制通知や乗客や駅員への

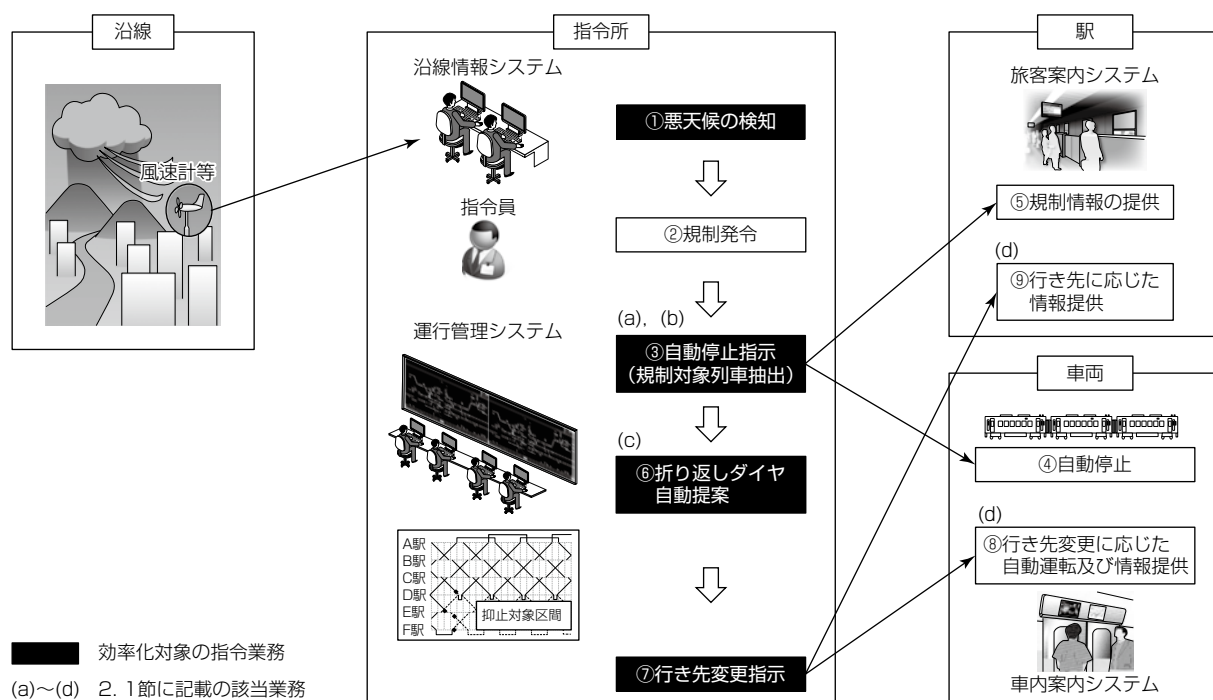
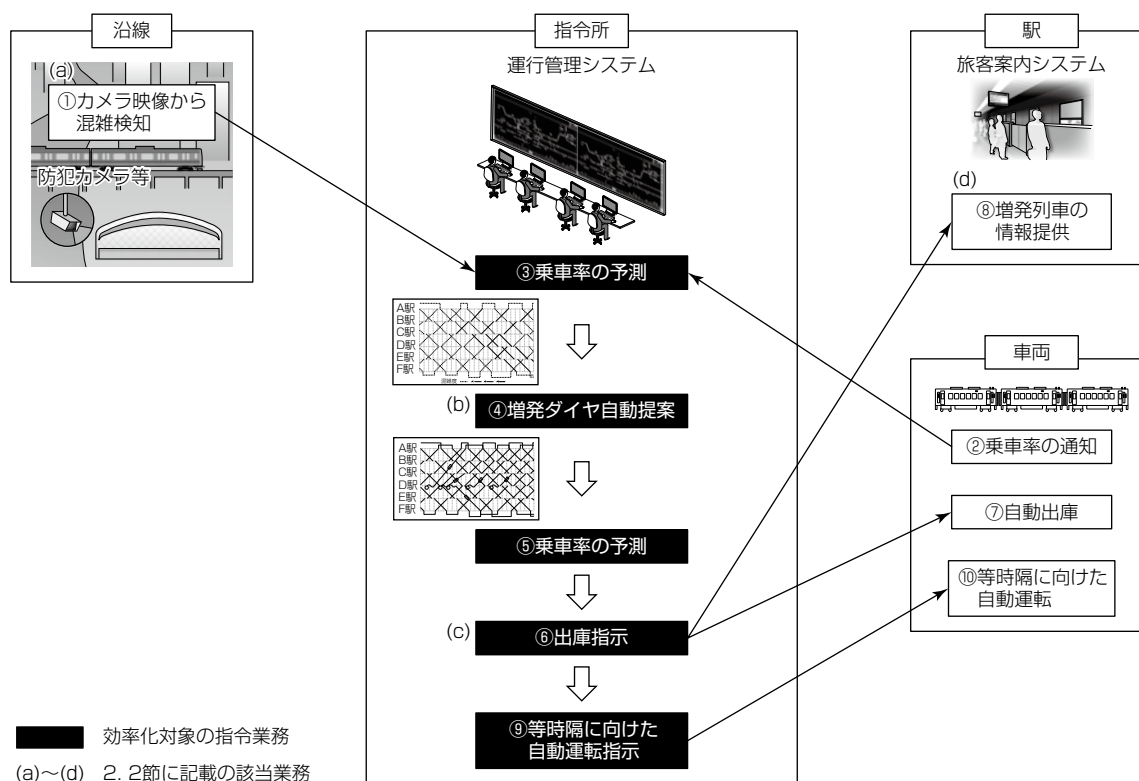


図1. 運行支障発生時の指令業務フロー



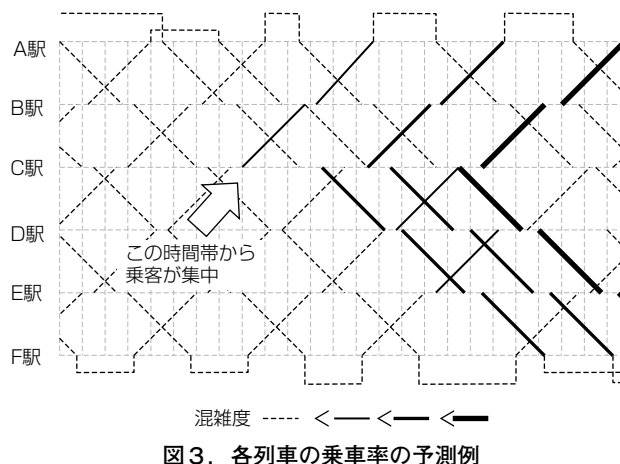
ダイヤ変更の情報提供を自動で行う。このようにして、規制に応じたダイヤ検討を試行錯誤する手間や関係部門への手配・乗客等への情報提供の業務負荷が低減できる。なお、折り返しダイヤの自動提案機能の詳細については3. 1節で述べる。

2.2 大量輸送需要発生時の例

沿線でのイベント開催など通常と異なる輸送需要が見込まれるときには、(a)今後の輸送需要の予測、(b)需要増に対する増発ダイヤ立案、(c)車両基地への出庫手配、(d)ダイヤ変更情報や運行状況等の乗客や駅員への情報提供など、指令員が適正な輸送力確保に向けた業務を経験やノウハウを頼りに実施してきた。

これに対し、スマート列車運行オペレーションでの大量輸送需要発生時の指令業務フローを沿線近辺での大規模イベントが終了し、イベント会場から最寄り駅に向かって大量の乗客が移動を始めた場面を例に図2に示す。イベント会場周辺のカメラ映像等から推定乗客数を取得し(図2の①、以下、図2中の番号だけ示す。)、運行管理システムがこの推定乗客数と現在走行中の各列車から収集した乗車率情報(②)を基に、現状のダイヤでの各列車の乗車率を予測する(③)。予測結果は運行管理システムのダイヤ画面上で乗車率の高さを列車スジの線種や太さで表現するなどして指令員に示す(図3)。

乗車率予測結果によって輸送力の増加が必要と判断がさ



れた場合、運行管理システムが増発ダイヤを自動提案し(④)、指令員は提案された増発ダイヤについて、再度乗車率予測を行う(⑤)。指令員は現状ダイヤより混雑緩和が見込まれる場合、ダイヤの承認を行う。ダイヤの承認後、運行管理システムは車両基地に出庫指示を出す(⑥)。車両基地では、出庫指示に従って車両が自動出庫する(⑦)。また、増発列車の情報を駅の案内表示や車両案内、スマートフォン、駅員のタブレット等に提供する(⑧)。

増発手配後に、イベント会場最寄り駅に想定以上の乗客が集中して列車に遅れが発生した場合、運行管理システムは各列車を等間隔に運転するための運転パターンを算出し、自動運転指示を当該列車に出す(⑨)。当該列車は運転指示を基に自動的に速度調整を行うことで、遅延拡大を防止する(⑩)。

このようにスマート列車運行オペレーションでは、カメラ映像の映像解析技術によって今後の輸送需要をシステムが予測する。指令員は予測された需要に応じた輸送力増強の要否について乗客流予測シミュレーション機能を用いて判断する⁽¹⁾。指令員の業務ノウハウをアルゴリズム化してシステムに組み込むことで増発ダイヤ案をシステムが自動提案する。指令員は提案内容を確認して承認することで、対象列車への車両基地への出庫手配や乗客や駅員へのダイヤ変更等の情報提供が自動で行われる。このようにして、運行支障発生時と同様の業務負荷が低減できる。

さらに、乗降時間の増大等による小規模な遅延発生時には遅延拡大を防止するための運転制御が自動で実施される。なお、増発ダイヤの自動提案機能の詳細は3.2節、列車運転間隔の調整機能の詳細は3.3節で述べる。

3. スマート列車運行オペレーションを構成する機能

スマート列車運行オペレーションを構成する主な機能について次に述べる。

3.1 運行支障区間を回避する折り返しダイヤ自動提案機能

折り返しダイヤ自動提案機能は悪天候等による規制区間を回避して列車運行を継続するための折り返しダイヤを提案するものである。

図4は異常気象等によってD駅～F駅の当該区間が抑止対象になり、その区間に向かう各列車が近傍の駅(◆印)で出発抑止された場合の動作例を示す。

この機能は、まず、抑止区間と折り返し設備の配置を考慮して運休区間を決定し、運休区間に向かう列車について運休区間の部分運休を自動設定する。次に、部分運休によって計画どおりの車両のやり繰りがつかなかった(車両運用に矛盾が生じた)列車について、折り返しや入出庫等を自動設定する。図4の例で、D駅に折り返し設備があり、D駅～F駅が運休区間になった場合、D駅からA駅に

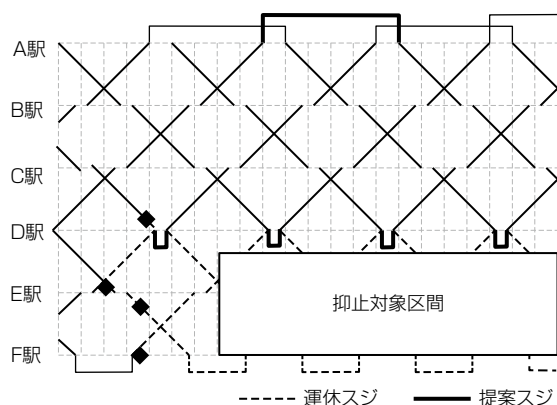


図4. 抑止対象区間を回避する折り返しダイヤ自動提案例

向かう上り列車に割り当てられる車両がE駅やF駅で抑止されているため、D駅に到着した下り列車の車両を使用するようD駅で下り列車と上り列車の折り返しを自動設定する。

この機能によって、指令員の復旧ダイヤ検討にかかる時間や労力を低減するとともに、復旧ダイヤを迅速に実行させることで、乗客への影響の早期低減が可能になる。

3.2 大量輸送需要に応じたダイヤ自動提案及び乗車率予測機能

この機能は、①通常時からの需要の増加を検出する機能、②需要増加による各列車の乗車率の変化をシミュレーションで推定する機能、及び③需要増に対して混雑緩和に効果的な増発ダイヤを提案する機能からなる。

3.2.1 需要増加検出機能

カメラ映像から映像解析によって人数を推定する機能である⁽²⁾。

3.2.2 乗車率シミュレーション機能

運転整理時に立案したダイヤに対して、乗客の列車選択基準(①最速経路を選択する。②乗車率が一定基準以上の場合、少し時間がかかっても乗車率が低い列車を選択する。)に沿って経路を検索し、3.2.1項で収集・算定したODデータ(Origin-Destination: 発駅/着駅の組合せごとの利用者数)に当てはめて、各経路・各列車の利用人数を推定する機能である。

図3の例では、矢印の時間帯からC駅へ乗客が集中した場合に、乗客流シミュレーションを行った結果を示しており、時間の経過とともにC駅を出発する列車の乗車率が高くなっていることが分かる。

これまでの運行支障発生の運転整理は、熟練の指令員が過去の乗客数等の実績やノウハウを基に立案や見直しを行っており、ダイヤ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、又は特定の駅に乗客が滞留しないようにダイヤを調整してきた。乗客流シミュレーションを活用することで、運転整理を実行する前に、想定した輸送需要と変更ダイヤの整合が確認でき、乗客サービスの向上と乗降時間の増大等による小規模な遅延の防止が可能になる。

3.2.3 増発ダイヤ自動提案機能

需要増に対応するため、出庫可能な車両数や出区線の使用状況等の条件を考慮した増発ダイヤを自動提案する機能である。

図3の例では、C駅での矢印の時間帯からの需要増に対

して、車両基地のあるD駅から、現時点で出庫可能な車両数、車両基地からD駅のホームに向かう際に使用する出区線の使用状況、他列車との時隔等を考慮して、増発ダイヤを自動提案する(図5)。

また、図5の増発ダイヤについて、乗客流シミュレーションを行った結果を図6に示す。C駅で乗客が集中する時間帯の列車本数が増加したことによって、図3のダイヤよりも乗車率を抑えられることが分かる。

この機能によって、指令員の需要に応じたダイヤ検討にかかる時間や労力を低減するとともに、増発ダイヤを迅速に実行させて乗客への影響の早期低減が可能になる。

3.3 列車運転間隔の調整機能

乗降時間の増大等によって小規模な遅延が発生した場合、従来は当該駅での停車時間が増大して出発が遅れ、後続列車は先行列車との運転間隔が詰まることで駅間停車が発生し、遅れが後続列車に拡大していく状況になる。従来の列車運行では熟練運転士が過去のノウハウに基づき、先行列

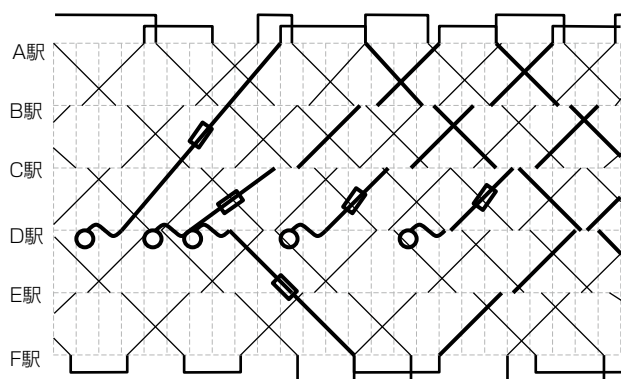


図5. 増発ダイヤの自動提案例

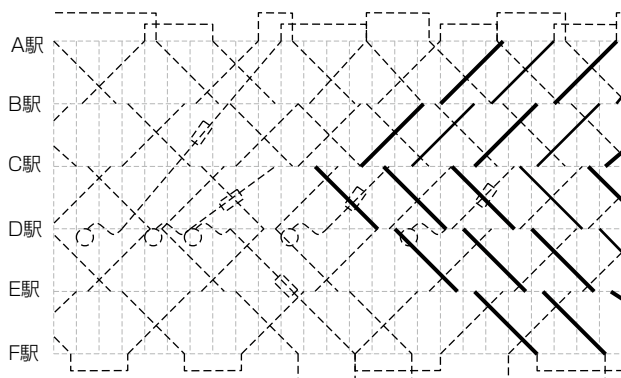


図6. 増発ダイヤについての乗客流シミュレーション例

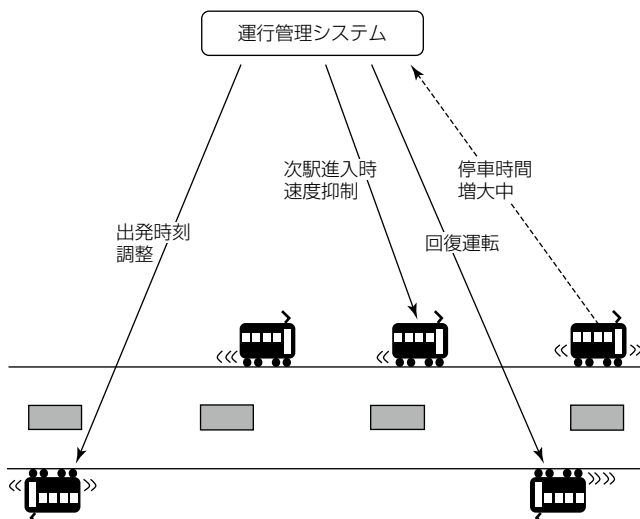


図7. 遅延拡大防止のための各列車への到着目標時刻指示

車に接近し過ぎないように速度を調整して運転を行っていた。

これに対して、この機能は運行管理システムが各列車から詳細な在線位置と速度を受信し、先行及び後続列車の在線位置や速度を加味して、先行列車との間隔が詰まることによる駅間停車を回避するための次駅の到着目標時刻を算出する。運行管理システムは算出した到着目標時刻を周囲の列車に指示し、各列車は指示された到着目標時刻に次駅に到着するように速度調整等を自動で行って運転する(図7)。

路線全体の各列車の運転状況に応じた到着目標時刻を運行管理システムが算出して各列車に指示することで、駅間での停車を削減し、遅延拡大防止を実現する。

4. む す び

本稿では、スマート列車運行オペレーションとそれを構成する機能について述べた。今後も指令業務を効率化し、柔軟な列車運行を支援するための技術開発を進めていく。

当社は自動車分野での安全な自動運転の実現に向けた技術開発を進めている。鉄道分野でも、これらの関連技術を結集して、需要に応じたオンデマンド自動運転や省エネルギー運転など、より高度な列車運行を実現することによって、沿線・地域の活性化や環境への負荷低減など持続可能な社会の実現にも寄与していく。

参 考 文 献

- (1) 立石大輔, ほか: 列車運行管理の高度化を支えるシミュレーション技術, 三菱電機技報, 90, No.9, 525~528 (2016)
- (2) 井上一成, ほか: 銀座線渋谷駅「混雑度の見える化」実証実験, JREA, 63, No.8, 44300~44304 (2020)

鉄道の安全・安心を支える 映像解析技術

Video Content Analysis Technologies Supporting Safety
and Security of Railway

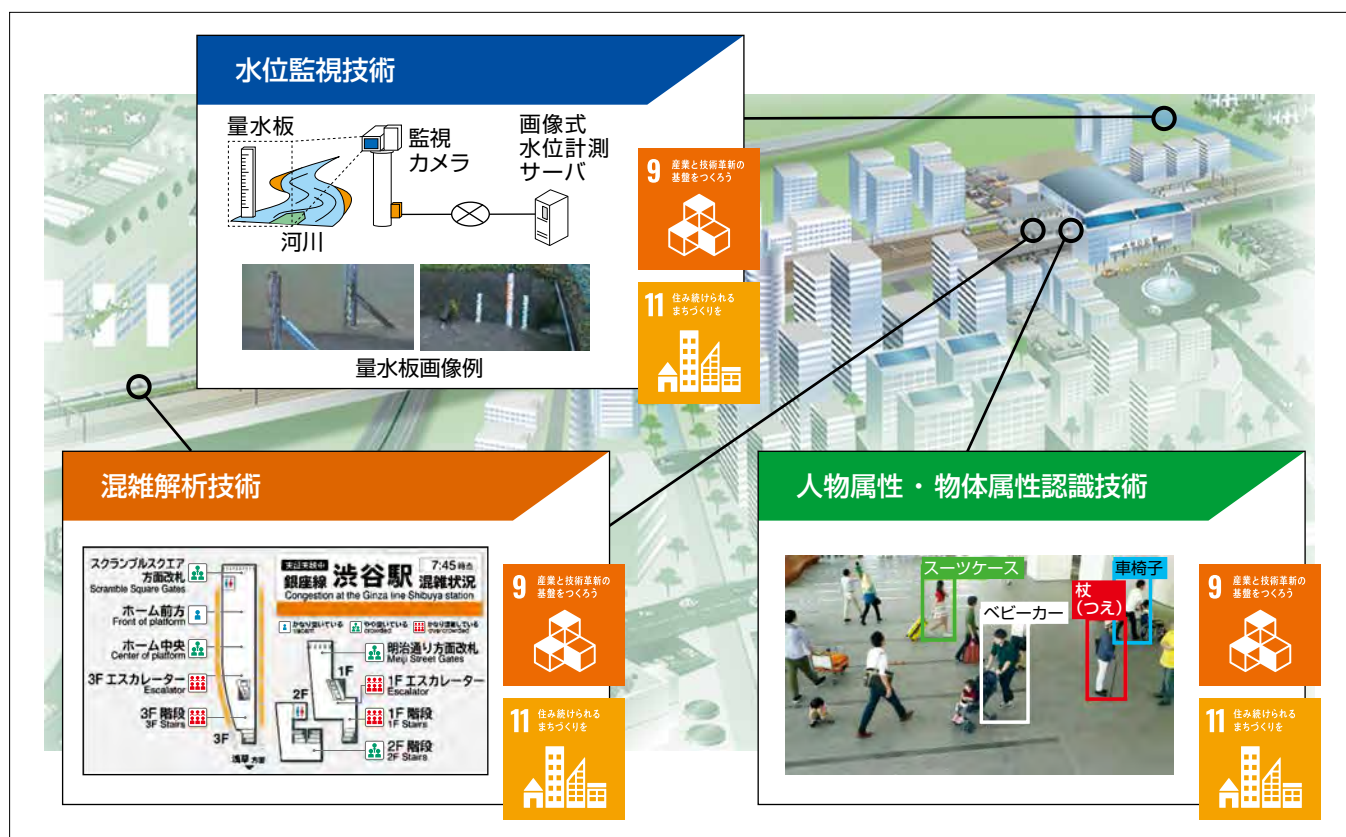
古畑貴司*
Takashi Furuhashi
岸下整明*
Nariaki Kishishita
菅谷元典†
Motonori Sugaya

原田綾子†
Ayako Harada

要 旨

映像解析技術は、ディープラーニング(深層学習)技術を始めとした人工知能(AI)技術の革新と高精細化などの映像技術の進化に伴い、実用化レベルになっており、我々の生活の様々な場面で利用されている。三菱電機でもAIを用いた様々な映像解析技術を研究開発している。鉄道の安全・安心に有効と思われる技術は次の三つである。前景画像と背景画像を比較することで、複数の人物が重なってもそのエリアの人数や混雑度を高い精度で算出する“混雑解析技術”を用いて、人物を正面からとらえる撮影角度で設置される監視カメラでも混雑度の見える化を可能にしている。2020年1～4月には東京地下鉄(株)の銀座線渋谷駅ホーム移設による混雑度の見える化を目的とした実証実験を実施した。新型コロナウイルス問題に伴い、ますま

す社会に求められる技術である。近年増加傾向の豪雨による河川氾濫の被害に対しては、量水板を撮影した監視カメラの映像を画像相関法で解析する“水位監視技術”によって24時間365日の自動監視による氾濫の早期把握を可能にした。駅係員による鉄道利用者サポートの効率化を目的とした“人物属性・物体属性認識技術”は、ディープラーニング技術を用いて、車いす利用者、ベビーカー利用者といった様々な属性のパターン画像をAIに学習させ、従来の機械学習では定義が難しい曖昧な属性や、人が気づけないことの検知を可能にしている。これらの映像解析技術を活用し、鉄道の安全・安心に貢献し、さらに社会情勢や市場ニーズを踏まえた新たな映像解析技術の開発を進めていく。



鉄道の安全・安心を支える映像解析技術

監視カメラ映像を使用した映像解析技術によって鉄道の安全・安心を支える。“混雑解析技術”は駅ホームの混雑度見える化を行い、“水位監視技術”は24時間365日の自動監視による河川氾濫の早期把握が可能である。さらに“人物属性・物体属性認識技術”はディープラーニング技術を用いて駅係員による鉄道利用者サポートの効率化を図る。これらの映像解析技術を活用して鉄道の安全・安心に貢献し、国連SDGs (Sustainable Development Goals)の目標9と目標11が目指す誰もが安心して住み続けられる持続可能な街づくりに貢献する。

1. ま え が き

映像解析技術は、ディープラーニング技術を始めとしたAI技術の革新と高精細化などの映像技術の進化に伴い、我々の生活の身近なところから社会インフラに至るまで様々な場面で利用されている。当社でもAIを用いた様々な映像解析技術を日々研究開発している。

本稿では、鉄道の安全・安心の実現に有効と思われる、“混雑解析技術”、“水位監視技術”、“人物属性・物体属性認識技術”の三つの技術について述べる。

2. 混雑解析技術

鉄道の混雑緩和は、安全性の観点から長年の課題であり、以前から鉄道事業者は、混雑緩和に向けて様々な施策に取り組んでいる。今回、新型コロナウイルス問題に伴い、鉄道利用者の安全の観点から“人との距離を保つ”、“人混みを避ける”意味で、“混雑検知と把握”、そして“鉄道利用者に高精度な混雑情報を発信すること”は、ますます重要な施策になっている。この章では、それらの課題解決の助けになる技術として、カメラ映像から人数や混雑度(人密度)を高精度に計測する混雑解析技術を2020年1～4月に行った実証実験の結果を交えて述べる。

2.1 カメラ映像による混雑解析の課題

カメラ映像から人数や混雑度を計測する技術としては、人検出技術を用いて個々の人物をカウントする方式が一般的である。一方、人物を正面からとらえる撮影角度で設置される監視カメラの映像でこの従来方式を用いると、混雑時は人同士が重なり合ってしまうことによって人物を検出できず、正確に人数を計測できないという課題があった。したがって、監視カメラで混雑解析を行うためには、人物同士が重なり合う映像でも正確な人数や混雑度を計測する映像解析技術が必要である。

2.2 前景抽出に基づく混雑解析技術

2.1節で述べた課題に対して、当社は、映像の前景抽出を利用して映像内の人数や混雑度を計測する技術を開発している。この技術では、あらかじめ撮影した背景画像と対象画像を比較し、前景(背景に存在していない物体領域)を全て人物とみなし、前景の面積から人数を推定する群集モデルを用いて混雑度を計測する。この群集モデルは、人物同士の重なりや見え方を考慮したモデルになっており、混雑時でも正確な混雑度の計測が可能になる。

2.2.1 高精度な前景抽出

前景抽出に用いる背景画像は無人の必要があるため、夜間の営業時間外に撮影した画像を用いる。一方対象画像は、外光や照明の影響で、背景画像とは明るさが異なることが多い。一般的な前景抽出方式である輝度差分方式を用いると、明るさが変化した背景領域を誤って前景領域として抽出するおそれがある。

混雑度を高精度に計測するには、前景を正確に抽出する必要がある。今回、誤検出を低減するため、テクスチャ類似度に基づく前景抽出方式を採用した(図1)。テクスチャ類似度とは、画像内の局所的な濃淡構造(模様)の一致度を評価する尺度である。背景画像と対象画像で濃淡構造が一致していれば、明るさが異なっても類似度が高い値になる。類似度が高い領域を背景、低い領域を前景と判定することで明るさの変化に頑強な前景の抽出を実現している。

2.2.2 群集モデルを用いた人数と混雑度の計測

人物一人当たりが画像内を占める面積を既知の情報として、前景の面積から人数及び混雑度を推定する手法を採用している。混雑度が高くなるにつれ、人物同士の重なりが増加するため、前景面積と人数の関係は線形にはならない。この方式では人物同士の重なりの影響を考慮した前景面積と人数の関係式(以下“群集モデル”という。)を用いる。群集モデルのイメージを図2に示す。各エリアでの群集モデルの構築に当たっては、次の手順で行っている。様々な人数の群集画像を用意し(図2の①)、これらの群集画像の前景抽出結果を生成する。これらの前景抽出結果から前景面積を求めると、人数と前景面積の関係性を示すデータ分布が得られる(図2の②)。

撮影画角内の人数推定には、群集モデルから前景面積を人数に変換し、そこから、推定人数と計測範囲から混雑度を推定する。人物同士の重なりが発生している混雑度の群集画像を用いて群集モデルを作成しておくことで、混雑時

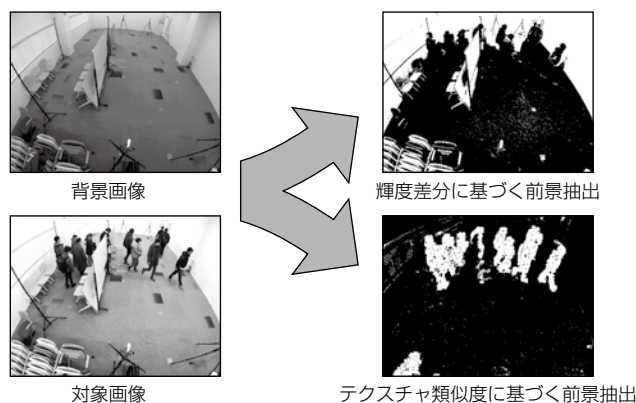


図1. 前景画像抽出結果(白：前景，黒：背景)

① 様々な混雑度(人数)の前景画像を用意



② 人数と前表面積の関係式(群集モデル)を導出

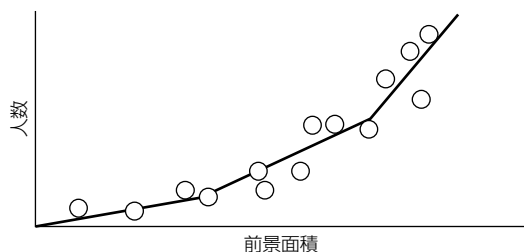


図2. 群集モデルの作成

でも高精度な人数と混雑度の推定を可能にした。この技術によって、混雑時でも駅の監視カメラ映像を用いて85%以上の精度での人数計測を実現した。

2.3 鉄道での実証実験

東京地下鉄(株)と共同で、この混雑解析技術を用いて銀座線渋谷駅の混雑度を計測し、銀座線車両の車内ディスプレイ(以下“トレインビジョン”という。)を用いて、列車内の鉄道利用者に混雑情報を提供する実験を2020年1月23日から同年4月30日までの約3か月間実施した⁽¹⁾(図3)。

混雑度の解析技術の精度評価、混雑情報の旅客案内への有効性の評価を目的にしている。

2.3.1 実証実験のシステム構成

渋谷駅構内の監視カメラ映像から混雑解析装置が混雑度を自動解析し、主要箇所の混雑度を“空いている(0.6人/㎡未満)”, “混雑している(0.6人/㎡以上~1.4人/㎡未満)”, “かなり混雑している(1.4人/㎡以上)”の3段階に分けて、リアルタイムな情報を配信している。図4は、実証実験のシステム構成を示す。なお、実証実験に当たり、監視カメラの映像データは、外部からアクセスが不可能な混雑解析装置で解析し、解析終了後には自動で映像データを削除することで個人情報の保護に万全を期している。

2.3.2 案内方法

スマートフォンのアプリケーションなどを用いた混雑情報を通知する取組みは、様々な鉄道事業者で行われている。アプリケーションはどこでも見ることができる一方、能動的な操作を要するため、鉄道利用者に自主的に確認してもらう必要がある。今回、乗車中に鉄道利用者がより容易に混雑情報を取得できるよう、トレインビジョンへの表示を

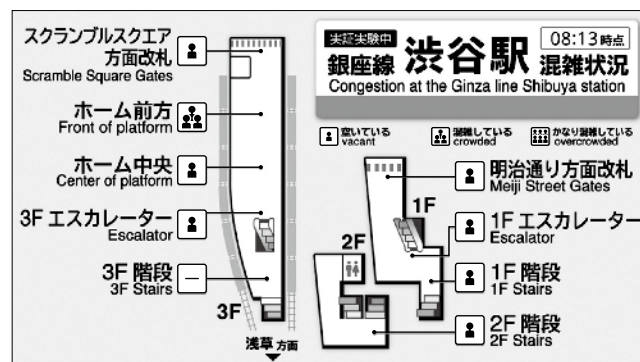


図3. トレインビジョンでの混雑情報表示の例

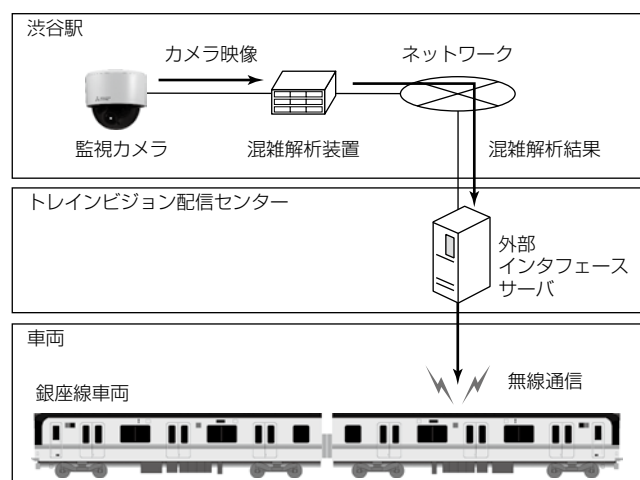


図4. 実証実験のシステム構成

行った。実証実験で乗車中の鉄道利用者が到着駅構内の混雑度を前もって確認することで空いている改札の選択、他路線の利用など行動選択が可能になることを評価している。

2.3.3 結果と考察

駅の既設の監視カメラと混雑解析装置を用いた混雑度情報、案内した“空いている”, “混雑している”, “かなり混雑している”という情報は実際の駅の混雑度に即した情報になっていることをサンプル画像から目視計測した人数の真値と照らし合わせる形で確認した。これによって、新たに混雑解析専用のカメラを設置することなく設備・工事コストを抑えて混雑度を正確に把握し、鉄道利用者に混雑情報として提供することが可能になった。また、鉄道利用者に行ったアンケートでは、混雑情報が誘導に有効である一方、鉄道利用者全てに情報が行きわたるように、アプリケーション、トレインビジョンだけでなく、商業施設や改札前サイネージ、音声放送など複数のチャネルで案内する必要があることが示唆されている。今後、混雑解析技術の列車内適用、高精度な混雑予測技術の開発などを進めながら、利用目的などで鉄道利用者の行動パターンを整理し、複数手段での適切な案内方法を検討していく。

3. 水位監視技術

令和元年の台風19号が鉄道網にもたらした水害による甚大な被害は記憶に新しい。従来の水位監視では、フロート式や水圧式等の水と接触する水位センサを使用していたが、洪水時等で水位観測所局舎の倒壊や水位計の流出が懸念される。年々激甚化する水害に備え、人手に頼らず、24時間365日にわたって水位を監視できるよう、当社では、河川から比較的離れた場所に設置した監視カメラの映像からAIを用いて水位の変化を計測する画像式水位計測アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムを適用して監視員の業務負担を増やすことなく河川の増水を監視する水位観測システムの提供が可能である(図5)。今回、画像式水位計測アルゴリズム及び評価実験結果について述べる。

3.1 画像式水位計測アルゴリズム

河川の最低水位時に撮影した量水板の画像(基準画像)と水位計測対象画像との相関によって水面の位置を検出する。

3.1.1 方式

河川に設置されている水位の目視計測を目的とした量水板を被写体として、基準画像(量水板全体が水面上に露出した画像)と計測対象画像とを画像相関によって比較し、量水板上の水面の位置を検出する。画像相関法による画像の比較は、明度やコントラストの違い及び局所的な不一致に対して有効であり、環境の変化に頑強な水位計測の実現を可能にする。

3.1.2 処理フロー

画像式水位計測アルゴリズムの処理フローは次のとおりである(図6)。

- (1) 最低水位時(量水板が全て水面上に露出)の映像から量水板を示す領域(テンプレート)を設定し、水位高(上端/下端)を入力することで基準画像定義を行う(図6(a), 図7(a))。

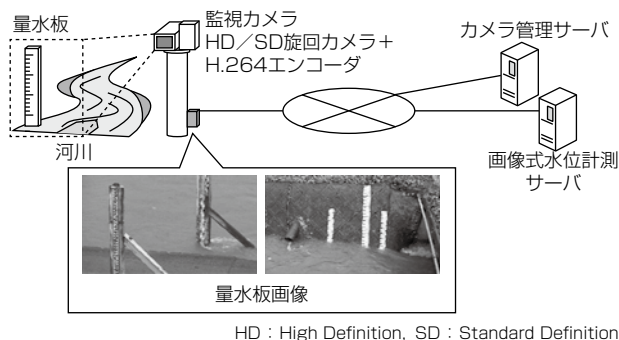
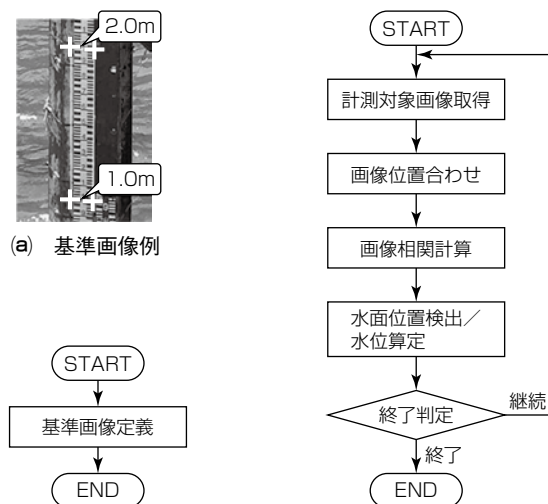


図5. 画像式水位計測システムの適用例

- (2) 計測対象画像(1 fps(frames per second))を取得する(図7(b))。
- (3) 基準画像と計測対象画像間の最大数十画素のずれ(カメラ位置決め精度, カメラ設置ボールの揺れ等)をテンプレートマッチングによって補正する(図7(c))。
- (4) 計測対象画像の量水板と量水板テンプレートの間で小領域ごとの相関係数を求め、マップ化する(図7(d))。
- (5) 相関係数マップを縦方向にスキャンして勾配を求め、(図7(e))勾配の最大位置を水面上領域と水面下領域の境界(水面の座標)として検出する(図7(f))。
- (6) 検出した水面の座標から量水板目盛りに対する平均位置を決定して量水板、テンプレート定義時に入力した画像座標と水位高値から水位に換算する(図7(g))。

3.2 評価実験

カメラ映像はフルHD(1920×1080)を使用した。2地点の量水板によって、設置条件や天候の異なる24時間の映像を評価対象とした(図8)。画像ごとの水位計測結果と目



(a) 基準画像例 (b) 基準画像定義処理フロー (c) 水位計測処理フロー

図6. 画像式水位計測アルゴリズムの処理フロー(2)

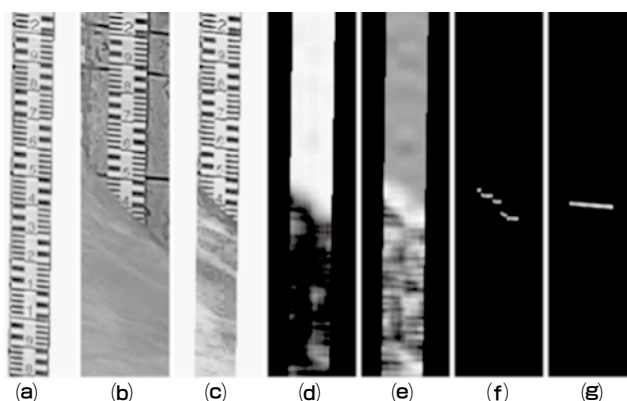
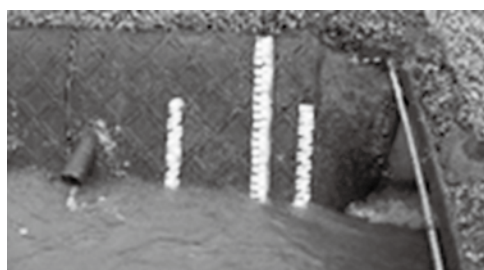


図7. アルゴリズムの動作結果の例(2)

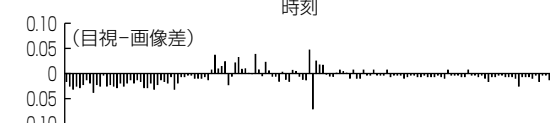
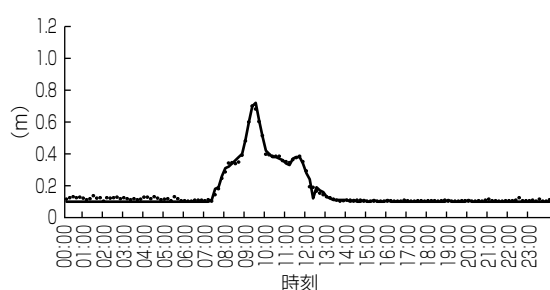
視による水位読み取り値とを比較したグラフを図9に示す。目視読み取り値を真値とした場合の処理結果のRMSE(二乗平均平方根誤差)は地点Aでは1.6cm, 地点Bでは1.7cmであった。鉄道事業者の効率的な河川監視と早期対策への貢献が期待できる。



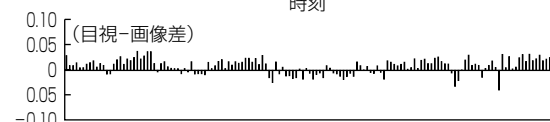
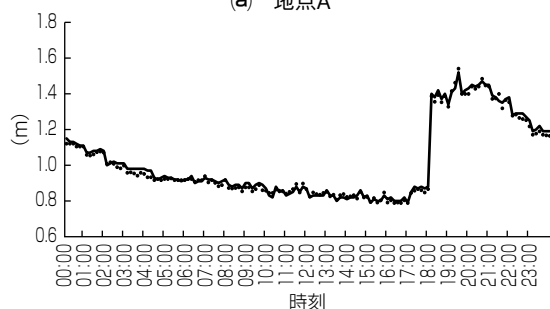
(a) 地点A



(b) 地点B

図8. 計測地点の撮影映像例⁽²⁾

(a) 地点A



(b) 地点B

図9. 計測結果⁽²⁾

4. 人物属性・物体属性認識技術

労働力人口が減少する中、AIの発達に伴い、技術革新が著しい機械警備は、様々な場面で利用され始めている。当社では、AIを用いて、監視カメラの映像から、その人物の属性を認識する“人物属性認識技術”と物体そのものの属性を認識する“物体属性認識技術”を開発した。今回、これらの技術を述べるとともに、鉄道の運用での技術適用(図10)への期待について述べる。

4.1 人物属性認識技術

4.1.1 ディープラーニング技術

従来の機械学習を活用した映像解析、例えば顔認証ではスキルのある技術者が顔の特徴量である目の中心や唇の端などの位置や距離から計算される値を定義し、それを検出する複雑なアルゴリズムを作りこむ必要があったが、ディープラーニング技術で画像認識を行うことによって、これまで人が定義していた特徴をAIがつかむことができる。

4.1.2 学習プロセスと精度

ディープラーニング技術で重要になる学習プロセスでは、どのような画像をどれほど用意できるかが重要であり、その学習後の検知結果を評価してチューニングするといったプロセスが検知結果の精度に大きな影響を与える。例えば、ベビーカーを押している人物を検知する場合、OK画像(ベビーカーを押している人物)とNG画像(ベビーカーを押していない人物)を大量に与えると、AIは2種類の画像群の異なる箇所を自動的に計算し、ベビーカーを押している人物の画像だけに現れる特徴を抽出してOK/NGを判定する。図11は学習データ数と精度及び人物画像のどこに特徴があるかを可視化したものである。図の左下の人物画像に対し、学習データが増加するほど対象物の特徴を

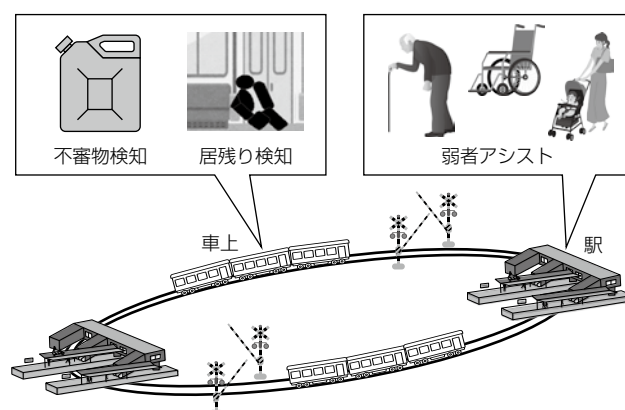


図10. 鉄道の運用での技術適用の例

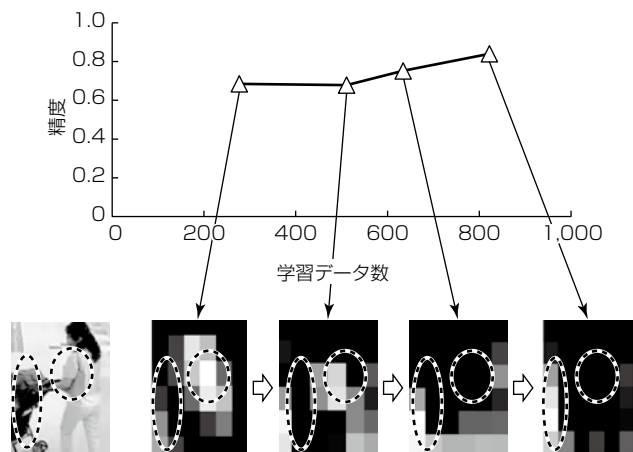


図11. 学習データ数による精度，特徴抽出の可視化

正しくとらえていることが分かる(白いほど強い特徴として判定する)。このデータを見ながら精度を確認して不足するデータを集める。

4.1.3 鉄道駅への適用例

当社のAI技術“Maisart”を活用した映像解析ソリューション“kizkia”⁽³⁾は、人物属性認識技術によって人物属性検知、置き去られた物体等の検知機能を備えており、従来の機械学習では定義が難しい曖昧な属性や、人が気づけないことの検知を可能にしている。kizkiaを用いて図12に示すようなシステムを構成することによって、駅構内で車いすや白杖(はくじょう)を使用する障がいのある人物をリアルタイムに検知することが可能である(図13)。検知し

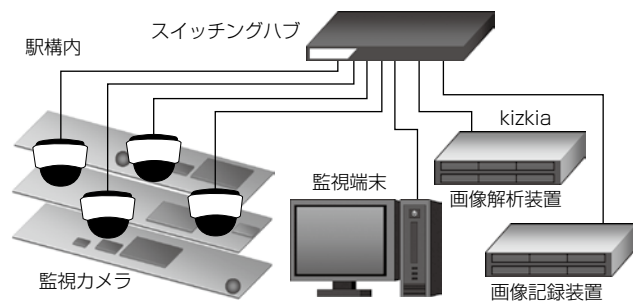


図12. 映像解析ソリューションkizkiaの駅システム構成例

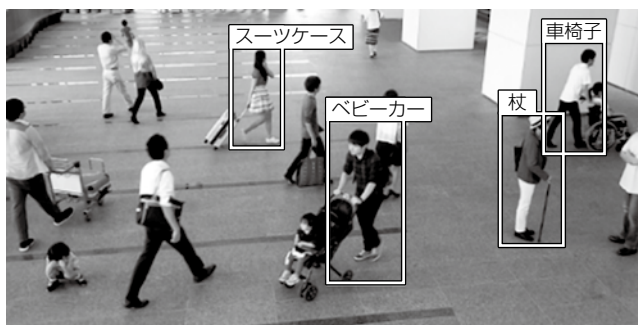


図13. 映像解析ソリューションkizkiaの検知例

た結果を駅係員に通知して事故を未然に防ぐなど、サポートが必要な鉄道利用者への早急な対応が可能な安全・安心を実現する監視カメラシステムを提供する。

4.2 物体属性認識技術

映像解析ソリューションkizkiaで使用しているMaisartで、物体の位置検知と識別を同時に学習することで高速かつ高精度な物体属性検知も可能である。従来技術では物体の領域ごとにニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network: CNN)で特徴量抽出するため処理時間が長かったが、シングルショットと呼ばれる手法によって物体の位置検知と識別を同時に学習して短時間処理を可能とするとともに、特徴量の抽出範囲を任意に変えることで、同じ画像に映りこむ大きさの異なる複数の物体を一つのCNNで検知可能にした。その結果複数の検知対象に対してCPUの高スペック化を抑え、解析装置の小型化を実現している。この技術を使用した画像解析装置を車両に設置し、居残り検知や不審物検知を行うことで、乗務員支援として終車点検の自動化、避難時の取り残し防止、不審な放置物の検知を実現する。

5. む す び

これまで、監視カメラを用いたセキュリティシステムはライブ映像監視及び記録映像の事後確認による“そのときと近い過去を見る”だけであったが、今後は映像解析技術を用いて人の目では気づけなかった事象をリアルタイムで検知し、リアルタイムに対応する等セキュリティ用途に限定されない応用展開が期待されている。加えて新型コロナウイルスの影響を契機に、3密回避等、混雑解析技術がもたらす混雑情報の提供価値は相対的に向上していくと考える。次に、水位監視技術は、気候変動によって水害が激甚化している日本で、効率的な河川監視と早期対策の面で安全な鉄道運行や水害の最小化に役立っていくと考える。人物属性・物体属性認識技術は、労働力人口が減少していく中、鉄道事業者のサポート、危険な事象に対する監視業務の効率化を実現し、誰もが安心して移動できる鉄道に貢献する。これらの映像解析技術を活用して鉄道の安全・安心に貢献し、さらに社会情勢や市場ニーズを踏まえた新たな映像解析技術の開発を進め、誰もが安心して住み続けられる持続可能な街づくりの実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 井上一成，ほか：銀座線渋谷駅「混雑度見える化」実証実験，JREA，63，No.8，44300～44304（2020）
- (2) 服部亮史，ほか：画像処理を活用した水位観測システムの実現，三菱電機技報，91，No.6，333～336（2017）
- (3) 中尾堯理，ほか：AIを活用した映像解析ソリューション“kizkia”，三菱電機技報，92，No.8，442～446（2018）

清水英弘*
Hidehiro Shimizu
西澤浩樹*
Hiroki Nishizawa
上杉知弘†
Tomohiro Uesugi

持続可能な社会での駅への取組み

Initiatives for Stations in Sustainable Society

要 旨

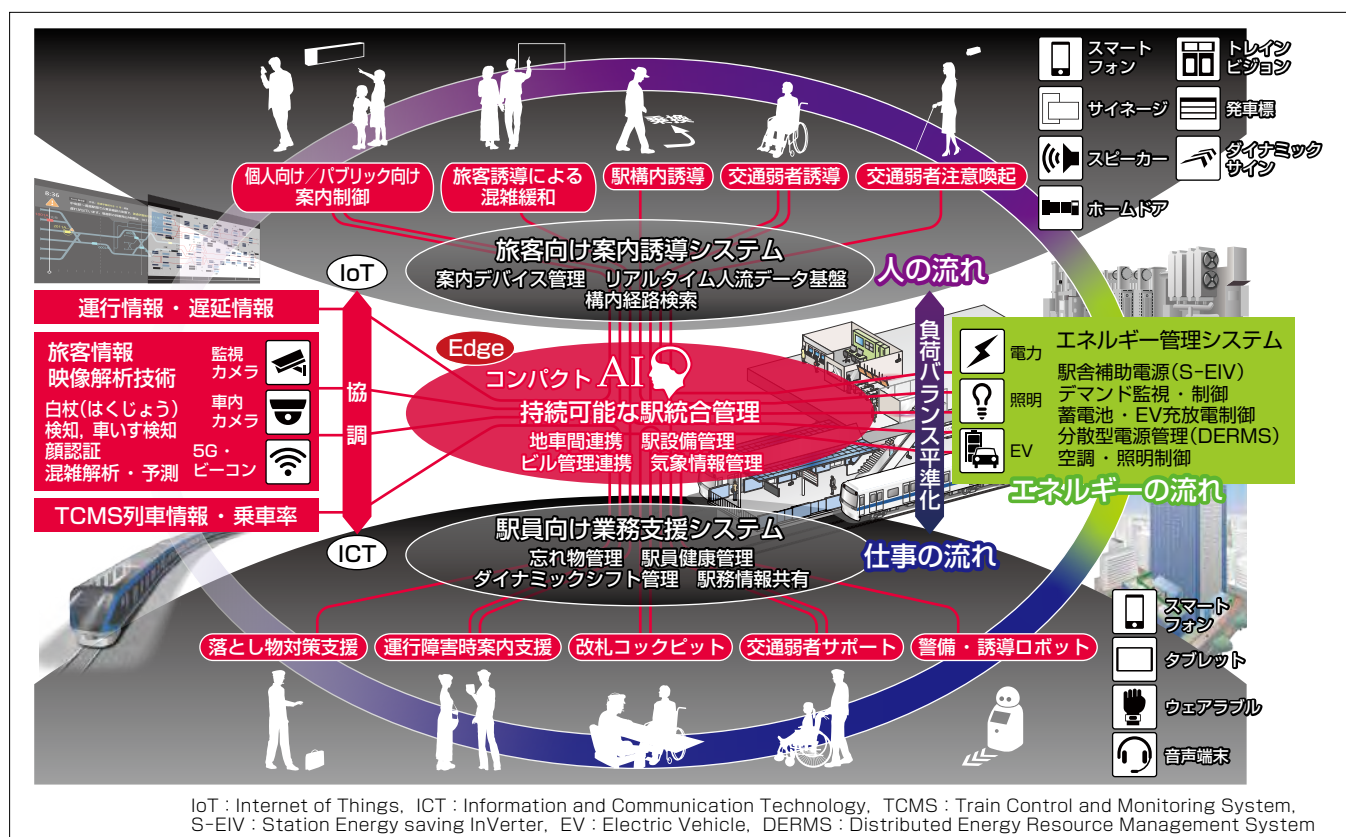
駅は交通結節点として、人間社会の営みの要になる空間である。我々は大災害やパンデミックを経験し、エネルギーや人の流れが経済の流れであることを学んだ。列車や駅設備がエネルギーを使って稼働し、駅の仕事が人の流れを生み、そして経済が動いていく。

三菱電機は、駅に関わる三つの要素“エネルギーの流れ”“人の流れ”“仕事の流れ”を統合的に平準化する技術の研究開発に取り組んでいる。

駅のエネルギーの流れに関しては、増加する駅舎の電力需要について省エネルギー化が大きな課題になっている。当社はエネルギーの流れを制御し、再生エネルギーの活用と駅のデマンド監視・制御によって電力量のピークカットを実現するエネルギー管理システムを実用化した。

駅の人の流れに関しては、当社はホームドアや監視カメラ、案内表示器など、安全安心のための設備を扱っている。最近では人工知能(AI)を使った映像解析技術によって、監視カメラの映像から障がい者などの交通弱者を検知して移動のサポートを充実化し、また、混雑を検知して旅客に提示することで混雑緩和を図る取組みを行っている。

駅の仕事の流れに関しては、社会問題となっている深刻な労働力不足を補うため自動化によって将来変化する業務に対応するために、従来にはない働き方が求められることが予想される。当社は、駅のエネルギーと人と仕事それぞれの流れを円滑にするとともに、相関関係に基づいて統合的に平準化する技術開発で国連SDGs(Sustainable Development Goals)が目指す持続可能な社会の実現に貢献していく。



持続可能な社会での駅の将来構想～エネルギーと人の流れと仕事の負荷バランスを統合的に平準化～

人の流れの平準化については、映像解析等のセンシングと駅の案内設備とを連携して、個々の旅客の目的と駅・沿線全体の混雑とのバランスを最適に保つ。仕事の流れの平準化については、業務の自動化と遠隔支援、駅員や委託業者の配置を動的に変えるシフト管理によって、平常時・異常時の負荷を分配する。エネルギーの流れの平準化については、電力消費のデマンド制御と蓄電池制御によるピークシフトに加え、人と仕事の流れを考慮してきめ細かな均一化を行う。

1. ま え が き

駅は、効率的な移動手段である鉄道に乗り降りする交通結節点として、様々な人が行き交い、鉄道と街の境目で業務がなされる、生活や経済などの人間社会の営みの要になる空間である。当社は鉄道事業分野でのサプライヤーとして、車両用電機品や変電設備以外にも、駅に多くの製品とソリューションを提供している。

本稿では駅の三つの要素“エネルギーの流れ”“人の流れ”“仕事の流れ”について当社の取組みと将来の構想を述べる。

2. 駅 の 進 化

駅は、生活様式や価値観の変化と技術革新によって時代とともに絶えず進化し続けている。首都圏の通勤ラッシュは今も心地よいものではないが、高度経済成長期のそれは文字通りの通勤地獄であった。火災報知器のような発車ベルにせかされてホームに駆け込んでも、満員の電車に乗り切らない旅客を各扉に3～4人の押し屋がサウナのような車内に押し込む風景に出くわす。駅には車内に取り残された靴の代わりの貸しサンダルもあった。ホームの灰皿やたんづば、和式便所、伝言板に続いて水飲み場もひっそりと姿を消した。代わりに、ペットボトルの飲料水が構内の自販機で売られ、ホームには空調の効いた待合室にタバコの煙はなく、発車メロディに合わせて閉まるホームドアが不注意な旅客を危険から守っている。パタパタと回るフラップ式の列車案内板もカラフルなLEDで多言語表示になり、構内の柱のデジタルサイネージはさながら量販店のテレビ売場のようだ。最大の進化は、小気味よい鉄(はさみ)のリズムに代わり、電子音と電動フラッパーゲートで不意を突く自動改札機とICカードの登場で、切符切りとキセルも死語になりつつある。このように駅の進化は電化によることも多く、更にデジタル化が進みつつある。

これまで鉄道は社会インフラとして日本の大量輸送を支え、新しい技術も取り入れながら利便性と快適さを向上させてきた。これからの鉄道は地球環境や人口減少の社会問題に東日本大震災やコロナ禍の経験を経て、電力も人の移動も仕事もそれぞれで負荷軽減を図りつつ、さらに全体最適で負荷分散して平準化にシフトすることが求められるであろう。当社は、駅で“エネルギーの流れ”を制御し、確実な電力供給から省エネルギーに発展させてきた。また“人の流れ”を案内装置で促し、安全安心の上に交通弱者のサポートを充実化している。そして将来更に駅業務の自動化が進み“仕事の流れ”が変化することが予想される中、働き方の変革にも技術で貢献することを目指している。

3. 駅のエネルギーの流れ

3.1 回生エネルギーの活用

当社は、草創期から鉄道向けに地上電気設備を納入し、常に新しい技術を実用化して業界をけん引してきた。電車が減速する際に発生する回生エネルギーを駅舎の電力として活用する“駅舎補助電源装置(S-EIV)”を提供している(図1)。この装置は、車両間で融通できずに摩擦熱として捨てられていた余剰回生エネルギーを直流から交流電力に変換して駅舎電圧と協調しながら駅に電力を供給するもので、回路としては、共振型高周波インバータと商用周波インバータから構成され、商用周波インバータにはSiC(シリコンカーバイド)パワーモジュールを採用し、高効率化を実現した。2016年には小型高機能タイプを製品化し、続いて蓄電タイプ、2017年には400V出力機をラインアップに加え、多くの鉄道事業者へ納入してきた。

3.2 駅デマンド監視・制御

駅デマンド監視・制御は、駅の主要設備(空調、LED照明等)の使用電力・電力量を監視し、快適性と省エネルギーを実現する。駅のデマンド実績と瞬時電力を監視し、

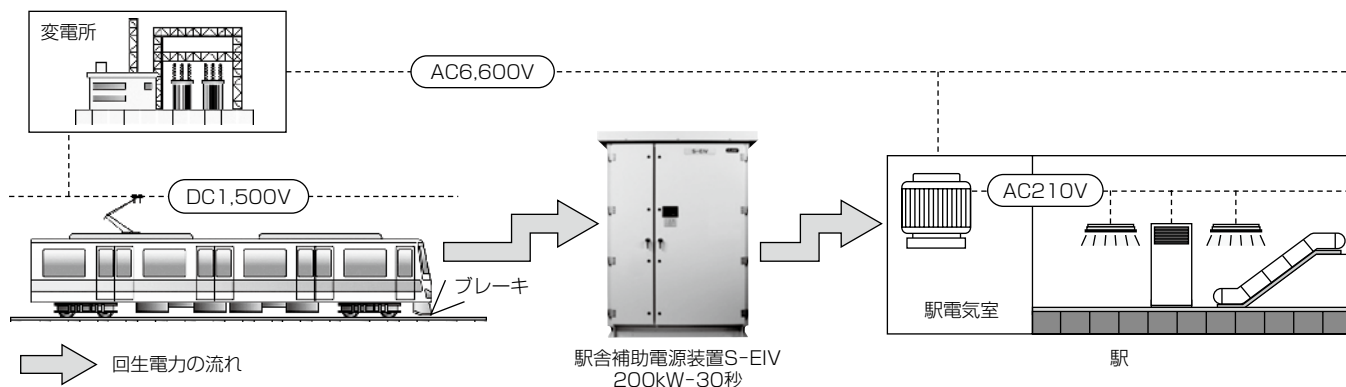


図1 S-EIVによる余剰回生エネルギーフロー

省エネルギーのレベルに従って、窓口、待合室、トイレ、休憩室、機器室、倉庫等のエリアの電気設備の制御を行う。また、エリアごとに日報・月報・年報の集計、グラフの見える化を行い、電力消費傾向を把握できる。

さらに、複数駅の協調制御によって、各駅デマンド実績値を収集し、全体のデマンド監視・制御／瞬時電力監視・制御を実施し、各駅の需要予測から電力コストが最小になる需給計画を立案し、蓄電池の充放電を制御することで対象区画全体のピークカットを実現することが可能であり(図2)、東日本旅客鉄道株の中央線3駅に納入した。

3.3 分散型電源管理システム(DERMS)

最近の試みとして、東日本旅客鉄道株が立ち上げたモビリティ変革コンソーシアムに参画し、太陽光発電やEV／電気バスなどの分散型電源を駅の高圧配電系統に接続することを想定したエネルギーマネジメントのシミュレーション

実験を行った。将来増加が予想されるEVと蓄電池を同時に充電することで配電線に大きな負荷(配電線過負荷)がかかり、また天候の影響で太陽光発電の発電量が大きく変わって配電線の電圧も大きく変動(電圧逸脱)することが予想される。シミュレーションでは具体的な駅をモデルとして、DERMS(Distributed Energy Resource Management System)シミュレータ(図3)によって設備の増強を最小限に抑えることを確認した(表1)。

表1. DERMSシミュレーションの結果

想定年	DERMS	最大電流値 過負荷発生有無	最大電圧降下幅 許容値超過	設備増強要否
2030年	なし	なし	許容値超過	電圧制御機器
	あり	なし	なし	不要
2040年	なし	過負荷発生 (バンク・配電線)	許容値超過	バンク増強 電線太線化 電圧制御機器
	あり	なし	なし	電線太線化

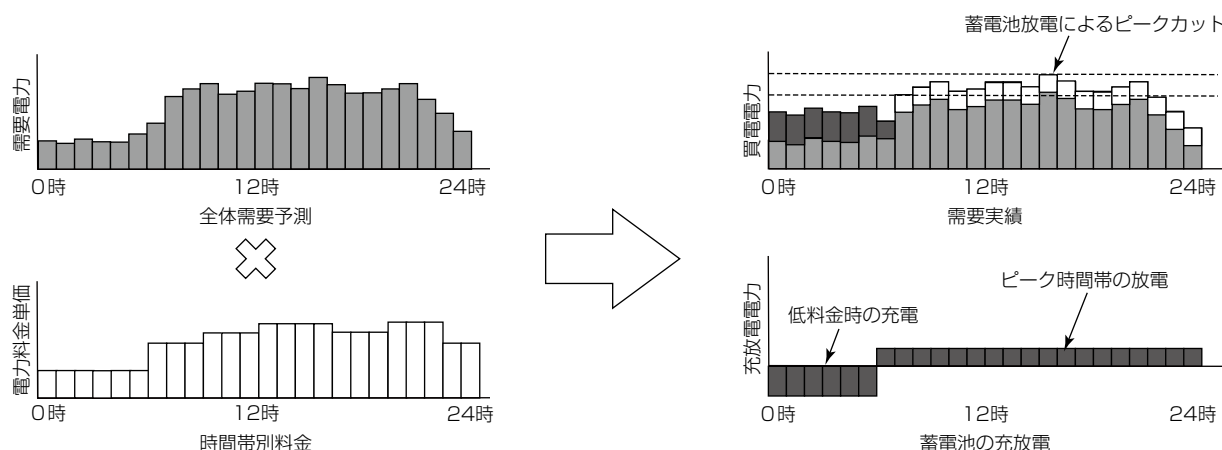
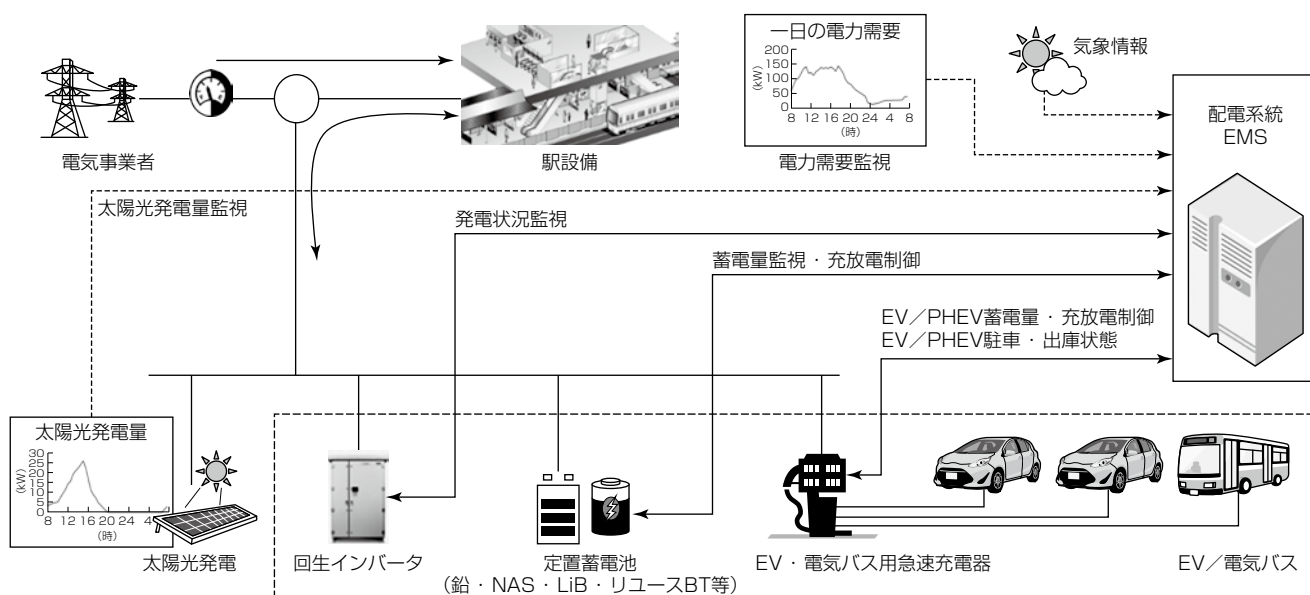


図2. コスト最小限ピークカットのイメージ



EMS : Energy Management System, PHEV : Plug-in Hybrid Electric Vehicle, NAS : ナトリウム硫黄, LiB : Lithium-ion Battery, BT : BaTtery

図3. DERMSの構成

4. 駅の人の流れ

4.1 混雑予測技術

当社は、駅の中の人の流れを安全に、そしてスムーズにするための駅設備を多くそろえている。バリアフリーで普及が進んだエレベーター、ホーム上から線路への転落や駆け込み乗車を防止する3Dセンサ付きホームドア、列車への乗り降りを見守って異常や防犯をリアルタイムに遠隔から又は後から確認できる監視カメラ、列車の行き先や運行情報を知らせる旅客案内表示システムやフルカラーLED発車標などがある。

最近では、AI技術のディープラーニング(深層学習)を用いて監視カメラの映像から車椅子やベビーカーを検知し、注意喚起に役立てる映像解析ソリューション“kizkia”を実用化した。また、今特集号の別稿で述べている映像解析技術による混雑解析の結果をヒートマップ等で可視化して旅客に提示することで、駅の混雑の平準化を促す実験も行っている。更に発展させて監視カメラ配置と人の動きベクトルから監視カメラの死角エリアの混雑度を補間する技術や、より空間的・時間的に離散した人流をフロアフィールドモデルに従って推定するマルチエージェントシミュレーション(MAS)(図4)と列車の乗車率を使って、リアルタイムに混雑を予測する技術の研究にも取り組んでいる。

4.2 ダイナミックサイン

駅の中の案内掲示は、改札付近やコンコースの柱やホーム中央に総合案内が、天井から下がる表示板に周囲の個別案内が掲示されている。マナー喚起や広告も含めて駅の案内

内情報は飽和状態である。旅客が主体的に情報を求める案内情報に対し、事業者側が旅客に行動を促す注意や誘導は、より直感的に伝える必要がある。当社は、床面の空きスペースにプロジェクションによる動的案内(ダイナミックサイン)を表示して旅客を誘導する実証実験を複数の駅で実施した。設置が容易なプロジェクタ内蔵の筐体(きょうたい)“てらすガイド”を駅構内に置き、文字や矢印、ピクトグラムをアニメーション表示することで視認性を向上させるもので、アニメーションの動く速度や切替え間隔など人間工学的要件を考慮してダイナミックサインを作成した(図5)。2018年の国家プロジェクトでJR武蔵境駅で行った実験(注1)では、路線の乗換えで駅員への問合せが減ることが確認できた(図6)。

ダイナミックサインは、前記の映像解析技術と組み合わせることによって混雑状況などの周囲の状況に合わせた誘導に適している。タイミングと視認性で効果的な誘導によって業務負荷軽減と駅構内混雑の平準化が期待できる。

(注1) 経済産業省平成30年度省エネルギー等に関する国際標準の獲得・普及促進事業の一部として「ダイナミック・サイニングに関する国際標準化(一般財団法人 日本規格協会)」プロジェクトで実施した。



図5. 改札外のダイナミックサイン

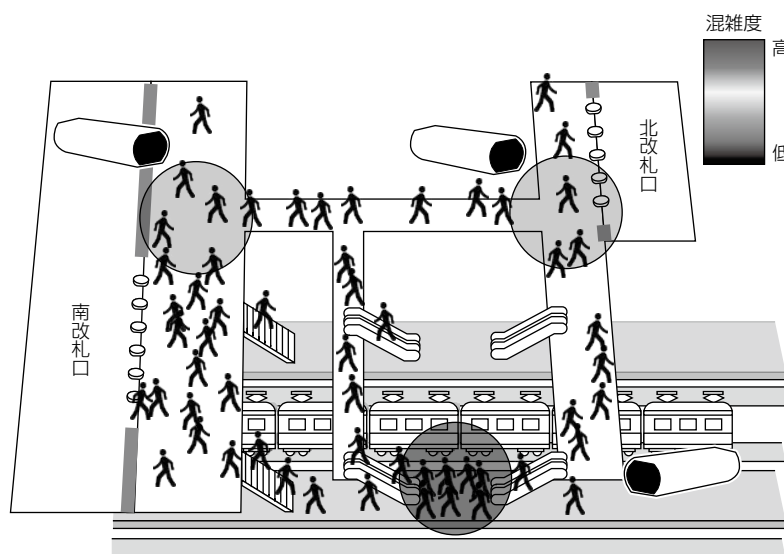


図4. 駅のマルチエージェントシミュレーションイメージ

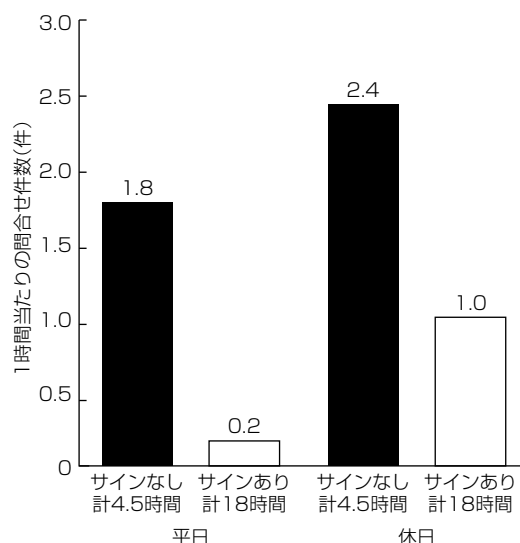


図6. サイン有無による時間当たりの問合せ数の変化

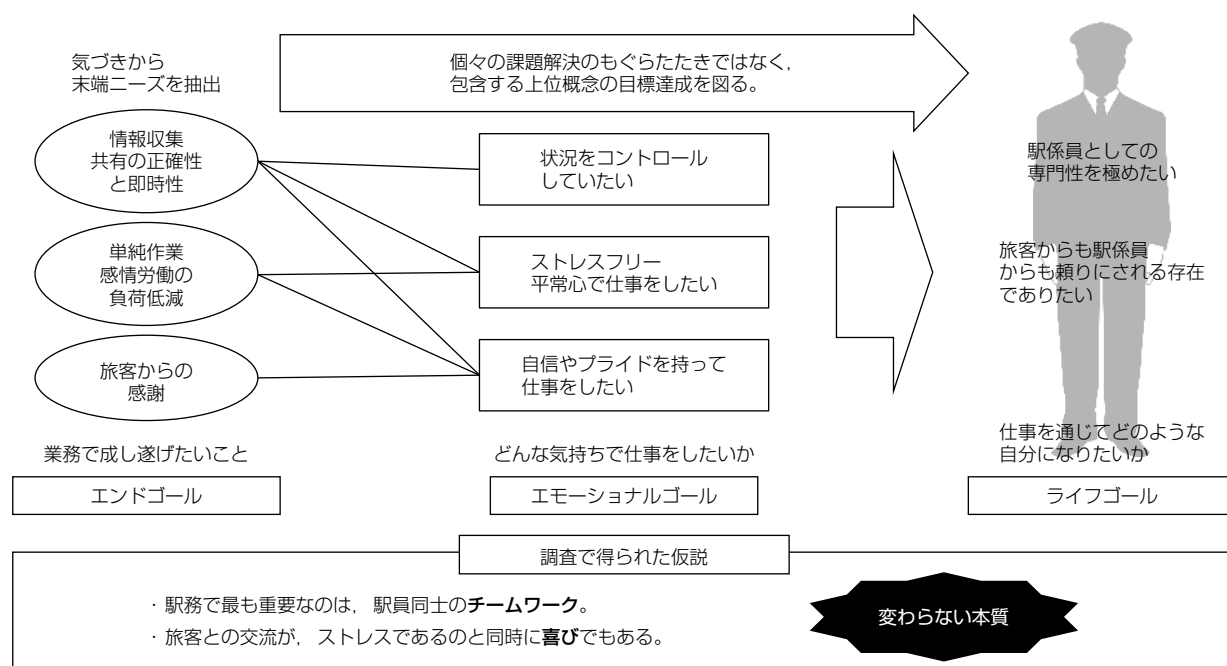


図7. ヒアリング調査による駅員のゴール

5. 将来の駅の仕事の流れ

電化が進んで環境にも配慮した駅は、この先さらにどう進化していくだろう。旅客の立場では、乗換えや待ち時間や人混み等、様々なストレスが解消されて街と駅の境を意識しない、よりシームレスな駅になることを期待している。当社は、将来の新しい駅ソリューションを創造する活動の一環で、多くの鉄道事業者にヒアリングを行った(図7)。最後にそこで得られた課題と気づきについて述べる。

駅の業務には、繰り返される単純な問合わせ対応や、時間拘束の長い車椅子介助、複雑な払戻しや、旅客による暴力、早朝・深夜勤務等の様々な課題がある。その根本の原因には、労働力人口の減少に輪をかけて駅の仕事は人気がなく人手不足が加速しているとの嘆きが聞かれ、それゆえ、技術による自動化・効率化への期待が大きかった。同時に、自動化には幾つかの落とし穴があることも分かった。自動化によってサービスが低下しないよう注意を払うが、自動化・効率化によって新たな仕事を生んでしまうこともある。トラブル対応のため自動改札に付ききりの見張り番や、システムが変わるたびに操作や故障対応を覚え直し、誤検知の確認や、AI学習のためのノウハウ入力も新しい仕事である。また、自動化から取り残された仕事を少人数でこなさなければならず、緊急時に自動化が機能しないと慣れない仕事に対応できないこともある。

一方、ヒアリングしたどの事業者も現場で働く人は一様

に、旅客サービスに真剣に取り組んで旅客の役に立つことをモチベーションにしていることも分かった。あるベテランの駅員が、自動改札で仕事は楽になったが顧客の顔が分からなくなったと眩(つぶや)いたのが印象に残る。彼が誇りを持って自らを鉄道マンと呼ぶのも、羨ましく思った。

人口減少の社会問題が迫る日本で、駅は従来の価値を維持しながら、将来にわたって業務の自動化・効率化を進めるとともに、業務の統廃合、遠隔からの接客対応、外部委託業者の活用や、元気なOBの活躍なども取り入れ、それらがダイナミックに連携する仕事の流れを作ることで平常時と異常時の負荷バランスを平準化すると同時に、働きがいもサポートすることが重要と考える。

6. む す び

鉄道事業は輸送サービス業から生活サービス業への拡大期にあり、駅は輸送と生活の境に位置する新たな可能性を秘めた結節点である。技術の進歩を積み重ねて駅の姿が変わっても、そこには人々の日常があり、めぐり合い、すれ違い、旅立ち、帰郷する、人生の大切な舞台であることはこれからも変わらない。当社は、自動化と、自動化で取りこぼされるものを技術で解決して、相関関係にあるエネルギーと人仕事の流れのそれぞれの負荷を軽減し、さらに統合的に平準化を図ることで持続可能な社会にふさわしい駅の実現に貢献していく。

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

菅原徹大*

Tetsuo Sugahara

石田貴仁*

Takahito Ishida

山下良範*

Yoshinori Yamashita

Traction Inverter System with SiC Power Module for Railway Vehicle

要 旨 (1)(2)(3)

2015年に国連総会でSDGs(持続可能な開発目標)が採択された。三菱電機は、これを社会から求められる重要な課題ととらえており、2018年度には、更にSDGsに貢献するため“三つの重点的に取り組むSDGs”を定めた。

- (1) 目標9：産業と技術革新の基盤をつくろう
- (2) 目標11：住み続けられる街づくりを
- (3) 目標13：気候変動に具体的な対策を

これらの目標に関連する技術として鉄道車両用電機品の省エネルギー化技術が挙げられる。当社は2012年2月からハイブリッドSiC(シリコンカーバイド)パワーモジュールを適用した鉄道車両用インバータ装置を世界に先駆けて(注1)東京地下鉄(株)01系営業線での性能評価試験を実施した。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

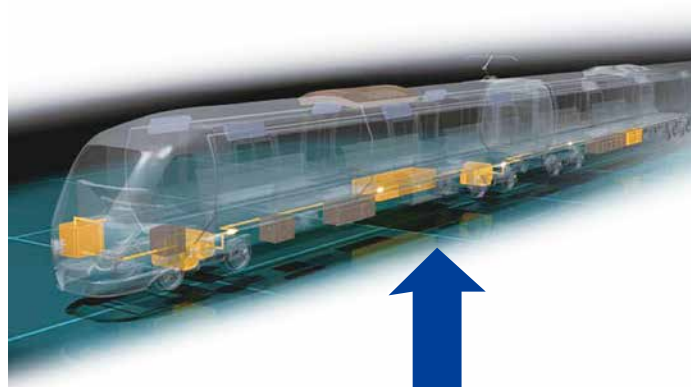
域の拡大、高周波スイッチングによるモータ損失の低減等、主回路システム全体として38.6%の省エネルギー化に寄与した。2016年2月には世界初(注2)のフルSiCパワーモジュールを適用したインバータ装置で40%の省エネルギー化に貢献し、“優秀省エネルギー機器表彰 経済産業大臣賞”を受賞した。今後継続的に、SDGsの省エネルギー目標に対して貢献するため、顧客ごとの様々な主回路システムに柔軟に対応し、より小型軽量化することで、国内・海外問わず、幅広い市場にSiCパワーモジュールを適用したインバータ装置の展開を見据え、並列駆動に適したLV100タイプと呼ばれる最新のフルSiCパワーモジュールを適用したインバータ装置を開発した。

(注1) 2012年9月27日現在、当社調べ

(注2) 2014年4月30日現在、当社調べ



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を製品化し、2014年度末から市場に投入した。従来車両と比較して約40%の省エネルギー効果を実現した。



LV100タイプ フルSiCパワーモジュール



LV100タイプ フルSiCパワーモジュール適用インバータ装置

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

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等、主回路システム全体としての省エネルギーに寄与できる。3.3kV フルSiCパワーモジュールを適用したインバータ装置では従来車両と比較して約40%の省エネルギーを実現した。

1. ま え が き ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

1997年の京都議定書が採択されて以降、様々な地球温暖化防止対策が進められてきた。その後、2018年に国連でSDGsが採択され、更に幅広い視野での社会課題解決が必要になっている。その中で当社は鉄道事業で培った技術で、持続可能で安全・安心・快適な、豊かな社会の実現に取り組んでいる。エネルギーの効率的な利用という面では、当社は2012年2月にハイブリッドSiCパワーモジュール(IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)をSi(シリコン)、ダイオードをSiCにしたパワーモジュール)を適用したインバータ装置を世界に先駆けて東京地下鉄(株)01系営業線での性能評価試験を実施したことを皮切りに、国内・海外向けインバータ装置にSiCの技術を多数適用している。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等、主回路システム全体としての省エネルギーに寄与している。2016年2月には世界初のフルSiCパワーモジュール(MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)・ダイオード共にSiCとしたパワーモジュール)適用した推進制御装置が“優秀省エネルギー機器表彰経済産業大臣賞”を受賞した。

今後継続的に、SDGsの省エネルギー目標に対して貢献するため、顧客ごとの様々な主回路システムに柔軟に対応可能な最新のSiCパワーモジュールを適用して、より小型軽量化したインバータ装置を開発した。

近年、パワーモジュールは並列駆動に適したLV100タイプのパッケージが世界標準になっている。パワーモジュールを開発・製造するパワーモジュールメーカー各社はLV100タイプのSiパワーモジュールを製品展開しているが、当社は世界で初めて^(注3)LV100タイプのフルSiCパワーモジュールを製品化し、Siパワーモジュールに比べてスイッチング損失を約80%低減した。これによって主回路システム全体としての省エネルギーに寄与することはもとより、世界標準パッケージ適用によって、インバータ装置の小型軽量化を実現でき、多様な鉄道車両用インバータ装置の構成・容量に対して最適な設計ができるようになった。

本稿では、最新の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特長、並びに実際の営業運用の中で得られた省エネルギー効果について述べる。

(注3) 2017年5月11日現在、当社調べ

2. LV100タイプ フルSiCパワーモジュール適用インバータ装置

2.1 インバータ装置

LV100タイプ フルSiCパワーモジュール適用インバータ装置の主要諸元を表1、外観を図1に示す。国内の在来線向けシステムを想定し、インバータ装置1台で最大220kWの誘導電動機を4台並列駆動する仕様になっている。

インバータ装置は断流器回路・パワーユニット・ゲート制御装置から構成されているが、LV100タイプのSiCパワーモジュールを適用することで、冷却器の小型化、フィルタコンデンサ・ラミネートブスバー等、SiCパワーモジュールとともに構成されるパワーユニットの高密度実装化を実現することで、従来のSiパワーモジュール適用インバータ装置に対して体積を約60%、質量を約50%低減できた。

2.2 LV100タイプ フルSiCパワーモジュールの特長⁽⁴⁾

図2にLV100タイプ フルSiCパワーモジュールの回路構成と外観を示す。LV100タイプのパワーモジュールは2レベルインバータの1アーム分の回路から構成されている。一般的なSiパワーモジュールの場合はSi-IGBT、フライホイールがSi-Di(シリコンダイオード)素子で構成されているが、フルSiCパワーモジュールの場合はSiC-MOSFETとSiC-SBDで構成している。

当社LV100タイプ パワーモジュールとしては、フルSiCパワーモジュールだけではなく、フルSiCパワーモジュールと互換性を持ったSiパワーモジュール、ハイブリッドSiCパワーモジュールも製品化しており、鉄道車両

表1. LV100タイプ フルSiCパワーモジュール適用インバータ装置の主要諸元

項目	仕様
入力(架線)電圧	DC1,500V
主回路方式	2レベル方式電圧型PWMインバータ
モータ駆動容量	最大定格220kW×4台
冷却方式	走行風自冷方式

PWM : Pulse Width Modulation

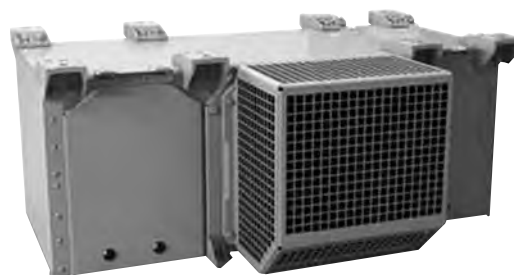


図1. LV100タイプ フルSiCパワーモジュール適用インバータ装置

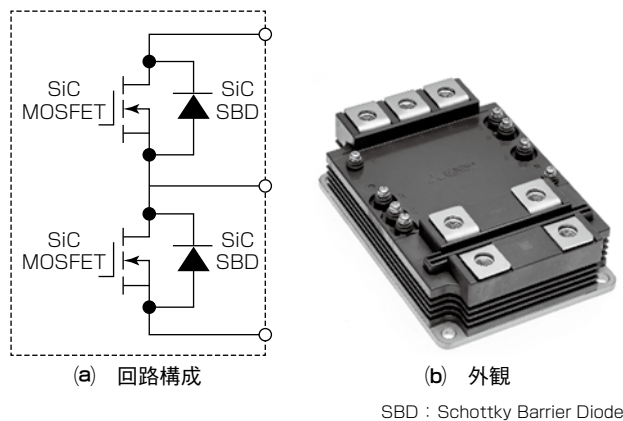


図2. LV100タイプ フルSiCパワーモジュール

表2. LV100タイプ パワーモジュールの主要諸元		
モジュール種類	Siパワーモジュール	フルSiCパワーモジュール
ドレイン・ソース間電圧	3,300V	3,300V
ドレイン電流	600A	750A
最大ジャンクション温度	150℃	175℃
スイッチング部	Si-IGBT	SiC-MOSFET
ダイオード部	Si-Di	SiC-SBD
外形寸法	100×140×40(mm)	100×140×40(mm)

の要求仕様に応じて、最適な素子を使用できる。

また、LV100タイプ パワーモジュールは並列駆動を容易にする端子配列になっており、鉄道車両の要求仕様に応じて並列数を変えることで最適化を図ることができる特長を持っている。

表2にLV100タイプSiパワーモジュール、及びLV100タイプ フルSiCパワーモジュールの主要諸元を示す。フルSiCパワーモジュールはSiパワーモジュールと比較し、電流量25%、ジャンクション温度許容値約16%増加、かつスイッチング損失80%低減を実現した。これによって、Siパワーモジュールよりも少ない素子並列数で同容量のモータを駆動でき、インバータ装置の小型軽量化に寄与している。

3. 小田急5000形への適用事例

当社は2014年に運用開始した小田急電鉄(株)(以下、“小田急”という。)1000形リニューアル車向けに世界初となる3.3kVフルSiCパワーモジュール適用インバータ装置を納入し、省エネルギー効果を実証した。2016年2月には小田急と共同で“優秀省エネルギー機器表彰 経済産業大臣賞”を受賞した。

その後、2019年には小田急5000形向けに、2章で述べたLV100タイプ フルSiCパワーモジュールを適用したインバータ装置を納入した。この章では5000形向けLV100タイプ フルSiCパワーモジュール適用インバータ装置の適用事例を中心に述べる。

3.1 搭載システムの諸元

表3に5000形車両と1000形リニューアル車両の諸元を示す。5000形車両は、1000形リニューアル車両と同様の10両編成(5M5T)を適用しており、8000形車両等の置き換えとして新造されている。図3に示すとおり、主回路システムは、VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ装置1台で4台の主電動機を制御する。

図4にVVVFインバータ装置の外観を示す。5000形車両向けインバータ装置は、1000形リニューアル車向けインバータ装置と比較し、体積で約30%、質量で約20%の小型軽量化を実現した。

3.2 本線走行試験結果

小田急本線で5000形向けインバータ装置の性能確認試験を実施した。図5に力行試験走行チャート、図6に回生試験走行チャートを示す。性能確認試験の結果から、力行・ブレーキの加減速度等、各種車両レベルでの評価を実

表3. 小田急車両の諸元		
項目	5000形	1000形リニューアル
電気方式	DC1,500V(架空電車線方式)	
編成(MT比)	10両編成(5M5T)	
軌間	1,067 mm	
最高速度	120 km/h	110km/h
加速度	3.3 km/h/s(250%乗車まで)	
減速度	4.0 km/h/s	
歯車比	6.31	
編成質量	308.7ton/編成	351.8ton/編成
主回路制御方式	SiC適用 電圧形VVVFインバータ	

5M5T : 5 Motor cars 5 Trailer cars

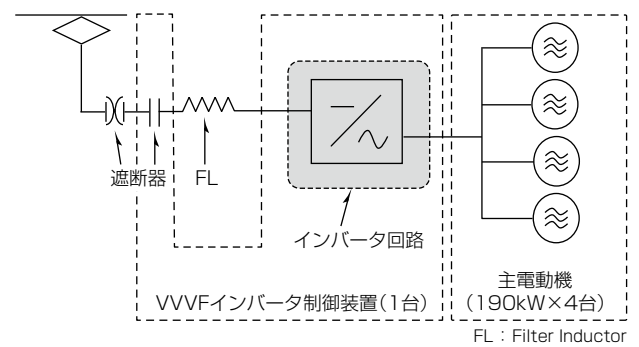


図3. 5000形主回路システムの構成



図4. 5000形車両のVVVFインバータ装置

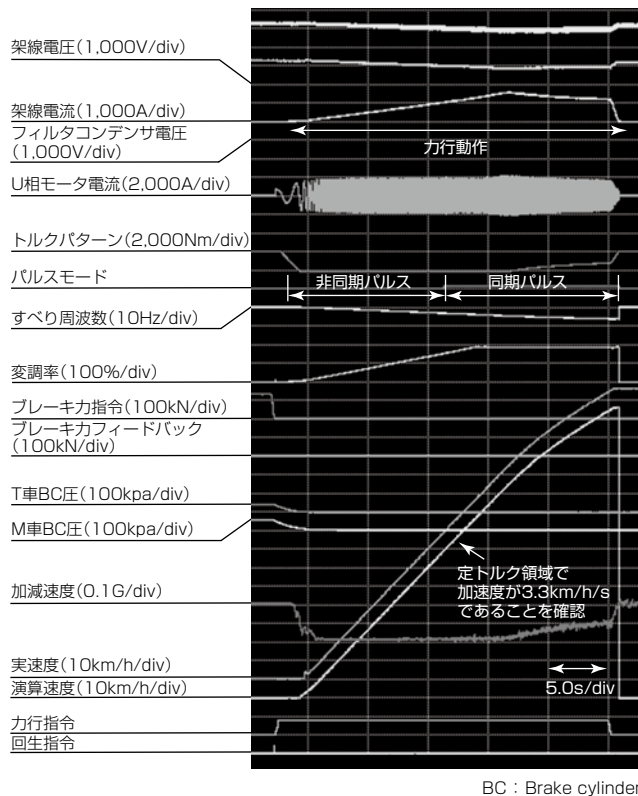


図5. 力行試験走行チャート

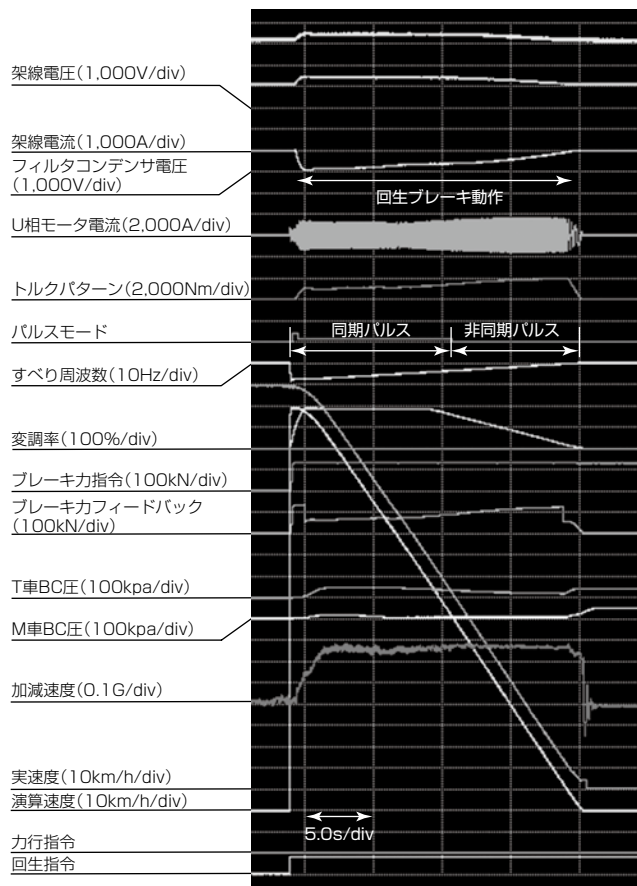


図6. 回生試験走行チャート

表4. 5000形, 及び1000形リニューアル車向け電力解析結果

5000形				
車号 5051編成(5M5T)				
	力行電力量 (kWh/(km・車))	回生電力量 (kWh/(km・車))	原単位 (kWh/(km・車))	原単位 (kWh/(km・ton))
編成 計	1.3330	0.5880	0.7450	0.0241

1000形リニューアル				
車号 1093編成(5M5T)				
	力行電力量 (kWh/(km・車))	回生電力量 (kWh/(km・車))	原単位 (kWh/(km・車))	原単位 (kWh/(km・ton))
編成 計	1.5500	0.7340	0.8160	0.0232

施し、LV100タイプ フルSiCパワーモジュール適用インバータ装置の健全性を確認した。また、これまでのSiCパワーモジュール適用インバータ装置開発を通じて得られた知見として、低騒音に寄与できる変調方式を採用し、乗車時の快適性改善も図った。

表4に、5000形車両、及び1000形リニューアル車両の営業線運用での原単位を解析した結果を示す。走行条件は異なるが、5000形の原単位は0.0241kWh/(km・ton)、1000形リニューアルの原単位は0.0232kWh/(km・ton)とほぼ同等の値であった。このことから、5000形車両の主回路システムは、既存のGTO(Gate Turn-Off thyristor)車両に対し、約40%の省エネルギー化を達成した1000形リニューアル車両と同様の省エネルギーシステムであることが確認できた。

4. む す び

LV100 タイプ 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特長、及び小田急5000形での適用事例を述べた。

世界的にSDGsに対する貢献が求められる中、環境負荷が低く、省エネルギー化に寄与できる鉄道システムは非常に重要な役割を担っている。特に今後も発展が見込まれる半導体素子、パワーエレクトロニクス分野では更なる省エネルギーシステムの開発が進むと想定される。

当社はSiCパワーモジュールを鉄道向けに世界で初めて適用したメーカーとして、今後も省エネルギー機器の開発によって環境負荷低減に貢献するための製品化開発を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 生方伸幸, 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 No.5-078 (2012)
- (2) 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, 電気学会全国大会No.4-139 (2010)
- (3) 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)
- (4) 根岸 哲, ほか: 3.3kVフルSiCパワーモジュール, 三菱電機技報, 92, No.3, 175~178 (2018)

鉄道車両用空調装置の技術動向

Technology Trend of Air Conditioning System for Railway Car

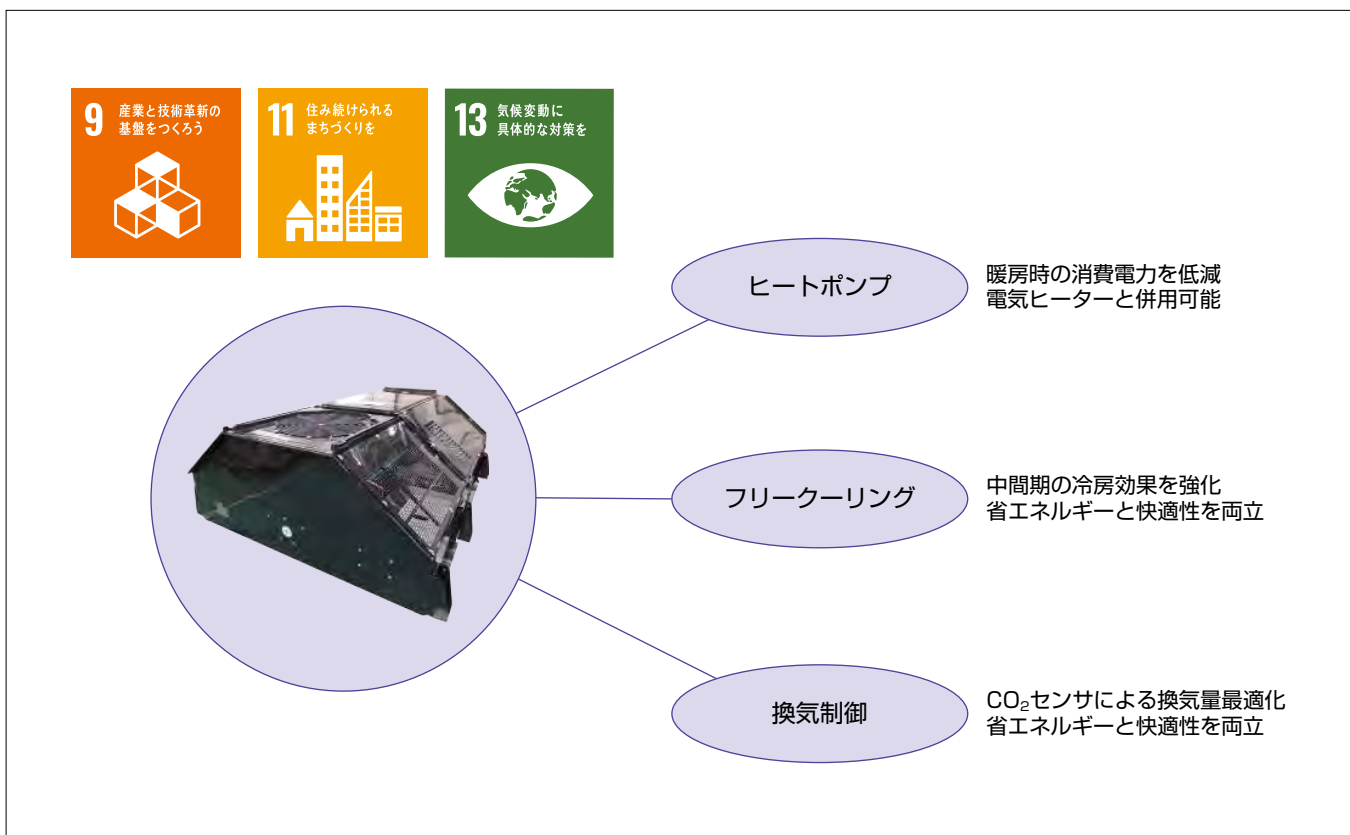
要 旨

日本国内での鉄道車両の冷房化率は100%に近く、空調装置は鉄道車両に欠くことができないサービス機器になっており、昨今の地球温暖化の影響、車内の快適性に対する要求の高まりを受け、世界的にも鉄道車両の冷房化は拡大している。冷房化の拡大とともに、快適性に対する要求も高まっており、空調装置についても高性能化が進んでいるが、同時に消費電力の増加を抑制し、環境負荷を低減することが求められている。

三菱電機は以前から鉄道車両用の空調装置で、快適性の向上だけでなく、省エネルギー技術の適用による環境負荷の低減に取り組んでいる。快適性と省エネルギー性能は往々にして相反するため、長期的には年間を通した消費電

力量の評価で、快適性と省エネルギー性を両立させることが重要である。温熱的な快適性は定量的な評価が難しいが、居室内の快適性指標である“予測温冷感申告(PMV)”と“予測不快者率(PPD)”を用いた快適性評価による車内環境改善に取り組んでいる。また、快適性と年間消費電力の削減を両立するために、ヒートポンプ、フリークーリング、CO₂センサを用いた換気量制御を組み合わせ、年間消費電力量を20%以上削減できることを検証した。

さらに、昨今の新型コロナウイルス感染症の世界的な流行によって、換気の見直されているが、当社は今後、換気機能の強化など安心して利用できる車内環境を提供できる空調装置の開発を進める。



鉄道車両用空調装置の外観と省エネルギー技術

鉄道車両用空調装置の高性能化に伴い、エネルギー効率を向上させて環境負荷を低減することが求められる。当社は空調装置の使用される条件に適したヒートポンプ、フリークーリング、換気制御の技術で年間の消費電力を最適化し、環境負荷の低減に取り組んでいる。省エネルギー技術と快適性向上技術の開発によって鉄道車両の快適な環境を提供するとともに環境負荷の低減に貢献し、国連SDGs(Sustainable Development Goals)の目標9、11、13の達成に貢献していく。

1. ま え が き

日本国内での鉄道車両の冷房化率は100%に近く、空調装置は鉄道車両の輸送サービスで欠くことができない装置である。昨今の地球温暖化の影響、車内の快適性に対する要求の高まりを受けて、鉄道インフラが急速に整備されつつある東南アジアの新興国だけでなく、欧州のような比較的冷涼な地域であっても、鉄道車両の冷房化が広がっている。快適性に対する要求に応えるため、空調装置の大容量化、高性能化が進んでいるが、同時に消費電力の増加を抑制し、環境負荷を低減することが必須の課題になっている。このような背景から、当社は車内の温熱的な快適性の向上だけでなく、省エネルギー技術の開発、メンテナンスの省力化に取り組んでいる。

温熱的な快適性は人それぞれ感じ方が異なり、快適性に対する要望は千差万別である。快適性と省エネルギー性能は相反することが多く、年間を通じた消費電力量の評価の下で、快適性と省エネルギー性を両立させることが重要である。

本稿では、予測温感申告(Predicted Mean Vote : PMV)と予測不快者率(Predicted Percentage of Dissatisfied : PPD)を用いて車内の快適性数値化して評価した事例、欧州向けの空調装置に搭載されている省エネルギー技術と年間消費電力量の最適化に関する事例を取り上げ、当社の技術動向について述べる。

2. 車内の快適性評価

年間を通して快適な温熱環境を提供することは、空調装置メーカーにとって重要な課題である。温熱的な快適性を評価する指標として不快指数がよく知られているが、乗客の温熱的な快適性は、周囲の気温、湿度、風速などの物理的な要因だけでなく、活動量や着衣量など人的な要因にも影響される。これら人的な要因を加味した快適性指標として、1970年にP.O.Fangerによって提案されたPMV及びPPDが一般的に知られ、その定義はISO7730:2005にも規定されている。

この章では、車両で計測された温度などの物理量からPMVとPPDを算出し、快適性を評価した事例について述べる。

PMVとPPDは式(1)と式(2)のように定義される⁽¹⁾。

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)L \dots\dots\dots (1)$$

$$PPD = 100 - 95e^{-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで M は人体の代謝量(W/m^2)で $58.15 \times MET$ (Metabolic rate)値で表され、 L は人体の熱負荷(W/m^2)を表し、人体

の代謝と、放射、着衣表面での熱伝達、発汗や呼気に含まれる水蒸気による不感蒸泄(ふかんじょうせつ)、呼吸による放熱の総和で表される。PMVの計算結果は $-3 \sim +3$ の数値で表され、0になるとき、人体での発熱と放熱の収支が平衡状態で、熱的に最も快適な状態とされ、値が低いほど寒く感じ、高いほど暑く感じると評価する。また、PMVが0のとき、不快と感じる人の割合であるPPDは最小値の5%になる。

図1は実測結果から算出されたPMVとPPDの推移を示す。ここで図1中のCLO値(Clothing level)は着衣量、MET値は乗客の活動量を表す。計測は中間期の冷房運転を想定した状況で実施し、隣り合う2両の車両に、異なる冷房能力制御段数の空調装置が搭載された状態で実施した。冷房能力制御を実施しない空調装置が搭載された車両では、PMVが0以下で推移し、冷房運転時の冷え込みが大きく、寒く感じる傾向が現れている。その際、PPDも10%程度まで上昇し不快と感じる人の割合が増えることが示されている。一方で、冷房能力制御を実施した場合、PMVは $-0.2 \sim +0.1$ で推移し、PPDも最小値の5%付近で推移し、過渡的な状態でおおむね快適な状態を保てていると考えられる。

2020年7月に発行された鉄道車両での車内の快適性を規定したISO19659-2:2020でも、PMV及びPPDに基づいて適正な温度・湿度の範囲が推奨・規格化されている。PMV及びPPDの数値と体感的な評価が一致するかは更なる検証が必要であるが、PMV及びPPDによる快適性の評価は、鉄道車両車内の快適性を評価する上でも有効と考えられ、今後の空調装置の設計でもこれら快適性指標を有効に活用する。

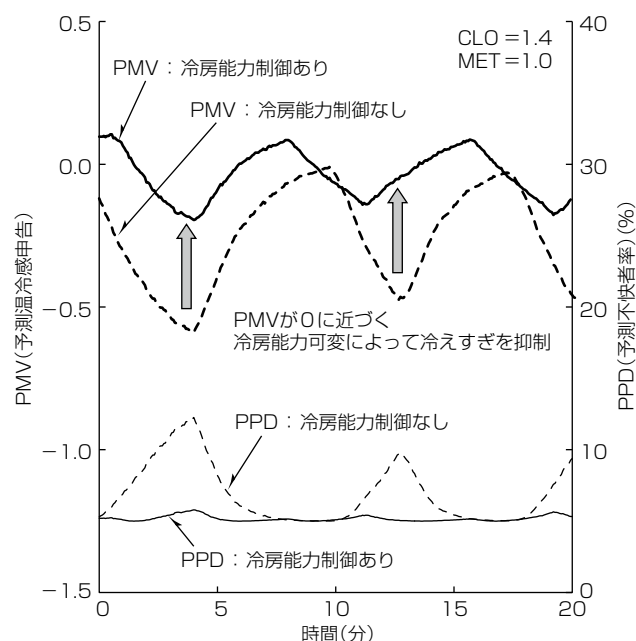


図1. PMV及びPPDの推移

3. 年間消費電力量の最適化

首都圏の通勤車両用空調装置に求められる冷房能力は、従来48kW/両程度が一般的であったが、昨今は高性能化が進み58kW/両に増加している。空調装置の高性能化とともに、消費電力も増大しており快適性と省エネルギー性能の両立が重要である。家庭用及び業務用空調装置では、JIS C9612：2013に基づくAPF(Annual Performance Factor)から算出された期間消費電力量で年間を通した省エネルギー性能を評価するのが一般的であるが、このような考え方は、鉄道車両用途ではまだまだ普及していない。空調装置の年間消費電力量は、搭載される車両の種類と走行路線や運用形態によって変化すると考えられ、その条件を一意的に決定することは困難である。しかしながら、年間を通した消費電力量は、車両寿命での空調装置のライフサイクルコストに影響を与えるため、今後、空調装置の省エネルギー性能を評価する上でますます重要な項目になると予想される。ここでは、欧州向けの空調装置で、年間の消費電力量を最適化するために導入した省エネルギー技術を述べるとともに、それらの省エネルギー技術を用いて年間の消費電力量を見積もった事例について述べる。

表1に示す空調装置運転条件は、2016年の第11回世界鉄道研究会議で提唱された空調装置の年間消費電力量を算出及び計測するための試験条件であり、特にドイツの鉄道では空調装置の年間消費電力量を比較的高い精度で見積もることができると報告されている⁽²⁾。

表1の条件は、冬季の暖房から夏季の冷房まで六つの運転条件と、年間の空調装置運転時間で構成される。条件1と条件2では暖房運転、条件3と条件4では、外気温度の低い中間期であるものの乗車率が高いことから、能力を絞った冷房運転、条件5と条件6では、夏季の冷房運転になる。条件1から4は、年間に発生する時間が長いことから、これらの条件下で効率的に空調装置を運転することが、年間の消費電力量を最適化する上で重要であると予想される。

そこで、空調装置を設計する上で、冬季の消費電力を抑制するために外気-6℃まで運転可能なヒートポンプを導入した。図2に示すとおり、ヒートポンプは四方弁で冷媒の流れを変更することで実現できる。電気ヒーターによる

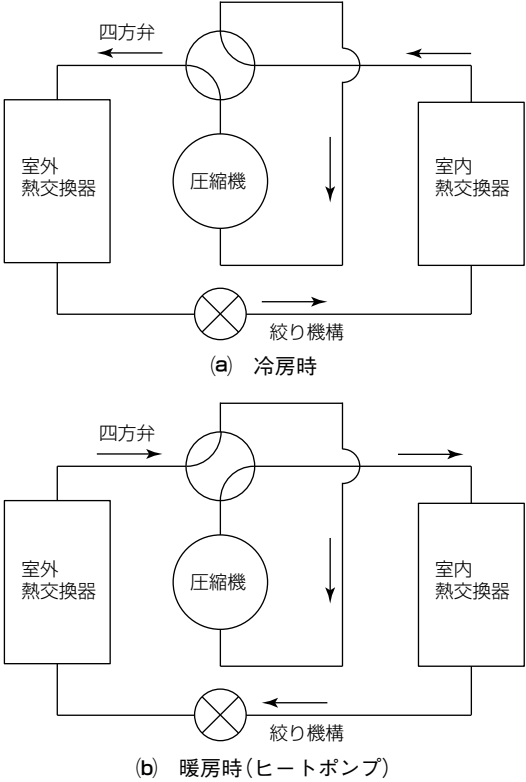


図2. 冷凍サイクル

暖房よりエネルギー効率に優れる一方で、低外気でのヒートポンプ運転は、室外熱交換器の着霜によって効率が低下するという課題がある。当該空調装置では、熱交換器サイズと絞り機構の最適化によって、外気が-6℃まで効率が大きく低下することなく安定してヒートポンプ運転を継続できる空調装置を実現した。

条件3及び4の中間期の条件では、高い乗車率によって車内の熱負荷が高く、外気温度が車内温度よりも低いにもかかわらず冷房運転が必要になる。このような低外気温度での冷房運転は、鉄道車両のような大量輸送機関で特徴的な運転モードである。このような条件下では、外気を積極的に取り込んで、冷房効果を補填するフリークーリングを実施することによって、圧縮機運転時間を低減し、エネルギー消費の大幅な削減が可能になる。図3の概念図で示すとおり、フリークーリングを実施する際は、空調装置内に取り付けられたダンパで車内空気の循環量を抑制し、循環風が全て新鮮外気になる。また、取り込む新鮮外気の風量に併せて、排気風量を可変させ車内の圧力を調整している。

従来、空調装置の換気運転では、外気温度と乗車率に応じて換気量を変更する制御が一般的であったが、当該空調装置では、空調装置内に設置したCO₂センサによって客室内のCO₂濃度を計測し、乗車率によらず車内のCO₂濃度を一定に保つよう外気を取り込み量を制御している。CO₂センサには検出値のドリフトが少なく、長期にわたって安定的な検出が可能な非分散型赤外線吸収法(Non-Disper-

表1. 年間消費電力量算出のための空調装置運転条件

条件	1	2	3	4	5	6
外気温度(℃)	-5	0	10	15	25	35
外気湿度(%)	82	85	82	75	45	41
日射負荷(kW/m ²)	146	85	136	219	496	555
乗車率(%)	20	50	100	50	50	100
年間の空調装置運転時間(h/年)	1,396	1,182	1,563	1,083	864	138

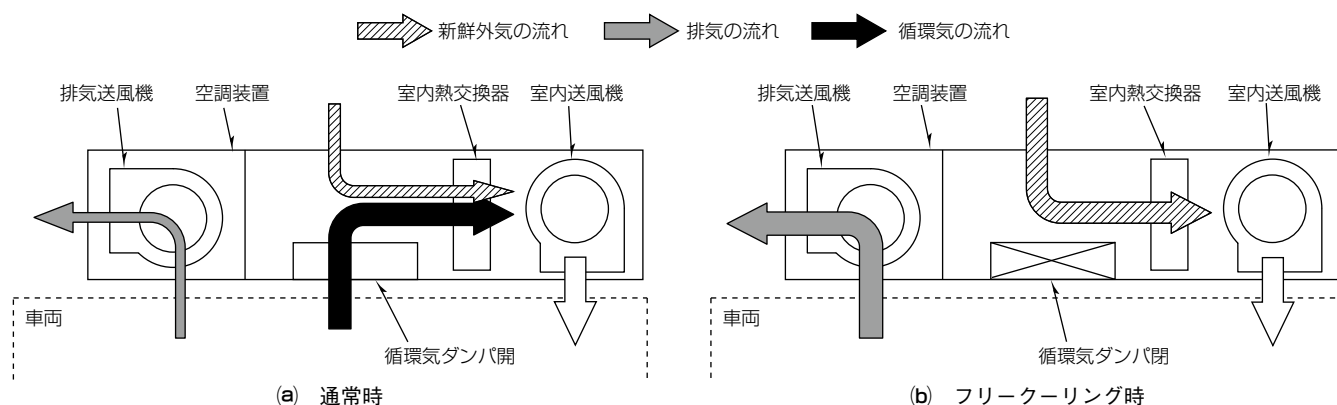


図3. フリークーリングの概念図

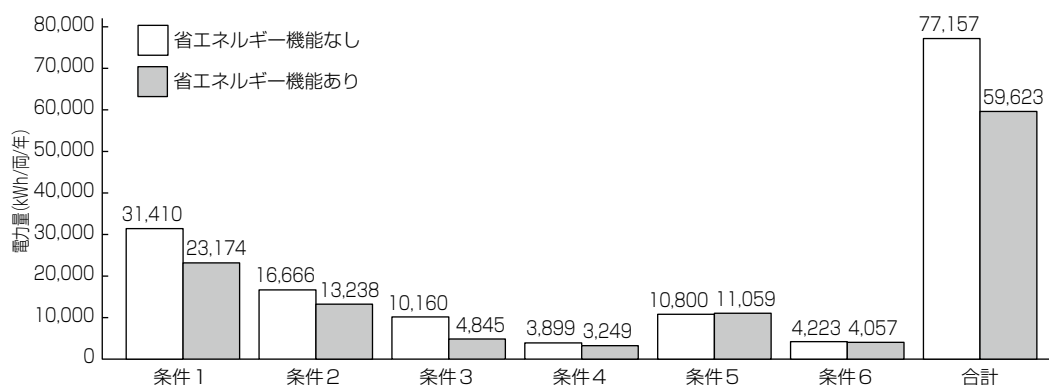


図4. 消費電力量の測定結果

sive InfRared : NDIR)方式のセンサを採用した。可変速の室内送風機とダンパによって、外気量を空調装置一台当たり $0 \text{ m}^3/\text{h}$ から $2,500 \text{ m}^3/\text{h}$ まで可変できるVAV(Variable Air Volume)方式との組合せによって、年間を通して CO_2 濃度を含めた車内空気質と省エネルギー性能の両立を図っている。

これらの年間消費電力量削減を目的とした機能の効果を検証するため、空調装置が車両に搭載された状態で実施された環境試験で、表1の各条件を模擬し、ヒートポンプ及びフリークーリングの省エネルギー機能を実装した場合と実装しない場合で消費電力量を比較し、これらの機能の効果を検証した。図4に試験の結果を示す。

条件1と2では、ヒートポンプによって消費電力量をそれぞれ20%以上削減できることが確認された。条件3では、フリークーリングの効果が大きく、この条件下では、消費電力量を半減できることを実証した。条件1から6までの合計で、年間の消費電力量で年間消費電力量の約20%に相当する年間17,500kWh/両の削減が可能になり、これは CO_2 の削減量で年間約5.3トン/両に相当する。

4. む す び

鉄道車両用空調装置の高性能化に伴い、快適性と省エネ

ルギー性能を両立させながら、環境負荷を低減することは、今後ますます重要になると考えられる。本稿では、年間消費電力量の低減に寄与する技術とその実施例について述べたが、冷凍サイクルに使用する圧縮機、熱交換器、送風機などの主要機器の高効率化にも引き続き取り組む。既存の空調装置には温暖化係数(Global Warming Potential : GWP)の高いHFC(ハイドロフルオロカーボン)が使用されているが、2016年に採択されたモントリオール議定書のキガリ改正のフェーズダウンに対応した温暖化対策の一環として、低GWP冷媒の検討・開発にも取り組む。

昨今の新型コロナウイルス感染症の世界的な流行によって、鉄道車両でも感染症対策の一環として換気の見直されている。換気機能の強化に取り組みつつ、今後も安心して利用できる車内環境の創出のため、空調装置内部の衛生性と車内空気質の向上に取り組み、多様化する快適性に対する市場ニーズに沿った製品開発を進める。

参考文献

- (1) ISO7730:2005 : Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria
- (2) Tim Berlitz, et al. : Duty cycle for Air Conditioning Systems of Railway Rolling Stock, 11th World Congress on Railway Research (WCRR) (2016)

海外交通事業でのSDGs実現に向けた取り組み

Activities in Overseas Transportation Business Field to Realize SDGs

関根久美子*
Kumiko Sekine
藤田泰貴†
Yasuki Fujita
甲村哲朗‡
Tetsuo Komura

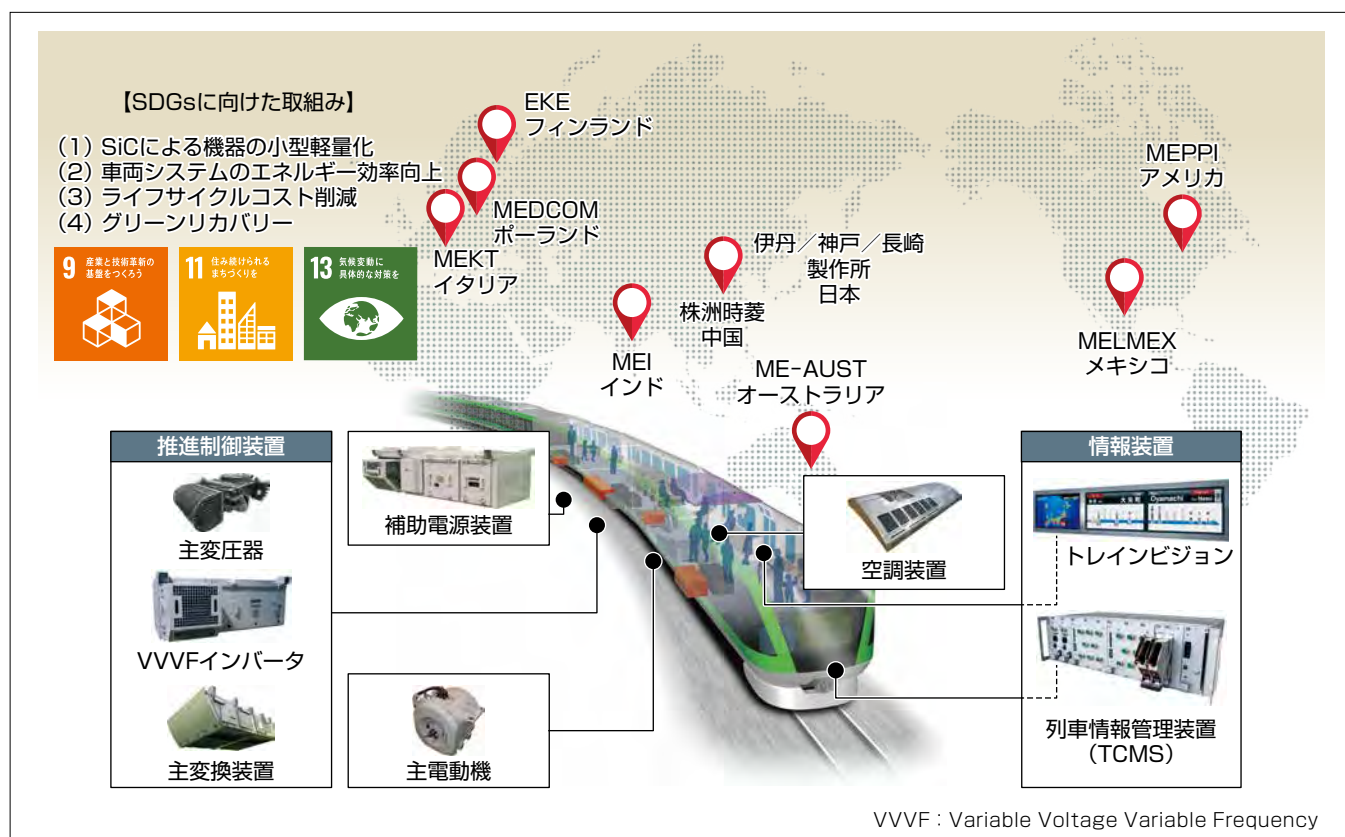
山下良範‡
Yoshinori Yamashita
松本剛嗣‡
Taketsugu Matsumoto

要 旨

三菱電機の海外交通事業は1960年のインド国鉄向け車両用電機品納入を皮切りに、欧州、北中南米、豪州、アジア各国に事業を展開し、2020年3月現在までに日本を除く計36か国・地域の57,400両以上に当社製品を供給してきた。60年に及ぶ軌跡の中で、メキシコ、豪州、米国、中国、インドに生産拠点を設置し、現地生産要求にも対応してきた。近年では、車両用空調装置生産のMitsubishi Electric Klimat Transportation Systems S.p.A.(MEKT：在イタリア)への出資(2014年4月)や鉄道車両用補助電源装置・推進制御装置等のパワーエレクトロニクス機器メーカーのMEDCOM Sp. z o.o.(在ポーランド)への出資(2015年10月)、列車統合管理システムや保全

技術に秀でたEKE-Electronics Ltd.(在フィンランド)への出資(2020年6月)を通じ、グローバルな技術開発に取り組んできた。さらに、省エネルギーによる低炭素社会への貢献や、安全・安心・安定輸送、さらには快適性の追求など、国連のSDGs(Sustainable Development Goals)への取り組みも積極的に行っている。

効率化・最適化と安全・安心が両立する社会システムが求められるポストコロナ下では、これまで当社が築き上げてきた車両用電機品の高い品質と省エネルギーの実現、さらには保守合理化による省人化等を通じ、持続可能な社会の発展に貢献していく。



総合電機メーカーの技術シナジーを実現する当社グローバル体制

1960年代からの当社の海外交通事業の歴史の中で、推進制御装置や補助電源装置等の海外生産拠点を世界8か国に展開している。1社で“走る、止める、制御する”の全てを実現するだけでなく、多種多様な幅広い製品・技術を持つ総合電機メーカーとして、SiC(シリコンカーバイド)パワーデバイスによる機器の小型軽量化、車両システムのエネルギー効率向上に向けた技術開発のほか、ライフサイクルコスト削減等SDGsに向けた取り組みを実施してきた。

1. ま え が き

当社の海外交通事業は、過去60年間の歴史で、世界市場でのインフラ構築を通じた安全・安心・安定輸送、さらには快適性の提供を使命として展開してきた。それに付随して、技術開発では、市場ごとに要求される規格への対応、機器の小型軽量化、省エネルギー、メンテナンス性向上などのニーズを実現した。

近年、地球温暖化など環境問題への意識が高まり、特に鉄道の制度や技術の中心である欧州では、コロナ禍を契機としたグリーンリカバリーなどの経済政策とも関連して、環境優位性が高い鉄道への期待が高まっている。また、欧州の鉄道産業の競争力強化のため、EU(European Union)の資金を投入したShift2Railなどの技術開発スキームが進められている。EUの鉄道政策や認証制度、規格開発などと連携した体系的な技術開発が行われ、これらの制度や規格はグローバルにも展開されている。さらに、2015年に国連総会で採択され、持続可能な社会の実現を目指すSDGsへの取組みとして、脱炭素社会の実現に向けた活動などが推進されている。

本稿では、これらの外部環境のトレンドを把握しつつ、自社技術を核とした海外メーカーとの連携によって、持続可能な発展に寄与する取組みについて述べるとともに、当社が今後世界市場で果たす役割について述べる。

2. 海外での当社の交通事業展開

当社の海外交通事業は、1960年のインド国鉄向け交流電気機関車から始まり、スペイン車両メーカーとの協業による同国鉄向け電気機関車の受注、1970年代のオーストラリア、メキシコでの電機品受注と現地生産拠点となるME-AUST(1974年)、MELMEX(1976年)立ち上げへと拡大する。その後、ニューヨーク州都市交通局向けには1997年に車両用空調装置、1999年に車両用電機品を受注し、米国市場に本格的に参入して現地生産を開始した。中国では急速に拡大する都市交通網整備に伴い、天津1号線向け車両用電機品受注を契機として多くのプロジェクトに参画し、2005年に現地生産拠点である株洲時菱を設立した。インドには2001年のデリー地下鉄で再進出を果たし、自己資金案件の増加による国産化要求の高まりに合わせて2015年に現地生産を開始した。欧州では2006年にロンドン地下鉄向け車両用空調装置を初受注し、現地生産を目的として2014年にイタリアの鉄道車両用空調装置メーカーを完全子会社化し、当社空調技術との融合によって製品力強化を図った。同

年、当社欧州販売拠点も整備・拡大し、車両用電機品と空調装置を併せた販売強化に努めてきた。2015年には、鉄道車両補助電源装置、推進制御装置等の製造・販売・保守を展開していたポーランドの鉄道車両電機品メーカーMEDCOMに資本参加した。MEDCOMはパワーエレクトロニクス応用技術や小型軽量化技術に優れており、当社のパワー半導体を含む先端技術との融合による製品競争力強化を展開中である。至近では、2020年6月に列車統合管理システムや保全技術に強いフィンランドのEKEへ出資し、今後、車両保守業務の合理化を実現していく。

当社は、グローバルなビジネス展開の過程で国産化を目的とした生産拠点の整備を進めてきた。同時に市場の最新トレンドを吸収し、顧客の要求に迅速に応えることを目的として、海外メーカーとのアライアンスを拡大しながら、鉄道車両用電機品を通じてSDGsの実現に貢献していく。

3. 技術開発活動

SDGsに向けた技術開発について、MEDCOM、EKE、MEKTとの連携を次に述べる。

3.1 SiC素子適用による機器の小型軽量化

当社は2012年2月に地下鉄車両向けとしてハイブリッドSiC素子適用の推進制御装置の営業線への導入⁽¹⁾を皮切りに、通勤型車両向けとしてフルSiC素子の適用⁽²⁾や、新幹線車両向けの主回路システムへのフルSiC素子の適用など、世界に先駆けて^(注1)SiC素子の鉄道車両への適用を推進し、機器の小型軽量化を達成してきた。SiC素子の低損失特性を生かし、補助電源装置(以下“APS装置”という。)の小型軽量化についてMEDCOMとともに取り組んでいる。従来のAPS装置では入出力を絶縁する変圧器が装置全体の体積・質量に対して大きなウェイトを占めていた。そこで変圧器の小型・軽量化に着目し、SiC素子を適用した高周波リンク方式のAPS装置を開発した。高周波リンク方式は、図1に示すように、高周波駆動インバータ、変圧器及び整流器を組み合わせることで、入出力回路の絶縁を行う方式である。Si(シリコン)-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)からSiC-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)への置換によって、インバータの高周波スイッチングを実現し、高周波化

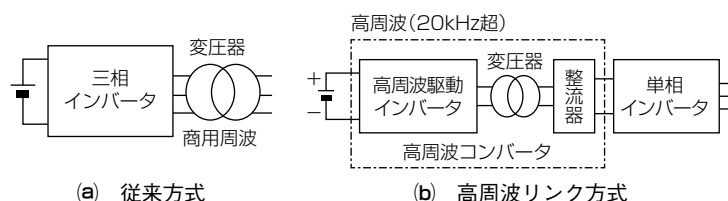


図1. APS方式の比較



図2. SiC素子適用の高周波リンク方式APS装置



図3. SiC素子適用のE-BUS向けAPS／推進制御装置

によって変圧器の小型軽量化を実現した。この結果として、装置全体の大幅な小型軽量化を図ることが可能になった。一例として、図2に示す95kVA容量のSiC素子適用のAPS装置では、同等出力容量の従来方式の装置に比べて、体積を約30%減、質量を約60%減にすることができた。

APS装置に加え、MEDCOMではSiC素子を適用した装置として、E-BUS(電気バス)向けに補助電源装置と蓄電池充電装置を一体化した推進制御装置を開発している。装置外観を図3に示す。屋根上に蟻装(ぎそう)される装置であり、SiC素子を適用することで従来に比べて最大30%の損失低減が可能になり、蓄電池による走行距離の向上に貢献し、また、体積・質量共に40%削減を実現している。さらに、E-BUS向けには車載装置のほかに、地上設置の蓄電池充電装置も開発しており、充電容量は30kWから急速充電用の650kWまで、様々なニーズに対応している。

(注1) 2012年9月27日現在、当社調べ

3.2 車両システムのエネルギー効率向上

従来の鉄道車両用主回路システムでの損失を分析すると、車両システム全体での発生損失に対してインバータの電力損失が占める割合は低い⁽³⁾。このことから、主回路システムで低損失なSiC素子を適用するだけでは、車両システム全体では十分な損失低減が期待できない。そこで、当社は車両の性能曲線に着目し、SiC素子を適用し、低インピーダンスモータと組み合わせ、高速領域から必要ブレーキ力を回生ブレーキで負担することで回生電力量を向上させ、車両システム全体としての省エネルギー効果を高めてきた。さらに、必要な編成引張力の大きさに応じて稼働するユニッ

トを編成内で制御する構成や、編成内のユニット搭載位置によってブレーキ力を変化させて滑走による回生ブレーキ力の低下を防ぐ構成等、長編成向けに編成全体での省エネルギー化や最適構成の施策を実施してきた。MEDCOMでは、LRV(Light Rail Vehicle)などの短編成で、スーパーキャパシターを利用した高効率駆動システムの開発を行っている。頻繁に加速と減速を繰り返すLRV向け推進制御装置では、蓄電池に比べて内部抵抗が低いスーパーキャパシターを適用することで短時間での充放電が可能になり、高効率で省エネルギーにも寄与するシステムになっている。

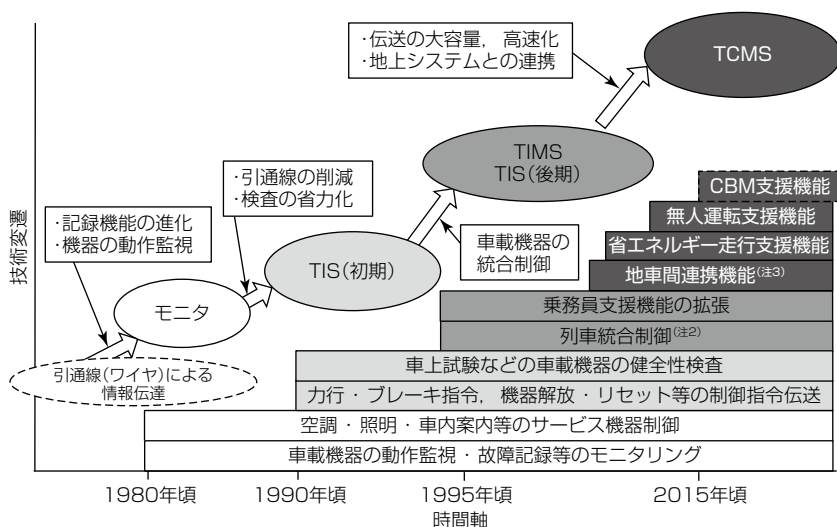
3.3 ライフサイクルコスト削減

当社及びEKEでは列車統合管理システム(Train Control and Management System: TCMS)及び車両遠隔保守支援システムを鉄道事業者提供している。

TCMSは、図4に示すように機器の監視や制御だけでなく、省エネルギー走行支援機能、地上設備との通信(地車間連携機能)を活用したメンテナンス支援機能、自動運転支援機能など、車両の頭脳として、鉄道車両の安全・安定輸送に活用領域を広げている⁽⁴⁾。

近年、鉄道車両保守の更なる省力化・効率化に向けてIoT(Internet of Things)やビッグデータなどのデジタル技術を活用した鉄道車両の遠隔監視、状態基準保全(Condition Based Maintenance: CBM)のニーズが高まっている。当社とEKEは更なる鉄道車両のライフサイクルコスト低減に向け、両社の技術を活用し、図4に示すTCMSを用いたCBM支援機能及び図5に示す鉄道車両遠隔保守・状態基準保全支援システムの実現を目指している。

第1段階が遠隔監視機能で、この機能は車両遠隔保守支援システムとして既に製品化している。TCMSが収集し



TIS: Train control Information management System, TIS: Train Integrated Management System
(注2) 編成全体としての動作が最適になるように電機品を統括制御する機能
(注3) 地上システムとTCMSが連携した車両保守支援及び列車運用支援機能

図4. 当社列車統合管理システム(TCMS)の機能変遷

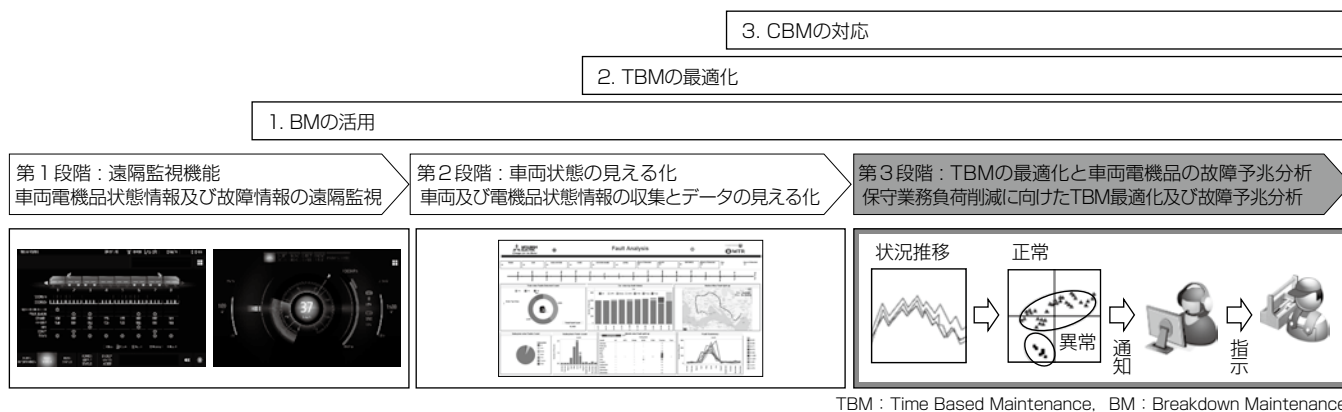


図5. 当社が考える鉄道車両遠隔保守・状態基準保全支援システム

た車両搭載機器状態情報を無線経由で地上に収集し、リアルタイムで監視可能になり、故障発生時には指令員、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。また地上から機器のログ情報やパラメータ変更を行うことで保守業務の省力化にも寄与している。

第2段階が車両状態の見える化である。TCMSから収集した車両搭載機器の稼働情報等を日時、走行位置、車両速度、環境条件等の付帯情報を含めたデータベースとして蓄積する。蓄積したデータを様々な観点で統計的に編集した結果を見える化し、機器ごとの稼働状況特性や故障の前兆把握の兆候有無を分析するような検討を可能にする。

第3段階が、CBMへの取組みである。車両搭載機器の稼働情報の中から機器の劣化傾向や特異データの特定を行う仕組みを構築し、故障発生前に機器を交換することでダウンタイム低減とメンテナンス周期最適化の実現を推進する。

3.4 グリーンリカバリー

鉄道車両用の空調装置は、R407CやR134aなどのHFC（ハイドロフルオロカーボン。代替フロン）冷媒で、GWP（Global Warming Potential：地球温暖化係数）1500前後を採用しているが、地球温暖化に対するGWP規制が強化されてきており、低GWP冷媒への切替えが必要な時期になっている。現在、欧州案件をターゲットとしてGWP1の自然冷媒CO₂の空調装置の基礎開発を進めており、冷媒変更に加えて圧縮機のインバータ制御による省エネルギー化も検討している。今後、MEKTでの製品化開発、市場でのフィールドテストを経て、欧州市場への展開を計画している。また、コロナ禍を受けて、鉄道車両空調での換気機能の重要性が注目されている。短期的には外気取り入れ量の制御変更によって換気量の増加を図る。換気量を増やすと熱負荷が増加し、車内空気の冷却性能が低下するという課題があるため、中長期的な取組みとして、換気機能強化に取り組むとともにエネルギー効率の改善を検討していく。

4. む す び

コロナ禍を経験する中で、鉄道事業に求められるニーズにも多様な変化が見られる。2020年6月にベルリンで開催されたドイツ連邦政府主催の“Rail Summit”では、2030年までに鉄道の乗客を倍増させ、将来的に、全ての主要都市間の鉄道運航頻度を30分間隔まで短縮し、利用客の利便性を向上させることなどが掲げられた⁽⁵⁾。これには、2018年から欧州で広まった反フライト運動（フライトシェイム）の影響もあると思われる。当社は北米市場ではニューヨーク市都市交通局向けにCBTC（Communications-Based Train Control）のサプライヤー認証を取得済みであり、移動閉塞による輸送力の向上と安定輸送に貢献できる。また、Shift2Railでは、持続可能な移動サービスを提供する統合プラットフォームの構築には、新技術を用いた多様なアプローチが不可欠であり、デジタライゼーション、オートメーション、テレコミュニケーション、サテライトサービスが重要とされている⁽⁶⁾。総合電機メーカーである当社は、専門メーカーでは提供できない複数事業にまたがる技術シナジーを通じて、今後も鉄道ビジネスでのグローバルな社会貢献に邁進（まいしん）する。

参考文献

- (1) 大橋 聡，ほか：SiCパワーモジュール適用鉄道車両用の高効率インバータシステム，第49回鉄道サイバネ・シンポジウム，No.505（2012）
- (2) 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）
- (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，鉄道車両と技術，No.190，6～11（2012）
- (4) 甲村哲朗：列車統合管理システム（TCMS）の最新技術と今後の展望，JREA，60，No.3，6～11（2017）
- (5) German government commits to rail at national summit，Railway Gazette International，July 1st（2020）
<https://www.railwaygazette.com/policy/german-government-commits-to-rail-at-national-summit/56852.article>
- (6) Shift2Rail，Annual Activity Report 2018，Shift2Rail Joint Undertaking，14（2019）

コロナ禍以降における 新しい社会での鉄道の考察

吉田和史*
Kazufumi Yoshida

Impact and Consideration on Railway for New Society Brought by COVID-19

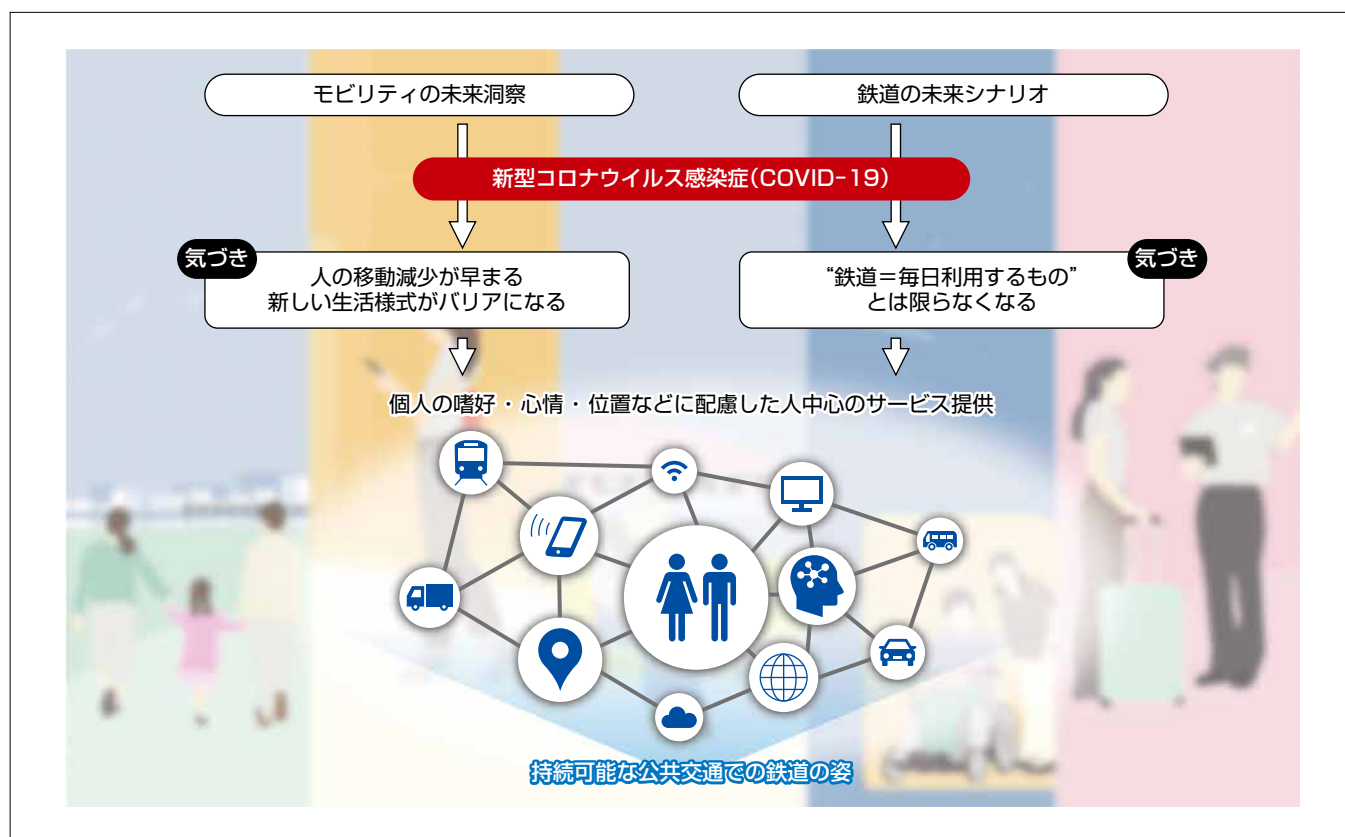
要 旨

三菱電機デザイン研究所では、未来を考えるために未来洞察、シナリオ手法などを活用した取組みを継続的に行っている。今回の新型コロナウイルスの発生によって、これまで当たり前だと思っていた様々な“常識”が変化していくととらえている。そこで、これまで取り組んできた成果を活用し、コロナ禍以降の考えるべき視点と新しい社会での鉄道の考察に取り組んだ。

未来を考えるためのアプローチとして、新しい社会の変化をミクロな視点とマクロな視点でとらえた。ミクロな視点では、人の意識、価値観の変化を、マクロな視点では、インフラなどの社会システムなどをとらえている。

様々な課題解決の視点から鉄道事業を俯瞰(ふかん)することで、持続可能な公共交通の姿が見えてくるのではないかと考える。

また、コロナ禍を経ての鉄道の取り組むべき視点として、従来のような旅客全体を集団(群)としてとらえた均質的なサービス提供から、個人の嗜好(しこう)、心情、位置などと考慮した人中心のサービス提供が必要になると考えられる。これらの視点は、デジタル社会の加速などによる利便性の向上とそれによって生まれる課題を踏まえ、持続可能な公共交通での鉄道の姿を考察するものであり、今後も継続的に検討していく視点である。



これからの社会での鉄道の姿と考えるべき視点

ゼロからの検討ではなく、これまで検討を行っていたモビリティの未来洞察、鉄道の未来シナリオを活用してコロナ禍が与える影響から気づきを抽出した。コロナ禍を経て人々の価値観が変化した新たな社会に向けて、都市とともに変化発展してきた鉄道の役割の再考が必要と考える。

1. ま え が き

2020年は新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の感染拡大の影響による緊急事態宣言の発令、不要不急の外出を抑える意識の変化によって、鉄道事業を取り巻く環境は、急速に変化しており、数値としても現れてきている。企業でのテレワーク推進によって鉄道事業を支えていた定期券収入は減少することが予想され、補完する収入源として期待されるインバウンドも、今後数年は期待できない状況にある。さらに輸送以外の駅内、沿線、ホテル、レジャー、観光など関連事業も旅客の移動を前提にしているため、大きな影響を受けている。これらの課題に対し、輸送の平準化、混雑回避を促すダイナミックプライシングや駅員・旅客の接触を低減させる仕組み、無人化など様々な施策が検討されている。

また、国連のSDGs(持続可能な開発目標)に向けた取り組みも、将来の鉄道にとって重要なテーマである。“持続可能な鉄道”を目標にしつつ、コロナ禍を乗り越えていかなければならない現状は、将来の予測が困難であり不確実性が一層高まってきている。

当社デザイン研究所では、これまで独自の未来洞察、シナリオ手法を用いた検討などの研究活動を通じて、あるべき姿、未来像の可視化に取り組んできた。しかし今回のコロナ禍による変化によって、これまで当たり前だと思っていた様々な“常識”が大きく変化しており、改めて再考の必要性が生じた。そこで、これまで取り組んできた未来洞察とシナリオ手法を用いた検討を振り返り、コロナ禍によってもたらされる新しい社会での鉄道への影響と考えるべき視点の考察に取り組んだ。

2. 新しい社会の変化を見る視点

2.1 未来を考えるためのアプローチ

デザイン研究所では、事業を取り巻く様々なステークホルダーが目指すべき将来を考え、そのために何をすべきか、実現するためにどう行動するかを考える取り組みを継続的に実践している。具体的には、未来洞察と未来シナリオである(図1)。未来洞察は、研究開発での新たな視点を獲得するために未来の行動の見通しを年表化しておくものである。未来シナリオは、シナリオ手法を用いて単一の未来予測ではなく、不確実性を前提とした“起こる可能性のある複数の未来”を可視化し、検討するものである。不確実性の高い外部環境を、整理分析した情報として社内外で共有することで、議論を活性化させて建設的なものにする狙いがある。

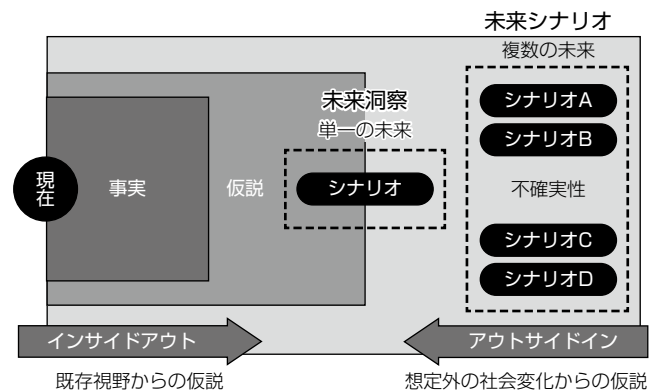


図1. 未来洞察と未来シナリオ

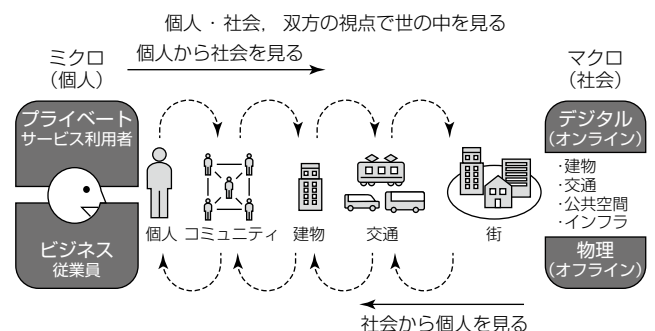


図2. ミクロな視点とマクロな視点

2.2 ミクロな視点とマクロな視点

未来洞察と未来シナリオを考えるに当たっては、新しい社会の変化をミクロな視点とマクロな視点でとらえるようにしている(図2)。ミクロな視点では、人の意識の変化、価値観の変化を、マクロな視点では、インフラなどの社会システムなどをとらえるようにしている。ミクロとマクロという二つの視点で新しい社会の変化をとらえることで、網羅性を確保して偏りが無い検討ができると考えている。

3. 新しい社会での鉄道への影響と考えるべき視点

3.1 モビリティの未来洞察からの気づき

コロナ禍以前から、デザイン研究所ではライフ、インダストリー、インフラ、モビリティの四つの領域での未来洞察を作成してきている。これは当社ではなく社会が主語になっているのが特徴である。縦軸にミクロな視点とマクロな視点、横軸が時間になっている(図3)。

四つの領域の未来洞察の一つである、モビリティから得られた将来に関する気づきから、新しい社会での鉄道への影響と考えるべき視点を考察した。また、コロナ禍の影響に関する様々な情報を基に、この年表と気づきの見直しも実施している。

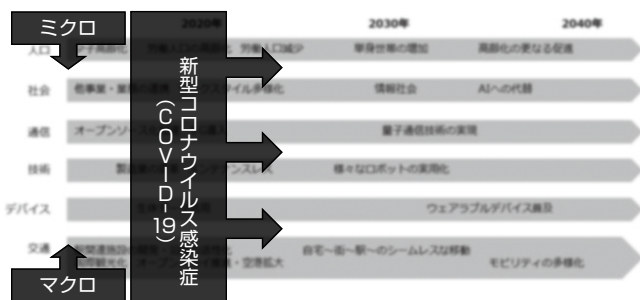


図3. モビリティの未来洞察

3.1.1 人起点での気づき

モビリティの未来洞察からコロナによって生じた人々の“価値の見直し”に着目して検討を行った。コロナ以前の当たり前、これからの当たり前をまとめたものが図4である。現状はコロナ禍によって、突然これまでの“当たり前(コロナ前)”を行うことが困難になった極端な状況である(図4①)。今後は本当に必要なコト、それほど大事ではなかったコトなどが認識・選択され、価値の見直しがされる(図4②)。さらに、新しい生活様式に向けて試行錯誤が進むことで、今までにない様々な選択肢が増加する。結果的に、新型コロナ終息後には個人にとって働く場所、住む場所など様々なことが“自由に選べる”ことが当たり前になっていると考えられる(図4③)。

そういった社会では、鉄道も選択肢の一つになり、様々な場面で“選択されない”ということも十分考えられるようになるだろう。また、通勤通学などの従来のルーティン化された移動も減少し、特定の場所でしかできないアクティビティなどの体験が主たる移動目的に切り替わっていくことが想定される。

3.1.2 社会起点での気づき

社会起点で大きな影響を与える要因の一つとしてデジタ

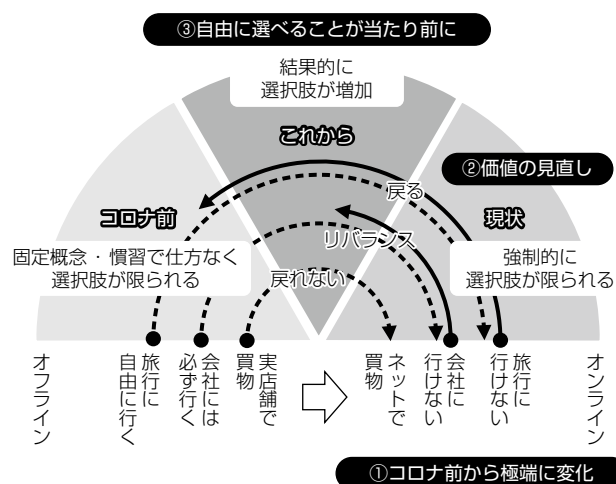


図4. コロナ禍が人に与えた影響の考察

ル社会の加速が挙げられる。様々なサービスがオンラインを常態にしていくことと、コロナ禍での意識の変化も合わさって、オンラインで可能なことはオンラインで対処して、リアルな移動が必要な際は、対人接触を避け、よりプライベートな空間での移動が好まれると考えられる。このほか、感染リスクへの配慮という視点からも、プライベートな空間での移動の実現は必要になる。

3.2 未来シナリオからの気づき

コロナ禍以前に、自動運転、MaaS(Mobility as a Service)など移動での新しいモビリティのあり方を検討した結果として、2050年での首都圏の交通のあり方を四つの未来シナリオで表現した(図5)。通勤等の人々の主な移動手段は鉄道か、鉄道以外の交通手段であるかという縦軸と、移動に関わる支払やサービス連携をつかさどるMaaSアプリケーションのオペレータが鉄道会社かIT企業かという横軸の四つの象限から構成される。コロナ禍によって鉄道事業を取り巻く環境が急速に変化している中、この四つのシナリオを見直すと、選択肢の増加によって移動手段が鉄道以外にシフトするシナリオの可能性が従来の想定以上に高まると考えられ、検討したシナリオの中ではシナリオ3、4が該当する。この二つのシナリオでは、“鉄道は人が毎日利用するもの”ではなくなっており、これまで当たり前だと思っていた常識が崩れる可能性を示している。

3.3 新しい社会での鉄道への影響

未来洞察と未来シナリオからの気づきから、今後の鉄道への影響を考察したものが図6である。これまで当社では駅やスマートシティに関する検討を行ってきたが、コロナ禍での様々な変化をきっかけに、“つながりの変化(図6①)”と“域

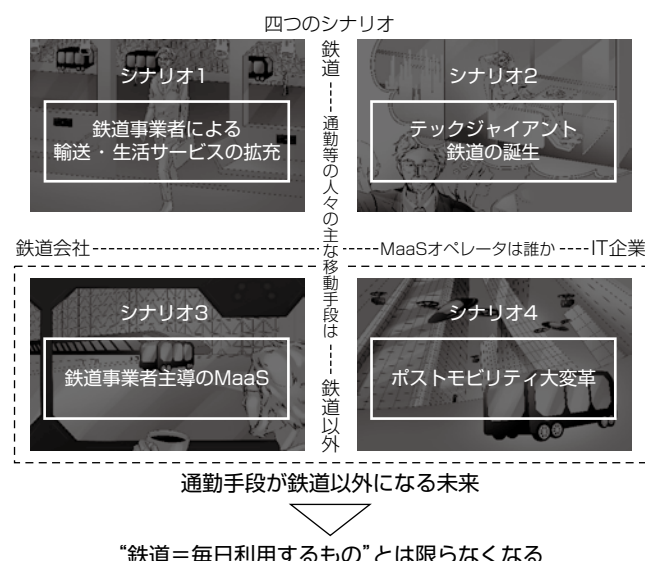


図5. 首都圏交通での未来シナリオ

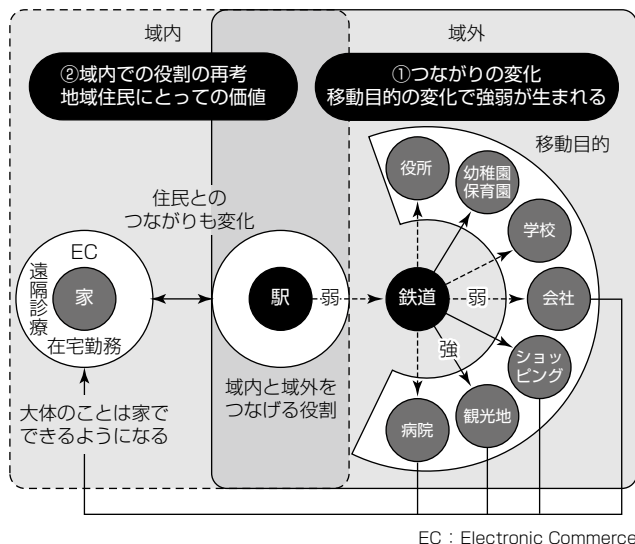


図6. 今後の鉄道についての考察

内での役割の再考(図6②)”の二つの視点に着目した。

“つながりの変化”は、これまでの鉄道は様々な場所(目的)との強いつながりを持っていたが、ルーティン化した移動の減少によって今後はつながりの強弱が変わってくるという視点である。例えば、会社に対しては、在宅勤務の増加で従来よりもつながりは弱くなり、逆に旅行など非日常を体験できる観光地等のつながりは強くなると思われる。“域内での役割の再考”は、移動目的の減少と移動機会の減少によって、沿線や最寄りの住民にとっての価値の再考が必要であるという視点である。これらの視点から域内を充実させ、改めて域外も含めて俯瞰することで、地域に根差した持続可能な公共交通の姿が見えてくるのではないかと考える。

人口減少による利用者の減少など鉄道事業を取り巻く環境は急速に変化している。輸送サービス業から生活サービス業への拡大期にある鉄道事業の中で、人を中心としたサービスを創出するためにも、地域・街と駅の境がなくなるシームレスな駅になっていくと考える。

3.3.1 新しい社会に向けた鉄道

先に述べたようにつながりの強さが変化することで、これまでとも言われていた小規模駅の無人化、中規模駅の観光特化型、公共サービスなどを含めた都市機能集約型といったような変化が一層加速すると考えられる。このように駅の進化形として、交通結節点のロケーションを活用した、鉄道事業者主体の超コンパクトシティという一つの方向性が見えてくる(図7)。このような役割になることで駅は交通結節点でありながら公共サービスなど様々なサービスを受けることができる場所になり“目的地”そのものにもなる。その結果、訪れる人は移動を目的とした旅客だけではなく、駅員の役割も変わっていくと考えられる。

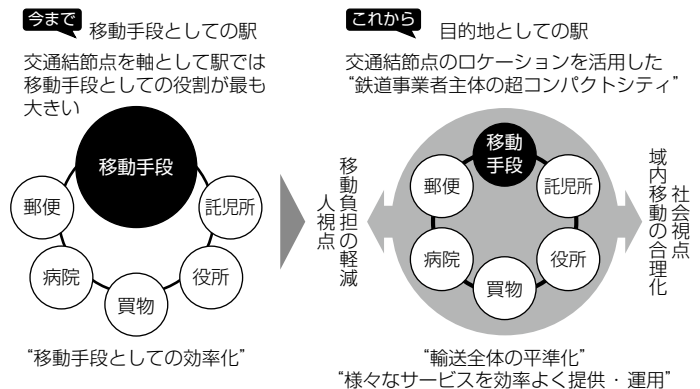


図7. 今後の鉄道についての考察

また、輸送については、“移動手段としての効率化”だけでなく、“輸送全体の平準化”が一層求められる。鉄道事業にとって、コロナ禍での密集を避ける感染リスクへの配慮だけでなく、通勤通学などのルーティン化された移動減少による収入減への対応、平準化を促す新しいビジネスの創出などが社会的にも事業的にも必要になると想像できる。

3.3.2 取り組むべき視点

コロナ禍を経ての鉄道の取り組むべき視点として、従来のような旅客全体を集団(群)としてとらえた均質的なサービス提供から、個人の嗜好(しこう)、心情、位置などに配慮したサービス提供が必要になると考えられる。簡単に言えば、人中心の視点ということになるが、従来、大量輸送を担ってきた鉄道事業では難しい視点かと思われる。ただ、ルーティン化した移動が減少し、プライベートな空間での移動が求められるなど、従来とは違う要求が強まる新しい社会を、危機ではなく契機としてとらえたい。

4. む す び

今回の考察では、これまで検討していた想定し得る未来に対して、コロナ禍によってどのような影響があり、変わるコト、変わらないコトは何か等の見直しを行い、目指すべき方向性と取り組むべき視点を抽出した。必ずしも真新しい視点ではないかもしれないが、将来の“持続可能な鉄道”に向けた取組みとして、また、コロナ禍をきっかけとして加速するデジタル社会や新しい生活様式が課題になる可能性などを踏まえ、改めて重要性が増した視点であると考えている。

コロナ禍による変化は、いかに“移動”が経済と密接な関係であったかを再認識する機会になった。今回の検討で不確実性の高いWith/Afterコロナの新しい社会に対し、改めて当社単独でなく顧客とともに議論を重ね、持続可能な公共交通としての鉄道を目指していく必要性を強く感じた。今後もSDGsの視点で鉄道の未来を継続的に考察していく。