



家庭から宇宙まで、エコチエンジ



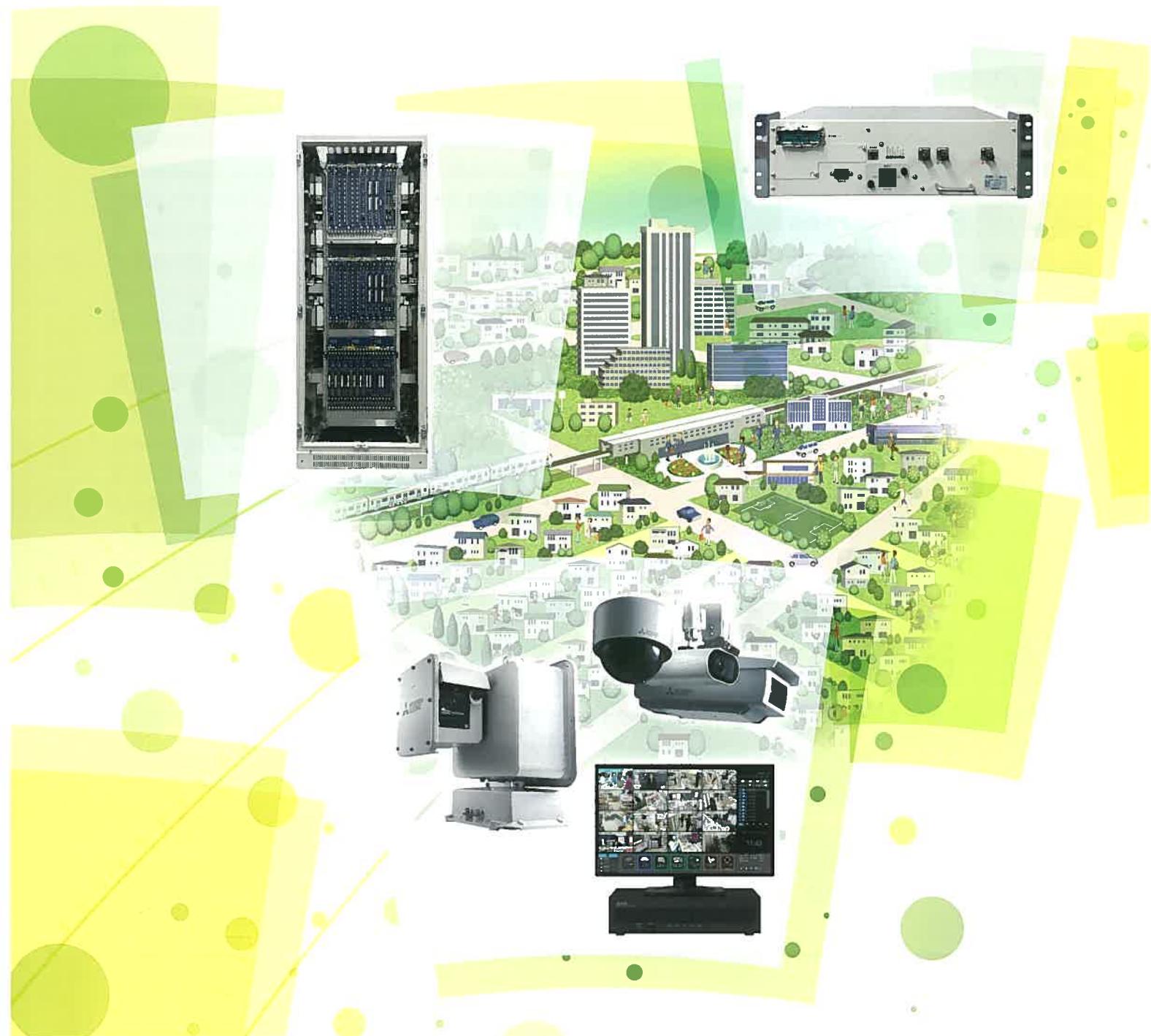
# 三菱電機技報

9

2020

Vol.94 No.9

“社会をつなぐ。未来をつむぐ。” 通信・映像技術



### 目 次

#### 特集「社会をつなぐ。未来をつむぐ。」通信・映像技術

進化と改革 ..... 卷頭言 | 1  
向井宏明

“社会をつなぐ。未来をつむぐ。”

通信・映像技術 ..... 卷頭論文 | 2  
三嶋英俊

俯瞰映像合成技術“Fairyview” ..... 8  
菊地謙仁・齐藤弘紀・小泉信幸

5Gによるネットワークカメラの新たな活用シーン ..... 12  
谷崎雄太・松本雅之

鉄道車両向け車内防犯システム ..... 17  
笠原裕志・今尾勝崇・菅谷元典

地方交通線向け列車制御用無線通信システム ..... 22  
鈴木哲也・黒岩 篤

新幹線向け静電アンテナの小形化 ..... 27  
坪 浩行・西本研悟・向井孝夫

海外スマートメータ対応通信ユニット ..... 32  
樋口晃二・西本研悟・福田洋三

10G-EPONユーザー宅内装置 ..... 37  
高橋浩司・稻村卓也・平瀬貴博

100/200Gbps CFP2  
デジタルコピーレントランシーバ ..... 42  
三重野光子・新宅宏彰・林 周作・斧原聖史・高橋啓介

組込みシステム向けセキュリティソフトウェア ..... 47  
牧村悠司

Communication and Video Technologies to Connect Society and the Future

Evolution and Revolution  
Hiroaki Mukai

Communication and Video Technologies to Connect Society and the Future  
Hirotoshi Mishima

“Fairyview”: Aerial-view Video Synthesis Technology  
Akihito Kikuchi, Hiromi Saito, Nobuyuki Koizumi

New Usage Scenes of Network Cameras by 5G Networks  
Yuta Tanizaki, Masayuki Matsumoto

In-vehicle Security System for Railroad Vehicles  
Hiroshi Kasahara, Masataka Imao, Motohori Sugaya

Wireless Connections System for Regional Lines Train Control System  
Tetsuya Suzuki, Atsushi Kuroiwa

Miniaturization of Electrostatic Antenna for Shinkansen  
Hiroyuki Akutsu, Kengo Nishimoto, Takao Mukai

Transceivers for Oversea Smart Meters  
Koji Higuchi, Kengo Nishimoto, Yozo Fukuda

Optical Network Unit for 10Gigabit Ethernet Passive Optical Network  
Koji Takahashi, Takuya Inamura, Takahiro Hirase

100/200Gbps CFP2 Digital Coherent Transceiver  
Mitsuko Mieno, Hirotaki Shintaku, Shusaku Hayashi, Kiyoshi Onohara, Keisuke Takahashi

Security Software for Embedded Systems  
Yuiji Makimura

#### Webサイト紹介

(三菱ネットワークカメラ・システム総合サイト) ..... 52

#### 特許と新案

「減結合回路」

「画像信号処理装置および画像信号処理方法」 ..... 53

「子局装置および省電力制御方法」 ..... 54

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：“社会をつなぐ。未来をつむぐ。”通信・映像技術

IoT(Internet of Things)で全ての人とモノがつながり、多くの情報の分析から新たな価値が生み出される。通信が人をつなぎ、街をつなぎ、そして世界をつなぐ。より快適で、より安心・安全な社会基盤を、通信・映像+セキュリティ技術で支える。

①大容量基幹光ネットワーク伝送装置

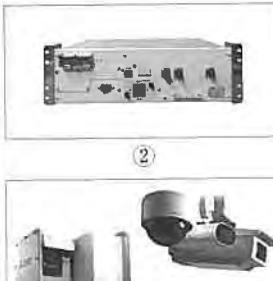
広域通信を支え、次世代の通信ネットワークに対応した高速・大容量、高信頼化の実現に貢献する。

②無線式列車制御システムの車上無線装置

無線通信技術の高度化によって、信頼性・安全性を確保する。将来の列車運行システムの実現につながる一歩である。

③ネットワークカメラ“MELOOK3”

映像の高画質化と俯瞰(ふかん)映像合成技術“Fairyview”的搭載によって、セキュリティ活用領域を拡大する。



# 卷頭言

## 進化と改革

Evolution and Revolution

向井宏明 *Hiroaki Mukai*

金沢工業大学 工学部 情報工学科 教授

*Professor, Department of Information and Computer Science, Kanazawa Institute of Technology*



現在は大学教員として次の世代の技術者の育成に関わっているが、それ以前の1990年から2017年まで27年間はFTTH(Fiber To The Home)用の通信機器の研究開発を中心に各種通信機器の研究開発に携わった。FTTHの研究を開始した当時は一般家庭での通信機器というと黒電話で一部の家庭にはFAXがあるという状況であったので、電話局から一般家庭までを光ファイバケーブルでつなぐFTTH向け機器の開発に携わっているという話題は工学系以外の人には通じなかった記憶がある。そのときから30年経過した2020年、通信環境は大きく進化した。多くの家庭にFTTHによる高速インターネット回線が接続され、誰もが全国どこにいてもスマートフォンやタブレットを利用できる。その結果、30年前には存在していなかったビジネスやエンタテインメントが出現して人々の生活様式に変化をもたらした。

2020年は東京2020オリンピック・パラリンピックでの盛り上がりが予想され、5G携帯電話などもここでの活躍が期待された。しかし、年初からの世界的な新型コロナウイルスの感染拡大によって多くの人が亡くなるなど暗転し、東京2020オリンピック・パラリンピックの延期を始めとして様々なイベントが延期又は中止された。日常生活でも人との接触を避けるために在宅勤務やオンライン授業が行われるなどの光景が全国各地で見られるようになった。人との接触が制限されるという環境で重要性を増したのが通信システムである。通勤や登校が制限された状況でも仕事や授業、飲み会などの人との交流までもがオンラインで可能なほどに通信システムが進化していることに多くの人が気付いた。

新型コロナウイルス禍はワクチンの開発などによって解消される日がいずれは来るが、オンラインでできてしまうことはオンラインで行うという流れは加速すると見られている。オンライン化が進むことで時間的な制約はなくなり、人々は育児、家事、介護、趣味などにも時間を使える。ま

た、大都市圏での朝夕の通勤ラッシュの緩和や大都市と地方間の情報格差の解消が進むことも期待される。その結果、人口減少、高齢化、地域格差などの社会問題の解決にもつながり、通信システムの進化は日常生活の変化どころか改革をもたらすものになると言える。

様々な活動がオンラインで行われるようになると通信量が増加する。スマートフォンやタブレットのような無線通信端末では高精細映像を視聴できる5Gが今後は普及していくが、高精細な映像の送受信時には多くの通信量が発生する。今後爆発的に増加する通信量を支えるのが家庭や携帯基地局と電話局間、全国の電話局間や海外の電話局までをつなぐ光通信で、より速く、より遠くまでの通信を実現するための様々な技術開発が行われている。また、近年、交通システム、電力システム、防災、防犯などのあらゆる場面で、画像やその他センサ類で収集したデータをネットワーク経由で収集する、モノのインターネットと呼ばれるIoT(Internet of Things)の導入が進んできている。IoTでのデータ通信は無線通信が中心になるが、通信可能領域の広範囲化や電池で数年間動作するような省電力化などの技術開発が行われている。IoTの普及とともに増加してきているのが、IoTを標的又はIoT自体を悪用したコンピュータ犯罪で、パソコンやサーバ向けのこれまでのコンピュータウイルス対策とは異なる新しいセキュリティ技術が必要になる。

“より速く、より高く、より強く”はオリンピックのモットーであるが、“より速く(高速)、より高く(高精細)、より強く(堅牢(けんろう))”という点では通信に関わる技術者もオリンピック選手と同様に努力を重ねて通信システムを日々進化させてきた。さらに、より遠くへ、より小さく、より安く、より使いやすくという面での進化も求められてきた。今後の通信システムの進化が将来の人々の生活に、現在は想像もつかないような改革をもたらすのではないかと期待する。

## “社会をつなぐ。未来をつむぐ。” 通信・映像技術

Communication and Video Technologies to Connect Society and the Future



三嶋英俊\*

Hidetoshi Mishima

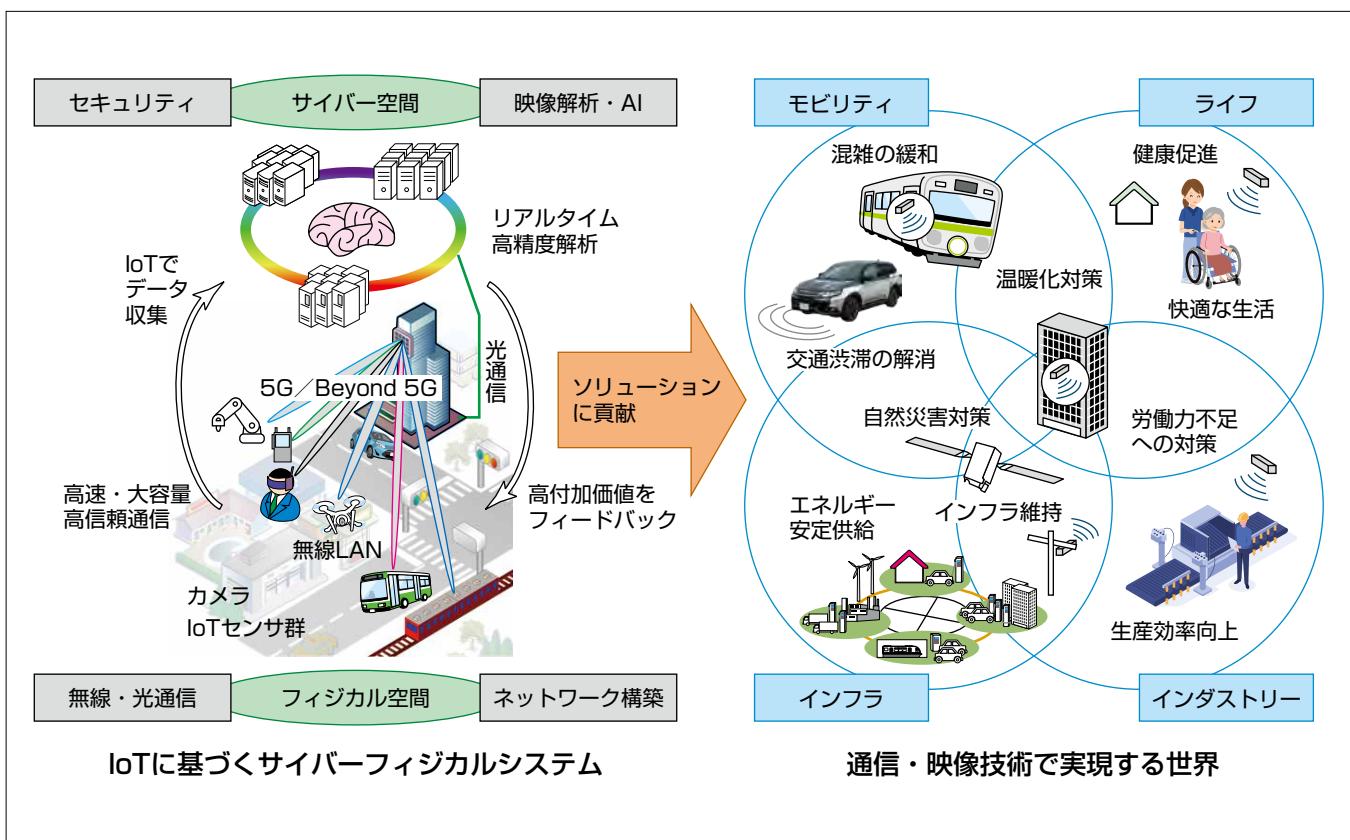
### 要 旨

日本は、Society5.0としてサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させることによって経済発展と社会課題の解決を目指している。Society5.0では、IoT(Internet of Things)で全ての人とモノがつながり、様々な知識や情報が共有されて、多くの情報の分析から新たな価値が生み出される。通信・映像技術は、IoT時代の社会基盤として、人の移動を最小限に抑え得るものであり、メディア情報を使って移動先があたかもそこにあるかのように人々の交流がなされて活発な社会活動に大きく寄与する。既にサービスが始まっている第5世代移動通信システム(5G)は、“高速・大容量”“高信頼・低遅延”“多数同時接続”的特長がIoT時代を更に進展させるのにふさわしいと期待される。

三菱電機は、今後複雑化する社会課題を解決し、一人ひ

とりがより豊かで快適に暮らせる、持続可能な社会の実現に向けて、より高い価値を持つソリューションを提供していく。通信・映像技術は、遠隔地に単純に映像をリアルタイムで届けるだけではなく、IoTデータに基づいてフィジカル空間で起きている内容をサイバー空間で分析し、より高度に把握して社会に価値を戻す社会システムに貢献していく。

ソリューションの共通基盤としてビジネスを支える通信技術の更なる高速化・高信頼化・低遅延化はもちろんのこと、アプリケーションを含めて技術課題を掘り下げて研究開発を進め、安心・安全・快適な未来社会の実現を通して社会課題の解決を加速する。



### 通信・映像技術の進展が貢献するソリューション(Society5.0の実現に向けて)

あらゆるもののがネットワークに接続されたフィジカル空間(現実世界)から、高速・大容量・高信頼な情報通信技術を用いたIoTによって大量のデータがサイバー空間上に蓄積される。サイバー空間で当社AI(Artificial Intelligence)技術“Maisart(マイサート)”や各種解析技術を用いて高い価値を創造し、現実世界にフィードバックすることで具現化する。多様なニーズにきめ細かに対応したモノやサービスを含めたソリューションを提供し、社会課題を解決する。

## 1. まえがき

Society5.0で実現する社会は、IoTで全ての人とモノがつながり、様々な知識や情報が共有されて、今までにない新たな価値を生み出す。IoTで集められたデータに基づいて現場映像などを解析するAI技術やIoTシステムそのものを支えるものとして、情報通信技術が全ての根幹になっている。最近のパンデミックでは、感染拡大防止のために世界中の多くの都市でテレワークでの在宅勤務を余儀なくされるなど、改めて情報通信の重要性が実感されている。このように情報通信の重要性は今後ますます高まると予想され、この期待に応えるために情報通信技術も急速に進展していく。

当社では、ライフ、インダストリー、インフラ、モビリティの4領域で、ソリューションの提供によってこのような社会課題を解決して新しい顧客価値を提供することで、Society5.0の社会を実現することを目指している。

本稿ではこれらにスポットを当てて、四つの領域で基盤になる情報通信技術として通信技術及び映像解析技術などの新たな技術への取組みについて述べる。

## 2. ライフ領域

### 2.1 家庭内情報通信システム

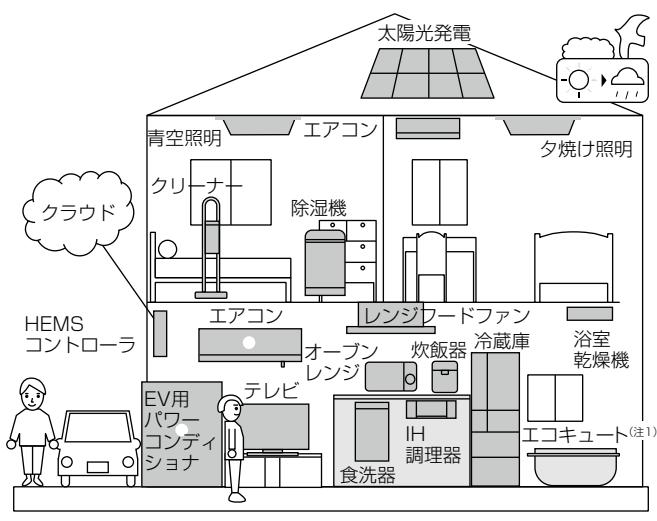
家庭内情報通信システムは、パソコンやテレビ、タブレット等のほかに、家電をネットワークでつなげるHEMS(Home Energy Management System)が既に実用化されて普及が始まっている。パワーコンディショナや蓄

電池とつながり、家電・住宅設備(以下“家電”という。)が消費する電力量を“見える化”して、家庭で各々が省エネルギーの工夫をする、又は、AIを使って家電を制御して電気代を節約できるようになった。

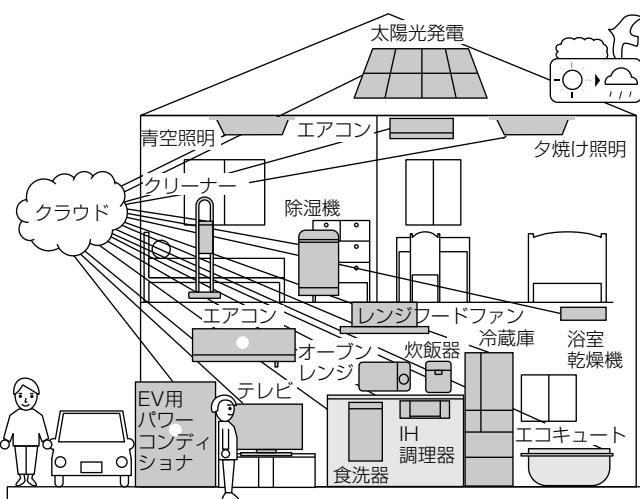
さらに、IoT時代を迎え、家電はIoTの機器へと大きく変わっていこうとしている。AIスピーカーなどのIoTガジェットと組み合わせてハンズフリーで人の命令を音声で受けて制御できるようなシステムなどがその代表である。これまで、家電はIoTゲートウェイ(以下“IoT GW”という。)技術を適用したHEMSコントローラを経由してクラウドに接続されるシステム(図1(a))が主流であったが、AIスピーカーなどで見られるのはIoT機器が直接クラウドに接続されるタイプのシステムである(図1(b))。これによって広域で機器のデータを収集・解析し、エネルギー管理やライフケアを始め、世の中の消費動向に基づきながらも、個々の志向や機器の使われ方に応じたもろもろのサービスを享受できるようになる。すなわち、家電のIoT機器化によって、コト(サービス)の価値が重視される時代になっていくものと考えられ、より快適な生活の実現に貢献する。また、血圧、脈波など健康関連のウェアラブルデバイスなどとの連携で、健康確保などに有益なソリューションの実現も可能になる。

### 2.2 IoT時代のセキュリティ技術

IoTの進展によって、家庭内とはいえネットワークを介したサイバー攻撃による機密情報の漏洩(ろうえい)や重要インフラの機能不全のリスクが高まっている。IoT時代ではネットワークにつながる機器への不正操作を防止する機器のセキュリティがますます重要になる。家電の使われ方によってはプライバシー情報など、高いセキュリティが求



(a) IoTゲートウェイ集約



(b) クラウド・ダイレクト接続

(注1) エコキュートの名称は、電力会社・給湯機メーカーが自然冷媒CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯機を総称するペットネームとして取り扱っている。

IH : Induction Heating(電磁誘導加熱), EV : Electric Vehicle(電気自動車)

図1. 家庭内情報通信システム

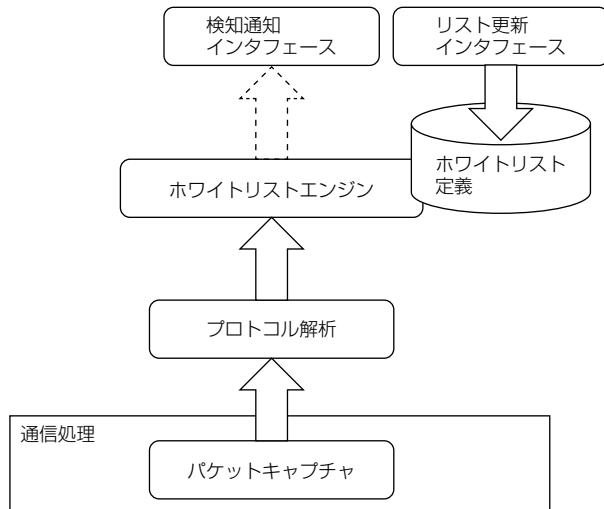


図2. ホワイトリスト型攻撃検知機能のブロック図

められる情報も保存されることが想定される。その場合に、クラウド・ダイレクト接続ではなく、IoT GWで一旦集約することでセキュリティ確保が可能になる。頻繁に機能や構成の変更を行わないIoT機器やIoTシステムのセキュリティを保護するためには、不正なプログラムや通信を検知するブラックリスト型アプローチより、正しいプログラムや通信を定義し、定義から逸脱するプログラムや通信を検知するホワイトリスト型アプローチが有効である。

当社は、GW自身と配下のIoT機器を守るための仕組みとして、将来のIoT GWへの適用を視野に、組み込み装置向けホワイトリスト型セキュリティ機能とホワイトリスト型攻撃検知機能<sup>(1)</sup>を開発した。前者はGW自身が実行するプログラムを監視する機能である。後者はGW配下のIoT機器の通信を監視する機能である。図2にホワイトリスト型攻撃検知機能のブロック図を示す。ホワイトリスト型攻撃検知機能は、監視対象とする通信を捕捉し、あらかじめ設定されたホワイトリスト定義との照合をホワイトリストエンジンで行い、定義に合致しない通信を検知する。また、システムの動作状態に応じて複数のホワイトリスト定義を切り替えることで、リアルタイム性を確保しつつ高度な攻撃検知を可能にしている。

未知の攻撃も含めて検知可能なこれら二つのホワイトリスト機能を活用し、よりサイバー攻撃に強いIoTシステムを提供していく。

### 3. インダストリー領域

#### 3.1 産業分野への5G応用

各国で商用サービスが開始された第5世代移動通信システム(5G)では、従来の高速・大容量に、新たに多数同

時接続、超高信頼・低遅延を加えた三つの柱を特長として、様々なサービス要件に応じた通信環境が提供可能になる。このような柔軟性を持つ5Gを活用した新たなビジネスやサービス創出が期待されており、これまでの通信事業者向け通信以上に高い無線通信の信頼性が求められる産業分野など異業種分野への適用が検討されている。特にファクトリオートメーション(FA)分野では、5Gの超高信頼・低遅延通信の特長を生かして、産業用通信規格である“CC-Link IE TSN”などの産業用Ethernet<sup>(注2)</sup>系の通信プロトコルを5G上で利用可能にする技術開発が進んでおり、5G LAN-typeサービスのサポート、ネットワークのリアルタイム性を保証するTSN(Time Sensitive Networking)に対応するクロック同期技術の導入によるTSC(Time Sensitive Communication)、複数の通信経路を用いた冗長的な無線通信による高信頼化技術などが3GPP(The 3rd Generation Partnership Project)で規格化されている。クロック同期技術では、5Gシステム全体を産業用ネットワーク内の一つの仮想的なブリッジに見せるトランシーバ機能を設けることで既存のFA機器に影響を与えることなくシームレスな接続を実現できる。FA向け5G規格の第1弾は、2020年6月に3GPP Rel.16で規格化され、主要な機能をサポートする3GPP Rel.17は2021年9月に規格化を完了予定である<sup>(2)</sup>。

このような状況を背景に、総務省では地域や産業の個別ニーズに応じて自治体や企業等が柔軟に独自の5Gシステムを構築・利用できるローカル5Gを2019年12月に制度化(28.2~28.3GHz)し、これまで通信事業者以外は困難であった専用帯域の電波免許取得が可能になった。2020年12月には新たに4.5GHz帯の利用や屋外での利用なども計画されている。ローカル5Gでは専用帯域の利用で安定した通信環境が得られることに加えて、企業が目的に応じて自由に5Gシステムを構成でき、SIM(Subscriber Identity Module)カードによる認証機能の提供など高いセキュリティが確保できるメリットが期待できる。さらには、この技術は変種変量生産が進む未来社会で、無線でネットワークを構築できることから製造ラインのリレイアウトが容易になり、生産性向上に寄与できる。

当社は産業用途への5G活用の取組みとして、総務省から2020年4月にローカル5Gの実験試験局免許を取得し、当社FA製品と接続した5G通信接続及び通信性能などの技術検証を開始した。この技術検証で得られた5G活用の知見を基にサービスや製品への適用の検討を進める。

(注2) Ethernetは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。

#### 3.2 産業分野へのネットワーク仮想化技術応用

ローカル5Gを産業分野に導入する際に、幅広いアプリ

ケーションで付加価値を確保するには、それぞれのアプリケーションが要求する様々なE2E(End-to-End)での通信品質を確保して素早くネットワーク構築することが重要になる。そこでE2Eでの通信要件を反映可能なネットワークスライス(論理的に分割され独立したネットワーク)を活用し、ダイナミックにネットワークを再構成することによって利用効率の高いネットワーク運用を実現する技術を開発した。

現在の通信ネットワークで、交換機や中継伝送装置の間を結ぶ基幹ネットワークに関してはネットワークスライスの要素技術であるネットワーク仮想化技術の導入が進められているが、端末と収容局を結ぶアクセスネットワークへの適用には至っておらず、工場など様々な種類の機器・システムが端末として接続されるネットワークでのE2E通信品質の確保が課題になっている。これに対して当社では、2017年に総務省から受託した“IoT機器増大に対応した有無線最適制御型電波有効利用基盤技術の研究開発”への取組み等によって、アクセスネットワークをツリーやリングなどの接続形態、又はIP(Internet Protocol)やEthernetなどのプロトコルに依存しない形態に抽象化して通信リソースの管理制御を行うネットワーク制御技術を開発している<sup>(3)</sup>。

特に伝送遅延時間の要求度に応じて、事前に通信リソースを複数のクラスに分類し、クラスごとに通信速度や可用性(システムを停止することなく稼働し続ける能力)などを算出しておくアルゴリズムを開発し、ネットワーク構築の要求を受けた際に最適な通信リソースを素早く割り当てることを可能にした。また、アクセスネットワークでの各論理リンクの通信リソース利用状況を管理して、スライスが利用する論理リンクを選択する方式を考案し、多数のスライスを効率よく収容できるようにした。今後、この技術を適用したネットワークスライス応用を進める。

### 3.3 産業分野への映像技術応用～骨紋(こつもん)～

人手作業を含んだ製造現場では、生産性及び品質向上のために、作業時間や作業ミスなどの情報が必要になる。従来は、監督者が目視で作業時間の計測や作業ミスの有無確認を行っていたため、問題点の抽出に膨大な時間を要していた。このような監視や問題抽出を自動化し、IoTを活用して迅速に効率改善を進めている。

当社は、AI技術“Maisart”による作業分析ソリューション“骨紋”を開発した。骨紋はカメラ映像から抽出した作業者の骨格情報から作業内容を認識して、作業時間を自動計測する。従来のカメラ映像を直接利用する方式では、作業内容を認識するために作業者の動作を数千サンプル学習させる必要があった。骨紋では作業者の動きを最もよく表す

骨格情報を使うため、10サンプル程度の骨格情報を学習させるだけで作業内容の認識が可能である。さらに、作業者の体格差を吸収できるように学習させるため、同じ作業内容であれば、学習時と異なる作業者でも作業内容の認識が可能である。この技術は、作業員の作業内容を解析して生産性向上の分析に貢献する。

製造現場での評価の結果、骨紋によって監督者の作業分析の工数を10分の1に削減できることが明らかになった。今後、実用化に向けて検証を重ねていく。

## 4. インフラ領域

### 4.1 インフラ制御の高度化

国内では労働人口の減少や近年の大規模自然災害の増加等を背景に、IoT活用による社会インフラの効率的な運用や維持管理に対するニーズが高まっている。作業員を現場に派遣することなくインフラ設備を遠隔監視するためには広域を高い信頼性でカバーする無線通信技術が重要になる。

インフラ向け無線通信技術の一例として、当社は電力スマートメータ用に920MHz特定小電力無線を適用した無線マルチホップネットワークを実用化している。スマートメータネットワークでは30分ごとの検針データをメータ間で無線中継しながら電力会社へ送信することで、直接通信では電波が届かない電力会社管内の広域に対する自動検針を実現している。

また、電力インフラでは、今後更なる導入拡大が予想される再生可能エネルギー(以下“再エネ”という。)に対応した電力網の安定化が運用上の課題に挙がっている。再エネの発電量は、天候に応じて数十秒程度で大きく変動するため、接続した電力網の電圧を高頻度に測定して適正值に制御する必要がある。このような短周期での広域監視制御に対応するために、当社は無線マルチホップネットワークの低遅延化に関する技術開発を進めており、無線信号の変調処理を中継情報と監視制御情報に対して個別に行い、中継情報を先行復調することで無線中継処理にかかる遅延を短縮する逐次復調処理技術を開発した<sup>(4)</sup>。この技術によって、無線信号全体の復調処理を待たずに中継情報の復調だけが完了した時点で中継先の選択を開始でき、無線中継に要する遅延を低減できる。

### 4.2 IoT社会を支える光通信網

日本国内では2020年に5Gの実サービスが始動したが、その超高速大容量、超低遅延、多数同時接続といった従来の移動体通信を超えた特長によって、単なる通信手段からAIやIoTの社会への浸透を加速するなど、未来のIoT社

会を創造する重要な基盤技術になることが期待される。さらに2030年の実現を目指したBeyond 5Gに向けた議論も既に開始され、その実用化に大きな期待が寄せられている。これら次世代の移動体通信ネットワークでは、従来の100倍から1,000倍にも達する超大容量ユーザー・基地局を効率よく収容する手段として、その幹線ネットワークである光通信技術に対する期待がますます高まっている。これを受けて当社は、2018年から国立研究開発法人 情報通信研究機構(NICT)の高度通信・放送研究開発委託研究として“Beyond 5Gに向けたモバイル収容大容量光アクセスインフラの研究開発”，及び“超並列光ネットワーク基盤技術の開発”を受託し、ユーザー当たり100Gbpsの超大容量無線ユーザーを効率よく収容可能な新たな光伝送技術、光変復調技術、光信号処理技術の研究を開始している<sup>(5)</sup>。高速・大容量、高信頼化が進む光通信技術は、未来社会の基盤をなし、例えばテレワークの拡充や分散オフィスによる事業継続、再エネ仮想発電所によるエネルギー安定供給などにも広く貢献する。

さらには、これら次世代の光通信技術を中心に、2030年の未来社会に貢献する新たな技術、ユースケースをオープンに共創する場としてIOWN(Innovative Optical and Wireless Network) Global Forumが2020年4月から開始された。当社もスポンサーとして参画することでその活動を推進する一翼を担うなど、光通信技術を軸にした未来社会への貢献に向け、その活動の場を拡大している。

#### 4.3 安心・安全を支える映像技術

インフラ向けの監視カメラ市場は、映像管理(Video Management System: VMS)や映像解析(Video Content Analysis: VCA)を活用した各種ソリューションの展開によって、国内外で拡大している。

このような需要の増加に対応して、当社グループでは、Maisartを用いて人物検出や不審行動検出を行う映像解析

ソリューション“kizkia”を実用化している。また、画像式水位計測装置“フィールドエッジ”も市場展開しており、近年の局所豪雨や巨大化した台風で氾濫する河川を監視するシステムを提供している。これによって、自然災害に対する安心・安全なソリューションの実現に寄与している。さらには、複数のカメラ映像を、上空から見下ろしたような映像に合成する俯瞰(ふかん)映像合成システム“Fairyview”を開発し、これによって監視員の労働人口の減少にも対応可能な製品を実用化している。広い範囲を複数の監視カメラで監視する場合、従来の映像監視システムでは、カメラ同士の位置関係や向きが、監視する現場とは一致しない個別の映像として表示されていた。そのため、広い範囲を移動する監視対象の追従・位置把握が困難という課題があった。Fairyviewは、この課題を解決し、監視業務を効率化するものである。このほか、インフラ維持に向けては、レーザーによる三次元計測データと壁面用高精細カメラによる高精細画像などを解析し、壁面ひび割れを図化するトンネル点検や鉄道沿線計測に提供している。VCAの分野では、解析結果に基づく情報提供など、監視用途以外にもカメラ映像の活用が拡大しており、今後も需要の増加が予想される。

## 5. モビリティ領域

### 5.1 列車制御を支える通信技術の高度化

従来の列車制御システムは、列車の在線位置を車軸によるレール間短絡で電気的に検知する軌道回路や、信号機などの地上設備を主体に構成されており、設備の維持管理コスト等の課題があった。これに対して地上設備の大幅な削減が期待できる無線式列車制御システム(図3)を実用化した。無線式列車制御システムでは、列車が地上子や自車の速度情報で計算した位置情報を基地局へ無線伝送し、地上

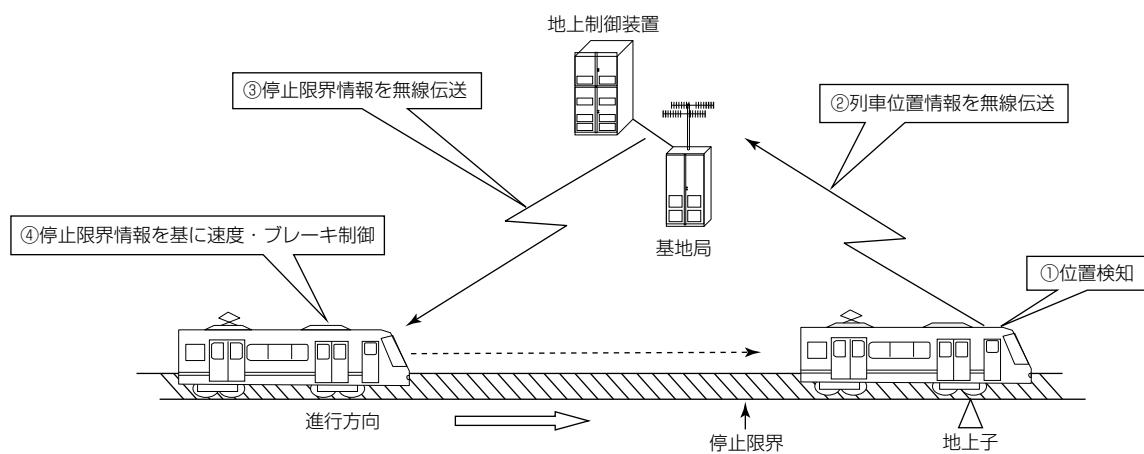


図3. 無線式列車制御システム

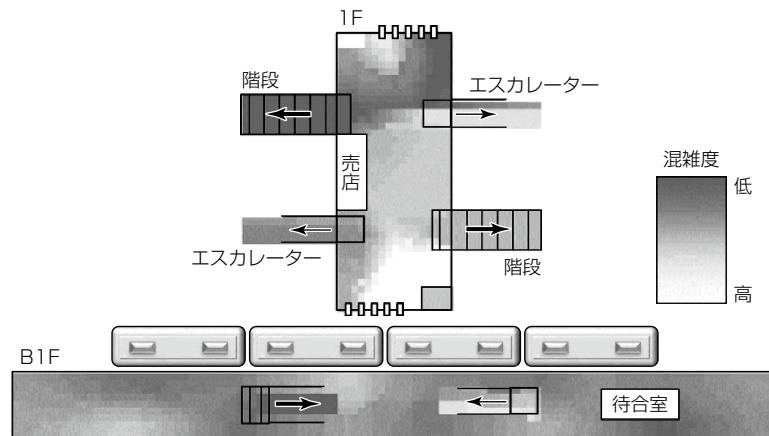


図4. 駅全体の混雜ヒートマップ

制御装置が受信した位置情報を基に後続列車に対する停止限界情報を生成して、基地局から列車へ無線伝送する。後続列車は、受信した停止限界を超えないようにブレーキパターンを作成して自車の速度を制御する。安全な列車制御を支える無線伝送には、高い信頼性が求められ、複数のアンテナを用いるダイバシティ技術と同一情報の複数回再送を適用することで担保している。

また最近では人口減少社会の到来による運転士等の不足に備えるため、列車制御システムを更に高度化した既設在来線での自動運転の実現が望まれている。この場合、列車の出発制御や制動操作等、列車と地上との間で伝送する情報量が増えるため、無線通信の伝送容量拡大が課題になる。これに対して当社は、送信信号の位相に加えて、二つの送信ダイバシティアンテナ間の送信信号の相対的な振幅・位相にも情報を乗せることで周波数帯域幅を増やさずに伝送容量を拡大する技術を開発している<sup>(6)</sup>。

## 5.2 公共交通機関の映像監視技術

駅や空港では利用者の安全確保、スタッフの業務効率化、運行遅延の抑制などの面から、混雑緩和のニーズが高まっている。混雑緩和は混雑の状況を正確に把握し、利用者を適切に誘導することが重要であり、当社でも幅広い監視カメラ製品を展開している。

そこで当社は、IoTシステムとして設置される監視カメラの映像を解析して、人数や混雑度(人密度)を推定する群集解析技術を開発した。混雑時は人が重なり一部が見えない映像になるため、従来では人数推定が困難であったが、AIを用いて人の重なり具合から人数や混雑度を90%の精度で推定することに成功した。図4は駅の複数の監視カメラ映像を使って混雑度を推定した混雑ヒートマップである。このように駅全体の混雑状況を利用者やスタッフに提示することで、混雑緩和に向けた利用者の適切な誘導が可能に

なる。列車内カメラの増設も進んでおり、今後は列車内の混雑情報も取り入れ、沿線全体の安心・安全を支えていく。

## 6. むすび

Society5.0の実現に向けたIoT時代に必要になる通信・映像技術の展望及び技術課題に対する取組みを述べた。情報通信技術の進展は著しく、10年後に訪れるであろうBeyond 5Gに向けた議論を通じた研究開発や、未開拓ではあるが将来有望視されているテラヘルツの利用についても研究を進めている。Society5.0の未来社会では様々な物理通信網が有機的に接続された災害に強いレジリエントなネットワークが形成され、その上に例えば知的・身体的障がいや物理距離のハンディキャップを克服するような超臨場感を持ったテレエグジスタンス、テレツーリング、遠隔医療、デジタルツインなどのサービスの実現が考えられる。

このような未来社会では情報通信に関わる要素技術の進展が必要なだけではなく、これら要素技術を統合し、システム全体を制御する技術、例えばネットワーク仮想化技術や集まつくる映像を含む様々な情報を有機的に結び付けてリアルタイムで解析する技術などが重要になってくると考えられる。それらの研究開発を加速し、安心・安全・快適な未来社会の実現に貢献していく。

## 参考文献

- 佐藤浩司, ほか: IoTゲートウェイのセキュリティ技術, 三菱電機技報, 92, No.6, 356~360 (2018)
- 長谷川史樹, ほか: 第5世代移動通信システムの標準化, 三菱電機技報, 93, No.9, 541~545 (2019)
- Nagasaki, A., et al.: A Method of Transport Abstraction for 5G Radio Access Network, CNSM2018 (2018)
- 広域無線マルチホップネットワーク技術, 三菱電機技報, 94, No.1, 45 (2020)
- Suzuki, N., et al.: 100Gb/s to 1Tb/s based coherent passive optical network technology, J. Lightw. Technol., 36, No.8, 1485~1491 (2018)
- 高速移動体通信向け相対空間マッピング変調方式, 三菱電機技報, 90, No.1, 38 (2016)

# 俯瞰映像合成技術“Fairyview”

“Fairyview” : Aerial - view Video Synthesis Technology

菊地顕仁\*  
Akihito Kikuchi  
斎藤弘紀\*  
Hironori Saito  
小泉信幸†  
Nobuyuki Koizumi

## 要 旨

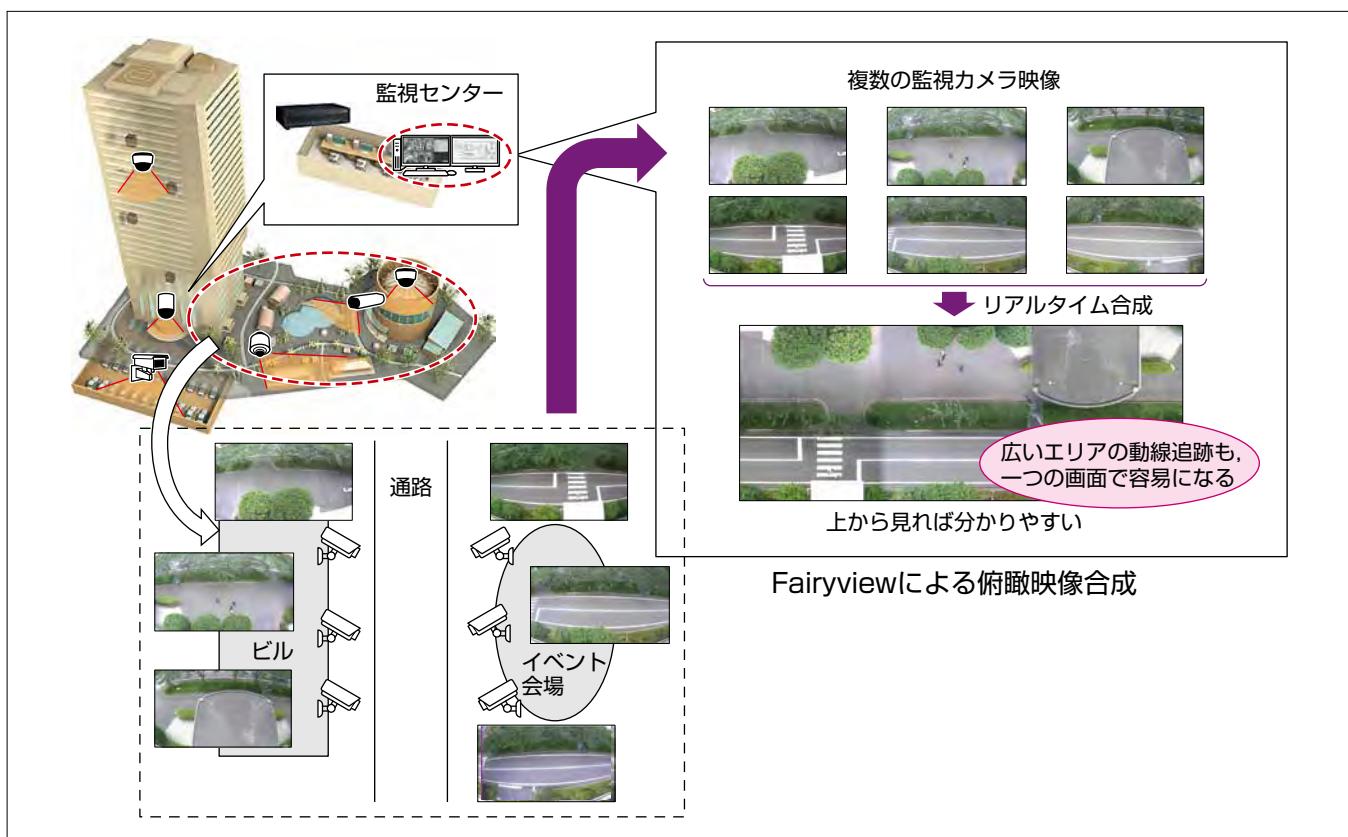
近年、国土交通省の安全性・テロ対策に対する指導強化を背景に日本国内の監視カメラの設置台数は堅調に増加している。また、少子高齢化・人口減に伴う消費支出減少、労働人口減少の対策として運営経費等の削減、作業効率化、省人化が求められている。

三菱電機は、コンビニエンスストアに代表される中小規模小売店向けに、簡単設置可能な監視システムパッケージ製品“MELOOK3シリーズ”を展開している。一方、大型施設・ビル等大規模監視システム向けには、監視カメラ台数最大512台収容可能なMELOOK3マルチタイプシステムを展開している。

大規模監視システムでは、監視エリアが広く、多数の監

視カメラが設置されているため、監視者はそれら複数の監視映像を切り替えて監視する必要がある。また、不審者を発見して追尾する場合、カメラの設置位置をあらかじめ把握し、不審者の動線を予測しながら監視映像を切り替えて監視するため、作業効率が悪く、監視者の負担が大きかった。

監視作業の効率化による監視者の負担軽減のため、複数の監視映像を俯瞰(ふかん)・合成し、一つの監視映像として表示可能な当社の俯瞰映像合成技術“Fairyview(フェアリービュー)”を使用した俯瞰映像合成装置を“MELOOK3マルチタイプシステム”的新規ラインアップとして2020年3月から販売を開始した。



## 俯瞰映像合成のイメージ図

図は大型施設内の通路を挟んだ二つの建物に各3台の監視カメラを設置した例を示している。従来のシステムでは、それぞれの監視映像が独立してモニタに表示されている。Fairyviewを使用することで複数の独立した監視映像を一つの監視映像として見ることができ、かつ、監視エリアを上から見ることができるイメージを示している。

## 1. まえがき

近年の社会情勢の変化によって、安心・安全に対する意識が高まる一方、少子高齢化・人口減による労働人口減少もあり、映像監視分野でも監視作業の効率化による省人化が市場から求められている。

当社は、大型施設・ビル等の大規模監視システム向けに“MELOOK3マルチタイプシステム”<sup>(1)</sup>を2018年から市場に展開してきた。大型施設・ビルでは、多くの監視カメラが用いられており、監視者は複数の監視カメラの映像から監視すべき映像を選択し監視している。しかし、監視すべき映像を選択するにはあらかじめ監視カメラの設置位置を正確に把握しておき、不審者の動線を予測して必要な映像を選択する必要があり、負担が大きかった。監視者を増やして負担を軽減するには経費がかかり、経営者の負担も大きい。

このような問題を解決するため、当社の俯瞰映像合成技術FairyviewをMELOOK3マルチタイプシステムに取り込む俯瞰映像合成装置の開発を行った。

本稿では、俯瞰映像合成技術Fairyviewの技術と俯瞰映像合成装置について述べる。

## 2. 俯瞰映像合成技術Fairyview

### 2.1 従来の映像監視システムの問題

従来の映像監視システムでは、監視カメラで撮影した映像をそのままモニタに表示していた。そのため、大型施設や大型ビルなど多数の監視カメラが設置されているシステムでは、監視者がモニタに表示された複数のカメラ映像を見て監視業務を行っている(図1)。

この監視システムでは、二つの問題がある。

#### (1) 監視映像に連続性がないため、作業効率が悪い

監視対象エリアを通常の監視カメラ複数台で撮影した場合、それぞれの監視カメラの映像には連続性がない。その



図1. 従来の監視システムでの映像表示例

ため、人物や自動車などの移動物体が次にどの映像に映るかなどの動線を監視者が予測しながら監視する必要があり、必要に応じて監視カメラ映像を切り替えることもある。これでは作業効率が悪く、対象人物を見逃すおそれがある。

#### (2) 人物の位置把握のため、監視者の負担が大きい

監視カメラで撮影した映像に映った人物の位置を把握するためには、監視者が対象人物と周辺の物体の配置から、監視対象エリア上での位置関係を目測する必要がある。これには監視者の教育や経験が必要になり、監視者だけでなく監督者の負担も大きくなる。

### 2.2 当社の俯瞰映像合成技術の特長

2.1節の問題に対して、当社の俯瞰映像合成技術Fairyviewを用いて、監視業務の効率化を目的にした俯瞰映像合成装置を開発した(図2)。Fairyviewは、監視対象エリアを撮影した複数台の監視カメラの映像を俯瞰・合成して、エリアを真上から見たような1枚の映像にする技術である。

Fairyviewの特長は、次の2点である。

#### (1) 高解像度カメラでのリアルタイムな映像合成

一般的に、複数のカメラ映像から俯瞰映像を合成するには、映像のひずみ補正、俯瞰映像への変換、カメラ映像の位置合わせを1フレームごとに実行する必要がある。そのため、近年増加する高解像度の監視カメラ映像での俯瞰映像合成処理には、大規模計算機が必要になる。

今回開発した俯瞰映像合成装置では、合成に使用する監視カメラ映像の画素と、俯瞰合成後の映像の画素の対応テーブルを事前に作成する。この画素間対応テーブルを用いることで、映像合成時に大規模計算機を必要とせず、GPU(Graphics Processing Unit)コンピューティングによるコンパクトな俯瞰映像合成が可能になる(図3)。

これによって、6台の監視カメラで撮影したフルHD(High Definition)(1920×1080), 30fps(frames per second)の映像でも、50ミリ秒以下の俯瞰映像合成を実現した。

#### (2) 監視カメラ映像間の映像合成

複数の監視カメラ映像を俯瞰映像へ変換して合成する場合、映像の継ぎ目で被写体が途切れて、継ぎ目が目立ってしまう。そこで、Fairyviewでは、監視カメラの撮影範囲が重畳する領域で、2台のカメラの透明度を調整して合成する、アルファブレンド処理を施すことで、継ぎ目の目立

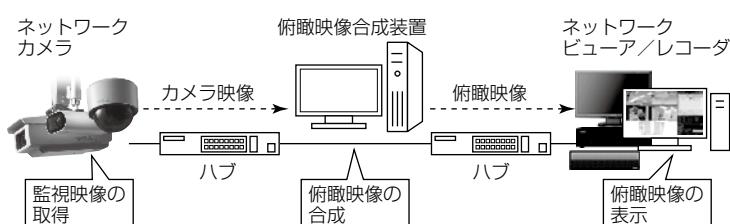


図2. 映像監視システムの構成

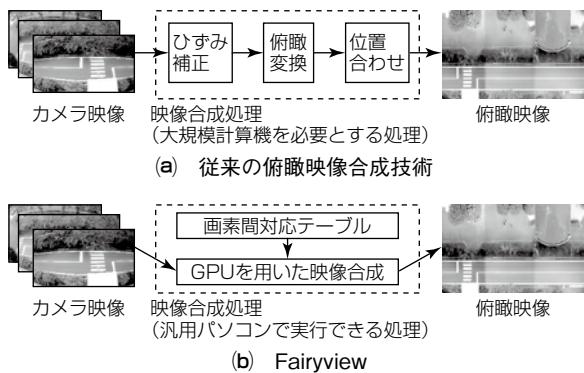


図3. 映像合成フローの違い

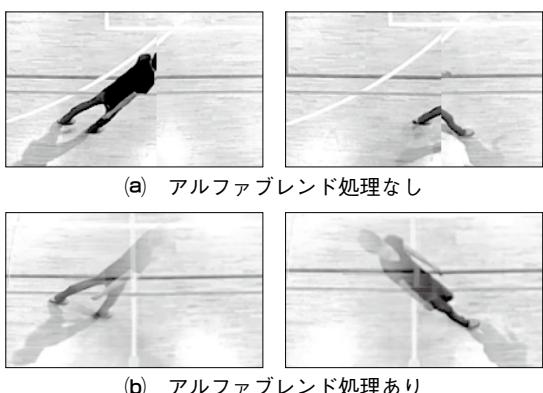


図4. アルファブレンド処理有無の違い

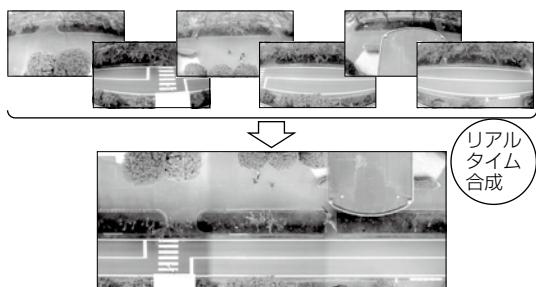


図5. Fairyviewで合成した俯瞰映像の例

たない映像合成を実現した(図4)。

### 2.3 Fairyviewを用いた監視業務の効率化

Fairyviewで合成した映像の一例を図5に示す。Fairyviewを用いることで、監視対象となる広域なエリアを一目で監視可能になり、2.1節で述べた従来の映像監視システムでの問題である人物や物体の動線把握と位置把握が容易になる。

## 3. MELOOK3マルチタイプシステムへの応用

ここまでFairyviewについて述べてきた。この章では、大規模監視システムにこの技術を応用した“MELOOK3マルチタイプシステム”について述べる。

### 3.1 システムの概要

図6は“MELOOK3マルチタイプシステム”で、Fairyviewを用いた俯瞰映像合成装置と連携する各システム構成装置の役割を示したものである。

監視カメラは、監視エリアを撮像し、符号化した映像をネットワークに配信する。俯瞰映像合成装置は、複数の監視カメラから配信される映像を取り込み、一旦、復号後、俯瞰映像を合成して、一つの監視映像として監視カメラと同様に符号化し、ネットワークに再配信する。レコーダは俯瞰映像を記録し、再生する。

ネットワークビューアは、俯瞰映像を復号し、監視モニタに表示する。

俯瞰映像合成装置が、監視カメラと同様の形式で俯瞰映像をネットワークに再配信することで、既設の“MELOOK3マルチタイプシステム”的各構成装置を変更することなく、容易に追加導入できる。

### 3.2 システムの特長

FairyviewをMELOOK3マルチタイプシステムに取り込み、応用することで天井のないエリアの監視、死角の少ない監視、パノラマ表示による広視界の監視が可能になり、より効率的な監視作業が行える。

#### 3.2.1 オープンスペースの監視

天井のない監視エリアでも壁に取り付けた監視カメラの映像を俯瞰することで図5に示すようにあたかも真上から監視しているように監視エリア全体を一つの監視映像と

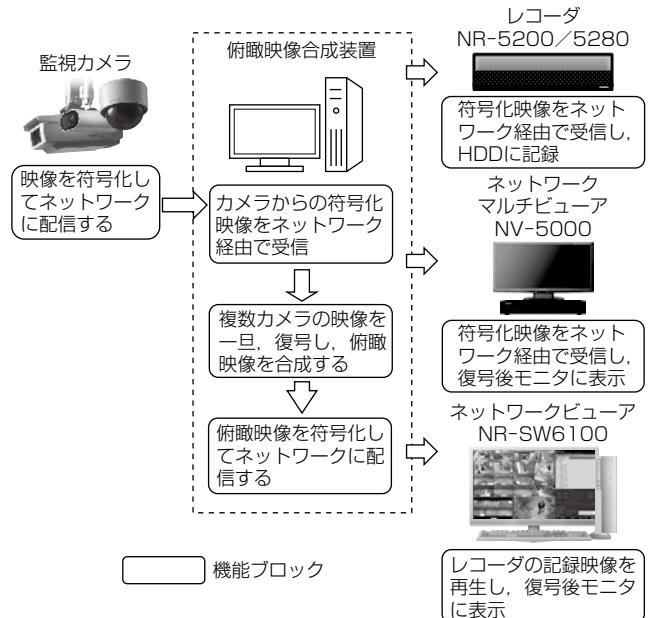


図6. “MELOOK3マルチタイプシステム”でのシステム構成装置の役割

して見ることができる。これによって不審者の動線監視が容易になり、監視者の負担が軽減される。また、モニタ上に監視エリアの全体映像と個別カメラの詳細映像をネットワークビューアに同時に表示することでより効率的な監視作業が行える(図7)。

### 3.2.2 死角の少ない監視映像の実現

全方位カメラの映像は単視点での映像のため、図8(a)のように監視エリア内にパーティション等の障害物があると死角がでてしまう。一方、俯瞰映像合成装置では、複数の監視映像を俯瞰・合成するので、死角を作る障害物があっても各監視カメラの死角を別の監視カメラで補完できて、死角の少ない監視映像を実現できる(図8(b))。

### 3.2.3 パノラマ映像による監視

水平方向・円周上に監視カメラを設置することで図9に示すパノラマ映像を合成できる。

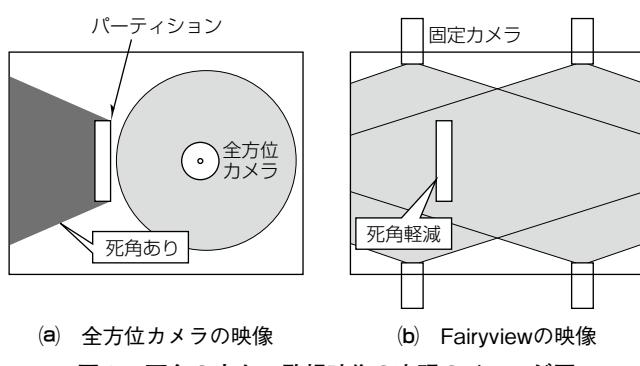
駅ホームのように監視エリアが水平方向に長い場合、パノラマ180度の映像で移動体の動線を一目で把握できる。また、一般的な全方位カメラに比較して、ひずみのないパノラマ360度(全方位)での映像監視もできる。

### 3.3 俯瞰映像合成装置の仕様

俯瞰映像合成装置の製品仕様を表1に示す。



図7. ネットワークビューアNR-SW6100での監視イメージ



(a) 全方位カメラの映像 (b) Fairyviewの映像  
図8. 死角の少ない監視映像の実現のイメージ図

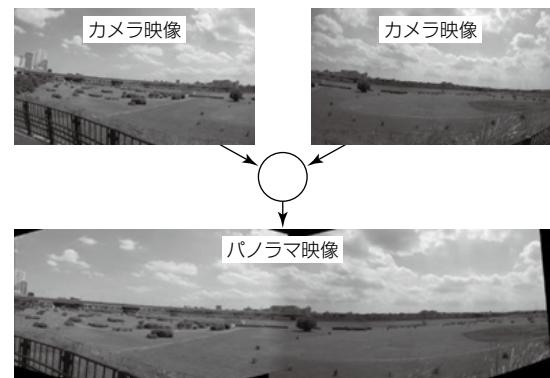


図9. パノラマ合成のイメージ図

表1. 俯瞰映像合成装置の仕様

OS	Windows <sup>(注1)</sup> 10 Pro
CPU	Intel Core <sup>(注2)</sup> i7 3.2GHz以上
GPU	NVIDIA GeForce GTX/RTX <sup>(注3)</sup> シリーズ
並列処理プラットフォーム	CUDA 8.0 <sup>(注3)</sup>
サポートカメラ	当社製MELOOK3カメラ NC-7020/7620/7820
映像入力	
入力数	6本
符号化方式	H.264
フレームレート	30fps
ビットレート	6 Mbps
解像度	1920×1080
映像出力(俯瞰映像)	
出力数	1本
符号化方式	H.264
フレームレート	30fps
ビットレート	6 Mbps
解像度	1920×1080

(注1) Windowsは、Microsoft Corp.の登録商標である。

(注2) Intel Coreは、Intel Corp.の登録商標である。

(注3) NVIDIA、GeForce GTX、GeForce RTX、CUDAは、NVIDIA Corp.の登録商標である。

CUDA: Compute Unified Device Architecture

## 4. む す び

Fairyviewを用いた俯瞰映像合成装置を現行“MELOOKマルチタイプシステム”に取り込むことで複数の監視映像を一つの映像として見ることが可能になり、監視者の負担が軽減した。特に、屋外駐車場等の天井のないオープンスペースでも監視エリアを上から監視でき、不審者の動線監視が容易になった。今後は、5G／ローカル5G(第5世代移動通信方式)の適用によって無線での大容量通信が可能になる。5Gとの連携によって、更なる高精度映像による監視精度の向上、無線接続による柔軟なカメラ配置が可能な監視システム等への展開を図るとともに、今後もより安心・安全な社会に貢献できるように映像監視システムの高機能化、高付加価値化を推進していく。

## 参 考 文 献

- (1) 菊地 舞, ほか: MELOOK3大規模監視システム, 三菱電機技報, 92, No.6, 371~375 (2018)

# 5Gによるネットワークカメラの新たな活用シーン

New Usage Scenes of Network Cameras by 5G Networks

谷崎雄太\*  
Yuta Tanizaki  
松本雅之\*  
Masayuki Matsumoto

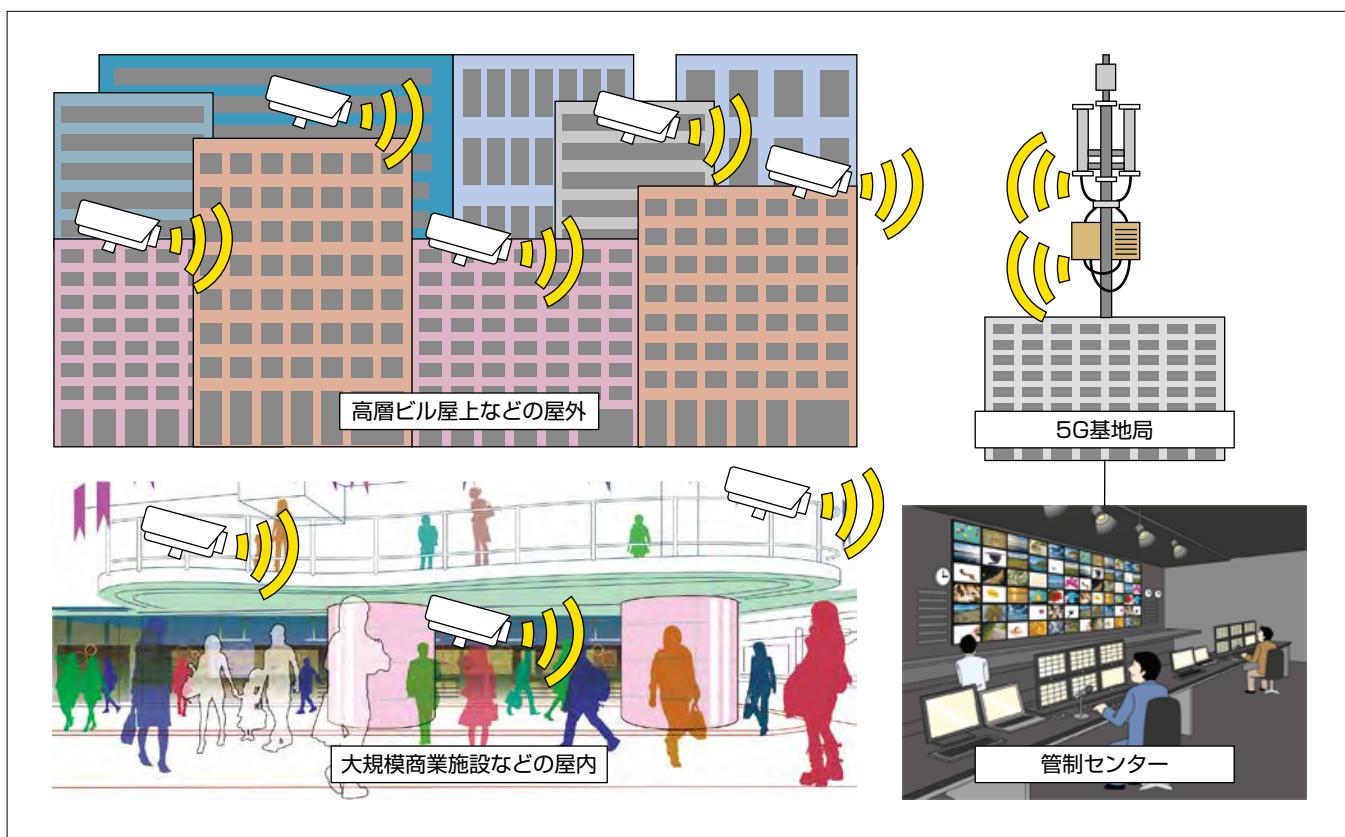
## 要 旨

第5世代移動通信システム(5th Generation: 5G)は、来るAI(Artificial Intelligence)・IoT(Internet of Things)時代のICT(Information and Communication Technology)基盤として、大きな注目を集めている。特に、5Gの特長である超高速(最大伝送速度: 20Gbps)・低遅延(無線区間1ms以内)伝送は、4Gでは実現が困難とされていた自動運転・重機の遠隔操作等への応用が期待されている。また、5Gの超高速・低遅延伝送によって、無線でありながらも、有線に近い性能が期待できるため、様々な機器のケーブルレス化に向けた議論がなされている。

今回、三菱電機のネットワークカメラの伝送路を5Gで無線化することによる新たな活用シーンの実現に向けて、株NTTドコモと共同で実証実験を行った。

実証実験では、ネットワークカメラの伝送路に5Gを適用した場合の、遅延やスループットによる映像表示への影響を評価するとともに、より5Gの特長を生かせると考えられる当社の俯瞰(ふかん)映像合成技術“Fairyview(フェアリービュー)”を用いた検証も併せて実施した。その結果、5Gを適用した場合に、条件によるものの、8台以上のネットワークカメラの映像をアップリンクで伝送した際にも、映像損失が発生せず、従来の有線接続に限りなく近い映像品質の実現が可能であることが分かった。

今後は、5G商用環境での実証を継続して行うとともに、無線給電技術の併用による電源も含めた完全なケーブルレス化や、ネットワークカメラ以外の様々な当社製品と5Gを組み合わせた新たな可能性を検討していく。



## 5Gによるネットワークカメラの新たな活用シーン例

従来、ケーブル敷設の問題から設置が困難であった高層ビル等の屋外へのネットワークカメラ設置に関して、5Gによる無線化によって、画質や遅延といった映像品質を有線と同等に保ちながら、自由度の高い設置が可能になる。また、ショッピングモール等の屋内に関しても、場所を選ばず自由度の高いカメラ設置が可能になることで、本来の防犯・監視用途以外にも、カメラ映像を人流解析に活用し、新たな付加価値の提供が可能になる。

## 1. まえがき

第5世代移動通信システム(5G)は、来るAI・IoT時代のICT基盤として、大きな注目を集めている。特に、5Gの特長である超高速(最大伝送速度: 20Gbps)・低遅延(無線区間1ms以内)伝送は、4Gでは実現が困難とされていた自動運転・重機の遠隔操作等への応用が期待されている。

また、5Gの超高速・低遅延伝送で、無線でありながらも、有線(光ファイバ等)に近い性能が期待できるため、様々な機器のケーブルレス化に向けた議論がされている。

本稿では、当社ネットワークカメラの伝送路を5Gによって無線化することで実現可能になる、新たな活用シーンを提案する。また、実現に向けた(株)NTTドコモとの共同実証の結果とともに、将来に向けた展望を述べる。

## 2. ネットワークカメラ技術動向

### 2.1 ネットワークカメラシステム

ネットワークカメラシステムとは、いわゆる監視カメラと呼ばれる防犯や安全対策を目的にしたカメラとその映像を記録する録画装置をネットワークで接続したシステムである。以前はアナログ方式が主流であったが、現在はデジタル方式が主流になっている。カメラから入力した高精細の映像を高効率の符号化方式で圧縮し、カメラと録画装置はIP(Internet Protocol)ネットワークで接続する。

当社ネットワークカメラの現在の主力製品は、2015年に発売した高画質・簡単操作が特長の“MELOOK3”である(図1)。

MELOOK3は業界初<sup>(注1)</sup>のオールインワンタイプ“MELOOK μ”的流れをくむ3機種目であり、ベーシックタイプ、アナログからの更新が可能な同軸タイプ、中大規模システム対応のマルチタイプの3タイプで構成している。カメラはフルHD(High Definition)(2K)・30コマ/秒の高画質・高精細の映像を、国際標準規格の高効率圧縮方式H.264で符号化し、録画装置ではカメラ映像をリアルタイ



図1. MELOOK3ネットワークカメラシステムの機器

ムで記録するとともに最大16画面×2モニタでの表示が可能である。

これまでの監視カメラは、犯罪や事故が起こった際の事後確認や、設置することによる牽制(けんせい)が目的であったが、映像の高画質化とネットワークへの接続によって、リアルタイムでの事象検出や遠隔地からの映像確認など、従来までの事後確認用途から、リアルタイムでの事象検出、さらには映像解析を用いた事前検知やビッグデータとしての活用など大きく変わろうとしている。

(注1) 2007年11月6日現在、当社調べ

### 2.2 新たな設置ニーズの高まり

映像の高画質化とともに、より広いエリアの撮像や死角をなくす目的で設置するカメラの需要も増加している。

大型ショッピングセンターなどでは1フロアに100台以上、店舗全体で400~500台にも上る。また、安全・防災面では、駅や道路など公共施設を中心にカメラの設置場所が増えている。複数のカメラ映像を確認する際には、

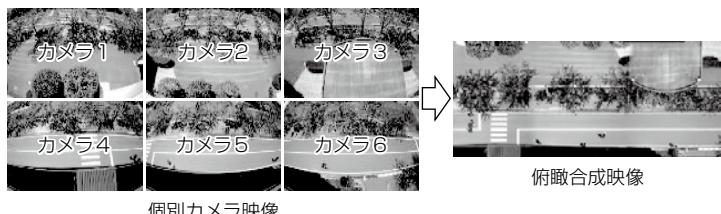
- (1) 1画面内にカメラ映像を複数表示するマルチ画面表示
  - (2) 一定時間で別マルチ画面に切り替わるシーケンス表示
- の二つが一般的であるが、複数のカメラ映像の一つに異常が見つかっても、慣れた監視員でなければすぐにどの位置に設置されているカメラであるか判別するのは困難であり、対象が画角から外れると見逃す可能性も高い。

そのため、360度の視野角を持つ全方位カメラによる頭上からの映像を使った人物動線の混雑などの全体確認を行うケースが近年増えている。

### 2.3 Fairyviewの概要

全方位カメラの映像は、魚眼レンズによる撮像のため、カメラより遠方の周囲映像のひずみが大きく、また中央1点からの撮像のため、商品陳列棚など高さのある障害物による死角が生じるという欠点がある。また、より広い範囲を映すために4K/8K画質といった高解像化が進んでいるが、この映像を記録・表示する録画装置やパソコンには、より高い性能が求められるなど制約が多い。

これらの欠点や制約を踏まえて、当社は俯瞰映像合成技術Fairyviewを開発した(図2)。Fairyviewは、一般的なネットワークカメラ映像を合成することで俯瞰映像やパノラマ映像を生み出すことを目的にした技術である。映像合成には専用パソコンが必要になるが、それ以外は従来のネットワークカメラや録画装置が使用可能であり、MELOOK3マルチタイプのオプションとして2020年4月に製品化された。従来のネットワークカメラ映像を使用し、複数のカメラで撮像することから、ひずみと死角が少ない俯瞰映像を得ることが可能である。



個別カメラ映像

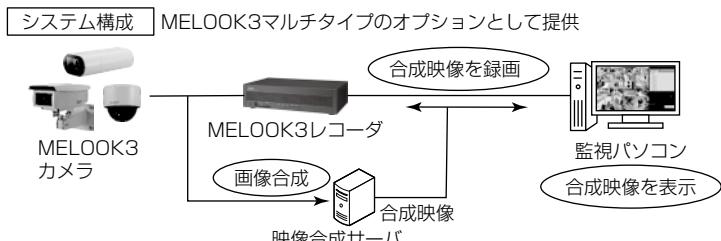


図2. Fairyviewの概要

製品版では、フルHD(2K)のカメラ映像を最大6台(12K相当)までリアルタイムで合成し、フルHD(2K)で出力することが可能である。また、機器性能の向上に伴って将来的にはより多くのカメラ映像の合成を行い、全方位カメラでは得られない、より広い画角での俯瞰映像のリアルタイム合成が実現見込みである。

#### 2.4 ケーブルレス化による新たな活用シーン

Fairyviewの映像合成に用いるカメラの設置場所は、全方位カメラ同様に屋内・屋外どちらも高所が中心になる。高所へのカメラ設置は、ケーブルの長距離配線や高所での作業による工事期間やコストの増大が懸念され、以前から無線化のニーズが強かった。無線によるカメラ映像の配信は無線LAN(Wi-Fi<sup>(注2)</sup>)や、3G/LTE(Long Term Evolution)といった通信回線が利用されてきたが、安定的な接続性と高画質映像に必要な帯域の確保、そして利用コストに課題があり、Webカメラのような限定的な利用にとどまっている。

これらの課題をクリアできる無線ネットワークインフラがあれば、カメラの設置場所は制約を受けることが少なくなり、カメラの利用用途が飛躍的に広がることが予想される。Fairyviewでも、ビルの屋上や商業施設の壁面、道路脇の電柱の上などへの設置が容易になり、公共施設を中心により広域での活用シーンが増えることが期待され、3章で述べる5G/ローカル5Gはその最有力と考えられる。

(注2) Wi-Fiは、Wi-Fi Allianceの登録商標である。

### 3. 5Gの技術動向

#### 3.1 5G

5Gは、携帯電話等に用いられる第5世代移動通信システムの規格を指す。

2015年9月、国際電気通信連合の無線通信部門(ITU-R)が策定したIMT(International Mobile Telecommunications)ビジョン勧告の中で初めて5Gのコンセプトが発表され、通信速度や遅延についての主要能力を示すと同時に、①高速大容量、②高信頼・低遅延、③多数同時接続の三つの利用シナリオが5Gの技術性能要件として合意された。

また、5Gの国際標準化を進める団体である3GPP(Third Generation Partnership Project)も、IMTビジョン勧告を受けて、シナリオに則した仕様や要求条件をまとめ、VR(Virtual Reality)/AR(Augmented Reality)、遠隔医療、自動運転などの多岐にわたるユースケースを挙げるとともに、三つの利用シナリオを実現するために、5Gの性能目標を表1のように定めている<sup>(1)</sup>。

これらの高い性能目標が実現されることによって、工場等に使用する、低遅延・高信頼が要求される通信回線の無線化に向けた議論も活発に行われている<sup>(2)</sup>。

しかし、表1は最終的な目標値であり、国内の通信事業者による5Gサービス開始時点(2020年春)での理論値は、おおよそDL(DownLoad):3Gbps、UL(UpLoad):200Mbps程度、遅延についてはLTEと大きな差がない見込みである。これは、5Gサービス開始時点ではLTEを5Gの制御用回線として利用するNSA(Non Stand Alone)構成であることが要因の一つとして挙げられる。今後、5Gだけの基地局で構成されるSA(Stand Alone)構成に移行し、8×8MIMO(Multiple Input Multiple Output)、256QAM(Quadrature Amplitude Modulation)の実装等によって、目標値へ近づいていく見込みである。

ただし、ネットワークカメラ1台当たりの伝送容量(UL回線)はフルHDで3Mbps程度、4K/8Kであっても数十Mbps程度と考えられ、設置台数等の条件にはよるもの、5Gサービス開始から間もない現時点であっても、十分に適用可能である。

#### 3.2 ローカル5G

5Gには、通信事業者が提供する5Gネットワーク(以下“公衆5G”という。)とは別に、用途に応じて企業や自治体等が自らの建物・敷地内といった特定エリアで、個別に構

表1. 5Gの性能目標

利用シナリオ	項目	目標値	
		DL	UL
高速大容量	伝送速度	20Gbps	10Gbps
	遅延	4.0ms	
高信頼・低遅延	遅延	0.5ms	
	信頼性	$1 \times 10^{-5}$	
多数同時接続	端末密度	100万台/km <sup>2</sup>	

築・利用できるローカル5G<sup>(3)</sup>と呼ばれる5Gネットワークが存在する。ローカル5Gの公衆5Gと比較した際の大きな利点として、

- (1) 5Gネットワークを自身で専有可能
- (2) 自身の土地内であればエリアを柔軟に設定可能といった点が挙げられる。

まず、(1)について、公衆5Gを利用する場合はどうしても不特定多数のユーザーとネットワークを共有することになるため、トライフィック状況によるスループット等への影響を避けることができない。これは、機器の遠隔操作等、低遅延・高信頼が求められるような場合には、重要な課題になり得る。次に、(2)について、公衆5Gは、広くエリアカバーをすることが大きな目的であるため、屋内など、個々の場所によっては、圏外になり、利用不可になる場合も想定される。

ローカル5Gは、これらの問題に対して、公衆5Gでは実現が困難なケースに対しても、解決策になり得る。

ネットワークカメラへの5G適用についても、映像をリアルタイムで処理する必要がある場合や、ある敷地内だけでの運用を行う場合には、ローカル5Gが適しているケースも十分に想定される。

## 4. 実証実験

### 4.1 背景

当社と(株)NTTドコモは5Gネットワークを使ったビジネス協創に向けた検討を重ねており、その一環としてFairyviewを含むネットワークカメラの可能性に着目し、(株)NTTドコモのドコモ5Gオープンラボ<sup>(注3)</sup>Yotsuyaで、商用環境と同等の5Gプレサービス環境(以下“5G(商用)”といふ。)を使ったネットワークカメラの各種動作検証を行ってきた。その成果は、ドコモオープンハウス2020<sup>(4)</sup>に出展するに至った。

出展に先立ち、当社と(株)NTTドコモは“俯瞰映像合成技術と5Gを活用した監視カメラサービスの実用化に向けた技術検証の連携協定締結”(2020年1月20日)と題した共同発表を行った。

(注3) ドコモ5Gオープンラボは、(株)NTTドコモの登録商標である。

### 4.2 実証構成と検証項目

実証実験で構築したシステムの構成を図3に示す。

今回、ネットワークカメラの伝送路として、

- (1) 有線(1000BASE-T)
- (2) LTE(商用)
- (3) 5G(商用)

の3種類を用いて比較検証を行った。LTE(商用)、5G(商用)ではアドレス解決のためVPN(Virtual Private Network)ルータを使用している。なお、この実験結果だけサービス開始後の検証値を含む。

検証項目として、表2に示す3項目に関して定量的な測定を行いつつ、映像のフリーズ・カクツキといった主観評価を行った。

映像確認の結果、5G(商用)でも、インターネット経由による遅延はあるものの、LTE(商用)と比較して改善されており、ネットワークカメラの伝送路として十分に適用可能であることを確認した。

### 4.3 Fairyviewの検証

4.2節での検証でも確認した、5Gの特長である大容量といった長所を活用するアプリケーションとして、Fairyviewを用いた二つの検証を実施した。

検証①(図4)では、Fairyviewの利用環境を想定し、複数のカメラのネットワーク経路を一つではなく複数設定することで、経路による遅延量の揺らぎによる、映像合成への影響がないことを確認した。

検証②(図5)では、複数のカメラ映像を伝送路に流した場合の映像への影響について、伝送路がLTE(商用)と5G(商用)のそれぞれの比較を目的に実施した。そのため、Fairyview用カメラ4台、通常カメラ3台、旋回カメラ1台

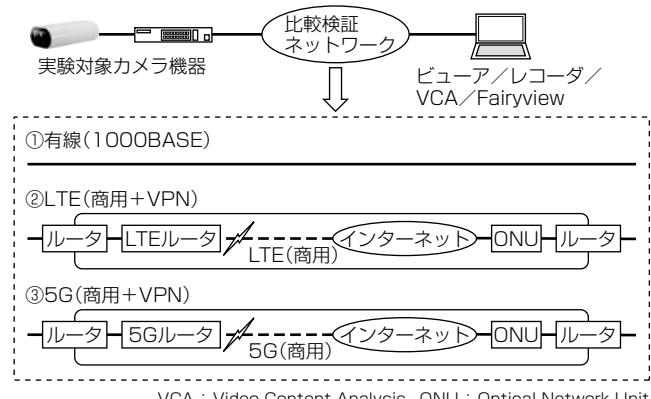


図3. 実証システムの構成

表2. 検証項目と測定結果

検証項目	有線	LTE(商用)	5G(商用)
平均UL スループット	96Mbps	3Mbps <sup>(注4)</sup>	28Mbps
遅延量 (ping平均)	1 ~ 2 ms	100ms	40ms <sup>(注5)</sup>
映像確認 (カクツキ、フリーズ)	正常	カクツキ・ フリーズ多発	正常 <sup>(注6)</sup>

(注4) 検証日時や機材によって差異が発生しており20Mbpsで映像伝送を出ることもあったが常時使用できるスループットを記載した。

(注5) プレサービス時はLTE(商用)と同じ100msであったが、サービス開始時には平均40msまで改善された。

(注6) プレサービス時は揺らぎに起因すると思われるカクツキの発生が確認された。

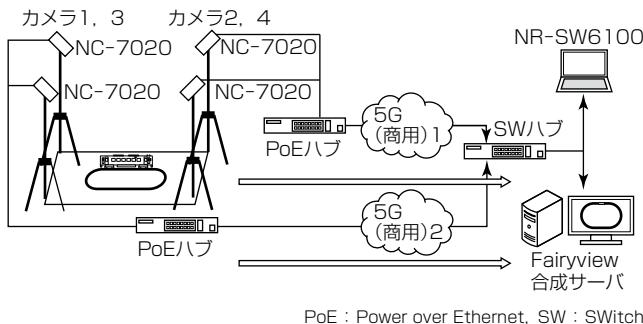


図4. Fairyviewの検証①(遅延量評価)

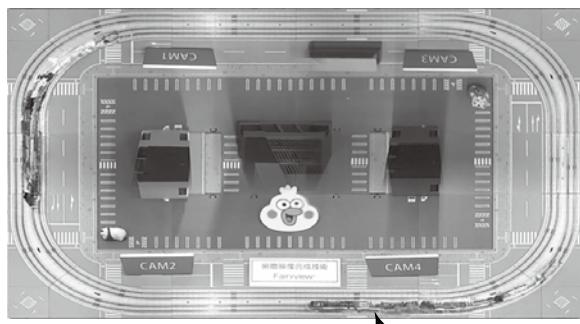


図7. 映像の表示崩れの一例(LTE(商用)の場合)

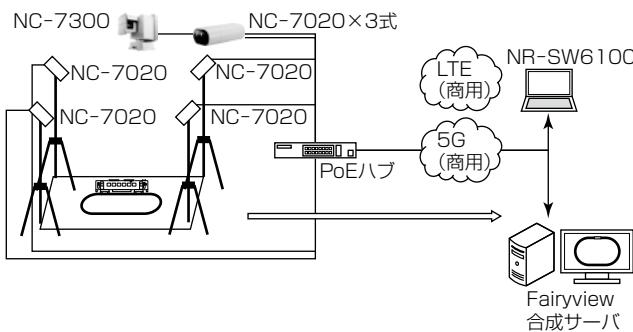


図5. Fairyviewの検証②(接続台数評価)



図6. Fairyview検証の様子

の合計8台のカメラを用いて、合計24Mbpsの映像配信を実施した(図6)。

LTE(商用)での検証時には、揺らぎに起因するパケット消失と考えられる映像の表示崩れが発生したが(図7)、5G(商用)での検証時は有線と変わらず安定した表示を行っていた。

またLTE(商用)では、使用機材や環境による実効帯域の変動が発生しており、多くのカメラ機器及び映像ストリームを使用するシーンでは、映像への影響がより顕著になると想定される。したがって、今後の新たなネットワークカメラ活用シーンの実現では、5Gが必要とされるシーンがより多くなることが予想される。

#### 4.4 今後の課題

今回の検証によって、5G回線はLTE回線と比較して

ネットワークカメラでの使用に適していることが分かった。2020年度は引き続き(株)NTTドコモと5G(商用)回線を用いた検証を実施し、顧客に責任を持って提案ができるようデータ収集を行っていく予定である。

ネットワークカメラを商用の5G回線で使用する場合の残る課題として、移動機側に付与されるグローバルIPアドレスが動的アドレスだけであり、カメラへの固定IPアドレス付与のためVPNを設定する必要があることである。この課題については、(株)NTTドコモからdOIC(docomo Open Innovation Cloud)を使ったIP付与方法の提案を受けており、引き続き検証を重ねて解決を図る。

## 5. む す び

ネットワークカメラの様々な設置ニーズに対応するため、伝送路に5Gを適用することで無線化した際の、新たな活用シーンを検討するとともに、実現に向けた実証実験について述べた。

実証実験の結果、5Gを適用した場合に、条件にはよるもの、有線と変わらない映像品質の実現が可能であることが分かった。

今後は、5G商用環境での実証を継続して行うとともに、当社で開発中の無線給電技術<sup>(5)</sup>と併用することで、電源も含めた完全なケーブルレス化も視野に入れた検討を行っていく。また、今回得られた知見を生かし、ネットワークカメラ以外の様々な当社製品と5Gを組み合わせた新たな可能性についても検討していく。

## 参 考 文 献

- (1) 3GPP : Servicerequirements for the 5G system, TS22.261 V17.2.0 (2020)
- (2) 5G - ACIA  
<https://www.5g-acia.org/>
- (3) 総務省 : ローカル5Gの概要について、新世代モバイル通信システム委員会報告 (2019)
- (4) DOCOMO Open house 2020 (2020年1月23日～24日開催)  
<http://docomo-rd-openhouse.jp/2020/>
- (5) 本間幸洋, ほか: 飛行中の無人航空機への無線送電技術, 三菱電機技報, 94, No.2, 134～138 (2020)

## 鉄道車両向け車内防犯システム

In-vehicle Security System for Railroad Vehicles

笠原裕志\*  
Hirosi Kasahara  
今尾勝崇†  
Masataka Imao  
菅谷元典‡  
Motonori Sugaya

### 要旨

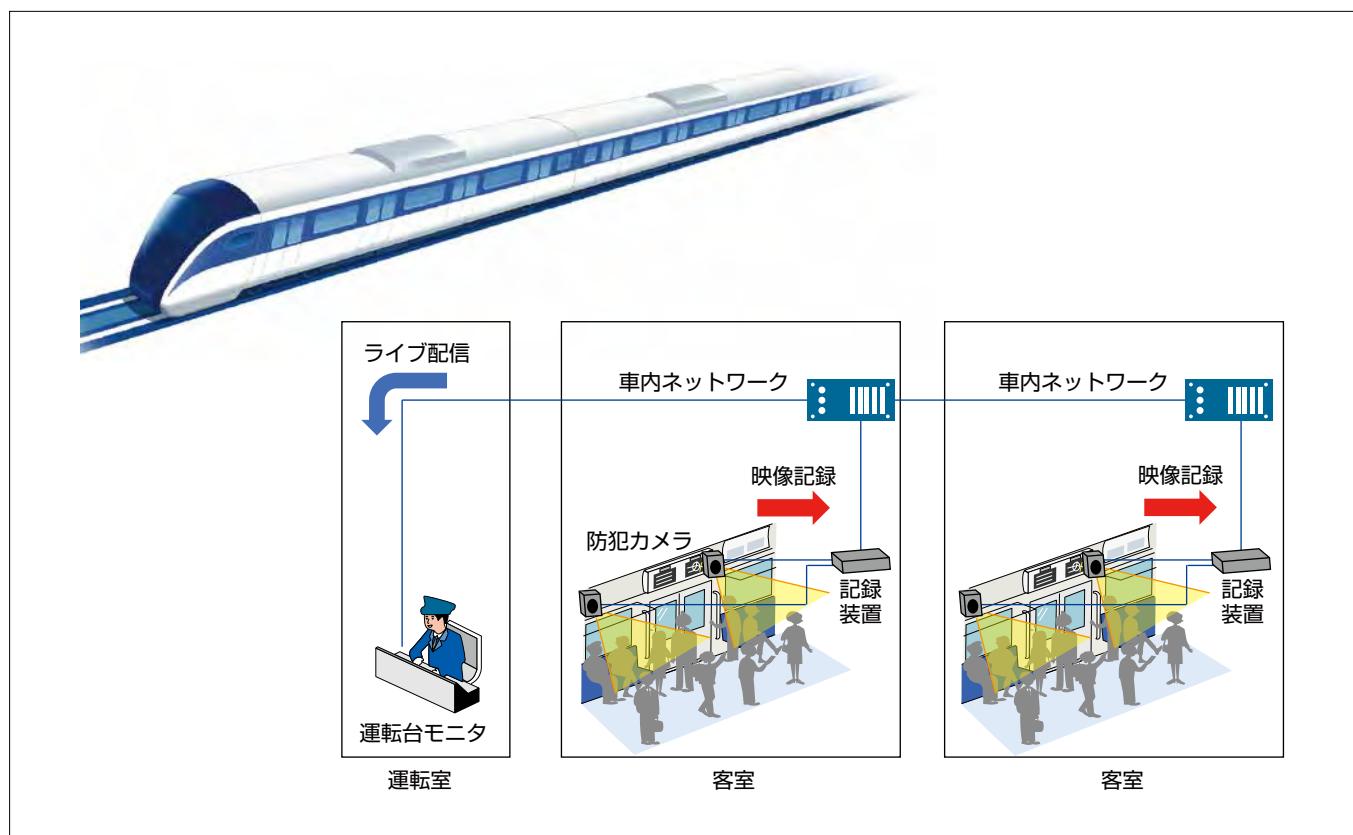
鉄道各社では、セキュリティ向上と犯罪抑止を目的に、車両内を撮影する防犯カメラと画像を記録する記録装置で構成する車内防犯システムの導入が一般的になりつつある。三菱電機では、2008年に新幹線向け、2009年に在来線向けの車内防犯システムを開発し、以降納入実績を伸ばしてきた。

従来、鉄道各社では、客室で死角になって迷惑行為が多い特定場所や、新幹線や特急車等の優等列車へ車内防犯システムを導入してきたが、このような場所・列車以外への導入は限定的であった。しかし、東京2020オリンピック・パラリンピックの開催決定を契機に、更なる鉄道の安心・安全・安定輸送に向け、複数のカメラで客室内をくまなく

撮影する車内防犯システムの導入が急増している。

そこで、当社では、鉄道車両向け車内防犯システムに要求されるネットワーク最適化、省スペース化、高信頼性、高保守性を満足する形で、カメラと記録装置のプラットフォームを一新するとともに、新機能を採用して対応した。

当社従来装置に比べて小型化を図り、機能を集約するとともに、耐環境性向上、広視野、高画質化、交換作業の効率化を実現し、カメラレンズの自己点検機能や、CBM (Condition Based Maintenance) 機能等を採用して記録データの信頼性と保守性を高めた車内防犯システムを新たに開発した。



### 鉄道車両向け車内防犯システムの構成

鉄道車両向け車内防犯システムは、主に車両内をくまなく撮影するように設置した防犯カメラと、その映像を確認できる記録装置で構成している。

## 1. まえがき

鉄道各社では、車両内での異常発生後に状況を速やかに把握して対応するため、防犯カメラ（以下“カメラ”という。）と記録装置で構成する車内防犯システムを導入することが一般的になっている。

従来、鉄道車両では犯罪多発箇所に集中してカメラを設置していたが、近年は更なるセキュリティ向上が求められており、車両内全てを死角なく監視できるようにカメラを配置し、映像を記録する記録装置を増設している。

今回、従来の車内防犯システムの機能と運用上の課題をフィードバックする形で、鉄道車両内に求められる新機能を搭載する車内防犯システムを開発した。このシステムのカメラと記録装置は、当社従来品に対して小型・低消費電力、高性能、高信頼性、高保守性を実現している。なお、この開発では、2015年に当社が市場投入して流通店舗や金融機関等の顧客から好評を得ている“MELOOK3ネットワークカメラ・システム”<sup>(1)</sup>のカメラ<sup>(2)</sup>と記録装置<sup>(3)</sup>の機能と性能を活用した。

## 2. 車内防犯システムの要求条件

車内防犯システムに対する要求条件は次のとおりである。

### (1) ネットワーク最適化

車内防犯システムの装置構成を図1に示す。カメラで撮影して、記録装置で記録する機能に加えて、運転台モニタでのリアルタイムの映像閲覧、記録映像の再生などのニーズも増加している。そのため、ネットワーク機能、映像配信の制御機能など多様な機能が求められている。

### (2) 省スペース化

鉄道車両では、限られたスペースの中に様々な機器が搭載されている。車内防犯システムでは、客室内を撮影するカメラはスペースが特に限られる鴨居（かもい）部（客室用扉上部のスペース）や、天井付近に設置される。記録装置は映像を保存する記録媒体の挿抜を考慮して、車両内から

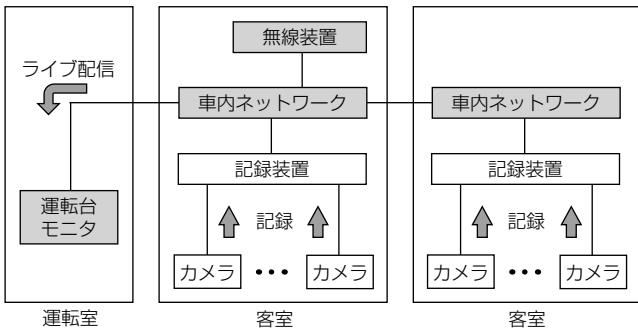


図1. 車内防犯システムの装置構成

アクセスしやすい場所に設置されるが、そのような場所は車内防犯システム以外の機器も多い。在来線列車は新幹線等優等列車以上に設置スペースが限られており、省スペース化のニーズは強い。

### (3) 高信頼性

車内防犯システムの普及に伴い、記録映像の持つ社会的な重要性は、犯罪捜査での活用の拡大等を背景として年々高まっている。そのため、システムの正常稼働はもちろんのこと、その正常性を確認するための機能も重要な要素の一つになっている。

### (4) 高保守性

カメラは撮影不可になる状況を避けるため、導入時に一般的な機器で行う電気的、機械的性能確認に加えて、撮影画角やレンズ異常等の確認が必要であるが、従来は目視点検に頼る作業が多く、カメラ台数の増加に伴って作業量が増大していた。そのため、目視点検作業の効率化が必要になっている。

## 3. 車内防犯システムの開発

この章では、2章で述べた要求条件を満足させるための課題を抽出し、それらの課題をいかに解決したかについて述べる。

### 3.1 ネットワーク最適化の課題と解決策

鉄道車両では大容量の車両間通信に、保守性の観点からLANケーブルを用いた100BASE-TX Ethernet<sup>(注1)</sup>を採用している。高解像度化が進むカメラ映像は、カメラ1台当たり1～4 Mbpsのデータ通信量が必要になっている。1編成のカメラが20台を超える場合、通信の安定化のためには全カメラ映像を配信するのではなく、運転台で閲覧するカメラ映像だけを配信する機能が必要である。

今回、図1に示すように、運転台モニタで閲覧するカメラを選択し、選択されたカメラの映像を記録装置が再配信することで、必要なカメラの映像だけを配信可能にした。この機能によって、例えばカメラが20台設置された列車の中からカメラ4台を同時に閲覧する場合、従来と比較して必要なデータ通信量は約1/5に削減可能になった。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス株の登録商標である。

### 3.2 省スペース化の課題と解決策

#### 3.2.1 カメラの小型化

車両内の鴨居部や壁面スペースに収容可能にするために、次のような解決策によって従来機種に対して体積比約36%削減と大幅な小型化を達成した。

### (1) 小型レンズの採用

レンズはカメラでサイズが最も大きい部品の一つである。このカメラは小型であることが要求されることから、従来カメラで採用したバリフォーカルレンズではなく、サイズの小さい固定焦点レンズを採用した。固定焦点レンズは焦点距離変更による画角調整ができないものの、単純構造のためレンズ本体のサイズを小さくできる上に、カメラ据付け時の画角調整作業が不要なため、工事を簡素化できるメリットがある。

### (2) 基板サイズの縮小

本体の小型化に伴って基板サイズの縮小が必要になる。このカメラでは新プラットフォームとして映像処理LSIを採用しており、従来複数のデバイスを実装することで実現していた映像処理、符号化伝送処理等の各処理を1チップへ統合した。また、更なる小型化実現策として、プリント基板の多層化、採用部品の小型化、部品実装の高密度化、電源回路のコンパクト化を適用し、小型筐体(きょうたい)へ収容可能なサイズを実現した。

### 3.2.2 記録装置の小型化

記録装置も車両内のデッキや車両連結部の限られたスペースに収納するため、次のような解決策によって小型化を推進し、従来機種に対して体積比約27%削減を達成した。

#### (1) 内部構造の見直し

記録装置では記録媒体のSSD(Solid State Drive)が最も大きい部品の一つである。この装置では画像の高解像度化に伴うデータ容量増への対応と、データ保持の信頼性を確保するため、SSDを2台(従来は1台)搭載する必要があった。内部構造を抜本的に見直し、基板配置や放熱を最適化することでSSDを2台搭載可能にするとともに、装置全体の小型化を実現した。

### (2) 基板サイズの縮小

装置全体の小型化のために、CPUボードや電源の新規カスタム開発を行った。また、従来記録装置では電源断時のSSDデータ保護機能として大容量キャパシタによる電源バックアップ機能を備えている。この装置では大容量キャパシタ基板の新規開発によって、SSD 2台分の電源バックアップに対応し、基板サイズの拡大を抑えた。

## 3.3 高信頼性の課題と解決策

### 3.3.1 カメラの広画角化

車内防犯システムでは、セキュリティ確保のためカメラ死角を可能な限り削減する必要がある。一方、カメラ台数を増加させると、システムが高負荷になって映像伝送の信頼性を損なうだけでなく、運用保守コストにも影響を及ぼす。そこで今回、広角の固定焦点レンズを採用してカメラを広画角化し、従来カメラと比較してより少ないカメラ台数で死角のない監視を可能にした(図2)。

従来カメラの画角は水平95°／垂直70°であったが、1台でより広域の監視エリアをカバーするため、水平140°／垂直106°の画角を持つ広角レンズを採用した。さらに、新規レンズに対応したレンズ支持部品を開発して形状を最適化し、広範囲の撮影を可能にした。また、レンズは広角になるほど被写界深度(フォーカスの合う範囲)が深くなることから、客室のような奥行きのある被写体に対して広角レンズの採用は有効である。

### 3.3.2 自動時刻補正機能の採用

記録装置は起動ごとに列車統合管理装置との時刻同期を行う自動時刻補正機能を備えており、精度の高い時刻を維持できる。これによって、記録映像の撮影時刻精度が向上

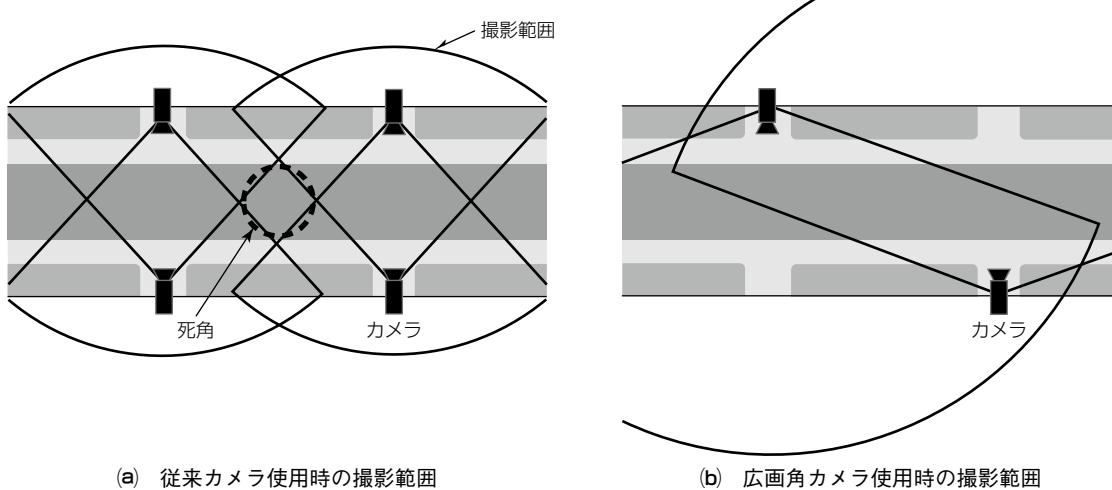


図2. カメラの広画角化

し、有事の際の証拠能力に高い信頼性をもたらすとともに、保守時の手動での時刻調整作業も省力化可能である。

### 3.3.3 放熱設計と難燃性

カメラと記録装置の小型化によって単位面積当たりの発熱量が増えるため内部温度が上昇しやすくなる。内部温度の上昇は製品寿命を縮める要因であるため、放熱対策が必須である。

今回開発した車内防犯システムでは、内部で発生した熱を効率的に放熱するために、カメラ、記録装置共に金属筐体を採用した。発熱部品を熱伝導材と内部板金を介して金属筐体に接触させることで熱を外部に放出する構造にしている。

さらに、間隙を最小化した金属筐体によって、鉄道車両機器で要求される防塵(ぼうじん)性と難燃性の強化も両立させるとともに、車体メンテナンス時の予期せぬ水・塵埃(じんあい)の浸入が想定されるカメラは、IPX2相当の防滴性能とIP5X相当の防塵性能を確保し、より堅ろうな車内防犯システムの構築を可能にした。

## 3.4 高保守性の課題と解決策

### 3.4.1 ホットプラグイン機能

万一カメラが故障して交換を要する際、交換するカメラに対する手動での設定作業を不要にした。設置されているそれぞれのカメラは記録装置の接続ポートと1対1の関係になっている。記録装置でカメラが(交換直後で)その設置

場所に対する設定がなされていないと判断すると、自動的に再設定を行うホットプラグイン機能を実装し、保守作業の効率化が可能になっている。

### 3.4.2 カメラレンズの自己点検機能

カメラレンズ異常等によって撮影映像に問題(映像が著しく暗い等)が生じた場合、この事象を速やかに発見して解消しなければならない。しかしながら、多数の車両に分散しているカメラの撮影状態を目視で個々に確認するには、多大な時間と労力を要する。さらにこのような目視点検作業は、運行時間外の車庫入庫時や定期点検時に限られるため、撮影映像欠落の発見が遅延するリスクがある。

今回開発したカメラでは、撮影映像の平均輝度値とオートフォーカス調整値を定期的に監視し、撮影映像に問題が生じたと判断した場合に、異常通知を行う機能を搭載した。カメラ制御で使用するパラメータだけを使用して実現したため、新規センサの取付け等は行わずにシステムコストの上昇を回避した。カメラ異常通知は記録装置に集約後、LED点滅で可視化するとともに、列車統合管理装置で通知され、運転台モニタへ即座に表示する(図3)。この機能によって、保守作業員はカメラ異常を速やかに発見・解消できるため、点検作業の時間短縮が可能になる。

### 3.4.3 状態監視機能

記録装置では、従来SSD故障時に内部に記録されている稼働状態を事後解析していたが、リアルタイムでの解析を可能にするよう改善した。記録媒体故障時には、従来の

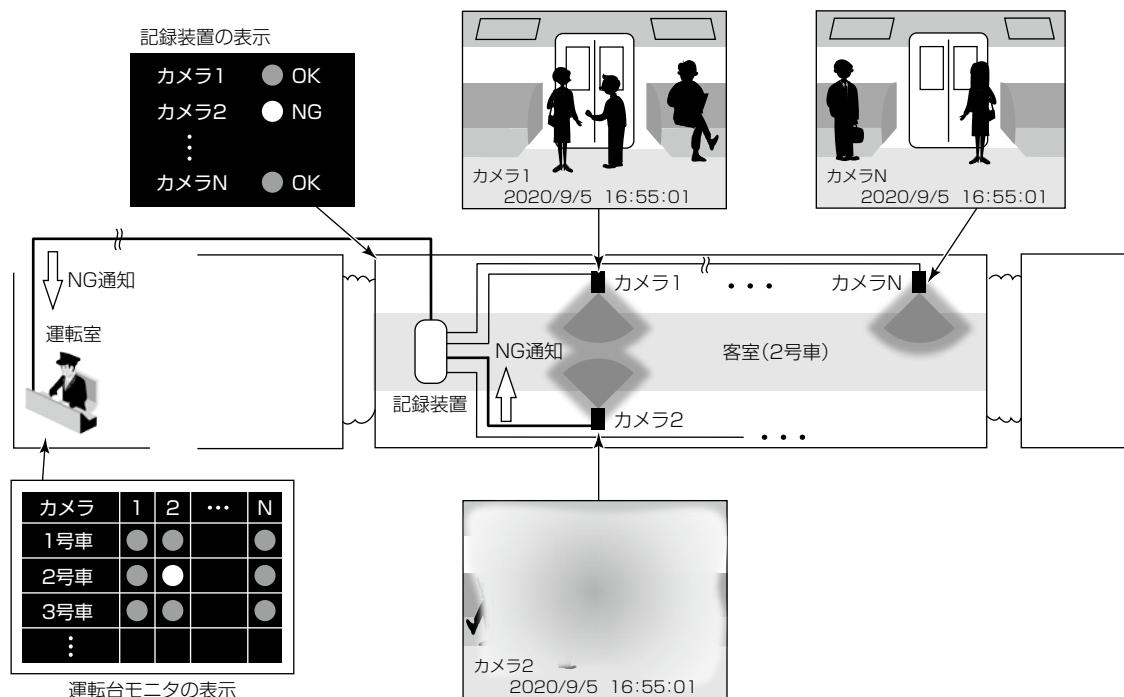


図3. カメラレンズの自己点検機能と異常通知イメージ

記録装置前面LEDでのエラー状態表示に加えて、列車統合管理装置へ記録装置から故障が通知され、乗務員や保守作業員は異常を把握できる。また、記録媒体交換等によって復旧するまで映像が記録できない期間が発生する課題に對しては、SSDの状態(書き込みデータ量や不良セクタ数等に基づく残寿命)を監視し、SSDが故障して記録停止する前にその異常を管理装置側に通知することで解決を図った。これによって、故障前にSSD交換を保守作業員に促すというCBM機能を実現し、映像が記録できない期間の発生を防いでいる。

また、カメラからの伝送異常が検知されず、記録できない期間が長期発生する課題に対して、その期間を極力短くするために、記録装置はカメラとの伝送が正常かどうかを定期的に監視する。カメラの故障、又は車両内ネットワーク異常等によるカメラとの伝送の切断時には、SSD故障と同様に管理装置側にカメラ故障を通知し、短時間でカメラの故障をシステムとして検知できる機能も備えている。

#### 3.4.4 ワンタッチロック式コネクタの採用

当社の従来機種では、カメラと記録装置間の接続コネクタは、DE-9コネクタ(D-sub 9pin)に代表されるねじによる嵌合(かんごう)の固定が主流であった。今回のカメラと記録装置は鉄道車両向け規格に準拠したワンタッチロック式コネクタを採用し、作業性を高めている。

#### 3.4.5 交換作業の省力化

記録装置では、新規開発した大容量キャパシタ機構を採用し、車両内環境下で、想定する装置寿命までキャパシタの交換作業が不要である。またファンレス構造にしたことから、ファンの交換作業も不要である。定期的に交換が必要なのは、映像が記録できないことに直結するSSDだけにとどめており、交換作業の省力化に貢献している。

### 4. 主要諸元

今回開発した車内防犯システムのカメラの主要諸元を表1に示し、記録装置の外観と主要諸元を図4と表2に示す。

### 5. むすび

MELOOK3ネットワークカメラ・システムに、2008年に開発した車内防犯システムの機能と運用上の課題をフィードバックする形で開発した鉄道車両向け車内防犯シ

表1. カメラの主要諸元

項目	諸元
撮像素子	1/3型CMOSセンサ
有効画素数	1280(H) × 960(V)
デジタル増感	最大16倍
WDR機能	SFV III
使用レンズ	固定焦点レンズ
画角	水平: 140°、垂直: 106°
電源	PoE
防滴性能	IPX2
防塵性能	IP5X
外形寸法	51(W) × 56(D) × 78(H) (mm)
鉄道規格	JIS E 4031 区分1等級B準拠

CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

WDR: Wide Dynamic Range

SFV: Super Fine View

PoE: Power over Ethernet

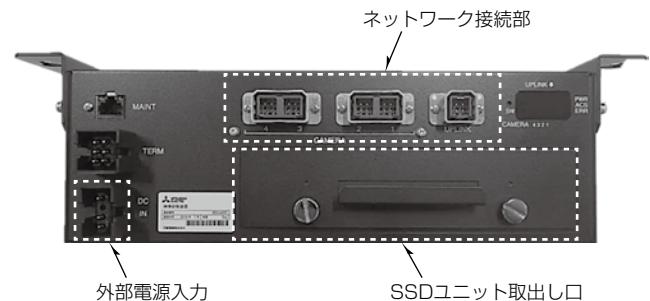


図4. 記録装置

表2. 記録装置の主要諸元

項目	諸元
記録媒体	SSD
ネットワーク接続	100BASE-TX
冷却方式	自然空冷(ファンレス)
電源断保護機構	大容量キャパシタ
外形寸法	300(W) × 170(D) × 99(H) (mm)
鉄道規格	JIS E 4031 区分1等級B準拠

システムについて述べた。カメラ、記録装置共に鉄道車両向けで要求されるネットワーク最適化、省スペース化、高信頼性、高保守性を満足する形で従来機種から機能向上を図り、より運用しやすい車内防犯システムにしている。

今回開発した鉄道車両向け車内防犯システムをベースに今後は仕様やニーズが異なる鉄道事業者向けに柔軟に対応していく。

### 参考文献

- (1) 三菱電機㈱: 三菱ネットワークカメラ・システム MELOOK3 <http://www.mitsubishi-electric.co.jp/nwcamera/melook3/>
- (2) 蓬田 仁、ほか: “MELOOK3”カメラ、三菱電機技報、89, No.6, 343~347 (2015)
- (3) 辻 亮宏: “MELOOK3”レコーダ、三菱電機技報、89, No.6, 348~352 (2015)

# 地方交通線向け 列車制御用無線通信システム

Wireless Connections System for Regional Lines Train Control System

鈴木哲也\*  
Tetsuya Suzuki  
黒岩 篤†  
Atsushi Kuroiwa

## 要旨

三菱電機は、東日本旅客鉄道(株)が小海線で運用を開始する地方交通線向け無線式列車制御システムで使用される無線通信システム(地上無線装置、車上無線装置ほか)を受注し、東日本旅客鉄道(株)と共に開発を行った。

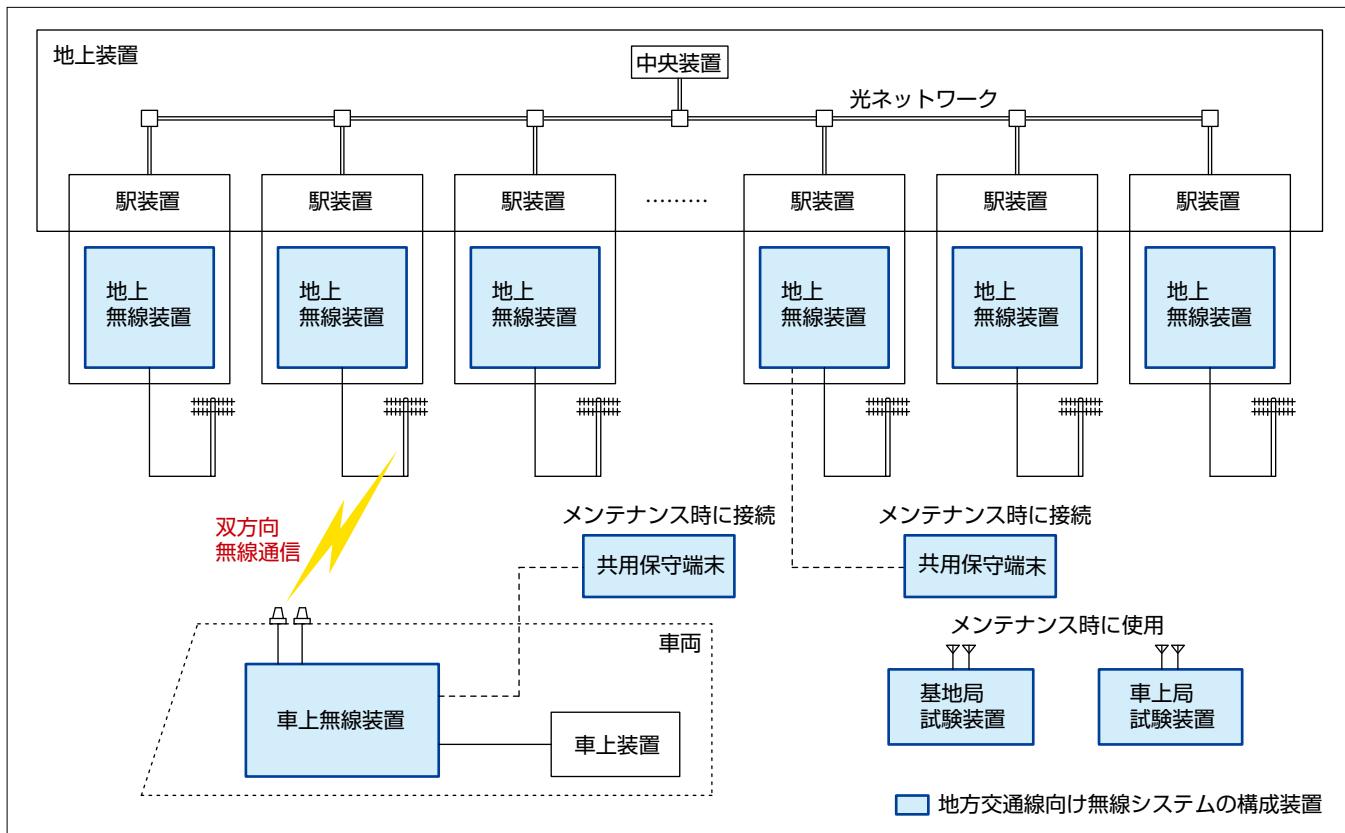
小海線は単線であり、上下線の列車の行き違いを駅の信号設備で制御するが、現行方式は設備を構成する機器数が多くて保守に人手がかかっており、非常ブレーキの警報解除や駅での出発信号の要求は運転士が手動で行っている。

新開発の列車制御システムでは列車が行き違う駅周辺で無線通信を行い、列車を制御する。無線化によって地上設備がシンプルになるため、地上子やケーブル等の削減が可能になり、保守業務が軽減できる。

また、無線通信エリア内にある各車両にリアルタイムで車両制御の情報を伝達し、エリア外の単線区間の車両の有無が確認できることで、保安度の向上にも貢献している。

列車制御に関連する設備であるため、無線通信には高い信頼性が求められるが、小海線では地形的な要因によって電波の伝搬環境が極端に変化する区間があったため、無線装置の性能だけでなく、机上の検討と現地の電波環境測定を繰り返し実施して地上アンテナの設置位置の最適化を行い、必要なカバーエリアを確保している。

この無線通信システムは、地方交通線向け無線式列車制御システムを構成する他の装置とともに小海線での実証確認を完了し、運用を開始する予定である。



## 地方交通線向け無線式列車制御システム全体と無線通信システムを構成する装置

東日本旅客鉄道(株)の地方交通線向け無線式列車制御システム全体と無線通信システムの構成を示す。無線通信システムは、地上側の装置に接続される地上無線装置、車上装置に接続される車上無線装置、及び、保守や試験に使用する共用保守端末、基地局試験装置、車上局試験装置で構成される。列車が通信エリア内に到達すると車上装置の指示によって無線でデータの送受信を行う。

## 1. まえがき

三菱電機は、東日本旅客鉄道(株)が小海線で運用を開始する地方交通線向け無線式列車制御システムに使用される無線通信システム(地上無線装置、車上無線装置ほか)を受注し、東日本旅客鉄道(株)と共に開発を行った<sup>(1)</sup>。

小海線は、1本の線路で上りと下りの双方向の列車を運行する“単線”であり、上りと下りの列車の行き違いを行うために途中の駅など、列車が待避する線路がある場所で列車の制御を行っている。列車の行き違いを行う駅などには進入の可否を示す信号設備とレールの接続方向を決める分岐器(ポイント)があり、信号設備と分岐器を連動させることで単線区間に1列車しか進入できないように制御している。信号設備と分岐器を連動する装置のある駅を“連動駅”と称する。

地方交通線向けの無線式列車制御システムは、連動駅周辺で今回開発した地上無線装置、車上無線装置を使用して地上と列車間の無線通信を行い、列車を制御する。

小海線への導入に当たり、無線装置の性能だけでなく、地形などの環境条件を考慮した地上アンテナの配置検討や、運用中の車両への搭載方法の検討を行い、小海線に適した無線通信システムを開発した。

本稿では、地方交通線(小海線)向けの列車制御用無線通信システムと開発した機器について述べる。なお、文中で今回開発した列車制御用の無線通信装置を示す場合は“無線通信システム”，無線通信装置を含む列車制御システム全体を示す場合は“無線式列車制御システム”と区別して表現する。

## 2. 地方交通線向け無線式列車制御システム

### 2.1 従来の列車制御システム

小海線で運用されている従来方式の列車制御システムでは、連動駅に設置した信号設備とその信号設備にケーブルで接続されている地上子(線路上に設置される車両と通信をする地上側の機器)を介して信号情報を伝送し、車両は地上子の上を通過する際に信号情報を取得して列車制御を行っている。

図1に従来システムでの非常ブレーキ制御を示す。

車両が地上子を通過した際に、地上子から得られた信号情報に基づいて車両内の警報が鳴る。運転士は警報を

確認後に手動操作で解除し、車両を操作して所定の位置に停車する。このとき、警報の確認が行われず、適切な操作がされなかった場合は非常ブレーキ制御が働き、車両が前方の信号機の位置を超える前に停車する方式になっている。

また、連動駅を出発する際には運転士が出発時刻を確認し、手動で車上装置を操作して出発信号の制御を行うことによって単線区間への進路を確保する。車両が到着する連動駅側では、運転士の出発信号の制御を受信すると、連動駅間の列車在線等のチェックを行う。駅間の単線区間に列車が存在する場合は出発信号は停止の表示(停止現示)のままになる。駅間に列車在線等がない場合は出発信号が進行の表示(進行現示)になり、列車が駅を出発することが可能になる。このように、連動駅間の単線区間には1列車だけが走行できるようにして列車の安全を確保している。

従来システムはこのように列車制御を行っているが、連動駅周辺には複数の地上子や関連する信号設備、及びこれらの装置を制御するための多数のケーブルの敷設が必要になるため、システムを構成する装置の部品点数が多くなって保守点検に人手がかかっている。また、連動駅周辺での制御は、運転士の手動作業で行うシステムになっている。

### 2.2 地方交通線向け無線式列車制御システムの利点

小海線で運用を開始する、地方交通線向け無線式列車制御システム全体を図2に示す。

小海線向けの無線式列車制御システムは図2のように中央装置が光ネットワークを通じて全ての駅装置に接続されており、地上無線装置は信号等を制御する駅装置内に設置されている。車上無線装置は車両内に設置されており、車両の制御などを行う車上装置と接続している。

地上無線装置は連動駅周辺を無線通信エリアとして車上無線装置との間で双方向の無線通信を行い、地上無線装置は地上側から送られる信号情報等の情報を車両側へ、車上無線装置は車両側から送られる車両個別の番号(以下“車両ID”という。)や位置と速度の情報等を地上側へ送信する。

無線式列車制御システムでは、中央装置が駅装置を経由して各無線通信エリア内の車両から送られる車両IDと位

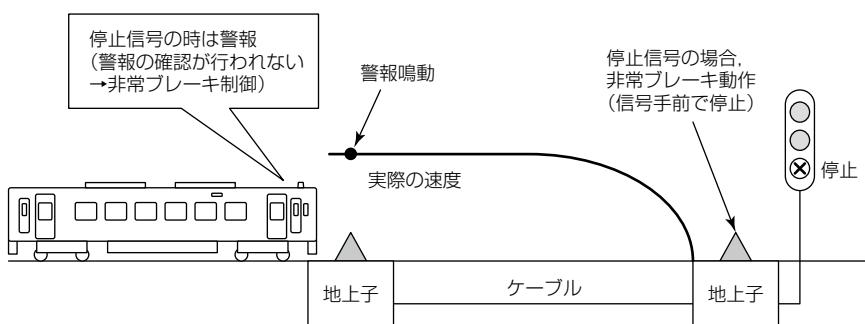


図1. 従来システムでの非常ブレーキ制御

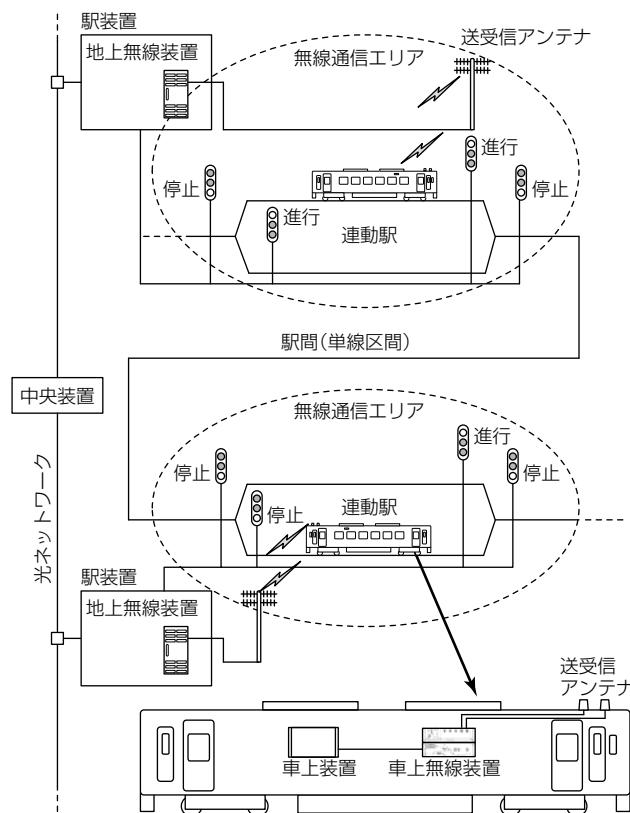


図2. 小海線に導入する無線式列車制御システム

位置や速度の情報を得ることによって、運行中の車両がどこに在線しているかをリアルタイムで把握できるため、無線通信エリア外へ進出し、かつ、他の無線通信エリア内へ進入していない車両を特定できる。これによって、中央装置は無線のカバーエリア外である駅間（単線区間）についても車両の有無の判定ができる、保安度の向上に貢献している。

地上側の装置と車両間の通信に無線を採用している無線式列車制御システムでは従来システムに比べて地上設備がシンプルな構成にできるため、連動駅周辺の信号設備に関する機器や接続するケーブルを削減することが可能になり、設置後の保守点検を容易にする効果が得られる。

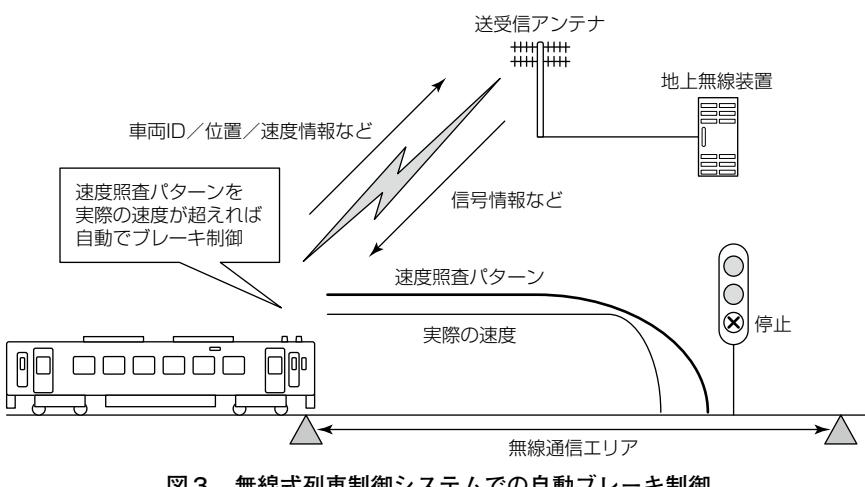


図3. 無線式列車制御システムでの自動ブレーキ制御

地上無線装置は駅装置を経由して中央装置から送られる信号情報をリアルタイムで無線通信エリア内の車両へ送信することで、各車両に対して自動ブレーキ制御を行うための情報等の制御情報を伝達している。

図3は無線式列車制御システムでの自動ブレーキ制御を示す。無線式列車制御システムでは無線通信によって信号情報を得た車上装置が、自らの位置と速度、及び、車両固有の情報などから設定される速度の限界を超過しないように自動でブレーキ制御を行うため、より安全な運行の実現が可能になる。

### 3. 小海線向け無線通信システムの開発

#### 3.1 小海線向け無線通信システム開発での注力点

東日本旅客鉄道株の無線式列車制御システムとしてはATACS(Advanced Train Administration and Communications System)<sup>(注1)</sup>が実用化されており、2011年10月から仙石線、2017年11月から埼京線で運用している<sup>(2)</sup>。

小海線の列車制御システムとATACSは異なるシステムであるが、列車制御に使われる無線通信システムとして無線に特化して比較した場合、表1に示すように特徴が異なっている。

このような小海線の特徴を考慮し、無線通信システムを開発するに当たって、次の項目を実現する必要があった。

(注1) 東日本旅客鉄道株開発の無線式列車制御システムである。

##### (1) 小海線特有の無線環境への適用

無線による列車制御を実現するためには高い信頼性が求められ、連動駅周辺の無線通信エリアへの進入時には確実に電波を捕捉して無線通信を開始すること、かつ、無線通信エリア内では通信を維持することが必須である。そのため、小海線の無線通信システムには同じ無線式列車制御システムであるATACSと同等の無線品質の確保が必要とされた。小海線の走行エリアには山間部など地形的に電波を送受信しにくい環境があり、無線装置自体の性能だけでなく、アンテナ設置条件などの置局設計と合わせて所望の無線性能を得る必要がある。

##### (2) 車上無線装置の小型化

既存の車両に車上無線装置を搭載することが小海線導入の前提条件であった。小海線が運用されている車両は、ディーゼルエンジン又はディーゼルとモータのハイブリッドエンジンを動力とする気動車であり、床下にはエンジ

表1. 小海線と埼京線の特徴の比較

条件	小海線	埼京線
無線通信エリア	連動駅周辺だけ通信	全線で通信
走行エリア	山間部と平野部	主に平野部
車両実装	車内の汎用器具箱	車両床下吊(つり)下げ
車両電源	車上発電機	外部直流電源から
温度環境	高地で冬場は低温	冬場も比較的温暖

ン設備を始めとして多数の装置が搭載されているため、車上無線装置を設置する場所がない。そのため、車上無線装置の搭載位置は車両内部になったが、設置スペースの最小化のため、極力、装置を小型にする必要がある。

#### (3) 車両実装

車上無線装置は、小海線で運用されている複数の車両に同じ設置条件で搭載するため、設置条件を共通化する必要がある。そのため、車上無線装置は汎用の器具箱内に設置できる構造にする必要がある。

#### (4) 電源と電圧変動

車上無線装置は、車両から供給される電源電圧に対応する必要がある。走行中にディーゼルエンジンの出力が変動すると、車両の発電機から供給される電源電圧も変動するため、電源装置には電圧変動に耐えられる性能が必要である。

#### (5) 温度環境

小海線の走行区間は高地であり、車両は冬場には低温下に置かれる。そのため、車上無線装置は低温の環境に対応することが必要である。

### 3.2 小海線向け無線通信システムの構成

小海線向け無線通信システムは、車上装置と接続する車上無線装置、地上側の装置と接続する地上無線装置、及び、保守装置である共用保守端末、基地局試験装置、車上局試験装置からなる。

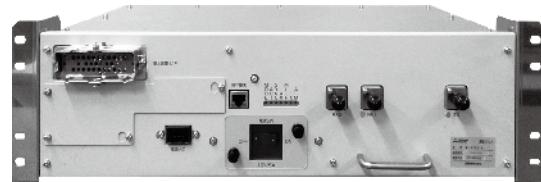
図2のとおり、車上無線装置は各車両に搭載され、地上無線装置は駅装置に設置されて、無線通信を担っている。

### 3.3 小海線向け車上無線装置の開発

車上無線装置は小海線向けに小型の装置を新たに開発した。開発した車上無線装置を図4に示す。

車上無線装置は車上装置との通信機能や無線の制御と送受信などの機能を持つ“統合無線ユニット”(図4(a))、及び、送受信する電波のフィルタなどを内蔵した高周波部と車両の発電機から供給される電源に対応した電源装置を搭載する“高周波・電源ユニット”(図4(b))の、2ユニットの構成にしている。

車上無線装置は2.3節の内容を実現するために、次の特長を備えている。



(a) 統合無線ユニット



(b) 高周波・電源ユニット

### 図4. 車上無線装置の構成ユニット

- (1) 小海線では地形的に電波が遮られることや、山肌などの反射でのマルチパスフェージング<sup>(注2)</sup>が発生することなどが懸念されるため、受信を行う機能には複数のアンテナで電波を受信して処理することで受信性能を向上させるダイバシティ受信技術を適用し、受信耐性を強化している。
- (2) 器具箱内に収められるように、車上無線装置の外形寸法は、統合無線ユニットを120(H)×430(W)×300(D)(mm)、高周波・電源ユニットを100(H)×430(W)×300(D)(mm)にした。
- (3) 各ユニットには器具箱内に取付けが可能な構造と強度を持たせた。
- (4) 小海線で運用される車両の電圧変動に対応する電源を新規に開発し、“高周波・電源ユニット”に搭載した。
- (5) 車上無線装置の各構成部品を厳選し、低温下の環境での正常起動を実現した。低温下の環境で起動することは、装置の評価試験で確認した。

(注2) 送信された電波が反射や散乱するために時間差がついて受信側に届くことで、送信元とは異なる電波の強弱が発生する現象である。

### 3.4 小海線向け地上無線装置の開発

小海線向けの地上無線装置(図5)はダイバシティ受信対応の無線機ユニットを採用することで高い要求性能である仙石線や埼京線で運用中のATACSと同等の無線品質の確保を実現できるハードウェア構成にした。

地上側の装置と地上無線装置とのインタフェースは、小海線独自のインタフェースが採用されたため、地上無線装置のソフトウェア開発で必要機能の実装を行った。

この小海線向けの新規ソフトウェアの開発に当たっては、対向する地上側の装置の動作を模擬する試験専用のアプリケーションを作成し、ソフトウェアを搭載した地上無線装置と組み合わせて徹底した動作検証を実施している。

地上無線装置と移動する車両上の車上無線装置は無線通



図5. 地上無線装置

信エリア内で確実に無線通信を行わなければならないが、小海線の走行エリアには山間部が含まれており、見通しが利かず送受信する電波の強度が低下する箇所や、マルチパスフェーディングの影響を受ける箇所などの、車両の走行中に電波環境が極端に変化する箇所が多数存在する。

小海線向け地上無線装置のハードウェアもダイバシティ受信技術などを適用しており、各種の試験や測定によって埼京線で運用されている無線装置と同等の性能を持つことを確認しているが、装置の性能だけでなく、小海線の地形的に無線通信を阻害する要因に対しても要求性能を確保するために対策が必要であった。

そのため、地上無線装置の各機器の開発と並行してアンテナ設置場所を最適化するための置局設計を行い、さらに、アンテナの設置工事を行う前にアンテナの設置予定場所で地上無線装置の技術実証機を用いた地上-車上間の電波測定試験を行って、送受信性能を確認した上で最適なアンテナ設置場所を決定した。

小海線向け無線通信システムはこのようなアンテナ設置を含めたシステム全体で、目標であるATACSと同等の無線通信品質を実現している。

### 3.5 無線通信システムを構成するその他の装置

小海線向け無線通信システムを構成する装置として、車上無線装置／地上無線装置のほかに、共用保守端末、基地局試験装置、車上局試験装置がある。

これらの装置は、車上無線装置／地上無線装置の設置時の動作確認試験や、保守点検でのシステムの健全性の確認など、小海線向け無線通信システムを長期間安定して運用できるようにするために必要な装置である。

共用保守端末は1台の装置に車上無線装置／地上無線装置／基地局試験装置／車上局試験装置の4種の装置に対応したアプリケーションを搭載し、用途ごとにアプリケーションを切り替えて使用できる共用端末として利便性を高めた装置にした。

### 3.6 小海線向け無線通信システムの検証

小海線向けの無線通信システムは、2015年8月に技術実証用の無線機と他社製の制御装置を組み合わせた試験で、無線通信の導通等の基本事項の確認を実施した。

2017年10～12月には小海線で実際に運用する無線装置を組み込んだ、無線式列車制御システム全体の組合せ試験を行い、実際に運用する形態を模擬したシステム検証を行った。

その後、2018年1月に地上無線装置、2018年8月に車上無線装置の初号機を納品し、小海線での設置工事を経て、2019年4月から実際に列車を走行させたシステム検証を実施して運用環境で実証確認を行い、2020年2月にシステム検証を完了した。

これらの検証を経て、小海線向けの無線通信システムが運用可能であることを確認できた。

## 4. む す び

東日本旅客鉄道(株)の小海線向け列車制御用無線通信システムの開発について述べた。このシステムの実現によって、①高い信頼性の無線通信システムの実現、②小型の車上無線装置の実現による車内設置の省スペース化、③小海線特有の環境への対応などを実現し、列車制御に用いる無線通信システムを実用化できた。この開発で得られた技術を応用し、今後の新規無線機の開発につなげていく。

今後も無線技術を活用したシステムを実現し、列車の安全・安定輸送を提供できるように貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) 東日本旅客鉄道(株)：JR東日本ニュース 小海線への無線式列車制御システムの導入について (2020)  
[https://www.jreast.co.jp/press/2019/20200310\\_h01.pdf](https://www.jreast.co.jp/press/2019/20200310_h01.pdf)
- (2) 東日本旅客鉄道(株)：JR東日本ニュース 埼京線への無線式列車制御システム(ATACS)の使用開始について (2017)  
<https://www.jreast.co.jp/press/2017/20171004.pdf>

# 新幹線向け静電アンテナの小形化

Miniatrization of Electrostatic Antenna for Shinkansen

## 要旨

新幹線の先頭車両の屋根上に搭載されている静電アンテナは、新幹線の架線電圧検知とVHF(Very High Frequency)帯無線通信を行う二つの機能を持った共用アンテナである。走行速度の高速化が進む新幹線では、車両外部に取り付けられた静電アンテナも騒音源の一つになっており、低騒音化が求められていた。

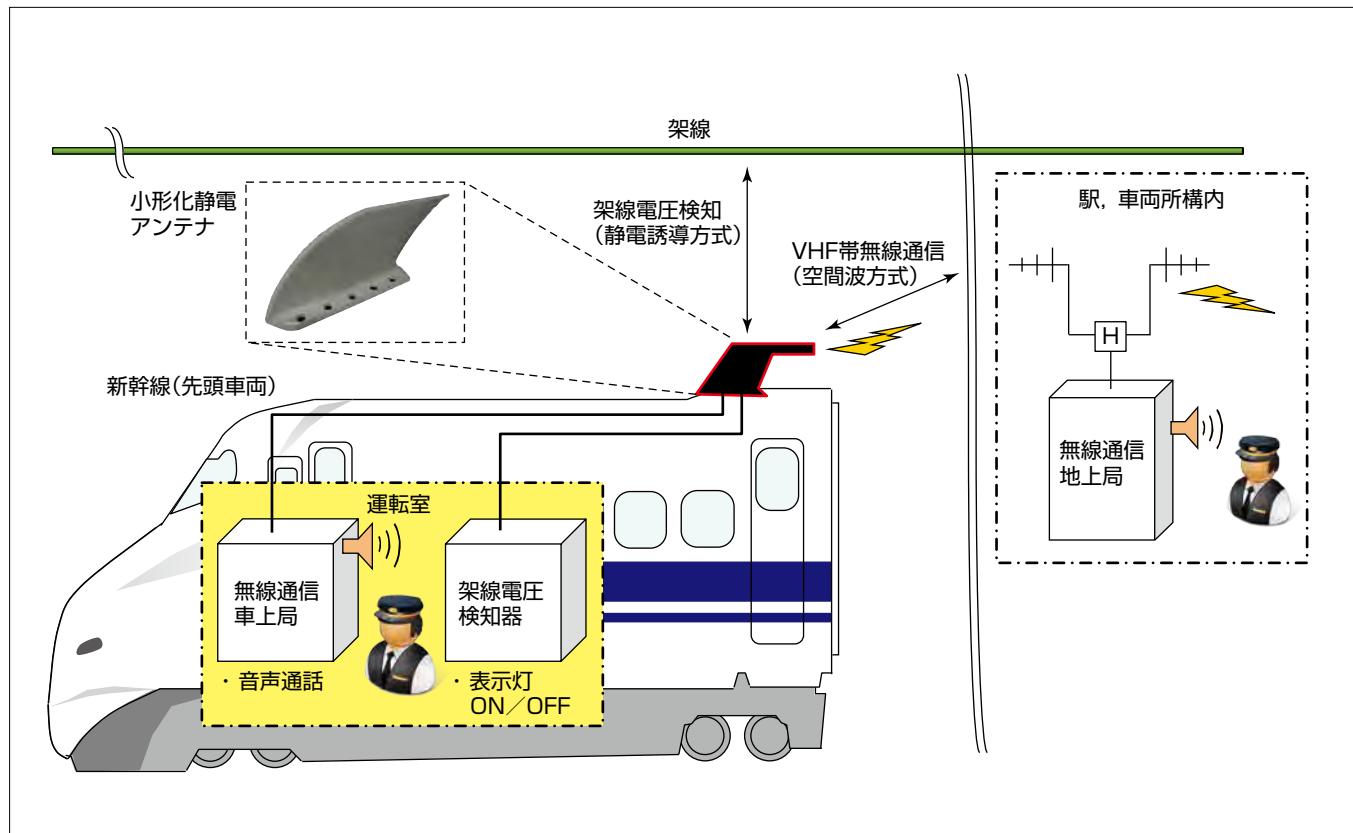
低騒音化のために必要になる滑らかな外形・小形化をアンテナ性能を維持した上で実現し、また高速走行時の風圧に耐える機械的強度を備えた構造を確保する必要がある。

そこで従来よりも小形化しつつ強度を確保し、架線電圧検知とVHF帯無線通信の性能を維持した静電アンテナの小形化開発を行った。架線電圧検知については、小形化に

よる検知棒の短縮化での性能劣化を補うためアンテナ基板面積の拡張を行った。VHF帯無線通信については、小形化形状でのインピーダンス特性の最適化のため、折り返しモノポール構造の採用及び並列共振回路の付加を行った。

開発した静電アンテナの単体性能評価を行い、計算機シミュレーション結果と同様の実測値が得られ、設計の妥当性を確認した。さらに新幹線車両に搭載して走行試験を行った結果、従来よりも低騒音化を実現していることを確認し、また従来と同等以上の電気的及び機械的な性能を持っていることを確認した。

今回開発した静電アンテナによって、高速走行する新幹線の低騒音化に貢献できる。



## 新幹線向け静電アンテナを用いる各種システム

新幹線向け静電アンテナは新幹線の先頭車の屋根上に搭載されており、高速走行時の騒音源の一つになっている。低騒音化のため、静電アンテナの架線電圧検知とVHF帯無線通信の性能を維持しつつ、滑らかな外形・小形化を実現した低騒音の小形化静電アンテナを開発した。

## 1. まえがき

東海道新幹線の先頭車両(1, 16号車)の屋根上に設置されている静電アンテナ<sup>(1)</sup>は、架線の加圧状態を確認するための架線電圧検知機能及び駅や車両所構内の入換に伴う、新幹線(車上)と扱い所(地上)との間で連絡通話を行うためのVHF帯無線通信機能を持ち、1964年の東海道新幹線開業以来、継続して使用されている。この突起した形状が高速走行する新幹線の騒音発生源の一つになっている。低騒音化のためには、滑らかな外形・小形化、特に上方に位置する検知棒の短縮化が求められた。近年の新幹線の高速走行(300km/h以上)時の風圧やトンネル内の圧力変動等にも耐える機械的強度も必要である。

本稿では、低騒音化のために検知棒の長さを短縮して小形化した静電アンテナの開発について述べる。

## 2. 従来の静電アンテナ

### 2.1 アンテナの構成

図1に従来の静電アンテナ(以下“従来アンテナ”という。)の構成を示す。 $\lambda_c$ はVHF帯の使用帯域 $f_1$ ~ $f_2$ の中心周波数 $f_c$ での自由空間波長である。アンテナは、地板に垂直に配置されたアンテナ基板と検知棒で構成しており、端子1は無線通信用、端子2は架線電圧検知用の端子である。アンテナ基板上には、平面状のアンテナ導体が形成されている。架線電圧検知には、交流架線と検知棒、アンテナ導体との間に生じる静電誘導をアンテナ動作に利用している。また、無線通信には、アンテナ導体がVHF帯のモノポールアンテナとして動作し、約1/4波長の電気長を保つようデザインされている。2種類のアンテナ機能を一つのアンテナで実現するために、架線電圧検知として機能する検知棒及び端子2にはVHF帯の無線信号を混入させない、また、無線通信用の端子1には交流周波数を混入させないように電気的に遮断している。

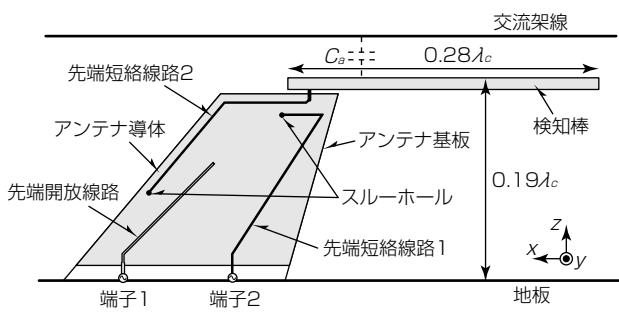


図1. 従来の静電アンテナの構成

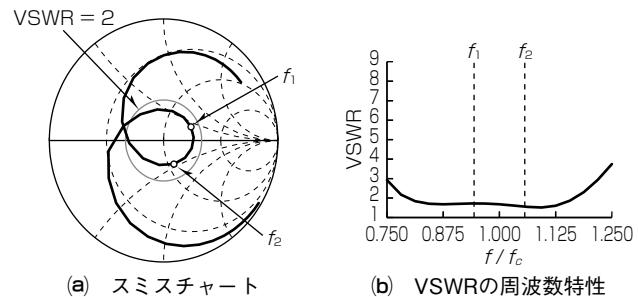


図2. 従来アンテナのインピーダンス特性

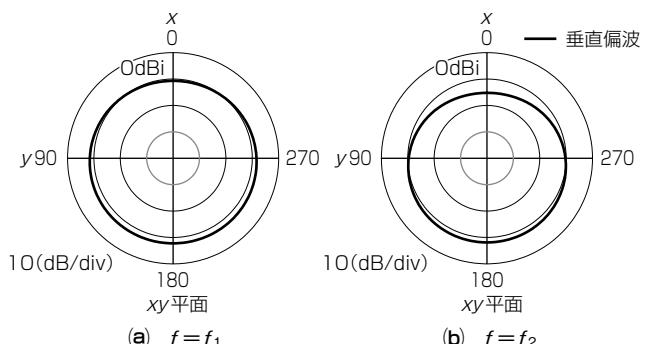


図3. 従来アンテナの放射パターン特性

### 2.2 架線電圧検知機能

架線とアンテナ導体との間の静電容量を $C_a$ 、交流架線の電圧及び角周波数をそれぞれ $V_0$ 、 $\omega$ 、静電アンテナに接続された架線電圧検知器の内部抵抗を $R_d$ とすると、 $R_d$ の両端に誘起される電圧 $V$ は、式(1)で表される。

$$V = \frac{R_d}{\sqrt{R_d^2 + 1/(\omega C_a)^2}} V_0 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

誘起された交流電圧は架線電圧検知器の内部回路で直流電圧に変換され、その電圧があらかじめ設定されたしきい値以上の場合、架線電圧を検知したことを通知する。

### 2.3 VHF帯無線通信機能

VHF帯無線通信の電気的特性を示す。無限地板設置時において、インピーダンス特性は、使用帯域 $f_1$ ~ $f_2$ でVSWR(Voltage Standing Wave Ratio) < 2であり(図2)、水平面(xy面)での垂直偏波の放射パターンの平均化利得は、 $f_1$ で1.3dBi、 $f_2$ で-0.3dBiである(図3)。

## 3. 小形化静電アンテナ

### 3.1 アンテナの外形

従来アンテナと小形化静電アンテナ(以下“小形化アンテナ”という。)の外形を図4に示す。低騒音化を実現するため、従来アンテナと比較して滑らかな外形にして、検知棒の短縮化及びアンテナ低背化等の小形化を行った。この低

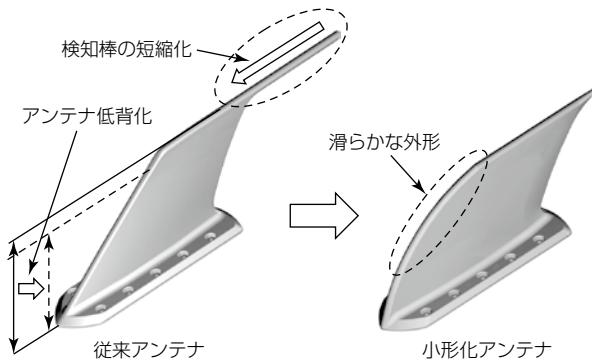


図4. 従来アンテナと小形化アンテナの外形

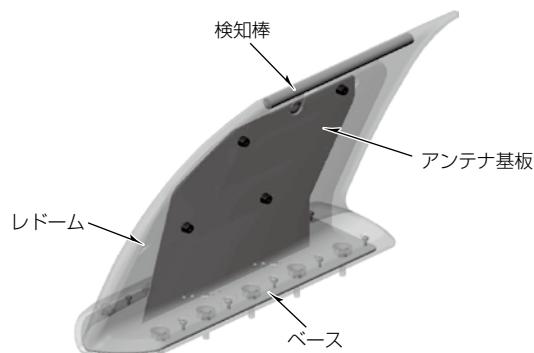


図5. 小形化アンテナの3D設計モデル

騒音化形状を維持しつつ、構造性能の目標値(最新の高速走行条件での設定安全率)を満足させるために強度計算モデルの詳細化及び強度設計の最適化が必要になり、電気性能の目標値(架線電圧検知性能:従来比1以上、VHF帯無線通信:利得従来比1以上、VSWR<2)を満足させるために従来と異なるアンテナ方式の検討及び形状と性能のトレードオフ設計の最適化が必要になった。

### 3.2 アンテナの構造設計

新幹線の走行速度は、1964年の開業当初は最高速度210km/hであったが、最近では300km/h以上へと高速化が続いている。新幹線の屋根上に取り付けられた静電アンテナは、走行速度に応じた風圧の影響をじかに受け、さらにトンネルへの進入・脱出時には新幹線車内と車外の差圧の影響を受ける。今回のアンテナ筐体(きょうたい)の構造設計では、図5に示すアンテナ全体の3D設計モデルを作成し、内外差圧力と風圧(片面の差圧力)の強度解析を行い、使用環境下で必要な強度を確保できることを確認した。

風圧解析は、車速300km/h以上で横風を考慮した風洞実験で得られた片面に掛かる荷重から、レドーム片面に投影した差圧力の解析仕様にした。環境の種類と仕様に基づいてレドーム、ベース、基板のそれぞれの最大応力点を抽出し(図6)、疲労限度の材料強度との比率から安全率を算出し、その結果、目標の安全率を十分に満足させた。

### 3.3 アンテナの構成

小形化アンテナの構成を図7に示す<sup>(2)</sup>。低騒音化及び小形化のため、従来アンテナよりも検知棒を短縮化し、アンテナを低背化しなければならないが、従来と同等のアンテナ性能を確保する必要がある。

### 3.4 架線電圧検知性能確保の設計

検知棒の短縮化とアンテナ低背化によって、架線～アンテナ間の静電容量が低下するが、アンテナ基板面積を拡張して静電容量の減少量を軽減し(図8)、架線～アンテナ間

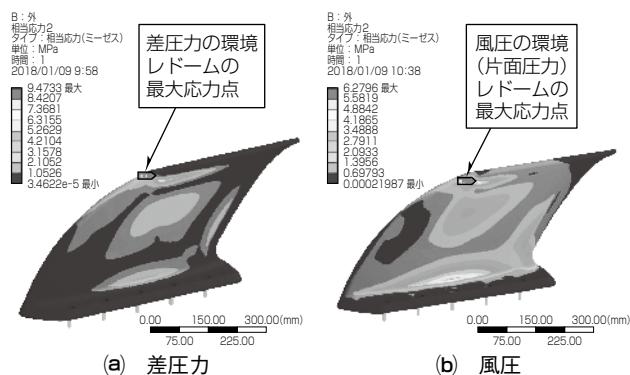


図6. 差圧力と風圧の解析結果

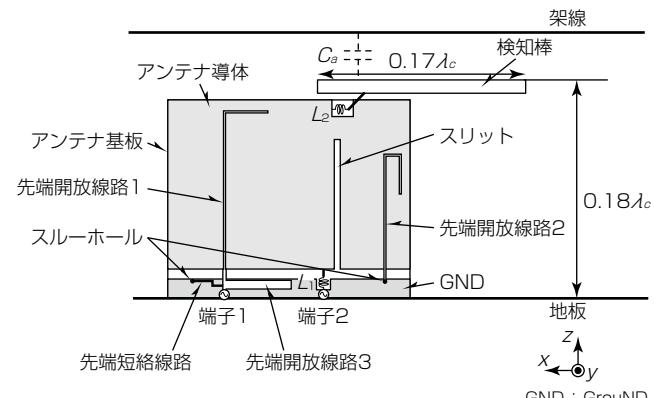


図7. 小形化アンテナの構成

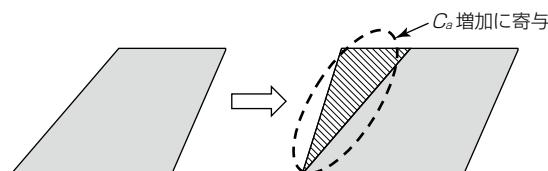


図8. アンテナ基板面積の拡張

の距離変動等の影響を検討して検知判定のしきい値を最適化することで、従来と同等の検知性能を確保した。

### 3.5 VHF帯無線通信性能確保の設計

低背化によって、アンテナが地板に近づきVHF帯のインピーダンス特性が劣化するので、従来のモノポール構造

ではなく、インピーダンス特性が調整可能な折り返しモノポール構造を採用した(図9)。また、従来は検知棒とアンテナ基板の電磁界結合によってインピーダンス広帯域化を実現していたが、今回は検知棒の長さが短くなっていることから、新たに並列共振回路を追加し、インピーダンス特性の広帯域化を行った(図10)。

### 3.6 小形化アンテナの性能評価結果

試作した小形化アンテナを図11に示す。アンテナ基板はFRP(繊維強化プラスチック)レドーム内に収まるよう最適化した。

また、試作アンテナの電気性能測定に用いた地板の条件を図12に、試作アンテナのインピーダンス特性を図13に、水平面(xy面)の放射パターン特性を図14に示す。イ

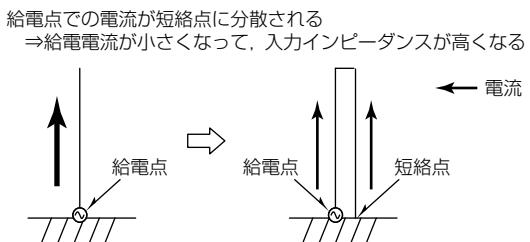


図9. 従来のモノポール構造と今回の折り返しモノポール構造

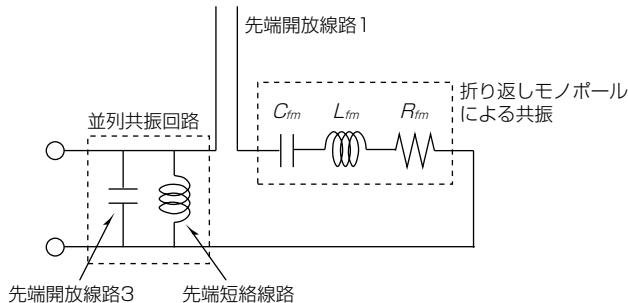


図10. インピーダンス特性広帯域化のための並列共振回路

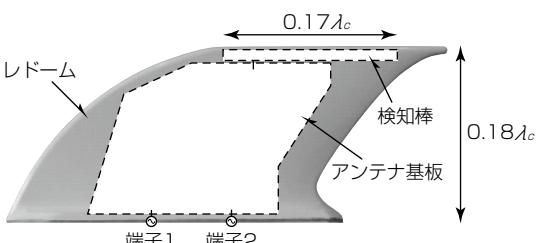


図11. 試作した小形化アンテナ

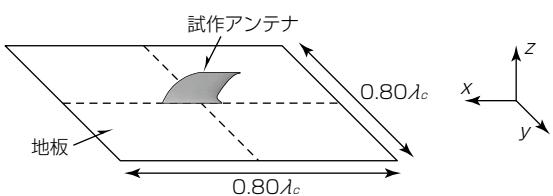


図12. 試作アンテナ測定時の地板の条件

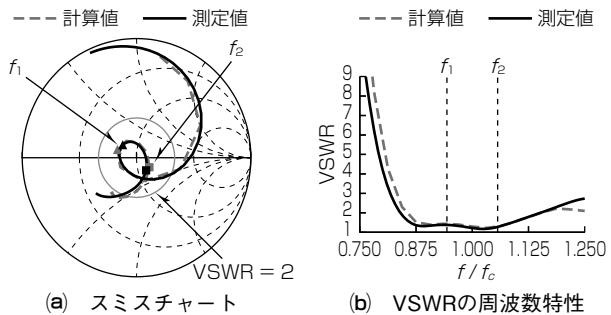


図13. 小形化アンテナのインピーダンス特性

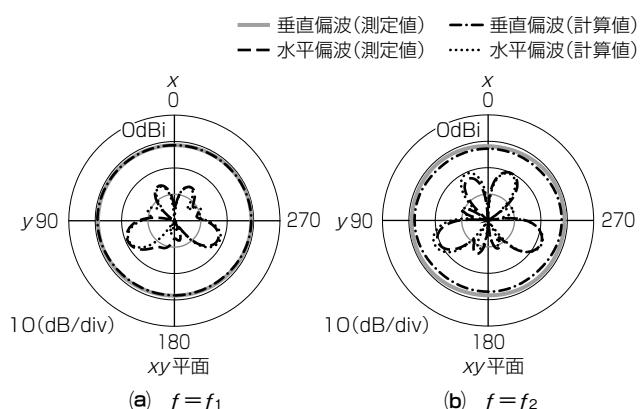


図14. 小形化アンテナの放射パターン特性

インピーダンス特性は、使用帯域f<sub>1</sub>～f<sub>2</sub>でVSWR < 2である。また、水平面でほぼ無指向性の放射パターン特性が得られている。実測値は計算値とほぼ一致する結果が得られた。

## 4. 走行試験結果

試作した小形化アンテナを東海道新幹線の車両に設置し、走行試験で各種性能評価を行った。

### 4.1 騒音測定

走行試験でアンテナの騒音特性の測定を行った。従来アンテナに比べて、アンテナ部分からの騒音は6.0dB低減した。今回的小形化アンテナ開発の目的である、低騒音化の効果を確認した。

### 4.2 応力測定

走行試験で応力測定を行った。事前の解析結果で応力が大きかった部位のひずみを測定し、環境仕様での応力値に換算することで評価した。走行試験では風圧と差圧力が合成されるが、風圧が速度の自乗に比例する想定で、応力値を換算した。その結果、最も安全率が低下したのはトンネル内の高速走行時であったが、レドーム、ベース、基板とも、目標の安全率を十分に満足した。また、走行試験では作り出せない高速走行+横風の最大風速環境を想定した風

洞試験を行い、走行試験より厳しい条件であったが、目標の安全率を十分満足していることを確認した。

#### 4.3 架線電圧検知性能

試作アンテナを新幹線の車両に搭載し、新幹線の走行エリアに敷設された架線で静電誘導される架線電圧検知性能を測定・解析した。測定は晴天時及び雨天時に実施し、解析はアンテナで得られた誘起電圧を、架線電圧検知のシステム設計のしきい値に対する比率(しきい値比)として求めた。従来アンテナと小形化アンテナでシステム設計から要求されるしきい値は異なっている。解析結果のうち、晴天時を図15(a)、雨天時を図15(b)に示す。最小のしきい値比は、従来アンテナでは4.01(晴天時)、3.43(雨天時)、小形化アンテナでは4.76(晴天時)、4.80(雨天時)であり、従来と同等以上の架線電圧検知性能を確保できていることを確認した。晴天時と雨天時のどちらでも、東海道全区間での使用に問題がないことを実証できた。

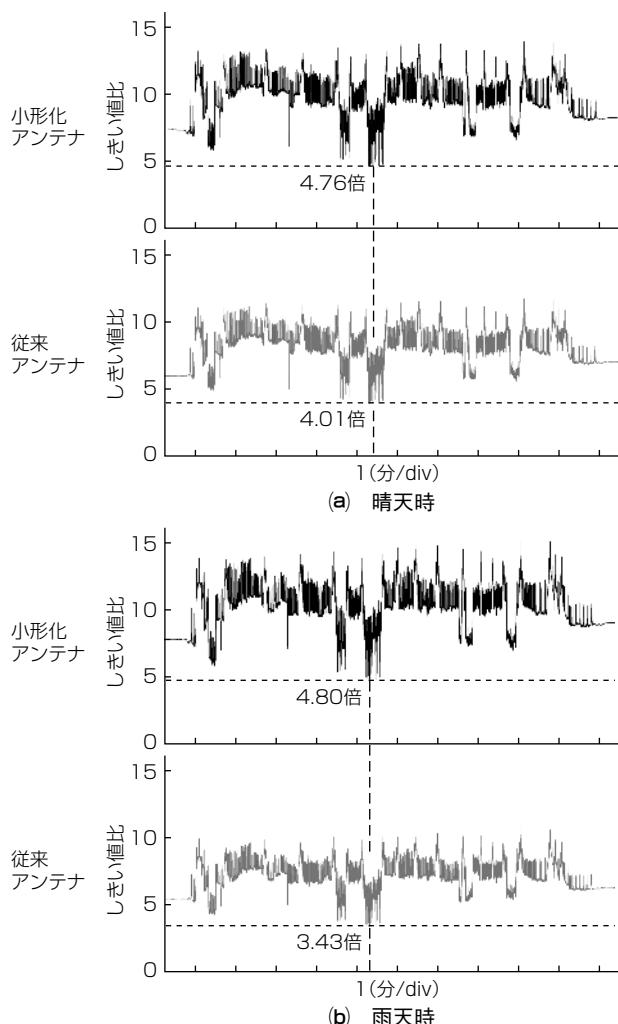


図15. 架線電圧検知の特性比較

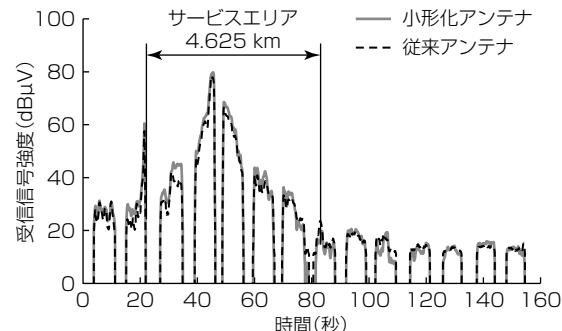


図16. VHF帯無線通信の受信信号強度測定結果例

#### 4.4 VHF帯無線通信性能

新幹線の走行中に、VHF帯無線通信サービスエリアでの受信信号強度(Received Signal Strength Indicator : RSSI)を測定した。無線性能の測定は、地上→車上の通信方向で、間欠送信(送信10秒、休止5秒の繰り返し)の条件で行った。測定結果の一例を図16に示す。車上のアンテナが地上の送信アンテナに最も近づくサービスエリア内の中央付近でRSSIが最大になって、車上アンテナが地上アンテナから離れるに従々RSSIが小さくなっていく。サービスエリアの境界地点でも、無線通信システムが要求する基準値以上のRSSIが得られていることを確認した。また、小形化アンテナで測定したRSSIは、従来アンテナの値と比べて同じか少し大きい(0~2.6dB高い)という結果が得られた。これらの試験結果から、小形化アンテナがVHF帯無線通信用アンテナとして、従来と同等以上の性能を持っていることを確認した。

### 5. むすび

高速化する新幹線の低騒音化のため、車両の屋根上に搭載された従来の静電アンテナよりも滑らかな形状・小形化した小形化静電アンテナを開発した。

試作アンテナの単体測定による設計の妥当性を確認後、走行試験による実証を行うことで、開発したアンテナは、高速走行時の風圧等に耐える強度を十分確保し、従来と同等以上の架線電圧検知性能及びVHF帯無線通信性能を実現した上で、低騒音化を成し得たことを検証した。

今回開発した小形化静電アンテナは東海道・山陽新幹線用新車両N700Sに搭載され、低騒音化に貢献する。

### 参 考 文 献

- (1) 黒田忠光, ほか:東海道新幹線架線電圧検知・構内無線共用アンテナ, 三菱電機技報, 38, No.4, 680~683 (1964)
- (2) 西本研悟, ほか:新幹線向け架線電圧検知/無線通信共用アンテナの小形化, 電子情報通信学会技術研究報告, A・P2019-115, RCS 2019-207 (2019)

## 海外スマートメータ対応通信ユニット

Transceivers for Oversea Smart Meters

樋口晃二\*  
Koji Higuchi  
西本研悟†  
Kengo Nishimoto  
福田洋三\*  
Yozo Fukuda

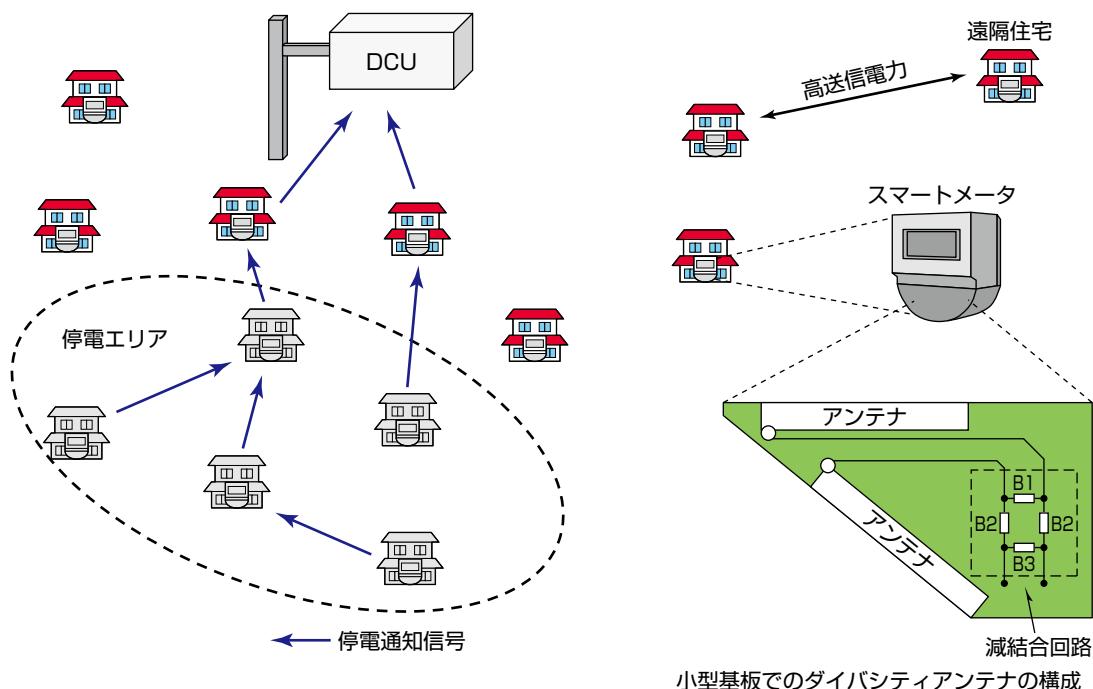
## 要旨

電力スマートメータ(以下“スマートメータ”という。)は通信機能を備えた電力メータで、遠隔自動検針、遠隔制御、HEMS(Home Energy Management System)連携による電力使用量の可視化を実現する。三菱電機はスマートメータ用に920MHz特定小電力無線を適用した無線マルチホップネットワークを実用化しており、国内電力会社に広く採用されている。

今回、新たに海外スマートメータ対応として無線マルチホップ方式の通信装置(以下“通信ユニット”という。)を開発した。開発に当たり、

- (1) 海外メータ形状への対応、停電通知機能(Last Gasp機能)の実装要求を踏まえた装置の小型・低消費電力化

- (2) 各戸のメータ間距離が大きい、設置環境によってDCU(Data Concentrator Unit)の設置が困難などの厳しい電波伝搬条件下での安定した無線通信品質の確保という課題があった。特に無線通信品質の確保に対しては電波の到來方向による影響を最小化するダイバシティアンテナ技術が有効であるが、装置の小型化に伴ってダイバシティを構成する2アンテナ間で利得差が発生してしまうことが問題であった。これを集中定数素子を用いた減結合回路によって解決し、小型化と無線通信品質確保を両立させた。また、低消費電力化の実現によって、1,000台規模のメッシュネットワークエリアで、停電エリア検出を可能にした。



## メッシュネットワークでの停電通知と無線通信品質の確保

メッシュネットワークでの停電エリア検出は、停電状態での自メータ及び他メータの停電通知信号の転送動作を、キャパシタの保持電力を有効活用することで実現した。小型化に伴うアンテナ性能劣化は集中定数素子を用いた減結合回路によって解決し、所望の無線通信品質を確保した。

## 1. まえがき

スマートメータシステムはエネルギーの効率的な利用、計量データの活用による様々なサービス提供などが期待され、各国で導入が進められている。例えば、

- (1) 検針作業の自動化による省力化
- (2) 電気利用状況の見える化による省エネルギー効果
- (3) 需給逼迫(ひっぱく)時の需要抑制による停電回避
- (4) 料金メニューの多様化によるユーザーメリット向上
- (5) 計量データの活用による新規サービス提供
- (6) スマートグリッド対応
- (7) 盗電対策

など、スマートメータシステム導入によって、電力供給の安定化、効率化、及び計量データの幅広い分野への活用が期待できる。

無線マルチホップ方式によるスマートメータ通信システムの全体構成を図1に示す。各戸のスマートメータに取り付けられる通信ユニットは、相互通信機能によるメッシュネットワークを構築している。メータの情報はメッシュネットワーク内の通信ユニットを経由することで、DCUへ集約され、IP(Internet Protocol)ネットワーク網を介して上位システムであるHES(Head End System)へ転送される。

海外では、電力需給逼迫やインフラ不備などによって、電力品質が不安定で停電発生頻度が高い国や地域があり、停電発生時の早急なエリア検出と復旧が重要な課題になっている。通信ユニットへの停電通知機能(Last Gasp機能)搭載は、早急な停電検出とともにメータ単位で停電を監視できるメリットがある。ただし、メッシュネットワークシステムでは、自メータの停電通知だけでなく、他メータの停電通知信号の転送処理が必要になり、電源が供給されない状態で動作しなければならないため、その電源確保が必須になる。

一方、スマートメータは各国、各地域で様々な形状・構造のものが採用されており(図2)，同一地域内で形状・構造の違うメータが設置されることも少なくない。通信ユニットはメッシュネットワーク全体の通信品質を確保するために、どのメータにも実装可能かつ無線性能を均一に保つ必要がある。

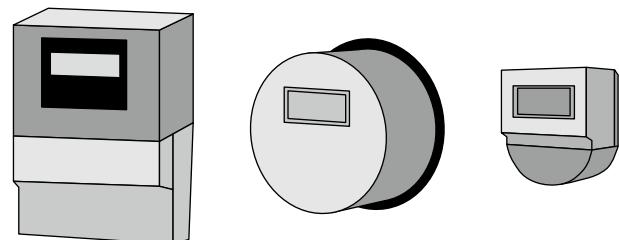


図2. スマートメータの形状例

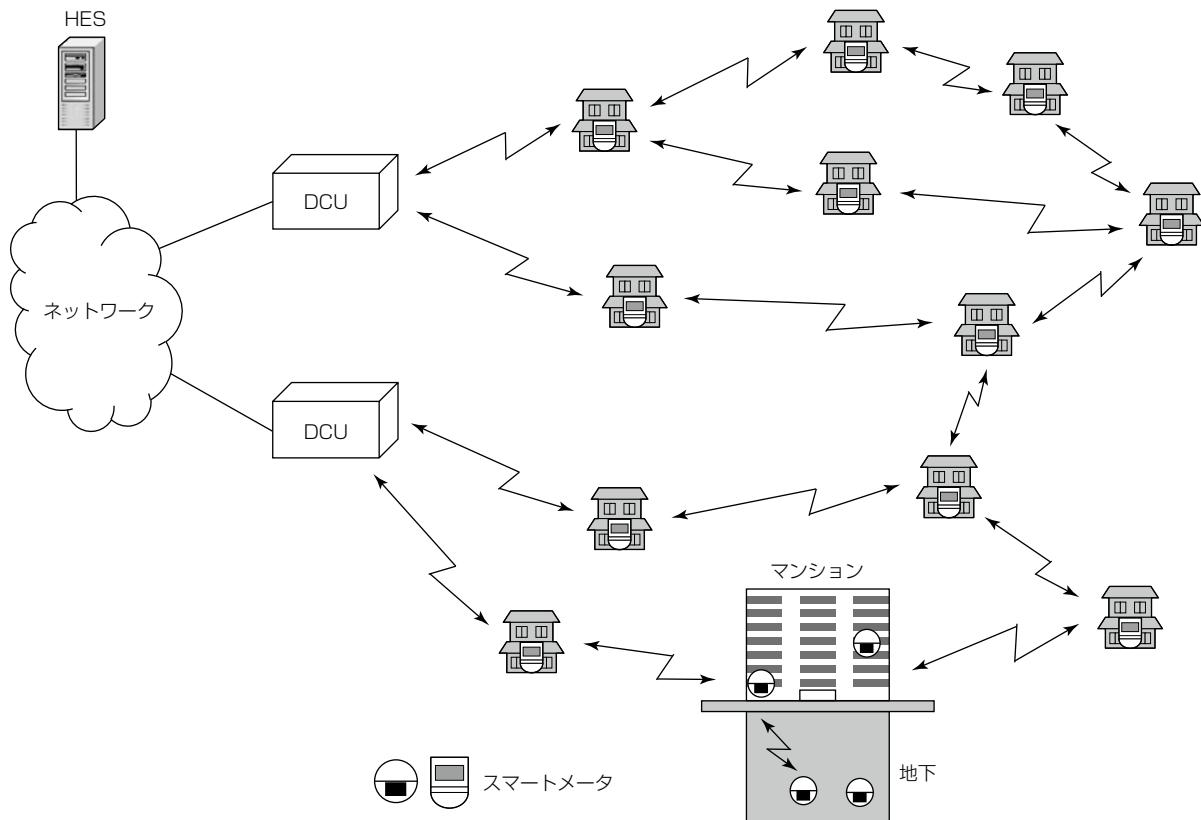


図1. スマートメータ通信システムの全体構成

## 2. 海外向けスマートメータ通信ユニット

図3に通信ユニット基板のブロック構成を、図4に機能ブロック図を示す。通信ユニットはメータ内部に実装する必要があり、小型化を目的にして全機能を1枚基板で実現している。次に、各ブロックについて述べる。

### 2.1 外部インターフェース部

メータとの電源と信号のインターフェースを行う。メータへの通信ユニットの装着と抜去はメータ電源が入った状態で行う必要があるため、活線挿抜に対応したインターフェースを実現している。

### 2.2 電源・Last Gasp部

メータ供給電源からキャパシタへの充電、及び内部動作用電源供給を行う。停電時はキャパシタの保持電力によって、Last Gasp機能を行う。

### 2.3 制御部・無線部

通信ユニットの各機能を制御するとともに、無線通信機能を実現する。無線周波数は800MHz帯、無線規格はEN300-220に対応する。国内向け特定小電力無線の送信電力は、電波法に20mW以下(ライセンスバンド除く)と

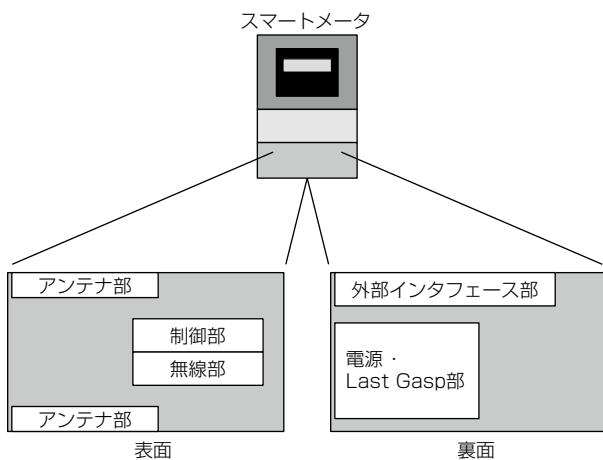


図3. 通信ユニット基板のブロック構成

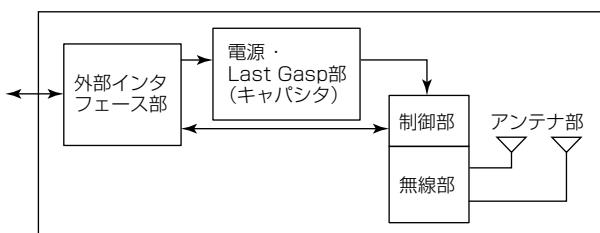


図4. 通信ユニット基板の機能ブロック図

定められているが、海外では最大1Wまでの規定が存在する。海外特有のメータ設置環境を考慮して送信電力の高出力化を行っている。

### 2.4 アンテナ部

実使用環境での無線信号のレベル変動下でも安定した通信を確保するため、アンテナ2本による2プランチ選択ダイバシティを行っている。

## 3. 海外向けスマートメータ通信ユニットの特長

### 3.1 停電通知機能(Last Gasp機能)の実現

#### 3.1.1 Last Gasp機能の動作

Last Gasp機能の停電発生時の動作について図5を用いて述べる。

##### (1) 停電検出

メータからの停電検出信号受信又は供給電源低下検出を行い、停電動作を開始する。

##### (2) 復電確認

短時間停電時の通信の輻輳(ふくそう)及び上位システムでの処理の輻輳を防ぐため、停電検出後メータからの供給電源状態を確認することで、最終的な停電判定を行う。

##### (3) Last Gasp動作へ移行

キャパシタエネルギーの有効利用のため、省電力動作(外部インターフェースの停止、不要動作ブロックの停止など)へ移行する。

##### (4) 自メータの停電通知と他メータの停電通知信号転送

無線通信で自メータの停電通知処理を行う。また、メッシュネットワーク内の他メータの停電通知信号転送処理を行う。図6に停電状態にあるメータからの停電通知信号のDCUまでの転送イメージを示す。この動作によって、同一メッシュネットワーク内の停電エリアが上位システム側で把握可能になる。

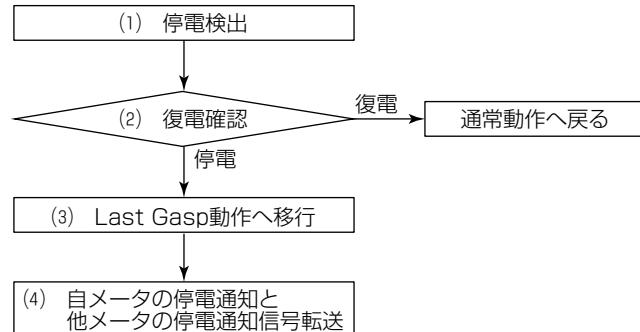


図5. Last Gasp機能の動作フロー

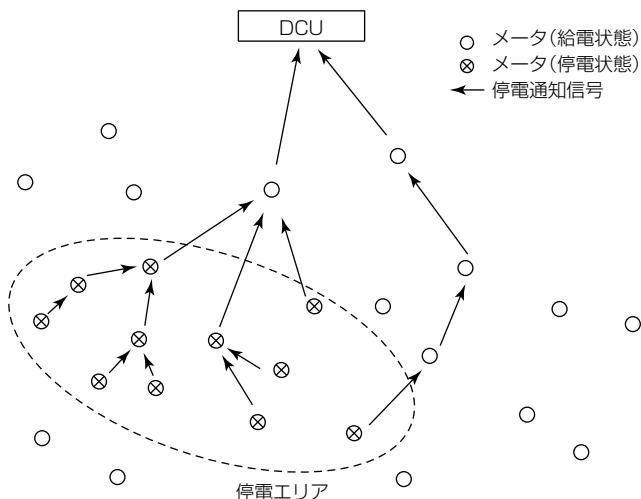


図6. 停電通知信号の転送イメージ

### 3.1.2 停電エリア検出動作

Last Gasp機能動作では有限のキャパシタエネルギーの有効活用が重要になる。動作用電源生成にDCDCコンバータを用いることで、低電圧までキャパシタのエネルギーを取り出し可能にした。また、装置回路構成、及び制御を含めた装置動作の最適化によって低消費電力化を実現し、1,000台規模のメッシュネットワークエリアで、停電エリア検出を可能にしている。

### 3.2 送信電力の高出力化

通信ユニット無線部のブロック図を図7に示す。RF (Radio Frequency)-ICからの出力にパワーアンプを追加することで、約10dBの送信電力アップを図っている。

### 3.3 ダイバシティアンテナ特性の改善

#### 3.3.1 小型化とアンテナ性能の関係

通信ユニットでは2本のアンテナによる2プランチ選択ダイバシティを構成しているが、小型の通信装置に2本のアンテナを搭載する場合には、アンテナ間の相互結合が強くなり、ダイバシティ効果(相関係数)やアンテナの放射効率が劣化するため、その改善が課題になる。

また、各国、各地域で採用されている様々なスマートメータの形状に合わせる場合、通信ユニットの小型化が必

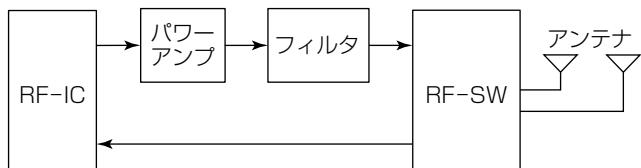


図7. 無線部のブロック図

要になる。それに伴い、基板上のアンテナ配置が平行配置からずれてしまうケースがある(図8)。このような場合、アンテナ間の離隔距離が非常に小さい上に相対位置が非対称になるために、相互結合による個々のアンテナ性能(利得)の劣化、アンテナ間の性能差を生じてしまい、ダイバシティ効果も期待できない。

この劣化原因であるアンテナによる結合を、集中定数素子からなる回路による結合で相殺させる減結合回路<sup>(1)</sup>を適用して最適化することによって、アンテナ間の性能差を改善してダイバシティ効果を確保した。

#### 3.3.2 減結合回路

図9に、少数の集中定数素子からなる小型の減結合回路の構成を示す。図8のメータA用では2個の直列のサセプタンスB2と1個の並列のサセプタンスB3の3素子でアンテナ間結合を低減していたが、メータB用では、並列のサ

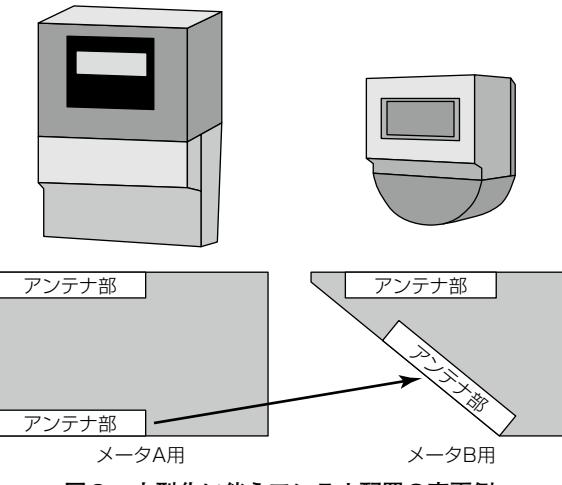


図8. 小型化に伴うアンテナ配置の変更例

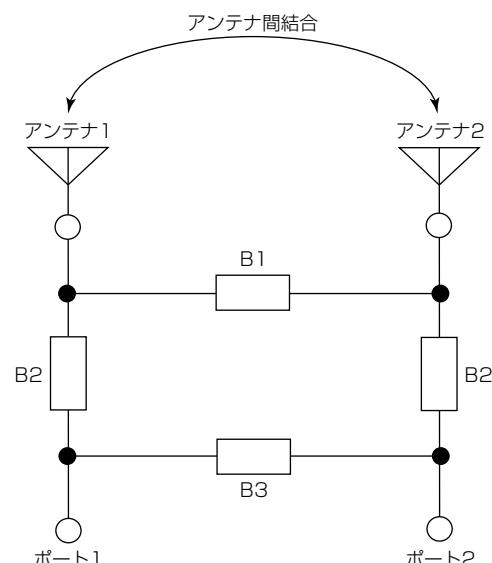


図9. 減結合回路

セプタンスB1を追加して改善を行った。

負荷B1の反射係数の偏角を $\gamma = 2\tan^{-1}(-B1R0)$ とおき( $R0 = 50\Omega$ )、 $\gamma$ を変化させた時のポート1, 2給電時の相対放射効率を図10に示す。B1がない従来の減結合回路( $\gamma = 0^\circ$ )では、ポート1, 2給電時の放射効率の差が大きくなるが、B1を挿入して $\gamma = 105^\circ$ とすることで、ポート1, 2給電時の放射効率を等しくした。

次に、減結合回路有無時の相互結合測定結果を図11に示す(横軸は使用周波数帯域の中心周波数 $f_0$ で規格化した周波数)。図9の減結合回路によって $f_0$ 近傍(使用周波数帯域幅は $f/f_0 \pm 0.005$ )で相互結合を大きく低減させた。

### 3.3.3 改善効果

#### (1) アンテナ性能の改善結果

図10に示すとおり、減結合回路の改善によって、2ア

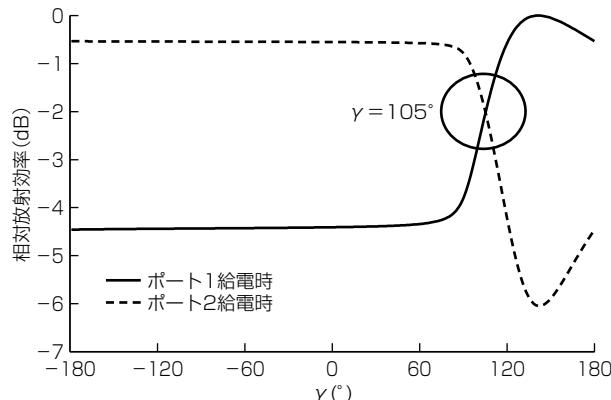


図10.  $\gamma$ とポート1, 2給電時の放射効率

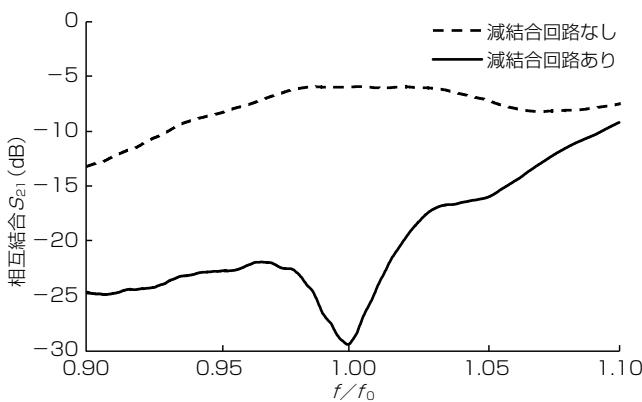


図11. 減結合回路有無時の相互結合測定結果

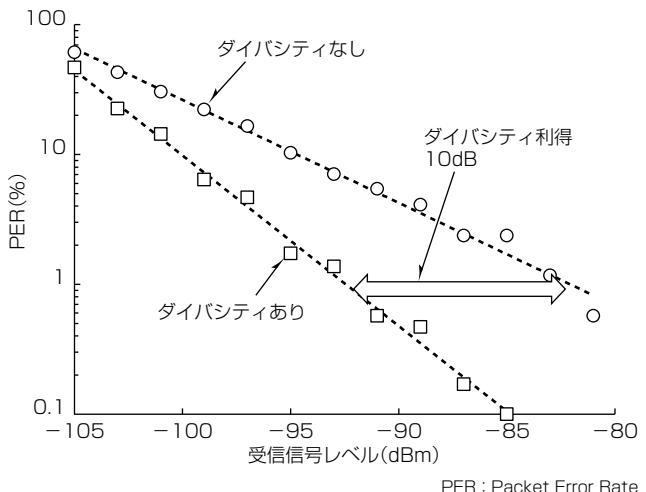


図12. アンテナダイバシティ利得(フェージングあり)

ンテナの利得をほぼ等しくし、2アンテナ間の利得差を約4 dB改善した。

また、この改善の適用は、アンテナ配置の変更に伴う2アンテナ間の性能差だけでなく、通信ユニットを実装するスマートメータ内の構造物による影響も低減させる効果がある。

#### (2) ダイバシティ効果

アンテナダイバシティによる効果を図12に示す。3.3.2項で述べたとおり、2アンテナ間の相関を下げ、利得のバランスを確保することで、約10dB(感度規定 PER = 1%)の利得改善を実現した。

## 4. むすび

海外スマートメータに搭載する通信ユニットについて、海外で重要な機能であるLast Gasp機能、及びアンテナを含む無線性能向上について述べた。海外向け通信ユニットは、各国、各地域で採用されているスマートメータの形状に合わせてアンテナ性能を安定して確保することが課題になる。今後の製品開発では、アンテナ性能を中心とした無線性能の更なる改善を進める。

## 参考文献

- (1) Nishimoto, K., et al.: Decoupling networks composed of lumped elements for diversity/MIMO antennas, 2013 IEEE APWC, 307~310 (2013)

# 10G-EPONユーザー宅内装置

Optical Network Unit for 10Gigabit Ethernet Passive Optical Network

高橋浩司\*  
Koji Takahashi  
稲村卓也\*  
Takuya Inamura  
平瀬貴博\*  
Takahiro Hirase

## 要旨

光アクセスネットワークとしてデータ伝送速度が最大1 GbpsであるGE-PON(Gigabit Ethernet-Passive Optical Network)システムが広く普及しているが、インターネットを用いた高精細映像配信やテレワークの浸透によって、データ伝送速度の高速化要求が年々高まっている。

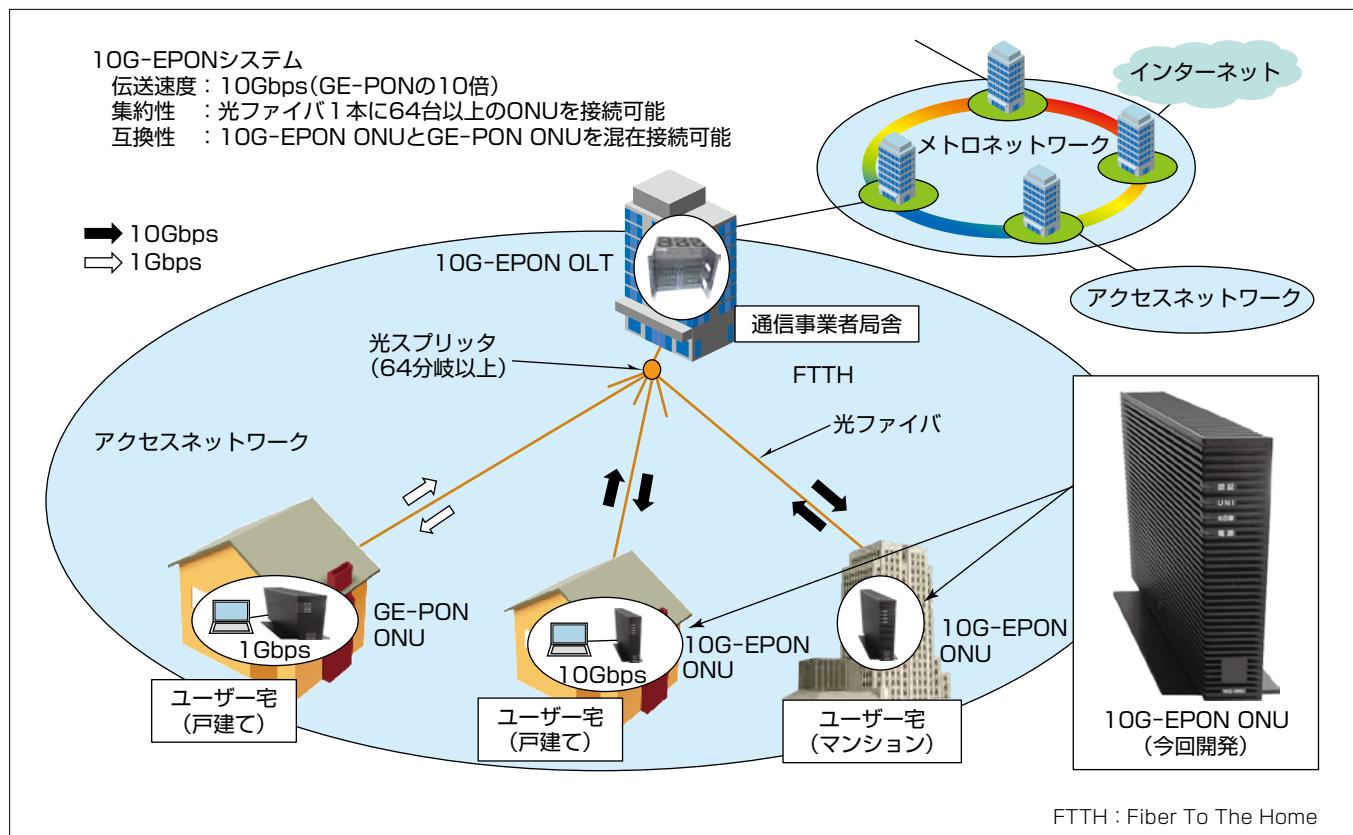
三菱電機は、GE-PONシステムの後継として、データ伝送速度を最大10Gbpsに高速化した10G-EPON(10 Gigabit-Ethernet Passive Optical Network)システムを開発した。

10G-EPONシステムは、通信事業者局舎内装置(Optical Line Terminal: OLT)とユーザー宅内装置(Optical Network Unit: ONU)で構成しており、ユーザー宅内に

設置される10G-EPON ONUは、高速化での課題を次の機能を搭載することによって解決した。

- (1) 前方誤り訂正(Forward Error Correction: FEC)機能搭載によるOLTとONU間のパワーバジェット(送信器の出力レベルと受信器の感度の差)の確保
- (2) 2.5G/5G/10GBASE-Tへの対応と優先制御機能搭載によるONUとユーザー端末間の高速化と通信安定化
- (3) 動的消費電力削減技術搭載等による省電力化
- (4) 自己監視機能搭載による保守運用性の向上

2018年から10G-EPON OLTを、2020年から10G-EPON ONUを通信事業者向けに提供開始し、社会の発展に貢献している。



## 10G-EPONシステム

通信事業者局舎内に設置される10G-EPON OLTとユーザー宅内に設置される10G-EPON ONUで構成し、OLTとONU間のデータ伝送速度を従来比10倍の10Gbpsに高速化している。OLTからONUへのデータ送信には波長多重技術、ONUからOLTへのデータ送信には時分割多元接続技術を適用し、10G-EPON ONUとGE-PON ONUの混在収容を可能にしている。

## 1. まえがき

FTTHによるインターネットサービスの国内契約者数は2017年に3,000万人を超える、2019年12月時点で3,274万人に達している<sup>(1)</sup>。さらに、インターネットを用いた高精細映像配信やテレワークの普及によって、データ伝送速度の高速化要求が年々高まっている。

10G-EPONシステムは、FTTHを始めとする光アクセスネットワークに広く適用されているGE-PONシステムの後継システムであり、高速大容量化を図っている。

本稿では、まず10G-EPONシステムについて述べ、次に今回開発した10G-EPON ONU(以下“10G-ONU”という。)に適用した伝送速度の高速化技術、優先制御技術、省電力化技術、保守運用性改善技術について述べる。

## 2. 10G-EPONシステム

図1に10G-EPONシステム構成を、表1にGE-PONシステム及び10G-EPONシステムの主要諸元を示す。10G-EPONシステムは、通信事業者局舎内に設置される10G-EPON OLTとユーザー宅内に設置される10G-ONUで構成し、OLTとONU間のデータ伝送速度を、GE-PONシステムの10倍になる最大10Gbpsへ高速化したシステムである。また、OLTからONUへのデータ送信(以下“下り方向通信”という。)には波長多重技術、ONUからOLTへのデータ送信(以下“上り方向通信”という。)には時分割多元接続技術を適用し、同一ファイバ上に複数のONUを接続可能にしている。

10G-EPONシステムの特長の一つとして、10G-ONUとGE-PON ONU(以下“1G-ONU”という。)の混在収容が挙げられる。10G-EPONシステムでは、下り方向通信は全てのONUに対して同報送信される。10G-ONUに対しては発光波長1,577.5±2.5nmの光信号、1G-ONUに対しては発光波長1,490±10nmの光信号を用い、各々のONUの光受信器に具備した波長フィルタによって適切な波長を選択することで、10G-ONUは10Gbpsのデータ信号だけを、1G-ONUは1Gbpsのデータ信号だけを受信できるようになっている(波長分割多重技術)。一方、上り方向通信では、10G-ONUは発光波長が1,270±10nm、1G-ONUは1,310±50nmの光信号を送信するため、波長が一部重なり波長多重技術が適用できない。そこでOLTからONUに対して上り方向の送信タイミングを割り当て、10Gbpsと1Gbpsのデータ信号が光ファイバ上で衝突しないように制御している(時分割多元接続技術)。これらの技術を適用することによって、10G-EPONシステム上での

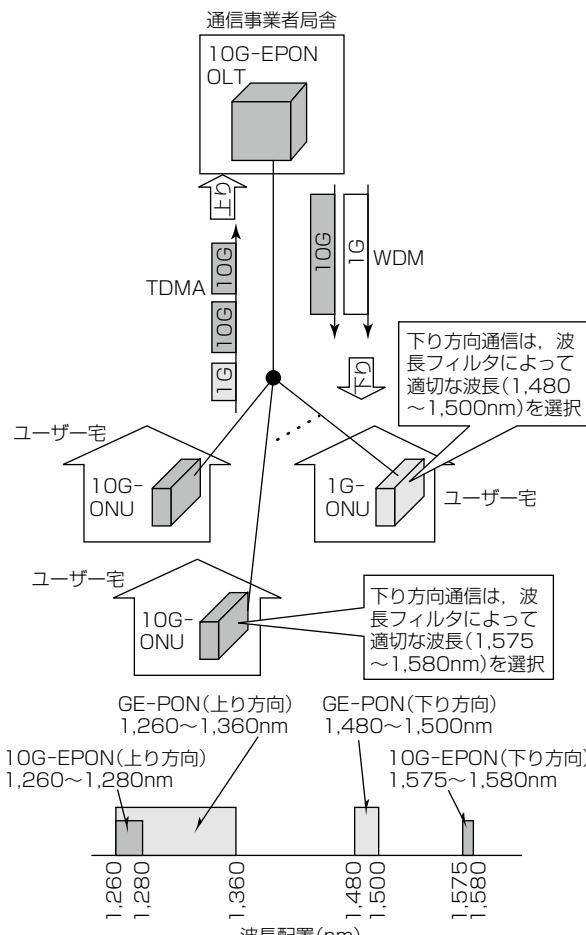


図1. 10G-EPONシステム構成

表1. システムの主要諸元

項目	GE-PON	10G-EPON
データ伝送速度	1 Gbps	10Gbps(実効帯域は約8.7Gbps)
物理速度	1.25Gbps	10.3125Gbps
FEC機能	オプション	必須
発光波長(上り方向)	1,310±50nm	1,270±10nm
発光波長(下り方向)	1,490±10nm	1,577.5±2.5nm
伝送媒体	IEC60793準拠 シングルモード光ファイバ (1.3μm零分散)	
ファイバ本数		1本(一芯双方向)
ONU接続台数(最大)	32台以上	64台以上

10G-ONUと1G-ONUの混在収容を実現し、データ伝送速度が最大1Gbpsの従来のFTTHサービスを継続しつつ、10Gbpsに対応した新しいFTTHサービスへのスムーズな移行を可能にした。

## 3. 10G-ONUの開発

### 3.1 10G-ONUの主要諸元

10G-ONUの主要諸元を表2に示す。OLTとONU間、ONUとユーザー端末間共に、最大10Gbpsのデータ伝送

表2. 10G-ONUの主要諸元

項目	10G-ONU
外形寸法 (mm)	35(W) × 195(D) × 170(H)
質量	0.8kg以下
空冷方式	自然空冷
設置条件	屋内
温度条件	0 ~ 40°C
湿度条件	30 ~ 95% (結露しないこと)
OLT側 インタフェース	ポート数 1ポート
	コネクタ SCコネクタ (JIS C 5973)
	伝送媒体 IEC60793準拠 シングルモード光ファイバ (1.3μm零分散)
	準拠規格 IEEE802.3-2018 10GBASE-PR30
	使用波長 上り: 1,260~1,280nm 下り: 1,575~1,580nm
	送信光レベル +4.0~ +9.0dBm
	受信光レベル -28.5~ -10.0dBm
ユーザー側 インタフェース (UNI)	ポート数 1ポート
	コネクタ RJ45コネクタ (IEC60603-7)
	伝送媒体 ANSI/TIA/EIA-568-A UTPケーブル
	IEEE802.3-2018 10GBASE-T(全二重) 5GBASE-T(全二重) 2.5GBASE-T(全二重) 1000BASE-T(全二重) 100BASE-TX(全二重)
	準拠規格
	主要機能
	・暗号化機能 ・FEC機能 ・優先制御機能 ・VLAN機能 ・省電力化機能 ・保守機能
給電方式	AC100V 50/60Hz VLAN: Virtual Local Area Network

速度に対応し、伝送速度を1G-ONUの10倍に向上させた。また、省電力技術の適用によって、高速化に伴う消費電力増加の課題を克服し、35(W) × 195(D) × 170(H) (mm)の外形寸法を自然空冷で実現した。10G-ONUの外観を図2に示す。

### 3.2 OLTとONU間の高速化技術

10G-EPONシステムも従来のGE-PONシステムと同じ光ファイバ伝送網を使用するため、光送受信器はGE-PONシステムと同じパワーバジェット(送信器の出力レベルと受信器の感度の差)を確保する必要がある。一方、



図2. 10G-ONU

10G-EPONシステムでは、OLTとONU間の物理速度を1G-ONUの1.25Gbpsから10.3125Gbpsに高速化するため、光受信器の受信感度が劣化する。光受信器の受信感度劣化を、光送信器の高出力化及び光受信器の高感度化だけで実現することは困難であるため、光送信器の高出力化と光受信器の高感度化に加えて、FECを必須機能として搭載することで、GE-PONシステムと同じパワーバジェットを実現した。

10G-EPONシステムで搭載必須にしたFEC機能は、訂正アルゴリズムにリードソロモン(255, 223)符号を適用し、データ量216バイトに対して32バイトのパリティを付与して送信する方式である<sup>(2)</sup>。パリティ付与によって、実効帯域は8.7Gbps(=10Gbps × 216バイト/(216バイト + 32バイト))となるが、FEC訂正前にBER(Bit Error Rate)  $\leq 10^{-3}$ の入力データをFEC訂正によってBER  $\leq 10^{-12}$ に引き下げることができ、受信感度劣化の改善効果がある。

図3にONU接続台数とONU1台当たりの平均スループットの関係を示す。ONU1台当たりの最大スループットは、ONU接続台数によらず、GE-PONシステムでは1Gbps、10G-EPONシステムでは8.7Gbpsになるが、PONシステムでは伝送帯域を全ONUで分配するため、ONU接続台数が増加すると平均スループットは低下する。図3から、ONUを32台接続した場合の平均スループットは、GE-PONシステムでは31Mbps/台まで低下するが、10G-EPONシステムでは272Mbps/台を確保可能である。さらに、ONUを64台接続した場合でも、10G-EPONシステムの平均スループットは136Mbps/台であり、ONU接続台数が増えてもユーザーは高速化の恩恵を受けることができる。

### 3.3 UNIの高速化技術

10G-ONUのユーザー側インターフェース(User Network Interface: UNI)は、1G-ONUのときの100BASE-TXと

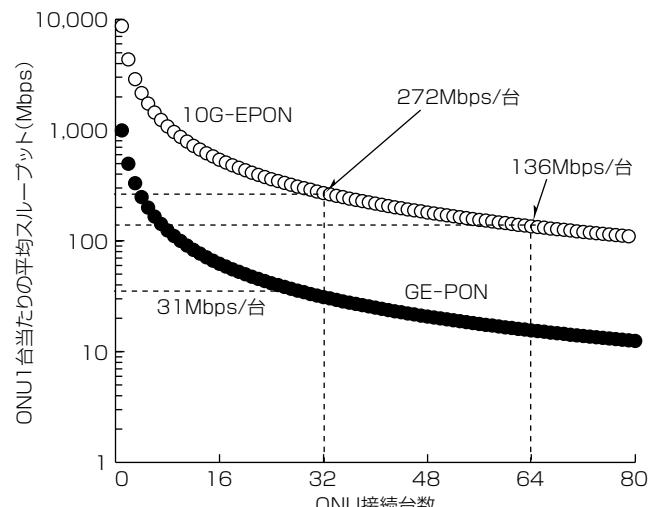


図3. スループット(理論値)の比較

1000BASE-Tに加えて、2.5GBASE-T、5GBASE-T、10GBASE-TのEthernet<sup>(注1)</sup>規格に対応することで、ONUとユーザー端末間のデータ伝送速度を最大10Gbpsに高速化した。

10GBASE-Tは、一般家庭にも普及している1000BASE-Tと同様のUTP(Unshielded Twist Pair)ケーブルを使用するEthernet規格で、IEEE802.3anとして2006年に標準化された。ただし、UTPケーブルのカテゴリーは、1000BASE-TのCat.5Eよりも高規格になるCat.6A以上を使用する必要がある<sup>(3)</sup>。1000BASE-Tから符号化方式及び信号変調方式を変更し、FECを適用することで、10倍のデータ伝送速度を実現している。

一方、2.5G/5GBASE-Tは、IEEE802.3bzとして2016年に標準化された規格である。10GBASE-Tと比較してデータ伝送速度は1/4又は1/2になるが、10GBASE-Tより消費電力が低く、1000BASE-Tで使用していた敷設済みのCat.5E又はCat.6のUTPケーブルを使用して2.5Gbps又は5Gbpsの高速通信が可能である<sup>(4)</sup>。Ethernet規格と対応するケーブルカテゴリーを表3に示す。

10G-ONUのUNIは様々なEthernet規格に対応したため、ユーザーはユーザー端末側が10GBASE-Tに対応していない場合でも1G-ONUのときと同じ1000BASE-Tで使用でき、ユーザー端末側が高速なEthernet規格に対応している場合には2.5G/5G/10GBASE-Tによる高速化の恩恵を受けることができる。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス株の登録商標である。

### 3.4 優先制御技術

10G-ONUは、OLT側インターフェースのデータ伝送速度が最大10Gbpsに対して、UNIは5Gbps以下(10GBASE-T以外の100/1000/2.5G/5GBASE-Tで接続時)の場合があるため、10G-ONU内でEthernetフレームの滞留・廃棄が発生する。電話や映像データといった優先度が高いフレームの10G-ONU内での滞留・廃棄を回避するために搭載した優先制御機能を図4に示す。

優先制御機能は、クラシファイ機能、プライオリティキューイング機能によって実現している。クラシファイ機

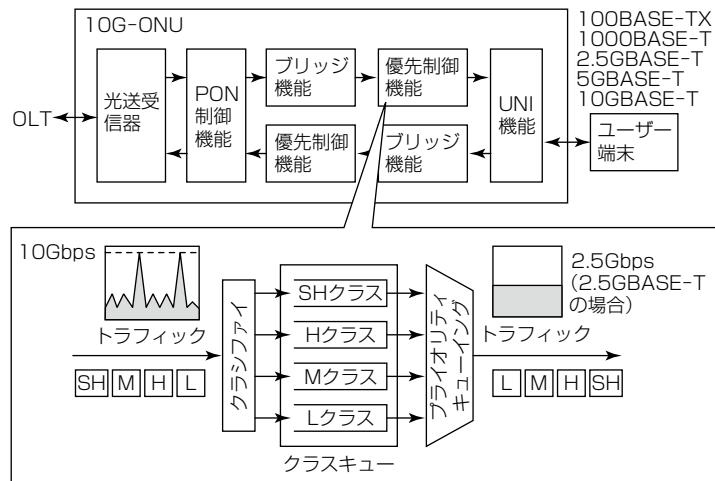


図4. 10G-ONUのブロック図

能は、OLTから入力されたEthernetフレームの優先度に基づき、SH(最高優先)、H(高優先)、M(中優先)、L(低優先)にクラス分けし、各々のキューに格納する。プライオリティキューイング機能は、キューに格納されたフレームを優先度が高いクラスから順に読み出し、ユーザー端末へ送信する。優先制御機能によって、OLTからの平均フレーム入力レートがUNI速度を超過した場合でも、高優先フレームのONU内での滞留・廃棄を回避できる。

### 3.5 省電力化技術

近年、地球温暖化対策の視点から、情報通信技術分野の電子機器でも低消費電力化の要求が高まっている。10G-ONUでは、低消費電力のデバイスを採用するとともに、動的消費電力削減技術を搭載することで、低消費電力化を実現した。

#### 3.5.1 低消費電力デバイスの採用

UNIの高速化に向けて適用した10GBASE-Tは、他のEthernet規格(例えば、5GBASE-T等)と比較して、物理層ICの消費電力が大きいという課題があった。10G-ONUでは、最も低消費電力の物理層ICを採用するとともに、基板上配線の低損失化等によって、消費電力を削減した。

当社ONUのデータ伝送速度当たりの消費電力の推移を図5に示す。縦軸は2004年に製品化した1G-ONUのデータ伝送速度当たりの消費電力を1.0として規格化してある。2014年までのプロットは1G-ONUの消費電力を示しており、2004年から2007年は搭載部品の集約化(Application Specific Integrated Circuit : ASIC)、2007年から2014年は電気回路の最適化によって消費電力を削減した。2019年のプロットは今回開発した10G-ONUの消費電力0.18(arb. unit)を示しており、2014年に製品化した1G-ONUの0.22(arb. unit)に対し十分に省電力化が図られている。

表3. Ethernet規格と対応ケーブルカテゴリー

Ethernet規格	ケーブルカテゴリー			
	Cat.5	Cat.5E	Cat.6	Cat.6A
100BASE-TX	○	○	○	○
1000BASE-T		○	○	○
2.5GBASE-T		○	○	○
5GBASE-T			○	○
10GBASE-T				○

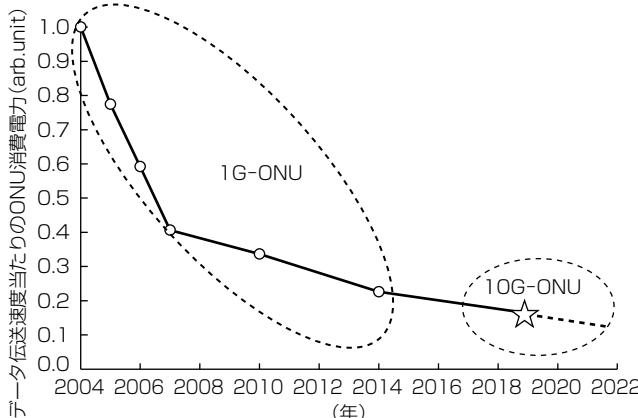


図5. 当社ONUのデータ伝送速度当たりの消費電力の推移

### 3.5.2 動的消費電力削減技術

10G-ONUの動的消費電力削減技術の動作を図6に示す。データ伝送が必要なとき以外は消費電力を削減する技術として、UNIにはIEEE802.3az(Energy Efficient Ethernet)を、OLT側インタフェースには光送信器を動的にシャットダウンする技術を搭載した。一定時間、ユーザー端末側からデータ受信がない場合、低消費電力動作に遷移し、ユーザー端末側からデータを受信すると通常動作に遷移することで、低消費電力化を実現している。低消費電力動作中は、光送受信器をシャットダウンするスリープ期間と、シャットダウンを解除しOLT-ONU間の制御データの送受信だけ許可するアクティブ期間を周期的に繰り返している。これによって、低消費電力動作中も、OLTからONUの監視・制御を可能にしている。

### 3.6 保守運用性改善技術

10G-ONUは、保守運用性を向上するため、フレーム転送の正常性と光送受信器の発光状態、装置内温度を監視する自己監視機能を搭載した。図7に10G-ONUの自己監視機能を示す。

フレーム転送の正常性監視は、フレーム転送に関わる各々の機能ブロックにCRC(Cyclic Redundancy Check)による監視機能を搭載することで実現した。フレーム転送の正常性監視機能を搭載することによって、通信障害発生時の原因特定が容易になる。

光送受信器の正常性監視は、PON制御機能と連携することで実現した。故障等によって光送受信器が連続発光状態になった場合など、OLTから指定された発光タイミングと異なる発光状態(誤発光状態)になったときに、光出力を停止することが可能になり、誤発光による他ONUの通信への影響を回避できる。

また、装置内温度の監視は、基板上に温度センサを搭載

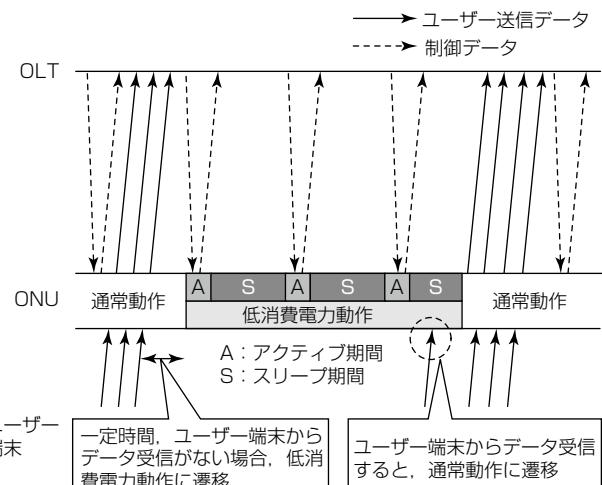


図6. 動的消費電力削減技術の動作

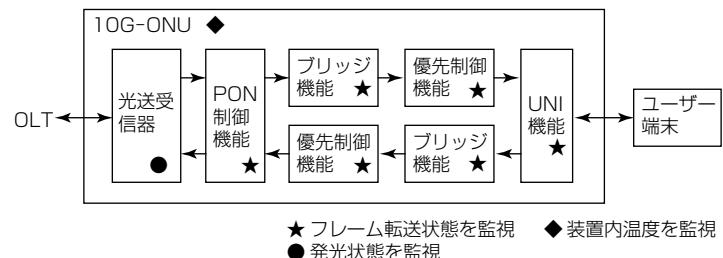


図7. 10G-ONUの自己監視機能

することで実現した。異常発熱時に10G-ONUの動作を停止することで発熱を抑制し、安全性を高めた。

## 4. む す び

OLTとONU間及びONUとユーザー端末間のデータ伝送速度を最大10Gbpsに高速化した10G-EPOON ONUを開発した。昨今、5Gに代表されるモバイルネットワークの広帯域化が進んでおり、10G-EPOONを適用したFTTHサービスはそのオフロード回線としてもますます重要性が増していくと想定される。引き続き10G-EPOONの普及に貢献していくとともに、これまでの開発で培った光アクセスネットワーク技術や当社が持つ多様な技術を活用して、次世代の光アクセスネットワークシステムの開発を進め、社会の発展に寄与していく。

### 参 考 文 献

- 総務省：ブロードバンドサービス等の契約数の推移(四半期) (2020) <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/data/gt010103.xls>
- IEEE Std 802.3-2018 : IEEE Standard for Ethernet (2018) [https://standards.ieee.org/standard/802\\_3-2018.html](https://standards.ieee.org/standard/802_3-2018.html)
- JEITA：ツイストペア配線 最新規格動向と関連情報 (2011)
- NBASE-T ALLIANCE : NBASE-T Performance and Cabling Guidelines (2016) [https://archive.nbasec.ethernetalliance.org/wp-content/uploads/2016/08/NBT\\_CablingWhitePaper\\_082916.pdf](https://archive.nbasec.ethernetalliance.org/wp-content/uploads/2016/08/NBT_CablingWhitePaper_082916.pdf)

# 100/200Gbps CFP2 デジタルコヒーレントトランシーバ

100/200Gbps CFP2 Digital Coherent Transceiver

三重野光子\*

Mitsuko Mieno

斧原聖史 §

Kiyoshi Onohara

新宅宏彰†

Hiroaki Shintaku

高橋啓介†

Keisuke Takahashi

林 周作‡

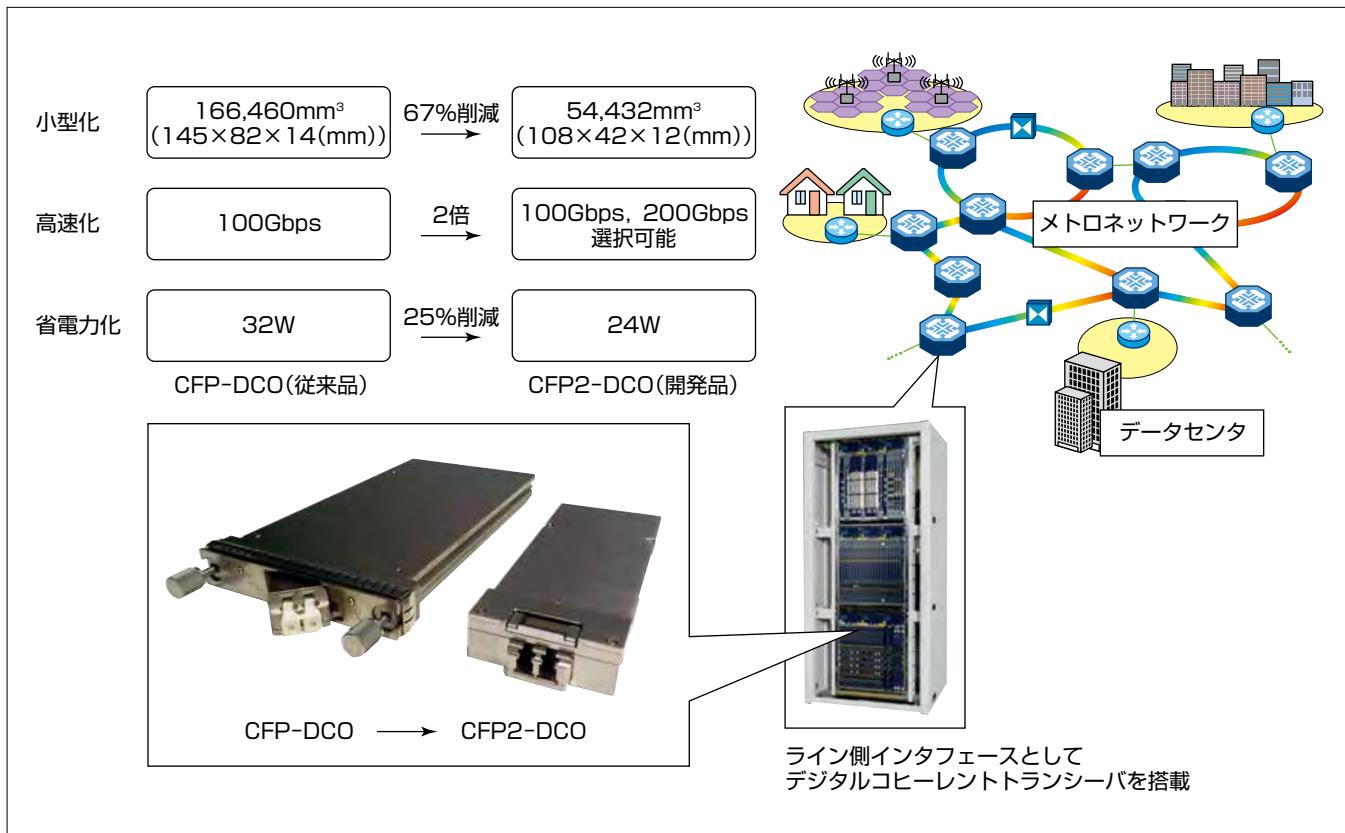
Shusaku Hayashi

## 要 旨

基幹系光通信システムでは、長距離大容量化・高機能化に加えて運用コストを低減するために高密度化・低消費電力化の要求が高まっている。これらの市場要求に応えるため、三菱電機はCFP MSA (Centum gigabit Form-factor Pluggable Multi-Source Agreement) 準拠版100/200Gbps CFP2-DCO (Digital Coherent Optics) トランシーバを開発した。小型光集積デバイスと最新のプロセスルールを適用したデジタルコヒーレントLSIを適用し、高密度実装技術と高効率放熱技術の組合せによって、CFP2パッケージ(108×42×12(mm))に実装し、従来品であるCFP-DCOトランシーバと比較して体積比で67%削減を

実現した。伝送速度は100Gbpsと200Gbpsに対応し、光・電気デバイスの高集積化と適応型電圧制御(Adaptive Voltage Scaling)技術によって、消費電力24W以下(従来品比25%削減)を達成した。

高性能の誤り訂正機能として低密度パリティ検査符号を採用し、光信号の雑音耐力を従来品比で1.5dB改善した。動作モードの切替えでメトロネットワーク向けに最大600km伝送が可能であり、データセンタ向けにも適用可能である。また、高密度波長多重システムの周波数グリッドを12.5GHz単位で設定可能にして、周波数利用効率改善への貢献が期待できる。



## CFP-DCO/CFP2-DCOトランシーバ

当社は2016年にデジタルコヒーレント方式を採用したCFP MSA準拠版100Gbps CFP-DCOトランシーバを開発した。今回、更なる高密度化、大容量化、低消費電力化の市場要求に応えるため、100/200Gbps CFP2-DCOトランシーバを開発し、CFP-DCOトランシーバと比較して体積比67%削減、消費電力25%減を実現した。この製品はメトロネットワークだけでなく、データセンタでも、今後のトラフィック需要増に貢献する。

## 1. まえがき

基幹系光通信システムでは、長距離大容量化・高機能化に加えて運用コストを低減するために高密度化・低消費電力化の要求が高まっている。これらの市場要求に応えるため、データ信号を光位相変調し、光ファイバを介して伝送するデジタルコヒーレントトランシーバの小型化・低消費電力化が進んでいる。プラガブル型の光トランシーバ規格のCFP MSA<sup>(1)</sup>は、光トランシーバベンダーが市場への安定供給を目的にパッケージサイズやピン配置等の仕様を取り決めている。クライアント側インタフェースのデファクト標準として広く普及しているCFPだが、近年はライン側インタフェースとしてデジタルコヒーレントLSIを搭載したCFPトランシーバの開発が進められている。クライアント側インタフェースのCFPトランシーバと区別するためコヒーレントCFP又はCFP-DCOトランシーバと呼ばれている。大きさや仕様によってCFPやCFP2、CFP4、CFP8と分類されている。

今回、伝送速度は100Gbpsと200Gbpsを選択可能で、低消費電力のデジタルコヒーレントトランシーバをCFP2<sup>(2)</sup>のパッケージで実現し、良好な送受信特性が得られた。

## 2. 100/200Gbps CFP2-DCOトランシーバの主要諸元と機能

### 2.1 主要諸元

開発した100/200Gbps CFP2-DCOトランシーバの外観を図1に、主要諸元を表1に示す。最新のプロセスルールを適用したデジタルコヒーレントLSIによって、高性能の誤り訂正機能(低密度パリティ検査符号)を実現し、光信号雑音耐力を1.5dB改善した。伝送距離はメトロネットワークに適用可能な600kmを達成した。また、光出力波長は1,529~1,567nmの範囲に対応し、周波数利用効率を高めるため周波数グリッドを12.5GHz単位で設定可能にした。最小受光感度は-24dBmを確保し、光ファイバ増幅器が不要になる無再生中継伝送は90kmまで可能である。

消費電力は、光・電気デバイスの高集積化とデジタルコヒーレントLSIに対する適応型電圧制御技術によってCFP2-DCOのMSA規格である24W以下を達成した。

### 2.2 機能

開発したCFP2-DCOトランシーバは、デジタルコヒーレントLSI、波長可変光源、コヒーレント集積デバイス(Coherent Optical Sub Assembly : COSA)、光アンプ、PD(Photo Detector)、監視制御IC、電源ICから構成され

る(図2)。COSAは電気ドライバアンプ、光位相変調器とコヒーレント受信器を集積したデバイスであり(図3)、COSAを搭載することによって、従来の部品構成から面積比約74%削減できる。クライアント側の送信データ信号(OTL4.4準拠)は、デジタルコヒーレントLSIで誤り訂正符号が付与され、COSA内の電気ドライバアンプで増幅され、光位相変調器で水平偏波と垂直偏波にそれぞれ変調信号を生成す



図1. CFP2-DCOトランシーバ

表1. 主要諸元

項目	仕様																		
動作ケース温度(°C)	0~70																		
電源電圧(V)	3.3																		
消費電力(W)	24																		
光送信特性	<table border="1"> <tr><td>伝送速度(Gbps)</td><td>111.81</td></tr> <tr><td></td><td>223.62</td></tr> <tr><td>変調フォーマット</td><td>DP-QPSK</td></tr> <tr><td></td><td>DP-16QAM</td></tr> <tr><td>光出力波長(nm)</td><td>1,529~1,567</td></tr> <tr><td>光出力パワー(dBm)</td><td>-3.5~+3.0</td></tr> <tr><td>周波数グリッド(GHz)</td><td>12.5</td></tr> <tr><td>波長安定度(GHz)</td><td>±1.5</td></tr> <tr><td>EVM(%rms)</td><td>14</td></tr> </table>	伝送速度(Gbps)	111.81		223.62	変調フォーマット	DP-QPSK		DP-16QAM	光出力波長(nm)	1,529~1,567	光出力パワー(dBm)	-3.5~+3.0	周波数グリッド(GHz)	12.5	波長安定度(GHz)	±1.5	EVM(%rms)	14
伝送速度(Gbps)	111.81																		
	223.62																		
変調フォーマット	DP-QPSK																		
	DP-16QAM																		
光出力波長(nm)	1,529~1,567																		
光出力パワー(dBm)	-3.5~+3.0																		
周波数グリッド(GHz)	12.5																		
波長安定度(GHz)	±1.5																		
EVM(%rms)	14																		
光受信特性	<table border="1"> <tr><td>最小受光感度(dBm)</td><td>-24</td></tr> <tr><td>DGD耐力(ps)</td><td>150</td></tr> <tr><td>最大伝送距離(km)</td><td>600</td></tr> </table>	最小受光感度(dBm)	-24	DGD耐力(ps)	150	最大伝送距離(km)	600												
最小受光感度(dBm)	-24																		
DGD耐力(ps)	150																		
最大伝送距離(km)	600																		
電気種信号入出力特性	主信号インタフェース OTL4.4																		
外形	<table border="1"> <tr><td>寸法(W×L×H)(mm)</td><td>108×42×12</td></tr> <tr><td>光コネクタ</td><td>LC型</td></tr> </table>	寸法(W×L×H)(mm)	108×42×12	光コネクタ	LC型														
寸法(W×L×H)(mm)	108×42×12																		
光コネクタ	LC型																		

EVM : Error Vector Magnitude, DGD : Differential Group Delay, OTL : Optical channel Transport Lane

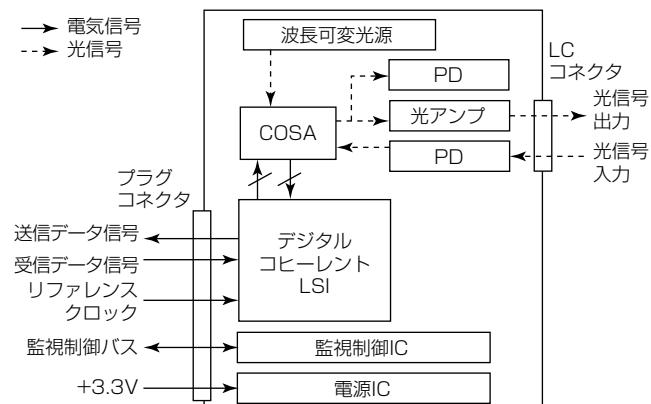


図2. CFP2-DCOトランシーバの機能ブロック図

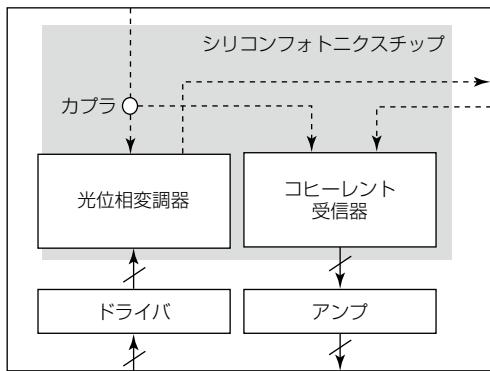


図3. COSAの機能ブロック図

る。変調フォーマットは、100Gbpsでは偏波多重四位相変調(Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying: DP-QPSK), 200Gbpsでは偏波多重16直交振幅変調(DP-16 Quadrature Amplitude Modulation: DP-16QAM)を適用する。変調した光信号は光アンプで增幅され、トランシーバから出力される。受信側は、COSA内のコヒーレント受信器で光信号を偏波ダイバーシチ受信し、デジタルコヒーレントLSIに入力する。デジタルコヒーレントLSIでは、高速A/D(Analog/Digital)変換部でデジタル信号に変換した後、デジタル信号処理によって、搬送波位相推定、偏波分離、波長分散補償及び誤り訂正復号を行う。リファレンスクロックは、デジタルコヒーレントトランシーバの位同期回路に用いられ、デジタルコヒーレントトランシーバが搭載されるホストボードから供給される。監視制御ICでは、各コンポーネントの初期設定や状態監視を行う。送受信データ信号の符号誤り訂正数、受信Q値等の統計データ及び警報信号を処理し、監視制御バスを通じて、ホストボード内の監視制御ICと通信できる。

### 3. 100/200Gbps CFP2-DCOトランシーバの技術

#### 3.1 送信技術

##### 3.1.1 変調制御技術

COSAは光位相変調器と電気ドライバアンプ、コヒーレント受信器を集積しており、トランシーバの信号品質は光位相変調器の制御によって大きく変わる。図4に示すとおり、マッハツエンダ型の光位相変調器はI-ch, Q-ch, P-chの3chの位相を制御する必要がある。

従来のLN(ニオブ酸リチウム)変調器は導波路に電界を印加して位相を制御していたが、COSAはシリコンデバイスであるため、ヒーターを用いて導波路の温度を変化させて位相を制御する。そのため、温度変化よりも低速の数百Hzで制御する必要がある。今回使用したCOSAは各チャネル

の位相制御用ヒーターが一つの構成であり、この構成ではI-ch又はQ-chの位相制御を行った際にP-chの位相関係も変動する。これに対応するため、P-chとI-ch(Q-ch)の調整を交互に行う制御方式を新規に開発し、高精度な位相変調を実現した<sup>(3)(4)</sup>。

図5はDP-QPSK変調信号の水平偏波成分と垂直偏波成分のコンステレーションマップを示している。光変調信号の品質はエラーベクトル振幅(EVM)で評価を行った。EVMは、復調信号が複素平面上にプロットされるコンステレーションマップの基準点からのベクトル差のスカラ量と基準ベクトルのスカラ量との比で定義される。この評価手法はコヒーレント受信によるデジタル信号処理が必要なため、厳密には送信側だけの信号品質を評価できない。このため、リファレンス受信器を用いて評価を行った。EVMは水平偏波成分及び垂直偏波成分の平均値12.841%rmsであり、良好な光信号品質が得られた。

#### 3.1.2 200G変調技術

DP-QPSKからDP-16QAMに変調方式を変更することで、200Gbps CFP2-DCOトランシーバを実現した。DP-16QAMにすることで変調損失は大きくなるため、位相制御に用いる光出力モニタ用のフォトダイオード(PD)の高感度化が求められる。そこで、COSAの光位相変調器に内蔵されるPDでなく、トランシーバ出力モニタ用の高

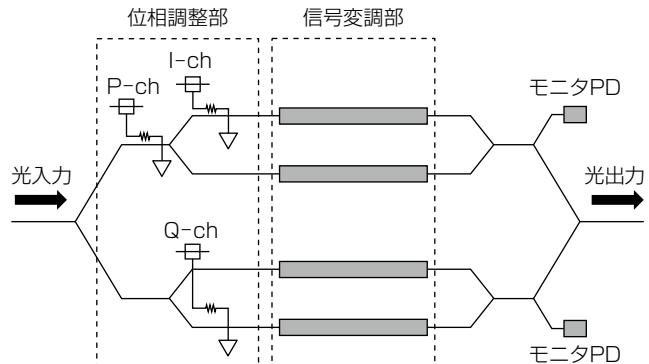


図4. 光位相変調器の構成

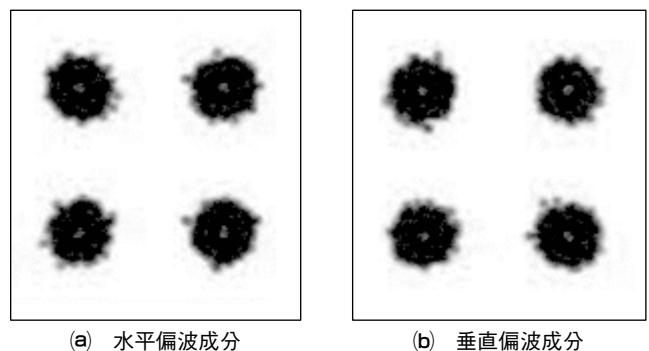


図5. DP-QPSK変調信号のコンステレーションマップ

感度な外部PDを用いて位相制御を行った。これによって、変調損失の増大による感度不足を解消でき、高精度な位相変調を行うことができ、EVMは水平偏波成分及び垂直偏波成分の平均値10.763%rmsであり、良好な光信号品質が得られた(図6)。

### 3.2 受信技術

光受信側に要求される性能は、光伝送路内に光増幅器がある場合とない場合で異なる。前者の場合、伝送距離は受信信号の符号誤り訂正限界での光信号対雑音強度比(OSNR)によって制限され、後者の場合は同条件での受信光平均強度によって制限される。今回開発したCFP2-DCOトランシーバは、メトロネットワーク向けとデータセンタ向けの用途があるため、それぞれの性能を評価した。このトランシーバでの受信Q値の符号誤り訂正限界は、軟判定誤り訂正機能有効時は6.2dB(誤り訂正後ビット誤り率:  $10^{-15}$ )であり、軟判定誤り訂正機能無効時は、8.4dB(同)である。メトロネットワーク向けには軟判定誤り訂正機能を有効にして、その誤り訂正限界での光信号対雑音強度比は12.5dBであった。また、データセンタ向けには軟判定誤り訂正機能を無効にして、波長1,548.5nm、環境温度25°Cとした条件での受信光平均強度に対する符号誤り率特性を図7に示す。受信信号の符号誤り訂正限界での受信光平均強度が-27.9dBmであることを確認した。これは、光出力信号平均強度を0dBmとした場合、無再生中継伝送が90km以上可能であることを示す。

### 3.3 低消費電力化技術

CFP MSAで規定されているCFP2-DCOトランシーバの消費電力の最大値は24Wであり、従来のCFP-DCOトランシーバの32Wと比較して8W以上の削減が必要になる。そのため、デジタルコヒーレントトランシーバの各構成部品での低消費電力化が重要なポイントになる。CFP2-DCOトランシーバでは、従来トランシーバから採用しているデジタルコヒーレントLSIの適応型電圧制御技

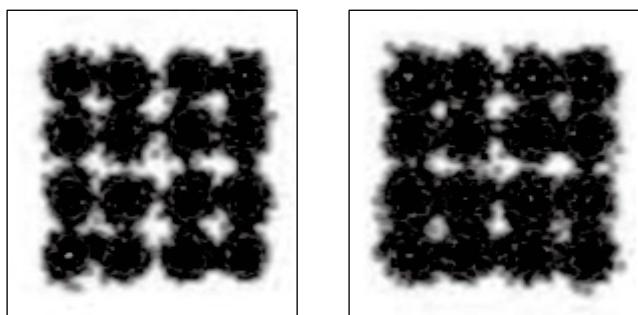


図6. DP-16QAM変調信号のコンステレーションマップ

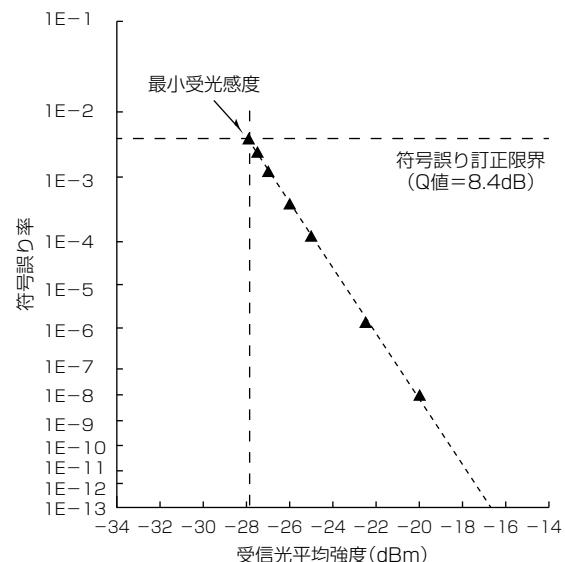


図7. 受光感度特性

術を適用した。適応型電圧制御とは、LSIの駆動電圧及びジャンクション温度をモニタし、動作条件に応じて最適な電圧を供給する技術である。LSI内の電圧及び温度モニタ結果から電圧制御部で電圧条件を算出する。デジタルコヒーレントLSIは、起動時に各機能ブロックを初期設定する際に、急激な消費電力上昇に伴う電圧降下が生じるため、運用時よりも高い電圧を供給する必要がある。このため、適応型電圧制御による消費電力抑圧効果は非常に高い。

この技術の適用によって、メトロネットワーク向けは24W以下、データセンタ向けでは22W以下の消費電力を達成した。また、伝送距離1,000km以上の更なる長距離ネットワーク向けでも28W以下を実現した。

### 3.4 高密度実装技術

#### 3.4.1 実装技術

CFP2(108×42×12(mm))はCFP(145×82×14(mm))から体積比で約67%小型化する必要がある。その実現には光・電気部品の小型化だけでなく、プリント基板上、及び筐体(きょうたい)内部空間の部品実装も高密度化する必要があった。それぞれの実装密度の比較を表2に示す。

CFP-DCO等の従来の設計手法は、プリント基板上の部品配置を設計後、筐体内部の部品配置・配線等の空間設計を実施していた。この開発では筐体内部の空間をより高密度化するために、三次元で部品配置と空間設計を同時に

表2. 実装密度の比較

	実装密度		
	CFP-DCO	CFP2-DCO	比
プリント基板上	49.8%	59.1%	1.2倍
筐体内部空間	25.2%	36.9%	1.5倍

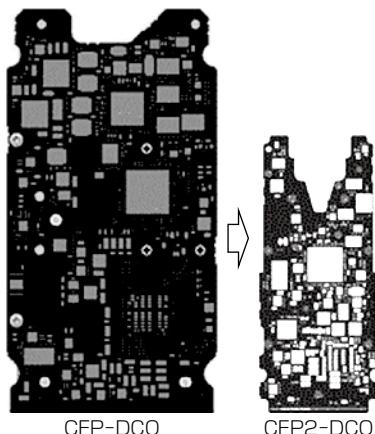


図8. プリント基板上の実装密度比較

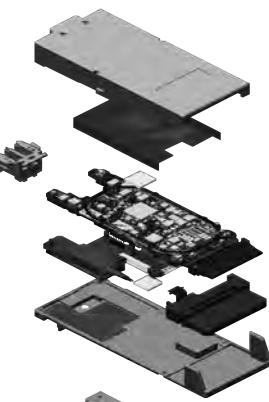


図9. CFP2-DCOトランシーバの構成

行う設計手法を適用した。

三次元設計の適用によって、プリント基板上の部品配置に関する制約条件が緩和可能になり、プリント基板上の実装密度がCFP-DCOの1.2倍に向上した。三次元設計では、部品配置のほか、光ファイバーラーティング設計も並行して実施した。光ファイバは所定の曲げ半径以下になると、光パワーの損失が生じるため、曲げ半径の確保が筐体内の空間を逼迫(ひっぱく)させる要因になっていた。この課題を解決するため、波長可変光源やデジタルコヒーレントLSIの搭載面と異なる面に光ファイバをルーティングするため、プリント基板の形状を最適化した。これらの施策でCFP-DCOから内部空間比1.5倍の高密度化を実現した。図8にCFP-DCOとCFP2-DCOのプリント基板上の実装密度比較を、図9にCFP2-DCOトランシーバの構成を示す。

### 3.4.2 放熱技術

CFP2サイズへの小型化によって、体積当たりの発熱密度が上昇し、各使用部品が適切に動作するための放熱設計は極めて重要になる。特に100Gbpsを超える超高速信号のデジタルコヒーレント処理は、最新のプロセスルールが適用されたLSIでもトランシーバ全体の消費電力の約半分を占める。そのため、精密な熱解析で周辺回路への影響を最小化する部品配置を行い、筐体表面に熱を効率よく伝導する必要がある。発熱量が大きいLSIや光部品は筐体への接地を数μm単位で管理し、十分な放熱効果を得た。

プリント基板上の放熱は熱流体解析ツールで、プリント基板上の発熱部品をモデル化し、熱解析を実施した。プリント基板表面も利用した熱伝導設計によって、部品配置を最適化して各部品温度を規定値内に収めた。

図10に動作ケース温度70°Cでのプリント基板の熱解析結果を示す。プリント基板上の温度差分は最大20°C以下で、設計どおりの放熱効果が得られていることを確認した。

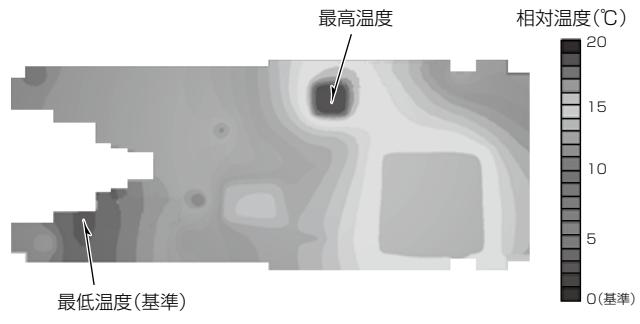


図10. プリント基板の熱解析結果

## 4. 将来に向けて

デジタルコヒーレントトランシーバは、LSIの微細化及び低消費電力化の恩恵を受けて、従来主流になっていたメトロネットワーク向けからデータセンタ向けに需要が移りつつあり、今後もこの傾向は続くとみられる。また、日本では2020年に第5世代移動通信システム(5G)の本格サービスも開始され、2030年頃に実用化が見込まれるBeyond 5G/6Gシステムのモバイルフロントホールの候補としてコヒーレント技術の採用が検討されている。

最後に、デジタルコヒーレントLSIの小型化・省電力化には、LSIの微細化技術だけでなく、光ファイバの波長分散補償、偏波分離、位相推定、誤り訂正等のデジタル回路削減の寄与も重要であることを述べておきたい。これら技術の発展とともにデジタルコヒーレントトランシーバの更なる小型・省電力化が進むことが望まれる。

## 5. むすび

CFP MSA仕様に準拠した100/200Gbps CFP2-DCOトランシーバを開発した。従来品のCFP-DCOトランシーバから体積比67%削減の高密度実装を実現し、最大伝送速度を200Gbpsまで高速化した。光信号送信部、光信号受信部共に設計仕様を満足する良好な特性を得ており、筐体温度70°Cの環境下で24W以下の低消費電力化も実現した。この開発成果が、将来の光通信ネットワークの大容量化・高密度化に寄与することを期待する。

## 参考文献

- (1) CFP MSA : Management Interface Specification 100/40Giga-bit Transceiver Package Multi-Source Agreement Ver.2.6 (r06a) (2017)
- (2) CFP MSA : CFP2 Hardware Specification Rev.1.0 (2013)
- (3) Ishikura, N., et al. : Transmission Characteristics of 32-Gbaud PDM IQ Monolithic Silicon Modulator Operating with 2-VPPD Drive Voltage, ECOC2016, W2.E4 (2016)
- (4) Takiguchi, T., et al. : 40G RZ-DQPSK Transmitter Monolithic-ally Integrated with Tunable DFB Laser Array and Mach-Zehnder Modulators, OFC2011, OMU3 (2011)

# 組込みシステム向けセキュリティソフトウェア

Security Software for Embedded Systems

牧村悠司\*  
Yuji Makimura

## 要旨

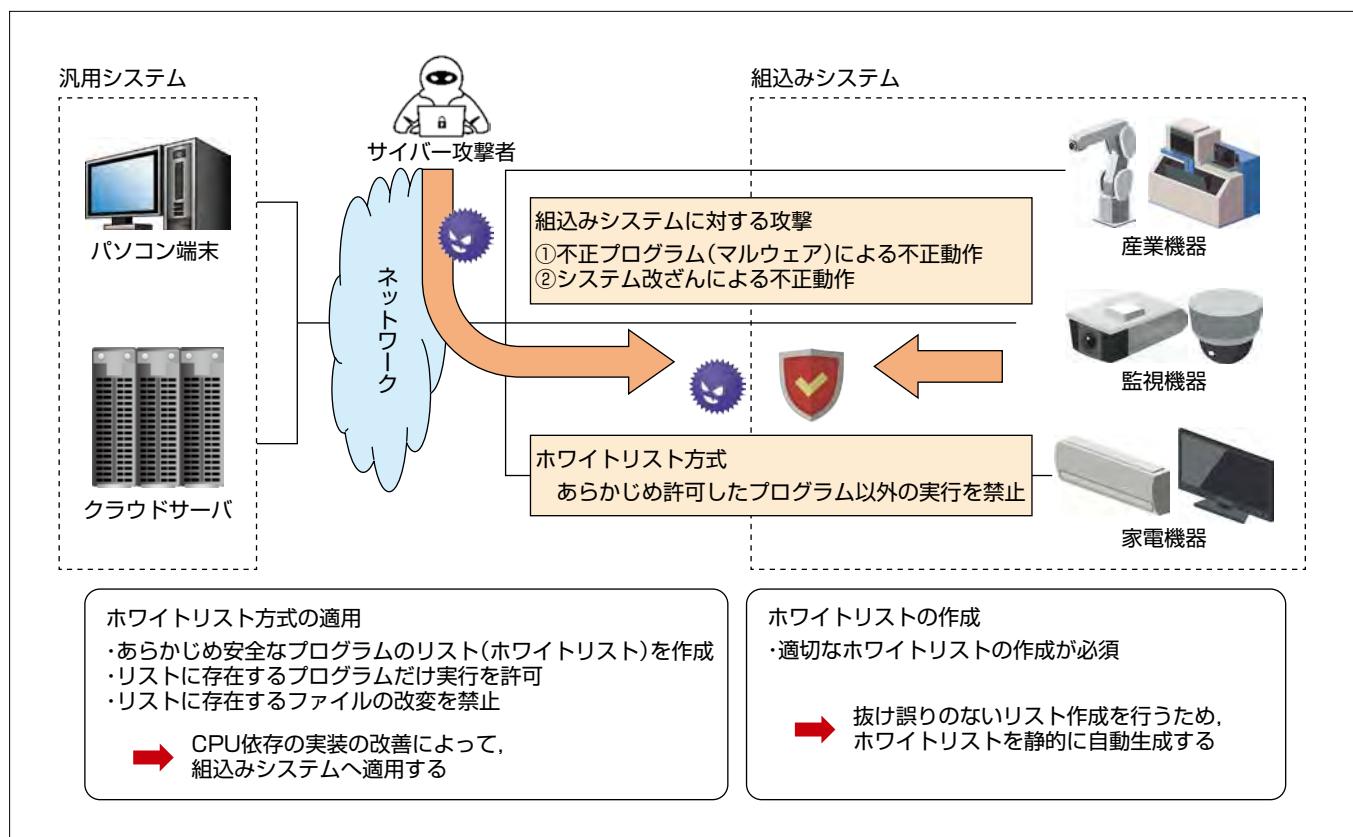
近年、IoT(Internet of Things)の普及に伴い、ネットワークには汎用システム(パソコン端末等)に加えて、多数の組込みシステム(IoT機器等)が接続されるようになった。今後5Gの導入によって組込みシステムの接続数は更に増加することが予想される。一方、組込みシステムを対象にした不正プログラム(マルウェア)攻撃の事例も増加しており、セキュリティ対策の必要性が高まっている。

不正プログラムに対するセキュリティ対策としては、セキュリティソフトウェアによる不正プログラムの実行制限が一般的である。実行制限手法には、不正プログラムの実行を禁止するブラックリスト方式と、あらかじめ許可したプログラム以外の実行を禁止するホワイトリスト方式がある。組込みシステムでは実行するプログラムをあらかじめ

規定可能であり、ホワイトリスト方式が適している。ホワイトリスト方式のセキュリティソフトウェアには市販の製品やOSS(Open Source Software)等が存在しているが、多様な組込み向けCPU環境で実行できないという課題や、抜け誤りのないホワイトリストの作成が困難といった課題がある。

これらの課題の解決に向けて、三菱電機ではCPU環境に依存せず実行可能であり、抜け誤りのないホワイトリストを静的に自動生成する組込みシステム向けセキュリティソフトウェアを開発した。

当社で開発する組込みシステムにこのセキュリティソフトウェアを搭載することで、IoTシステムがもたらす恩恵を安心・安全に享受できる社会の実現を目指す。



## 組込みシステム向けセキュリティ対策

組込みシステムに対する攻撃には、不正プログラムによって不正な動作を実行させるものと、システムを改ざんして不正な動作を実行させるものがある。これらへの対策として組込みシステムにホワイトリスト方式セキュリティソフトウェアを導入することが有効である。ホワイトリスト方式のセキュリティソフトウェアでは、抜け誤りのない適切なホワイトリストを作成する必要があるが、人手作成では抜け誤りのリスクがある。ホワイトリストを自動生成することで、ホワイトリストでの抜け誤りを防ぐ必要がある。

## 1. まえがき

近年、IoTの普及に伴い、汎用システム（パソコン端末等）だけでなく、組込みシステム（IoT機器等）がネットワークに接続されるようになり、その数は2020年には300億個を超えることが予想されている。今後5Gの導入によって、通信速度、同時接続数、遅延時間が大幅に向かって、ネットワークに接続される組込みシステムの数は爆発的に増加することが予想される<sup>(1)</sup>。

ネットワークに接続される組込みシステムが増加するにつれて、組込みシステムを標的にしたサイバー攻撃事例も増加している。2016年には14万5千台以上の組込みシステムが不正プログラムMiraiに感染し、大規模な分散型サービス妨害(Distributed Denial of Service: DDoS)が発生している<sup>(2)</sup>。このようなサイバー攻撃事例から組込みシステムでも、不正プログラムに対するセキュリティ対策の必要性が高まっている。

当社では、CPU環境に依存せず実行可能であり、抜け誤りのないホワイトリストを静的に自動生成する組込みシステム向けセキュリティソフトウェアを開発した。

本稿では、2章でセキュリティソフトウェアについて、3章で組込みシステム向けセキュリティソフトウェアの開発について述べ、4章でホワイトリスト自動生成手法について述べる。

## 2. セキュリティソフトウェア

Miraiのような不正プログラムによる攻撃を防ぐ対策として、①不正アクセスを防ぐこと、②不正なプログラムを実行させないことの2点が挙げられる。①の対策として、パスワード等を用いたアクセス認証が一般的に利用されるが、組込みシステムは機器数が多いことから、パスワード等のアクセス権管理が十分でない場合が多い。また、管理者が定期的にアクセスすることなく長期間運用されることから、不正アクセスの検出も困難である。そのため、組込みシステムでは①の対策に加えて、②の対策を行うことが重要である。②の対策としてはセキュリティソフトウェアを用いた不正プログラムの実行禁止手法が一般的に用いられている。

### 2.1 不正プログラムの実行禁止手法

不正プログラムの実行禁止手法には、ブラックリスト方式とホワイトリスト方式がある。各方式の特徴を表1に示す。ブラックリスト方式は、不正プログラムのパターンをリスト化し、プログラム実行時にリストとのパターン照合

を行うことで、パターンにマッチした不正プログラムの実行を禁止する方式である。この方式では、過去に蓄積してきた膨大な不正プログラムパターンとの照合が必要になるため、不正プログラム判定の処理負荷が大きい。また、リストにないプログラムは全て実行可能になるという特徴がある。そのため、この方式は汎用システムのようにリソースに余裕があり、動作させるプログラムをあらかじめ規定しない場合に適している。一方、ホワイトリスト方式は、実行を許可するプログラムのリストを作成し、リストにあるプログラムだけ実行を許可する方式である。この方式では、実行するプログラムがリストに存在するか否かを判定するだけでよいため、処理負荷が小さい。また、不正プログラムかどうかに関わらず、リストにないプログラムは実行できないという特徴がある。そのため、ホワイトリスト方式を適用する場合、使用するプログラムを網羅した抜け誤りのないホワイトリストを適切に作成する必要がある。組込みシステムでは、実行するプログラムをあらかじめ規定することが可能であるため、ホワイトリスト方式の不正プログラム実行禁止手法が適していると考えられる。

### 2.2 既存ソフトウェアの組込みシステムへの適用可能性

組込みシステムへ適用可能なホワイトリスト方式のセキュリティソフトウェアとして、当社試作ソフトウェア、市販ソフトウェア、OSSの三つを検討した。各ソフトウェアの特性を表2に示す。

#### (1) 当社試作ソフトウェア

当社では、製品に適用するセキュリティ機能に対して保守性を確保するため、Linux<sup>(注1)</sup>サーバ向けにホワイトリスト方式のセキュリティソフトウェア<sup>(3)</sup>を試作している。このソフトウェアの実現方式はサーバ向けの汎用的なCPUアーキテクチャに依存しているので、組込みシステムのCPUアーキテクチャへそのまま適用することができない（移植性の課題）。また、このソフトウェアではホワイトリスト作成を容易にするため、実行したプログラムを学習して動的にホワイトリストへ登録する機能を持つが、ブ

表1. 不正プログラム実行禁止手法の特徴比較

特徴	ブラックリスト方式	ホワイトリスト方式
処理負荷	大	小
リスト定期更新	必要	不要
新種の脅威への耐性	なし	あり
未登録プログラムの実行	可能	不可

表2. セキュリティソフトウェアの特性比較

	保守性	移植性	ホワイトリスト完全性
当社試作ソフトウェア	○	×	△
市販ソフトウェア	×	×	○
OSS	×	○	×

ログラムの要否を人手で判定する必要があり、リストに抜け誤りが生じ得る(ホワイトリスト完全性の課題)。

### (2) 市販ソフトウェア

特定のOS及びCPU環境で動作し、組込みシステム向けのホワイトリスト方式セキュリティソフトウェアとして実績がある。しかし、特定のOS及びCPU環境でだけ動作を保証しており、対応していない組込みCPUへ移植することが困難である(移植性の課題)。また、製品がバイナリ形式で提供されるためソースコードの入手ができない、製品適用時の保守性の担保が困難である(保守性の課題)。

### (3) OSS

Linux向けホワイトリスト方式のセキュリティOSSとして、SELinux(Security-Enhanced Linux)<sup>(4)</sup>があり、汎用システム向け、組込みシステム向け、ともに実績がある。OSSであるためソースコードを容易に入手できる一方で、不具合発生時に開発元から十分なサポートを受けることが難しく、製品適用時に保守性の担保が困難である(保守性の課題)。また、SELinuxはリッチなアクセス制御が可能であるが、ホワイトリスト生成時にアクセス権を詳細に設定する必要があり、抜け誤りのないホワイトリストの生成が非常に困難である(ホワイトリスト完全性の課題)。

組込みシステムは長期間運用されるため、保守性に優れる当社試作ソフトウェアを採用し、当社試作ソフトウェアが持つ移植性とホワイトリスト完全性の課題を解決する方法を検討した。移植性の課題に対して、サーバ向けの当社試作ソフトウェアを組込みシステムへ適用する手法を検討し、多様な組込みシステムに対して汎用的に適用できる見込みを得た。また、ホワイトリスト完全性の課題に対して、組込みシステムのモジュール生成時にホワイトリストを静的に自動生成する手法を実現した。

(注1) Linuxは、Linus Torvalds氏の登録商標である。

## 3. 組込みシステム向けセキュリティソフトウェアの開発

### 3.1 当社試作ソフトウェアのセキュリティ機能の実現手法

当社試作ソフトウェアでは、Linux OSのカーネル内システムコールフローに介入し、プログラムの実行要求を行う処理とプログラムの展開を行う処理の間に、ホワイトリスト照合による実行判定処理を挿入する。この実行判定処理では、プログラムが実行される場合に対象のプログラムがホワイトリストに存在するかを判定し、存在すれば元のシステムコールフローへ戻すことでプログラムを実行する。もし、存在しなければ認証エラーとしてプログラムの実行を禁止する。また、ファイルが書き込みモードでオープンされた場合、対象のファイルがホワイトリストに存在する

かを判定し、存在すれば認証エラーとして処理を終了する。もし、存在しなければ元の処理フローへ戻す。これによって、ホワイトリストに登録されているプログラムだけ実行を許可し、ホワイトリストに登録されているファイルの改変を禁止する。当社試作ソフトウェアのセキュリティ機能の実行処理フローを図1に示す。

ホワイトリスト照合による実行判定処理をOSのシステムコールフローに挿入するためには、システムコールフローの処理で、次処理を呼び出している場所を特定し、次処理の呼出先をホワイトリスト照合による実行判定処理に置き換える必要がある。システムコールフローの各処理はメモリ上にCPU命令(アセンブラー命令)の形式で格納されており、CALL命令等の次処理へ移動する命令を解析することで、次処理の呼出先メモリアドレスを特定できる。当社試作ソフトウェアでは、IntelアーキテクチャのCPU命令セット(アセンブラー命令)を使用したプログラム実行要求処理で、次処理を呼び出している場所を特定し、呼出先のメモリアドレスを実行判定処理のアドレスに書き換えることによって、実行判定処理の挿入を実現している。挿入手法を図2に示す。

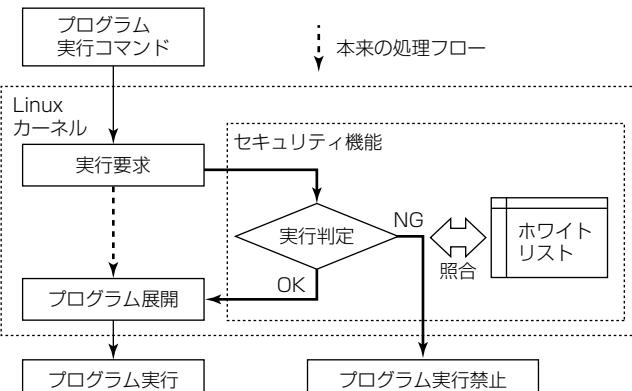


図1. 当社試作ソフトウェアのセキュリティ機能の実行処理フロー

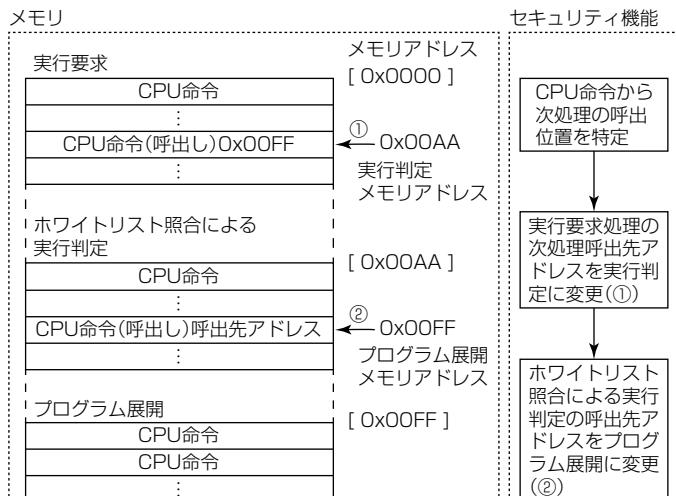


図2. 当社試作ソフトウェアでの実行判定処理の挿入手法

### 3.2 組込みシステムへの適用課題

CPUアーキテクチャによって使用できるCPU命令セットは決まっているため、当社試作ソフトウェアを異なるCPUアーキテクチャの環境に移植する場合は、移植先のCPU命令セットを解析し、実行判定処理の挿入が実現可能か個別に確認する必要がある。組込みシステム開発では、多様な組込みCPUからシステム構築に適したものを見定すため、開発機種ごとに使用するCPUが異なる。そのため、多様なCPUが存在する組込みシステムへ当社試作ソフトウェアを汎用的に適用することは困難である。

### 3.3 解決手法

当社試作ソフトウェアを、多様な組込みシステムへ汎用的に適用するためには、CPU命令セットを使用してメモリ上で実現していた実行判定処理の挿入をCPU命令に依存しない別の手法で代替する必要がある。

当社試作ソフトウェアはLinuxサーバに適用することを前提にした実現方式にしており、組込みシステムへの適用は想定していなかった。Linuxサーバ開発の場合、開発元からバイナリー形式で提供されるOSを汎用的なCPUを搭載したサーバマシンに適用することで実行環境を構築し、実行環境と同一のシステム上でソフトウェア開発を行う。Linux OSがバイナリー形式で提供されること、サーバシステムが汎用的なCPUを使用することから、当社試作ソフトウェアではCPU命令を使用してメモリ上でOSのシステムコールフローに介入し、Linux OSに対して後天的に実行判定処理を挿入する手法を採用していた。一方、組込みシステム開発では、構築するシステムに応じて多様なCPUを使い分ける。また、リソースの制約から実行環境とは異なるシステム上でソフトウェア開発を行い、Linux OSを含めた全てのソースコードを実行環境のシステム向けにクロスコンパイルしている。Linux OSのソースコードをコンパイル可能であることから、組込みシステム開発では、Linux OSのソースコード上でシステムコールフローに介入し、Linux OSに対して先天的に実行判定処理を挿入することが可能である。

そこで、CPU命令に依存しない実行判定処理の挿入方法として、Linux OSソースコード上の実行判定処理を挿入すべき場所にあらかじめ高水準言語で定義したフック関数を挿入しておき、挿入したフック関数から当社試作ソフトウェアの実行判定処理を呼び出す方法を検討した。この解決手法によるセキュリティ機能の実行処理フローを図3に示す。これによって、CPU命令セットで実現していた実行判定処理の挿入を代替可能であり、当社試作ソフトウェアを多様な組込みシステムへ汎用的に適用することが

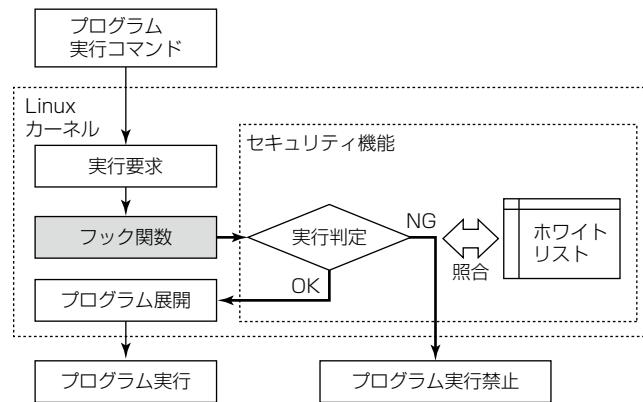


図3. 解決手法によるセキュリティ機能の実行処理フロー

可能になる。

### 3.4 性能評価

性能評価検証のため、当社試作ソフトウェアに実行判定処理の挿入代替手法を使用して開発した組込みシステム向けセキュリティソフトウェアを、組込みシステムで使用されることが多いARM系CPUを使用したシステムに適用し、動作確認と性能評価を実施した。動作環境の詳細を表3に示す。

結果として、ホワイトリストに登録されているプログラムだけ実行を許可し、ホワイトリストに登録されているファイルの改変を禁止する処理ができていることを確認した。さらに、リソースに制約がある組込みシステム環境での処理負荷を計測するため、組込みシステム向けセキュリティソフトウェアを適用した際の処理オーバーヘッドを計測した。この計測ではファイルのopen及びclose処理を1,000万回繰り返し実行し、1回当たりの処理時間平均を算出した。結果を表4に示す。この結果から、検証環境での処理オーバーヘッドはシステムコール全体の約3%(260ns)程度になっていることが分かる。システムの動作周期を1msと仮定した場合でも、動作周期の1%以下に

表3. セキュリティ機能移植環境比較

環境	(a)移植元	(b)移植先
CPUアーキテクチャ	Intel Xeon <sup>(注2)</sup> E5-2630(2.3GHz)	ARM v8 <sup>(注3)</sup> Cortex <sup>(注3)</sup> -A53(1GHz)
メモリ	32GB	1 GB
Linuxカーネル	3.10	4.4.120
ディストリビューション	RHEL <sup>(注4)</sup> , CentOS <sup>(注4)</sup>	Buildroot <sup>(5)</sup>

RHEL : Red Hat Enterprise Linux<sup>(注5)</sup>

(注2) Xeonは、Intel Corp.の登録商標である。

(注3) ARM, Cortexは、ARM Ltd.の登録商標である。

(注4) RHEL, CentOSは、Red Hat, Inc.の登録商標である。

表4. 処理オーバーヘッド計測結果

ホワイトリスト判定処理の有無	処理時間(ns)
判定処理あり	9,146
判定処理なし	8,886

収まっているため、このセキュリティソフトウェアの処理負荷が極めて小さいことを確認した。

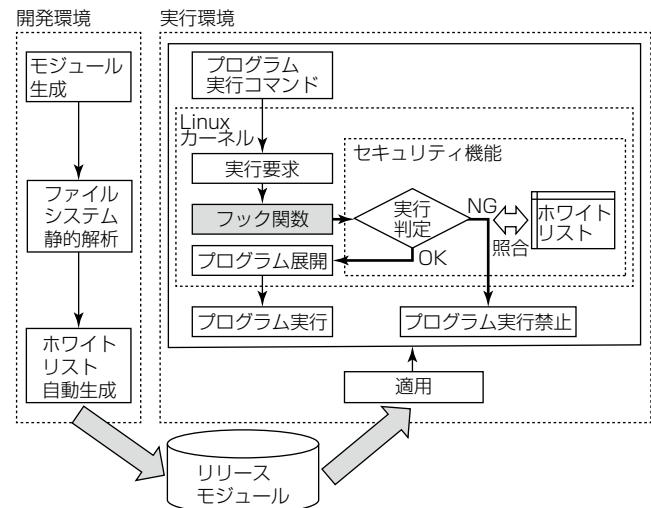
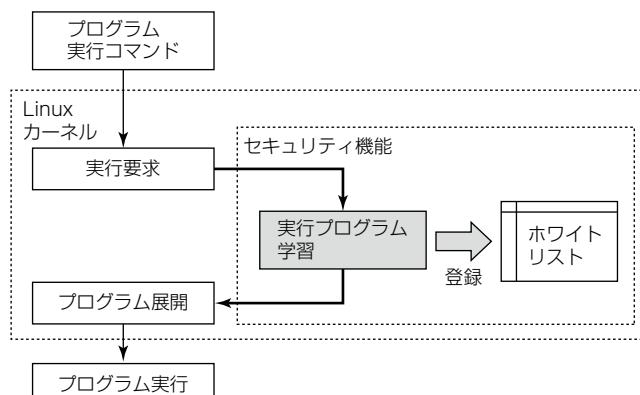
## 4. ホワイトリスト自動生成手法

### 4.1 当社試作ソフトウェアのホワイトリスト生成手法

当社試作ソフトウェアは、ホワイトリストの作成を容易にするために、ホワイトリストの作成補助機能を持つ。この機能は、学習モードでプログラムを実行させることで、プログラムから呼び出された動的ライブラリを捕捉し、ホワイトリストに登録するものである。この機能の実行処理フローを図4に示す。この機能を使用することで、必要なプログラムとそのプログラムが参照するライブラリだけを登録した、必要最低限のホワイトリストを作成することが可能になる。一方で、抜け誤りのないホワイトリストを作成するためには、システム運用時に必要なプログラムを網羅的に実行し、ホワイトリストに登録する必要がある。システム運用時に必要となるプログラムは、機械的に判別することが難しく、人手による判断が必要である。このため、ホワイトリストに抜け誤りが生じる可能性があった。

### 4.2 組込みシステム向けセキュリティソフトウェアのホワイトリスト自動生成手法

組込みシステム向けセキュリティソフトウェアでは、ホワイトリストに抜け誤りを生じさせない手法として、ホワイトリストを静的に自動生成する方法を検討した。まず、組込みシステムのように非アドオンな設計となる開発では、システム更新以外でプログラムの追加や改変が発生しない。このため、実行環境でホワイトリストの作成や更新を行う必要はなく、開発環境でホワイトリストを事前に作成可能である。また、組込みシステムの開発では、開発環境やソースコードを全て自社内で管理しているため、開発環境で生成されるリリースモジュールは全て信頼できる。こ



れらのことから、ホワイトリストを静的に自動生成する方法として、組込みシステムのリリースモジュール生成時に、ファイルシステムを静的解析し、リリースモジュールに含まれる全てのプログラムとライブラリを抜け誤りなくホワイトリストに登録する手法を開発した。処理フローを図5に示す。この手法を適用することで、リリース後に追加される不正プログラムの実行を禁止することが可能である。

## 5. むすび

当社がLinuxサーバ向けに試作したセキュリティソフトウェアを組込みシステム向けに移植開発したセキュリティソフトウェアと、組込み向けARM系CPUの環境での性能評価結果について述べた。これによって多様な組込みCPUに対して汎用的に当社セキュリティソフトウェアを適用できる見込みを得た。また、従来は人手で作成が必要であったホワイトリストをモジュール作成時に静的に自動生成する手法を開発し、抜け誤りのないホワイトリストを容易に生成することを可能にした。

今後、開発した組込みシステム向けセキュリティソフトウェアを当社の組込みシステムへ適用することで、IoTシステムがもたらす恩恵を安心・安全に享受できる社会の実現を目指す。

## 参考文献

- 総務省：令和元年版情報通信白書（2019）  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintoeki/whitepaper/ja/r01/pdf/index.html>
- OVH：The DDoS that didn't break the camel's VAC (2016)  
<https://www.ovh.com/world/news/articles/a2367.the-ddos-that-didnt-break-the-camels-vac>
- 伊藤孝之、ほか：Linuxにおけるプログラムホワイトリスト化試作、情報処理学会第77回全国大会、431～432 (2015)
- SELinux  
<https://github.com/SELinuxProject>
- Buildroot  
<https://buildroot.org/>



## 防犯やライン監視などのニーズに応える先進技術をご提案 三菱ネットワークカメラ・システム総合サイト

カメラで撮影した映像を遠隔地からパソコンやスマートフォン等で確認できるネットワークカメラは、防犯や工場の製造ライン監視など様々な場面で活用されています。

三菱ネットワークカメラ・システム総合サイトは、ネットワークカメラの導入、買換えを検討しているお客様や、三菱電機のネットワークカメラの販売店の皆様に、MELOOKシリーズの各製品の特長、ムービー紹介、業種別活用シーン、技術ニュースなど、当社ネットワークカメラ・システムの最新情報をお届けしています。多彩なラインアップを取り揃え、業種を問わずお客様のニーズに応えます。

URL : <http://www.mitsubishielectric.co.jp/nwcamera/>



### 主なコンテンツ

**業種別 活用シーン** とともに、監視カメラシステムに対する要求もアナログ方式からデジタル方式へ、さらに高画質監視から一歩踏み込んだ高精度な映像監視へと進化しています。このようなニーズに先進技術で応える“MELOOK3”を始めとする当社製品ラインアップの概要と主な特長を紹介しています。

最大32台のカメラ接続やスマートフォンでの遠隔監視など当社ネットワークカメラ・システムの特長を1分間のムービーで紹介する動画集もご覧いただけます。



**会員サイト** 導入、買換えをご検討のお客様、販売店の皆様向けに、製品仕様や取扱説明書、工事説明書などの詳細な資料を提供しており、CAD図面データもダウンロード可能です。また、各種見積依頼や製品・サービスに関するお問い合わせも承っています。(会員登録(無料)が必要です。)

**製品情報** 店舗やマンション、金融機関、工場など様々な業種の具体的な活用シーンに合わせた最適なシステムを提案します。

“セキュリティ強化”“管理負荷低減”などシステム導入によって実現できるポイント、施設イラストに機器の設置場所を示した詳細なシステムイメージ、主な構成機器の情報を分かりやすく紹介しています。



▶詳しくはWEBサイトでご覧いただけます。

三菱電機 ネットワークカメラ

検索