

## 2.3 ICT・エレクトロニクス応用

ナノテクノロジー・材料を基盤とした情報通信・ナノエレクトロニクス技術は、IoT (Internet of Things)、人工知能 (AI) 時代に代表される今後のスマート情報社会、革新的環境エネルギー社会、世界最高水準の医療・福祉社会を支える共通基盤技術と位置づけられる。これまでは、比例縮小 (スケーリング) 則による Si-CMOS デバイスの高集積化と高性能化によってけん引されてきたが、デバイスの微細化が物理的限界に近づいており、この限界を突破すべく様々な新しい潮流が生まれている。

その1つがデバイスの3次元化である。NAND型フラッシュメモリの3次元積層技術をはじめ、TSV (貫通シリコンビア) や近接場磁界結合の技術を使った3次元ヘテロ集積化技術がすでに実用化されている。メモリとプロセッサの積層集積化に加え、フォトニックデバイス、MEMS/NEMS、センサなど、異種機能のデバイスを集積化する技術の進展が著しい。ロジック演算用のトランジスタ素子自体も、16nm世代から導入された Fin 型 MOSFET で立体構造に変化した。3nmより先の世代では、Si ナノシートや Si ナノワイヤを用いた横型 Gate All Around 構造が導入されるとみられ、2030年代以降はナノシートがさらに縦積みされた本格的な3次元構造の時代に突入するとみられている。

従来の材料にはない、新しい機能の活用を視野に入れた新規デバイス・材料開発も大きな潮流をなしている。例えば既存の3次元バルク材料とは異なる物性の表面・界面を有するグラフェン、 $\text{MoS}_2$ をはじめとする遷移金属ダイカルコゲナイド、トポロジカル絶縁体のような機能性原子薄膜などの新材料の特性を活用し、飛躍的な消費電力削減と超高速化を可能にするイノベティブなデバイス創製などをめざす流れである。特に  $\text{MoS}_2$  など2次元半導体について、上記の Si ナノシートを置換する候補材料として、近年活発に研究が行われている。電子が持つスピン自由度を利用できる物質を用いたスピントロニクスの研究開発も活発であり、スピン MRAM など量産段階にいたっている技術もある。

また、組み合わせ回路に基づく従来法と全く異なる、新しい計算パラダイムを実現する新アーキテクチャの検討も本格化している。非デジタル、すなわちアナログ信号を使った計算パラダイムとして、クロスバースイッチやメモリアレイを使ったアーキテクチャ、脳神経回路などの動作にヒントを得たスパイキング・ニューラルネットワーク (SNN) などのニューロモルフィック・コンピューティング、非線形ダイナミカルシステムを使ったコンピューティングなどで、AI の情報処理に適したハードウェアの実現をめざす研究が行われている。なかでも量子コンピューティングは、古典力学系では実現できない情報処理機能を実現するものとして、近年、特に注目を集めている。量子系は計算だけでなく、通信の秘匿性についても従来の古典情報処理では実現できない安全性を担保するため、量子暗号や、量子中継、量子ネットワークへ応用する研究が進んでいる。

情報処理デバイスや通信技術と並んで今後のスマート情報社会の主要な構成要素となるのがセンシングデバイスである。センサは人工知能や制御システムの入力となり、その応用は IT 機器、オーディオ機器、ロボット、ドローン、VR・ARシステム、自動運転車、医療機器など、今後のイノベーションのキーとなるほとんどのシステムに広がっている。これらの応用のためのセンサとして、画像・映像を取得するイメージセンサや、加速度、圧力、音などの多様な物理量を検出・測定可能な MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) センサがもっとも重要である。また、健康・医療などの応用分野で安定して使いやすい化学センサの開発も期待され、各種の物理センサや化学センサと集積回路やプリントエレクトロニクスとの組み合わせも重要になる。電子や光子などが持つ性質 (量子性) を積極的に活用して、より高感度な計測・センシング技術を開発しようとする取り組みも進んでいる。

### 2.3

俯瞰区分と研究開発領域  
ICT・エレクトロニクス応用

今後のICT・ナノエレクトロニクスの研究開発には、素子単独の性能向上にとどまらず、システムや応用まで、複数の技術レイヤーにわたる幅広い視野がますます求められる。特に近年、Deep LearningをはじめとするAI技術のロボット自律制御への利用が大きなトレンドをなしており、柔軟な動作が可能なソフトロボティクス、小型・計量・高出力のアクチュエータの開発との融合研究が活発化している。今後は、ソフトとハードの融合によりデバイス開発を加速させるとともに、長期的視野に立った俯瞰的な研究開発が求められる。

## 2.3

俯瞰区分と研究開発領域  
ICT・エレクトロニクス応用