

2.3 ICT・エレクトロニクス応用

サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたデジタル社会（Society 5.0）の実現に向けて、サイバー空間で高速な数値解析やデータ処理、AI処理、量子計算などの高度な情報処理、フィジカル空間における情報・データの収集を行うIoT技術、機器のリアルタイムの制御に必要なエッジコンピューティング、両空間を結びつける高速・大容量・低遅延・多接続・低消費電力・セキュアな次世代の通信技術が期待されている。このICT・エレクトロニクス区分では、ナノテクノロジー・材料技術を基盤とした情報通信（ICT）およびエレクトロニクスの技術分野で世界的に注目される領域を取り上げる。具体的には、「革新半導体デバイス」、「脳型コンピューティングデバイス」、「フォトニクス材料・デバイス・集積技術」、「IoTセンシングデバイス」、「量子コンピューティング・通信」、「スピントロニクス」の6つの研究開発領域であり、以下に概要を示す。なお、エレクトロニクス技術として注目される「パワー半導体材料・デバイス」については、再生可能エネルギーを含む電力網での高効率な電力変換や、電車や電気自動車における高効率モーター駆動などで強い社会的なニーズがあるため、社会インフラ・モビリティ応用区分で取り上げる。

革新半導体デバイスは、従来のCMOSを超える新動作原理のデバイスを開発し、超高速・超低消費電力でデータ処理する集積システムの実現をめざす研究開発領域である。IoTやエッジAIコンピューティングなどの様々な応用に向け、主に材料とデバイスの視点で新たなロジック用デバイスおよび不揮発メモリの研究開発動向を示す。デバイスを構成する材料としては、Siなどの従来の半導体だけでなく、二次元材料、磁性材料、強誘電材料などの様々な材料を用いられるようになってきている。ロジック用デバイスの構造としては、FinFETからSiナノシートを用いたGAAFET、さらにp型とn型のGAAFETを積層したCFETへと研究開発が進展している。また、さらに先の世代を見据えてチャンネルに二次元材料を用いたトランジスタの試作も進められている。不揮発メモリとしては、NAND型フラッシュメモリ、相変化メモリ（PCM）、磁気抵抗メモリ（MRAM）などにおいて大容量化、高速化などの性能向上が進められている。

脳型コンピューティングデバイスは、人間の脳の情報処理を模倣した回路、そこに利用する革新的な材料・デバイスの基盤技術の開発により、人間のように高度な判断や予測、制御などを超低消費電力で行うことができるAIアクセラレータ・チップを実現するための研究開発領域である。ここでは、AIアクセラレータ、コンピュータインメモリ（CIM）、ニューロモルフィックチップ、リザーバーコンピューティングに分類し、それらに関わるデバイス・材料・物理現象を中心に記載している。AIアクセラレータでは、クラウド向けのチップ（GoogleのTPU、NVIDIAのGPUなど）の性能向上が進み、浮動小数点演算速度はPFLOPSオーダーに突入している。また、エッジ向けも演算精度を軽量化したチップの製品化も進められている。CIMでは、ReRAMやメモリスタなどの不揮発性デバイスの特性を利用して重みを記憶するnvCIMの研究開発が活発になっている。ニューロモルフィックチップでは、Intel社のLoihi 2による実効ニューロン数の増大、欧州のHuman Brain ProjectのBrainScaleS-2による深層学習精度の向上などの進展がみられる。リザーバーコンピューティングでは、材料などの持つ様々な物理的な特性を利用した物理リザーバーコンピューティングが材料・デバイスの研究者を巻き込んで活発化している。

フォトニクス材料・デバイス・集積技術は、光の多様な現象・機能を利用して高性能/高機能な光学材料や光デバイスを創出し、エレクトロニクス技術との融合と様々なデバイスの集積により、新たな機能を有するチップ・モジュール・装置を実現する研究開発領域である。この領域では、光技術の応用、集積技術、デバイス、材料に関して動向を記載している。応用では、次世代通信応用としてオールフォトニックネットワーク実現やテラヘルツ波利用に向けた活動、光集積回路を用いたAIアクセラレータなどコンピューティング技術への応用、LiDAR（light detection and ranging）などのセンサー応用が進められている。集積技術では、シリコンフォトニクスのプラットフォームに二次元物質などの新たな材料を導入する動きや、光回路と電気回路を同時集積する光電融合集積技術も進展している。デバイスでは、フォトニック結晶ナノ共振器構造やプラ

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

ズモニクス構造によるレーザー、光アイソレータ、メタサーフェスなどの研究開発が進展している。材料では、二次元物質、トポロジカル絶縁体、ワイル半金属、反強磁性体などの新奇物質に関する光物性研究への関心が高まっている。

IoTセンシングデバイスは、MEMSセンサーを代表とする高性能・高機能なセンシングデバイスの研究開発により、健康で便利に暮らせ安心・安全なスマート社会の基盤となるIoTを実現する研究開発領域である。これまで取り扱ってきたMEMSセンサー、化学センサーに加えて、光学センサー、量子センサー（ダイヤモンドNVセンター）の動向を記載している。MEMSセンサー技術は継続的に革新され、低コスト化・小形化と高性能化が進展しており、高性能MEMSマイクロフォンを用いて、CO₂を光音響法で検出するガスセンサー、1 Pa以下のノイズレベルで数cmの上下動を測定できる気圧センサーなども開発されている。化学センサーでは、金属酸化物や有機高分子材料に加え金属有機構造体（MOF）が注目され、人工嗅覚センサーによる食品の状態モニタリング、新型コロナウイルス（COVID-19）感染者の診断試験などが行われている。光学センサーでは、従来の3Dイメージ、TOF方式測距、LiDAR、SPADに加え、偏光イメージセンサー技術が開発されている。量子センサーでは、量子性の積極利用や量子限界に迫る精密制御によって、従来手法よりも感度が高いセンシングが可能であり、ダイヤモンドNVセンターを中心に生命現象や細胞内環境の精密計測、高感度なウイルス検出などの応用を目指して幅広い分野で研究開発が進められている。

量子コンピューティング・通信は、電子や光子などの量子性を積極的に活用して、古典系では実現できない情報処理やセキュア通信を実現するための研究開発領域である。超伝導量子ビットを筆頭にイオンなどさまざまな物理系で研究開発が進められている量子コンピュータ、冷却原子系やイオン系での開発が進む量子シミュレータ、実装に向けた開発が急速に進んでいる量子暗号通信、将来に向けた基礎研究の段階にある量子中継・量子ネットワークなどが含まれる。量子コンピュータでは、様々な量子ビットの研究開発が進展し、NISQの活用、エラー訂正技術、量子アニーリング技術、量子シミュレーション、古典コンピュータとのハイブリッド化などが進められている。量子暗号通信では、伝送距離の延伸、伝送損失の低減、通信速度の向上などが行われている。

スピントロニクスは、固体中の電子が持つ電荷とスピンの両方を工学的に応用する分野であり、電荷の自由度のみに基づく従来のエレクトロニクスでは実現できなかった機能や性能を持つデバイスの実現をめざす研究開発領域である。最近では、熱スピン流に基づいた熱電変換をめざすスピнкаロリトロニクスや物質のトポロジカルな性質に着目したスピン流の制御、スピントロニクスで発展した技術の量子状態制御への応用、スピンを用いた人工知能デバイス研究など新しい展開をみせている。ここでは、スピントロニクス素子として、スピントルク発振素子（STO）、MRAM、スピンMOSFET、新たな展開として、反強磁性スピントロニクス、原子核スピン流生成と核スピン熱電効果、スピンメカニクス、トポロジカルスピントロニクス、量子スピン液体を用いたスピントロニクス、非線形コンピューティング、計算科学を用いたスピントロニクス材料探索の研究動向を示す。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用