

高周波・光デバイスの最新動向と将来展望

The Latest Status and Future Outlook of High Frequency and Optical Devices



増田健之*
Kenji Masuda

*高周波光デバイス製作所長

要 旨

デジタルトランスフォーメーション(DX)の推進とセンシング技術の発達によって、情報のデジタル化が進み、第5世代の無線通信や光ファイバー通信インフラを通じてリアルタイムに情報が収集・伝達されるようになっている。さらに、ChatGPT^(注1)を始めとするAIの急速な発展によって、労働の効率化や機器の高度化が急速に進んできている。これによってスマートシティ、モビリティサービス及び遠隔医療などの新しいビジネスアイデアが生まれてきており、より豊かな社会の実現が進んでいくものと考えられる。その実現に欠かせない重要な製品として、より高性能なセンサー・高周波デバイス及び光デバイスに期待が寄せられている。

(注1) ChatGPTは、OpenAI OpCo, LLCの登録商標である。

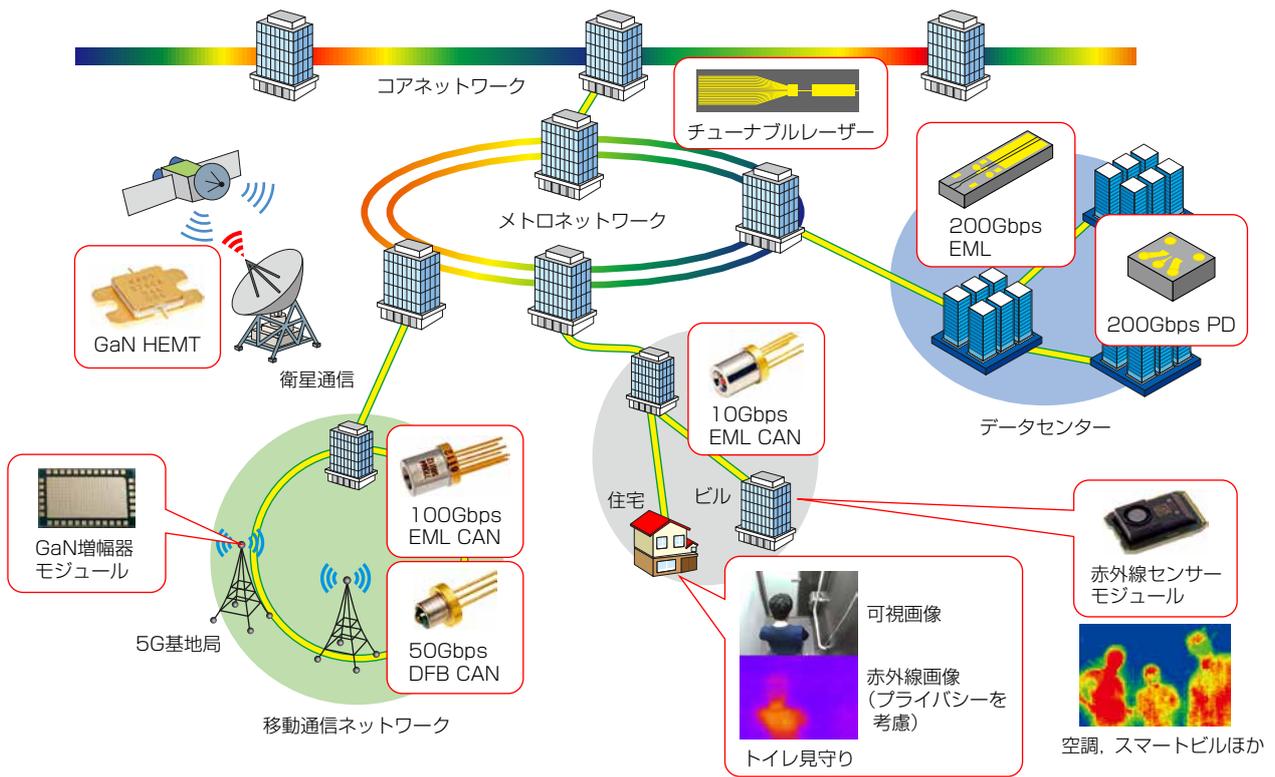
1. ま え が き

デジタル化は多くの分野で進行しており、特にセンサー技術を用いた人間の行動状態・把握、知覚のデジタル化が注目され、人間の活動情報や遠隔地の情報を無線・有線通信によるネットワークでリアルタイムで把握できるようになっている。また、過去の知見や経験、そしてSNS(Social Networking Service)の投稿やGPS(Global Positioning System)位置情報、オンライン購買行動等の社会行動もデジタルデータとして蓄積され、ビッグデータとしてAIや機械学習(ML)で分析・解析されている。これらによって、知識や経験がなくても高度な判断が可能になってきている。一方で急速なAI/ML発展・活用を始めとするあらゆる情報のデジタル化によって、消費電力増大が社会問題になってきており、持続的な社会発展に向けての急務な課題である。このような社会課題の解決、そして更なる発展を支えていくインフラ基盤は通信とセンシング技術であり、それらを支えるデバイスとして高周波デバイス、光デバイス及び赤外線センサーが挙げられる(図1)。本稿ではこれらの最新動向と将来展望について述べる。

2. 高周波デバイス

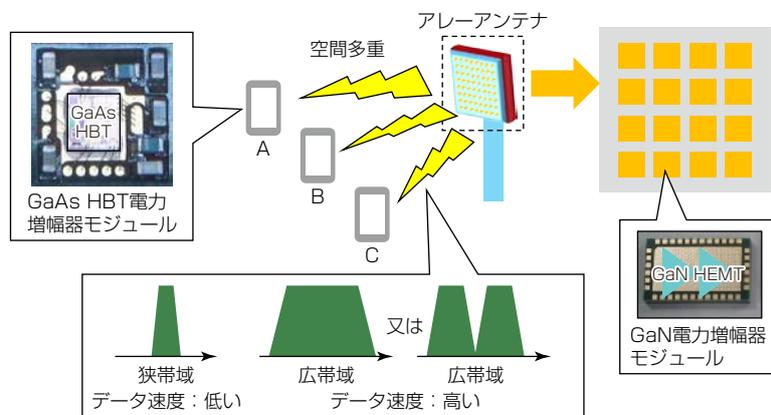
2.1 市場・技術動向

GaAs(ヒ化ガリウム)に代表される高周波用化合物半導体デバイスの主な用途は、所望の無線電力レベル(およそ1～数百W)に高周波信号を増幅する電力増幅器である。Si(シリコン)系デバイスに比べて高周波動作と高耐圧特性を持つため、高い電源電圧で動作でき、同じゲート幅のトランジスターで、より高い出力電力密度を実現できる。その代表例が携帯電話機及び基地局用電力増幅器(図2)、衛星通信やレーダー用電力増幅器(図3)である。2010年代になると、GaAsよりも高い電源電圧(20～50V)で動作可能なGaNデバイスの実用化が進み、GHz以上の高周波帯で高出力かつ高効率動作が要求されるレーダーや衛星通信用地上局では、GaAsからGaN電力増幅器への置き換えが始まった。



GaN：窒化ガリウム、HEMT：High Electron Mobility Transistor、5G：第5世代移動通信システム、EML：Electro-absorption Modulated Laser、CAN：CAN型パッケージ、DFB：Distributed Feedback、PD：Photodiode

図1-三菱電機の情報通信用高周波・光デバイスの適用分野



HBT：Heterojunction Bipolar Transistor

図2-5G携帯電話機と基地局の電力増幅器

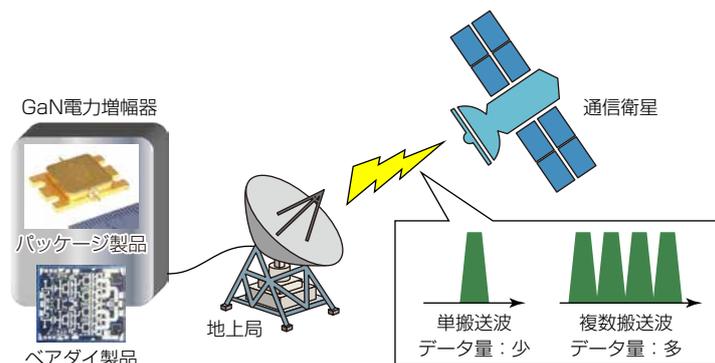


図3-衛星通信用地上局の電力増幅器

携帯電話基地局用電力増幅器にGaNデバイスが急速に適用され始めたのは比較的最近で、5Gの本格運用が契機と言える。5Gでは、従来の3GHz以下よりも高い周波数(3~7GHz)の利用が可能になった。これまで主役であったSi系電力増幅器よりもGaN電力増幅器の方がより高効率で増幅動作できるためである。一方、3.7V程度と低い標準バッテリー電圧の下で動作しなければならない携帯電話機用電力増幅器では、第3世代移動通信システム(3G)時代から、負のバイアス電圧を必要としないGaAs HBTが、今なお、電力増幅器の主役座を維持している(図2)。

ここでは、今後も高周波用化合物半導体デバイスとして活躍が期待されるGaN電力増幅器に対する要求特性と、デバイスの将来展望を述べる。

2.2 GaN電力増幅器に対する要求性能

電力増幅器は、無線システムでアンテナに近傍に配置され、所望の出力電力レベルまで信号増幅を行う。通常、その消費電力は、無線システム内で最も大きい。そのため、無線システム用電力増幅器には、システムの消費電力低減のために高効率動作が常に要求される。通信用途の場合は、高効率動作に加えて低歪(ひず)み動作との両立が要求される。

5G基地局では、図2に示すようにアンテナ素子が複数個配置されたアレーアンテナを用いて、各ユーザー端末に向けて電波を効率的に照射する空間分割多重技術が使用されている。電力増幅器はアンテナ素子ごとに1個配置される。このアンテナの採用によって、広帯域な変調信号(図2)を複数のユーザー端末に効率的に伝送可能になり、理論上10~20Gbpsの高速データ通信が可能である。

衛星通信用地上局でも、携帯電話基地局同様に、複数の搬送波の同時利用を可能にする広帯域化の要求が電力増幅器に対して高まっている(図3)。

図4は、電力増幅器の非線形性によって生じる歪みが信号に及ぼす影響例を示している。一つは自身のチャンネル信号の歪みと、もう一つは隣接チャンネルへの電力漏洩(ろうえい)である。前者は自身のチャンネル信号を受信した際のデータの誤り率を増加させ、後者は隣接する他のユーザーのデータの誤り率を増加させるため、共に所定の規格値内に歪みを抑制する必要がある。この歪みの影響を抑制するために、電力増幅器自身の線形性を保つ設計を施すだけでなく、デジタル信号処理を用いた歪みの抑制をシステム的に行う場合もある。

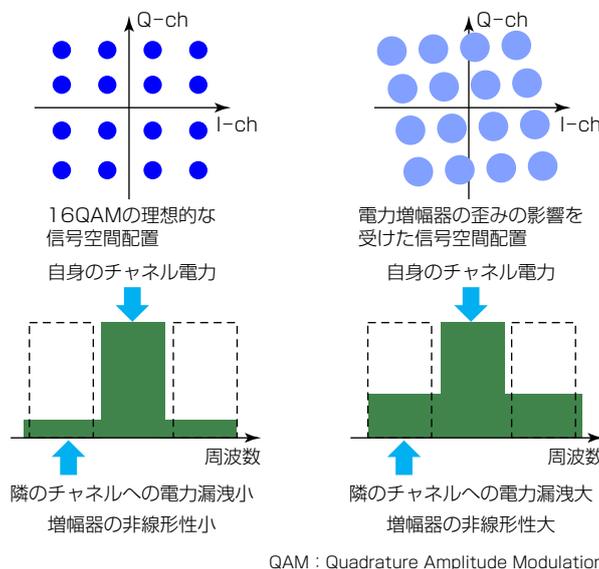


図4-無線通信システムでの歪みの影響例

2.3 将来展望

GaNデバイスは実用化が進みつつあるとはいえ、まだ結晶欠陥の多さなどの観点からGaAsデバイスに比べてデバイス技術の成熟には至っていない。そのため今後も結晶成長などの基盤技術の改良が重要である。また、電力増幅器用GaNデバイスの現在の技術課題としては、出力電力の高密度化、高効率動作化、高周波動作化が挙げられる。出力電力の更な

る高密度化はデバイスの温度上昇を伴うため、高放熱技術の一つであるGaN on Diamond等の新構造が検討されている。さらに超高周波の利用を目指す第6世代移動通信システム(6G)では、40~140GHzのミリ波帯に加えて、300GHzといったTHz帯の利用が検討されている。そのため、短ゲート長化などの研究も活発に進められている。GaNデバイスは、今後も性能向上が見込まれ、情報通信インフラのキーデバイスとしての貢献が期待される。

3. 光通信デバイス

3.1 市場・技術動向

スマートフォン等の移動端末の普及と動画配信やSNS等のクラウドサービスの急拡大に伴って、演算機器やストレージ機器を収容するデータセンターの大規模化が進んでいる。最近では、生成AIの社会的又は産業的な利用が急拡大する中、データセンター内に収容されるAI/ML用サーバーでは並列演算処理を行うGPU(Graphics Processing Unit)間の相互接続のために、サーバーとラック間やGPUボード間の接続にも光ファイバー通信の技術が使用されるようになり、同用途での光トランシーバーの市場拡大と高速化が急速に進んでいる。

また、データセンターの大規模化に伴って、10kmから数百km離れたデータセンター間をつなぐ光通信ネットワークの大容量化も必要になるため、従来は主に数百kmを超える長距離通信に使用されていた、光の強度に加えて位相や偏波にも情報を乗せるデジタルコヒーレント方式の適用範囲が拡大している。

それに加えて、AI/MLサーバーが機械学習を行うためには大量の情報を収集する必要があるため、ブロードバンドサービスの大容量化も必要になる。光ファイバーを使ったブロードバンドサービスの一つであるFTTH(Fiber To The Home)では、最高10Gbpsを実現するXG-PON(10-Gigabit-Capable Passive Optical Network)やXGS-PON(10-Gigabit-Capable Symmetric PON)の普及が進み、更なる大容量化を志向した最高50GbpsのHS-PON(Higher Speed PON)の標準化を踏まえて実用化に向けた開発が進められている。また携帯電話等の移動端末の通信に利用される移動通信ネットワークでは、5Gの普及とポスト5Gに向けて無線周波数帯の拡張が必要になるため、無線アンテナと移動通信基地局を結ぶ光通信ネットワークも25Gbpsから50~100Gbpsへの高帯域化が必要になる。

光通信ネットワークを構成する光トランシーバーには、電気信号と光信号を相互に変換するⅢ-V族の元素を組み合わせた化合物半導体のレーザーダイオードとフォトダイオードの光デバイスが主として搭載される。現在、データセンター内通信に使用される光トランシーバーは、動作速度100Gbpsの光デバイスが主流であるが、間もなく動作速度200Gbpsの送受信デバイスを搭載した光トランシーバーの導入が始まり、その先を見据えたbeyond 200Gbps(すなわち400Gbps)時代に適用される光デバイスの開発も進められている。

また、大規模なデータセンターで使用される伝送システムでは、多くの光トランシーバーを収容するため、空調含む全体の消費電力低減が大きな課題になっている。データセンター内通信用の光トランシーバーでは、デジタル信号処理用プロセッサの消費電力低減と光デバイスの動作温度範囲拡大が並行して進められている。また、光導波路や光変調器を集積化したシリコン基板に化合物半導体のレーザーを結合させた集積デバイス(シリコンフォトニクス)が市場投入されている。これまで、化合物半導体を用いた光デバイスと比較して、シリコンフォトニクスは動作速度や導波路損失の点で不利とされてきたが、性能改善によって数百mまでの短距離通信用途では動作速度200Gbpsのデバイスが実用化されつつある。

データセンター間をつなぐデジタルコヒーレント方式の通信には、従来の長距離伝送に使用されていた伝送装置(トランスポンダー)を経由することなく、ルーター同士が直接接続するIP(Internet Protocol) over DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing)が普及している。この用途では、400Gbps(変調速度64Gbaud)以下の通信速度から800Gbps・1.6Tbps(変調速度128Gbaud)への移行が進む見通しであるが、そこに適用される光デバイスには、高速化と同時に小型の光トランシーバーに実装するための低消費電力化と小型集積化が求められる。

FTTHや移動通信システムに用いられる光デバイスに関しては、屋外に設置されることを想定して湿度と幅広い温度範囲に対応した気密封止パッケージに収納され、とりわけ製造コストが低いCAN型パッケージに組み込まれることが一般的である。システムの高速化に対応するためには、チップの高速化だけではなくパッケージの高帯域化も必要であり、既に50~100Gbpsの実用化にも目途が立っている。これら光通信ネットワークの概念図を図5に示す。

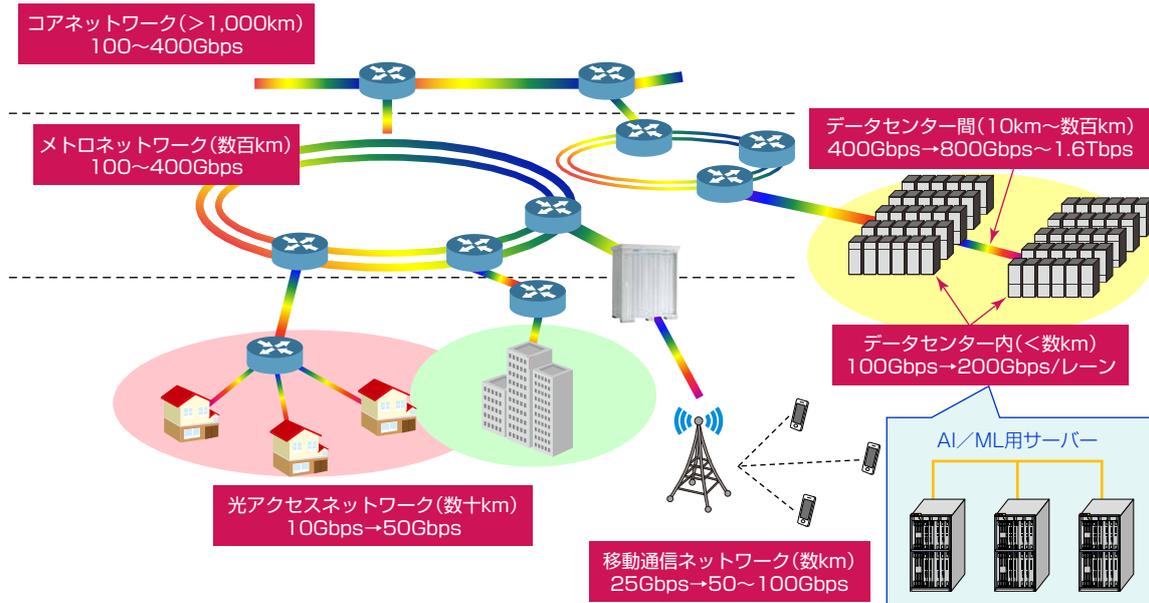


図5-光通信ネットワーク概念図

3.2 将来展望

3.1節に述べたとおり、AI/ML用サーバー及びそれを収容するデータセンターの大規模化に伴う消費電力の増加が課題になっているが、信号が更に高速化されると、IT機器内の電気信号線路のエネルギー損失も無視できなくなる。この抑制には、エネルギー損失の大きい電気信号線路を光配線へ置き換えることが有効である。また、GPUの速度向上に追従した帯域密度(単位長さ当たりの信号速度)の向上も必要になる。したがって、今後は低消費電力動作と高密度実装性の両方を兼ね備えた次世代光デバイスが必要になる。

シリコンフォトニクスは、大口径ウエハーを用いることによるスケールメリットと光電変換素子を除く機能の集積性の点では優位ではあるが、今後の更なる高速化への対応には物性的な限界に到達することが予想される。一方、化合物半導体は優位的な材料物性を活用した更なる性能向上が可能であり、デジタルコヒーレント方式を含む今後の更なる高速化にも最適な選択肢であると考えられる。今後、シリコン材料による低コスト集積性と化合物材料による高効率発光及び高速動作の利点を組み合わせた光電融合デバイスの技術進展が期待される。

4. 赤外線センサー

4.1 市場・技術動向

波長380nm(青)~780nm(赤)の可視光よりも波長の長い領域の光を赤外線と呼び、中でも8~14μmの赤外線は、遠赤外線又はLWIR(Long-Wavelength InfraRed)と呼ばれている。遠赤外線を測定し画像化したイメージの特長としては、被写体温度の判別が可能であることはもちろん、暗視が可能であること、可視波長の外乱光の影響を受けにくいこと、煙、霧など波長より小さい微粒子による散乱の影響を受けにくいことが挙げられる。

従来赤外線センサーは、主に監視装置に使われる高画素で高価なセンサーと、照明の自動点灯、自動ドア、空調などに使われる低画素で低価格なセンサーの2極に分かれていた。

近年は、赤外線カメラに使用されていた高画素センサーの低画素化や、従来熱検知に使用されていたセンサーの高画素化によって高度な空調、防犯、見守り、人数カウントといった用途に加えてキッチンや工場の設備監視など市場成長が継続している。

4.2 赤外線センサーMeiDIRの特長

当社では1980年代から赤外線センサーの技術開発を行い、独自方式のサーマルダイオード赤外線センサー技術を開発

し、高画素、高分解能な赤外線センサーに適用してきた。

サーマルダイオード赤外線センサー技術は、ボロメーター方式のセンサーと比べて低コスト化が容易で、焦電センサーやサーモパイル方式のセンサーと比べて高画素化が可能でかつ高性能、という特長がある。

このような特長を生かして、2019年、一般民生用向けに小型・低価格赤外線センサーモジュール“MeiDIR(メルダー)”シリーズの最初の製品としてMIR8032B1を発売した。80×32の高画素と高い温度分解能(100mK)によって、当社ルームエアコン“霧ヶ峰”の“ムーブアイmirA.I.+ (ミライプラス)”などに採用された。

2022年に、“より広い範囲で高精度に人・物の識別や行動把握を行いたい”というユーザーの要望に対応して、画素数(80×60)を約2倍にしたMIR8060B1を開発し、AIを活用した見守り等に活用されている。

2023年には、MIR8060B1と同じセンサーサイズと画角のまま、200℃以上の温度まで検知可能にしたMIR8060B3を開発した。

2025年、更に広い範囲を検知したいという要望に対応して、画角を100°×73°に広げた新製品MIR8060C1を開発した。MIR8060C1は、熱画像を不明瞭にする不要な光の入射成分を抑制しつつ、既存品の2倍以上の検知面器を実現する新開発のレンズを採用している。1台でも広範囲のモニタリングが可能になり、広い範囲を見守り際の設置効率が大幅に改善する。

これらMeiDIRシリーズの外観と主要諸元を図6に示す。また、MIR8060B1とMIR8060C1のモニタリング状況の比較を図7に示す。



形名	MIR8060C1	MIR8060B3	MIR8060B1	MIR8032B1
画角	100°×73°	78°×53°		78°×29°
画素数	80×60	80×60		80×32
フレームレート	4/8fps	4/8fps		4fps
検知可能温度	-5~+60(℃)	-5~+200(℃)	-5~+60(℃)	
温度分解能	180mK	250mK	100mK	
モジュールサイズ	19.5×13.5×9.7(mm)		19.5×13.5×9.5(mm)	

図6-MeiDIRシリーズの外観と主要諸元

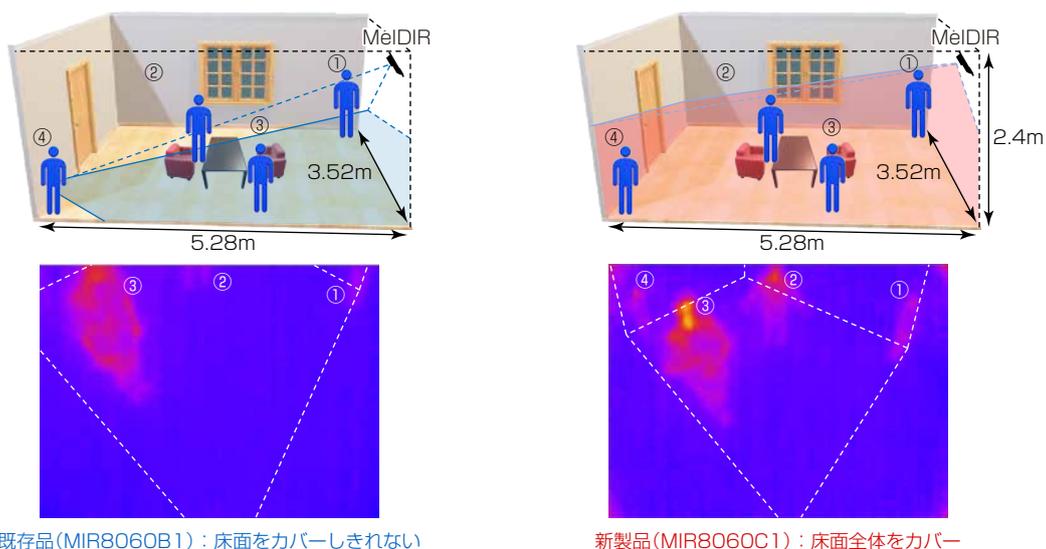


図7-MIR8060B1とMIR8060C1の比較

4.3 将来展望

近年AI技術の進化によって急速にクラウドAIの利用が一般化し、センサー情報をクラウドに収集してAI処理を行うシステムが急速に発達している。同時にセンサーデバイス上で直接データ処理を行う低遅延なエッジAIもリアルタイム性

が要求される自動運転車やスマートホームデバイスなどでの利用が進んでいる。

赤外線センサーは被写体の熱分布を画像化できるため、人体のような熱がある被写体に対して、可視カメラなどでは取得できない情報を直接得ることができる。そのため熱を持った被写体に対して、少ない情報量でAI認識が可能で、末端のシステム上で処理を行うエッジAIとの親和性が高い。

MelDIRはAIとの親和性の高さを生かして、AIを適用した空調や見守りシステムのためのセンサーとして採用されてきた。同時により広範な顧客にMelDIRを使用したAIを利用できるよう、汎用マイコンを搭載したデモキットにYOLO (You Only Look Once)をベースにMelDIR用に最適化した検知アルゴリズムを開発してきた。検知モデルは、リビングのような一般環境で複数の人間の存在を検知する学習モデルや、トイレのような行動様式が決まった環境で正常な姿勢と異常な姿勢を検知する学習モデルであり(図8)、学習モデルを準備しなくてもAI検知できる。

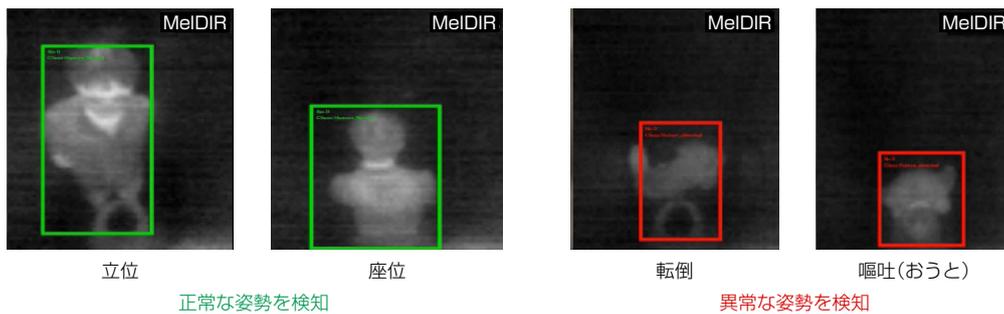


図8-MelDIRとデモキットによるAI検知例

このように“MelDIR”ラインアップの拡充とともにAIの活用を行い、より広い範囲の社会課題の解決に貢献している。

5. む す び

あらゆる環境の把握、すなわち情報を担う赤外線センサーとその状況を高速に伝える高周波デバイス、光デバイスの最新動向及び将来展望について述べた。これらのデバイスは社会活動をより便利にし、持続可能な社会に不可欠なキーデバイスと考える。当社は、今後も時代に即した先進的なデバイスを提供し続けることで、活力ある社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 増田健之：高周波・光デバイスの最新動向と将来展望，三菱電機技報，97，No.3，130～134（2023）