

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、 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 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ド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

2.3.1 新機能ナノエレクトロニクスデバイス

(1) 研究開発領域の定義

IoTやエッジAIコンピューティングなど将来のさまざまな応用に向けて、現在のナノエレクトロニクスデバイスのさらなる高性能化と低消費電力化を進めつつ、従来のCMOSを超える新動作原理のデバイスを開発し、ビッグデータを超高速・超低消費電力で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。新材料の特性を理論的・実験的に確認し、デバイス試作で超低消費電力動作、超高速動作、大容量、超長期記録などの優位性を確認することが研究開発の課題である。組み合わせ回路に基づく従来法とは全く異なる、新しい計算パラダイムを実現する新アーキテクチャも検討されており、研究開発課題はデバイスレベルからシステムレベルまで多階層に及んでいる。

(2) キーワード

低消費電力、集積回路、More Moore、Beyond CMOS、IRDS、不揮発性メモリ、NANDフラッシュ、抵抗変化型メモリ、ReRAM、相変化メモリ、PCM、スピンMRAM、ロジック埋め込み不揮発性メモリ、インメモリコンピューティング、SCM、急峻スロープトランジスタ、FeFET、ナノシート、ナノワイヤ、グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイド (TDMC)、 MoS_2 、トポロジカル絶縁体、スピントロニクス、脳型コンピュータ、深層ニューラルネットワーク、DNN、スパイク型・ニューラルネットワーク、SNN、ニューロモルフィック、IoT、エッジAIコンピューティング

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

2010年代、第4世代通信 (4G) で構築されたクライアントサーバシステムを介して、スマートフォンとデータセンターを繋いだクラウドコンピューティングが実現された。2020年代はSociety 5.0の実現に向けた社会インフラとして5Gインフラが導入され、さらに2030年頃にポスト5Gインフラの導入が予測されている。これにより、人間が感知できない通信遅延で端末とサーバの間でデータ演算情報がやり取りできるリアルタイムコンピューティングの環境が提供される。例えば多数のセンサ端末からの入力に基づき、分散基地局で発生するAIからの出力情報が、無意識のうちに生活空間に降り注ぐことになる。このようなリアルタイムコンピューティングの空間を国内一律に提供するには、現在の4Gインフラの数十倍の電力が必要と予測されている。今後の持続的な社会実現には地球環境の保全とエネルギー問題を両立させる必要があり、情報通信機器の超低消費電力化を進め、世界の電力消費エネルギーを削減する努力が必要不可欠である。

情報通信機器の心臓部にあたるのがロジック用デバイス、メモリ、高周波回路などのシリコン集積回路であり、これらは市場の要求から高性能化、高機能化、高集積化が進められている。2010年代、高集積化が限界に達するとの見解が数多くあったが、チップ面積を決める多層配線ピッチのスケールリングはロードマップどおり継続的に進み、2020年の7nm世代先端ロジック集積回路でトランジスタの集積数は約100億個となった。今後も微細化と高集積化は2028年頃の2.x nm世代ロジックまで継続されると予想され、1チップ上のトランジスタ数は約1兆個に達すると予測されている。リアルタイムコンピューティング空間の実現には1兆トランジスタ世代のナノエレクトロニクスデバイスが必要と考えられ、現在のトランジスタ (MOSFET) の材料や構造、基本的な論理回路、メモリ回路などに対して革新的な技術を開発し、積極的に導入していく必要がある。例えば、電力の供給を切っても記憶した情報が消えない不揮発性メモリや不揮発性ロジック、使ってい

ない回路ブロックのきめ細やかな電力供給制御、動作電圧の低い新原理のトランジスタ、人間の脳の動作に近い（エネルギー消費の少ない）新規デバイスや新規アーキテクチャの検討が必要である。

〔研究開発の動向〕

ナノエレクトロニクスデバイス関連の研究開発の動向はInternational Roadmap for Devices and Systems (IRDS) の報告書に詳しくまとめられている。IRDSは、2015年度版報告書の公開で活動を終えた国際半導体技術ロードマップ (ITRS) の資産を引き継ぎ、IEEEと応用物理学会を中核としてスタートした。デバイス関連の動向に関しては、最新版の2020年度版ではMore Moore (MM) チャプターとBeyond CMOS (BC) チャプターにまとめられている。想定されるアプリケーションは、ビッグデータ、IoTエッジセンサ、深層学習とAI、エクサスケールコンピューティング、ロボティクス・自律システムであり、デバイス技術だけでなく、その上位の回路、アーキテクチャ、アプリケーション関連技術との協調的な研究開発の重要性がうたわれている。

・ロジック用デバイス

16 nm世代から導入された立体構造のFin型MOSFET (FinFET) は、3 nm世代対応のゲート長18 nmにおいても、短チャネル効果を十分抑制できることが報告されている。2.x nm世代以降は、SiナノシートやSiナノワイヤを用いた横型GAA (Gate All Around) 構造が導入されるとみられているが、しきい値電圧調整の限界、配線抵抗の増大および配線間絶縁信頼性の劣化、寄生容量・抵抗の増大などにより、Siデバイスの面内方向の微細化は終焉を迎えると予想されている。

その後は、Siナノシートに代わり2D物質、例えば硫化モリブデン (MoS_2) 等が導入される可能性がある。現在、p型2D材料、n型2D材料のスクリーニングおよび300 mm材料成長装置の研究開発が精力的に進められている。2030年代以降は、Siナノシートあるいは2D物質が縦積みされた3D化世代へ突入すると考えられる。将来の1.x nm世代に向けて、n型Siナノシートトランジスタ上にp型ナノシートトランジスタを積層させたCFET (Complementary FET) 構造の研究開発が進められている。

2D物質のなかでも特に注目を集めてきた材料が、極めて高い移動度を有するグラフェンである。ただし単層のグラフェンにはバンドギャップがなく、バンドギャップを有する2層グラフェンでもデジタル情報処理に必要なオン・オフ電流比を実現できない。そこで幅を狭くしたグラフェンナノリボン (GNR) でバンドギャップを持たせる研究が行われている。そのためにはアームチェア型のエッジ形状にする必要があり、原子レベルの精度でGNRを形成する技術が要求される。近年は、元来バンドギャップを有する2D材料である遷移金属ダイカルコゲナイド (Transition metal dichalcogenide: TMDC) をチャンネルに用いたトランジスタの研究開発がさかんになっている。特に MoS_2 については、CVDやMOCVD、スパッタリングなど、量産化をめざした成膜技術の研究開発が進められている。

電源電圧を大幅に削減できる急峻なサブスレッショルドスロープ特性を実現するトンネルFETや負性キャパシタンスゲートFETなどの研究開発もさかんである。さらに、NEMSスイッチ、MottFET、トポロジカル絶縁体デバイスなど、新原理の超低消費電力ロジックデバイスの可能性も検討されている。

・不揮発性メモリ

不揮発性メモリ技術は、電荷保持型のフラッシュメモリとそれ以外の方式に大別できる。NAND型フラッシュメモリは世界半導体市場 (約45兆円) の10 %を占める。これまでの平面縮小技術に代わり、3D積

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

層構造形成技術、すなわち高積層成膜技術、高アスペクト比エッチング、原子層堆積 (Atomic Layer Deposition: ALD) などによる大面積均一成膜技術が大容量化をけん引し、主要製品は3D積層型にほぼ移行した。

電荷保持型以外の不揮発性メモリには、抵抗変化型メモリ (ReRAM)、相変化メモリ (Phase Change Memory: PCM)、スピンMRAM (STT-MRAM、SOT-MRAM) などがある。超低消費電力化のため、VCM (Voltage Controlled MRAM) など、電圧駆動方式の不揮発性メモリの研究開発も進められている。FTJ (Ferroelectric Tunnel Junction) や FeFET、強誘電体 Hf 酸化物を用いたメモリ等も注目を集めている。また、SRAM が多用されてきた L2 キャッシュ、L3 キャッシュへの STT-MRAM 適用など、これまで揮発性メモリが使われてきたメモリ階層への不揮発性メモリの進出も期待されている。DRAM と NAND フラッシュメモリの処理遅延時間 (latency) のギャップは 100 倍以上に及び、ギャップを埋めるバッファメモリとして、各種不揮発性メモリを用いた SCM (ストレージクラスメモリ) の開発が必要である。ロジック回路と混載できるロジック埋め込み不揮発性メモリの研究開発も活発である。これまでロジック埋め込みメモリとしてフラッシュメモリが使われてきたが、CMOS ロジック回路の微細化に追従できなくなり、ReRAM や MRAM、PCM に置き換える研究が進められている。近年、これまで HDD に格納していたデータを全てメモリ上に保持して処理を格段に高速化するインメモリコンピューティングへの応用もさかんに研究されている。

また、ビッグデータの利活用を推進するため、デジタルデータを 100 年、1000 年単位で安全に保存できる、超長期保存メモリデバイスも求められている。超長期信頼性を実現するメモリの候補として、MONOS、ReRAM、CNT を使った RAM、現在のフラッシュメモリの改造などが候補にあがっている。新規不揮発性メモリの普及には、製造工程および実使用下における信頼性の確保が重要な課題であり、特性劣化のメカニズム解明、劣化予想のモデル構築、劣化させない使い方の提案など、総合的なアプローチが求められる。

・非ノイマン・脳型演算デバイス

脳神経回路などの動作にヒントを得た新しいアーキテクチャで超高速・低消費電力ビッグデータ処理をめざす研究が活発化している。組み合わせ回路に基づく従来法とは全く異なる、新しい計算パラダイムを実現するデバイスとアーキテクチャが検討されている。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、スパイク・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が研究されている。確率的デジタルコンピューティング、イジングマシン、量子コンピューティング (2.3.6 節参照) も新しい計算パラダイムをめざす動きとして注目されている。

現在の AI の主流は深層学習であり、その結合加重を表現するためのシナプス動作素子の研究開発が進められている。ReRAM や PCM、スピン MRAM など、ほぼ全ての不揮発性メモリが研究対象となり、材料探索も幅広く行われてきた。単体素子の研究開発は現在でも大学を中心に行われているが、研究開発の最先端ではシステム化や実装に関する研究に重心が移ってきている。深層学習応用に代わる脳型情報処理応用をめざした素子開発では、①高度な脳の機能・動作の模倣をめざした研究、②センサ機能を有する脳型素子の研究、および③リザバー計算応用をめざした研究がさかんになりつつある。

①高度な脳機能・動作では、スパイクタイミング依存可塑性を単体素子の機能だけで実現する試みに加えて、興奮性シナプスや抑圧性シナプスなどの動作実証も試されている。これらの機能を脳型情報処理に用いるにはアーキテクチャの開発を含むシステム化の研究が必要となる。

②センサ機能を有する脳型素子研究では、光応答性と学習機能を備えた素子開発などがさかんになってき

ている。視覚情報を中央演算システムに送らず、情報の入力から学習、簡単な判断までをエッジで処理させる試みであり、将来的にはAIロボットへの搭載などが期待される。現在主流の視覚センサに加え、力検出などさまざまなセンサと組み合わせた素子の研究開発も今後進むと期待される。

③リザバー計算は、整然とした階層型ニューラルネットワークを用いる深層学習と異なり、入力と出力の中間の層（リザバー）は非線形な入出力特性さえ示せばブラックボックスでよく、さまざまな物理・化学システムがリザバーとして動作する。従来の半導体デバイス研究とはアプローチが全く異なっており、幅広い研究分野からの参入が相次いでいる。材料・ナノ構造ドリブンの多体系を積極利用するアプローチや、光を用いたよく規定された系を用いるアプローチがある。近年、FeFETをリザバーコンピューティング素子として使う提案がなされ、現在のCMOSプラットフォーム上でのリザバー計算の可能性を示すものとして注目されている。

• その他

IoTエッジ（IoT）デバイスはセンシング、無線通信、情報処理、データストレージなどの機能を有するデバイスであり、将来のスマートシティ、スマートビルディング、医療、ヘルスケア、生産現場や物流、農業などへの応用が期待されている。電源供給ラインから独立して動作できるよう、環境発電デバイスと蓄電デバイスの集積化技術の開発に期待が寄せられている。環境発電では、振動、熱、光、環境電波、集積回路中の電荷や熱の再利用など、複数のエネルギー源の活用が想定される。蓄電デバイスでは、蓄えられるエネルギー体積密度を大きくできる全固体電池などに注目が集まっている。センサなど各コンポーネントの超低消費電力化も重要であり、上述の脳型演算デバイスもIoTエッジデバイスへの応用が期待されている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• ロジック用デバイス

2019年にTSMCとSamsungが極端紫外線（Extreme Ultraviolet：EUV）リソグラフィの量産技術適用を開始した。2020年にはTSMCが5 nm世代プロセスを用いた量産を本格的に開始し、このプロセスで製造されたチップを搭載した最新端末がAppleより販売された。TSMCは2022年には4 nm世代プロセスの量産を始める計画を発表している。2.x nm世代以降のトランジスタの研究開発はベルギーのIMEC、米IBMのAlbany Nanotech Complexなどのプラットフォームがけん引している。

• 不揮発性メモリ

NAND型フラッシュメモリでは高積層構造形成プロセスによる大容量化の競争が繰り広げられている。2020年11月にはMicron Technologyが176層のNAND型フラッシュメモリの出荷を開始した。さらなる高積層化に向けて、高アスペクト比の微細ホール加工技術、異なる薄膜の連続成膜技術、大表面積の均一成膜および高選択比の等方エッチング技術の研究開発が推進されている。

ReRAMについては、大容量SCMへの応用をめざす取り組みがさかんだったが、近年はロジック混載メモリとインメモリコンピューティング応用へとシフトしている。ReRAMはスイッチング原理の違いにより、CBRAM（Conductive Bridge RAM）とOxRAM（Oxide-based RAM）とに分かれ、現在はHfO₂を用いたOxRAMが主流となっている。近年、IntelやTSMCにより、先端CMOS LSIへReRAMの適用可能性が示されている。インメモリコンピューティング応用についてもISSCC、IEDM、VLSIシンポジウム等の主要な国際学会において、毎年新しいAIアーキテクチャへの適用実証が多数発表されている。

IntelとMicron Technologyが2016年に発表した3D XPoint™ (3DXP) メモリを機に、PCMの研究開発も一層活発化している。3DXPメモリは、DRAMとNANDの中間性能を持つSCMの有用性を実証した。製品開発は米国が先行しており、これを韓国が追随している。日本では界面相変化メモリiPCM (interfacial PCM)、新規カルコゲナイド系材料の開発などの基礎研究が行われている。

スピンMRAMの研究開発は2000年代から日本、米国を中心に行われ、STT-MRAMについては基礎研究フェーズが完了した。近年は、SOT書き込み方式、電圧制御書き込み方式など新方式の研究開発に移行している。現在、STT-MRAMの応用開発、実用化研究が企業で推進されており、Samsungが混載型STT-MRAM製品の量産を開始している。微細大容量MRAMではキオクシアとSK-hynixが先行している。AIなどへの応用も米国、ベルギー、日本から提案されている。

・非ノイマン・脳型演算デバイス

従来の深層ニューラルネットワーク (DNN) と比べ、より脳に近い動作をするスパイクング・ニューラルネットワーク (SNN) が注目されている。学習アルゴリズムの改良によりDNNに匹敵する高い学習性能が得られるようになり、消費電力が低く雑音にも強いSNNの特長が活かせるようになった。2014年にIBMが発表したSNNのIC「TrueNorth」では、ニューロン1個に対するシナプス数が256個にとどまり、カエルの脳程度の規模しか実現できなかったが、2020年3月にIntelからネズミの脳並みの数のニューロンとシナプスを持つSNN演算システム「Pohoiki Springs」が発表され、話題となった。これは同社が2017年に発表したSNNチップLoihiを768枚結合させたシステムで、ニューロン1個に対するシナプス数が約1000個に増えている。

TrueNorthを発表したIBMは、その後もPCMを用いたSNNの研究開発を継続的に行っている。ReRAMでは、ヒューレットパッカード出身の研究者らによって、深層学習のデモンストレーションや高度な脳機能の模倣などが試されている。米国ではこのほか、ミシガン大学、アリゾナ州立大学などの大学発ベンチャー企業による研究開発も進んでいる。米国における当該分野の主要な研究者には中国出身者が多く、中国に設立されたChua Memristor Instituteのメンバーとしても活躍している。

欧州では、フランスCEA-LetiやベルギーIMECなどで、集積化まで含めた脳型素子開発が進められている。大学では、英サザンプトン大学、独アーヘン工科大学、伊ミラノ工科大学において抵抗変化素子を用いた研究が行われ、仏CNRSなどで強誘電体を用いた研究が行われている。欧州では基礎研究に重心が置かれ、いずれもが世界をけん引している。一方、実用化研究については米国や中国ほどの勢いは感じられない。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

国内では、2020年度にJST CREST領域「情報担体を活用した集積デバイス・システム」および対応するさがけ領域が発足した。従来の概念にとらわれない新しいデバイス・システムの研究開発が志向されている。また、ポスト5G情報通信システムで用いられる先端半導体の国内製造技術を確保するため、令和元(2019)年度補正予算「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業」において先端半導体製造技術の開発に関する公募が行われている。エッジAIコンピューティングについては、総務省、文部科学省、経済産業省の3省連携で2016年に創設された人工知能戦略会議の下、戦略的に研究開発が推進されている。NEDO「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発」事業が2016年からスタートし、10年計画で推進されている。また、2017年に開始したNEDO「IoT推進のための横断技術開発プロジェクト」で、脳型素子を用いたAIシステムの研究開発が行われている。

米国では、2020年6月に超党派による法案「CHIPS (Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors) for America Act」が提出され、米国内の半導体製造の復活と技術サプライチェーンの確保する方針を打ち出した。さらに続いて提出された「American Foundries Act of 2020 (AFA)」では、米国の各州に対し、商業的な半導体製造施設の拡大を促す助成の提案がなされている。2020年5月には、米国から要請を受けたTSMCがアリゾナ州での半導体工場建設を発表した。2021年から120億ドルを投じて、5 nm世代プロセスの半導体工場を建設する計画である。ニューロモルフィック・コンピューティングに関しては、IntelがLoihiを基にしたIntel Neuromorphic Research Community (INRC) を2018年に発足させ、現在多くの大学や研究機関、企業が参加している。

欧州では、2013年から始まった10年計画のHuman Brain Projectのなかでニューロモルフィック・コンピューティングの研究開発が推進されている。2020年2月には、AIなどを対象に今後10年間、およびさらにその先を見据えた画期的なデジタル戦略が欧州委員会から発表された。EU圏の企業が産業データを共有できる制度を構築することで、AI開発での産業データ活用を進める。

中国においても脳型情報処理システムおよびデバイス開発に多額の資金が投入されている。脳型デバイスの総称として広く認知されるようになったメモrista (Memristor) の提唱者であるL. Chuaの名を冠した研究所「Wuhan National Laboratory for Optoelectronics Chua Memristor Institute」が設立され、また北京大Institute for Artificial IntelligenceにCenter for Brain Inspired Chipsが開設されるなど、組織、人員が急速に充実してきている。中国政府と欧米から戻った著名研究者らを中心に多くの著名な国際会議 (Nature ConferenceやIEEE) を開催していることも近年の特徴であり、中国は当該分野の世界的リーダーになりつつある。

(5) 科学技術的課題

デバイスの微細化とともに、デバイス間を接続する配線の幅も微細化される。近年、金属中の電子の平均自由行程と配線幅とが近づき、配線界面や粒界における電子の反射散乱の影響による比抵抗上昇が顕在化してきた。そこで、現在の配線材であるCuに変わる金属材料の探索が活発化してきている。5 nm世代ではCu配線を使える見込みであるが、3 nm世代以細では結論が出ていない。代替金属としてはRuあるいはCoが最有力である。配線抵抗の増大はロジックデバイスだけでなく、PCMを用いた3DPXのように抵抗変化のための動作電流が大きい不揮発性メモリのスケーリングにも影響する。また、トランジスタの3D化により、NANDやSRAMといったプリミティブセルの単位面積あたりの集積度が一段と向上すると予想され、電力密度の増大による発熱の問題を解決する必要がある。放熱性を考慮したデバイス設計、電子とフォノンとの相互作用を考慮したデバイス構造、高速スイッチング動作がチップ内の特定領域で集中的に発生しないような並列演算アルゴリズムなどの開発が必要である。

今後のナノエレクトロニクスのめざすべき方向は、従来の考え方の延長・延命ではなく、システムレベルから新たな枠組み・方式を構築することにあると考えられ、日本でもレイヤー (アーキテクチャ、回路、デバイス、材料) 間の垣根を取り払った研究プロジェクトの実現は必須である。特に、新型メモリと新型トランジスタの両方を3次元的に混載し、両者の特徴を活かしたアーキテクチャの実現が必要であり、システムの専門家とデバイスの専門家の協調が不可欠である。

例えば、産業界による大規模メモリの実現と長期信頼性試験、大学 (公的研究機関) によるメモリ機構の研究と長期信頼性モデルの構築、産業界と大学 (公的研究機関) の共同開発による新材料探索などが必要になる。ロジックについても同様な枠組みでの研究が必要である。また、可能な限り早い段階から産学連携

の体制を構築し、小規模集積回路レベルで萌芽研究から推進することで、研究開発の正しい方向の選択、実用化への効率的な技術移転をめざしていくことが望ましい。

デバイス試作にはファウンドリ機能を基軸にした産学連携の仕組みも強化していく必要がある。また、デバイス作製に関する共用設備では新規な材料やデバイスの作製が容易にできるような体制・仕組みづくりが重要である。特にナノデバイス研究の場合、微細加工プロセスのためのクリーンルームの維持や高度な装置の運転・保守が重要であり、高度な能力と経験を持った技術者の存在が必要不可欠である。

（6）その他の課題

半導体エレクトロニクス分野において日本の産業界には厚い技術・人材蓄積があるが、その蓄積は急速に散逸し失われつつあるため、これを回避し人材や設備等を有効活用する仕組みが必要である。つくばのTIAの研究環境はその先導事例として期待されるが、個別ファンディングの縦割りの運用にならないよう注意する必要がある。また、このような産業界の人材が集まっている中で、大学の学生が加わることは人材育成の視点から大変重要であり、大学からの学生の長期派遣の仕組みづくりを行う必要がある。

まだ萌芽的段階にあるAIや脳型コンピュータ技術の開発には、産学官で研究交流・人材交流を密に行い協同していくことが重要である。大学では特に基本原理実証や基礎物理の追究を行うとともに、若い人材を育て研究分野に供給すること、国の研究機関ではじっくり腰を据えてより発展的な研究ができる環境を研究者に提供すること、産業界ではこれまでに蓄積されてきた技術的ノウハウを新たな研究に有用に活かすことが期待される。また、長期的な視点を持って短中期の目標を説得力のある形で作成し、確実に研究を発展させていくようなプロジェクトの提案を行うとともに、優秀な研究者の国際的な循環に食い込めるような研究拠点を国内にも確立することが期待される。

さらに、最近のIoTデバイス技術やエッジAIコンピューティングに必要と考えられるのは、応用ごとに異なる境界条件（コストも含む）と必要条件の高度なすり合わせであり、ファウンドリ企業を巻き込んで実現するソリューションビジネスと類似していると理解できる。これは正に日本企業が得意とするところであり、今後のIoT/エッジAIコンピューティング技術を牽引することができる好機である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・ ロジック関係では急峻スロープ特性をめざしたデバイス開発、新チャネル材料トランジスタの研究開発など、深い学術的理解に基づく研究開発が行われている。 ・ 不揮発性メモリではフラッシュメモリ、スピンMRAMを中心に継続的な学会発表が行われている。
	応用研究・開発	○	→	・ キオクシア（旧東芝メモリ）がNAND型フラッシュメモリの3次元積層化を推進している。同社は韓国 SK-Hynixと共同でスピンMRAM開発も進めている。パナソニックおよび富士通セミコンダクターから、小容量ReRAMが製品化されている。 ・ イジングモデルの基底状態探索を高速処理するアクセラレータが富士通、東芝などから発表された。
米国	基礎研究	◎	→	・ 新材料・新原理のロジックデバイスの研究開発が強力に推進されている。 ・ スタンフォード大学がReRAMのインメモリコンピューティング応用に関する学会発表を継続的にしている。 ・ IBMが機械学習分野への展開を継続的に学会で発表している。

	応用研究・開発	◎	→	・米国内の半導体製造の復活を目指す CHIPS for America、AFA2020 法案が提出された。 ・Micronが176層のNAND型フラッシュメモリの出荷を2020年11月に開始。Everspin Technologiesが1GbのSTT-MRAMのサンプル出荷を開始。 ・IntelがSNNの研究コンソーシアムINRCを発足した。
欧州	基礎研究	◎	→	・IMECがGAAナノワイヤ、ナノシートFETの開発、埋め込み電源配線など、3 nm世代以降の先端ロジックデバイスの開発を推進中。不揮発性メモリでもIMEC、CEA-Letiから継続的に学会発表が行われている。 ・Human Brain Projectでニューロモルフィック・コンピューティングの研究開発が推進されている。
	応用研究・開発	○	→	・STMicroelectronicsがロジック埋め込み型PCMを内蔵した車載用マイコンを上市。
中国	基礎研究	○	↗	・清華大学がReRAMのインメモリコンピューティング応用を継続的に発表するなど、大学の学会発表が増加している。 ・Chua Memristor Instituteをはじめ脳型情報処理システムおよびデバイス開発の拠点が相次いで開設されている。
	応用研究・開発	○	→	・応用研究の公開情報が少なく全容は不明。 ・YMTC（長江存儲科技有限責任公司）が128層のNAND型フラッシュメモリを開発。
韓国	基礎研究	○	→	・大学・研究機関による基礎研究結果の学会発表は継続的に行われている。
	応用研究・開発	○	→	・SamsungがEUVリソグラフィの量産技術適用を開始した。 ・Samsung、SK-Hynixが128層NAND型フラッシュメモリを開発済み。SK-Hynixは3DXPの追試結果も発表している。
台湾	基礎研究	○	→	・国立清華大学がReRAMのインメモリコンピューティング応用を継続的に学会で発表している。
	応用研究・開発	◎	↗	・Macronix社がIBMと共同で3DXPを開発中。 ・TSMCがEUVリソグラフィを用いた5 nm世代プロセスによる量産を本格的に開始した。同社はロジック混載MRAMの開発で継続的に学会発表を行っている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) テレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

関連する他の研究開発領域

- ・ 計算脳科学 (システム・情報分野 2.1.7)
- ・ プロセッサアーキテクチャー (システム・情報分野 2.4.1)
- ・ スピントロニクス (ナノテク・材料分野 2.3.3)
- ・ 微細加工プロセス (ナノテク・材料分野 2.6.1)

参考・引用文献

- 1) IRDS, "International Roadmap for Devices and Systems (IRDS™) 2020 Edition", IEEE, <https://irds.ieee.org/editions/2020> (2021年1月26日アクセス).
- 2) S. Subramanian et al., "First Monolithic Integration of 3D Complementary FET (CFET) on 300mm Wafers", *2020 IEEE Symposium on VLSI Technology* (2020) : 1-2. doi : 10.1109/VLSITechnology18217.2020.9265073
- 3) S. Sato, "Graphene for nanoelectronics", *Japanese Journal of Applied Physics* 54 (2015) : 040102. doi : 10.7567/JJAP.54.040102
- 4) M. Y. Han et al., "Energy Band-Gap Engineering of Graphene Nanoribbons", *Physical Review Letters* 98 (2007) : 206805. doi : 10.1103/PhysRevLett.98.206805
- 5) B. Radisavljevic et al., "Single-layer MoS₂ transistors", *Nature Nanotechnology* 6 (2011) : 147-150. doi : 10.1038/nnano.2010.279
- 6) K. Kang et al., "High-mobility three-atom-thick semiconducting films with wafer-scale homogeneity", *Nature* 520 (2015) : 656-660. doi : 10.1038/nature14417
- 7) 島 久「IoT向け不揮発メモリ技術」『応用物理』89巻11号 (2020) : 667-670. doi : 10.11470/oubutsu.89.11_667
- 8) 與田 博明 他「スピントロニクスメモリ最新動向」『応用物理』88巻6号 (2019) : 394-398. doi : 10.11470/oubutsu.88.6_394
- 9) S. Mueller, "Ferroelectric HfO₂ and Its Impact on the Memory Landscape", *2018 IEEE International Memory Workshop (IMW)* (2018) : 1-4. doi : 10.1109/imw.2018.8388831
- 10) G. Jan et al., "Demonstration of Ultra-Low Voltage and Ultra Low Power STT- MRAM Designed for Compatibility with 0x Node Embedded LLC Applications", *2018 IEEE Symposium on VLSI Technology* (2018) : 65-66. doi : 10.1109/vlsit.2018.8510672
- 11) J. Pak et al., "40nm & 22nm Embedded Charge Trap Flash for Automotive Applications", *2018 IEEE International Memory Workshop (IMW)* (2018) : 17861147. doi : 10.1109/IMW.2018.8388778
- 12) C. F. Yang et al., "Industrially Applicable Read Disturb Model and Performance on Mega-Bit 28nm Embedded RRAM", *2020 Symposium on VLSI Technology* (2020) : 1-2. doi : 10.1109/VLSITechnology18217.2020.9265060
- 13) S. Yamazaki et al., "Reliability Enhancement of 1Xnm TLC for Cold Flash and Millennium Memories", *2015 Symposium on VLSI Technology* (2015) : T112-T113. doi : 10.1109/vlsit.2015.7223642

- 14) 森江 隆「ニューロモルフィックシステムと物理デバイス」『応用物理』88巻7号 (2019) : 481-485.
doi : 10.11470/oubutsu.88.7_481
- 15) 堀尾 喜彦「ブレインモルフィックコンピューティングと物理デバイスへの期待」『応用物理』88巻9号 (2019) : 619-623. doi : 10.11470/oubutsu.88.9_619
- 16) 秋永 広幸, 浅井 哲也「アナログ抵抗変化素子を用いた脳型回路」『応用物理』89巻1号 (2020) : 41-45. doi : 10.11470/oubutsu.89.1_41
- 17) D. Ielmini and R. Waser (eds.), *Resistive Switching : From Fundamentals of Nanoionic Redox Processes to Memristive Device Applications* (Hoboken, New Jersey : Wiley-VCH, 2020), https://www.abebooks.com/servlet/BookDetailsPL?bi=30565403398&searchurl=isbn%3D9783527334179%26sortby%3D17&cm_sp=snippet_-_srp1_-_title1.
- 18) W. Wang et al., "Computing of temporal information in spiking neural networks with ReRAM synapses", *Faraday Discussions* 213 (2019) : 453-469. doi : 10.1039/C8FD00097
- 19) S. Seo et al., "Artificial optic-neural synapse for colored and color-mixed pattern recognition", *Nature Communications* 9 (2018) : 5106. doi : 10.1038/s41467-018-07572-5
- 20) E. Nako et al., "Proposal and Experimental Demonstration of Reservoir Computing Using $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2/\text{Si}$ FeFETs for Neuromorphic Applications", *2020 Symposium on VLSI Technology* (2020) : 1-2. doi : 10.1109/VLSITechnology18217.2020.9265110
- 21) 176-Layer NAND, "176-Layers of Innovation", Micron, <https://www.micron.com/products/nand-flash/176-layer-nand> (2021年1月26日アクセス).
- 22) P. Jain et al., "A 3.6Mb 10.1Mb/mm² Embedded Non-Volatile ReRAM Macro in 22nm FinFET Technology with Adaptive Forming/Set/Reset Schemes Yielding Down to 0.5V with Sensing Time of 5ns at 0.7V", *2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)* (2019) : 212-214. doi : 10.1109/ISSCC.2019.8662393
- 23) C. F. Yang et al., "Industrially Applicable Read Disturb Model and Performance on Mega-Bit 28nm Embedded RRAM", *2020 Symposium on VLSI Technology* (2020) : 1-2. doi : 10.1109/VLSITechnology18217.2020.9265060
- 24) Intel Optane™ Persistent Memory 200 Series Brief, "Intel® Optane™ persistent memory 200 series delivers on average 25% more bandwidth¹ with up to 4.5 TB total memory per socket", Intel., <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/products/docs/memory-storage/optane-persistent-memory/optane-persistent-memory-200-series-brief.html> (2021年1月26日アクセス).
- 25) 野澤 哲生「これぞ「脳」の実力の片鱗? AIの主役はDNNからSNNへ」『日経エレクトロニクス』2020年7月号 : 55. <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/ne/18/00007/00114/>

2.3.2 集積フォトニクス

(1) 研究開発領域の定義

光の持つ多様な機能を利用して、高性能/高機能な光デバイスやそれらを集積化したモジュール・装置・システムを実現することにより、光の持つ高速性と低遅延性、低消費電力性を最大限に活かすとともにコストの低減を実現し、新たな機能と価値の創造をめざす研究開発領域である。光の技術は情報通信、医療・バイオ、加工・分析・計測、映像、照明、発電などの幅広い応用分野への適用が期待されており、用いる材料の高品質化、デバイスの高性能化・小型化・低消費電力化・高信頼化、多様なデバイスの集積による高機能化・多機能化、多様な材料・デバイスの集積化技術などの研究開発課題がある。

(2) キーワード

光配線、光電子融合、光集積回路、ハイブリッド集積、シリコンフォトニクス、ナノフォトニクス、量子フォトニクス、プラズモニクス、フォトニック結晶、メタマテリアル、微小共振器、トポロジカルフォトニクス、光ニューラルネット、光コンピューティング、フォトニックアクセラレータ、オンチップ光コム、光スキャニング、光相変化材料、薄膜強誘電体、ナノカーボン、二次元材料

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

光・フォトニクス技術は、光通信、照明や表示機器のほか太陽光発電など日々の生活で広く利用されているだけでなく、加工技術や測量技術を活用した製造業、農業、漁業の分野、光コヒーレンストモグラフィー(OCT)や内視鏡など医療の現場などにも浸透している。また、最近では高度なサイバーフィジカルシステム(CPS)によるSociety 5.0の実現に向けて、現実世界の様々なものの形や位置情報などのセンシング・イメージングデータの取得、ビッグデータの高速度・低消費電力な高度情報処理といったIoT/AI分野への光・フォトニクス技術の期待も高まりつつある。このように、光・フォトニクス技術は、現在および将来における安全・健康・快適な生活を実現するうえで欠くことのできない基幹技術の1つである。集積フォトニクス技術はこの光・フォトニクス技術の一領域であり、各種光デバイスを高度に集積化することにより、光のもつ高速性と低遅延性、低消費電力性を最大限に活かすとともにコストの低減を実現し、新たな機能と価値の創造をめざすものである。ここでは、主に光通信・光配線、光コンピューティング、光センシングなどの光デバイスの高度な集積化が必須になる応用領域と、その基盤となるシリコンフォトニクス、ナノフォトニクス、ナノ材料、ハイブリッド集積技術などについて記載する。

近年のIoTやビッグデータ解析等の普及により、通信の主体は従来の人と人の中から機械と機械の間に移っており、さらにAIの普及により機械学習・深層学習による膨大な学習データを処理する必要から、データセンター等のシステムで処理される情報量のニーズは今後も爆発的に増大すると予測される。これらの莫大なデータを解析して新たな価値を創出するためには、これまで以上に高速かつエネルギー効率の高い情報処理技術が不可欠である。また、自動運転など実時間性が重要な応用では、低遅延な情報伝送・処理が必須である。これらの要求を満たすために重要な役割を担うのが、光配線や光の特性を活かした新たなコンピューティング技術であり、それらを実現するシリコンフォトニクスやナノフォトニクスなど集積フォトニクスへの期待が高まっている。また、量子情報分野においては、量子情報の媒体である光子に対する量子演算をスケールアップで安定して実現するプラットフォームとして、集積量子フォトニクスの発展が期待されており、計測や分

光技術においても、システムの小型化・安定化などを可能にする集積フォトニクス技術が注目されている。そのなかでも、シリコンフォトニクスは、設計・製造・組み立て・検査等の全ての段階で、既存のシリコン電子デバイスとの互換性を図ることにより、既存のシリコン・エレクトロニクスの膨大なリソースを活用することが可能になり、チップ間やチップ内光配線に適用できるほど小型化・低コスト化ができる技術として期待されている。

【研究開発の動向】

集積フォトニクスの主要ターゲットの1つが、光配線・光インターコネクトであり、将来的にはチップ内への導入も期待されている。この光配線の実現に向けた研究開発は国内外で継続的に進められており、シリコンフォトニクス技術を用いた多チャンネル光送受信機や光モジュールなど、各国で多くの取り組みが進んでいる。また、最近の動向として、ニューラルネットワークやニューロモルフィックコンピューティングなどの新たなコンピューティング技術への応用をめざした研究が進められている。集積フォトニクス技術で実現されたこれらの専用プロセッサ（フォトニックアクセラレータ）に関連する研究が欧米を中心に盛り上がっている。国内でもJST-CREST「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術」で光パルスゲートコンピューティングなどの研究が進んでいる。量子情報の分野でも集積フォトニクスの活用が進んでいる。シリコン光回路を用いた光量子状態の生成や量子テレポーテーションの実現など多くの進展がみられ、化合物半導体量子ドットやダイヤモンド色中心を用いた高性能単一光子源や超伝導体単一光子検出器をシリコン/SiNの光回路に集積して量子集積光回路を実現しようとする試みがある。

集積フォトニクスは情報処理分野以外への応用も広がりをみせている。自動運転における測距・センサ技術として重要なLiDAR（Light Detection and Ranging、Laser Imaging Detection and Ranging）については、大規模光集積回路の実現が可能なシリコンフォトニクスを活用した非機械式ビームスキニングによる高精度・小型化・低コスト化の実現が期待されている。ここでは、比較的高パワーなレーザダイオードが必要であるが、人間の目に損傷を与えないアイセーフの観点から、従来の通信波長帯で使用されていた近赤外あるいは中赤外領域の光が適している。集積フォトニクスを活用したオンチップ光コムも注目を集めつつあり、計測や分光のほかマイクロ波フォトニクスへの応用に関する研究が多く報告されている。さらに、オンチップ加速器やオンチップ光ジャイロスコープ、光集積回路を用いた超解像イメージングなど、欧米を中心に集積フォトニクスの新たな応用研究も進んでいる。

超小型化と低消費エネルギー化をめざして、さまざまなナノフォトニクス技術がデバイスに応用され始めている。発光デバイスとしては、ミクロンスケールまたはそれ以下の超小型のレーザがさまざまなシステムで実現されている。フォトニック結晶ナノ共振器構造を用いたレーザでは、極低しきい値での室温連続電流注入発振が達成されている。受光器としては、フォトニック結晶をベースとしたさまざまな超小型受光器が研究されており、プラズモニクスによる光アンテナ効果を利用した小型化も図られている。光変調器、スイッチ関連では、シリコンフォトニクスを中心にさまざまな電気光学変調器が開発されているが、近年プラズモニクス構造をベースとして非線形ポリマーを組み合わせた素子が開発され、性能が飛躍的に向上しつつある。光メモリとしては、微小共振器を用いた双安定レーザ型が欧州で研究され、日本ではフォトニック結晶ナノ共振器を用いた光非線形双安定スイッチ型が研究されている。

シリコンフォトニクスを中心に発展してきた集積フォトニクスの更なる高機能化・高性能化を実現するため、各種光素子をそれぞれに適した材料で実現し集積化する異種材料集積（ハイブリッド集積）技術への注目・期待がこれまで以上に高まっている。基板貼り合わせ技術や転写プリント法などの新たな集積化技術、シリコ

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

ン基板上への直接成長技術など、1つのチップ上へのハイブリッド集積技術が大きく進展している。また、個々のチップを集積化する実装技術においても光ワイヤリングと呼ばれる手法などで進展がみられる。さらに、強誘電体を含むさまざまな材料のシリコン基板へのハイブリッド集積とその光機能実証が報告されるなど、集積フォトニクスの可能性が広がりつつある。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

○光配線・光電子融合

光配線では伝送容量の増加をめざしたシリコンフォトニクス光集積回路の多チャンネル化に関する研究が各国で進んでいる。国内ではPETRA（技術研究組合光電子融合基盤技術研究所）が25 mm²に12チャンネルが集積された300 Gbps光送受信機を実現しており、2020年にはインテルから総バンド幅1.6 Tbpsのシリコンフォトニクス光集積回路が報告されている。また、波長多重技術による大容量化の検討も進んでおり、PETRAは小型16波長多重光回路を実現し、世界に先駆けて1波長あたり32 Gbpsの高速信号伝送に成功している。光電子融合技術については、MITを中心とした米国のグループがポリシリコン層を光学層に用いてバルクCMOSやFinFETとの一括集積が可能なプラットフォームを開発し、CMOS集積WDM光チップの作製と動作実証を報告するなどの進展がみられる。

○光演算技術、不揮発光メモリ

光を用いたアナログ演算、特にニューラルネット演算の研究開発が急速に活発化している。ニューラルネット演算においてもっとも負荷が大きい演算はベクトル行列積演算（積和演算）であるが、光を用いると積和演算を高速、低消費電力に実行できる点がもっとも注目されている。Mach-Zehnder干渉器（MZI）をマトリックス状に集積した回路で任意のユニタリ行列演算ができることが従来から知られていたが、MITのグループは特異値分解を用いてこの回路で任意の行列演算ができることを利用したニューラルネット演算器を提案し、シリコンフォトニクスを用いて作製した集積回路で5入力信号について原理実証している。彼らはこの方式を、Recurrent neural network（RNN）やConvolutional neural network（CNN）に用いることを提案している。Stanford大学のグループは、逆発展による学習も光で行う回路を提案している。この方式では、上述のMZIによるマトリックス回路において各MZIに受光器を配置し、この測定データを用いて光を伝搬させながら学習を行う。

オンチップ光メモリとして最近注目を集めているのが、相変化材料を用いた不揮発性光メモリである。これはGe₂Sb₂Te（GST）を導波路上に装荷した構造で、GSTが結晶相とアモルファス相で大きく異なる光学特性を示すことを利用したものである。2019年には、この構造を活かしたニューロモルフィックコンピューティングの光アクセラレータが報告された。これは、SiN光導波路およびリング共振器からなる光回路であるが、一部にGSTが装荷されており光強度に応じて応答が変化するように工夫されており、4ニューロンの光回路で文字認識などに成功している。

○LiDARとオンチップ光コム

LiDAR応用では、光フェーズドアレイアンテナ方式と日本発のスローライト方式の検討が進んでいる。前者については、3次元集積技術を用いた光フェーズドアレイと駆動CMOSの単一チップ集積と、それを用いたコヒーレントLiDARのデモンストレーションなどの進展がみられる。また、スローライト方式はJST-ACCELプ

プロジェクトで研究開発が進んでおり、フォトニック結晶スローライト導波路を用いて高い解像度で広角なビームスキャンニングが報告されるなど進展をみせている。オンチップ光コムはSiNマイクロリング共振器などにおける非線形光学効果を利用した光コム発生技術である。化合物半導体光増幅器とSiNチップに形成されたループミラーで構成された励起用レーザと、同じSiNチップ上に形成された高Q値リング共振器を用いた乾電池駆動のオンチップ光コムなども報告されており、実応用が近づきつつある。

○シリコンフォトニクス

シリコンフォトニクスによる光トランシーバの開発ターゲットは800 Gbpsに移っている。100 Gbpsをアナログ2値振幅変調で行うことは駆動電子回路の高速化の観点で困難だと予想され、多値変調、波長多重、マルチコアファイバを用いた空間多重、フューモードファイバを用いたモード多重など、いずれかと組み合わせるものと予想される。また、LSIからの電気信号インターフェースとしてQSFP (quad small formfactor pluggable) やon-board opticsを用いる標準化も進められてきており、高速コンピューティングにおける光インターコネクトの重要性が益々重要となってきた。

シリコンフォトニクスにおいて重要課題の1つであるレーザ光源の実装技術に関しては、PETRAが行っているフリップチップ実装が主流となりつつあるが、従来の化合物半導体レーザの貼り合せ技術に代わって、量子ドットをSi上に直接成長する技術が目覚ましく進歩してきており、実用レベルの光出力と閾値が達成されている。また、最近では所定位置にレーザ素子を貼り合わせるトランスファー・プリンティング技術も完成度を増しており、光集積回路への機能デバイスの表面実装技術も今後注目される。

光スイッチの研究開発が活発化している。これは、現在データセンターなどで用いられている電気のパケットスイッチが帯域・遅延時間・消費電力などの観点でシステム全体のボトルネックになりつつあり、その解決手段として光サーキットスイッチに対する期待が高まっているためである。2次元MEMSとシリコン導波路を組み合わせた構成で、従来に比べて約1桁低損失な光スイッチが報告されており、小型・低価格・大規模化を同時に実現できる方式として注目されている。

○量子集積フォトニクス

シリコンフォトニクスを利用した量子光回路が進展している。シリコンモノリシック光集積回路では、オンデマンドで決定論的に単一光子の生成が可能な単一光子源の集積化が困難なため、ハイブリッド集積技術を用いた量子光回路の実現を目指す研究が加速している。化合物半導体量子ドットからなる量子光源を用いたハイブリッド集積量子光回路の研究が欧米を中心に進んでいる。国内では転写プリント法(後述)を用いて量子ドット単一光子源をCMOSファウンドリで作製した光回路に集積する研究などがある。最近の成果として注目されるのは、MITのグループによるAlN光回路にダイヤモンド色中心を用いた単一光子源128チャンネルを集積した量子光回路の報告である。この報告は量子光源の集積にとどまるものであるが、今後量子中継器や量子演算チップへの展開が期待されている。ダイヤモンドを用いた量子情報技術はさまざまな形で進展しており、日本はダイヤモンドに関する高い材料技術を有するものの、その集積化をめざした取り組みでは海外グループが大きくリードしている。

○ナノフォトニクス

メタマテリアルの一種であるメタサーフェスと呼ばれる構造が実用化に向けて研究が加速している。2011年にHarvard大学のCapassoらがサブ波長の光アンテナアレイを用いて、数十nm程度の薄膜を光が通過ま

たは反射する際に任意の波面制御が可能となることを示したのが研究の出発点になり、高効率化、低損失化、多機能化の研究が進んできたが、近年は薄膜レンズとしての研究が活発化している。スマートフォン等の小型携帯機器への適用をめざして、波長収差が補正され広帯域な白色光に対して像を結ぶアクロマティックレンズが開発されつつある。

プラズモニクスによるナノスケールの閉じ込めサイズを持つ導波路にさまざまな機能材料を組み合わせ、電気光学変調器や受光器を実現する研究が加速しており、光電変換器の小型化、超高速化が進展している。変調器としては、スイス連邦工科大学 (ETH) の Leuthold の研究グループでは、MIM (金属・絶縁体・金属) 構造の導波路の 100 nm 程度のギャップに電気光学ポリマーを埋め込み、短尺で超高速の Mach-Zehnder 型電気光学変調器を実現している。その性能は年々向上し、近年は 100 GHz を超える周波数で動作しており、またリング共振器と組み合わせることによって、低ロス化 (挿入損失 2.5 dB) にも成功している。ナノフォトニクス変調器の材料は近年さまざまなものが用いられるようになってきている。薄膜 LiNbO_3 を用いたメンブレ型電気光学変調器は、非常に低い電圧で超高速動作を達成している。また、プラズモニクスに ITO を組み合わせた構成で超小型の電気光学変調器も報告されている。モード体積が立方ナノメートルを下回るピコ共振器が注目されている。金ナノ粒子と金基板の間に形成されるプラズモニック共振器で実現され、室温で単一分子との強結合を実現するなどこれまで難しいと考えられてきた条件下での量子電気力学効果の活用之道を拓いた。最近では遷移金属ダイカルコゲナイドとの組み合わせも報告されるなど展開を見せている。

○トポロジカルフォトリクス、非エルミート光学

「物質におけるトポロジカル理論」(2016年のノーベル物理学賞)の概念が光学の分野に導入され、トポロジカルフォトリクスと呼ばれる研究が活発化している。フォトリック結晶やメタマテリアルなどの人工ナノ構造を用いて、さまざまな興味深いトポロジ的な性質が見つかり、活発な研究が世界中で行われている。当初は理論研究やマイクロ波領域での原理検証実験が主であったが、近年、光学領域における実験実証が急速に進みつつあり、光トポロジカル絶縁体の作製や、光トポロジカル絶縁体のエッジモードによるレーザ発振などが報告されている。また、フォトリック結晶のバンド構造によって生じるトポロジカル特異点が近年注目を集めており、トポロジカル特異点の重ね合わせにより超高 Q 状態を実現する手法や、一方向性の束縛状態の形成等が報告されている。これらの分野では特に中国の研究者の動きが活発である。

トポロジカルフォトリクスと並行して近年活発化しているのは、非エルミート光学と呼ばれる分野である。これは元々、利得と損失がある PT 対称性と呼ばれる対称性をもって配置される場合に、例外点 (Exceptional Point: EP) と呼ばれる状態を境にして、光が複素固有値状態から実固有値状態に転移する現象に興味を持たれて研究が始まったものである。その後、この EP 付近でさまざまな興味深い現象が発現することがわかり、幅広い研究に展開しつつある。まだ、基礎研究の段階であるが、EP 付近でのセンサの感度向上、非対称的なモード変換器、光の軌道角運動量を持ったレーザ発振、屈折率虚部を用いたレーザビームのステアリング技術などの興味深いデバイスが実現されており、今後の研究の進展が期待されている。

○ナノマテリアル

近年グラフェンを中心に、 h-BN 、 MoSe_2 、 MoS_2 、 WSe_2 等の単原子層二次元物質やカーボンナノチューブ、半導体ナノワイヤなどさまざまな新しい性質を持つナノスケール材料をナノフォトニクスと組み合わせデバイス動作させる試みが引き続き増加している。グラフェンに関しては、特に受光器、変調器の研究が進展している。MIM 型のプラズモニック導波路にグラフェンを結合させた構造において、photo-bolometric 効果を用

いて110 GHzの帯域で0.5 A/Wという高い受信感度が報告されている。また、グラフェンの上に絶縁体を挟んで分離電極を設けることにより、プラズモニックな増強効果と同時にPIN接合を形成する構造で、photo-thermoelectric効果を利用して12.2 V/Wという高い外部変換効率も報告されている。電気光学変調器に加えて、最近では位相変調器としての動作も報告されている。また、グラフェンは光非線形材料としても高いポテンシャルを持っており、MIM型導波路にグラフェンを装荷したデバイスにより、光非線形性を利用した全光スイッチが報告されており、超高速（260 fs）かつ低消費エネルギー（35 fJ）での動作が達成されている。

MoSe₂などの遷移金属カルコゲナイドは、大きな光非線形性や励起子効果、強い発光などグラフェンにはない顕著な光学的性質を持つため、デバイス応用をめざした研究が進行している。例えば、Columbia大学のグループによりWS₂を装荷したSiNマイクロリング共振器を用いた電気光学変調器の実現が報告されている。またこれらの物質はVan der Waals結合により多彩な材料を多層化してヘテロ接合を作ることができるため、新しい物性制御の可能性を持つ材料としても注目されている。MoTe₂とグラフェンのヘテロ構造をSi細線導波路上に装荷した光通信波長の受光器が最近実現されており、50 GHzの動作帯域、0.2 A/Wの感度が報告されている。

○強誘電体材料の集積フォトニクス応用

電気光学効果が大きいニオブ酸リチウム（LiNbO₃：LN）の薄膜化技術がここ数年で大きく発展し、集積フォトニクスに応用しようとする試みが進んでいる。光通信の高速光変調器として利用されてきたLNを利用することで、集積フォトニクスにおける変調速度の更なる向上が期待できる。Harvard大学のグループは、CMOSで駆動できる1.4 Vの動作電圧で3 dB帯域45 Gbpsを超える薄膜LN変調器を実現し、CMOS直接駆動による75 Gbpsの信号変調などを実証している。また、中国の研究グループからはシリコン導波路とのハイブリッド集積を実現し、100 Gbpsを超える変調も報告されている。LNのナノ加工技術の発展により高品質なオプトメカニクス結晶の実現も可能になっており、量子情報分野におけるトランスデューサへの展開も期待されている。優れた電気光学特性を有するチタン酸バリウム（BaTiO₃：BTO）薄膜の作製と集積フォトニクス応用に関する研究も欧州で進んでおり、シリコン光導波路をハイブリッド集積した変調器が報告されている。さらに、シリコン基板上に集積されたBTO光変調器において、半導体光変調器では実現が難しい極低温（4 K）高速変調（20 Gbps）動作も報告されており、量子集積フォトニクスへの応用も期待されている。

○ハイブリッド集積技術

ハイブリッド実装およびハイブリッド集積に関する研究はこれまでもその重要性は認識されてきたが、モノリシック集積の限界を打破し集積フォトニクスの可能性をさらに広げるため、その重要性がますます高まっている。フリップチップ実装など個々のチップを集積・実装する技術はすでに広く利用されているが、最近の話題として光硬化で形成したポリマー導波路を用いたチップ間の光接合技術（光ワイヤリング）の進展があげられる。隣接して配置された半導体レーザアレイとシリコン導波路チップの接続、シリコン導波路から光ファイバへの接続が0.4～0.7 dB程度の損失で実現されている。

基板貼り合わせ技術は、シリコン基板上に大面積一括で化合物半導体薄膜などの異種材料を接合できる技術であり、広く利用されている。国内では東京工業大学のグループなどで光集積をめざした貼り合わせ技術の研究が進んでいる。また、NTTグループは、InP系薄膜の貼り合わせと再成長技術を用いてメンブレンレーザの研究を進めている。最近ではエバネッセント結合によりレーザ出力のシリコン導波路への結合にも成功し、集積フォトニクスの光源技術の1つとして注目されている。さらに、この技術を適用できる材料系が拡大して

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

おり、高速光変調器への応用が可能な強誘電体や、オンチップ光非線形素子への応用をめざしたGaPのシリコン基板上への貼り合わせなどが報告されている。

転写プリント法は、デバイス加工を施した後に光回路上に集積することができる技術である。集積化したい光素子にゴムを押しつけ急速に引き剥がすことで素子をピックアップする。その後、光回路上の所望の場所に配置し、ゆっくりとゴムを引き剥がすことで光素子が光回路上に集積される。一連の作業は光学顕微鏡下で行われるが、研究室レベルではかなり高精度（位置合わせ誤差100 nm以下）が実現されており、本手法を用いたシリコン光回路への化合物半導体光素子や量子光源の集積が報告されている。個々のデバイスを集積する技術としてマイクロプローブを用いた手法も知られており、ダイヤモンド量子光回路をはじめ量子フォトリニクス分野を中心に利用されている。これらの手法は、スループット向上の課題があるが、材料を選ばない集積技術であるとともに、良質なデバイスを選別し導入することができるのが魅力である。

シリコン基板上への化合物半導体の直接成長に関する研究の歴史は長い。シリコンでは実現が困難な高効率光源をシリコン基板上に直接形成できる魅力は大きい。近年、応用上重要な温度安定性や反射光耐性に優れた量子ドットレーザをシリコン基板上に直接形成する技術が大きく進展しており、米国、欧州、中国、国内では東京大学のグループからシリコン上直接成長による量子ドットレーザの発振が報告されている。UCSBのグループからは、Si基板上への直接成長で形成した受動モードロック量子ドットレーザとそれを用いたテラビット超の伝送容量実験などが報告されている。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

米国では、集積フォトニクスに関して2015年に始まったAIM Photonics (American Institute for Manufacturing Integrated Photonics) での取り組みに加え、2017年からはデータセンターのエネルギー効率化をめざすENLITENED (ENergy-efficient Light-wave Integrated Technology Enabling Networks that Enhance Dataprocessing) プログラムがスタートしている。また DARPAのもとで2019年からパッケージ総バンド幅100Tbps、エネルギーコスト1 pJ/bitをめざすPIPES (Photonics in the Package for Extreme Scalability)、2020年からLUMOS (Lasers for Universal Microscale Optical Systems) などの大型プロジェクトが続々と立ち上がっている。LUMOSはシリコンなどの光集積回路に光利得を有する化合物半導体を集積するハイブリッド集積をめざすもので、集積ハイパワーレーザや可視域への応用も視野に計画されている。量子集積フォトニクスやダイヤモンド量子フォトリニクスについてはNSF、EFRI、ACQUIREプログラムやMITRE Quantum Moonshotプログラムなどの支援の下で活発な研究活動が行われており、世界をリードしている。

欧州ではHorizon 2020のなかで、集積フォトニクスに関するプロジェクトが多く進行している。シリコンフォトニクスを含む光エレクトロニクス関連のプロジェクトは、2015～2020年の間で42.4 Mユーロで12プロジェクトが登録されており、STMicroelectronicsをファブとして利用して、伝送容量2 Tbps、消費電力2 mW/Gbps、コスト0.2 ユーロ/Gbpsが目標値となっている。ハイブリッド集積に係るプロジェクトとして、Southampton大学などを中心にIII-V半導体のSOI基板への集積や量子ドットレーザの直接成長技術を対象としたPICTURE (Photonic Integrated Circuits using a Thin and UnifoRm Bonding LayEr) プロジェクトが2020年末まで予定されている。また、2019年には、転写プリント法を用いた異種材料集積・光電集積により高速光トランシーバの実現をめざすCALADANプロジェクトがIMECやGent大学(ともにベルギー)などが参加してスタートした。このプロジェクトではコスト目標0.1 ユーロ/Gbpsが掲げられている。その他、S2QUIP (Scalable Two-Dimensional Quantum Integrated Photonics) など、量子集積フォトニクス

に関するプロジェクトも進行中である。

日本においては、2022年3月まで技術組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）をベースに、総バンド幅10 Tbpsを目標としたNEDOプロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス」が進行中である。2017年には同技術をベースにして光トランシーバの製造、販売を司る会社（アイオーコア）が設立されている。また、2019年度からNEDO先導研究プログラムで「異種材料集積による10テラビット級低消費電力光伝送デバイス技術開発」が開始されている。さらに、2020年度にはJST未来社会創造事業大規模プロジェクト型「トリリオンセンサ時代の超高度情報処理を実現する革新的デバイス技術」の公募が行われて「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成」が採択され、新たな展開が開始されると期待される。

（5）科学技術的課題

当面、シリコンフォトリクスにとってもっとも重要な適用領域は光インターコネクトであり、この領域で重要な主な指標は、高帯域密度（単位例：Tbps/cm²、Tbps/cm）、低消費電力（単位例：mW/Gbps、pJ/bit）、低コスト（単位例：ドル/Gbps）の3つである。高帯域密度化のためには、高速化と高密度化が必要であり、前者は前記の400 Gbps実現に向けた取り組みが行われているが、後者は特に光トランシーバに接続する光ファイバのピッチによって制限されていることが多く、この部分の研究開発を加速する必要がある。消費電力は主にLSIと光変調器/受光器間の電気配線の静電容量と電圧振幅で決まるため、低消費電力化の鍵は、この電気配線を短縮する実装構造・方法を電子デバイスの実装構造・方法と整合させることにある。低コスト化のためには、シリコンフォトリクス製品のエコシステムを既存のエレクトロニクスのエコシステムに整合させる必要がある。前述の米国のAIM Photonicsは、これをめざした動きである。

ナノフォトリクス分野全体でみると、引き続き新奇な現象や従来の常識を打ち破るような特性が達成され続けており、アカデミックな成果は出続けていくものと思われる。一方、ナノフォトリクスの根幹を支えるナノ加工技術に関しては、依然、研究室レベルの技術に頼るところが多い。今後は大規模集積化と大量生産が可能なナノフォトリクス作製技術の開発が重要なポイントになる。シリコンフォトリクスのなかにどれほどナノフォトリクスに関連した作製技術を導入できるか、または、既存のシリコンフォトリクス技術で作製可能なナノフォトリクス構造の範囲を広げていくかが鍵となると思われる。

集積フォトリクスでは、高性能光素子を実現する物理と高度な加工・プロセス技術、それらの特性を劣化させることなく大規模集積化する技術が必要である。単体素子で高性能な素子も集積化には適さないことも少なくない。デバイス開発においても性能の追求とともに集積化を意識した研究開発が今後重要になってくる。集積化技術においては、プロセス整合性やスループット、更には歩留まりやコストも考慮して、個々のデバイス性能を最大限に引き出す技術の開発が求められる。特に光子1つひとつを扱う量子集積光回路では、個々のデバイスに極限的性能が求められるため、古典光を用いる集積フォトリクス以上に高度な技術開発や新たな発想が求められることが予想される。また、一般に集積化技術は既存デバイスに対応して技術開発が行われるが、集積フォトリクスのパラダイムシフトをもたらすようなデバイスや材料の革新に対して柔軟に対応できる手法の開発も期待される。その観点から、研究開発が活発となっているハイブリッド集積技術の更なる高度化に対する期待は大きい。一方、量子応用を含む集積光回路の一層の高機能化・高性能化をめざし、今後はナノフォトリクスデバイスの導入も進むことが予想される。そのため、シリコンフォトリクス作製技術を含め加工技術の一層の微細化・高精度化も重要になると考えられる。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

(6) その他の課題

シリコンフォトニクスを試作に関して、EUにはEuropractice (IMEC, Leti, IHP) やSTMicroelectronics、米国にはAIM Photonicsのファウンドリ (シャトル) サービスがある。また、シンガポールの科学技術庁がIME (Institute of microelectoronics) のシリコンフォトニクス部門を法人化することを決定し、少量・多品種生産ができるアドバンスド・マイクロ・ファウンドリ (AMF) が発足した。日本では産総研を主体としたシリコンフォトニクス・コンソーシアムがシャトルサービスを開始し、産総研のスーパークリーンルームでウェハ・プロセスが行える体制が構築されている。独自ファブを持たない日本の大学・企業は個別にシンガポールのIMEを利用することが多かったが、研究開発としては産総研のシリコンフォトニクス・コンソーシアムのシャトルサービスを利用する動きや、また商用としてはジャパンセミコンダクター (JSC) を生産ファブとして利用する動きも出てきている。このようなファブは世界中の人、金、技術、情報等が集まるハブとして機能を持つため、ファブを国内に持つことは、シリコンフォトニクスに限らず、ナノフォトニクス、さらにはナノテク全般で国の競争力を強化するために重要になると考えられる。このような共同利用の仕組みを構築し、持続可能な形で運営していくには、少なくともファブの維持費をまかなえる程度の多数の参加者を国内外の多様な分野から集める必要があり、そのためには継続的な国・学会・業界等のリーダーシップが求められる。

集積フォトニクスやナノフォトニクスの研究には高度な技術が要求されるため、研究者や企業にとって新たに参入することは必ずしも容易ではない。産総研でのMWP (Multi Project Wafer) 試作が利用できるようになったことは、今後の国内関係研究の活性化に大きく貢献すると期待できる。一方、今後重要となる化合物半導体の加工・集積についても同様な取り組みが実施されることが望まれる。企業が請け負うことも考えられるが、設備投資や運転経費などを考えると、国の施策としての検討も必要と考えられる。集積フォトニクスはさまざまな技術が必要とされる領域融合研究であり、異なった分野を専門とする研究者間の共同研究が本質的に重要である。異分野の研究者間の連携・融合をより強力に推し進めるための、大型プロジェクトやその他の枠組みの積極的な活用が望まれる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・ 東大、東工大、NTTなどでハイブリッド集積技術の研究が進んでいる。また、JST-CRESTではNTTの光パスゲートコンピューティングなど、フォトニクスを活用した新たな光情報処理技術の研究が複数進行している。 ・ オンチップ光コムの研究は国内では慶大が孤軍奮闘状態。 ・ ダイヤモンドを用いた量子情報技術、量子センサ技術に関する研究は、東工大、横国大、慶大、京大、阪大などで進んでいるが、その集積化研究は未着手。
	応用研究・開発	○	→	・ NEDOプロジェクトで開発された「光 I/O コア」を用いたオンボード光モジュールやAOCなどが開発されている。また、産総研でもMPWサービスが始まり国内研究機関や企業で活用され始めている。 ・ 複数企業が参加するNEDO先導研究プログラムにおいて、ハイブリッド集積技術の開発とその低消費電力高速光伝送デバイス技術への応用をめざした取り組みが開始されている。 ・ JST-ACCELではスローライトを利用したオンチップLiDARの研究開発も進んでいる。

米国	基礎研究	◎	→	・シリコンフォトンクスでは、MIT、UCSB等の大学を中心に幅広い研究が行われており、世界をリードしている。 ・ナノフォトンクスの基礎研究に関しては、MIT、Stanford大などに各分野において世界をリードする研究者がおり、活発な研究を行っている。 ・多くの大学、研究機関で集積フォトンクス関連の研究が活発に行われている。大規模光回路関連ではMITが強力。UCSBは量子ドットレーザ直接成長技術で顕著な業績を挙げている。 ・量子集積フォトンクスでは、MIT、Harvard大、Maryland大、NISTなどが中心となっている。
	応用研究・開発	◎	→	・AIM Photonicsの設立に続いて、多くの関連プロジェクトが始動している。 ・2020年に入ってからIntelやIBMから最新の成果が発表されるなど、企業の研究が堅調。 ・Harvard大の薄膜LN技術を基礎にスタートアップ会社が設立された。 ・集積フォトンクスを利用したニューラルネットワークに関するスタートアップ会社からは光AIチップのプロトタイプが発表されている。
欧州	基礎研究	◎	→	・フォトンクス全般で基礎研究が着実に進められている。 ・集積フォトンクスでは、Southampton大、Bristol大（英）、Gent大、IMEC（ベルギー）、KIT（独）、Leti（仏）などが、量子集積フォトンクスについては、Bristol大（英）、KTH（スウェーデン）、Copenhagen大（デンマーク）、CNRS（仏）、Würzburg大（独）などが中心。 ・オンチップ光コム分野ではEPFL（スイス）が世界をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↗	・集積フォトンクスに関係する多くの研究プロジェクトが走っており活発である。 ・IMECは欧州のナノフォトンクスを支えるファウンドリとして重要な役割を果たしている。 ・ごく最近IMECと英国・CST globalの連携が発表されるなど、特にハイブリッド光集積分野での応用研究・開発が進んでいる。 ・IBMチューリッヒでも光メモリを用いたインメモリコンピューティングなどの研究が進んでいる。
中国	基礎研究	○	↗	・ナノフォトンクスなどの分野では、欧米からの帰国組を中心に多くの発表があり、存在感を高めている。 ・薄膜LN技術などの注目に値する成果もある一方、集積化技術、集積フォトンクスという点では目立った成果は多くはない。 ・量子情報技術・量子集積フォトンクスについては、中国科学技術大学や北京大学などのグループが世界レベルで活躍している。 ・拠点大学には最先端の加工技術装置が導入されており、作製技術も急速に立ち上がりつつある。 ・近年、遷移金属カルコゲナドを用いたナノフォトンクスや、トポロジカルフォトンクスなどの新しい分野に、優秀な研究者が多数参入し、国から潤沢な資金を受けて顕著な研究成果を上げつつあり、成長が著しい。
	応用研究・開発	○	→	・HuaweiやHiSiliconなどでシリコンフォトンクスチップの研究開発が行われており、今後大きく進展する可能性がある。 ・HiSiliconからはシリコンフォトンクスチップを用いた量子鍵配送に関する発表もあり、量子技術への進出も予想される。 ・SMICにシリコンフォトンクス用の製造ラインを構築中。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

韓国	基礎研究	△	→	・ソウル大学、KAIST、KISTや延世大学などでナノフォトニクス、シリコンフォトニクスやトポロジカルフォトニクスの基礎研究が行われているが、集積化技術、集積フォトニクスという点での顕著な動向は見られない。
	応用研究・開発	△	→	・Samsungでシリコンフォトニクスやハイブリッド集積の研究活動が進んでいるが、学会や論文での発表は少ない。一方、集積光回路や光送受信機など関連技術に関する特許は積極的に申請されている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

- 1) K. Kitayama et al., "Novel frontier of photonics for data processing-Photonic accelerator", *APL Photon.* 4, no. 9 (2019) : 090901. doi : 10.1063/1.5108912
- 2) A. W. Elshaari et al., "Hybrid integrated quantum photonic circuits", *Nat. Photonics* 14, no.5 (2020) : 285-298. doi : <https://doi.org/10.1038/s41566-020-0609-x>
- 3) A. L. Gaeta, M. Lipson and T. J. Kippenberg, "Photonic-chip-based frequency combs", *Nat. Photon.* 13, no. 3 (2019) : 158-169 . doi : 10.1126/science.aad4811
- 4) P. P. Khial, A. D. White and A. Hajimiri, "A Nanophotonic optical gyroscope with reciprocal sensitivity enhancement", *Nat. Photonics* 12, no. 11 (2018) : 671-675. doi : <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0266-5>
- 5) S. Fatholouloum et al., "1.6Tbps Silicon Photonics Integrated Circuit for Co-Packaged Optical-IO Switch Applications", *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020* (2020) : T3H.1. doi : <https://doi.org/10.1364/OFC.2020.T3H.1>
- 6) S. -H. Jeong et al., "Polarization Diversified 16 λ Demultiplexer Based on Silicon Wire Delayed Interferometers and Arrayed Waveguide Gratings", *J. Light. Technol.* 38, no. 9 (2020) : 2680-2687. doi : 10.1109/JLT.2020.2969240
- 7) P. Bhargava et al., "Fully Integrated Coherent LiDAR in 3D-Integrated Silicon Photonics/65nm CMOS", *2019 Symposium on VLSI Circuits* (2019) : C21-5. doi : 10.23919/VLSIC.2019.8778154
- 8) M. Blaiche et al., "Hybrid multi-chip assembly of optical communication engines by in situ 3D nano-lithography", *Light Sci. Appl.* 9, no. 1 (2020) : 71-81. doi : 10.1038/s41377-020-0272-5
- 9) S. Liu et al., "High-channel-count 20 GHz passively mode-locked quantum dot laser directly grown on Si with 4.1 Tbit/s transmission capacity", *Optica* 6, no. 2 : 128-134. doi : <https://doi.org/10.1364/OPTICA.6.2.0128>

doi.org/10.1364/OPTICA.6.000128

- 10) C. Wang et al., “Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages”, *Nature* 562, no. 7725 (2018) : 101-104. doi : 10.1038/s41586-018-0551-y
- 11) K. Takeda et al., “Few-fj/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photonic-crystal lasers”, *Nature Photonics* 7, no. 7 (2013) : 569-575. doi : 10.1038/nphoton.2013.110
- 12) M. W. Knight et al., “Photodetection with Active Optical Antennas”, *Science* 332, no. 6030 (2012) : 702-704. doi : 10.1126/science.1203056
- 13) A. Melikyan et al., “High-speed plasmonic phase modulators”, *Nature Photonics* 8, no. 3 (2014) : 229-233. doi : <https://hdl.handle.net/1854/LU-4367368>
- 14) E. Kuramochi et al., “Large-scale integration of wavelength-addressable all-optical memories on a photonic crystal chip”, *Nature Photonics* 8, no. 6 (2014) : 474-481. doi : 10.1038/nphoton.2014.93
- 15) Y. Shen et al., “Deep learning with coherent nanophotonics circuits”, *Nature Photonics* 11, no. 93 (2017) : 441-446. doi : 10.1038/nphoton.2017.93
- 16) T. W. Hughes et al., “Training of photonic neural networks through in-situ backward propagation and gradient measurement”, *Optica* 5, no. 7 (2018) : 864-871. doi : <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000864>
- 17) M. Takenaka et al., “High-efficiency, low-loss optical phase modulator based on III-V/Si hybrid MOS capacitor”, *Optical Fiber Communication Conference (OFC2018)* , (2018) : Tu3K.3. doi : <https://doi.org/10.1364/OFC.2018.Tu3K.3>
- 18) Shuming Wang et al., “Broadband achromatic optical metasurface devices”, *Nature Communications* 8, no. 1 (2017) : 187. doi : 10.1038/s41467-017-00166-7
- 19) C. Haffner et al., “Low-loss plasmon-assisted electro-optic modulator”, *Nature* 556, no. 7702 (2018) : 483-486. doi : 10.1038/s41586-018-0031-4
- 20) S. Barik et al., “A topological quantum optics interface”, *Science* 359, no. 6376 (2018) : 666-668. doi : 10.1126/science.aag0327
- 21) S. K. Ozdemir et al., “Parity-time symmetry and exceptional points in photonics”, *Nature Materials* 18, no. 8 (2019) : 783-798. doi : 10.1038/s41563-019-0304-9
- 22) M. Ono et al., “Ultrafast and energy-efficient all-optical switching with graphene-loaded deep-subwavelength plasmonic waveguides”, *Nature Photonics* 14, no. 1 (2020) : 37-43. doi : 10.1038/s41566-019-0547-7
- 23) I. Datta et al., “Low-loss composite photonic platform based on 2D semiconductor monolayers”, *Nature Photonics* 14, no. 4 (2020) : 256-262. doi : 10.1038/s41566-020-0590-4

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

2.3.3 スピントロニクス

（1）研究開発領域の定義

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実現をめざす研究開発領域である。ハードディスクの大容量化や省電力化、不揮発性メモリの実現など、私たちの生活の中ですでに使われている技術もあるなか、デバイスの高機能化・省電力化に向けた研究開発が進められている。最近では、熱スピン流に基づいた熱電変換をめざすスピンカ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、さらには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。

（2）キーワード

スピン流、スピントルク、スピン軌道相互作用、スピンホール効果、スピンゼーベック効果、不揮発性メモリ、電圧トルク、トポロジカル物質、量子状態制御、スピンカロリトロニクス、スピンメカニクス

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

電子は電荷とスピンの2つの自由度を持つことがよく知られている。従来、研究分野として電荷を主に扱う「電子工学」とスピンを主に扱う「磁気工学」の2つに分かれて発展してきたが、1990年代以降のナノテクノロジーの発展により、電子の電荷とスピンを効果的に結びつけて利用する学理体系の構築が始まり、スピントロニクスと呼ばれる研究領域の誕生へとつながった。なかでも強磁性金属とその多層膜をベースとした分野がもっとも応用研究が進展しており、すでにハードディスクの磁気ヘッドとして広く普及し、記録密度の大容量化に貢献している。さらに、スピン流を用いることで、従来の電子素子が抱えていたジュール熱によるエネルギー損失の問題の解決にもつながり、電子機器類の小型化・高性能化、画期的な省エネデバイス開発や量子効果の制御への寄与等が期待できる。

〔研究開発の動向〕

スピントロニクスの歴史は、1857年のW. Thomsonの磁気抵抗効果の発見にさかのぼる。当時は磁気抵抗効果の大きさを表すMR比が低く、実用化にはほど遠い状況であった。1988年のA. FertおよびP. Grünbergらによる巨大磁気抵抗（Giant Magneto Resistance：GMR）効果の発見をきっかけに、GMR効果を利用したデバイス開発が世界中で進められ、1997年にGMRヘッドとして実用化された。その間、1995年に宮崎照宣とJ. S. Mooderaがそれぞれ室温における大きなトンネル磁気抵抗（Tunnel Magneto Resistance：TMR）効果を報告した。TMR効果は電子がトンネルできる程度の薄い絶縁体層を強磁性層で挟んだときに、2つの強磁性層の磁化の相対的な方向によってトンネル抵抗が変化する効果である。TMR効果についてはGMR効果発見以前から研究が行われていたが、室温における高いMR比は報告されていなかった。GMR効果のMR比が5～15％程度であることに対して、TMR効果は20～70％と格段に高いことから、2004年に超高記録密度用TMRヘッドとして実用化された。さらに、S. S. P. Parkinと湯浅新治が開発したMgOを絶縁層とするTMR素子では100％を超えるMR比が得られ不揮発性固体メモリ（Magnetoresistive Random Access Memory：MRAM）の実現にもつながっている。

1990年代には、磁化が電気伝導に与える影響が研究の中心で、かつ金属系と半導体系の2つの流れがあったが、2000年頃からは電気伝導が磁化に与える影響に興味が持たれるようになり、スピン注入磁化反転や電流による磁壁駆動、スピンホール効果などの研究が精力的に行われるようになった。さらに、TMRやスピン注入、スピンホール効果などが、既存の材料の分類である金属・半導体・絶縁体の枠を超えて観測されており、スピン流の概念で解釈されている。スピン流とは、電子のスピン角運動量の流れであり、実験的に電流と分離して生成・検出することが可能である。スピン流は、電気的には絶縁性を示す物質であってもスピン波（マグノン）として生じるもので、スピントロニクスにおける基本的な概念の1つである。また、磁気と電気の変換（スピンホール効果、逆スピンホール効果）、磁気と熱の変換（スピンゼーベック効果、スピンペルチェ効果）など、磁気とほかの物理量との変換の基礎にもなっている。さらに、近年では音や振動といった機械運動とスピン流との変換も発見されている。熱にかかわる分野をスピнкаロリトロニクス、力学的運動にかかわる分野をスピンメカニクスと呼ぶこともある。これらの変換にはスピン軌道相互作用が大きな役割を果たしているが、界面における結晶対称性の破れがその根底にある。スピン軌道トルク（Spin Orbit Torque : SOT）による磁化反転はその例である。

2000年代初頭に発見されたトポロジカル物質と呼ばれる、物質が持つトポロジーによって特徴づけられる新しい物質群においてもスピン軌道相互作用が大きく影響しており、ごく最近ではトポロジカル物質であるワイル磁性体やトポロジカル絶縁体をスピントロニクスへ応用するトポロジカルスピントロニクスと呼ばれる分野も形成されつつある。

（4）注目動向

【新展開・技術トピックス】

・スピン軌道トルクMRAM

スピンホール効果あるいはスピン軌道相互作用によるラッシュバトルクを用いることで、現在実用化が進むSTT-MRAMに比べて高効率のMRAMが作れることが期待されている。原理的に3端子であるため書き込みラインと読み出しラインを分離できるという回路上の利点もある一方で、素子サイズが大きくなるという問題も抱えている。近年、その高速性、高信頼性を生かしたSRAM置き換えの研究開発が進んでいる。MRAMによりキャッシュを不揮発にすることで携帯端末などの省エネルギー化も期待されている。

・電圧駆動MRAM

現在、実用化が進んでいるSTT-MRAMやスピン軌道トルクを用いるSOT-MRAMは電流が作る磁界を書き込みに使う場合に比べて非常に低消費電力となるものの、電流を用いてスピン流を発生するためにジュール熱によるエネルギー散逸を伴う。一方、電圧電界誘起磁気異方性変化によるトルク（電圧トルク）を書き込みに用いる新しい不揮発性メモリ「電圧駆動MRAM」は、電流をほとんど流さずに電圧のみで書き込むため、理論的にはさらに2桁程度小さなエネルギーでの書き込みが可能となる。近年、電圧パルスによる高速双方向磁気書き込みが実験的に示されたこと、 10^{-7} 台のエラーレートが実証されたことで、実用化の可能性が高まっている。その他にも電圧による磁気異方性変化自体を大きくする必要があるが、最近、FeIr系などで従来の10倍以上の電圧効果が見出され実用化に着実に近づいている。

・電圧駆動スピントロニクスメモリ（Voltage Control Spintronics Memory : VoCSM）

2016年に提案されたスピン軌道トルクと電圧による磁気異方性変化を同時に利用することにより低電力化と高集積度を同時に満たすことをめざしたMRAMの新しいアーキテクチャである。1つの重金属ワイヤの上に複数の磁気トンネル接合を作ることが特徴で、このうち電圧をかけたもののみを低消費電力で書き換えるこ

とが可能になる。

• 高感度磁場センサ

トンネル磁気抵抗素子およびマグネットインピーダンスセンサ (MI センサ) を用いた心磁計、脳磁計の研究が進んでいる。すでに、心磁・脳磁の信号測定に成功しており今後の実用化が期待される。

• スピンMOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)

スピンMOSFETは、電力増幅作用を持ち、出力電流やトランスコンダクタンスを磁化状態によって操作でき、不揮発で、既存のSi集積回路で蓄積された微細加工技術や回路設計技術などの資産を使うことができるという特徴を持つ。原理的にはCMOS回路構成も可能である。スピンMOSFETからなる論理回路は、素子数の少なさと不揮発性により低消費電力動作が期待できる。まだ理想的な出力特性を得るにはいたっていないものの、これまでいくつかの試作と原理的な動作実証の研究が行われている。このような再構成可能な論理回路や不揮発性論理回路の実現は、今後のスピントロニクスにおける重要な目標になると考えられている。

• Siへのスピン注入、輸送、検出とスピンMOSFETの試作

大阪大学-TDKグループは、スピンMOSFETの作製とその動作実証を試み室温でスピンMOSFETを動作させたと報告した。ゲート電圧によるドレイン電流の変調はある程度できているが、スピン注入と検出による磁気抵抗比は0.01~0.04%程度と非常に小さいものであった。最近、東京大学グループは、GaMnAs/GaAs/GaMnAsからなる強磁性半導体ヘテロ接合を用いた縦型FETにサイドゲートを付けた独特のトランジスタ構造を作製し、低温ではあるがスピンMOSFETの動作と大きな磁気抵抗比60%の達成に成功した。また、東工大-NIMS-東大グループは、既存のTMR素子とMOSFETを組み合わせるという手法により、擬似スピンMOSFETの作製と良好な特性の室温動作を示した。

• マグノニクスと脳型コンピューティング

スピン波やマグノンキャリアとするデバイスの実現をめざす、マグノニクスと呼ばれる研究領域も誕生しており、ドイツや日本を中心に進展している。例えば、スピン波スピン流を用いた論理ゲートが提案され、動作実証が報告されている。スピン波は室温でも十分に干渉効果を得ることが可能であるため、これを利用することでデバイス構造を簡易化可能であることが指摘されている。また、スピン波やスピントルク発振の非線形性を利用して脳型コンピューティングを行おうという動きもある。スピントルク発振器とディレイラインを用いてリザバーコンピューティングの実証が行われ注目を集めている。また、スピントルク発振器はHDDのさらなる記録密度向上のためのマイクロ波アシスト磁気記録 (Microwave Assisted Magnetic Recording: MAMR) 用の発振器としても期待されている。この他、磁性ドット間の双極子相互作用を利用した脳型計算のシミュレーションが発表されるなど近年急激に研究開発が活発になっている。

• トポロジカルスピントロニクス

トポロジカル絶縁体表面のスピン流やトポロジカル反強磁性体の仮想磁場などのトポロジに起因する特性を利用することにより、素子の高密度化や高速動作、高効率なスピン流・電流変換もしくは熱電変換の実現など、新材料・新デバイス開発をめざした新しいスピントロニクス技術として期待されている。特に近年、ワイル反強磁性体であるMn₃SnやMn₃Geなどにおいて、反強磁性体では発現しないと考えられてきた異常ホール効果、異常ネルンスト効果、磁気光学効果などが、電子構造のトポロジを起源として出現することが東大物性研グループにより報告され、反強磁性体を用いたスピントロニクスに新しい方向性を切り拓きつつある。また、実空間でトポロジに保護された磁気構造であるスキルミオンに関しても、レーストラックメモリ活用に向けた研究が進められている。

• スピンゼーベック・異常ネルンスト効果を含む垂直熱発電

従来型の熱電変換は熱流と電流が平行であったため、性能に限界があった。これに対しスピンゼーベック効果、異常ネルンスト効果は熱流と電流が垂直方向であるため、非常にシンプルな構造で高い変換効率值得期待される。理論上の上限であるカルノー効率に達することが原理的には可能であると示された。最近の垂直熱発電の出力密度は $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$ に達しており、あと1桁向上すればBiTe系の従来型熱電素子を超えるところまで達している。

• 超伝導トポロジカル量子整流

第二種超伝導体MoGeを、磁性絶縁体 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 基板に成膜した試料において、試料の温度を一定に保ちながらこの薄膜試料の面内方向にある特定の強度の磁場を印加すると、外部からの入力がないにもかかわらずMoGeの面内方向に直流電圧が発生した。この直流電圧は、電磁ノイズのある測定環境では一日中安定して観測され続けた。この直流電圧はMoGeがいわゆる渦糸液体相にあるときに生じており、磁性体界面と開放側界面における渦糸のアンバランスが整流機能を生じたと考えられる。温度差ではなく環境のゆらぎを検出しており、低温動作ながらも非常に感度の高い整流素子であり、ノイズ評価や微弱信号の検出に利用できる可能性がある。

• フレキシブルスピントロニクス

磁気抵抗素子をフレキシブル基板上に製膜することにより磁歪効果を用いたベクトル型のひずみセンサとなることが示された。今後、ゼロエネルギー消費のデータロガー付きセンサとなる可能性があり注目されている。

• 量産化へ向けた動き

米GlobalFoundries、米Everspin Technologies、米Intel、韓国Samsung Electronics、台湾TSMCなどの大手ファウンドリや半導体メーカーが軒並み、混載用MRAM (eMRAM) やSTT-MRAMの個別部品を300mmウェハで量産済み、もしくは量産準備が整ったとしている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

スピントロニクスは基礎研究から応用研究まで多くの先駆的研究が日本から生まれてきた研究領域である。わが国においては、JSPS科研費特定領域研究「スピン流の創出と制御」(領域代表者：高梨弘毅、2007～2010年度)やJST戦略的創造研究推進事業(さががけ)「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス(略称：次世代デバイス)」領域(研究総括：佐藤勝昭、2007～2013年度)において、スピン流物理に関する基盤が構築された。特に特定領域「スピン流の創出と制御」からは、巨大スピンホール効果やスピンゼーベック効果の発見、スピン起電力の実証等、スピン流の学術的基盤に関して非常に高水準な研究成果が多数報告されたことが高く評価されている。また、さががけ「次世代デバイス」においても、磁性誘電体中のスピン流を利用した電気信号の伝達、グラフェンを介したスピン流の制御など、スピントロニクスの発展に寄与する多くの成果が生まれている。その後、スピンの角運動量変換を介して固体中の巨視的物理量が別の物理量に変換されるスピン変換物性の学理追求、物質界面のナノスケール制御による磁氣的、電氣的、光学的、熱的、機械力学的なスピン変換機能の開拓をめざすJSPS科研費新学術領域「ナノスピン変換科学」(領域代表者：大谷義近、2014～2018年度)が発足した。また、内閣府革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現」(PM：佐橋政司、2014～2018年度)では、AI/IoT時代における低消費電力化への要請に応えるため、電圧で磁気メモリに情報記録する究極の不揮発性メモリや省電力スピントロニクス論理集積回路などのコンピュータにおける各メモリ/ストレージ階層の省電力を極めることに挑戦した。また、JST戦略的創造研究推進事業におけるCREST「トポロジカル材料科学に基づく

く革新的機能を有する材料・デバイスの創出」(研究総括: 上田正仁、2018～2025年度) およびさがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」(研究総括: 村上修一、2018～2023年度) においても、ワイル磁性体やスキルミオンなどのトポロジカル物質をスピントロニクスに応用したトポロジカルスピントロニクスに関する研究が推進されている。さらに、2020年から開始となったCREST「情報担体を活用した集積デバイス・システム」(研究総括: 平本俊郎、2020～2027年度) およびさがけ「情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム」(研究総括: 若林整、2020～2025年度) においてもスピントロニクスは重要な分野の1つとして取り上げられている。加えて、JST未来社会創造事業大規模プロジェクト型・技術テーマ「トリリオンセンサ時代の超高速情報処理を実現する革新的デバイス技術」においては、「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成」(研究開発代表者: 中辻知、2020年度～) が採択され、スピントロニクスとフォトリソニクスを融合した革新的情報処理ハードウェア技術開発が推進されている。

また、日本学術会議「マスタープラン2014」重点大型計画および文部科学省「学術研究の大型プロジェクト-ロードマップ2014」においてスピントロニクスが重点課題の1つとして取り上げられた。これを受けて「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク」拠点の整備が始まりスピントロニクス学術連携研究教育センターを拠点大学(東京大学、東北大学、大阪大学、慶應義塾大学)に設置し、主要大学、国研、関連企業をはじめとする国内有力研究機関を結ぶネットワークを形成している。スピントロニクスは日本学術会議「マスタープラン2020」重点大型計画および文部科学省「学術研究の大型プロジェクト-ロードマップ2020」にも採択され、新しく京都大学を拠点に加えた整備を開始する。しかし、上記のマスタープラン・ロードマップは直接の予算措置を伴うものではなく、将来的には予算措置を含む国の施策が求められる。

米国においては、NSF、DOE、DODなどの支援の下、スピントロニクス関連の研究プロジェクトが多数存在し、基礎研究から応用研究まで幅広く実施されている。なかでも、DOEのエネルギーフロンティア研究センター(Energy Frontier Research Centers: EFRCs)の1つであるSpins and Heat in Nanoscale Electronic Systems (SHINE、2014～2020年)では、伝導電子スピン流とマグノン流を制御するナノ電子システムを構築することを目的とし、カリフォルニア大学リバーサイド校を中核に米国におけるスピントロニクスに関係する機関(ほかにはジョーンズ・ホプキンス大学、カリフォルニア大学ロサンゼルス校、テキサス大学オースチン校)が参画している。また、同じくEFRCの1つであるInstitute for Quantum Matter (IQM、2018～2022年)においては、量子もつれやコヒーレンスなどの量子効果が巨視的に発現する新しい量子物質や物性を開拓することを目的としている。ジョーンズ・ホプキンス大学を中核機関とし、コーネル大学、ペンシルバニア州立大学、プリンストン大学、ラトガース大学が参加している。

欧州では、Horizon 2020の枠組や各国の研究資金で基礎研究を中心に実施されている。Horizon 2020においては、反強磁性スピントロニクスの実現をめざしたAntiferromagnetic Spintronics (ASPIN、2017～2021年)プロジェクトや新規トポロジカル物質・トポロジカル物性の開拓をめざすTopological materials: New Fermions, Realization of Single Crystals and their Physical Properties (TOPMAT、2017～2022年)がある。また、ドイツにおいてはDFG支援の下、スピнкаロリトロニクスに関する新しい研究分野開拓をめざしたSpin Caloric Transport (SpinCAT、2011年～)、スキルミオンを含む実空間でのトポロジカルスピンソリトンを用いたデバイスとアプリケーション開発に向けた基礎研究を行うSkyrmions: Topological Spin Phenomena in Real-Space for Applications (2018年～)などがある。特にSpinCATに関しては、2008年に慶應大グループによって発見されたスピンゼーベック効果に注目した大型プロジェクトである。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

(5) 科学技術的課題

磁性半導体をはじめとする半導体スピントロニクス材料開発に関しては、高いキュリー温度を得るための指針を確立するため、結晶成長機構の解明、欠陥やキャリア濃度の制御方法の開発、バンド構造と強磁性発現機構の理解、さらにはそれらの理解に基づくマテリアルデザイン方法の確立が求められる。また、スピンMOSFETなどスピndeバイスの研究については、着実に進歩しているものの、室温動作、満足すべきトランジスタ性能、平行磁化と反平行磁化の違いによる十分大きな磁気抵抗比（磁気電流比）など、すべての要件を満足するデバイス作製が今後の重要な課題である。

近年、スピン軌道相互作用にかかわる物理が大きな発展をみせているものの、一般的にスピン軌道相互作用の大きな元素はレアアースが多く元素戦略的な観点が必要となる。また、スピнкаロリトロニクスやスピンメカニクスにおいては、応用のためには熱/力学的運動⇄スピン流⇄電流の変換効率の向上が必要であり、新物質の開発と原子レベルでの界面制御技術が必要になる。さらに、スピン流やトポロジカル物質を用いたスピントロニクスに関しては、まだ基礎研究フェーズであるといえるものの、実験室レベルの基本動作実証からプロトタイプの実作、デバイスの安定性や信頼性を検証するレベルまでステージアップさせることが必要である。

(6) その他の課題

スピントロニクスはもともと磁性薄膜の成長と物性を得意とする研究グループに牽引されてきた経緯があり、個々の研究者が前述の分野全体にわたる広い知識を必ずしも有しているわけではない。そこで、この分野では、物理・数学・物性・結晶工学・磁気工学・半導体工学・微細加工技術・計測工学の諸分野の研究者、さらにシステム（回路）・デバイスの専門家や産業界をいかに結集し学際的かつ産学連携を誘発する土壌を豊かにしていくかが重要な課題といえる。本研究開発領域は日本が強みを有する領域であり、今後も競争力を維持していくためには若手人材の育成と確保も最重要課題の1つである。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・JST戦略的創造研究推進事業などを中心に基礎研究が継続的に行われている。 ・トポロジカルスピントロニクスなどの新しい概念に基づく研究開発が成果をあげ始めている。
	応用研究・開発	○	↘	・実用化へ向けた本格的な研究開発は少なくなりつつある。企業のより一層の寄与が必要である。
米国	基礎研究	◎	↗	・NSF、DOE、DOE傘下のNERSC、ONRからの手厚い支援のもと、良質な基礎研究成果を出し続けている。
	応用研究・開発	○	↗	・キャッチアップが早く、電圧トルクなど多くの応用研究が始まっている。Everspin、Global-Foundries、IntelがMRAMの量産体制を準備しつつある。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

欧州	基礎研究	◎	→	・英国ではEPSRCとJSPSとの共同プロジェクトとして、有機スピントロニクス等の研究が行われている。 ・フランスではフランス国立研究機構 ANR により、かなり広範囲にわたってスピントロニクス関連の支援が行われている。 ・ドイツではDFGの支援のもと、スピン流-熱流変換現象を扱う大型プロジェクト SpinCaT が2010年に立ち上がり、多くの研究グループが参画している。 ・トポロジカル現象を用いた新しいスピントロニクス研究も積極的に行われている。
	応用研究・開発	△	→	・IMECなどが応用研究を再開したがそれほど目立った進展はない。
中国	基礎研究	◎	↗	・量子異常ホール効果の実証など、質の高い研究が行われるようになってきている。 ・潤沢な研究資金と豊富な人材を活用し、欧米を凌ぐ勢いで研究が行われ、高いポテンシャルを有する。
	応用研究・開発	△	↗	・応用研究に関する情報はそれほどないが、基礎研究の質が高くなっているなか、今後国家的事業として重厚な支援がなされる可能性がある。
韓国	基礎研究	○	↗	・これまで理論中心だったが、界面DMIの研究などの実験においても良質な研究がみられるようになってきている。 ・個別研究レベルでは秀逸な研究が存在する。
	応用研究・開発	○	↗	・SamsungがMRAMの量産体制を準備している。 ・財閥系企業などからの潤沢な資金をもとに応用研究・開発を活発に行う可能性がある。

- (註1) フェーズ
- 基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲
- 応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲
- (註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価
- ◎：特に顕著な活動・成果が見えている ○：顕著な活動・成果が見えている
- △：顕著な活動・成果が見えていない ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
- (註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化
- ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・新機能ナノエレクトロニクスデバイス（ナノテク・材料分野 2.3.1）
- ・トポロジカル材料（ナノテク・材料分野 2.5.5）

参考文献

1) 齊藤英治, 村上修一『スピン流とトポロジカル絶縁体—量子物性とスピントロニクスの発展—』(共立出版, 2014) .

2) G. Binasch et al., "Enhanced Magnetoresistance in Layered Magnetic Structures with Antiferromagnetic Interlayer Exchange", *Physical Review B* 39, no. 7 (1989) : 4828. doi : 10.1103/physrevb.39.4828

3) M. N. Baibich et al., "Giant Magnetoresistance of (001) Fe/ (001) Cr Magnetic

- Superlattices", *Physical Review Letters* 61, no. 21 (1988) : 2472. doi : 10.1103/physrevlett.61.2472
- 4) T. Miyazaki and N. Tezuka, "Giant Magnetic Tunneling Effect in Fe/Al₂O₃/Fe Junction", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 139, no. 3 (1995) . doi : 10.1016/0304-8853(95) 90001-2
- 5) J. S. Moodera et al., "Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions", *Physical Review Letters* 74, no. 16 (1995) : 3273. doi : 10.1103/physrevlett.74.3273
- 6) Satoru Nakatsuji, Naoki Kiyohara and Tomoya Higo, "Large Anomalous Hall Effect in a Non-collinear Antiferromagnet at Room Temperature", *Nature* 527, no. 7577 (2015) : 212-15. doi : 10.1038/nature15723
- 7) 科学技術振興機構 CREST 研究領域「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」,
https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah30-3.html (2021年2月17日アクセス)
- 8) 科学技術振興機構 さきがけ研究領域「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」,
https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunyah30-3.html (2021年2月17日アクセス)
- 9) 科学技術振興機構 CREST 研究領域「情報担体を活用した集積デバイス」,
https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunya2020-3.html (2021年2月17日アクセス)
- 10) 科学技術振興機構 さきがけ研究領域「情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム」,
https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunya2020-4.html (2021年2月17日アクセス)
- 11) 科学技術振興機構 未来社会創造事業 大規模プロジェクト型 技術テーマ「トリリオンセンサ時代の超高度情報処理を実現する革新的デバイス技術」,
<https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/large-scale-type/theme08.html> (2021年2月17日アクセス)
- 12) 日本学術会議 第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン (マスタープラン2020) ,
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-24-t286-1.html> (2021年2月17日アクセス)
- 13) 文部科学省 学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想 ロードマップの策定 -ロードマップ2020-,
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1388523_00001.htm (2021年2月17日アクセス)

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

2.3.4 MEMS・センシングデバイス

(1) 研究開発領域の定義

健康で便利に暮らせ安心・安全なスマート社会の実現にはInternet of Things (IoT) が重要であり、その主要な構成要素としてMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) センサを代表とするセンシングデバイスの技術開発を目的とする。MEMS センサや化学センサなどセンシングデバイスの高感度化、高信頼化、低消費電力化、小型軽量化、低コスト化、MEMS プロセス技術の高度化、複数のセンサの融合、プリンテッドエレクトロニクス技術などの研究開発課題がある。

(2) キーワード

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)、弾性波デバイス、慣性センサ、マイクロフォン、LiDAR、圧電デバイス、化学センサ、バイオセンサ、分子識別センサ、匂いセンサ、ガスセンサ、電気化学デバイス、グラフェンFET、アプタマー、集積化、アレイ化、5G、セキュリティ、ストレス

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

Society 5.0やIoTに代表されるスマート社会を築くために、人工知能や通信 (ネットワーク) と並んで主要な構成要素がセンサ (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は、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が、今後はこれらに加えて健康・医療などの応用分野で安定して使い易い化学センサ (バイオセンサ、分子識別センサ、匂いセンサ、ガスセンサなど) 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 (IC) やプリンテッドエレクトロニクス (Printed Electronics) との組み合わせも重要になる。イメージセンサはすでに企業主体の開発フェーズにあるため、本領域ではMEMS技術、MEMSセンサおよび化学センサを中心に扱う。

MEMSセンサに代表される物理センサは、アカデミアから企業まで高性能化、小型化、低価格化などに対する研究開発がダイナミックに進展している。一方、有害物質のモニタリング、病気診断、健康管理などで用いられる化学センサの研究開発は大きく遅れている。多くの化学センサでは、センサ部位が外界と接触しなくてはならず、集積化エレクトロニクスで培われてきたパッシベーション技術 (デバイスの堅牢性を担保する表面保護技術) を適用することが本質的に困難であり、安定性や再現性を確保するために使用のたびに表面清浄化やキャリブレーションなどが必要な状況にある。今後は個々のセンサの性能向上だけでなく、この問題点を克服する必要がある。また、各種の物理センサや化学センサをアレイ化・集積化することでさまざまなデータ・情報を併せて取得することを可能にし、新しい価値の創造や産業展開を期待したい。

スマート社会に関連する産業では、欧米中のサービスプラットフォームが覇権を握り、高い利益率を確保しているが、それ以上に高い利益率を確保しているのがデバイス・モジュールメーカーである。実際、DRAMの利益率は変化が激しいものの平均的には高い水準にあり、また、弾性波フィルタとそれを含む無線フロントエンドモジュールの利益率も高い水準にある。日本の企業がサービスプラットフォームに食い込むことは容易ではないが、デバイス・モジュールに強い企業が多く、また、この図式は自動運転やカーシェアリングが急速

に進む自動車産業にも広がる可能性があり、日本にとって本研究開発領域の重要性は極めて高い。

〔研究開発の動向〕

(a) MEMS技術・センサ

MEMS技術によるセンサとしては、スマートフォンを例にとると、マイクロフォン、加速度センサ、ジャイロスコープ、および圧力センサ（気圧センサ）などが使われている。また、クロック発振器の一部もMEMSである。これらのセンサの技術は継続的に革新され、その結果、低コスト化・小形化と高性能化が進んでいる。小形化について、例えば、加速度センサの大きさは、最近5年でチップ面積にして約1/10になっているが、これはウェハレベルパッケージングやTSV（Through Silicon Via）といった技術の高度化によるところが大きい。

高性能化については、自動運転やロボット制御などに用いられるジャイロセンサとLiDAR（Light Detection and Ranging）、音声認識のためのマイクロフォン、資源探索等のための重力センサ（高感度加速度センサ）などの研究開発が進んでいる。現在、自動運転に用いられているジャイロセンサは、100万円台以上と高価な光学式であり、MEMSジャイロセンサを高性能化することによってこれを置き換えることが期待されている。ほぼ同じことがLiDARにもいえる。音声認識率はマイクロフォンの性能によるところが大きい。2018年から2年の間に新方式のMEMSマイクロフォンがInfineonによって実用化され、最新のTWS（True Wireless Stereo）イヤホンに使われている。高性能MEMSマイクロフォンを用いて、CO₂をフォトアコースティック法で検出するガスセンサも登場している。

まだ実用化されていないが、研究開発が行われているものとしては、イメージセンサと組み合わせて用いるMEMS方式の手ぶれ防止アクチュエータと可変レンズがある。現在、手ぶれ防止はボイスコイルモータでレンズを並進させることで実現されているが、CMOSイメージャをMEMSで並進だけでなく回転させれば、回転方向の手ぶれも補正可能になる。その他、ロボットの機械学習に用いる触覚センサ、環境認識や医療などに用いられるハイパースペクトラムイメージャ、ボタンレスタッチセンサなども研究開発されている。

(b) MEMS技術による弾性波フィルタ

MEMS技術の主要な用途はセンシングであるが、通信分野でもその重要性が高まっている。無線通信フロントエンドモジュールにおいて周波数選別を担うのがMEMS技術によるBAW（Bulk Acoustic Wave）フィルタやSAW（Surface Acoustic Wave）フィルタといった弾性波フィルタであり、第5世代通信規格（5G）の普及やポスト5Gに向けて、性能向上が求められている。5Gでは、3.5 GHz帯と4～5 GHz帯、およびミリ波帯の28 GHz帯が新たに使えるようになる。長距離の無線通信に適した周波数は数百MHzから6 GHzの領域であり、従来から用いられている900 MHz～2.5 GHz帯は非常に混雑しており、キャリアアグリゲーションに代表される高度な利用法が進み、弾性波フィルタへの技術的要求（挿入損失、温度安定性、カットオフ特性、線形性、パワーハンドリングなど）はますます高くなっている。また、5G用に新たに割り当てられた高い周波数領域（3.5 GHz帯、4～5 GHz帯）に対応するため、弾性波フィルタには今までにない技術が求められる。現状、この周波数帯では弾性波フィルタは用いられていないが、遠くない未来に効率的利用のため弾性波フィルタが必要になる。ポスト5Gでは、さらに高い周波数でも弾性波フィルタが用いられることが予想されており、そのための研究開発が始められている。

(c) 化学センサ

化学センサにはガスセンサのように空気中で特定の分子をモニタリングするものや、血液中のバイオマーカー

の検出のように溶液中で特定の化学物質を検出するものなどがあるが、基本的な検出方法はほぼ共通している。それぞれの目的に沿って検出する分子・物質と特異的に相互作用する認識分子（核酸、ペプチド、タンパク質、低分子化合物など）を電気化学デバイス（トランジスタ）や光素子のトランスデューサ上に付着しておき、分子・物質と認識分子との相互作用による電気信号や光信号の変化を検出している。一般的に検出する分子・物質の量は少ないので、化学センサの高感度化は重要な課題となっている。また、先に述べた安定性や再現性の問題についても克服する必要がある。さらに、測定する空気中や溶液中には目的とする分子・物質以外にもさまざまな夾雑物が混じっているため、高選択性を得る手法や、低選択性の認識分子の場合にも異なる種類の測定から目的の分子・物質の濃度を導き出す手法を見つけることが重要である。

化学センサの研究開発では、ガスセンサや抗原抗体センサのように、既知の限られた特定の分子種を計測する従来タイプのものと、空気中や溶液中に存在する多種多様な分子群を網羅的にセンシングして、個々の分子に対する選択性は高くなくとも複数のセンサで得られたデータから望みの分子の量を求めるような新しいタイプのものに大別することができる。従来タイプのセンサ研究開発では、例えば、すでに実用化されているガス検知器のような消費電力、デバイスサイズ、安定性等の素子スペックの要請が厳しくない分野に応用展開が図られてきた。一方、IoTには低消費電力、制御性、分子選択性、堅牢・安定性等が要求されるため、これら従来タイプのセンサ研究開発で培われた技術をそのままIoTに適用することが困難である。このため、IoTに適した新たな化学センサの技術や、複数のセンサをアレイ化・集積化した新しいタイプの研究開発が強く求められるようになってきている。

これらの新たな要求に対して、カーボンナノチューブ（CNT）やグラフェン、ナノ構造金属酸化物などのナノ構造体を用いた化学センサ、センサアレイの研究開発が活発化している。ナノ構造体は高い表面对体積比と表面自由エネルギーを有していることや、量子効果の発現やバルクとは異なる特異なバンド構造のために高い移動度を有するなど、センサの高感度化と低消費電力化につながる可能性があり、期待が高い。

複数の分子・物質の同時検出、化学反応の可視化のために、集積回路技術と化学センサの融合によるアレイ化技術が注目されている。多くの生体反応は単一の化学物質を見ているだけでは判断できず、多項目の組み合わせの理解が重要と考えられ、機械学習の活用により、これが可能になりつつある。その代表的なものが匂いのセンシング技術分野であり、複数の匂い検出膜を用いて同時に検出し、機械学習により匂いの物質と量を推定することがなされている。このような複数の分子・物質の情報の可視化（デジタル化）は医療・健康分野だけでなく、環境など他の分野への展開が期待されている。

化学センサの応用としては、先に述べた健康・医療分野だけでなく、環境、安心、豊かな暮らしなどへの展開が期待されている。身体の状態だけでなく、ストレスや心の状態を知るために、血液中に分泌されるホルモンなどを検出するセンサ（ストレスセンサ）の研究開発も進められている。また、農業分野の応用をめざして、土壌のセンシング、植物体の活動センシングなどの研究も活発になってきている。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

（a）MEMS技術・センサ

MEMSはこれまで広くセンサに用いられ、産業的にも成功を収めているが、アクチュエータに用いられて成功した例は限られており、インクジェットプリンタヘッドが唯一の産業的成功例である。しかし、最近、圧電材料をはじめとする技術の進歩によって、新しいMEMSアクチュエータが実用化されつつある。具体的には、LiDAR、ARヘッドセット内の画像投影、配向制御などに用いられる走査型マイクロミラーデバイス、カメラ

の手ぶれ防止アクチュエータ、可変ミラー、MEMSスピーカなどである。これらの技術の多くは、大学や公的研究機関の技術をシーズにしてベンチャー企業で開発されており、本研究開発領域でもシーズ技術がベンチャー企業によってスピード感を持って実用化される動きがますます顕著になっている。これらのうちでも、最近、特にLiDARの研究開発競争が熾烈であり、大手企業とベンチャー企業が入り乱れている。LiDARを研究開発している企業は50社を下らないと思われ、各国で公的資金も投入されている。LiDARには、従来からある機械走査型、走査型マイクロミラーデバイスを用いたMEMS型、およびソリッドステート型がある。機械走査型は高性能であるが、値段と大きさが問題であるため、MEMS型とソリッドステート型がさかんに研究開発されている。

SAWフィルタは無線通信に欠かせないデバイスであるが、10年以上前にはおおそ技術的に成熟し、その後、非連続な進歩から遠ざかっていた。その間、競合するBAWフィルタは日本発の新圧電材料ScAlNの導入などもあり、欧米企業によって技術的にも事業としても大きく発展した。しかし、最近、厚さ1 μ m程度以下と薄い単結晶圧電材料をシリコンや水晶の基板で支持した構造が利用可能になり、新しいSAWデバイスや派生デバイスが登場し、実用化が進むとともに研究開発が活発化している。この技術では、日本が先行し、欧米が追っている。中国では、無線通信システムの基幹部品である無線フロントエンドモジュールを国産化するための投資が活発になっている。現在、SAWフィルタとBAWフィルタの研究開発に取り組む中国企業は、それぞれ10社を下らず、そのなかには既存企業もベンチャー企業も含まれる。

(b) 分子センサ技術

さまざまな応用に向けて、新たな材料、検出原理、作製プロセスによる超高感度の化学センサの研究開発が活発になっている。例えば、グラフェンFETによる化学センサにおいて、単層グラフェンを活用することで、緩衝液およびヒト血清サンプルで、それぞれ600 zmol/Lおよび20 amol/Lまでの超高感度検出が可能との報告がある。また、a-IGZO FETを活用したさまざまなイオンセンサが実現しており、0.001 pHの分解能が得られた報告もある。

酵素/抗体フリーおよびラベルフリーのバイオセンシングのために、MIP（分子インプリンティング）技術が活発化している。MIPはCMOS型/FET型のゲートに修飾することができ、生体-電気インターフェースに適している。ゲートにMIPコーティングされたFETセンサは、標識された材料を使用せずに、グルコース、ドーパミン、シアル酸、オリゴ糖などのさまざまな小さな生体分子を選択的に検出できる。

通常FETバイオセンサは中性の分子を捕獲しても信号を得ることはできない。一方、アプタマーのような核酸分子は、ターゲット分子を捕獲して二次構造が変化することが報告されており、例えば核酸を構成するリン酸基は負電荷を持っているため二次構造変化は電荷分布の変化をもたらし、検出可能となる。これまではターゲット分子が引き起こす化学反応を利用して、pHの変化などにより間接的に検出する方法が知られていたが、一本鎖のDNAアプタマーを固定化したFETバイオセンサにより、中性のストレスホルモンであるコルチゾールを高い感度で検出することが確認されている。

印刷技術で作製して体に装着できる化学センサにより、汗からの様々なイオンやバイオマーカをセンシングした報告が増えている。通常のイオンFETと同様に、バックゲート側に酵素、抗体、イオノフォア（ionophore）等を固定化することで実現しており、PEDOT:PSSを基板材料とした有機トランジスタやIGZO、グラフェンなどを用いたものがある。

化学センサをアレイ化することで、多項目のバイオ物質や化学物質の2次元分布を可視化する検討が進んでいる。イリノイ大学とTSMCのグループは複数種類の生理活性物質を同時に検出するための計測モジュール

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

ルを含んだCMOS型の100万画素のオープンイノベーション・プラットフォームを実現している。また、英国のインペリアルカレッジやグラスゴー大学のグループは、ドリフト補正回路やデジタル出力回路などが内蔵されている様々なタイプのCMOSベースのISFETセンサアレイを報告している。このような集積化・アレイ化されたセンサは、単独のセンサとは異なり要求される性能や仕様が集積化エレクトロニクスレベルになるため、研究開発のパラダイムシフトが求められる。例えば、分子識別センサにおいては、分子センサ部位のチャネル材料探索（堅牢な分子選択性）、電極材料（堅牢な電気的接合）等においてもエレクトロニクス素子としての消費電力、制御性、分子選択性・堅牢・安定性等の性能を満足する新しい材料・デバイス・回路設計技術の開発が求められている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

(a) MEMS技術・センサ

米国では、DARPA（Defense Advanced Research Projects Agency）が約30年にわたりMEMS技術を強力に支援している。DARPAはMEMS技術を管轄するMicrosystems Technology Office（MTO）を設置し、継続的に研究開発プログラムを推進している。DARPAが特に重要視しているのは、兵器の定位やナビゲーションに必須の慣性センシング技術とクロック技術を含むPNT（Positioning, Navigation and Timing）技術である。このカテゴリの下、高性能ジャイロスコープ、量子センサ、量子クロックなどのプログラムが行われている。また、超省消費電力（ゼロ待機電力）センサのプログラムも引き続き行われている。

欧州では、フランスのLeti、ドイツのフラウンホーファー研究機構（特にISIT、IPMS、ENASの各研究所）、フィンランドのVTT、スイスのCSMCなどの大型研究拠点がMEMS・マイクロシステムの研究を主導し、それらを中心に大学がネットワーク化されている。ドイツでは、The Research Fab Microelectronics Germany（FMD）というプログラムが推進され、7つのフラウンホーファー研究所と2つのライプニッツ研究所がこれに参加し、Federal Ministry of Education and Research（BMBF）によって2020年までに3.5億ユーロの資金が投じられる。2019年は7千万ユーロの研究開発プロジェクトが行われ、多くの装置が最新型に更新された。産業界に近い研究開発が行われていることが特徴である。

中国では、IT機器や無線通信機器のキーデバイスであるMEMSの国産化を進めるため、中央政府と地方政府が主導し大きな投資が行われている。これらの投資は網羅的であり、半導体デバイスやMEMSについて、欧米とデカップリングしても困らないように、サプライチェーンの全てを中国内で完結させる方針がみえる。MEMS技術に関連して、ここ10年で多くの新興企業が登場し、これらの企業と政府機関や政府系研究所が一体となって、蘇州、上海、重慶、厦門、淄博、南昌、煙台など、各地で競うように巨額投資が行われ、研究開発と産業の集積地が建設されている。例えば、苏州纳米城（蘇州ナノシティ）、上海インテリジェントセンサ工業団地、淄博高新区MEMS产业基地（淄博ハイテクゾーン）、常州スマートセンシングタウン、鄭州智能传感谷（鄭州インテリジェントセンシングバレー）などである。中国最大のMEMSの研究機関は、中国科学院上海微系统与信息技术研究所（SIMIT）であり、傘下に複数の研究所や企業を有し、学位も授与する巨大な組織である。上海に8インチラインを有する研究拠点SITRI（Shanghai Industrial μ Technology Research Institute）もSIMIT傘下にある。また、この分野の主要な国際会議で、中国の大学からの研究論文が急増しており、その水準が高くなっていることから、これらの大学は巨額投資の恩恵を受け、人材供給元として機能していると思われる。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域 ICT・エレクトロニクス応用

(b) 分子センサ技術

多種類の分子群を連続的に計測することを可能にするIoTセンサデバイスの開発を押し進めるプロジェクトが世界的に進められている。米国では、UC BerkeleyのBERKELEY SENSOR & ACTUATOR CENTERで、シリコンデバイスを基軸とした集積化分子識別センサを提案するなど、分子識別センサに関する研究が精力的に進められている。また、Intel社とコーネル大学の共同研究チームはIntelのニューロモルフィックチップ「Loihi」を用いて、化学物質データの高効率な識別を達成している。この研究は直接的なセンサデバイスの研究ではないが、入力データとして72個の化学センサのデータセットを用いており、多数のセンサを集積化することで分子群の識別が可能であることを示す重要な研究となっている。

欧州では、Horizon 2020のなか、大掛かりな研究開発が進められており、取得されるビッグデータとそこから得られる解釈を用いた新たなサイエンスと新しい産業のイニシアティブを取ることをめざしている。例えば、イタリアでは、金属酸化物半導体化学センサの低消費電力化およびシリコン基板上への作製に取り組んでおり、Brescia大学では、酸化物ナノ材料を基軸として分子識別センサを初めて提唱し、さまざまな分子種を網羅的に検知するとともに、それらの実績に基づいたナノセンサに関するベンチャー（Nano Sensor Systems）を設立している。スイスのETH Zurichでは、ナノ粒子を用いたアレイ型センサ（3種の酸化物センサで湿度とCO₂を測定）による呼吸疾病診断（糖尿病等）のデバイス開発を行っており、Sensirion社は金属酸化物アレイセンサ（4種）を商用化している。ドイツでも、JLM Innovation社とHaickグループと共同で呼吸からがんを検知するSniffphone（20種のセンサアレイを利用）を開発している。

中国では、IoTセンサに関するセンターが2016年に立ち上がっており、産官学を巻き込んだ大きな研究開発の流れとなっている。北京大学で多種多様なナノ材料を用いた揮発性化合物センシングを行っており、分子だけでなく呼吸中のウィルス等の検出にも成功している。

韓国では、KAISTがCenter for Integrated Smart Sensorsを設立し、集積化センサのR&Dを精力的に推し進めており、動物由来タンパク質触媒を利用したナノセンサ（16種）を用いて、呼吸による疾病診断・個人認証が可能な小型デバイスを開発している。

インドでは、MEMS技術を用いて、SO₂、CO₂、H₂、CO等を検出する集積化金属酸化物ガスセンサの作製と実証が行われており、Nanosniff社では4種のMEMS センサアレイからなる温度特性解析技術を利用して10 ngレベルで爆発物の分子識別が可能な爆発物センサを開発している。

日本では、「MSSフォーラム」において物質・材料研究機構が開発したMSSセンサ（膜型表面応力センサ）を基盤にして、40社以上が有効なユースケースや計測方法の研究開発を連携して行っている。また、産業界では、第一精工（強誘電体膜+感応膜の匂いセンサ）、太陽誘電（MEMS+感応膜の匂いセンサ）、パナソニック（多チャンネル+感応膜の集積化分子センサ）、アロマビット（センサ+感応膜）、コニカミノルタ（複数の金属酸化物センサの組み合わせ）などのIoT分子識別センサデバイスが開発されている。このように産学連携や個別での研究開発が進められているが、新たな化学センサの研究開発を目的にした大型のプロジェクトは実施されていない。

(5) 科学技術的課題

センサ・MEMS分野の中心的な技術的課題は、チップ面積や消費電力を大きくせずにS/N比を上げること、強力なアクチュエータを実現すること、現実的な方法で異なる要素を集積化することなどである。高い性能を出すためには、高度な微細加工・集積化技術が必要であり、中途半端な研究施設では競争力のある研究開発は行いにくくなっている。この分野では、着実な研究開発によって産業的価値のある基盤技術を維持・進歩

させつつ、研究施設を動かし、そのうえで新規アイデアを小投資で試みるような研究体制が適している。

半導体集積回路の研究開発では、LSI ファウンドリが提供する様々なプロセスプラットフォームの上で設計がなされる。MEMSについては設計とプロセスとが切り離せず、そのことを言い表した“One Device, One Process, One Package”という言葉がある程である。しかし、デバイスごとに製造プロセスを開発していたのでは実用化に時間とコストがかかり過ぎるため、複数のデバイスに対応する有力なプロセスプラットフォームがいくつか登場し、それらによる欧米発のデバイスがシェアを占めるようになった。メインストリームで勝負するには、プロセスプラットフォームの改良・革新が欠かせない。

バイオマーカの検出、呼気の分析、空気中汚染物質の濃度測定などを低コストで行うためには、ソリッドステート化学センサが必要である。実用的なソリッドステート化学センサとしては、ISFET (Ion Sensitive FET)、触媒燃焼型ガスセンサなどがある。必要な性能を発揮するにあたっては、前者は使用前のキャリブレーションを必要とするため連続使用には向かず、後者はセンサを高温にし、表面を清浄かつ活性に保たなくてはならないので、省消費電力化できない。このような化学センサは、明らかにIoT用途に向かない。一方、論文では、数え切れない程の「高感度」、あるいは「省消費電力」化学センサが報告されている。しかし、残念ながら、ほとんどのものがドリフト、戻りの応答、繰返し性能、あるいは信頼性に問題をかかえている。多くの場合、化学物質に対する結合力や吸着面積を上げれば高感度になるが、同時に前述の問題が発生する。IoT用途に長期間安定して使えるソリッドステート化学センサの新しいアイデアが待たれる。最近、集積回路技術を活用してキャリブレーションをチップ内で行う報告があり、このような技術を含む、堅牢なセンシング技術の創製、センサデバイス構造設計、センサ材料設計、センサ回路設計技術の開発、統合的研究開発の発展を期待したい。

(6) その他の課題

日本では、大型プログラムによって順調に立ち上がったものの、その後の基盤的支援が行われずに縮小されるMEMSの研究拠点もある。特に、産業に直結した研究開発を行うべき研究拠点に対しては、従来の競争的資金による研究がそぐわないことから、基盤部分（全体の3割程度）を公的資金によって支えるといった議論も必要であろう。この方式では、政府投資総額を増やすことを必要とせず、民間資金によるレバレッジによって研究の速度と成功確率を格段に上げられる。フラウンホーファー研究機構では、民間からの研究資金の額に応じて、基礎的部分の支援額が決まる仕組みがあるが、このようなインセンティブと競争性（従来の競争的資金とは異なる競争性）について、わが国の公的研究所や大学に対しても考えていくことが必要になってきている。

集積化IoTセンサデバイス開発では、センサ材料、集積化デバイス構造、センサ回路設計技術の研究開発を包括的にかつ同時並行で行う研究体制でないと、世界的に競争力のあるデバイス開発は難しい。例えば、BERKELEY SENSOR & ACTUATOR CENTERではまさに多様なメンバー構成（ナノ材料化学・有機化学・機械工学MEMS・回路設計研究・人工知能等）で新しいアイデアのサイエンスとデバイスを生み出そうとしている。米国・欧州のセンシングデバイスの研究開発例と比較し、日本はダイナミックな時代の変化に対応する研究グループの構造・体制になっていない。アカデミックの研究室単独で達成可能な技術には限界があり、センサ材料（材料化学）・デバイス構造（半導体工学）・センサ回路（電気工学）が一体となってシナジーを生む研究体制の構築が強く求められる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	- MEMS関係の主要国際会議での論文数が多いが、多くの大学研究者の興味がメインストリームや産業技術から離れつつある。若手研究者の層は比較的厚いが、彼らがメインストリームや産業技術を習得できる機会は少ない。また、企業からの基礎的な研究報告が少なくなっている。 - 集積センサ技術開発で、NIMS (MEMS+感応膜)、豊橋科技大学 (CMOS+感応膜)、東京大学 (シリコンデバイス+金属ナノ構造、堅牢な分子識別界面+集積化センサ)、慶應義塾大学 (堅牢なセンサ回路設計) などの活動が活発になっている。
	応用研究・開発	○	↘	- 日本のデバイス・モジュールメーカーの実力は高く、弾性波フィルタ、自動車用慣性センサなどに強みがあるが、デバイス化・製品化に向けた研究開発が低調になっている。 - 従来の日本式の研究開発では、世界の速度に付いていけないため、M&Aで補っている。ベンチャー起業は低調である。 - 第一精工、パナソニック、NTT、コニカミノルタ、富士通、太陽誘電などで、集積センサ、匂いセンサなどの研究開発を進めている。
米国	基礎研究	◎	→	- 研究者の層が厚く、研究開発のスペクトルは広く、新しい発想は米国から出てくることが多い。実力のある有名大学、Stanford大学、UC Berkeley/Davis/Irvine、ミシガン大学、Georgia Techなどは、メインストリームやベンチャー起業でも高い実力を見せている。 - BERKELEY SENSOR & ACTUATOR CENTERなど、多くの大学で応用を意識した基礎研究がなされている。
	応用研究・開発	◎	→	- InvenSense、SiTimeなどに続く成功しそうなベンチャー企業が次々と現れている。シリコンバレーでは、この分野への投資熱も高い。 - BAWフィルタの大手企業は全て米国企業であり、BroadcomはRobert Boschを抜いて世界最大のMEMS企業となった。 - バイオセンサを社会に実装するようなスタートアップ企業が活発。C2 sense社の食品の匂いモニタリングセンサデバイス開発など。 - Intel社とコーネル大学の共同研究チームが、Intelのニューロモルフフィックチップ「Loihi」を用いて、化学物質データの高効率な識別を達成。
欧州	基礎研究	◎	→	- 欧州では応用研究志向が強く、基礎研究と応用研究は一体的に進められている。特に実力のある研究拠点は、論文発表にプライオリティを置いておらず、論文からだけでは実力を測れない。 - 大型研究拠点が産業に直結した研究開発で強さを見せる一方、大学の存在感は薄くなっている。 - 化学センサの基本的な検討だけでなく、集積回路との一体化の検討に関しては米国以上に活発になっている。イタリアの金属酸化物半導体化学センサの低消費電力化およびシリコン基板上への作製、スイスETH Zurichのナノ粒子を用いたアレイ型センサによる呼吸疾病診断 (糖尿病等) のデバイス開発など。
	応用研究・開発	◎	→	- Robert BoschのMEMSセンサでの地位はゆるぎない。同社は社内で活発な研究開発を行いつつ、シリコンバレーやフラウンホーファー研究機構とも共同研究を積極的に行っている。 - STMicroelectronicsはビジネスで一時的勢いはないものの、MEMSについて全方位の研究開発を実施している。 - フランスのLeti、ドイツのフラウンホーファー研究機構などは、世界的に強力な研究機関であり、ベンチャー起業も比較的さかんである。 - 集積化学センサ関係では、Sensirion社 (スイス) が金属酸化物アレイセンサを商用化し、JLM Innovation社 (ドイツ) がTechnion (イスラエル) と共同で呼吸からがんを検知するSniffphone (20種のセンサアレイ利用) を開発している。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

中国	基礎研究	○	↗	・ 主要国際会議で中国の占める論文シェアがもっとも高く、1/3程度に達することもあり、最近、研究の質、量ともに急伸している。 ・ 大学は拡大する産業界への人材供給元であるため、それに見合った量の研究開発プロジェクトが大学でも行われている。 ・ 集積化学センサでは、北京大学で多種多様なナノ材料を用いた揮発性化合物センシングを行っている。分子だけでなく、呼気中のウイルス等の検出にも成功している。
	応用研究・開発	○	↗	・ MEMSやセンサの国産化の政府方針のもと、巨額投資が行われている。 ・ 多くの新興企業が登場し、科创板（中国版NASDAQ）に上場する企業も現れている。 ・ 現時点では、中国企業は技術とシェアで欧米企業に及ばないが、マイクロフォンと赤外線センサでは存在感を高めている。 ・ IoTセンサに関する研究開発センターが作られている。
韓国	基礎研究	△	↘	・ かつてセンサ・MEMSの研究で上位に位置していたが、実用化の成功例に乏しいため、産業界や政府からの投資熱が冷めている。 ・ その結果、分野に研究資金が行き渡らず、研究者層が薄くなっている。 ・ KAIST：Center for Integrated Smart Sensorsを設立し、集積化センサのR&Dを精力的に進めている。
	応用研究・開発	△	↘	・ 財閥系IT企業は、スマートフォン等に搭載するセンサ・MEMSをグループ内で調達するべく、研究開発を行ってきたが、技術的蓄積と高度人材が不足しており、成功例に乏しい。 ・ KAISTチームによるスタートアップ企業が立ち上がっている。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ IoTアーキテクチャー（システム・情報分野 2.5.5）
- ・ ロボット基盤技術（ナノテク・材料分野 2.3.5）

参考・引用文献

- 1) H. Beitollahi et al., "A review on the effect of introducing CNTs in the modification process of electrochemical sensors", *Electroanalysis* 31, no. 7 (2019) : 1195-1203. doi : <https://doi.org/10.1002/elan.201800370>
- 2) S. K. Krishnan et al., "A review on graphene-based nanocomposites for electrochemical and fluorescent biosensors", *RSC Advances* 9, no. 16 (2019) : 8778. doi : [10.1039/C8RA09577A](https://doi.org/10.1039/C8RA09577A)
- 3) Y.Hahn, R. Ahmad and N. Tripathy, "Chemical and biological sensors based on metal oxide nanostructures", *Chem. Commun.* 48, no. 84 (2012) : 10369-10385. doi : [10.1039/c2cc34706g](https://doi.org/10.1039/c2cc34706g)

- 4) Michael Taeyoung Hwang et al., “Ultrasensitive detection of nucleic acids using deformed graphene channel field effect biosensors”, *Nature Communications* 11, no. 1 (2020) : 1543. doi : 10.1038/s41467-020-15330-9
- 5) K. Takechi and S. Iwamatsu, “Sensor applications of InGaZnO thin-film transistors”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 58, no. 9 (2019) : 090504. doi : <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab1fc0>
- 6) Kuniaki Nagamine et al., “Printed Organic Transistor-based Biosensors for Non-invasive Sweat Analysis”, *ANALYTICAL SCIENCES* 36, no. 3 (2020) : 291-302. doi : <https://doi.org/10.2116/analsci.19R007>
- 7) T. Sakata, S. Nishitani and T. Kajisa, “Molecularly imprinted polymer-based bioelectrical interfaces with intrinsic molecular charges”, *RSC Adv.* 10 (2020) : 16999–17013. doi : 10.1039/d0ra02793f
- 8) 黒岩 繁樹, 大橋 啓之, 逢坂 哲彌, 電界効果トランジスタを用いたバイオセンサの展開, 「電気化学」, 2020 年 88 巻 4 号 p. 317-325. doi : <https://doi.org/10.5796/denkikagaku.20-FE0030>
- 9) K. Ishida et al., “Microsensor Device for Simultaneously Measuring Moisture & Nutrient Substance Dynamics in Plants”, *2019 IEEE SENSORS* (2019) : 1-4. doi : 10.1109/SENSORS43011.2019.8956827
- 10) Carlos Duarte-Guevara et al., “Characterization of a 1024 × 1024 DG-BioFET platform”, *Sensors and Actuators B* 250 (2017) : 100–110. doi.org/10.1016/j.snb.2017.04.107
- 11) N. Moser et al., “ISFET Arrays for Lab-on-Chip Technology : A Review”, *2019 26th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)* (2019) : 57-60. doi : 10.1109/ICECS46596.2019.8965034
- 12) N. Moser et al., “A Scalable ISFET Sensing and Memory Array With Sensor Auto-Calibration for On-Chip Real-Time DNA Detection”, *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems* 12, no. 2 (2018) : 390-401. doi : 10.1109/TBCAS.2017.2789161
- 13) N. Imam and T. A. Cleland, “Rapid online learning and robust recall in a neuromorphic olfactory circuit”, *Nature Machine Intelligence* 2 (2020) : 181-191. doi : 10.1038/s42256-020-0159-4

2.3

俯瞰
区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

2.3.5 ロボット基盤技術

（1）研究開発領域の定義

人間が苦手な作業の代行や人間の能力を強化するように、人に寄り添いスマートな（賢い）ロボットを実現するための革新的な要素技術・基盤技術を開発する領域である。小型・軽量・高出力のアクチュエータ、小型・軽量・低価格のセンサ、自律・協調動作を可能とする人工知能、柔軟な動作が可能なソフトロボティクス、不測の事態に対応できる新たな制御技術、基盤技術を統合したモジュール開発、などの研究開発課題がある。

（2）キーワード

サービスロボット、手術支援ロボット、Surgery 4.0、遠隔操作、ソフトアクチュエータ、人工筋肉、センサ、ソフトロボット、ソフトロボティクス、協調制御、自律制御、人工知能（AI）、機械学習、自己修復、フレキシブルエレクトロニクス、エレクトロハイドロダイナミクス、誘電エラストマー、デジタルファブリケーション

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

世界的な高齢化、医師を含む医療従事者の不足などから、診断や治療を支援するロボットシステムや介護リハビリを支援する機器の需要は今後ますます増加することが予想されている。また、最近の新型コロナウイルス感染症の広がりから、感染症対策として遠隔操作ロボットなどの活用も求められるようになってきている。このように少子高齢化・労働力不足が進むなかで、ロボット技術は従来のものづくり分野だけでなく、サービス分野、医療・介護、農林水産業、社会インフラ保守管理、災害救助などへの活用が期待される。これまで産業用ロボットで世界をリードしてきた日本にとっても、新たな応用分野に向けたロボット技術開発は非常に重要である。これらサービス分野も含めたロボット産業全体の市場規模は2035年には10兆円となり、例えば、手術支援ロボットだけでも2021年には2.5兆円に達すると予想されている。今後のサービス分野などの新たな応用分野では人間とより密接に関わることから、人に危害を与えない安全性とともに、人とのコミュニケーションなどロボットには高度な機能が要求されるようになる。これまでも、さまざまな応用分野へのロボット技術の導入をめざして国家プロジェクトが推進されているが、これらの活動を要素技術・基盤技術の立場から後押しし、今後発展が期待される分野で要求される性能・機能を満足する材料・デバイス、部品、モジュールを世界に先駆けて研究開発することは、ロボット技術で引き続き日本がリードしていくためにも重要である。このような要求への対応には、ロボットの主要分野であるメカニクスと、AIなどの情報科学（IT）やナノテクノロジー・材料など異分野間の技術の融合・統合による新たな要素技術・基盤技術の開発が不可欠である。

この研究開発領域では、医療分野でのロボットや、人間との共同作業や人間の支援を行うときに重要になるサービスロボット、ソフトロボットを例に、それらの実現に向けたロボットの要素技術・基盤技術として、駆動技術（アクチュエータ）、制御技術、センシング技術（センサ）、材料技術などがあるが、ここでは主にアクチュエータ、自律制御技術、材料技術について記載する。なお、ロボットにおいてはセンシング技術も非常に重要であるが、多種多様なことからここでは取り扱わないので、センシング技術の詳細については研究開発領域「MEMS・センシングデバイス」を参照されたい。

〔研究開発の動向〕

2次産業で利用されてきたロボット技術を医療分野やサービス産業へ展開するためには、複雑な動作ができる多関節アームなどに加え、ソフトロボット技術や人工知能（AI）技術など、ハードウェアからソフトウェアにまたがる様々な新しい技術が必要とされる。特に、人工筋肉のような新たなアクチュエータの開発、柔軟な体の位置や変形の検出、外部との接触の検知技術、柔らかい体や腕を精度良く制御するための制御技術、自立制御技術などの研究が活発になっている。ソフトロボットに関する厳密な定義はないが、柔らかい素材を用いた柔軟なメカニズムに関する研究から始まり、最近では柔らかさの概念拡張と分野横断型研究によって様々なタイプのソフトロボットが世界中で開発されている。これまでロボティクスでは、メカトロニクスや制御工学を基礎とした研究者らによって推進されてきたが、ソフトロボット研究では、材料工学、化学、物理学、生物学などの研究者らも含めた非常に広範な研究分野の研究者が関与して、分野融合・統合的な研究として発展させている。最近ではソフトロボティクスに関する独自の国際会議の開催、学術雑誌の創刊もされており、極めて注目度の高い学術領域となっている。2013年には、Soft Robotics Journalが刊行されており（2019年のIF=6.16）、2018年からIEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft) が開催され、IEEEでの地位を確立しつつある。この会議では、材料やセンサ、アクチュエータなどの基礎技術について多くの発表があり、それを用いたモデル化や学習、制御、生物規範ロボティクスなども報告されていた。また、ウェアラブルや脚ロボット、グリッパなどの応用例もあり、「柔らかい」という接頭語がついてはいるがロボティクス全般に研究がいきわたっている。EuroEAPと呼ばれるヨーロッパで主に開催される電気駆動型高分子材料やセンサ、アクチュエータを扱う学会も2011年に発足し、その後活発に活動している。

医療用のロボットにおいても、ソフトロボット技術の利用が進んできている。例えば、米国Intuitive社は事前にCT画像から3次元の気管支内の挿入経路を計画するシステムを用いて、2019年に肺の気管支内の生検を実現する直径3.5 mmの柔軟構造体を用いた手術支援ロボットIonを発表している。また、欧州ではオランダのアイントホーフェン大学発のベンチャー企業が形成外科における血管縫合などのマイクロ手術を支援するマスタスレーブ型のロボットを開発し、CEマークを取得して2020年に初の患者での治療を実施している。

機械系のソフトアクチュエータとしては、古くから空気圧アクチュエータや流体アクチュエータがあり、1980年代には東工大の鈴森らによるゴムを用いたマッキベン型人工筋が開発され、最近の世界的なソフトロボットブームによってマッキベン型人工筋や空気圧で駆動する人工筋肉の研究開発が活発になっている。また、柔らかい素材の特性を活かしたソフトアクチュエータとして、高分子アクチュエータ（Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) アクチュエータ、電場応答性ゲルアクチュエータなど）や誘電エラストマーアクチュエータ（Dielectric Elastomer Actuator: DEA）も古くから知られている。高分子アクチュエータは電場に応答してイオンが動いて高分子膜やゲル膜が屈曲運動を生成するため、低電圧（数V）で駆動するが、湿潤な条件が必須となっている。一方、DEAは伸縮可能な電極によって誘電ゴムが挟まれたキャパシタ構造で静電力によって駆動するものである。この動作には一般に1 kV以上の高電圧が必要であるが、電流値は極めて小さく完全にドライな環境で駆動し、誘電ゴムにあらかじめ歪みを加えることで極めて大きな変形を実現することができる。そのため、デバイス系の研究者やロボットへ応用しやすいメリットがあり、多くの研究者がDEAの研究を進めている。なお、ソフトアクチュエータとは異なるが、国内ロボットメーカーでは、関節を柔らかく制御することによって柔らかい運動を実現し、人間と共存できるようなコ・ロボットの開発が進められており、そのためのトルク制御などの制御技術などに進展がみられる。

ここ数年のロボット自律制御の大きなトレンドとしては、「Deep Learningのロボット自律制御への積極的な利用」と「ロボットと人の協調制御の発展」がある。これまでも強化学習などの機械学習手法がロボット自

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

律制御に積極的に取り入れられてきたが、2018年以降、IEEE Robotics and Automation Society (RAS) の International Conference on Robotics and Automation (ICRA) で Deep Learning を利用したロボット自律制御手法がさかんに提案されるようになった。Deep Learning のロボット制御への応用の初期段階では、ドローンの姿勢制御やセンサ値の解析、細胞のマイクロマニピュレーション、脳内血管を回避しながらの脳内への管子挿入制御など、さまざまな角度からの利用が試みられた。このような数年間の多岐にわたるトライアルを経て、Deep Learning に代表される機械学習がロボット自律制御に適用できる場面が明確になりつつある。機械学習が自律制御に活きるのはロボットの運動制御そのものではなく、比較的安定で変化の少ない周囲の環境下で状況を判断して動く方向や条件を自律的に決定する、という使い方である。一方、模倣学習や姿勢・運動制御のようにリアルタイム性が求められる対象に対しては、Deep Learning や強化学習に限らず、機械学習を用いたアプローチはいまだ研究段階である。その最大の理由は、周囲環境の不確実性への対処が根底にあり、いわゆる「開かれた環境」への対処は機械学習でもいまだ乗り越えられていない大きな問題として残っている。

もう一方のトレンドである「人とロボットの協調制御」では、高齢者や障がい者の運動補助ロボットやリハビリテーションロボットの発展がみられる。EU で CYBATHLON と名付けられた障がい者補助ロボットを用いたスポーツ大会が開かれるなど、その活動が世界的な中心となりつつあり、義手・義足、外骨格ロボットなどを利用して対象者・病院・研究機関・企業が一体となった取り組みが積極的に進められている。このように人とロボットが協調して動作する部分自律 (Partial Autonomy) がよりさかんになってきている。また特筆すべき点として、ロボットの部分自律制御をより最適に行うために人の運動制御原理を理解するという研究が工学・ロボット制御の視点からさかんに進められている。RAS の Technical Committee (TC) on Human Movement Understanding などの活動もあり、人の運動制御の理解が深まることで、人の動きと親和的にロボットを制御する技術は一層進展することが期待される。

(4) 注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

ソフトロボティクスに関する新技術分野の1つとして、3Dプリンタ (付加製造法)、レーザカッター等を含むデジタルファブリケーションがあげられる。例えば、複数の材料を3次元造形可能なマルチマテリアル3Dプリンティング技術が2019年にNature誌に掲載され、硬さの異なる部品を3Dプリンタで設計して、アクチュエータとボディを一体化した構造を作製し、移動できるソフトロボットのデモンストレーションに成功している。これらの技術によって、センサ、アクチュエータ、配線を埋め込んだデバイスの設計が可能になる。プリントできる素材などの改良も進み、従来の付加製造法では問題であった材料の強度も徐々に改善され、構造部材なども付加製造によって作り出すことができるようになった。一方、付加製造特有の精度確保や機構設計法、あるいは材料的な考察は続いており、付加製造のためのマニファクチャリング工学の確立がまたれる。特に、ソフトロボティクスとしては高分子材料などの柔らかい素材をどのように安定に活用できるかが重要である。

ソフトアクチュエータに関しても新たな技術が出てきている。DEAについては、精密作製プロセスとエラストマーの薄膜化技術の統合によって低電圧化に成功し、自律駆動できるセンチメートルサイズの移動ロボットが報告されている。柔軟な機構の概念をさらに拡張するために、化学や物理学を背景とした仕組みが研究されている。例えば、Jamming 転移 (砂のような粉体が固体や流体のように振舞う性質) を利用し、どのような形状にもフィットできる Jamming Gripper が研究されている。空気圧を用いた人工筋肉の研究がデジタルファブリケーション技術と融合してさかんに行われているが、空気圧を生成するポンプは大きくて

重いためシステムが肥大化し、騒音が大きいため用途が限定されている。これに対し、最近、電気流体力学 (ElectroHydroDynamics: EHD) と呼ばれる物理化学的な現象を用いたソフトポンプが報告された。このソフトポンプは伸縮可能な電極とエラストマーで構成され、ポンプ内には誘電性液体が満たされている。電極近傍で生成するイオンが電界によって加速され、結果として誘電液体が運動する。このポンプとアクチュエータが一体化した構造を設計し、完全に電気駆動できる流体駆動型の人工筋肉をデモンストレーションし、ウェアラブルデバイスへの応用展開も示されている。このように物理化学的な変化を活用することで、これまでのメカトロニクスを基礎としたロボティクスになかった新しい展開が起こりつつある。

AI技術とソフトセンサ、アクチュエータに関する融合研究も報告されつつある。例えば、空気圧人工筋に導電性材料を組み込むことで、センサ機能を付与した人工筋をブリヂストンと東京大学の研究グループが開発している。人工筋を構成するゴムにヒステリシスや非線形性とリカレント型ニューラルネットワークの学習法の一つであるリザーバーコンピューティング (Reservoir Computing) を組み合わせることで、極めて精度良くリアルタイムに変位を推定することに成功している。外部に変位センサを取り付けることなくデバイスを設計できることが期待される。

IEEE Soft Robotics 学会では、無限次元を持つ柔らかいロボットをどのようにモデル化し、制御するか、について多くの発表がある。特に、近年は進展が著しい学習法をソフトロボットのモデル化や制御に使うという動きが活発化している。また、ロボット自律制御の観点では、ソフトロボティクスの制御原理確立の議論が注目される。従来の一般的なロボット制御ではモデルベース制御がその基本であったが、モデル化が難しいソフトロボットの制御では新しい制御概念の構築が必要である。これまでは、Deep Learningなどの機械学習を用いてそれぞれのデバイス・環境に合わせた手法で制御器を開発することが多かった。しかし、統一された制御概念確立の必要性がRASのTechnical Activity Board Meetingでも指摘されるなど、ソフトロボットの普及には必須であり、さまざまな方面からその確立に向けた議論が進められている。

手術支援ロボットについては、徐々にではあるが実用化されつつある。国内では2019年5月に、通常の鉗子を挿入して現状の低侵襲な外科手術を遠隔に実施できるマスタスレーブ型ロボット「The Senhance Surgical System」(TransEnterix) が国内で薬事承認を得て、埼玉医科大学に導入されている。また、2019年6月に人工股関節全置換術を支援し、海外ではすでに多くが導入されているロボットMAKOが日本で保険適用となり、今後の国内での普及が注目される。海外の事例としては、2019年10月に英国CMR surgical社のコンパクトな手術支援ロボットVerisusのインドの病院への導入、2019年6月にオランダPreceyes社が眼科手術支援用のマスタスレーブ型ロボットのCEマーク取得、機能性脳疾患の手術（定位脳手術）を補助する医療ロボットKYMERO（2016年にKoh Young Technologyと延世セブランス病院が共同開発）が2年間の臨床試験を経て2020年8月から臨床の現場に導入、2020年3月に韓国国内で承認を受けた人工関節手術ロボットCUVIS-jointを韓国CUREXO社がインド最大のインプラント企業Meril Healthcare社に最小で53台を輸出する契約締結、などがある。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

米国では、2018年にNSFがContinuum, Compliant, and Configurable Soft Robotics Engineering (C3 SoRo) という領域を設定し、総額2千万ドルで10個の学際融合チームに実質2019年から4年間付与される。2020年のIEEE RoboSoftの実行委員長がC3 SoRoの研究代表者であり、開催地が米国であるということも関係しているが、この会議では口頭発表60件のうち半数以上の31件が米国からの発表であり、このプロジェクトが米国におけるソフトロボティクスの推進に大きく貢献している。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

EUでは、Horizon 2020により多くのロボット研究が支援されている。ソフトロボット関係では、SoMa - Soft-bodied intelligence for Manipulation (2015年～)、Self-Healing Soft Robotics (Future and Emerging Technologies (FET) プログラム、2019年～) などがある。手術ロボット関係では、EDEN2020 (低侵襲脳神経手術ための統合技術プラットフォーム、2016～2020年)、SMARTSurg (手術支援ロボットプラットフォーム、2017年～)、SARAS (AIによるロボット手術支援、2018～2020年) などがある。義肢・外骨格ロボット関係では、SoftPro (義手・リハビリテーションのためのシナジーベースのオープンソース基盤・技術、2016～2020年)、CYBERLEGS++ (ロボット義足・外骨格、2017～2020年)、MyLeg (埋め込み型の筋電ロボット義足、2018～2021年)、Xosoft (ソフトな生体模倣外骨格、2018年～) などがある。また、さまざまな外骨格ロボットや義肢を共通の環境で評価するための試験場を作り、そこで実験を行うことで世界標準規格の作成をめざしている Euro Bench プロジェクトのように、新規技術のベンチマークや標準作成そのものがプロジェクトになっているものもある。さらに、脳活動のロボットへの応用として、EUのHuman Brain Projectが脳科学の成果をロボットへ積極的に転用する動きが進んでいる。

中国では2011年の12回目の5年計画においてロボットを重点分野と位置付けて以来、活発に研究開発が行われており、「ロボット産業発展計画 (2016～2020年)」の象徴的な10製品のなかに、手術支援ロボットが明記されている。これらにより、Beijing Medical Robotics Industry Innovation Center (IMC) などの政府主導によるR&Dセンターが設置されている。

韓国は今後5年間で総額1.2兆ウォンの予算を投入する大型医療機器開発プロジェクト「凡部處全周期医療機器研究開発事業」が行われる。手術ロボットだけではなく、手術支援用ロボットには人工知能融合という条件付きのことが多い。

日本では、ロボット技術の研究開発と社会展開に向けた各府省のさまざまなプロジェクトが立ち上がっている。要素技術開発を目的としたものとしては経産省の「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」(2015～2022年度)がある。ソフトロボット関係では、異分野の若手研究者がソフトロボット学を構築する試みとして、科研費新学術領域「ソフトロボット学の創成:機電・物質・生体情報の有機的融合 (代表:鈴森康一)」(2018～2022年度)が推進されている。身体拡張に関するものでは、JSTのERATO「稲見自在化身体プロジェクト」(2017～2022年度)があり、ウェアラブルロボットを利用した身体拡張の研究が進められている。手術ロボット関係では、AMEDの「高度遠隔医療ネットワーク研究開発事業」(2020年～)が開始され、遠隔での手術支援ロボットの実証研究とガイドラインの策定などを行っていく。また、内閣府のムーンショット型研究開発制度により、「ムーンショット目標3:2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」が設定され、自律制御技術などの革新的な技術開発により人と共生するロボットの実現をめざして2020年度から開始される。

(5) 科学技術的課題

ソフトロボット研究において検討すべき課題の1つとして、束縛されていないソフトロボット (Untethered soft robots) の構築があげられる。これは、ソフトアクチュエータを駆動させる技術の多くが空気圧などの流体アクチュエータとポンプを基礎としているためであり、Nature Electronics誌においてレビュー論文が書かれ、その重要性が議論されている。完全に電気駆動型のDEAやEHD等のソフトアクチュエータ技術をさらに発展させつつ、積極的に物理化学現象を活用し新技術を探索することも重要である。

自己修復可能な材料などを含むソフトロボット研究に適した材料開発も必要である。ロボットに適用することを考えると、材料の機械的特性に着目されがちであるが、自己修復能力を含めた化学的特性、センサとして

用いるための電気的特性など複数の面から材料の特性を評価し、目的に合った材料を新たに開発することがソフトロボティクスの技術シーズとして求められる。また、新たな材料を用いた構造設計も重要であり、特にここ数年進歩の速い3次元プリンティングなどの付加製造法を用いることなども考えておく必要がある。柔らかさの設計法として、自然界でうまくいっている形態を模倣する生物模倣型設計も重要であり、目的とする機能を実現するために生物がどのような形態を利用しているか、それをどのように模倣するかなど考える必要がある。

環境に煩雑さの残る開かれた環境での自律制御は依然として重要な未解決な問題として残っている。Deep Learningといった機械学習によるBig Dataをもとにした最適化では、時々刻々と変化するような環境の煩雑さには対応できないことも明確になってきた。この糸口としては人の運動制御原理の理解が役に立つ可能性があり、今後ロボティクスの視点から運動制御原理の解明が進むことが期待される。また、部分自律における課題としては「主体感」の問題がある。人とロボットが協調する際、人が「ロボットに動かされている」、「ロボットに合わせている」という感覚が強くなってしまうとロボットと協調することが人にとって大きなストレスになりかねない。このため、人とロボットの協調では、自分で動いているという主体感を強く持てるようなシステムにしていく必要があり、工学的な技術だけでなく医学的・心理学的なアプローチと融合しながら技術を確立していく必要がある。

（6）その他の課題

日本国内では先駆的にソフトロボットが研究されていたが、現在は欧米や中国が研究の中心となっている。これは、先進的ロボティクス研究に、北米ではDARPAやNSF、ヨーロッパではEUなどから継続的な大型研究費の支援がなされていることが背景となっている。わが国においても、ソフトロボティクスのような萌芽的分野への先行的な投資を促す施策や、若手研究者らの独立した研究環境を提供することなど、継続的な研究支援が望まれる。

今後、ロボティクスは遠隔診療や再生医療などの医学分野、テレワークなどを利用した分散社会の実現やインフラの整備点検といった新しい街づくり、自動運転や自動仕分けなどを用いた流通分野、など多岐にわたる分野での活躍が期待される。そのため、研究の段階から分野をまたいだ議論を行い、ロボット自律制御に求められる機能など、新たな基盤技術として求められるものをあぶりだす必要がある。また、その中で各技術分野のバックグラウンドを持ちつつ、異分野の知識を吸収しその可能性と限界を見据え、それらの活用を考えられるような若手の育成が必要である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	- ソフトロボット開発や人の運動制御原理の理解にもとづく部分自律などの概念が作られている。 - ソフトロボット関係の学術論文は指数的に増大している。 2020 IEEE Soft Robotics では口頭発表の10/60を占めた。 - 新学術領域ソフトロボット学が立ち上がっている。 - 遠隔操作への期待が高まっており、AMED 高度遠隔医療ネットワーク研究開発事業が開始された。

	応用研究・開発	○	→	・ S-muscle 社、SoLARIS 社、株式会社イノフィス等の大学発ベンチャーが登場している。 ・ 各ロボットメーカーより、さまざまな協働ロボット（コ・ロボット）が発表されている（2019 国際ロボット展）。 ・ 医療応用や Human Augmentation の分野での応用利用が期待される。 ・ 海外ではさまざまな手術支援ロボットが実用化あるいは実用段階に入っているなかで、わが国の動きはやや弱い。
米国	基礎研究	◎	↗	・ ソフトロボット関係の学術論文は指数的に増大し、質の高い論文も多い。 ・ NSF C3 SoRo Project が推進され、IEEE Soft Robotics では口頭発表の半数（31/60）が米国からである。 ・ Harvard 大学では多数の異分野融合プロジェクトが立ち上がっている。 ・ Lewis らのファブリケーションに関する研究が目立つ。 ・ マイクロ・ナノロボット、ソフトロボットの開発が活発。医療ロボットや AI などこれまで通り多数の研究発表がある。
	応用研究・開発	◎	↗	・ Harvard 大学の研究グループのメンバーらが Soft Robotics Inc. を設立し、物流分野に参入。 ・ Soft Robotics Inc. はソフトグリッパと AI によって様々な形状の物体をピッキングすることをコア技術とし日本へも展開している。 ・ 自律制御に関しては、基礎的なものよりも応用とリンクした研究がさかんである。 ・ アカデミックな分野にはあまり出てこないが、軍事応用はかなり進んでいるようである。 ・ 米国 Intuitive surgical 社が、肺の気管支内の生検を実現する柔軟で細径なロボット Ion を開発した。
欧州	基礎研究	○	→	・ Horizon 2020 における様々なプロジェクトにみられるように、ロボットに関する基礎研究が継続して行われている。 ・ 英国、イタリア、ドイツ、スイスの順で学術論文が多く出版されており、質の高い研究を展開しつつある。 ・ SHERO プロジェクトなどが推進されている。 ・ 英ブリストル大学ソフトロボティクスセンターで研究が進んでいる。 ・ 基礎的な研究成果の応用への展開が早い。
	応用研究・開発	○	→	・ 応用技術の世界標準にしてい動きが強く、応用プロジェクトと標準化プロジェクトが同時に走っている。 ・ 英国 CMR のロボット Verisus の開発が進んでいる。
中国	基礎研究	○	↗	・ ソフトロボットに関する基礎研究の学術論文が約 70% 占め、学術論文は指数的に増大している。 ・ 目立った動きはないが、Soft Robotics Journal に中国発の論文が増加している。 ・ 動物実験に対する倫理規定の低さから、脳神経系の活動に関する基礎的な実験も多い。 ・ 医療ロボット関連の論文数の増加が示すように、5G を用いた遠隔操作や AI を活用したものなど活発に研究が行われている。
	応用研究・開発	○	↗	・ コ・ロボットに関しては、DLR など研究が進んでいる。 ・ 5G などの通信や画像処理といったソフトウェア分野での応用は積極的であるが、自律制御に関しては応用分野では目を見張る成果はあまりない。 ・ 手術支援ロボット関連のベンチャーだけでも多数存在している。整形外科や低侵襲外科領域でのロボットの開発がさかんである。

韓国	基礎研究	○	↗	・ソフトロボット開発などの基礎研究は進んでいる。またICRA開催に立候補するなど、基礎研究拡大に積極的である。 ・ソウル大学ではKyu-Jin ChoらがHuman-Centered SoFT (Soft robotic Future Technology) Centerを設立している。 ・DGIST-ETH Microrobotics Research Centerにおいて、マイクロロボットの研究が行われ着実に成果をあげている。
	応用研究・開発	○	→	・ソウル国立大学ロボティクスセンターでは、ウェアラブルロボットに関する研究が進んでいる。 ・人工関節手術ロボットCUVIS-jointが韓国内で実用化され、インドでの販売展開など着実に成果をあげている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ソフトロボティクス（システム・情報分野 2.2.1）
- ・生物規範型ロボティクス（システム・情報分野 2.2.2）
- ・生活支援ロボット（システム・情報分野 2.2.7）
- ・MEMS・センシングデバイス（ナノテク・材料分野 2.3.4）

参考・引用文献

- 1) K. Suzumori, S. Iikura and H. Tanaka, "Development of Flexible Microactuator and Its Applications to Robotic Mechanisms", *Proceedings, 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1991) : 1622-27. doi : 10.1109/ROBOT.1991.131850
- 2) Y. Osada, H. Okuzaki and H. Hori, "A polymer gel with electrically driven motility", *Nature* 355, no. 6357 (1992) : 242-244. doi : 10.1038/355242a0
- 3) R. Pelrine et al., "High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%", *Science* 287, no. 5454 (2000) : 836-839. doi : 10.1126/science.287.5454.836
- 4) M. A. Skylar-Scott et al., "Voxelated soft matter via multimaterial multinozzle 3D printing", *Nature* 575, no. 7782 (2019) : 330-335. doi : 10.1038/s41586-019-1736-8
- 5) X. Ji et al., "An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators", *Sciences Robotics* 4, no. 37 (2019) : eaaz6451. doi : 10.1126/scirobotics.aaz6451
- 6) E. Brown et al., "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, no. 44 (2010) : 18809-18814. doi :

10.1073/pnas.1003250107

- 7) V. Cacucciolo et al., “Stretchable pumps for soft machines”, *Nature* 572, no. 7770 (2019) : 516-519. doi : 10.1038/s41586-019-1479-6
- 8) R. Sakurai et al., “Emulating a sensor using soft material dynamics : A reservoir computing approach to pneumatic artificial muscle”, *Proceedings of 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)* , (2020) : 710-717. doi : 10.1109/RoboSoft48309.2020.9115974
- 9) S. I. Rich, R. J. Wood and C. Majidi, “Untethered soft robotics”, *Nature Electronics* 1, no. 2 (2018) : 102-112. doi : 10.1038/s41928-018-0024-1
- 10) N. Mohajerin, M. Mozifian and S. Waslander, “Deep Learning a Quadrotor Dynamic Model for Multi-Step Prediction”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2018), http://ncfrn.mcgill.ca/members/pubs/2017_ICRA_Grey_Box_model.pdf(2020年12月8日アクセス)
- 11) A. Segato et al., “GA3C Reinforcement Learning for Surgical Steerable Catheter Path Planning”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2020). doi : 10.1109/ICRA40945.2020.9196954
- 12) N. Sünderhauf et al., “The limits and potentials of deep learning for robotics”, *International Journal of Robotics Research* 37, no. 4-5 (2018) : 405-420. doi : <https://doi.org/10.1177/0278364918770733>
- 13) J.M. Tom et al., “First-in-human robotic supermicrosurgery using a dedicated microsurgical robot for treating breast cancer-related lymphedema : a randomized pilot trial”, *Nature communications* 11, no. 1 (2020) : 757. doi : 10.1038/s41467-019-14188-w
- 14) 下田他「人に主体感を持たせるロボットによる運動補助」『日本AEM学会誌』27巻4号(2019) : 412-418. doi : <https://doi.org/10.14243/jsaem.27.412>

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

2.3.6 量子情報・通信

(1) 研究開発領域の定義

量子力学が記述す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、古典系では実現できない情報処理機能・性能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、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。

(2) キーワード

量子情報科学・技術、量子コンピュータ、Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) computing、量子誤り訂正、量子シミュレータ、量子アルゴリズム、量子アニーリング、量子通信、量子暗号鍵配送、量子中継、量子ネットワーク、超伝導量子ビット、冷却原子、イオントラップ、半導体量子ビット、光量子ビット、スピン量子ビット、トポロジカル量子計算、量子乱数生成、量子メモリ

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

量子力学は、20世紀において半導体、NMR、レーザなどの基礎となり、私たちの生活を陰ながら支えてきた。21世紀に入り個々の量子系を精密に制御する技術が発展・成熟してきたため、その量子性を積極的に利用することによって初めて可能となる応用をめざした研究が進められている。その代表例は、従来の古典的な論理演算に基づいた情報処理の原理を量子力学へと拡張する、量子情報処理である。ムーア則に基づく情報処理能力向上への減速感から新たな概念の情報処理技術への社会的なニーズも高く、量子情報処理は学術的な価値だけでなく社会課題の解決に直接貢献できる技術としての役割が期待される。2019年に、従来型コンピュータのパフォーマンスを量子コンピュータが超える「量子優位性」を証明した、と主張する実証実験の報告がなされ、量子情報処理の実用性にエビデンスを与える流れがみえてきた。計算原理として量子力学を利用する量子コンピュータや、実際の物質系と同じ模型を人工的に作り出す量子シミュレータは、従来の古典コンピュータで解くには効率が悪い問題を高速で解くことができると期待されている。

また、量子性は計算速度だけではなく、通信におけるプライバシー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ことができる。近年、軍事・外交機密を筆頭に、ゲノムデータや製薬情報など、長期間秘匿性を担保する必要がある情報が電子的に伝送、保管、処理されるようになっているが、実用的な量子コンピュータが実現されると、現代の暗号方式で守られていたデータが全て解読される事態が懸念される。この懸念を解決するには、将来的な通信の秘匿性・安全性確保に有用な量子暗号技術や、グローバルなセキュアサイバー空間を実現するための、衛星光通信技術やネットワーク構築技術を含む量子中継・量子ネットワーク技術が必要となる。また量子暗号技術は、フィジカル空間とサイバー空間が融合したSociety 5.0の可用性と安全性を高めるために重要である。一方で、量子中継技術は異なる情報担体（例えば光子と超伝導量子ビット）の間のインターフェースともなりうるので、分散型量子コンピューティングの実現にも重要である。

真に有用な量子コンピュータの実現には、新たな材料系や集積デバイス、実装、システム技術などの基盤技術の総合的な高度化が必須であり、量子コンピュータは広く科学技術領域の研究開発にかかわるフラッグシップハードウェアとしての役割を果たしうる。また、量子情報科学は、これまで考えられてきた問題に新た

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

な基礎的視点を与える。量子情報を経由することによって、例えば、従来の情報科学の定理が簡単に証明される、新たな古典アルゴリズムの発見に貢献するなど、従来の情報科学へのフィードバックが期待される。また、新奇な物性をもつ物質の発見や、ブラックホールなどの基礎物理への多大な貢献につながりつつある。量子情報科学は、未来のテクノロジーや基礎学理に大きく影響を与える研究開発領域であり、私たちの日常生活を根底から変えうる可能性を秘めている。

〔研究開発の動向〕

・量子コンピュータ・量子シミュレータ

2020年代を迎えても量子コンピュータの研究開発は加速的な拡大傾向が続いている。その流れは世界中に及び、各国がそれぞれの国家戦略を構築しそれに基づいた新たな国家プロジェクトが進んでいる。特に米国、EU、中国は巨額の投資の下で活動しており、今後にわたりその動きが注目される。日本でも内閣府により量子技術イノベーション戦略が2020年に策定され、理化学研究所を中心とした国内産学連携体制が整いつつある。産業界としては米国 Google や IBM、インテル、マイクロソフトなどの大企業に加えて、米国、カナダ、欧州ではベンチャー企業も参入し存在感を高めている。日本の産業界でも NEC、富士通などハイパフォーマンスコンピューティングに強い企業の参入が始まった。

研究開発において現在先行している超伝導量子コンピュータでは、Google、IBMなどのトッププレーヤーは50～70量子ビットのレベルでの高精度な量子ビット制御に取り組んでいる。Googleは2019年に53量子ビットの量子コンピュータで量子優位性を実証したと発表し、世界中で大きな話題となった。量子優位性を実証するために設計されたタスクに対してではあるが、用いられた量子コンピュータがハードウェア技術として古典コンピュータを凌駕するレベルにいたったことが実証された。超伝導量子コンピュータではマイクロ波を用いた量子ビット制御が行われるが、これに必要な高密度（多ビット）の高周波生成・制御システムの開発、パッケージ技術、それを格納できる冷凍機の大型化に成功したことを意味しており、ハードウェア技術として100量子ビット以上のスケーラブルな量子ビットの精密制御が可能なレベルに到達しつつあるといえる。また、今後数年間で1000量子ビットが達成されると期待されている。一方で、量子ビットの数が増えるだけでは性能を発揮することができないので、量子ビット操作に伴う演算精度にも注目していく必要がある。量子ビットの方式からハードウェア構成にいたるまで、精度とスケーラビリティをどのように両立し、実現するかが今後の競争軸となるだろう。

超伝導量子ビット以外の方式ではイオントラップ方式で集積化が進んでいる。研究開発で先行し、クラウド経由でプロセッサの提供を行っている IonQ に加えて、Honeywell も2020年に開発を始めたことが発表された。光を量子ビットに用いる方式でも、スケーラビリティを確保する手法や、シリコンフォトニクス等を活用する小型集積化への試みがなされている。シリコン量子ビット方式では、2ビットレベルの高精度（99%超）の量子状態制御に成功した。

現状の量子コンピュータは、1つひとつの量子ビットに生じる誤りはわずかであっても、計算を長く続けるとそれが積み重なって間違った計算結果を生んでしまう。したがって、大規模な量子コンピュータの実現には、量子誤り訂正を実装した、ノイズ耐性のある量子コンピュータの実現が必須である。誤り訂正に必要となる量子ビットの数は100万とも1億ともいわれており、そのような大規模集積化の実現には20年以上が必要とされている。量子誤り訂正付きの量子コンピュータ実現はさらに先とみられてきたが、「量子優位性」というマイルストーン的な成果が出た流れのなかで、量子誤り訂正の実現へ向けた基礎研究が本格化するものと推測される。その一方で、演算精度がさほど高くなく、量子ビット数も数十から数百程度といった近未来に実現

可能な量子コンピュータでもスーパーコンピュータを上回る潜在能力を持っているため、それを有効活用しようという動きが出てきている。この新たな方向性は Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) 技術と呼ばれ、世界的に活発な探索が行われている。特に、量子コンピュータを用いた変分量子アルゴリズムの量子化学計算や機械学習への応用がさかんに研究されている。それに加え、エラーによる影響を統計処理によって補償するノイズ補償技術の開発も進められている。

ここまで説明したのはゲート型量子コンピュータ（万能量子コンピュータ）と呼ばれる。その高速性の保証されたゲート型量子コンピュータ以外にも、超伝導量子ビットを用いてイジング問題の最適化に特化した専用量子マシン、いわゆる量子アニーラの研究開発がカナダのベンチャー企業 D-Wave や NEC を中心に着実に進められている。超伝導量子アニーラ方式をとるカナダの D-Wave 社は 5000 量子ビット超の商用ハードウェアシステムを発表するなど集積化を進めており、関係のユーザー企業やミドルウェア企業とのエコシステム構築が進んでいる。冷却原子による量子シミュレーション技術においても、シミュレーションの自由度を向上させるリュドベリ軌道電子の高速生成と制御に成功するなど実用性拡大へ向けた活動が進んでいる。

・量子通信（量子暗号、量子中継・量子ネットワーク）

量子暗号鍵配送（QKD）は 1984 年の BB84 プロトコルの提案に始まり、一般的な攻撃に対する安全性証明や QKD をサブプロトコルとして用いることを保証する組み立て可能性（Composability）の証明が進み、2010 年ごろまでには理論的基礎が確立した。その後、装置の不完全性があっても成立する安全性理論の開拓が始まり、2010 年ごろからは実験家と共同で、実装されたデバイスの特性にまで踏み込んだ解析と対策が進められている。この実装安全性の研究は、欧州電気通信標準化機構（ETSI）や国際標準化機構（ISO）における QKD 装置の安全性保証の標準化の動きに強い影響を与えている。同時に実装の不備を突く古典的デバイスによる攻撃法（サイドチャネル攻撃）の研究も一時脚光を浴びた。現在は攻撃方法とその対策を整理することで安全性保証の標準に組み込まれようとしている。

QKD の弱点とされていた伝送距離と速度の問題を解決すべく研究開発が進められ、2015 年ごろまでにはデコイ BB84 プロトコルを実装したクロック周波数 1GHz 台の実用的な装置が、東芝と NEC によって完成された。近年、さらなるクロック周波数向上に向けた研究開発がスイス、中国、日本などで始まっている。

連続量（CV）QKD は従来型のコヒーレント光通信の部品のみで構成できるため、既存技術との親和性が高く、低価格の QKD 装置となりうる。2019 年にホモダイン検出の周波数弁別特性を活かして光通信とのファイバコア共有が実証され、近距離での実用化が期待される。その一方で、実装安全性を含めた無条件安全性の証明が未だになされておらず、デコイ BB84 の水準には達していない。

一方、QKD は一度に鍵を伝送できる距離、速度に限界がある。このため現状では、安全性の保証された局舎（trusted node）を介したネットワーク化が行われている。最初期の例としては、米国の高等研究計画局（DARPA）が Washington DC で行った実験がある。ネットワークの制御まで行った例としては、ウィーン市内で欧州の研究機関が構築した SECOQC がある。日本でも 2005 年ごろから量子暗号ネットワークの検討が始まり、2010 年世界最高速のネットワークとして Tokyo QKD が稼働した。2017 年に中国が北京 - 上海間 2000 km の幹線と合肥などでの都市ネットワークを完成させ大型化で先行している。米国でも民間企業が QKD ネットワークを提供している。欧州でも EU と各国（英国、ドイツ、イタリア、スペインなど）が量子ネットワークの建設を進めている。最近では QKD 装置を局舎でつなぐだけでなく、鍵生成の制御、生成した鍵の管理、供給といった安全な鍵をアプリケーションに提供するプラットフォームとしての研究開発が進められ、一部は国際電気通信連合・電子通信標準化部門（ITU-T）で標準化作業が行われている。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

量子中継は量子もつれスワッピングを用いて隣接しているノード間の量子もつれを離れたノード間の量子もつれに変換していくものである。そのためノードにおける2つの量子ビットの量子もつれ状態（Bell状態）測定の実現が注目された。また、伝送路の光子損失のため光子対の片方が届かないことによるスケールビリティの消失の問題が指摘され、研究の1つの焦点は量子メモリに移った。量子メモリの主な構成要素としては、原子集団（atomic ensembles）、共振器量子電磁力学（cavity QED）、結晶中の色中心（color defect centers）などが提案されている。メモリ（コヒーレント）時間、フィデリティ（忠実度）など全ての性能指標を満たすものはまだ実現されておらず、しばらくは複数の候補が並行して研究されるものと考えられる。量子メモリの研究開発とともに、量子メモリのコヒーレンス保持時間の要求を低減させるためのアーキテクチャの研究も進められている。今後は誤り訂正技術の研究開発も必要となる。量子メモリを用いない方法として、光だけによる量子中継も提案されているが、光子のクラスター状態を用いた量子誤り訂正を基本としているため、実現には解決すべき問題が多く残されている。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

・量子優位性を実証できるレベルの量子コンピュータシステム技術

Googleが超伝導量子ビット方式で開発した53量子ビットマシンで量子優位性を実証した、と2019年に発表した。ランダムに選ばれた量子ビットに対しての1量子ビット演算と隣接する量子ビットに対する2量子ビット演算を繰り返すというランダム量子回路からの出力をサンプリングするというタスクにおいて、量子コンピュータが200秒で実行できたのに対して既存のスーパーコンピュータでは1万年以上かかると見積もられた。スーパーコンピュータの計算手法の改善による時間短縮も報告されているが、依然として量子コンピュータでの200秒に対するギャップは埋まっていない。また、スーパーコンピュータが数千ノードの計算機システムであるのに対して、量子コンピュータが1台の希釈冷凍機中の1チップを用いた計算であることを留意しておくべきである。この成果は、50ビットレベルのエラーレートの極めて小さい量子状態制御がハードウェアとして実現したことを意味する。すなわち、量子ビット、読み出し回路、結合回路の設計と超伝導チップの均一性の良い集積技術、チップ同士を3次元的にフリップチップボンディングする多層配線技術、室温からのマイクロ波による精密制御技術が総合的に動作できる環境が整ったといえる。

・NISQ時代の研究開発

NISQ技術の主なターゲットは、(i)量子による計算の加速を科学的に実証する量子優位性の実証、(ii)大規模な量子コンピュータに発展させる要素技術の実証基盤の確立、(iii)古典コンピュータと合わせてその性能を最大限に引き出す古典-量子ハイブリッドアルゴリズムの開発、の3つである。(i)については、2019年にGoogleによって量子優位性が示された。しかし、これは特定のタスクにおいて実時間でスーパーコンピュータに比べて速い、という結果にすぎず、計算量理論的な計算の加速の実証にはまだいたっていない。量子計算理論分野では、量子加速を実験的に検証するための方法が構築されつつある。

長期的な視点に立ち、大規模な量子コンピュータを実現するためには、量子誤り訂正が必須であることは依然として変わっていない。(ii)では、50量子ビット級の量子コンピュータを用いて1つの論理量子ビットに対して量子誤り訂正を実証することが次のマイルストーンになるであろう。また、1万量子ビットへと拡張するためには、現在の制御方法をそのまま拡張するのでは不十分である。大規模化に向けた技術的課題をあぶり出し、それを解決するための方策をNISQデバイスで検証しながら研究開発を進めることが理想的である。

(iii)では、NISQを意味のあるタスク、量子化学計算、近似最適化、機械学習などへ応用する試みが行わ

れている。古典コンピュータでもできる処理と量子コンピュータが得意なタスクを分離し、それぞれを接続して処理を行う量子-古典ハイブリッドアルゴリズムの研究が進められている。

• QKD 商用化の動き

中国でQKD機器を開発しているQuantumCTekが、2020年の7月に上海NASDAQ市場に上場し、初日に914%という記録的な値上がりを記録した。このことは研究や安全保障の観点で語られてきた量子暗号技術が民間の投資の対象となったことを示している。日本でも、2020年10月に東芝が、2020年度第4四半期より、国内外での量子暗号通信システムのプラットフォームの提供およびシステムインテグレーション事業を順次開始することを発表した。国内外で、QKDネットワークを構築し、金融機関を中心とした顧客向けQKDサービスを2025年度までに本格的に開始する予定である。

• QKDの長距離化技術

QKDの長距離化技術として、2018年に英国の東芝欧州研究所が、量子メモリを使わずに量子中継1回分の長距離化を実現できるTwin-Field QKD方式を提案し、原理的な実証に成功した。最近では509kmの伝送に成功している。しかし、この方法は異なる光源の間での位相同期が必要になり、実用にはまだ障害が残っている。位相同期は、コヒーレント光通信やCV-QKDと共通な課題であるので、これらの研究開発から解決策が見出される可能性もある。

もう1つの長距離化技術として、衛星を用いたQKDシステム開発の動きがある。現時点で、グローバルな鍵配送を可能にする唯一の方法であることが主な理由である（地上で大陸を横断するためには、他国の領土に局舎を置く必要があり、非現実的）。2017年に中国が世界初の衛星-地上間 QKD 実証を発表しており、また日米欧それぞれで衛星量子暗号の研究開発が進められている。重要な技術要素の1つは光子レベルでの光ビームの捕捉追尾である。

• 量子中継技術

量子中継、または量子インターネットについては、デルフト工科大学（オランダ）のQuTechプロジェクトが注目されていたが、米国でも研究が本格化している。特にシカゴ大学とハーバード大学の研究グループが注目される。シカゴ大学とアルゴンヌ国立研究所は共同で、量子ネットワークのプロトタイプを開発している。2020年2月にシカゴ郊外の敷設済みファイバを使い、52マイル（約84 km）の量子もつれ共有に成功したことを発表した。また、ハーバード大学、MIT、BBNテクノロジーズが共同でBoston-area Quantum Testbedを運用しており、新しいQKDプロトコルやデバイスのテストとともに、量子中継に用いる量子メモリのインストールを行おうとしている。ハーバード大学のグループは1次元フォトニック結晶共振器の中にシリコン空孔センターを入れたデバイスを試作しており、量子中継に必要な量子メモリの候補として注目される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

[日本]

2020年1月に策定された量子技術イノベーション戦略により、わが国として研究開発や産業化・事業化を促進するための指針が示され、イノベーション創出に向けた重点推進項目として、「重点領域の設定」「量子拠点の形成」「国際協力の推進」が掲げられた。

量子コンピュータ関連では、JST ERATO 中村巨視的機械プロジェクト、JST CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」、JST さきがけ「量子の状態制御と機能化」が2016年度に発足した。また2018年度からは文科省Q-LEAPプロジェクトが開始し、理化学研究所における超伝導量子ビットハードウェア開発をフラッグシップとして、イオントラップ、半導体量子ビット、量子ソフトウェアなど、量

子コンピューティングに関する研究が強化されてきている。SIP「光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術」(2018年度～)でイジング型コンピュータ、NISQ コンピュータ等のソフトウェア開発が進められている。2019年度からはJSTさがけ「革新的な量子情報処理技術基盤の創出」が開始され、2020年度からは、NISQ型量子コンピュータの応用研究を中心とする文科省Q-LEAPプロジェクト「量子AIフラッグシップ」が発足し、量子ソフトウェア領域の研究強化が始まっている。同じく2020年度に、内閣府ムーンショットプロジェクトの目標6に「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」が設定された。さらに、NEDOは2020年に「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発/【研究開発項目(2)】次世代コンピューティング技術の開発」に関する公募を行った。このなかに“量子コンピューティング関連技術”があげられており、アニーリングマシン開発および周辺技術開発が含まれている。2020年に、大学などを中核とした産学連携を推進するためのプログラムである、JST共創の場形成支援プログラム 本格型 政策重点分野「量子ソフトウェア研究拠点」が開始した。加えて2020年度からは、持続的な量子技術分野の人材層の強化を目標とした文科省Q-LEAPプロジェクト「人材育成プログラム」が開始した。以上のように、中期的・長期的な目標設定のもと、量子コンピュータ関連の研究が加速されている。

一方、量子通信については、SIP「光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術」(2018年度～)でQKDネットワークの実用化研究が行われている。また、量子通信に関する基盤技術開発の底上げのため総務省の直轄プロジェクトとして「グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」が2020年度から開始される。これは初年度14.1億円を投じて、QKD技術の高度化(高速化、長距離化、耐環境性の向上)とネットワーク管理技術、量子中継技術に関する研究開発を民間企業、大学、国研から12機関が参画して行うものである。

[米国]

米国では、2018年に出された国家戦略方針(The National Quantum Initiative Act)に基づく国家プロジェクト投資が進んでいる。大統領府は2021年度の予算要求として量子情報研究に4億6700万ドルを計上した。エネルギー省(DOE)は2020年1月に、米国内に2つから5つの学際的な量子情報科学(QIS)研究センターを設立するため今後5年間で最大6億2500万ドルを投資すると発表した。他にも全米科学財団(NSF)などからの国家プロジェクトが複数公募されている。

現在米国では量子インターネットの基盤技術開発のためにThe Chicago Quantum Exchange (CQE)が設立され、シカゴ大学とアルゴンヌ国立研究所、フェルミ加速器研究所が中心となり、中西部の3大学と2020年7月現在15企業パートナーが参加している。また、ブルックヘブン国立研究所を中心としてオークリッジ国立研究所、ロスアラモス国立研究所とストーニーブルック大学がニューヨークでテストベッドを建設している。量子インターネットに向けた動きがDOEとその傘下の国立研究所を中心に進められている。

[中国]

2019年には中国科学技術大学(USTC)が超伝導量子ビットで12ビットの動作を報告し、また2020年12月には、光を使った量子コンピュータで量子優位性の実証に成功した、と発表した。USTCは、建設が進められている量子情報科学国家実験室(2020年末に第1研究棟完成)と同じ安徽省合肥市にあり、大型研究開発拠点として中国の研究開発加速の中心となるものと思われる。中国科学院と中国IT大手のアリババ(阿里巴巴)グループは、共同で量子計算実験室を設立し量子情報科学の先進的研究、量子コンピュータの開発に取り組んでいる。現在、11ビットの量子コンピュータのクラウドサービスを展開している。

[欧州]

EUでは2018年にEU Quantum Flagshipが採択され活動している。前半は立ち上げフェーズであ

り、2021年から本格化の予定である。この間、2019年にはQuantERAコンソーシアムによる20Mユーロを投じるプロジェクト公募もなされた。この公募は2017年に次いで2度目である。ドイツでは、EU Flagshipの一翼をなすOpenSuperQプロジェクトで、ユーリッヒ研究所にD-Waveのコンピュータを2021年までに導入する計画を発表している。英国は2014年から進められているThe UK National Quantum Technologies Programmeに対する2019年からの追加投資が表明された。産業界からの投資も含めて総額3億5000万ポンドになる。フランス・イノベーション省（MESRI）が量子国家戦略を2021年1月に発表。量子コンピュータ、量子暗号・通信、量子センサなど7つの分野に5年間で18億ユーロを投資する予定であると表明した。

量子通信基盤の構築に向けたEuroQCI initiativeが進められており、これをサポートするように2019年6月にEuroQCI declarationが採択され、現在25カ国が署名している（2020年10月）。また、QKD実用化のため2019年9月から3年間のプロジェクトOPENQKDが始まっている。ここではQKDを組み込んだ通信インフラの実現をめざして15百万ユーロの予算、38機関（13カ国）からなるコンソーシアムが組まれている。

（5）科学技術的課題

今後は量子ビットの精度向上とシステムとしてのスケーラビリティを同時に実現することがより重要になる。物理研究だけではなく、広く材料科学、デバイス集積技術、3次元実装技術、高周波制御回路、実装部品、冷凍機、システムアーキテクチャなどの広い分野にわたる協業が重要になるものと思われる。これらの技術開発により、現在主流の超伝導量子ビットやほかの方式においても技術的制約・課題が顕在化する可能性があり、どこにブレイクスルーが必要なのかが明確になるだろう。

NISQの応用研究は、この1、2年でかなりの広がりを持った反面、いろいろな課題も浮き彫りになってきた。変分量子アルゴリズムにおける量子状態の表現能力を向上させるためには量子計算のステップ数を増やす必要があるが、パラメータの勾配が消失してしまう問題が生じており、初期パラメータの選択法やパラメータの更新方法において新たなブレイクスルーが必要である。また、扱える問題のサイズにも制限があり、量子化学計算や機械学習などにおいて興味のある対象を扱うにいたっていない。量子コンピュータ実機を使えるメリットを毀損しない形で問題分割し、小規模な量子コンピュータ上で実行可能にするなど、より高度なアルゴリズム設計が求められている。

大規模な量子ネットワークの実現のためには量子暗号通信の高速化や長距離化が必須であるが、長距離化には検出器の低雑音化やTwin-Field QKDなどの新たなプロトコル開発が必要である。また、グローバルネットワークに接続するローカルネットワークでは、低コスト化のために既存の光通信との共存が望まれ、雑音耐性の高いQKDシステムの開発が必要となる。一方、大規模なネットワークでは、異なる方式・異なるベンダの装置の相互接続も課題となる。また、量子セキュアネットワークとしてのキラーアプリの確立も重要な課題である。将来的な全量子ネットワーク実現のためには、十分離れた中継点に置かれた量子メモリ間を光でリンクする必要があり、量子波長変換や光と量子メモリのインターフェース、誤り訂正技術が必要である。

（6）その他の課題

量子技術への国家プロジェクトや産業界からの投資がなされ、研究開発拠点が形成されるなか、世界的に量子技術の人材が不足していくことが予想される。わが国に注目すると、時限的拠点による人材育成以前に、その基盤となる大学における教育体制や安定的地位についた指導側の人材が圧倒的に不足している。基盤予算の削減による大学教員の減少のなか、特に理論分野は海外と比して全くもって脆弱な体制である。国内の

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

研究者への安定的な地位の拡充や、数少ない既存の研究者が研究教育に専念できる環境や制度の構築、待遇の改善による海外研究者の取り込みによる長期的な教育体制を敷かなければ、量子技術の分野で世界と競争し存在感を示すことは難しいだろう。

量子コンピュータや、量子通信の研究開発は、挑戦的・総合的な工学研究の様相を呈し始めており、これまでの物理学のスキルを中心とした量子人材は視野をより広げることが求められる。同時に、周辺の研究開発分野に携わる人材の関与がますます必要となるため、厚い人材層や周辺技術を保有する産業界とは特に連携を図るべきであり、そのための補助金や研究開発コンソーシアムの形成などの体制づくりが望まれる。また、量子技術を啓蒙する場を作り人材の広がりや育成を図る必要があり、量子技術イノベーション拠点ではこのような活動を強化すべきである。

また、各国が国をあげて研究開発に取り組んでいることから、国家間の技術的な機密性が高まることが予想される。最終形態の量子コンピュータばかりでなくそれを構成する各種要素技術も高度な機密技術となり、必要な要素技術の調達が困難になる可能性もある。要素技術を含むキーとなる技術の育成戦略も重要となる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	量子技術イノベーション戦略が策定、基礎研究から実用化へつなぐ戦略と体制ができた。理化学研究所（Q-LEAPフラッグシッププロジェクト）、大阪大学量子情報・量子生命研究部門、慶應義塾大学量子コンピュータセンターなど、拠点形成が進み、関連研究のシナジーがみえてきている。JST ERATO、CREST、さががけ、などのプロジェクトにおいて幅広く基礎研究が支援されている。 量子暗号通信に関する理論的研究は東京大学、名古屋大学、富山大学、慶應義塾大学、NICT、NII、産総研、三菱電機等で行われている。実験的研究もNICT、北海道大学と学習院大学でQKDに関して、大阪大学と横浜国立大学で量子中継に関してそれぞれ活発な研究を行っている。停滞期に比べると上昇傾向にあるが、海外の加速度に比べると相対的に現状維持とせざるをえない。
	応用研究・開発	○	→	Q-LEAP フラッグシッププロジェクト、量子情報処理フラッグシップでは、基礎基盤研究とともに、量子コンピュータや量子シミュレーションの応用研究が進む。イジング専用マシンについては、NEDOプロジェクトにおいて量子デバイスを用いたハードウェア、統合ソフトウェア環境整備、従来型の半導体デバイスを用いた専用マシンの研究開発が進む。NEC（Q-LEAP、NEDO）、富士通（NEDO）など企業からの国家プロジェクトへの参画が見られ、産学連携による遂行体制が確立しつつある。 NICTを中心に、SIPにおいてネットワークと量子セキュアアプリケーションの研究が進められている。衛星量子通信についても実証に向けた研究がソニー、スカパーJSATも参加して進められている。停滞期に比べると上昇傾向にあるが、海外の加速度に比べると相対的に現状維持とせざるをえない。
米国	基礎研究	◎	↗	DOE傘下の国立研究所や大学において古くから量子技術・量子情報科学の基礎研究が続けられてきた。総額1000億円を優に超える米国の国家プロジェクトNational Quantum Initiativeにおいても、基礎研究重視や研究インフラの整備が唱えられており、2020年には新たな量子拠点づくりに巨額の投資がなされる。最近では量子中継ネットワークについての研究も進展。

2.3
俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

	応用研究・開発	◎	→	上記の基礎研究に支えられ、米国では産業セクターが積極的に量子技術の応用研究を進めている。IT企業からは、Google、IBM、インテル（欧州と連携）、マイクロソフト（世界各国と連携）などが応用研究を進め、また、Rigetti computingやIonQなどに代表されるようなベンチャー企業も多数登場している。量子通信分野では、Quantum XchangeがId Quantiqueと協業し、QKD ネットワークサービスを開始した。各地でフィールドテストのための量子ネットワークテストベッドが作られ、衛星量子通信も量子もつれ共有をターゲットにプロジェクトが始まっている。
欧州	基礎研究	◎	↗	国立研究所や大学において古くから量子技術・量子情報科学の基礎研究が続けられてきた。予算規模1300億円（10年）を超えるEU Quantum Technology Flagshipプロジェクトがスタートし、第一次の採択が決定し本格始動した。英国ではQuantum Technology Hubsのもと約400億円規模（5年）の国家プロジェクトが2014年から進む。オランダQuTechを中心とした量子ネットワーク研究Quantum Internet Allianceやジュネーブ大・東芝ケンブリッジ研究所ではQKD研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	オランダ、デルフト工科大学を中心とするQuTechでは、インテルやマイクロソフトと共同して、量子コンピュータの実現や応用に向けた研究が進む。英国Quantum Communication Hubによる量子暗号ネットワークが建設されている。EUにおけるOPENQKD、スペインでのCVQKDによるネットワーク、ドイツでのQuNet Initiativeなど各国で量子ネットワーク開発が進む。衛星量子通信の研究開発もドイツなどで行われている。ETSIによる標準化活動も進展している。
中国	基礎研究	○	↗	第13次五カ年計画のもと、中国科学院を中心として量子情報科学の拠点形成が進む。安徽省合肥市に量子技術や量子情報科学を対象とする量子情報科学国家実験室の第1研究棟が2020年に完成。また、中国科学技術大学で12量子ビット動作を成功させるなど具体的な成果が出始めた。中国科学技術大学のグループは量子暗号でも新しいプロトコルの実証実験を実施。Atomic ensemble量子メモリ研究も進む。
	応用研究・開発	○	↗	アリババ（阿里巴巴集団）、Huaweiに続き、Origin Quantum（本源量子）も、量子コンピュータのクラウドサービスを提供開始。北京-上海間の2000 kmネットワークは現在も稼働中。世界に先駆けて衛星量子通信を成功。量子専門企業の株式が上場され量子が投資の対象にもなっている。ITU-Tでのネットワーク標準化、ISOでの実装安全性の標準化ではリード。
韓国	基礎研究	×	→	現状、量子暗号通信の研究が一部で見られるものの、活発ではない。量子情報処理技術に対する大型国家プロジェクトが発表された。
	応用研究・開発	△	→	SKテレコムがId Quantiqueへの出資、量子乱数源の開発、Korean TelecomがITU-Tを舞台にした標準化活動をそれぞれ行っている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) テレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

関連する他の研究開発領域

- ・量子コンピューティング (システム・情報分野 2.4.2)
- ・物質・材料シミュレーション (ナノテク・材料分野 2.6.4)

参考・引用文献

- 1) F. Arute et al., "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor", *Nature* 574, no. 23 (2019) : 505-510. doi : 10.1038/s41586-019-1666-5
- 2) K. Takeda, A. Noiri, J. Yoneda, T. Nakajima and S. Tarucha, "Resonantly Driven Singlet-Triplet Spin Qubit in Silicon", *Phys. Rev. Lett.* 124, no. 11 (2020) : 117701. doi : 10.1103/PhysRevLett.124.117701
- 3) M. Mizoguchi et al., "Ultrafast creation of overlapping Rydberg electrons in an atomic BEC and Mott-insulator lattice", *Phys. Rev. Lett.* 124, no. 25 (2020) : 253201. doi : 10.1103/PhysRevLett.124.253201
- 4) V. Scarani et al., "The Security of Practical Quantum Key Distribution", *Rev. Mod. Phys.* 81, no. 3 (2009) : 1301. doi : 10.1103/RevModPhys.81.1301
- 5) H.-K. Lo, M. Curty and K. Tamaki, "Secure quantum key distribution", *Nature Photon.* 8, no. 8 (2014) : 595-604. doi : 10.1038/nphoton.2014.149
- 6) A. Tomita, "Implementation Security Certification of Decoy - BB84 Quantum Key Distribution Systems", *Adv. Quantum Technol.* 2, no. 5-6 (2019) : 1900005. doi : 10.1002/qute.201900005
- 7) A. Huang, S. Barz, E. Andersson and V. Makarov, "Implementation vulnerabilities in general quantum cryptography", *New J. Phys.* 20, no. (2018) : 103016. doi : 10.1088/1367-2630/aade06
- 8) M. Sasaki et al., "Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network", *Opt. Express* 19, no. 11 (2011) : 10387-10409. doi : 10.1364/OE.19.010387
- 9) T.A. Eriksson et al., "Wavelength division multiplexing of continuous variable quantum key distribution and 18.3 Tbit/s data channels", *Commun. Phys.* 2 (2019) : 9. doi : 10.1038/s42005-018-0105-5
- 10) S. Muralidharan et al., "Optimal architectures for long distance quantum communication", *Sci. Rep.* 6 : (2016) : 20463. doi : 10.1038/srep20463
- 11) Q. Zhang, F. Xu, Y.-A. Chen, C.-Z. Peng, and J.-W. Pan, "Large scale quantum key distribution : challenges and solutions", *Opt. Express* 26, no. 18 (2018) : 24260-24273. doi : 10.1364/OE.26.024260
- 12) H.-S. Zhong et al., "Quantum computational advantage using photons", *Science* 370, no. 6523 (2020) : 1460-1463. doi : 10.1126/science.abe8770

2.3.7 量子計測・センシング

(1) 研究開発領域の定義

量子力学が記述す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、古典系では実現できない高感度な計測・センシング技術を開発するための領域である。個々の量子や原子集団全体の量子状態を制御しプローブとして用いるもの、複数の量子の相関状態（量子もつれ）や量子干渉を制御するものがあり、その計測・センシング対象も多様である。対象量子系の例としては、冷却原子、原子イオン、ダイヤモンドNVセンター、極低温電子回路、（偏極）核スピン、電子スピン、光子があげられる。

(2) キーワード

量子計測、量子センシング、精密分光、量子生命科学、原子時計、光格子時計、量子慣性センサ、量子ジャイロスコープ、量子もつれ光、超偏極、動的核偏極（DNP）、冷却原子、ダイヤモンドNVセンター、ナノ粒子、周波数標準、光子検出器

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

計測・センシングは、あらゆる科学技術の基盤であり、またSociety 5.0においても、現実世界をデータ化し、サイバー世界と融合させるのに不可欠な技術である。従来の光や電気を用いた計測技術における感度や分解能などの限界を、個々の光子、電子や原子の量子状態を制御することで、打ち破ることが可能になる。その要素技術や基盤となる理論は、量子コンピュータや量子通信などの研究とも密接に関連しており、それらの研究分野の進展にともない、量子計測センシング分野の研究は著しく進展している。実現可能性の高さや、そのアプリケーションの多様さから、科学技術・社会に与える波及効果も大きい。例えば光格子時計は、現在の時間標準として使われているセシウム原子時計を2桁も上回る高い時間精度を持つ。その高い精度のおかげで、時間の進み方が重力の大きさに応じて変わるというアインシュタインの一般相対性理論の効果を、地上わずか1 cmの高さの違いでも検出可能である。そのため、光格子時計は地殻変動、火山活動の観測等への応用が検討されている。衛星からの電波に依存した位置標定システムであるGPSを補完する技術として期待されるのが、量子慣性センサである。加速度計、ジャイロスコープ、重力勾配計など複数の慣性センサを統合することで、衛星からの信号に頼らず自律して位置を把握することができる（慣性航法）。衛星からの電波が届かない海中での作業において真価を発揮するため、排他的経済水域（EEZ）や北極海における資源探査上、極めて有用とされている。慣性航法の精度を律速しているのはジャイロスコープであり、量子技術を用いてその性能を高めることで精度を飛躍的に向上できると期待されている。炭素原子で構成されるダイヤモンドの一部が窒素原子で置換されて形成されたダイヤモンド窒素空孔（Nitrogen Vacancy：NV）センターは、磁場、電場、温度、圧力などの高感度センサとして、工学、医学、生命科学分野など、広範な分野での応用が期待されている。光あるいは物質の量子もつれを利用する量子もつれセンシングは古典技術では実現不可能な高いセンシング能力が約束されており、研究開発が進められている。医療、生命科学分野での応用開発が進められているのが超偏極イメージング技術である。現在主流となっているポジトロン断層法（PET）などの核医学検査は被曝リスクを伴うため、被曝リスクのない超偏極イメージングへの期待は高い。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

〔研究開発の動向〕

• 光格子時計、量子慣性センサ

2001年の光格子時計の提案以降、その研究開発は日本をはじめとして、欧米、アジア各国の計量標準研究所など20以上の研究拠点に波及し、高精度化に向けた基礎研究が進められている。2016年には、日米の研究機関で提案当初の目標であった18桁精度が実現され、現在の研究開発は、基礎研究から時計の応用・実用化へと広がっている。

実用化に向けた技術開発として、各研究機関で開発された時計をつなぐ光ファイバ網の構築が進められている。特に欧州圏では、各国の標準研究所をつなぐ数1000 kmにわたる光ファイバ網の整備が進められ、ドイツ、フランス、英国、イタリアの標準研究所が光ファイバを介して互いの時計を比較できる状況が整いつつある。このような時計のネットワーク化は、開発した時計の再現性の確認や時間情報の共有、相対論的測地による高精度な標高の体系を作るうえで重要である。

また、重力ポテンシャル計としての測地応用に向けて、実験室を離れた環境下でも安定に動作できる可搬型光格子時計の開発も進められている。ドイツ国立物理工学研究所（PTB）では、トレーラーに搭載した光格子時計を開発し、フランスとイタリアの国境の山中のトンネル内に光格子時計を運び、光ファイバでイタリア国立計量研究所（INRiM）の光格子時計とつないで、実験室外での時計比較の実証実験を行った。日本では、18桁精度の可搬型光格子時計を開発し、東京スカイツリーの地上階と展望階に設置し、一般相対性理論の検証実験を行った。時計の可搬化技術によって、例えば火山や地殻変動の測定など、実地に持ち込んで測定が可能となると、測地応用の用途が広がるものと期待される。

時計の各種主要部品の製品化も進められている。欧米のベンチャー企業では、光-光、光-マイクロ波間の周波数変換を担う光周波数コム（Menlo Systems（独）、TOPTICA Photonics（独）、IMRA America（米））や原子冷却用光源（TOPTICA Photonics（独）、MOGLabs（豪））、分光用超狭線幅レーザ光源（Stable Laser Systems（米）、Menlo Systems（独））、光ファイバ周波数伝送装置（Muquans（仏））、レーザー光源、原子減速用真空槽（AOSense（米））等の製品化が行われている。

光格子時計による「秒」の再定義に向けた動向として、光格子時計で時刻標準を生成する取り組みも行われている。今後、このような活動とともに、光格子時計の再現性が多くの拠点で確認され、信頼性が高められることにより、光格子時計による「秒」の再定義の議論はより加速するものと期待される。

量子技術を利用したジャイロスコープとしては、スピンの歳差運動を用いたNMR型や原子波干渉型などがあるが、感度という観点では後者が圧倒的に高い性能を示す。古典のジャイロスコープでは、EEZや北極海における資源探査に必要な精度が実現できておらず、量子技術の導入が必須と考えられている。米国スタンフォード大学で開発された熱原子ビーム干渉型も、仏国LNE-SYRTEで実現された冷却原子噴泉型も、現時点ではロシア製の古典ジャイロスコープの性能に劣る状況にある。しかし、今後性能が飛躍的に向上する可能性があり、古典ジャイロスコープを上回る性能の実現が期待される。

航法研究においては、乗り物のダイナミクスを考慮する必要があるため、加速度耐性、ダイナミックレンジ、バンド幅といった、時計研究とは異なる観点からの性能が求められる。中性原子を用いた干渉計は加速度と角速度の双方に応答してしまうため、これらを切り分ける技術をより改善していくことが不可欠である。この点については、大阪大学において微小空間にトラップされたイオンを対象とした量子ジャイロスコープの研究が進んでいる。このジャイロは乗り物の運動により加速度等が印加されても原理的に角速度計測に影響がない。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域 ICT・エレクトロニクス応用

• ダイヤモンドNVセンター

単一ダイヤモンドNVセンターの光検出磁気共鳴 (Optically Detected Magnetic Resonance : ODMR) が1997年に初めて報告されてから、二十数年にわたりドイツと米国を中心に、政府投資による基礎研究が強力に進められ、磁場、電場、温度、圧力、pH、などのセンシングにおいて従来技術 (超伝導量子干渉計 (SQUID) 磁気センサ、光ポンピング (OPM) 磁気センサ、蛍光分子イメージング、高速AFM、等) を凌ぐ可能性が見出された。NVision、SQUITEC、QNAMI、QZABRE、Quantum Diamond Technologies Inc. など、基礎的な知財を押さえたうえで当該分野の先駆者を擁するスタートアップが多数立ち上がっており、今後数年のうちに市場が確立されていくと考えられる。中国は10年近く前からNVセンターの研究を本格的に実施している。日本では、筑波大学や産業技術総合研究所が材料面において、当該分野の発展に大きく貢献してきた。また最近、ダイヤモンドの表面近傍に配置したNVセンターにより、ダイヤモンド基板上の分子の核磁気共鳴 (NMR) 分光にも成功しており、ミクロ領域での分子構造化学を開拓する基礎分析ツールになると期待されている。また、Qdyne (quantum heterodyne) 法などの新規な計測プロトコルについても開発が進み、高い周波数分解能でNMR信号を観測することが可能であることが実証された。

生命現象や細胞内環境を精密計測するための超高感度センサとしてダイヤモンドナノ粒子が注目を集めている。近年ナノダイヤに関して、数ナノメートル程度の直径を持つナノ粒子によるさまざまなセンシング機能の発現が報告されていて、例えば、pHや温度の量子計測が実証されてきており、今後の生命科学応用へ期待される。

• 量子もつれセンシング

量子もつれセンシングは、80年代の量子もつれの検証実験、ボーズ-アインシュタイン凝縮 (BEC) の実現、また90年代からの量子情報通信処理研究・技術の進展とともに急速に発展してきた。2000年代以降、米国では国防省陸軍研究局 (DOD)、陸軍研究局 (ARO)、高等研究計画局 (DARPA) による投資と研究の進展がみられた。その応用としては、2000年頃に量子光干渉断層像 (量子OCT) が提案され、また2000年代中頃に量子イルミネーションが提案された。わが国においては、2007年に北海道大学から位相測定標準量子限界を超える多光子もつれ干渉の実験が、また2013年にそれを応用した量子もつれ顕微鏡が報告されている。また、2015年には、超広帯域量子もつれ光源を利用し、量子OCTで世界最高の0.54 μ m分解能 (空気中) に相当する2光子干渉縞の取得が報告されている。

• 超偏極NMR/MRI

核スピンの偏極率 (NMR/MRI信号強度に比例) を一時的に数万倍にすることで、 ^{13}C や ^{129}Xe 等の安定同位体核の超高感度計測を実現する量子センシング技術である。1990年代から超偏極寿命が長い核スピンを対象に、生体外で励起装置を用いて強力に超偏極誘導し、すぐに検体に投与してMRI撮像を行う新しいイメージング技術が生まれ、現在でも主流となっている。最初の試みは光ポンピングにより励起した ^3He や ^{129}Xe など希ガスの超偏極MRIである。欧米や中国で肺疾患を対象とする臨床応用が進んでいる。

2003年にスウェーデンのグループが、水溶性物質を動的核偏極 (DNP) で高感度化させてから水溶液に溶解させるdissolution DNP (dDNP) 法を開発し、 ^{13}C NMR信号を1万倍以上増幅することに成功した。この発見を機に、安定同位体元素を超偏極誘導することで、PET等の核医学検査に代わる放射線被曝の無い安全な分子イメージング診断につなげる研究が世界中で始められた。2013年にはカリフォルニア大学サンフランシスコ校 (UCSF) で世界初の臨床試験が前立腺がん診断で実施された。現在、世界23カ所以上に、

米国 GE ヘルスケア社が開発した臨床研究に使える ^{13}C 励起装置が導入されており、世界 10 カ所程で数百人規模の臨床試験が進められている。脳腫瘍、乳がん、膵臓がんを含む多くのがん診断や心筋梗塞や糖尿病性心筋症などの心機能評価へと適用拡大が急速に進んでいる。一方、日本国内には臨床研究に使用可能な、医薬品製造の基準 (GMP) に対応した ^{13}C 励起装置は導入実績が無く、開発競争で致命的な遅れを取っている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

・光格子時計高安定化に向けた研究への注目

時計を用いて時間、周波数計測を行う際、いかに短時間でリアルタイムに高精度な測定を行えるかを示す安定度も重要な要素となる。光格子時計は、多数の原子を同時に観測することで高い安定度を実現できる。しかし実際には、時計遷移を励起するためのレーザ光の周波数ノイズにより、光格子時計本来の高安定度が実現できない。レーザ光の不安定性は、参照する光共振器のミラーの熱雑音に起因するため、これを抑えるために、長い共振器や低温シリコン共振器を導入して高い安定度が実現されている。一方で、これらは装置の大型化を招き、時計装置の可搬化の障害となっている。そこで近年、光共振器に頼らずに原子のコヒーレンス等を有効に利用する新たな時計の高安定化の研究が注目されている。例えば、光格子中の原子集団からの超放射の利用、原子の非破壊観測、時計の無駄時間無し連続動作、アクティブ時計、スピンスクイージングの実現等の試みがなされている。このような光格子時計の高安定度化は、今後の重要な研究テーマである。

・量子もつれ光を用いる赤外量子吸収分光への注目の高まり

2 つのもつれ光源における量子もつれ光子対生成過程間の量子干渉を利用することで、高額な赤外領域の検出器を使わずに、可視の光源と検出器のみで赤外領域の吸収分光測定が実現できる。2016 年にシンガポールのグループが発表した後、ドイツ、オーストリア、英国、スペインなど欧州諸国で研究が開始された。ドイツでは産学連携を担うフラウンホーファー研究所が中心となって取り組んでいる。国内でも、Q-LEAP プロジェクトの 1 つとして、これまでの大強度量子もつれ光源開発の強みを活かす特長ある研究が、産学連携の枠組みで進められている。

・dDNP 技術開発のさらなる進展

dDNP 技術では 6 ~ 10 T への更なる高磁場化に加えて、偏極源であるラジカル剤からまず ^1H 核に偏極を移し、続いて ^1H から ^{13}C へと移す Cross-Polarization により 50% 以上の ^{13}C 偏極率を 20 ~ 30 分の短時間で得られる技術が開発されている。第 2 世代の dDNP 型臨床機にはこの技術が採用され利便性が大幅に改善されると見込まれる。dDNP で励起された分子の超偏極寿命は数分と短いため臨床応用のネックとなっているが、東京大学のグループが開発した ^{15}N 標記分子では 1 時間以上の長時間観測に成功している。また、事前に励起さえ始めておけば、ルーチンの形態像撮影にプラス 5 分で超偏極 ^{13}C MRI による分子イメージングを追加できる診断プロトコルが米国で整備され、今後 10 年で核医学検査から被曝の無い超偏極 ^{13}C MRI 診断への切り替えが進むものと考えられる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

[日本]

量子科学技術 (光・量子技術) を駆使して非連続的な解決 (quantum leap) をめざす「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)」が 2018 年から 10 年の予定で実施されている。3 つの領域のうちの 1 つである量子計測・センシング技術領域では、主にダイヤモンド NV センターを用いた Flagship プロジェクト (課

題名「固体量子センサの高度制御による革新的センサシステムの創出」が発足し、脳磁計などの医療応用や、電池やパワーデバイスの電流・温度をモニタリングするシステム開発がターゲットとなっている。さらに、量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスの研究など、7件の基礎基盤研究が推進されている。新たに量子生命科学研究のFlagshipプロジェクト（課題名「量子生命技術の創製と医学・生命科学の革新」）が2020年に発足し、生体ナノ量子センサ、超高感度MRI/NMR、量子論的生命現象の解明・模倣の3つを対象とした研究開発が10年間の予定で行われる。

JSTでは、さががけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」が発足し、一部のテーマでNVセンターを用いた研究が進められている（2017年度～2022年度）。未来社会創造事業 大規模プロジェクト型「冷却原子・イオンを用いた高性能ジャイロスコープの開発」（2017年～）、「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」（2018年～）が進められている。2020年に、大学などを中核とした産学連携を推進するためのプログラムである、JST共創の場支援プログラム 本格型 政策重点分野「量子航法科学技術拠点」が開始した。

AMED先端計測プログラムの支援により北海道大学とベンチャー企業である日本レドックスの共同開発により純国産のPHIP型¹³C励起装置の製品化が進められている。2021年度中にまず小動物イメージング用装置として国内販売が予定されており、今後の海外市場への進出と臨床機の開発が期待される。

【欧州】

光格子時計の実用化に向けたプロジェクトが立ち上がっている。欧州で進められているEuropean Quantum FlagshipのIntegrated Quantum Clock (iqClock) プロジェクトでは、光格子時計の可搬化と製品化および超放射レーザーの開発を進めている。英国のバーミンガム大学は企業と共同で小型Sr光格子時計の開発、オランダのアムステルダム大学、デンマークのニールスボーア研究所、ポーランドのニコラスコペルニクス大学、オーストリアのウィーン工科大学、インスブルック大学は、Sr原子を用いた超放射レーザーの開発を進めている。プロジェクトには、TELEDYNE e2V、TOPTICA Photonics、NKT Photonicsなどの企業が協力している。英国のQuantum Technology Hub コンソーシアムでは、量子センサの実用化技術開発の一環として、バーミンガム大学のグループが、Sr光格子時計の小型化、可搬化に向けた開発を行っている。欧州宇宙機関（ESA）では、マイクロ波時計を用いたプロジェクト（ACES）の後継として、光時計の宇宙利用（Space Optical Clocks：SOC）のため、光格子時計の国際宇宙ステーション搭載に向けたプロジェクトを2007年より進めている。

ダイヤモンドNVセンターのプロジェクトとして、ASTERIQS（Advancing Science and Technology through diamond Quantum Sensing）が、2018年からの3年間（予算1千万ユーロ）の予定で進められている。ダイヤモンドNVセンターによるナノレベル高空間分解能磁気センサ、電池モニタリングシステム開発、小型NMRなどの開発が進む。また、dDNPに代わる新技術確立に向けて、ダイヤモンドNVセンターの核スピン超偏極イメージングへの応用をめざす2つのプロジェクト、MetaboliQsとHYPERDIAMONDが立ち上がり、脱・核医学の動きがさらに加速している。

フランス・イノベーション省（MESRI）が量子国家戦略を2021年1月に発表した。7つの分野に5年間で18億ユーロを投資する予定であり、その中の1分野が、量子センサ技術の応用開発（総投資額2億5800万ユーロ）である。

（5）科学技術的課題

現在の光格子時計は、すでに社会実装されているマイクロ波時計と比べて装置が大型、煩雑かつ長期安定動作が難しく、それらをいかに小型化・堅牢化するかが重要な課題である。時計を動作させるには、複数台

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

のレーザを高精度かつ長期間安定に制御する必要がある。今後、レーザ開発や製品化に特化した企業の技術力の導入が重要となってくる。また、光格子時計のネットワーク化においては、実現した高精度な時間、周波数情報をいかに劣化させずに共有できるかが課題となる。従来の衛星を介したマイクロ波周波数伝送では大気の影響等の影響により精度、安定度の面で不十分である。一方、光ファイバ周波数伝送に関しても、距離が延びるとともに伝送安定度が劣化するため、地球規模の大陸間長距離伝送に適用するのは難しい。今後、このような長距離伝送に耐えうる高精度な周波数伝送手法の開発が必要となる。

量子慣性センサ開発において、ダイナミックレンジやバンド幅に対する問題は、光格子時計開発よりも切実である。特にバンド幅は、原子波干渉を利用する限りにおいて、回避しがたい技術的難点である。そのため、乗り物などの実環境下で原子波干渉型ジャイロが動作したという実験報告はなく、これまで時計研究に行ってきたと同様の持続的投資が必須なのは間違いない。この問題点の解決には超高性能古典ジャイロと量子ジャイロとをハイブリッド化することが不可欠であり、すでに中国Wuhan Institute等でこうした研究が始まっている。

ダイヤモンドNVセンターを脳磁計などに応用するには、さらなる高感度化が不可欠である。計測技術の改善、および物質科学的改善によるアプローチの両方が必要と考えられる。計測技術的アプローチでは、環境からのノイズ低減のための量子プロトコル開発などがあげられる。物質科学的アプローチでは、ダイヤモンドのさらなる高品質化やNVセンターの効率的な生成技術開発などが考えられる。実用化の観点からは低価格化が重要であり、小型化、集積化技術開発が必要となる。ダイヤモンドの高速成長技術、大面積化などの研究開発も、長期的に取り組むべき今後の課題としてあげられる。

超偏極イメージングは3次元位置情報+スペクトル(代謝)情報+時間の5次元情報として得られることが多く、テンソル分解など高次元データの特徴を活かした情報処理技術や、実用に際して高次元の情報を直感的にわかりやすく表現・提示する技術の必要性が高まっている。また、臨床用MRI装置は通常¹H専用機であり、¹³Cなどの異核は撮像できない。オプションで多核対応できるMRI機種は現状全て海外メーカー品であり、国内メーカーのMRI装置を所有する病院では超偏極¹³C MRIは実施できない。今後、MRI装置の研究開発やインフラ整備が必要となる。

(6) その他の課題

欧米と比べて量子技術の人材が不足しており、中長期的な観点からは重要な課題と考えられる。量子計測・センシング分野の人材には、センサに関する知識や量子物理のほか、それを取り巻く材料科学、生命科学、情報工学等の幅広い知識の習得や、理論からシステム開発まで見渡せる力が必要である。量子技術、量子情報科学に興味をもつ学生は増えているにもかかわらず、体系的な教育は満足にできておらず、大きな課題である。アカデミアのみならず、産業界においても人材の確保は重要な課題である。大学院生や博士研究員などの若手人材を育成し、本領域の将来を支える次世代リーダーを、すそ野を広げつつ養成する必要がある。今後、拡大が見込まれる量子技術市場において、早い段階から企業の関心を惹きつけ、新たな市場創生につなげるため、アカデミアと企業関係者との間で「量子技術」に関する最新技術と動向を共有することが重要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	Q-LEAP 量子計測・センシング領域や、新規Flagship「量子生命」、JST さきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」など、複数のプロジェクトによって研究開発が進む。しかし加速度的に増えている海外の投資に比べると十分とはいえない。 日本初の技術である光格子時計では、光格子時計の実証実験と18桁の時計精度を実現した東京大学・理化学研究所を中心に、世界をリード。
	応用研究・開発	○	↗	東京大学・理化学研究所・島津製作所では、可搬型光格子時計を開発し、一般相対論検証実験を実現。未来社会創造事業でも、東京大学・理化学研究所を中心に、社会実装をめざし、小型・可搬型光格子時計の開発を行っている。 Q-LEAP 量子計測・センシング技術領域のFlagshipプロジェクトでは、脳磁計などの医療応用や、電池やパワーデバイスの電流・温度をモニタリングするシステム開発が進む。量子もつれ光を利用したセンシングへの企業の関心は高まりつつあり、今後の発展が期待される。超偏極イメージングの開発競争で遅れたが、放射線科医を中心に国内での臨床試験をめざす動きがあり、状況打開を臨む機運は高まっている。
米国	基礎研究	◎	↗	光格子時計の開発では、JILA、NISTで世界トップレベルの時計精度を実現。ハーバード大学を中心に、ナノ粒子を用いた磁場計測や温度計測の実証研究などが進む。量子もつれ光を用いた研究では、メリーランド大学、ボストン大学、イリノイ州立大学、カリフォルニア州立大学アーバイン校、NISTなどに加え、カナダにも複数の拠点があり、北米地域で連携している。超偏極イメージング研究でも、UCSFなどを中心に、多くの研究機関が潤沢な予算のもと、新規トレーサーや疾患モデル動物のイメージングなどで優れた研究成果が出ている。
	応用研究・開発	○	↗	DARPAのプロジェクトで、NISTなどのグループが光周波数コムを搭載した光時計を微細加工した基板上に実装するなど、チップスケール原子時計の開発が進む。AOSense、Stable Laser Systemsなどのベンチャー企業による時計の要素技術開発と製品化も行われている。ハーバード大学を中心に、神経電流のDC磁場の計測や、NVセンターのスピンをプローブとしたイメージング技術開発がさかん。ゴーストイメージングに関し、その原理を用いた画像処理システムが開発されている。超偏極 ¹²⁹ XeによるCOPDなどの肺疾患診断と、超偏極 ¹³ Cによる、がんおよび心筋症の診断で大規模臨床研究が進められ、臨床データを扱う共通プラットフォームや撮像プロトコルの整備も充実。
欧州	基礎研究	◎	↗	光格子時計の開発が各国の計量標準研究所を中心に行われ、各国の研究所間をつなぐ長距離光ファイバ網の構築が進められている。ダイヤモンドNVセンターの研究では、ドイツを中心に先駆的な研究がなされている。シュトゥットガルト大学では、AC磁場に関する世界最高感度900fTHz ^{-1/2} を達成している。核偏極イメージングでは、黎明期より研究領域の中核を担ってきた大学が多く、近年ではdDNP装置の性能と利便性を大幅に向上するCross-Polarization技術の発明など、革新的な技術を創出。
	応用研究・開発	◎	↗	iqClockプロジェクトでは、可搬型光格子時計の開発と製品化および超放射レーザーの開発が進む。欧州宇宙機関（ESA）では、光時計の宇宙利用のため、光格子時計の国際宇宙ステーションへの搭載に向けたプロジェクトが2007年より進む。ベンチャー企業による時計用レーザー光源とその周辺機器の製品化も進展。MetaboliQsとHYPERDIAMONDの2プロジェクトによる医療応用、ASTERIQSプロジェクトによる高性能センサ開発など、ダイヤモンドNVセンターの応用研究開発が進む。

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

中国	基礎研究	△	↗	中国計量科学研究院、中国科学院、華東師範大学で光格子時計の開発が進展。中国科技大学、香港中文大学で、磁場計測やタンパク質のスピンラベルに関する研究が進む。量子もつれ光源や、光子検出器に関する研究の質と量は近年著しく向上。 ¹²⁹ XeガスのMRIの報告が中国の研究機関からなされている。
	応用研究・開発	△	→	中国科学院で宇宙利用に向けたSr光格子時計の小型化に着手。 ¹²⁹ Xeガスによる肺疾患の診断は2018年から臨床応用が始まっている。
韓国	基礎研究	△	→	韓国標準科学研究院では、Yb光格子時計を開発。量子もつれ光を用いた基礎研究に関して、浦項工科大学が世界レベルの研究を実施。dDNPによる認知症の早期診断の可能性を示唆する成果など、著名な基礎研究成果が複数報告された。
	応用研究・開発	△	→	特筆すべき応用研究・開発はみられない。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ バイオ計測・診断デバイス（ナノテク・材料分野 2.2.3）
- ・ バイオイメージング（ナノテク・材料分野 2.2.4）
- ・ MEMS・センシングデバイス（ナノテク・材料分野 2.3.4）
- ・ ナノ・オペランド計測技術（ナノテク・材料分野 2.6.3）

参考・引用文献

- 1) S. Bennetts, C. C. Chen, B. Pasquiou, and F. Schreck, "Steady-State Magne-to-Optical Trap with 100-Fold Improved Phase-Space Density", *Phys. Rev. Lett.* 119, no. 22 (2017) : 223202. doi : 10.1103/PhysRevLett.119.223202
- 2) B. Braverman, A. Kawasaki, E. Pedrozo-Penafiel, S. Colombo, C. Shu, Z. Li, E. Mendez, et al., "Near-Unitary Spin Squeezing in ¹⁷¹Yb", *Phys. Rev. Lett.* 122, no. 22 (2019) : 223203. doi : 10.1103/PhysRevLett.122.223203
- 3) G. Jacopo, S. Koller, S. Vogt, S. Häfner, U. Sterr, C. Lisdat, H. Denker, et al., "Geodesy and Metrology with a Transportable Optical Clock", *Nature Phys.* 14, no. 5 (2018) : 437-41. doi : 10.1038/s41567-017-0042-3
- 4) S. B. Koller, J. Grotti, S. Vogt, A. Al-Masoudi, S. Dorschner, S. Hafner, U. Sterr, and C. Lisdat, "Transportable Optical Lattice Clock with 7 × 10⁻¹⁷ Uncertainty", *Phys. Rev. Lett.* 118, no. 7 (2017) : 073601. doi : 10.1103/PhysRevLett.118.073601

- 5) G. E. Marti, R. B. Hutson, A. Goban, S. L. Campbell, N. Poli, and J. Ye, "Imaging Optical Frequencies with 100 μ Hz Precision and 1.1 μ m Resolution", *Phys. Rev. Lett.* 120, no. 10 (2018) : 103201. doi : 10.1103/PhysRevLett.120.103201
- 6) W. F. McGrew, X. Zhang, R. J. Fasano, S. A. Schaffer, K. Beloy, D. Nicolodi, R. C. Brown, et al., "Atomic Clock Performance Enabling Geodesy Below the Centimetre Level", *Nature* 564, no. 7734 (2018) : 87-90. doi : 10.1038/s41586-018-0738-2
- 7) T. L. Nicholson, S. L. Campbell, R. B. Hutson, G. E. Marti, B. J. Bloom, R. L. McNally, W. Zhang, et al., "Systematic Evaluation of an Atomic Clock at 2×10^{-18} Total Uncertainty", *Nature Commun.* 6 (2015) : 6896. doi : 10.1038/ncomms7896
- 8) F. Riehle, "Optical Clock Networks", *Nature Photon.* 11, no. 1 (2017) : 25-31. doi : 10.1038/nphoton.2016.235
- 9) M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Yahagi, K. Kokado, H. Shinkai, and H. Katori, "Test of General Relativity by a Pair of Transportable Optical Lattice Clocks", *Nature Photon.* 14, no. 7 (2020) : 411-15. doi : 10.1038/s41566-020-0619-8
- 10) J. M. Boss, S. K. Cujia, J. Zopes, L. C. Degen, "Quantum sensing with arbitrary frequency resolution", *Science* 356, no. 6340 (2017) : 837-840. doi : 10.1126/science.aam7009
- 11) S. Schmitt et al., "Submillihertz magnetic spectroscopy performed with a nanoscale quantum sensor", *Science* 356, no. 6340 (2017) : 832-837. doi : 10.1126/science.aam5532
- 12) T. Ono, R. Okamoto, and S. Takeuchi, "An entanglement-enhanced microscope", *Nat. Commun.* 4 (2013) : 2426. doi : <https://doi.org/10.1038/ncomms3426>
- 13) S. Pirandola, B. R. Bardhan, T. Gehring, C. Weedbrook, and S. Lloyd, "Advances in photonic quantum sensing", *Nature Photon.* 12 (2018) : 724-733. doi : <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0301-6>
- 14) Z. J. Wang et al. "Hyperpolarized ^{13}C MRI : State of the Art and Future Directions", *Radiology* 291, no. 2 (2019) : 273-84. doi : 10.1148/radiol.2019182391
- 15) J. H. Ardenkjaer-Larsen. "On the Present and Future of Dissolution-DNP", *J. Magn. Reson.* 264 (2016) : 3-12. doi : 10.1016/j.jmr.2016.01.015
- 16) H. Nonaka et al. "Design of a ^{15}N Molecular Unit to Achieve Long Retention of Hyperpolarized Spin State", *Sci. Rep.* 7 (2017) : 40104. doi : 10.1038/srep40104
- 17) F. Reineri, T. Boi, and S. Aime, "Parahydrogen Induced Polarization of ^{13}C Carboxylate Res-onance in Acetate and Pyruvate", *Nat. Commun.* 6 (2015) : 5858. doi : 10.1038/ncomms6858
- 18) B. J. Tickner et al. "Optimisation of Pyruvate Hyperpolarisation Using SABRE by Tuning the Active Magnetisation Transfer Catalyst", *Catal. Sci. Technol.* 10, no. 5 (2020) : 1343-55. doi : 10.1039/c9cy02498k
- 19) L. Bordonali et al. "Parahydrogen Based NMR Hyperpolarisation Goes Micro : An Alveolus for Small Molecule Chemosensing", *Lab Chip* 19, no. 3 (2019) : 503-12. doi : 10.1039/c8lc01259h