

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。これからのエレクトロニクスデバイスは、将来の様々なアプリケーションを睨みながら、さらなる高性能化・高機能化とともに、従来よりも桁違いの超低消費電力化が強く求められ、世界的に競争が激化している分野である。

現状の CMOS デバイスには、微細化の物理的限界、特性ばらつきの増大、素子の消費電力増大などが見え始めており、この限界を突破する方策として、いくつかのナノエレクトロニクスの潮流が見え始めている。一つは、現在の平面的な 2 次元デバイスである CMOS を TSV (貫通シリコンビア) や近接場磁界結合の技術を使って 3 次元化するものであり、さらには CMOS の上に、スピンドバイス、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 3 次元的に集積化するヘテロ集積化技術である。これにはメモリとプロセッサを積層集積化する技術も含まれる。もう一つは、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・材料開発であり、例えば既存の 3 次元的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、遷移金属ダイカルコゲナイドやトポロジカル絶縁体のような 2 次元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目指す流れである。三つ目の潮流は、不揮発性ロジックやニューロモルフィックコンピューティング、動的再構成プロセッサ、量子コンピューティングなどに代表される新規のアーキテクチャを取り入れて将来の超高性能かつ超低消費電力のコンピュータ技術を確立しようという流れである。これからの新しいアプリケーションやサービスを生み出す革新的なナノエレクトロニクス基盤を創成するためには、基本デバイスの改善だけのアプローチでは限界があり、集積回路レベルからシステムレベル、さらにはソフトを含めたアーキテクチャの視点からの検討も重要となる。

以上の観点から、今後の ICT・ナノエレクトロニクスの研究開発には、システムを見据えた、技術レイヤー間の融合が不可欠になると予測される。特に日本における人工知能技術の開発は、ソフト開発が中心になっており、デバイス材料と回路アーキテクチャの間に高い壁が存在する。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。

2.3.1 超低消費電力（ナノエレクトロニクスデバイス）

（1）研究開発領域の定義

従来よりも桁違いの超低消費電力を可能とするナノエレクトロニクスデバイスを実現し、集積回路への適用を目指す。新材料の特性を理論的・実験的に確認し、システム最適設計によるデバイス試作で超低消費電力動作、超高速動作、超大容量、超長期保存などの優位性を確認するなどの研究開発が課題である。また、飛躍的な消費電力削減と超高速演算を可能にする、従来の CMOS を超える新動作原理のデバイスや新回路アーキテクチャなどのデバイスレベルからシステムレベルにまたがる研究開発課題が存在する。「Society5.0」を実現するための IoT システム、ビッグデータを利活用するクラウドサービス、トリリオンセンサー社会を実現するエッジコンピューティング、そしてそれらを支えるセキュリティ技術の社会実装と高度化に、これらの課題解決は必要不可欠のものとなっている。

（2）キーワード

低消費電力、不揮発性メモリ、不揮発性ロジック、ロジック・イン・メモリ、集積回路、More Moore、More than Moore、Beyond CMOS、抵抗変化メモリ、立体構造トランジスタ、トンネル・トランジスタ (TFET)、負性容量による急峻スロープトランジスタ (NCFET)、スピントロニクス、グラフェン、トポロジカル絶縁体、脳型コンピュータ、非ノイマン型、ニューロモルフィック、機械学習、ディープラーニング、IRDS、SCM

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

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ことが必要であり、再生可能エネルギー利用の拡大や消費エネルギーの削減が重要になっている。エネルギーとして大きな割合を占めるようになっている電気エネルギーについては、電気機器の低消費電力化技術の開発による、さらなるエネルギー消費の低減が求められている。その中でも各分野において使用量が増加している情報通信機器の省エネルギー化はモーターや照明器具の高効率化とともに重要であり、エレクトロニクスデバイスの低消費電力化が強く求められている。

情報通信機器の心臓部に当たるのがマイクロプロセッサ、メモリ、高周波回路などの集積回路であるが、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おり、現在のトランジスタ (MOSFET) の微細化限界を超える新しい動作原理と省低消費電力化を同時に進めるためには、トランジスタの材料・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、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メモリや不揮発ロジック、光通信デバイスの小型・集積化、使っていない回路ブロックのきめ細かな電力供給制御、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) 新規デバイスや量子情報処理など新規アーキテクチャなどの検討が必要である。

これらの技術が実現できれば、オフィスにおけるパソコンやサーバーの未使用時の機器停止と瞬時起動、データセンター等における大幅な電力削減、家庭における家電の待機電力削減、携帯機器の長時間使用など、消費電力化と利便性の向上につながる。

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、International Roadmap for Devices and Systems (IRDS) 関連活動が、IEEE と応用物理学会を中核としてスタートした。2016年に白書 (White paper)、2017年度には IRDS としては初めての報告書 (Report) が公開されている。IRDS では、その名に示されているように、デバイス・プロセス関連技術とシステム・アーキテクチャ関連技術の協調的な研究開発の重要性が謳われている。また、デバイスの3次元化を含むサブ 10nm 超微細化が継続する中、さらにここ数年の際立ったトレンドとしては、「クラウド」と「IoT エッジ」からなる「AI ベースのシステムソリューション」と、AI を含む新コンピューティング・アーキテクチャを実現する新デバイス開発への要求の高まりが挙げられる。これらは、Beyond CMOS デバイス、あるいは、Emerging Research デバイスと呼ばれている。

[研究開発の動向]

●ロジック用デバイス

米国では NRI (ナノエレクトロニクス研究イニシアチブ) が中心になって研究開発を推進している。従来は NRI 主導で4つの地域の大学で、トンネルデバイス、スピンドデバイス、グラフェンなどのテーマに対して集中的な研究を行っていたが、2013年に刷新され、3つの NRI 研究センター (CNFD、INDEX、SWAN) と3つの STARnet (Semiconductor Technology Advanced Research network) 研究センター (FAME、C-SPIN、LEAST) になった。この STARnet が米国 DARPA と協力して運営されることは注目される。これらの研究センターでは、エネルギー効率の高いナノ磁性のスイッチング素子、サブスレッショールドスロープの急峻な素子として III-V のトンネルトランジスタ (TFET) を超えるデバイスなどを研究開発している。また、新デバイスのコンセプトは新たな材料が基盤となるとしている。

●不揮発性メモリ

日本における主な研究開発プロジェクトとしては、2010年経済産業省でスタートして2011年に NEDO に移管された「低炭素社会を実現する超低電圧デバイスプロジェクト (LEAP)」があった。このプロジェクトでは、LSI の配線層に集積を可能とする磁気抵抗変化デバイス、相変化デバイス、原子移動型スイッチの開発が進められていた。金属原子移動型スイッチに関しては、その後、JST CREST 等に研究開発が引き継がれ、FPGA の実用化等を見据えた研究開発が継続されている [参考文献 1]。これは産官連携の好例である。動作原理は Conductance Bridge 型の ReRAM (CBRAM) のそれと同様であるが、スイッチングに適した仕様となるように工夫されている。

また、最先端研究開発支援プログラム (FIRST) の「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」において実施された、スピントロニクス素子を用いた待機時電力ゼロのロジック混載用不揮発性メモリの研究開発は、2014年度から開始された内閣府の革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」に引き継がれている。当該事業では、STT (Spin-Transfer-Torque) -MRAM から、スピン軌道トルク (SOT:Spin Orbit Torque) MRAM、さらには、電圧 (パルス) 駆動 MRAM (Voltage Controlled MRAM: VC-MRAM) 電圧制御スピントロニクスメモリ (Voltage-Control Spintronics Memory: VoCSM) 等、超低消費電力スピントロニクスメモリの研究開発への展開がなされている [参考文献 2-4]。さらに、2016年度より、実世界にある多様なデータをセンサネットワーク等で収集し、サイバー空間で大規模データ解析・処理等を行い、現実世界

を制御する次世代 IoT 基盤技術を横断的に開発することを目指した NEDO 「IoT 推進のための横断技術開発プロジェクト」が開始された。データ蓄積に関しては、IoT システム用革新的不揮発性メモリ、高速で大容量な異種メモリで構成される高速かつ低電力な分散ストレージサーバーシステムと、各種メモリの利点を引き出すヘテロジニアス分散データベースの開発等が推進されている。セキュリティに関しては、ReRAM の個体差を認証に用いる Physical Unclonable Function (PUF) 技術の開発も行われている。

また、ReRAM など各種不揮発性メモリ素子の持つメモリスタ特性を人工シナプスとして活用し、ニューロモルフィック・コンピューティングに応用する研究も活発化している。

●カーボン材料と層状物質

新たなトランジスタチャネル材料の有力候補として考えられているカーボンナノチューブやグラフェンなどについては、Si-CMOS をベースとする従来からの集積・微細化技術開発の中に組み込まれる形で NEDO の MIRAI プロジェクトにおけるナノシリコンインテグレーション (NSI) や JST CREST の次世代エレクトロニクスデバイスなどで取り組みがなされてきた。また、2013 年より科研費新学術領域「原子層科学」、2014 年より「 π 造形科学：電子と構造のダイナミズム制御による新機能創出」が開始された。さらに 2013 年度からは JST で「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」と題する CREST とさきがけが、2014 年度には、「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」と題する CREST が開始され、ナノエレクトロニクス・材料関係の国家プロジェクトが少しずつ整ってきた。

しかし、これらのプロジェクトは、その予算規模からいっても要素技術の基礎検討と一部デバイス試作による技術実証に留まっており、他の材料とは異なる物性を活かしつつ産業的なインテグレーションを見据えた研究開発にどうつなげていくかが今後の課題である。

一方米国では IBM が「C (カーボン) の生態系を構築する」との理念を掲げ、情報処理デバイスを含む様々なアプリケーションを提案し、一部は実際に試作まで行っている。世界中を回って (キャラバンして) 参画者を (資金的面も含めて) 募っている。Samsung は、Graphene spintronics を対象とした研究部署を設立している。米国 SRC/NRI はグラフェンとスピントロニクスをともに次世代ロジックデバイスの主要技術と見なしてロードマップを提案している。

●脳型演算回路

超低消費電力を目指すナノエレクトロニクスの新たなアーキテクチャの研究開発の一つである脳型演算回路においては、脳型動作をする固体素子および脳型回路を実現するアーキテクチャに関する基礎研究が盛んに行われてきていた。国内では、JST CREST [次世代デバイス] にて、不揮発性アナログ抵抗変化素子が開発されていた [参考文献 5]。国内では、NEDO 「IoT 推進のための横断技術開発プロジェクト / 超高速・低消費電力ビッグデータ処理を実現・利活用する脳型推論集積システムの研究開発 (2016 年度～)」にて、エッジデバイス応用を想定した脳型演算デバイス、回路とアーキテクチャの一体型研究開発が開始され、その動作実証と評価が進められている [参考文献 6]。その後、欧米では、国家プロジェクトを開始し、集積回路を用いた脳型情報処理の実証が進められてきた。

以下に、今後必要となる取組みを記す。

●ロジック用デバイス

トランジスタの高移動度チャネル材料として化合物半導体やナノカーボン材料 (グラフェン、

カーボンナノチューブ) などの実用化を目指した研究開発も進めていく必要があり、さらには電源電圧を大幅に減らすことができる急峻なサブスレッショルド特性 (S 値 $<60\text{mV}/\text{dec}@RT$) を実現するトンネル・トランジスタの研究開発にも材料の視点を加えることが重要である。さらに、ロジック素子の低消費電力化と低発熱化は今まで以上に重要になるため、発熱をいかに抑制するかも鍵になる。将来の集積回路における熱の問題を解決するためには、熱伝導など熱に関するナノレベルの理解に基づいて、熱エネルギーの効率的な制御や利用の技術を創成するフォノンエンジニアリングの研究開発に取り組む必要がある。

●メモリデバイス

DRAM や NAND フラッシュメモリの微細化限界が迫っていることもあり、抵抗変化型メモリ (ReRAM)、相変化メモリ (ex. PRAM, PCM, TRAM)、スピン MRAM (ex. STT-MRAM, SOT-MRAM) など不揮発メモリの研究開発やそれらの 3 次元実装技術の開発を加速していく必要がある。また、ビッグデータの利活用を推進するために、従来の視点にはなかった、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の研究開発が喫緊の課題となってきた。ここでは如何に超長期信頼性を担保できるメモリを開発できるかが鍵であり、それを実現するメモリの候補としては、MONOS、ReRAM、CNT を使った RAM、現在の Flash メモリの改造などが候補に挙がっている [参考文献 7]。

超省電力の観点からは、不揮発性メモリは電流駆動から電圧駆動への流れが進展することが期待される。具体的には、電圧駆動 MRAM (VCM、VoCSM) の研究開発が盛んに進められている。一方で、熱耐性や書換回数等のメモリ特性やメモリの動作範囲他の回路設計関連技術等に、研究課題が指摘されている [参考文献 8, 9]。また、FTJ (Ferroelectric tunnel junction) や FeFET、さらには強誘電体 Hf 酸化物を用いたメモリ等も、新材料研究の観点から注目を集めている [参考文献 9]。従来、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。具体的には、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 適用の試みなどが考えられる [参考文献 10]。

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 10^5 倍にも及び、高効率のメモリシステム構築におけるボトルネックとなっている。これ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。PCM (Phase Change Memory) を用いた SCM が既に製品化されているが、さらなる高機能化、大容量化を目指し、ReRAM (Resistance switching RAM) 等を使った SCM の開発が期待されている。

新規不揮発性メモリの普及には、製造工程及び実使用下における信頼性の確保が喫緊の課題であり、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。

さらに、Embedded memory (組み込みあるいは埋め込みメモリ) の研究開発も、その重要性は増すばかりである [参考文献 11]。3D XPoint™ memory の成功は、DRAM と NAND の中間性能を持つストレージクラスメモリの有用性を実証した [参考文献 8]。これらの研究開発は、非ノイマン型コンピューティング研究開発のブースターとなっている。

●ナノカーボン材料

大面積化や結晶性・層数・配向等の制御など集積化を前提とした工学的なアプローチで、産・学の連携が必要になる。具体例としては、グラフェン関係では、原子レベルでのナノ構造制御(欠陥導入、グラフェンナノリボン [GNR] のエッジ制御など)、化学吸着による物性変化、プロ

セス誘起ダメージの回避、グラフェン内電子伝導挙動の解析、散乱の制御などが必要であり、また、デバイス構造にするためのプロセス・インテグレーションの研究開発も進めていく必要がある。さらに、層状半導体である遷移金属ダイカルコゲナイドの研究も進める必要がある。さらに広い意味での二次元機能性原子薄膜であるトポロジカル絶縁体の電子デバイスへの応用研究も今後進めていく必要があろう。

●脳型演算回路

個々の要素技術の開発（その基本的な理解を含む）、その動作を実現し得る固体素子の開発、およびその特徴を活かした回路アーキテクチャの構築が必要である。メモリデバイスの項でも記載されている通り、ストレージクラスメモリ等の研究開発が、非ノイマン型コンピューティングの研究開発のブースターとなっている一方で、我が国において、現状では、メモリストに代表される新材料・新デバイスの研究開発とシステム・アーキテクチャの研究開発を一体で行う試みは少ない。今後、これらのソフト・ハード一体型研究開発の推進が喫緊の課題となるであろう。また、これら材料・デバイス・回路関係者に加え、数学者、脳科学者などとの連携や、材料からデバイスレイヤーでは信頼性、回路からアーキテクチャレイヤーではセキュリティ、そして研究開発のガイドライン策定・標準化も重要になってくると思われる。

●センシングデバイス

振動・温度だけではなく、生活環境中に存在する微量の化学物質を検知するセンサが求められている。従来のガスセンサは化学物質の選択性が低く消費電力も大きい。選択性の向上と低電力化を実現する研究開発を進めることが重要である。

●発蓄電デバイス

エネルギー問題だけでなくモバイル製品の使い勝手を考えると、充電フリー化は必須の課題であり、低消費電力化と共に、環境発電デバイスと蓄電デバイスの集積化は強く望まれていると考えられる。環境発電では振動・熱だけでなく、環境電波や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を活用することが想定される。他方蓄電デバイスでは、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。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

上述の米国 NRI では、今後探求すべき研究テーマとして、①「磁化の向き」とは異なる状態変数（スピン状態、光の状態、電子の位相状態など）、②新しい物理に基づく省エネロジック（スピン波、光波、音波など）、③古典的なものと量子の境に位置するような計算（量子状態の僅かな重なりを古典的計算に取り入れたものなど）、④ブール代数とは異なる計算（有用なデータ変換を高エネルギー効率・高速に行うダイナミックなシステム：アクセラレータ的）、などを検討している。しかしながら、基本素子だけのアプローチには限界があり、集積回路レベルからの回路ネットワークの革新と情報アルゴリズムの革新との融合による新しいアプローチも今後必要となる。実際、萌芽的レベルながらこの種の研究も世界中で行われ始めている。また、アナログ的不揮発性メモリアレイを論理演算に用いる「In-memory Computing」は世界的な動向になりつつある。ロジックとデジタルメモリのデバイス・システムレベルでの協調設計を目指した「Memory on Logic」に代わり、ニューロモルフィック・コンピューティング研究が主流になりつつある。

- ロジック関係では発熱・消費電力を十分に抑える必要があるため、FinFETやナノワイヤトランジスタなどの3次元構造トランジスタの開発とともに、TFET (Tunneling FET、トンネル・トランジスタ) やネガティブキャパシタンス FET などの急峻なサブスレッショルド特性を持つデバイスの開発は引き続き盛んに行われている。
- ナノカーボン関係では、グラフェンに制御された欠陥を導入することで磁化が発現することが理論・シミュレーションにより示されている。単原子 (C) 欠陥、線状欠陥 (zigzag edge) が有効であることが示され、高密度磁気記録媒体への応用などが提案されている。また、Samsung は韓国内の多数の大学と連携し、大学側からの発表の形態でグラフェンやCNTの集積的な機能実証についての報告を始めている。グラフェンの大面積合成と転写による大面積の透明導電膜 (2010年のNature) 等の例のように、大面積化や大面積のロールベースでの転写プロセスなどのプロセス課題を含む取り組みで、ナノカーボン材料デバイスインテグレーションを意識している。
- 脳型演算回路関係では、シナプスに対する医学・生理学的理解の深耕と、抵抗変化型メモリや相変化型メモリの登場が上手くマッチしていることから、人間の脳情報処理に習った密結合型の3次元ネットワークを有する高密度メモリ技術とその集積プロセス技術、高効率な情報処理アルゴリズムとそれを具現化する回路技術などの研究開発が盛んになってきている。人間の脳では、「記憶」と「忘却」を繰り返すことで重要な情報のみ「経験」として蓄積し、新たな判断に利用しているが、この「記憶」と「忘却」を自律的に行う固体素子の動作も、国内で実証された。電荷蓄積型の不揮発性メモリに加え、PCM、ReRAM、原子スイッチ、スピントロニクス素子などにおいては、それらのアナログ抵抗変化特性等を用いたシナプス動作の研究なども進みつつあり、脳の情報処理の本質をまねたコンピュータの開発も視野に入ってきた [参考文献 12, 13]。ReRAMにおいては、その抵抗変化比が大きいことを利用して、アナログ制御を行い、積和回路等に應用する研究開発が活発に行われている。最近では、そのアナログ変化の制御性を高めるための研究開発も報告されるようになってきた [参考文献 14, 15]。IBM が、人間の脳のように同時並行的に情報処理するコンピュータチップを開発して注目を集めている。これは「ニューロシナプティック・コンピューティング・チップ」と呼ばれ、高度なアルゴリズムとシリコン電子回路を使用している。このようなチップの研究開発が極めて盛んになってきており、実用化が進んだ暁には、多くの画像や音声から特定の顔や声を識別したり、膨大な情報 (ビッグデータ) から目的の情報を精度良く見つけたりする機能を、ロボットや自動車、家電などに組み込むことが可能になる。
- 不揮発性メモリ関係では、DRAM、NAND を置き換えるといったシンプルな目標が設定された研究開発は影を潜め、適材適所で活用することを想定した研究開発が推進されている傾向が伺える。また、セレクトタの研究開発も継続的に進められている [参考文献 16]。ここでは、各種不揮発性メモリ素子特性に合ったセレクトタ設計・材料選定が必要である。ReRAM用2端子セレクトタとしては、OTS (Ovonic Threshold Switching) を有望視する報告が多い。

2018年5月に京都で開催された第10回IEEE International Memory Workshop (IMW) における主催者発表によると、技術トレンドを不揮発性メモリにて分類すれば、件数の多い順に、ReRAM (30%)、NAND・Flash (18%)、MRAM (14%)、Selctror and PCM (9%)、Embedded (9%)、DRAM (7%)、FeRAM (7%)、Neuro (7%) とのことであった。2018 Symposia on VLSI Technology において、同様に発表件数で分類すれば、ReRAM (32%)、

MRAM (21%)、NAND (14%)、SRAM (14%)、PCM (11%)、その他 (8%) となっていた。

不揮発性メモリの基礎研究では、IoT 向けアプリを前提とした超省電力化を目指して、動作原理を電流駆動から電圧駆動へ変える動きが活発化している。例えば 電圧制御スピン RAM、FeFET-RAM, FTJ などがある。強誘電体材料としては、Hf 酸化物が注目を集めている [参考文献 9]。Hf 酸化物は ReRAM としても使えるし、強誘電特性を使って FeFET や FTJ としての使い方もできる。従来の high-k ゲート絶縁膜としての用途もあり、万能材料になる可能性があることで、世界中の研究機関が研究を加速している。ただし、Hf 酸化物を強誘電体として用いた時の、不揮発性メモリ動作不良のメカニズムはまだよくわかっていないので、信頼性検討もこれからの課題である。また、ReRAM の 3D 化開発も加速している。デバイスを 3 次元的に作り上げるもので、自己選択メモリセルを 4 層重ねたクロスポイント型 3D-ReRAM や、積層膜の端面を利用した 4 層 3D 構造の ReRAM など、積層膜の端面を使えるところが ReRAM ならではの 3 次元構造といえる。さらに、ReRAM に関しては、様々な計測手法を用いて動作原理の解明が進み、メモリ動作に関する信頼性を議論できるようになってきていることがここ数年間の大きな進展である [参考文献 17, 18]。最近の傾向として、不揮発性メモリにおける混載向け、大容量向け (クロスポイント型) の境界がぼやけつつある。ReRAM を混載に使う試みや、STT-MRAM をクロスポイント型で 3 次元積層化する試みも報告されている。

PCM に関しては、従来バルク型→ナノワイヤ (ピラー) 型→結晶粒界の相変化→超格子型 (トポロジカル絶縁体) と、学術的な進化が持続的にもたらされており、ストレージクラスメモリとしての応用も進展している [参考文献 8, 19]。PCM は 3 次元積層しやすく、OTS セレクタとの相性も良いことから、SSD 向けバッファメモリとしての製品化も報告されている。

また、新規不揮発性メモリ素子のメモリ用途以外の応用検討という視点も重要と思われる。例えば、ロジック演算回路への不揮発性の付与とそれを用いたロジックセルベースの不揮発性パワーゲーティング、不揮発性メモリ素子を用いた新規論理演算回路の構築とそのためのアーキテクチャ (非ブール代数、非ノイマン)、不揮発性素子のバラツキ特性を利用した暗号生成技術 (PUF: physical unclonable function)、上記の脳型演算回路でも触れられている不揮発性メモリ素子のアナログ的抵抗変化特性を活かした人工シナプスデバイス (メモリスタ) などである。さらに、酸化物の酸化還元反応が不揮発性抵抗変化の起源であることを利用して、メモリ部分を高感度で低消費電力の水素センサとして用いる報告がなされ、注目を集めている [参考文献 20]。

各種不揮発性メモリを、デジタルメモリとしてでなく、そのアナログ特性を活かしたシナプスデバイス (メモリスタ) としてニューロモルフィック・コンピューティングに適用する発表は、近年、急激に増加している。今回調査した IEDM 2017, VLSI シンポジウム 2018, IMW 2018 にて不揮発性メモリ関係の発表は計 59 件あったが、その 20% にあたる 12 件は、ニューロモルフィック・コンピューティング (In-memory Computing) 応用であった。

なお、ニューロモルフィック・コンピューティングに用いる不揮発性メモリアレイの素子は、LRS/HRS (低抵抗状態 / 高抵抗状態) のスイッチングを行う基準抵抗値を数百 k Ω ~ 1M Ω と非常に高くすることが必要で、デジタルメモリ用途の 100 ~ 1,000 倍になる。狙うアプリによって、同じ原理の不揮発性メモリであっても、設計仕様が大きく異なることに留

意されたい。

新規不揮発性メモリの信頼性に関する詳細な検討も、ここ数年の報告で目立ってきている。ReRAMにおける導電性フィラメントのナノコンタクト領域における金属イオンや酸素空孔の振舞い、それらと動作不良、特性劣化との関係が徐々に明らかにされつつある。併せて、製造工程における特性劣化、実使用下での動作信頼性の議論も行われており、それらの検討結果をデバイスや材料設計に反映する試みが活発化している。量産実用化が近づいてきている兆候とも見なせよう。

不揮発性メモリ開発の activity は、米国が依然、他地域と比べ群を抜いている。地域間の研究協業が多いものの、米国は IEDM2017 で 14 件、VLSI2018 で 6 件の発表があった。ちなみに、日本は 0 件 / 3 件、欧州は 10 件 / 1 件、中国は 5 件 / 2 件、韓国は 2 件 / 5 件、台湾は 6 件 / 1 件となる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

EU の参加国が総力を上げて取り組む、10 億ユーロの 10 年プロジェクトが注目される。2013 年 1 月に始まった EU Flagship グラフェンプロジェクトで、「20 世紀の驚異の材料がプラスチックなら 21 世紀はグラフェンであろう」との標語の下に、このプロジェクトからは多くのグラフェン応用が生まれてくると期待される。また、特徴的なこととして、グラフェンやその他の 2 次元材料に関する国際標準化が、このグラフェン Flagship にて強力的に推進されていることが挙げられる。グラフェン応用における国際標準化の必要性が強く認識されている。

米国では、新規な素子を用いたコンピューターシステムの開発に関する大型の国家プロジェクトが進んでいる。また、米国やヨーロッパではニューロモルフィックコンピューティングに関するプロジェクトが新たに立ち上がりつつある。特に米国では、既に終了した STARnet の SONIC が次世代情報処理技術研究を牽引していたようである。米国におけるマグネティック・コンピューティング研究の一環と思われる電歪と磁歪を組み合わせた磁気異方性制御手法が U.C.Berkeley から発表されている。同プログラムには DARPA、NRI、NSF などの予算がついているもようである。Stanford 大学が先導している SystemX Alliance、Non-Volatile Memory Technology Research Initiative から報告されている、DARPA 等のサポートを受けた Nano-Engineered Computing Systems Technology、あるいは N3XT と呼ばれているプロジェクトでは、新材料開発を含む、異種接合に関する研究開発を活発に推進している。例えば、シリコンベースロジック、CNT ロジック、ReRAM、CNT センサを 3 次元積層する技術とそのシステムとアーキテクチャを開発し、主に 2015 年以降に、インパクトの高い学術雑誌、国際会議での報告を続けている。

Beyond CMOS の取り組みとして、米国では Rebooting computing のコンセプトの下、国プロとして注力しており、大きく 2 つの方向性が示されている。一つは ReRAM 系コンピューティングで、アナログ的抵抗変化を示す不揮発性素子 (ex. ReRAM) を人工シナプスとして用い、人工神経回路網を構築するもの。もう一つは、スピン系コンピューティングで、スピンホール効果により MTJ の書込み (磁化反転) を行うデバイス技術を核に、Non-Boolean 領域への展開を図っている。いずれも、生物の脳の働きを模した Neuromorphic Computing を目指したもので、脳に匹敵する高効率 (超省電力) の情報処理が期待される。

日本では 2014 年から始まった革新的研究開発推進プログラム (ImpACT) の中に「無充電

で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」というプログラムが採択され、電流を流さず、電圧のみで磁気メモリ素子を記録し、IT 機器の電力使用量を劇的に削減することを目的としている。上記プログラムは、2016年度より、STT 及び SOT-MRAM と電圧駆動 MRAM の 2 テーマに集約して活動している（5 プロジェクト体制を 2 分科会に改組）。また、2016年度より始まった NEDO「IoT 推進のための横断技術開発プロジェクト」においては、システムとしてデータを収集、蓄積、解析するために必要となる基盤・実装技術、それらに必要となるセキュリティ基盤技術等の研究開発が行われ、それら新技術の社会実装が進められている。超低消費電力デバイスは、それら全てのカテゴリにおいて基幹技術となっている。

（5）科学技術的課題

今後の超低消費電力ナノエレクトロニクスの目指すべき方向は、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次元で）混載し、両方の特徴を生かしたアーキテクチャの実現が必要であり、システム（回路）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目指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の強化が必要で、このファウンドリ機能を基軸にした産学連携の仕組みについてもさらに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で大変重要であり、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人工知能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 Edge AI computing に必要とされると考えられるのは、応用毎に異なる境界条件（コストも含む）と必要条件の高度なすり合わせであり、Foundry 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/Edge AI computing 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	○	→	<p>ロジック関係では、Steep Subthreshold を目指したデバイス開発、新チャネル材料トランジスタの研究開発など、重要な研究領域にしっかりと投資が行われ、深い学術的理解に基づく研究開発が行われている。</p> <p>メモリ関係では、従来の電荷蓄積型に代わり、状態変化（抵抗変化、相変化など）を動作原理とする不揮発メモリの基礎研究が盛んであり、材料、プロセスなどの分野で世界をリードする結果が報告されている。産総研で研究されている超格子 PCM（トポロジカル RAM）は、次世代 PCM として研究進展が期待される。スピン磁気メモリとしては、SOT (spin-orbit torque) -MRAM（東北大）と電圧制御スピン RAM（産総研）の 2 方式が研究されている。前者は 3 端子の電流駆動、後者は 2 端子の電圧駆動。Sub-ns の高速スイッチが低電力で可能と期待。</p> <p>メモリ関係の研究領域としては次の 2 点が重要である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Vertical RRAM の提案と 3D 積層化への応用が米国、韓国と共同で進められている。NAND 置き換えを視野に入れている。Tera-bit の 3D-RRAM 実現のカギはセクタ。2 端子クロスポイントの積層なら、多値にしなくても NAND より高密度にできると期待。 ・ 将来の AI コンピューティングを目指し、RRAM を使ったニューラルネットワーク (NN) プロセッサ、不揮発性メモリアレイを使った In-memory computing の検討が活発化している。
	応用研究・開発	○	→	<p>ロジック関係のデバイス技術が日本の差別化技術にならなくなりつつある。</p> <p>メモリ関係では、DRAM や NAND フラッシュメモリの微細化限界が迫っており、これに代わる不揮発メモリの開発が活発に行われている。また三次元積層技術も盛んに研究され実用段階に入りつつある。NAND フラッシュメモリを製造している東芝は、DRAM 代替としてスピン RAM を使うことを目指した開発を韓国の SK-Hynix と技術的な補完関係を構築しながら共同で進めている。次世代メモリ開発では海外メーカーとの共同開発が一般化している。</p> <p>ReRAM は、2013 年にパナソニックからマイコン用途で市場投入がなされ、2016 年には、富士通セミコンダクター株式会社から、4M ビット品の提供が開始された。2017 年には、パナソニック セミコンダクターソリューションズと半導体ファウンドリである台湾 UMC より、40nm 世代に向けた微細化共同開発がリリースされた。その他、long-term retention の特性劣化など、メカニズムと劣化予測を行えるモデル構築が研究されている。</p> <p>ReRAM の PUF 応用が検討されている（パナソニック）。</p> <p>HfO₂ 材は期待の NVM 用万能材料で、Y ドーピングによる endurance 向上など、応用を前提にした材料研究が進められている。</p> <p>STT-MRAM は、高速性、書き込み電流低減、熱揺らぎ耐性を同時に満たすべく製品化検討が精力的に進められている。MTJ の微細化は、学会発表では 10nm φ 以下まで進んでいる。</p> <p>原子移動型スイッチは実用化検討段階で、FPGA の routing switch 応用などが期待される。遷移金属酸化物を用いる他の RRAM と異なり、Cu と Ru 電極に挟まれた固体高分子電解質中に Cu イオンの導電性フィラメントを形成する。スイッチ用途の他、NVM としての設計も可能。</p>

米国	基礎研究	◎	↑	<p>トポロジカル絶縁体の研究など、新研究領域の取りかかり・立ち上がり早い。</p> <p>ロジック分野においては、新材料・新原理を組み合わせたデバイスの施策など、非常に機敏に動いている。</p> <p>メモリ分野においては、RRAM の一つである CBRAM における Active 電極材料選定の理論研究は注目に値する。試行錯誤でなく理論で、揮発 (セレクトタ向け) / 不揮発 (メモリ向け) の Active 電極材料を選定できる。シミュレーション研究が非常に進んできており、CBRAM におけるセレクトタ / メモリ設計の良きガイドとなる。</p> <p>RRAM をメモリスタとして使い、ニューロモルフィック・コンピューティングあるいは In-memory computing システムを構築するための理論研究が活発。そのアレイは NN として働き、アナログコンピュータとしてのオンライン機械学習が可能。素子の信頼性が低くても (Bit Error Rate が多少大きくても)、学習機能により NN (アナログコンピュータ) としては十分、機能するとの見解。信頼性に対する考え方が異なる。</p> <p>RRAM の混載使用が検討されている。クロスポイント型でなく 1T1R として使うことで、ロジックとの融合を図る。そのための 1T として ON 電流が大きい 2D-MoS₂ FET が検討されている。10 nm 以下のノードを目指しており、3D 化も視野に入れている。</p>
	応用研究・開発	◎	↑	<p>シリコンフォトニクスの研究開発は猛烈なスピードで進んでいる。各種 NVM 開発が精力的に行われている。米国単独でなく、他地域との共同開発が目立つ (調査した 23 件中、14 件)。</p> <p>STT-MRAM では、混載以外の用途として 3D 積層化検討が進んでいる。pMTJ (垂直磁化型 MTJ) のインテグに向けた Doped-HfOx の 2 端子 bipolar セレクトタを使い、大容量クロスポイント型をデモ。BEOL の 400℃ 処理に耐える pMTJ は昨今の大きな要請であり、材料の開発が進められている。MTJ のスケーリング (ex. 20 nm φ 以下) 検討も進む。MTJ 周縁の加工ダメージがなければフリー層の異方性磁界は MTJ サイズ減少とともに増加し、結果として磁化の熱揺らぎ耐性を維持できることが示された。MTJ スケーリングに伴う抵抗増加を抑えるため、RA (抵抗×面積) 低減も検討されている。磁化固定層の薄膜化により多層膜界面の平坦化を図り、MgO 膜の信頼性を損なわずに厚みを低減し、RA を下げた。低電圧駆動の MTJ 開発も進められており、10 nm ノード以下のロジック電圧でも動く見通しを得ている。混載用途では今後、必要性が増す。</p> <p>RRAM では、3D 積層化を実現するための vertical メモリセル構造が検討されている。従来のような縦積みではなく、メモリ素子とセレクトタを同軸円柱として形成する (同軸で半径方向に積層)。</p> <p>一方、各種 NVM の動作信頼性に限界を認め、リフレッシュもよしとする現実的使い方により DRAM 代替を狙う提案もされている。</p>

欧州	基礎研究	○	↑	<p>2014年から2020年の7年間で実施される Horizon2020 において、ICTは重要なテーマと位置づけられており、ナノエレクトロニクスやフォトニクス技術を含む技術開発が新世代システム開発として実施される。</p> <p>メモリ関係： 3D積層のニューロモルフィックコンピューティングの研究では、各種メモリスタデバイス (PCM, RRAM, FTJ) におけるアナログ的フィラメント形成のモデル作成と原子レベルのシミュレーションを通じて、最適なデバイス選定が検討されている。RRAMを用いたNN形成の研究では、2つのRRAM (w/ 1T) で1つのシナプスを形成し、各RRAMにexcitorとinhibitorを担わせる検討がシミュレーションにて行われている。</p> <p>メモリ及びセレクトタのスイッチングメカニズムの解析が、原子レベルの精密なシミュレーションにより明らかになりつつある。CBRAMでは、フィラメント先端のナノコンタクトにおける僅か数コの原子の移動(再配置)で抵抗が6桁変わる様子が再現されている。RRAM用2端子選択デバイスとして有望なOTSセレクトタでは、a-Ge-Seの不純物準位解析等を通じて、電子/熱的な特性改善の指針が得られている。</p> <p>セレクトタレスの試みもある。メモリ膜に自己整流、セルフコンプライアンス特性を持たせる。ポイントはメモリ膜における欠陥密度を一定に保つことで、そのための制御層を導入。</p>
	応用研究・開発	○	↑	<p>各種NVMの実用化検討が行われている。OTSセレクトタ搭載RRAMの読み出し方法の工夫による信頼性向上、HfO₂膜への局所的Siイオンインプラでスイッチング領域を限定することによるRRAM特性改善、CBRAMのスイッチング特性及び信頼性を改善するカルコゲナイド材料の検討、混載向けHfO₂ベースのFeFET-RAMの開発(32MBitアレイを22nm-nodeのFD-SOI上で作製)、PCMを用いたComputational Memoryによる非ノイマン型コンピューティング、MTJのナノ・パターンニングによるSTT-MRAMの高密度化、BEOLの400℃処理にも耐えられるトップピン型pMTJを有するSTT-MRAMの開発、STT-MRAMにおけるアプリを考慮した磁化フリー層の熱安定性評価など。並行して、各種メモリセル特性に合わせたセレクトタの開発も進められている。耐熱性に優れたGe-Se系のOTS材料、混載PCMを可能にするゲート付きFD-SOIダイオード(Trに代わる混載unipolar NVM向けセレクトタ)、CB型の揮発性unipolarセレクトタの開発など。</p>
中国	基礎研究	◎	↑	<p>RRAM関連の研究が活発。RRAMをニューロモルフィック・コンピューティングに使うためのアナログ特性発現制御の基礎研究を、米国と共同で行っている。HfO_x膜中の酸素空孔(Vo)分布を制御する新たなメモリ膜構成を提案し、精密なアナログ的抵抗変化を可能にしている。また、酸化膜型RRAMのフィラメントgap領域におけるVo挙動をRTN(random telegraph noise)の解析を通じて把握する研究が行われており、高抵抗状態における抵抗分布のメカニズム及び対策が見えてきている。</p>
	応用研究・開発	○	→	<p>RRAM開発はこれまでもっぱらSCM狙いだったが、混載用途にも適用範囲を拡げてきている。28nmプロセスにてBEOLで作る。eFLASHに比べ、消費電力、コスト等の様々なパフォーマンスで有利。一方で、SCM向けに3D積層化の開発も進めている。積層膜の側面を使ってメモリbitを形成し、8層まで増やしている。HfO₂/TaO_xの2層からなるTMO(遷移金属酸化物)型メモリ膜を採用。メモリセルに自己選択性があり、セレクトタ不要。不揮発性メモリのセレクトタ技術を応用したTCAM(Ternary Content Addressable Memory)の提案がある。酸素空孔フィラメント型ダイオード2コでTCAMを構成。スイッチ型メモリスタ特性と整流性を確認。10nm以下のスケラビリティがある。</p>

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	○	↗	メモリ関係では、セレクト材料の研究として、複雑な多元系でなく、2元系 Te ベース OTS や As ドープの SiO ₂ などのシンプルな材料構成で優れたセレクト特性を発現し得ることを示している。また、FE-RAM (Fe-FET RAM) に好適な Si:HfO ₂ 膜の材料・プロセス研究を米国と共同で行っている。ナノグレイン化することでスイッチング特性を向上。 シナプスデバイスを従来からある電荷蓄積型デバイスの延長で作製する研究が行われている。特殊な材料を使ったメモリスタでなくても、Si ベースのダイオードや NAND Flash など STDP 特性を発現できることをシミュレーションで示している。ニューラルネットワークとしての学習精度も遜色なく、注目に値する。
	応用研究・開発	○	↗	STT-MRAM では、混載向け 28nm FDSOI プロセスで高い動作信頼性を持つ MTJ を作製し得ること、10 nmφ以下の MTJ スケーリング、製造ばらつきを認めた上で各種特性をバランス良くまとめる駆動条件の最適化などが報告されている。
台湾	基礎研究	○	→	RRAM アレイを用いて DNN (deep neural network) のためのオンライン学習を加速する研究、In-memroy computing のパフォーマンスを低下させる RRAM の抵抗ばらつきの影響を抑制する計算スキームの研究が米国と共同で行われている。RRAM の抵抗変化は完全なアナログである必要はなく、多値でも十分使うことができ、2 値のデジタル RRAM を使っても NN を構成できるという結果は、応用への障壁を下げると期待される。
	応用研究・開発	◎	↗	3D 積層クロスポイント型 PCM の開発を米国と共同で行っている。カルコゲナイドを使った OTS (Ovonic Threshold Switching) セレクト特性の改良、自己発熱により Reset 動作を容易にするナノピラー形状の工夫、製造工程における熱耐性向上 (BEOL における 400°C の thermal budget) や加工ダメージを低減するための膜構成などが検討されている。 STT-MRAM を混載用途で使う際の信頼性に関する検討が行われている。はんだリフローのプロセス温度 (260°C) や外部磁界 (ex.300 Oe) の影響など、実用化・製品化を強く意識した取り組みである。RRAM の実用化に向けた信頼性評価・解析が進められている。素子単体からメモリアレイとしての信頼性向上に重点がシフトしている。遷移金属酸化物を用いた RRAM が対象で、retention にて高抵抗状態が変動するメカニズムが明らかになりつつある。 PCM, STT-MRAM, RRAM すべてが取り込まれており、不揮発性メモリ開発に対する顕著な活動が見て取れる。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、絶対評価である。

◎：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、×：活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) Toshitsugu Sakamoto et al., "Atom Switch with Improved Cycle Endurance Using Field Enhancement for Nonvolatile SoC," *2018 IEEE International Memory Workshop (IMW)*, 2018. doi:10.1109/imw.2018.8388781
- 2) Shunsuke Fukami et al., "Magnetization Switching by Spin-orbit Torque in an Antiferromagnet-ferromagnet Bilayer System," *Nature Materials* 15, no. 5 (2016): 535. doi:10.1038/nmat4566
- 3) Hiroki Noguchi et al., "Novel Voltage Controlled MRAM (VCM) with Fast Read/write Circuits for Ultra Large Last Level Cache," *2016 IEEE International Electron Devices*

- Meeting (IEDM)*, 2016. doi:10.1109/iedm.2016.7838494
- 4) H. Yoda et al., "Voltage-control Spintronics Memory (VoCSM) Having Potentials of Ultra-low Energy-consumption and High-density," *2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2016. doi:10.1109/iedm.2016.7838495
 - 5) Hisashi Shima, Ni Zhong and Hiro Akinaga, "Switchable Rectifier Built with Pt/TiO_x/Pt Trilayer," *Applied Physics Letters* 94, no. 8 (2009). doi:10.1063/1.3068754
 - 6) Reiji Mochida et al., "A 4M Synapses Integrated Analog ReRAM Based 66.5 TOPS/W Neural-Network Processor with Cell Current Controlled Writing and Flexible Network Architecture," *2018 IEEE Symposium on VLSI Technology*, 2018. doi:10.1109/vlsit.2018.8510676
 - 7) Senju Yamazaki et al., "Reliability Enhancement of 1Xnm TLC for Cold Flash and Millennium Memories," *2015 Symposium on VLSI Technology (VLSI Technology)*, 2015. doi:10.1109/vlsit.2015.7223642
 - 8) Scott Deboer, "Memory Technology: The Core to Enable Future Computing Systems," *2018 IEEE Symposium on VLSI Technology*, 2018. doi:10.1109/vlsit.2018.8510707
 - 9) Stefan Mueller, "Ferroelectric HfO₂ and Its Impact on the Memory Landscape," *2018 IEEE International Memory Workshop (IMW)*, 2018. doi:10.1109/imw.2018.8388831
 - 10) Guenole 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. doi:10.1109/vlsit.2018.8510672
 - 11) James Pak et al., "40nm & 22nm Embedded Charge Trap Flash for Automotive Applications," *2018 IEEE International Memory Workshop (IMW)*, 2018. doi:10.1109/imw.2018.8388778
 - 12) Sung-Tae Lee et al., "Neuromorphic Technology Based on Charge Storage Memory Devices," *2018 IEEE Symposium on VLSI Technology*, 2018. doi:10.1109/vlsit.2018.8510667
 - 13) Hang-Ting Lue et al., "A Novel 3D AND-type NVM Architecture Capable of High-density, Low-power In-Memory Sum-of-Product Computation for Artificial Intelligence Application," *2018 IEEE Symposium on VLSI Technology*, 2018. doi:10.1109/vlsit.2018.8510688
 - 14) Can Li et al., "In-Memory Computing with Memristor Arrays," *2018 IEEE International Memory Workshop (IMW)*, 2018. doi:10.1109/imw.2018.8388838
 - 15) Chih-Cheng Chang et al., "Mitigating Asymmetric Nonlinear Weight Update Effects in Hardware Neural Network Based on Analog Resistive Synapse," *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems* 8, no. 1 (2018): 116. doi:10.1109/jetcas.2017.2771529
 - 16) Kazuhiro Ohba et al., "Cross Point Cu-ReRAM with BC-Doped Selector." *2018 IEEE International Memory Workshop (IMW)*, 2018. doi:10.1109/imw.2018.8388824.
 - 17) Toshiyuki Taniuchi et al., "Direct Observation of Chemical States in ReRAM by Laser-based Photoemission Electron Microscopy," *2018 IEEE 2nd Electron Devices Technology*

-
- and Manufacturing Conference (EDTM)*, 2018. doi:10.1109/edtm.2018.8421513
- 18) Masashi Arita et al., "Oxygen Distribution around Filament in Ta-O Resistive RAM Fabricated Using 40 Nm CMOS Technology," *2018 IEEE International Memory Workshop (IMW)*, 2018. doi:10.1109/imw.2018.8388844
- 19) Gabriele Navarro et al., "Phase-Change Memory: Performance, Roles and Challenges," *2018 IEEE International Memory Workshop (IMW)*, 2018. doi:10.1109/imw.2018.8388845
- 20) Zhiqiang Wei et al., "From Memory to Sensor: Ultra-Low Power and High Selectivity Hydrogen Sensor Based on ReRAM Technology," *2018 IEEE Symposium on VLSI Technology*, 2018. doi:10.1109/vlsit.2018.8510697

2.3.2 発光・表示デバイス

(1) 研究開発領域の定義

高解像度で視認性・色再現性が高く、高効率かつ低消費電力で動作する発光・表示デバイス（ディスプレイ）の実現を目指す研究開発領域である。発光材料の蛍光・燐光の高効率化や発光色制御、発光デバイスの高性能化（高速化、低消費電力化）、カラーフィルターの透過率・色再現性・耐久性の向上、空気や水などによる発光材料や発光デバイスの劣化保護、量子ドットやマイクロ LED などの新たな表示デバイスの作製プロセス開発、などの研究開発課題がある。

(2) キーワード

ディスプレイ、Near-Eye Display、液晶、有機 EL、有機 LED、OLED、熱活性化遅延蛍光、TADF、第三世代発光分子、Hyperfluorescence、量子ドット、マイクロ LED、カラーフィルター、BT.2020、フレキシブル、車載、AR・VR・MR

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

現代の人々の生活の周りには様々な発光・表示デバイス（以下、ディスプレイ）が存在している。1970年代に世界で初めてカラーテレビが誕生して以来、高度情報化社会とインターネットの普及に伴い、人々の周りにはテレビ以外にモニター、ノート PC、スマートフォン、タブレットと多様なデバイスが生まれてきた。ディスプレイには様々な方式があるが、ここではナノテクノロジー・材料との関係が深く、最近注目されている有機 EL、量子ドット、マイクロ LED を中心に記載する。

これまでディスプレイの代表的な用途はテレビであり、「家で」「備え付けの大画面で」視聴するという統一の状況で使用されるものであった。しかし近年、スマートフォンを始めとするディスプレイは「屋外で」「手で持てる大きさで」「持ち運びながら」視聴する場面が増え、それぞれの用途に合わせたディスプレイの研究開発が必要である。また、今後はその使用場面がさらに多様化すると考えられる。例えば自動車の EV 化により、これまでと異なる縦横比を持つディスプレイが採用され始めている。また、エンターテインメントや業務用に活用が期待されている VR（仮想現実：Virtual Reality）・AR（拡張現実：Augmented Reality）・MR（複合現実：Mixed Reality）は、これまでのディスプレイと異なり眼からの距離が非常に近い Near-Eye Display であるため、これまででない高解像度が求められる。さらに、フレキシブル基板上にディスプレイを搭載するフレキシブルディスプレイが実現すると、曲面を始めとするあらゆる場所にディスプレイを「貼る」ことが可能になる。

これらの実現に向けては発光材料のみならずディスプレイを構成するすべての材料の改良が求められており、今後これらの研究開発の発展により、ディスプレイに新しい価値が生まれると考えられる。例えば、有機 EL ディスプレイの発光素子である OLED（Organic Light Emitting Diode）では、現在、りん光材料が実用に用いられているが、希少資源やコストの問題から第三世代の発光分子である熱活性化遅延蛍光（TADF：Thermally Activated Delayed Fluorescence）分子への展開が進み、世界的規模で研究開発が活発化している。TADF は簡単な分子設計で 100% の電気・光変換（量子効率）を実現する究極の発光材料として期待されている。

[研究開発の動向]

現在、ディスプレイの主役となっている液晶ディスプレイは、人間が網膜で認識できる色再現領域と比べるとまだ狭い領域であり、より自然に近い色を実現するべく「色再現領域の拡大」は全てのディスプレイに共通している研究課題の一つである。液晶ディスプレイは白色バックライトに RGB（赤緑青）のカラーフィルターを通すことで色を発現しており、これらの材料のスペクトルの改良により、色再現領域の拡大が期待できる。色の規格はこれまで各種団体が提案してきており、直近の目標としては NHK が提唱する BT.2020 が挙げられる。この色規格の実現に向けて、従来の白色バックライト＋カラーフィルターの組み合わせだけでなく、有機 EL（OLED）や量子ドット、マイクロ LED といった材料も有力な候補であり、今後どの技術が主役となるのか、その材料の特性に加えて化合物の安定性や生産の安定性、コスト等を鑑みて研究開発が行われている。

また、ディスプレイに求められる一般的な研究開発の方向性として、高解像度と高輝度が挙げられる。テレビにおいては既に 4K、将来は 8K といった高解像度に向けた研究開発が進められている。また、VR・AR・MR といった Near-Eye Display においては眼に近接するため超高解像度が必要であり、2018 年 10 月にはソニーから 4000ppi を超える AR ディスプレイの販売が開始され、今後もこのようなディスプレイが増えると想定される。しかし、高解像度が実現すると同じ面積当たりのピクセル数が多くなり、その結果パネル以外の面積も増えることで開口度の低下につながる。開口度の低下はパネル輝度低下につながるため、あらかじめ個々のピクセル輝度を上げることによって、同じ輝度を保ったまま、高解像度を実現すべく、パネルの高輝度化も重要な研究課題の一つである。なお、モバイル用途では高輝度化は駆動時間とも関係することから、消費電力との関係なども考慮しておくことが求められる。

ディスプレイ開発のもう一つの大きな流れとしてはフレキシブル化が挙げられる。既にスマートフォンでは端部が曲がったディスプレイが製品化されているが、用途拡大に向けたさらなるフレキシブル化に向けて、発光材料のみならずトランジスタ材料や外部からの空気や水の侵入を防ぐバリアフィルムの開発も活発に進められている。

スマートフォンのディスプレイでは、2017 年に Samsung Galaxy シリーズに続き iPhone でも有機 EL が採用され、今後の中国メーカー（Huawei、Xiaomi、vivo など）の動向が注目される。中国ではディスプレイ工場への投資を大規模に進めており、今後のディスプレイ業界の市場や技術、需給動向を把握するには中国でのパネル生産動向に注目しておく必要がある。

（４）注目動向

[新展開・技術トピックス]

・有機 EL/TADF

有機 EL 材料は、1980 年代の C.W.Tang らによって発表された論文を端緒として開発が活発化している。有機化合物に電界をかけて赤・青・緑色を発光させることができ、液晶と比べて電力をオフにすることで完全な黒を表現できることや一部の部材が不要になることから、高コントラストとフレキシブル化、薄膜化が可能なディスプレイとして注目を集めている。既にスマートフォン向けには Samsung Display、大画面テレビ向けには LG Display が大半のシェアを有している。

その中でもここ数年は熱活性化遅延蛍光（TADF）と呼ばれる材料の開発が活発になってい

る。TADF は励起されたエネルギーの 75% の割合を占める無輻射失活のりん光に対応するエネルギーを、項間交差により残り 25% の蛍光にエネルギー移動させることで、外部から得たエネルギーを 100% 発光に転換できる現象である。緑色、黄色、赤色の発光 TADF においては、発光効率と耐久性において実用化への可能性が大きく見えてきている。難易度の高い青色発光 TADF においても、2018 年度に大幅な性能向上が報告され、実用化の可能性が見えてきた。TADF の開発に携わる九州大学発のベンチャー企業 (kyulux) には、Samsung Display、LD Display、JDI を始めとする複数のパネルメーカーが出資しており、業界全体で注目を集めている。kyulux 社のプレスリリースによると 2019 年中に量産が開始される可能性がある。

このように、今後、OLED の発光材料において、従来の蛍光・りん光材料から TADF 材料へのパラダイムシフトが加速していくと予想される。最近では、一重項分裂 (Singlet Fission) を OLED の発光層に用いることで、内部発光効率 100% を超える OLED も報告されており、赤外発光デバイス等に有用な技術になる。また、OLED 延長線上に位置する電流励起による有機半導体レーザーも、その実現も期待される。

・量子ドット

色再現領域の拡大はディスプレイの主要課題の一つであり、色再現領域を拡大させるには赤・青・緑の 3 色の発光スペクトルを狭線化・最適化することが必要である。発光スペクトルはその物質の持つエネルギー振動準位を表しており、発光スペクトルを狭線化させるには、エネルギー振動準位をできるだけ単一にする必要がある。

量子ドットは、直径が 2-10 ナノメートル (原子 10-50 個) と、非常に小さい均一な粒子サイズを持つ無機材料である。均一なサイズを持つことでエネルギー準位が単一化され、励起状態を 3 次元的に閉じ込めることで、より単一の発光スペクトルを得ることができる。その可能性については従来から注目されていたが、近年その発光特性や化合物の安定性、量産性が向上し、既にテレビへも採用されている技術となっている。

・マイクロ LED

量子ドットに次いでディスプレイ業界で注目されている技術がマイクロ LED である。マイクロ LED は文字通りマイクロサイズ (一般には $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$) の LED チップをバックライトに敷き詰めたものであり、そのチップサイズの小ささから高解像度のディスプレイの実現が可能である。Apple が 2014 年にマイクロ LED のベンチャー企業 (LuxVue 社) を買収したことを端緒として、ディスプレイメーカー各社がベンチャー企業への投資等を通して、マイクロ LED の技術開発に注目している。

マイクロ LED は無機結晶のエピタキシャル成長、チップ化、モジュール化という工程を経て作製されており、それぞれの工程において解決すべき課題が山積している。それらの中でも大きな課題は、ウエハー上に作製した LED チップをモジュールに組み込む際の設置作業効率である。マイクロオーダーのチップを 1 つずつ搭載するには非常に時間がかかり、特に大画面のテレビ向けには現実的ではない。そこで、ウエハー上に LED チップを一度に製造し、大量の LED チップを一度に運ぶ方式があるが、この方法では赤・青・緑の 3 色は作製できず単一色のみとなる。その場合はさらにカラーフィルター等で色変換を行う必要があり、工程の複雑化やコストアップにつながるため、最適なプロセスに向けてはまだ研究開発が必要である。

2018年時点ではSID Display Weekにおいて台湾の液晶パネルメーカー AUO が初めて 16 インチのプロトタイプを展示した程度に留まっており、実際の製品への搭載は早くても 2020 年以降であると想定される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

欧州では、Horizon2020 を中心として、HyperOLED プロジェクト（2017 年～2019 年）など大きな研究開発チームが組織され、TADF のメカニズム解明から新材料の開発まで網羅的に研究開発が進められている (https://cordis.europa.eu/project/rcn/205938_en.html)。プロジェクトでは、メルク、Cynora 等の企業をサポートする体制が構築されている。

中国においても、2019 年度に TADF を中心とした OLED 材料に関するファンドが準備されている。

韓国においては、第 3 次科学技術基本計画に掲げられた重点国家戦略技術の一つに「超集密ディスプレイ工程および装置技術」が挙げられており、「主力輸出産業の高度化」という主要課題に対する取り組みとしてピックアップされている。

日本における次世代ディスプレイの実現に向けた研究開発としては、フレキシブル化を目的とした国家プロジェクトなどがある。NEDO では「次世代プリントドエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発」（平成 22 年度～平成 30 年度）が実施されており、省エネ・大画面・軽量・薄型・フレキシブル性を実現可能なプリントドエレクトロニクスの技術開発が行われている。プラスチックフィルム基板上に TFT アレイを形成するための材料や、そのプロセス開発に取り組んでおり、電子ペーパー、デジタルサイネージ、フレキシブルディスプレイや携帯端末への展開が期待されている。JST では戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)において「有機材料を基礎とした新規エレクトロニクス技術の開発」があり、その中で新しい高性能ポリマー半導体材料と印刷プロセスによる AM-TFT を基盤とするフレキシブルディスプレイの開発が進められている。また、ERATO「安達分子エキシトン工学プロジェクト」（平成 25 年度～平成 30 年度）では、分子エキシトン過程の制御により新たな有機の発光材料、発光デバイスの研究開発が進められている。

（5）科学技術的課題

これまでは主要用途であったテレビ向けに色再現領域や解像度、輝度の改良を行ってきたが、その更なる改良と共に、既に出現している多種多様なディスプレイの実現に向けて以下のような課題が残されている。

・さらなる色再現領域の拡大（スペクトルの狭線化／スペクトル極大波長の最適化）

色再現領域の拡大に向けては、赤・青・緑のスペクトルの狭線化と共に、スペクトル極大波長の最適化が求められる。従来の液晶ディスプレイ＋カラーフィルターの改良と共に、量子ドットやマイクロ LED といったシャープなスペクトルを持つバックライトによる色再現領域の拡大も進められている。しかし、実用化に向けてはこれらの特性と合わせて化合物の安定性、安定な生産方法、生産コストもクリアする必要があり、それらを総合的に満たす材料系の創成が求められている。

・高解像度 (素子構成/プロセスの改良)

使用シーンの拡大が見込まれる VR・AR・MR 向けディスプレイは網膜に近接したディスプレイであり、特に VR ではディスプレイの解像度が落ちることで使用者の VR 酔いに直結するため、高解像度へのニーズが他用途と比べて大きい。ソニーが 2018 年 10 月に発売している UXGA 解像度 (1600 × 1200) のマイクロ OLED ディスプレイは、トランジスタの小型化を行い、補正回路で特性ばらつきをカバーしたうえで、トランジスタのレイアウトやプロセスを最適化し、さらにカラーフィルターの配置を変更することで、近接ディスプレイにも適用可能なディスプレイを実現している。このように高解像度に向けては材料設計のみならず、素子構成の改良を含めた研究開発が求められる。

・部材のフレキシブル性 (材料の安定性向上)

新しいディスプレイとして期待されているフレキシブルディスプレイに向けては、各種部材のフレキシブル化が求められる。発光層 (液晶+カラーフィルター、有機 EL 等)、偏光板、バックプレーン、バリアフィルムといったあらゆる部材に対してフレキシブル状態における材料の安定性と特性維持の両立は重要な開発課題になる。

・バックプレーン改良

スマートフォンに使われているディスプレイは、今後は性能面での差別化が難しくなり、従来にないデザイン性が求められる。例えば、端部が曲がった形状やディスプレイ以外の部分 (ノッチ部) 低減や、従来の四角形から丸みを帯びたデザインを始めとする形状の自由度が求められる可能性がある。それらの実現にはトランジスタを始めとするバックプレーンの改良が必須であり、今後さらに研究開発が求められる分野である。

・TADF-OLED の青色発光の高効率化と高耐久化

OLED で最大の課題は、高効率と高耐久性の両方を満足する青色発光材料の開発である。現状では、実用化が可能な安定な青色リン光材料が未だ得られていないため、主にアントラセン系の三重項-三重項励起子消滅 (Triplet-Triplet Annihilation : TTA) プロセスを用いた青色蛍光分子が実用に用いられている。TADF も安定性の高い青色材料が期待されているが、現状では、様々な課題を抱えている。例えば、発光効率に関しては EQE>20% を超える OLED も報告されているが、安定性に関しては長いものでも数 10 時間程度に留まっている。TADF では、本質的に三重項励起状態のエネルギーレベルを高くしなければならないため、TTA で積極的に用いられているアントラセン等の電気化学的に強固な分子骨格を用いることは出来ない。OLED における分子の劣化は、ラジカル状態の安定性や三重項励起子の安定性が大きく関与している。そのため、今後、劣化機構を解明するとともに、光化学的や電気化学的な視点から構成原子間の結合エネルギーの安定化、ラジカルの安定性の向上が求められる。さらには、多くの化学反応が寿命の長い励起三重項状態から生じることから、三重項励起寿命の高速化が素子の安定性の向上にとって重要なポイントになる。

(6) その他の課題

色再現領域の拡大に向けて開発が進められている量子ドットやペロブスカイト型材料には有

害な物質である Cd や Pb が含まれており、EU の RoHS 規制を始めとする各国の法規制への適用が必須である。現在は研究開発の発展に伴い、RoHS 規制をクリアする材料系も見出されてきているが、法規制の変更も起こりうるため、各国の法規制状況は常に注意を払う必要がある。

TADF のコア技術は日本で生まれた技術であり、世界をリードする立場にある。大学を中心とした基礎研究の深掘りとともに、材料開発を迅速に進めるための計算科学、AI を利用した網羅的な材料開発スキームの確立なども求められる。また、早期の実用化に向けて、大学、国研、化学メーカー、材料メーカー、デバイスメーカーなどを含む産学官連携のエコシステムの構築が望まれる。

(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	◎	→	フレキシブル化に向けた基礎研究として、NEDO「次世代プリントドエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発」、JST S-イノベ研究開発テーマ「有機材料を基礎とした新規エレクトロニクス技術の開発」が推進されている。 TADF の材料開発において九大 OPERA、京都大学化研、関西学院大学を中心に、材料開発から基礎的な光物理過程の解明、デバイス物性まで網羅的な研究開発が進められている。
	応用研究・開発	○	→	九大発ベンチャー Kyulux が実用化を視野に網羅的な材料開発とデバイス開発に取り組んでいる。また、出光興産、JNC、住友化学、保土谷化学、NSCC、半導体エネルギー研究所 (SEL) 等において、精力的に材料開発が進められている。 一方、デバイス開発においては、JDI、JOLED において一部開発が進められているが、韓国、中国メーカーに比較すると、人・資金などの面で劣っている。
米国	基礎研究	◎	→	ノースカロライナ大学、MIT、ハーバード大学、ジョージアテック等で主に計算科学を用いた精密な分子設計が進められており、新しいコンセプトの分子創出に繋がっている。今後、AI 等を用いたコンビナトリアルな分子設計が進む可能性が高い。
	応用研究・開発	○	→	量子ドットの最大手 Nanosys は開発加速。量産性向上のため DIC と協業シंकジェット QD インク開発に着手した。 Apple 社は次世代のディスプレイに向けに、マイクロ LED の検討にも着手している。 りん光材料で世界を席巻している Universal Display Corporation (UDC) が、ポストりん光材料として TADF 分子の開発に乗り出している。これまでのりん光材料のノウハウを生かすことで、材料純度や周辺材料とのすり合わせ技術で優位性がある。
欧州	基礎研究	◎	→	Horizon2020 でプロジェクト「Flexible and Wearable Electronics」が推進されていた (2018 年 4 月で終了)。 発光材料に関する Horizon2020 等の大型プロジェクトが主に英国、ドイツを中心に進められており、基礎的な光物性の解明からデバイスの高性能化まで、幅広い研究開発が進められている。
	応用研究・開発	○	→	Fraunhofer FEP にて次世代フレキシブルディスプレイが開発されている。 ドイツの Cynora 社が独自の Cu 錯体の開発を断念し、九大 OPERA の技術をコピーして 100 名規模の大人数で材料開発を進め、韓国、中国のパネルメーカーとの協業を進めている。
中国	基礎研究	◎	↗	精華大学、浙江大學、華南理工大学、香港大学等の有力大学において、TADF の材料からデバイス開発まで集中的に行われている。論文数の伸びが極めて著しい。
	応用研究・開発	○	↗	大型パネルの量産技術・投資が進み、2019 年にはフレキシブル有機 EL も量産開始が見込まれる。 BOE、GVO、天馬、Visionox 等の有力パネルメーカーが TADF-OLED の開発に着手している。 量子ドット (QD) ベンチャー、新型ディスプレイへ投資する企業が増加している。

韓国	基礎研究	○	→	ソウル大学、成均館大学、KAIST等の有力大学において、TADFの材料からデバイス開発まで網羅的に行われている。
	応用研究・開発	◎	→	第3次科学技術基本計画の30重点国家戦略技術として「超集密ディスプレイ工程および装置技術」が挙げられている。Samsungは量子ドットTVの開発を推進している。LGディスプレイ、Samsungエレクトロニクスにおいて、TADFのパネル化の検討が進められている。また、多くの中小化学メーカーがTADFの開発に取り組んでいる。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、絶対評価である。

◎：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、×：活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) C. W. Tang and S. A. Vanslyke, "Organic Electroluminescent Diodes," *Applied Physics Letters* 51, no. 12 (1987) : 913. doi:10.1063/1.98799
- 2) S. Boudin, "Phosphorescence Des Solutions Glycériques Déosine Influence Des Iodures," *Journal De Chimie Physique* 27 (1930) : 285. doi:10.1051/jcp/1930270285
- 3) C. A. Parker and C. G. Hatchard, "Triplet-Singlet Emission In Fluid Solution," *The Journal of Physical Chemistry* 66, no. 12 (1962) : 2506. doi:10.1021/j100818a043
- 4) Ayataka Endo et al., "Thermally Activated Delayed Fluorescence from Sn (4+) -Porphyrin Complexes and Their Application to Organic Light Emitting Diodes - A Novel Mechanism for Electroluminescence," *Advanced Materials* 21, no. 47 (2009) : 4802. doi:10.1002/adma.200900983
- 5) Hiroki Uoyama et al., "Highly Efficient Organic Light-emitting Diodes from Delayed Fluorescence," *Nature* 492, no. 7428 (2012) : 234. doi:10.1038/nature11687
- 6) D. Y. Kondakov, "Triplet-triplet Annihilation in Highly Efficient Fluorescent Organic Light-emitting Diodes: Current State and Future Outlook," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 373, no. 2044 (2015) . doi:10.1098/rsta.2014.0321
- 7) Ryo Nagata et al., "Exploiting Singlet Fission in Organic Light-Emitting Diodes," *Advanced Materials* 30, no. 33 (2018) . doi:10.1002/adma.201801484
- 8) Atula S. D. Sandanayaka et al., "Toward Continuous-wave Operation of Organic Semiconductor Lasers," *Science Advances* 3, no. 4 (2017) . doi:10.1126/sciadv.1602570

2.3.3 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／高機能なデバイスや装置・システムを開発し、情報通信、医療・バイオ、加工、分析・計測、映像、照明、発電など幅広い応用分野への適用を目指す研究開発領域である。用いる材料の高品質化、デバイス構造の最適化、デバイスの小型化・集積化、低消費電力化、超短パルス化、分解能の向上、超精密計測、光子状態の量子制御などの研究開発課題がある。

(2) キーワード

シリコンフォトニクス、インターコネク、光電子融合、光配線、光インターポーザ、光トランシーバ、光スイッチ、大規模光集積、フォトニックネットワークオンチップ、光ニューラルネット、光コンピューティング、ナノフォトニクス、フォトニック結晶、プラズモニクス、メタマテリアル、量子フォトニクス、トポロジカルフォトニクス、単一光子源

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

光技術は光通信、レーザー加工、3Dプリンティング、LED照明、太陽光発電、バイオイメージングなど幅広い応用分野ですでに利用されており、今後も新たな情報処理分野や健康・医療分野などでさらなる進展が期待されている。このように、光技術の応用範囲はかなり広いが、ここでは「フォトニクス」として電子機器や電子デバイス（エレクトロニクス）との関わりが強いコンピュータやサーバーの光通信・光配線技術、これらの高速化、大容量化、低消費電力化、小型化などを支える新たな光デバイス技術・材料技術を中心に記載する。

現代の情報社会を支えるインターネットには光ファイバーネットワークが必要不可欠であり、高機能通信用レーザーにより高速・大容量な情報通信が可能となっている。現在も、光の持つ波動としての自由度である波長・偏光・位相・空間分布を活用した多重化によりさらなる高速化・大容量化が進められている。このような波動としての光を制御する技術の完成度は高く、現在の光通信技術の基礎を支えているだけでなく、今後もコンピュータ・サーバーのラック間・ボード間・チップ間・チップ内の光配線技術（光インターコネク）へと繋がる基盤的な技術となっている。

光デバイスの小型化や高性能化に向けて期待されているのが、ミクロン以下の微細構造で光を制御するナノフォトニクス技術である。ナノフォトニクス技術は、微細加工技術の進展によって2000年頃から急激に立ち上がり、フォトニック結晶、プラズモニクス、メタマテリアル、シリコンフォトニクスなどの分野に分かれて進展し、様々なデバイスに適用されるようになり、次世代の光集積技術の有望な候補として期待されている。特に、チップ内光インターコネクや光ネットワークオンチップを実現する技術として、集積回路のプロセス技術を活用したシリコンフォトニクス技術が注目され、コンピュータの光配線応用に向けた開発が活発化している。また、ナノフォトニクスによる高密度集積を利用して、大規模なフェーズドアレイや大規模な光干渉回路など、従来技術では大規模化が難しかったものへの応用研究が活発化しており、広い範囲に波及効果が見えつつある。

一方、光は波動としての性質だけではなく量子としての性質も持つ。スクイーズド光、単一

光子、もつれ光子などの量子としての光は、ショットノイズ限界の打破、アンチバンチングや量子もつれなど、波動としての光とは質的に異なる現象をもたらすことが知られている。これら量子としての光を制御する技術は、波動としての光を制御する技術と比較すると未熟であり、光の幅広い応用分野で利用できるような状況ではないが、量子としての光が簡便に利用可能となれば、量子暗号通信など既存技術と異なる原理に基づく応用の開拓が期待される。

[研究開発の動向]

近年、様々なナノフォトニクス技術が超小型化と低消費電力化などを目的として、デバイスに応用され始めている。例えば、発光デバイスとしては、化合物半導体フォトニック結晶ナノ共振器構造を用いたレーザーで、極低閾値での室温連続電流注入発振が達成されている。また、プラズモニクス構造をレーザー共振器に適用することで波長よりもはるかに小さいサイズのレーザー発振動作が報告されている。光受光器では、フォトニック結晶やプラズモニクスをベースとした様々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様々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。光スイッチとしては、フォトニック結晶ナノ共振器を利用した素子でアトジュール領域でのスイッチング動作が達成されている。光メモリとしては、微小共振器を用いた双安定レーザー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。このように、ナノフォトニクス技術により、従来の技術では不可能な超小型サイズと超低消費電力動作が達成され始めているが、いずれも単一素子の性能達成にとどまっている。集積化に関する取り組みとしては、MITのシリコンフォトニクス技術による大規模な集積型フェーズドアレイの実現や、NTTの波長の異なるナノ共振器を100個以上集積することで100ビットを超える光RAMの集積に成功した例などがある。

ナノフォトニクス技術を利用した非集積型デバイスは、日本を中心に高性能なデバイスが開発されており、すでに商品化も行われている。京都大学のグループはフォトニック結晶型の大面积面発光レーザーの研究に取り組み、すでに単一デバイスで10W以上の出力を取り出すことに成功し、この技術を用いて浜松フォトニクスで商品化している。また、東北大学の積層型3次元フォトニック結晶の技術を用いて、フォトニックラティス社では偏光素子など多彩な機能光部品を開発し商品化している。このように、ナノフォトニクス技術の個別部品としての商品化では、日本が世界の中で先行している。

光インターコネクトなど光素子の集積化が必要な応用に向けてはシリコンフォトニクス技術への期待が大きい。このシリコンフォトニクス技術はかなり開発が進んでおり、シリコン細線導波路をベースにして、電気光学変調器、電気光学スイッチ、光受光器などを集積する技術が世界各地にあるファウンドリを通じて利用可能になりつつある。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

シリコンフォトニクスに関連する国際学会等での動向としては、シリコンのキャリアプラズマ効果を改善するために歪 SiGe や化合物半導体と Si をハイブリッドしたマッハツェンダ型変調器や、SiGe を用いた小型電界吸収型変調器など注目されるものもあるが、光トランシーバの基本構成要素である光変調器や受光器の基本構造や高速化に関する発表は減少している。これは、原理的に温度依存性や波長依存性の小さいマッハツェンダ型変調器やゲルマニウムの PIN 型受光器を用いた 50Gbps 程度までの 2 値振幅変調に関しては実用化レベルに達しているためと推定される。実際、複数のベンダーから 100Gbps のトランシーバの製品発表があり、標準化に向けて 400Gbps に対する研究開発が盛んに行われている。今後の開発ターゲットは 800Gbps に移ると想定されるが、100Gbps をアナログ 2 値振幅変調で行うことは主に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 (Few Mode Fiber) を用いたモード多重等の組み合わせで実現されると予想される。さらに、データセンタ間や大規模データセンタ内など比較的長距離の光インターコネクトを想定し、従来の OOK (on-off keying) を用いたアナログ通信から、長距離通信で採用されているデジタルコヒーレント技術の適用の検討も始まっている。従来のアナログ通信とデジタルコヒーレント通信との棲み分けに関しては、消費電力を含むコストパフォーマンスが重要な判断基準になると予想され、FEC (前方誤り訂正) を用いたアナログ通信が限界を迎えるポスト 400G (例えば 800G) イーサネットの規格などが検討され始めている。

シリコンフォトニクスにおいて重要課題の一つであるレーザー光源の実装技術に関しては、PETRA で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、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。

シリコンフォトニクスは光インターコネクト以外の応用も注目される。その一つにリモートセンシング用の高精度・小型・低コストの LIDAR (Light Detection and Ranging, Laser Imaging Detection and Ranging) がある。光インターコネクト用のデバイス設計を変更することで LIDAR が実現可能なことから、米国の MIT から光回路と電気の集積回路をワンチップ化した報告がなされており、国内でもシリコンベースのフォトニック結晶を利用した高精度な LIDAR 開発が、JST の戦略的創造研究推進事業 (ACCEL) プロジェクトとして進行中である。また、シリコンフォトニクスの技術を用いた大規模なマトリックス光スイッチの研究が急速に進展している。産総研の熱光学効果によるマッハツェンダ干渉計 (MZI) 型電気光学変調器による 32×32 の光スイッチのノンブロッキング低損失動作、中国の研究機関の電流注入動作による 32×32 MZI ゲート光スイッチ、UC Berkeley の MEMS を使った 128×128 の光マトリックススイッチ、などの報告が相次いでいる。

MZI の回路で任意のユニタリ演算を表現できることが指摘され、任意の線形フィルターや行列ベクトル積演算回路への応用など、情報処理への応用も注目を集めている。2017 年に MIT の Soljacic の研究グループがシリコンフォトニクスを用いた大規模な MZI ゲート回路を光ニューラルネットに用いる提案をした。この提案は MZI マトリックス型回路を用いて、ニューラルネットの根幹であるベクトル行列積演算を行うものであり、プロトタイプによる動作を確認し、CMOS ベースのハードウェアに比べ低遅延・低消費電力化の可能性を指摘している。彼らは論文発表後に 1000 万ドルの資金を集めて光集積回路をベースにした人工知能ハー

ドウェア開発のスタートアップ企業を設立し、すでに 20-30 人程度のスタッフを集めて実用化を目指した研究開発を行っている。その他にも、Princeton 大学の Prucnal の研究グループでは、リング共振器を重み付けに用い、高速電気光学変調器をニューロンとして用いて、高速に再帰演算を行う連続時間リカーシブニューラルネットワーク (RNN) の提案、UC Davis 校の Ben Yoo の研究グループでは、光受光器と FET を組み合わせたニューロンを用いた集積回路によりスパイク型光ニューラルネットワークの提案などがなされている。また、MZI ゲートを連結した回路は、ベクトル行列積演算だけでなく様々なアナログ・デジタル演算が可能であることから、様々なブリアン演算や算術演算回路を実装する提案が相次いでいる。これらはいずれもシリコンフォトニクス、フォトニック結晶、メタマテリアルなどのナノフォトニクスによる超小型光ゲートをベースとしており、CMOS の限界を打破する低遅延性能が期待されている。光コンピューティング研究は光ニューラルネットワークも含め 1980 年代、90 年代に活発に研究されたが、その後 CMOS に対して優位性を示すことができず衰退したという歴史がある。再びこの研究が活発化している背景には、光ゲートの大規模集積技術や高効率、低遅延の光電変換が実現しつつあることや、深層学習の進化によるニューラルネットワークエンジンの高速化のニーズ、高速回線に繋がった情報処理装置の低遅延化のニーズなどがあり、かつては想定されていなかった光演算方式が新たに研究され始めている。

プラズモニクスやフォトニック結晶により高性能な電気光学変調器や光電変換デバイスを実現する研究が加速している。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 100nm 程度のギャップに電気光学ポリマーを埋め込み、短尺で超高速のマッハツェンダ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 100GHz を超える周波数で動作するに至っている。また、NTT の研究グループは、フォトニック結晶を用いることにより、感度を 1A/W に保ちながらデバイス容量として 1fF を切るものを報告しており、光電変換の消費エネルギーを極限まで低減できる可能性が見えつつある。

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。メタサーフェス研究の出発点は、2011 年に Harvard 大学の Capasso 等が、サブ波長の光アンテナアレイを用い、光散乱の際の位相ずれに人為的な勾配を作ることによって、数 10nm 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を可能にしたことである。その後、メタサーフェスは高効率化、低損失化、多機能化の研究が進んできたが、近年、薄膜レンズとしての研究が活発化している。特にスマートフォン等の小型携帯機器への適用を目指して、可視光で動作し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の開発が進められている。

近年、グラフェン、h-BN、MoSe₂、MoS₂、WSe₂ 等の単原子層 2 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様々な新しい性質をもつナノ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増加している。特に MoSe₂ などの遷移金属カルコゲナイドは、大きな光非線形や励起子効果、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、その特異な光学的性質のデバイス応用を目指した研究が進行している。また、相変化材料とナノフォトニクスの組合せもあり、例えば GeSbTe をシリコンフォトニクスによるナノデバイスと組み合わせることで超小型の不揮発性光メモリが報告されている。

カーボンナノチューブのフォトニクス応用研究では、導入された欠陥の光物性の理解がここ

数年で急速に進み、アリアルジアゾニウム塩による欠陥を用いた単一光子発生の高純度化・長波長化やフォトニック結晶による発光レートの増強が実現し、室温・通信波長帯における単一光子源としての応用に向けた研究が進んでいる。また、欠陥による励起子の捕捉効果を利用し、50 nm 程度の極短尺のナノチューブで発光効率の大幅な改善に成功するなど、近赤外域における超解像イメージングへの応用も進んでいる。材料面では、カイラリティ分離技術・選択合成技術の進展に加え、高密度大面積配向膜が得られるようになり、サブバンド間プラズモンの観測や荷電励起子（トリオン）とファブリ・ペロー共振器との強結合によるトリオンポラリトンの実現、太陽電池の高効率化など、物理分野および工学分野への波及が見られている。

「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）の物性物理における新しい概念が光学の分野にも導入され、近年研究が活発化している。これは、ノーベル賞受賞者のHaldaneが理論予測したところから始まっている。特殊なフォトニック結晶を用いると、トポロジカル絶縁体のエッジモードと似たトポロジーによって守られた導波路モードが実現するというものである。その後、フォトニ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、様々な興味深いトポロジカルな性質が見つかった。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、光学周波数における実証実験が急速に進みつつあり、光学領域における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ー発振などが報告されている。この分野では、特に中国の研究者の動きが活発である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

海外では、ナノフォトニクスによるアトジュール光情報処理を目指した研究プロジェクトや、ナノフォトニクス回路を用いた光デジタル演算技術の研究プロジェクトなどが走っている。米国では、2015年7月に、AIM Photonics (American Institute for Manufacturing Integrated Photonics) というコンソーシアムが設立され、連邦政府から \$110M のファンディングを受け、主にシリコンフォトニクスの設計・製造・組み立て・パッケージング・検査等のエコシステムを確立し、シリコンフォトニクスをエレクトロニクスと同様の産業にすることを目指している。

欧州では、Horizon2020の中で、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として、2015～2020年の間で42.4M € (12プロジェクト) が登録されている。imec および Eindhoven 工科大学を中心に複数のプロジェクトが進行しており、特にシリコンと化合物半導体を融合したナノフォトニクスプラットフォームに関する研究が活発になっている。STMicroelectronics をファウンドリとして利用することで、伝送容量 2Tbps、消費電力 2mW/Gbps、コスト 0.2 €/Gbps などの目標値も掲げられている。

シンガポールでは、科学技術庁がシリコンフォトニクスの将来性を見据えて、IME (Institute of Microelectronics) 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、技術組合光電子融合基盤技術研究所 (PETRA : Photonics Electronics Technology Research Association) をベースに、光配線や光素子の開発を行い光エレクトロニクス実装システム技術の実現を目指した NEDO プロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」(2022年まで) が進行中であり、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 (AIO Core) も設立されている。また、今年度から産総研を主体としたシリコンフォトニクス・コンソーシアムが発足し、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。基礎研究としては、JSTの戦略的創造研究推進事業（ACCEL）では、ナノフォトニクス技術を利用した「スローライト構造体を利用した非機械式ハイレゾ光レーダーの開発」（横浜国立大学）の研究が進められている。平成27年より始まったJSTの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」領域においても、ナノフォトニクス関連の複数のテーマが進められている。

（5）科学技術的課題

ナノフォトニ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が、ナノフォトニクスの根幹を支えるナノ加工技術に関しては、依然として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ニクス作製技術の開発が重要なポイントになる。この中で、シリコンフォトニクスの作製技術は非常に成熟しており、大規模化や大量生産に関しての問題点はほぼクリアされているが、既存のシリコンフォトニクス技術で作製可能なナノフォトニクス構造は非常に限られている。このため、シリコンフォトニクスの中にどれだけ他のナノフォトニクス関連の作製技術を導入できるか、また、既存のシリコンフォトニクス技術で作製可能なナノフォトニクス構造の範囲を広げていくかが重要である。さらに、光インターコネクタなどの応用では、光集積回路をCMOSベースの電気回路と低消費電力で低遅延に結合させる必要があり、光電変換素子とトランジスタを近くに集積することなどが重要になると考えられる。緻密な光電集積技術の開発に向けたナノフォトニクス技術の活用が期待される。

（6）その他の課題

シリコンフォトニクスの試作ができる施設は米国、欧州、シンガポール、日本などにあるが、世界中の人、資金、技術、情報等が集まるハブとして機能を持つことは、シリコンフォトニクスだけでなくナノフォトニクスなどの競争力を強化する上で重要である。このような施設を持続可能な形で運営していくには、施設の運転・維持費を賄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、産学官が協力して魅力ある共同利用の仕組みを構築していく必要がある。

(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	○	→	東大、東工大、NTT を中心にシリコンと化合物半導体や磁性材料等の接合技術、京大、横国大を中心にフォトニック結晶を用いた高性能光デバイス等の研究開発で世界をリードしている。 平成 27 年より始まった JST-CREST でもナノフォトニクス関連のプロジェクトが複数スタートしている。
	応用研究・開発	○	→	PETRA (光電子融合基盤技術研究所) を中心に産学共同のプロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発 (2022 年まで)」を行っている。 JST ACCEL において、フォトニック結晶のデバイス応用プロジェクトが走っている。 ナノフォトニクスの単体素子では、フォトニック結晶レーザーや偏向素子などで近年商品化が進んでおり、世界的に先行している。 PETRA の技術をベースに光トランシーバチップの生産・販売を行う会社 (AIO Core) が設立された。
米国	基礎研究	◎	→	ナノフォトニ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。特に近年プラズモニクスやトポロジカルフォトニクスの研究が活発化している。 ナノチューブ関連では発光性欠陥導入は米国が主導している。
	応用研究・開発	◎	→	AIM Photonics で他国に先んじたシリコンフォトニクスのエコシステム構築を目指している。Luxtera 等が光トランシーバを販売中であり、Intel も製品リリースを発表した。 ナノフォトニクスのバイオ、センサーおよび太陽エネルギー応用に関しては活発な活動がある。 ナノフォトニクス技術を用いたニューラルネットやデジタル計算などの光コンピューティング関連の研究が活発化し、プロジェクトが走り始めている。 ナノフォトニクスを用いた光ニューラルネットに関しては、多額の投資を受けたスタートアップ会社が興され、産業化へ向けた開発を開始している。
欧州	基礎研究	◎	→	ベルギーの Ghent 大、imec、英国の Southampton 大、フランスの LETI 等を中心に幅広い研究が行われている。 Imperial College 等でメタマテリアル、プラズモニクス関連の純粋基礎研究に関しては伝統的に強く、理論研究者が指導的な立場を果たしている。
	応用研究・開発	○	↗	Horizon2020 の中で総額 20M €程度がシリコンフォトニクス関係。TERABOARD, ICT-STREAMS 等、ボードレベル、システムレベルの実用化を意識したものが多い。 imec、Eindhoven 工科大、CNRS/LETI 等にファウンドリ機能を含むナノファブリケーションの技術が結集されている。特にシリコンフォトニクスと化合物半導体ナノフォトニクスの融合をベースとしたデバイス応用研究が進んでいる。 ETH/KTH を中心としてプラズモニクス技術を中心とした高速電気光学変調器、光受光器の研究が急速に進展し、高速光伝送や光マイクロ波応用へ向けた研究開発が進行している。 ナノチューブフォトニクスのチップ上の集積化に向けた研究が見られる。

中国	基礎研究	○	↗	プラズモニクス、メタマテリアルを中心に大量の論文を発表している。かつてはレベル的に問題のある論文も多かったが、近年質的にも向上している。 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イドを用いたナノフォトニクスや、トポロジカルフォトニ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	○	↗	近年、欧米にわたった優秀な若手中国人研究者が多数本国に帰国し、研究リーダーとして中国で研究開発を行うようになり、国からも応用を目指した研究に多額の資金援助が行われている。 特にクリーンルームや製造設備に関しては、最新の設備が導入されて進展が目覚ましい。 半導体受託生産で中国最大手の中芯国際集成电路製造 (SMIC) はシリコンフォトニクス用の製造ラインを構築中。
韓国	基礎研究	△	→	Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) を中心にナノフォトニクス、シリコンフォトニクスの基礎研究分野では複数の傑出した研究者が活躍している。特に米国帰りで優秀な研究者が目立つ。 ただし、国家として基礎研究への投資が大きく行われている様子には見えない。
	応用研究・開発	△	→	Samsung を中心にナノフォトニクスの応用研究が活発に行われている。特にディスプレイ、発光素子の分野での研究開発が活発だが、研究発表の数は多くない Samsung 社が CPU とメモリ間をシリコンフォトニクスで繋ぐ開発を行っている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、絶対評価である。

◎：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、×：活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) M. Smit et al., "Moore's Law in Photonics," *Laser & Photonics Reviews* 6, no. 1 (2012) : 1-13. doi:10.1002/lpor.201100001
- 2) D. Miller, "Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips," *Proceedings of the IEEE* 97, no. 7 (2009) : 1166. doi:10.1109/jproc.2009.2014298
- 3) B. G. Lee et al., "High-Performance Modulators and Switches for Silicon Photonic Networks-on-Chip," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 16, no. 1 (2010) : 6-22. doi:10.1109/jstqe.2009.2028437
- 4) Jie Sun et al., "Large-scale Nanophotonic Phased Array," *Nature* 493, no. 7431 (2013) : 195. doi:10.1038/nature11727
- 5) Koji 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. doi:10.1038/nphoton.2013.110
- 6) M. Khajavikhan et al., "Thresholdless Nanoscale Coaxial Lasers," *Nature* 482, no. 7384 (2012) : 204. doi:10.1038/nature10840

- 7) Y.-J. Lu et al., "Plasmonic Nanolaser Using Epitaxially Grown Silver Film," *Science* 337, no. 6093 (2012) : 450. doi:10.1126/science.1223504
- 8) M. W. Knight et al., "Photodetection with Active Optical Antennas," *Science* 332, no. 6030 (2011) : 702. doi:10.1126/science.1203056
- 9) Linyou Cao et al., "Resonant Germanium Nanoantenna Photodetectors," *Nano Letters* 10, no. 4 (2010) : 1229. doi:10.1021/nl9037278
- 10) A. Melikyan et al., "High-speed Plasmonic Phase Modulators," *Nature Photonics* 8, no. 3 (2014) : 229. doi:10.1038/nphoton.2014.9
- 11) Kengo Nozaki et al., "Sub-femtojoule All-optical Switching Using a Photonic-crystal Nanocavity," *Nature Photonics* 4, no. 7 (2010) : 477. doi:10.1038/nphoton.2010.89
- 12) Liu Liu et al., "An Ultra-small, Low-power, All-optical Flip-flop Memory on a Silicon Chip," *Nature Photonics* 4, no. 3 (2010) : 182. doi:10.1038/nphoton.2009.268
- 13) Kengo Nozaki et al., "Ultralow-power All-optical RAM Based on Nanocavities," *Nature Photonics* 6, no. 4 (2012) : 248. doi:10.1038/nphoton.2012.2
- 14) Eiichi Kuramochi et al., "Large-scale Integration of Wavelength-addressable All-optical Memories on a Photonic Crystal Chip," *Nature Photonics* 8, no. 6 (2014) : 474. doi:10.1038/nphoton.2014.93
- 15) Keijiro Suzuki et al., "Low Insertion Loss and Power Efficient 32×32 Silicon Photonics Switch with Extremely-High- Δ PLC Connector," *Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers*, 2018. doi:10.1364/ofc.2018.th4b.5
- 16) Lei Qiao, Weijie Tang and Tao Chu, " 32×32 Silicon Electro-optic Switch with Built-in Monitors and Balanced-status Units," *Scientific Reports* 7, no. 1 (2017) . doi:10.1038/srep42306
- 17) Kyungmok Kwon et al., " 128×128 Silicon Photonic MEMS Switch with Scalable Row/Column Addressing," *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2018. doi:10.1364/cleo_si.2018.sf1a.4
- 18) Yichen Shen et al., "Deep Learning with Coherent Nanophotonic Circuits," *Nature Photonics* 11, no. 7 (2017) : 441-446. doi:10.1038/nphoton.2017.93
- 19) Alexander N. Tait et al., "Neuromorphic Photonic Networks Using Silicon Photonic Weight Banks," *Scientific Reports* 7, no. 1 (2017) . doi:10.1038/s41598-017-07754-z
- 20) Mohammadamin Nazirzadeh, Mohammadsadegh Shamsabardeh and S. J. Ben Yoo, "Energy-Efficient and High-Throughput Nanophotonic Neuromorphic Computing," *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2018. doi:10.1364/cleo_at.2018.ath3q.2
- 21) Zhoufeng Ying et al., "Silicon Microdisk-based Full Adders for Optical Computing," *Optics Letters* 43, no. 5 (2018) : 983. doi:10.1364/ol.43.000983
- 22) Tohru Ishihara et al., "An Integrated Nanophotonic Parallel Adder," *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems* 14, no. 2 (2018) : 1-20. doi:10.1145/3178452
- 23) Christian Haffner et al., "Low-loss Plasmon-assisted Electro-optic Modulator," *Nature* 556, no. 7702 (2018) : 483. doi:10.1038/s41586-018-0031-4

- 24) Kengo Nozaki et al., "Photonic-crystal Nano-photodetector with Ultrasmall Capacitance for On-chip Light-to-voltage Conversion without an Amplifier," *Optica* 3, no. 5 (2016) : 483. doi:10.1364/optica.3.000483
- 25) N. Yu et al., "Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction," *Science* 334, no. 6054 (2011) : 333. doi:10.1126/science.1210713
- 26) Shuming Wang et al., "Broadband Achromatic Optical Metasurface Devices," *Nature Communications* 8, no. 1 (2017) . doi:10.1038/s41467-017-00166-7
- 27) Wei Ting Chen et al., "A Broadband Achromatic Metalens for Focusing and Imaging in the Visible," *Nature Nanotechnology* 13, no. 3 (2018) : 220-226. doi:10.1038/s41565-017-0034-6
- 28) Sanfeng Wu et al., "Monolayer Semiconductor Nanocavity Lasers with Ultralow Thresholds," *Nature* 520, no. 7545 (2015) : 69-72. doi:10.1038/nature14290
- 29) Carlos Ríos et al., "Integrated All-photonic Non-volatile Multi-level Memory," *Nature Photonics* 9, no. 11 (2015) : 725. doi:10.1038/nphoton.2015.182
- 30) Xuedan Ma et al., "Room-temperature Single-photon Generation from Solitary Dopants of Carbon Nanotubes," *Nature Nanotechnology* 10, no. 8 (2015) : 671. doi:10.1038/nnano.2015.136
- 31) Xiaowei He et al., "Tunable Room-temperature Single-photon Emission at Telecom Wavelengths from Sp³ Defects in Carbon Nanotubes," *Nature Photonics* 11, no. 9 (2017) : 577. doi:10.1038/nphoton.2017.119
- 32) Akihiro Ishii et al., "Enhanced Single-Photon Emission from Carbon-Nanotube Dopant States Coupled to Silicon Microcavities," *Nano Letters* 18, no. 6 (2018) : 3873. doi:10.1021/acs.nanolett.8b01170
- 33) X. He et al., "Carbon Nanotubes as Emerging Quantum-light Sources," *Nature Materials* 17, no. 8 (2018) : 663. doi:10.1038/s41563-018-0109-2
- 34) Noémie Danné et al., "Ultrashort Carbon Nanotubes That Fluoresce Brightly in the Near-Infrared," *ACS Nano* 12, no. 6 (2018) : 6059. doi:10.1021/acsnano.8b02307
- 35) F. D. M. Haldane and S. Raghu, "Possible Realization of Directional Optical Waveguides in Photonic Crystals with Broken Time-Reversal Symmetry," *Physical Review Letters* 100, no. 1 (2008) . doi:10.1103/physrevlett.100.013904
- 36) Ling Lu, John D. Joannopoulos and Marin Soljačić, "Topological Photonics," *Nature Photonics* 8, no. 11 (2014) : 821. doi:10.1038/nphoton.2014.248
- 37) Sabyasachi Barik et al., "A Topological Quantum Optics Interface," *Science* 359, no. 6376 (2018) : 666. doi:10.1126/science.aaq0327
- 38) Miguel A. Bandres et al., "Topological Insulator Laser: Experiments," *Science* 359, no. 6381 (2018). doi:10.1126/science.aar4005

2.3.4 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目指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、我々の生活の中で既に使われている技術もある中、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、絶縁体中のスピン波スピン流、熱スピン流に基づく熱電変換などのスピнкаロリトロニクスという新しい展開を見せている。

(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、スピンゼーバック効果、不揮発性メモリ、電圧トルク、トポロジカル物質

(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。中でも強磁性金属とその多層膜をベースとした分野が最も応用研究が進展しており、既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Kelvin卿の磁気抵抗効果の発見に遡る。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が、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、強磁性層の磁化の相対的な配置によってトンネル抵抗が変化する効果である。TMR効果は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、世界初の不揮発性メモリ (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を持たれるように

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一つである。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、磁気と他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。熱に関わる分野をスピントロニクス、力学的運動に関わる分野をスピンメカニクスと呼ばれることもある。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、界面においては結晶対称性の破れがあるため、スピン軌道相互作用が大きな効果をもたらす。スピン軌道トルク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、物質がもつトポロジ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]

・電圧駆動 MRAM

現在、実用化が進んでいる STT-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大きな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 STT-MRAM よりもさらに 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いだされ実用化に着実に近づいている。

・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 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。

・VoCSM (Voltage Control Spintronics Memory)

内閣府 ImPACT 「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」の支援の下、2016 年に東芝が提案し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目指した電圧書き込み方式の MRAM の新しいアーキテクチャ技術である。一つの重金属ワイヤー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

スピン MOSFET は、電力増幅作用をもち、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もつ。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、素子数の少なさと同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至っていないものの、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 ID 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をキャリアとするデバイスの実現を目指す、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飛躍的な進展を遂げている。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ー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。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ー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・新デバイス開発を目指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 Mn_3Sn や Mn_3Ge 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が期待される。理論上はカルノー効率に達することが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、あと一桁向上すれば 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磁場を印加すると、ある特定の磁場値において、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揺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。

[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（さきがけ）「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、さきがけ「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目指す 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ている。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。

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。中でも、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（他にはジョンホプキンス大学、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の一つである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。ジョン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目指した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目指す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目指した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トロニクス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Skirmionics: 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バック効果に注目した大型プロジェクトである。

（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TC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を制御方法の開発、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などスピンデ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関わる物理が大きな発展を見せているものの、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⇔電流の変換効率の桁違い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言えるものの、実験室レベルの基本動作実証からプロトタイプ of 作製、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、個々の研究者がこれら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言える。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一つである。

(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	◎	→	・JSPS 新学術領域、JST 戦略的創造研究推進事業、内閣府 ImPACT 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開始されている。
	応用研究・開発	○	→	・ImPACT など で実用化へ向けた研究開発が行われてはいるものの、企業の寄与はそれほど大きくはない。
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。
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中、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 やハイニクスが MRAM 研究に力を入れている。 ・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

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプ of 開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、絶対評価である。

◎：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、×：活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 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的发展—』 (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 (2019年2月12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 (2019年2月12日アクセス)

2.3.5 MEMS・センシングデバイス

(1) 研究開発領域の定義

MEMS センサに代表されるセンシングデバイスは、安心・安全なスマート社会を実現する上で重要な Internet of Things (IoT) を構成する主要な要素であり、様々な環境において多種多様な情報を取得するセンシング技術の開発が進んでいる。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、プリント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)、センサ、IoT (Internet of Things)、プリントドエレクトロニクス (Printed Electronics)、SAW (Surface Acoustic Wave) フィルタ、BAW (Bulk Acoustic Wave) フィルタ、慣性センサ、MEMS アクチュエータ、化学センサ、セキュリティ

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

超スマート社会 (Society 5.0) あるいは高度なサイバーフィジカルシステム (CPS) を築くためには、人工知能などの新たな情報処理技術や高速大容量ネットワーク技術と並んで、現実の世界の多種多様な情報を取得するセンシング技術が重要になっている。その応用は、IT 機器、自動運転車、ロボット、ドローン、VR・AR システム、健康・医療、インフラ保守など、社会の様々なシステムに広がっている。これらの応用のためのセンシングデバイス (センサ) としては、画像・映像を取得するイメージセンサと加速度、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) が最も重要でその利用も拡大している。今後はこれらに加え、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の開発も期待され、物理センサや化学センサと集積回路 (IC) やプリントドエレクトロニクス (Printed Electronics) との組み合わせも重要になると考えられる。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、本領域では化学センサも含めて MEMS センサを中心に扱う。

スマート社会に関連する産業を見ると、欧米と中国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。一方、サービスプラットフォーム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。DRAM の利益率は 60 ~ 70% に達していると言われるが、MEMS 最大の商品である BAW (Bulk Acoustic Wave) フィルタとそれを用いた無線フロントエンドモジュールの利益率も 50% 程度であると言われている。生み出す付加価値はデバイス・モジュールとサービスプラットフォームで高く、システムで低くなる「スマイルカーブ」を描く。この「デバイス・モジュールメーカーとサービスプラットフォームの時代」において、日本の企業が後者に食い込むことはかなり難しいと思われるが、日本には強いデバイス・モジュールメーカーが多い。また、この図式は EV 化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高い。

[研究開発の動向]

(a) MEMS センサ

世の中のセンサの多くが MEMS 技術によるものである。スマートフォンを例にとると、ここにはマイクロフォン、加速度センサ、ジャイロスコープ、圧力センサ（気圧センサ）など、合わせて 10 個以上の MEMS センサが用いられている。クロック発振器の一部も MEMS である。これに加えて、2～3 個のイメージセンサ、磁気センサ（電子コンパス）、タッチパネル、温度センサ、GPS、赤外線顔認識センサ、指紋センサなども搭載されている。今後、セキュリティの問題がより重要になると考えられ、指紋センサが MEMS 技術による超音波方式になる可能性がある。また、磁気センサも MEMS になり、慣性センサとモノリシック化（一体化）される可能性がある。

これらの MEMS センサの技術は継続的に革新され、その結果、低コスト化と高性能化が進んでいる。例えば、加速度センサの大きさは、最近の 5 年間でチップダイの面積にして約 1/10 になっており、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。低コスト化による爆発的な応用の広がり、スマートフォンがそうだったように、想像を超えた大きなパラダイムシフトをもたらす。今後は、自動運転に用いるジャイロスコープ、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）、ロボットの機械学習に用いる触覚センサなどでの高性能化や高機能化が期待されている。

(b) 弾性波フィルタ

Society 5.0 では、大量のデータが無線でやり取りされ、次世代通信規格 5G では、3.5 GHz 帯と 4～5 GHz 帯、およびミリ波帯（28 GHz 帯）が新たに使えるようになる。見通せない距離の無線通信に適した周波数は数百 MHz から 6 GHz の領域であるが、この領域には新たに無線通信に割り当てられる帯域はほとんど残されていない。新しい 3.5 GHz 帯と 4～5 GHz 帯は、従来の 900 MHz～2 GHz 帯より高い周波数であるため、周波数選択フィルタ（デュプレクサ等）にはより高い技術が求められる。

現在、周波数選択フィルタには、SAW (Surface Acoustic Wave) フィルタと BAW (Bulk Acoustic Wave) フィルタが使われている。後者は、現在の MEMS における最大売上高の製品であり、Broadcom（米国）が最大手メーカーとなっている。SAW・BAW フィルタには、高周波化に加えて、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の点でさらに高い性能が求められており、研究開発が盛んである。最近、これまでの限界を打破する新しい弾性波デバイスとして、シリコン基板や水晶基板に支持された厚さ 1 μ m 以下の薄い圧電単結晶板を用いたデバイスが開発され、極めて高い性能を示している。

(c) 化学センサ（バイオセンサ）

人の健康を体内環境として直接モニターするには生体活動に関与する微量物質を高い選択性をもって検出する必要がある。そのために、生物由来あるいは生物に関連する物質がバイオ分子受容体として開発されてきた。しかし、バイオ物質は生ものであり多くの場合センサとして常温で保存することができないという問題がある。そこで、どこでも使えるバイオセンサという観点から、生体の主要高分子であるタンパク質、炭水化物（糖鎖）、核酸を用いた微量ターゲッ

ト物質受容体技術の研究動向について示す。

酵素タンパク質は化学物質を選択的に捉えてその反応を触媒するので、反応生成・消費物質を測定することで元の化学物質を定量できる。さらに、動物の免疫が分子認識能力を持つことを利用して抗体センサが開発されたが、熱や pH の影響により比較的容易に壊れて変性しやすく、光や水・空気による変質および細菌やリソソームによる分解も起こりやすいため、常温で長期に保存することは難しい、などの課題がある。

糖鎖は各種糖がつながった化合物であり、タンパク質を修飾することでその機能に大きな影響を与え、細胞内外の分子認識や分子間情報伝達に重要な役割を持つ。また、ウイルスと細胞の相互作用にも深く関わっていることから、糖鎖チップは迅速なウイルス感染症等の検出に向くと期待されている。タンパク質とは違って熱変性を起こしにくいいため、糖鎖センサは室温で長期使用可能である。糖鎖の化学合成では遺伝子工学の手法を使うことができないため、必要なセンサ用の糖鎖を創り出すことを目的として、様々な合成法の開発が試みられている。

遺伝子の実態であるデオキシリボ核酸（DNA）などの核酸の中には、その配列によって抗体のように特定の物質を特異的に認識し結合する機能をもつ核酸アプタマーが存在する。アプタマーは抗体や糖鎖と同様に高い選択性を持つ受容体として使える上に、生物由来原料を用いずに化学合成原料によって安価に製造できること、乾燥状態で常温保存できることなど、IoT 時代のセンサ受容体として数々の優れた特徴を有している。核酸アプタマーは、特定のターゲット分子に対応する分子を創生するランダムスクリーニングにより作製可能であるが、L. Gold により開発されたその代表的製法である SELEX（systematic evolution of ligand by exponential enrichment）法の基本特許が 2011 年に失効したため、近年では様々なアプタマーが国内外で盛んに開発されている。

バイオセンサは通常は上で述べた分子（またはイオン）認識部とトランスデューサ（信号変換部）とから構成される。主要なトランスデューサとしては、電気化学デバイスと光検出デバイスがある。小型・軽量で簡便に使えるウェアラブルなセンサとしては、電気化学デバイスが優れている。しかし、電位を検出するタイプのセンサでは参照電極が必要となり多くの場合定期的にキャリブレーションを入れる必要がある。また電流検出を利用するタイプのセンサは消費電力が課題になる。このため、消費電力が少なく安定な測定が可能な電気化学デバイスの開発が望まれている。光検出型の場合は、光源および消費電力が課題である。シリコンフォトニクスや表面プラズモンなどのナノ・マイクロフォトニクス技術の利用が期待される。

（４）注目動向

[新展開・技術トピックス]

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。一方、MEMS 技術をアクチュエータに用い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、圧電材料をはじめとする技術の進歩によって、最近新しい MEMS アクチュエータの実用化の動きが出てきている。具体的には、映像プロジェクション、LIDAR（Light Detection and Ranging）、ジェスチャ認識、配光制御などのための走査型マイクロミラーデバイス、カメラまわりのアクチュエータ、薄型スピーカ（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顕著になっている。

常温での長期保存ができるバイオセンサ受容体である核酸アプタマーには RNA アプタマーと DNA アプタマーがあるが、RNA の方が多様な立体構造を形成しやすいことから、創薬には RNA アプタマーが適すると考えられてきた。これに対し、SELEX 法で行う核酸のスクリーニングに用いる初期ライブラリに、多様なセクションを可能にするために化学修飾した一本鎖の人工核酸を用いる検討が行われ、修飾人工核酸による唾液中コルチゾールをターゲットとした人工核酸アプタマーの開発、およびアプタマーを用いたメンタルストレス計測用電界効果トランジスタ（FET）バイオセンサなどが報告された。IoT 時代のどこでも使えるバイオセンサとしてのアプタマーおよびその利用技術の開発が期待される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

米国で MEMS 技術を約 25 年にわたり強力に支援しているのは、DARPA（Defense Advanced Research Projects Agency）である。DARPA が継続的に重要視しているのは、兵器のナビゲーションに必須の慣性センシング技術である。これに関する最新のプログラムは、Precise Robust Inertial Guidance for Munitions (PRIGM) program と呼ばれる。慣性センサの 1 つであるジャイロスコープには MEMS の中核をなす重要技術が凝縮されており、その研究を行うことで MEMS 技術の本筋の研究に繋がっている。他に、干渉に強いアダプティブ高周波デバイスを研究する Signal Processing at RF (SPAR) program、超省消費電力センサを研究する Near Zero Power RF and Sensor Operations (N-ZERO) program の 2 つのプログラムが実施されている。

欧州では Horizon 2020 のもと、いくつかの MEMS 関連プロジェクトが実施されている。多くは Industrial Leadership のためのプロジェクトに整理されている。前述の MEMS スピーカ (https://cordis.europa.eu/result/rcn/198209_en.html) もそれらのプロジェクトの 1 つで開発されたものであり、事業化を目指すベンチャー企業 USound（オーストラリア）が注目を集めている。

中国では、MEMS やパワー半導体の大型研究拠点である SITRI（Shanghai Industrial μ Technology Research Institute）が 2015 年に上海に設立され、遅れていた 8 インチラインの立ち上げは昨年完了したと思われる。半導体デバイスや半導体装置の国産化に多額の投資を続ける中国政府は、MEMS 関連の国内企業にも積極的に補助をしている。最近、米国との貿易紛争で中国国内のハイテク産業が危機にさらされていることが、政府投資を活発にさせている。前述の周波数選択フィルタとそれを用いた無線フロントエンドモジュールは、米国と日本でしかほとんど作れない基幹部品であり、それがないとスマートフォンは製造できない。2018 年 7 月、四川省綿陽市政府は BAW フィルタメーカーである諾思（天津）微系統と戦略的協力協定を締結し、綿陽市游仙区の工場に総額 128 億元（約 2100 億円）を投資すると発表している。

（5）科学技術的課題

センサ・MEMS 分野の代表的な技術的挑戦は、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、および現実的な方法で異なる要素を集積化することである。例えば、S/N 比を上げるには、極めて高い Q 値、超高精度加工、超

高性能圧電膜、超高感度ピエゾ抵抗などが必要である。これらは、現実的な解があるのかどうかを含めて、原理検討や材料開発から取り組むべき中長期的な課題である。

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。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、そのプラットフォームによるデバイスがシェアを占めるようになった。このような流れに対し、日本発の有力なプロセスプラットフォームはなく、海外企業の M&A で獲得しているだけである。

現在、スマートフォン、自動車、ヘルスマonitoring デバイス、ゲーム機器などに幅広く用いられているセンサはおおよそ物理センサであるが、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、ISFET (Ion Sensitive FET)、触媒燃焼型ガスセンサなどがある。しかし、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て表面を清浄かつ活性に保たなくてはならないため低消費電力化が難しい。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、論文では多くの「高感度」、あるいは「省電力」を謳った化学センサが報告されているが、そのほとんどはドリフト、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。

(6) その他の課題

センサ・MEMS の研究開発は産業に直結し、その進歩や展開は速い。このような技術分野においては、従来型の研究開発プロセス、例えば、競争的研究費によってアカデミックを支援し、生み出されたシーズが論文等を通じて企業に伝わり、企業による社内研究開発あるいはアカデミックとの共同研究を通じて実用化されるというプロセスは、速度の点からも成功確率の点からも十分な機能を果たせなくなっている。

米国においては、多くの教授や学生が起業を試みることからわかるように、アカデミックでの研究とベンチャー企業での開発とが極めて近い。事業のシーズがあると、ベンチャーキャピタルから多くの資金が投入され、例えば、普通なら 1 年かかる開発が 3 か月で終わることも少なくない。それでも DARPA は MEMS の実用化がさらに早くできる方法がないかという問題意識を持っている。欧州では、フラウンホーファー研究機構、Leti (フランス)、IMEC (ベルギー)、CSEM (スイス)、VTT (フィンランド) などの研究拠点の役割が大きい。これらの研究拠点には、先行投資して開発、蓄積された技術群を基に複数の企業が集まり、効率よく研究開発が進められている。これらの研究拠点の予算の基盤部分には、我が国で言えば運営交付金のような公的資金が充てられているが、その割合は全体の数割程度以下である。政府から見れば、税金による投資に対して数倍のレバレッジが民間からの研究資金によってもたらされていることになる。

日本では、政府投資によっておおよそ丸抱えされた研究拠点がある一方、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研究拠点もある。特に、産業に直結した研究開発を行っている、あるいは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、欧州の研究拠点のように全体の3割程度の基盤部分を公的資金によって支える、という方式に変更していくような議論も必要であろう。この方式は、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。

(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	○	→	主要国際会議での論文数は多いが、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。この状況は韓国と似ているが、その他の国の状況とは異なる。 若手研究者の層は比較的厚い。
	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。しかし、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。 東北大学などで産学連携が強力に進められている。
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。
	応用研究・開発	◎	↑	慣性センサのベンチャー企業 InvenSense は、ここ 10 年で数百億円を売り上げる主要なセンサ企業へと成長し、2017 年、TDK によって 1600 億円で買収された。その後も、有力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 フィルタの上位 2 社 (Broadcom、Qorvo) は米国企業であり、Broadcom は Robert Bosch を抜いて世界最大の MEMS メーカーとなった。
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とは一体である。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。
	応用研究・開発	◎	↑	Robert Bosch は MEMS 売上高首位の座を Broadcom に譲ったが、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 (2012 年に首位を陥落)、MEMS について全方位の研究開発を実施している。 Leti の研究開発も盛んである
中国	基礎研究	○	↑	数年前まで中国からの研究発表に見るべきものは少なかったが、最近では優れた研究成果が報告されている。半導体技術の 1 つとして政府投資も盛んであり、研究開発熱は高い。
	応用研究・開発	○	↑	技術的蓄積を必要とするセンサ・MEMS では、独自技術に基づく製品は見られないが、従来技術に基づく圧力センサ等はかなり製造されている。 国内に実装メーカーが多くあり、欧米製のセンサ・MEMS をパッケージングして大手スマートフォンメーカーに納入しており、存在感を増しつつある。 政府からの手厚い援助もあり、欧米企業の M&A によって一気に最新技術を立ち上げようとする活力がある。深圳や上海の周辺ではベンチャー起業が盛んである。

韓国	基礎研究	△	↘	数年前までセンサ・MEMSの研究で、論文数等から判断して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、全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と思われる。既に台湾が韓国より上位である。
	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。MEMSやセンサより桁違いに多くの利益を稼ぎ出すメモリ等があるので、本研究開発領域には日が当たりにくい。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、絶対評価である。

◎：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、×：活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) W. Chappell, R. H. Olsson III and R. G. Polcawich (DARPA), "Enabling the Next Generation of MEMS Technology", The 2018 Solid State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop, Hilton Head, South California, USA, June 3-7, 2018, pp. 1-2.
- 2) 田中秀治「欧米MEMS企業の牙城崩せ、中国勢が続々切り込む：International Conference on Commercialization of Transducer & MEMS 2017 報告」『日経テクノロジーオンライン』（2017年10月31日オンライン）。
- 3) 田中秀治「IEEE MEMS2018の論文から見える集積化センサの将来」『次世代センサ』28, 1 (2018) : 38-41.
- 4) 南部谷俊介他「糖鎖固定化電界効果トランジスタによるインフルエンザウイルスから分離したヘマグルチニンの検出」『Proceedings of the Chemical Sensor Symposium』58 (2015) : 91-93.
- 5) 栗原正靖他「キャピラリー電気泳動法を用いた修飾核酸アプタマーのセレクション」『電気泳動』59, 2 (2015) : 88-90.
- 6) Hirotaka Minagawa et al., "Selection, Characterization and Application of Artificial DNA Aptamer Containing Appended Bases with Sub-nanomolar Affinity for a Salivary Biomarker," *Scientific Reports* 7, no. 1 (2017) . doi:10.1038/srep42716

2.3.6 三次元ヘテロ集積

(1) 研究開発領域の定義

複数の異なる機能を持つエレクトロニクス回路を三次元的に集積し、LSIチップの高機能化・小型化・低消費電力化を実現し、エレクトロニクス機器への適用を目指す領域である。三次元的な集積を可能にするウェーハの薄膜化、高信頼のウェーハボンディング（接合）、熱設計などの要素レベルの研究開発課題や、低電圧駆動ロジック、各種メモリ、イメージセンサ、MEMS、シリコンフォトニクスなどの異なる機能を持つエレクトロニクス回路を三次元的に集積して特性向上の確認を行うなどの原理実証、システムレベルの研究開発課題がある。

(2) キーワード

三次元集積、異種機能集積、More than Moore、三次元実装、3D-IC 設計技術、熱設計、ロジック、メモリ、パワーデバイス、光電融合、シリコンフォトニクス、MEMS、イメージセンサ、シリコン貫通ビア（TSV）、磁界結合、高バンド幅結合、スーパーチップ、ウェーハボンディング

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

今後のスマート社会における家電製品の一層の低消費電力化、スマートフォンなど誰もが使いやすい情報端末、安全性と省燃費を両立する自動車、自動運転など、半導体集積回路の機能性と情報処理能力向上に対する要望はますます強くなっており、増え続ける用途に対応した多品種の集積回路（LSI）を適切に社会に供給していく技術の開発が重要になってくる。これまでは、ムーアの法則に代表される二次元的なスケールリングによりトランジスタの微細化、高速化、低消費電力化を実現し、LSIの高集積化・高機能化を進めてきた。しかし、近年微細加工技術の困難さが増大し、トランジスタの性能向上の物理的限界が見え始めてきている。これに対し、III-V族半導体やGeなどの新材料チャネル、三次元構造トランジスタ、ナノワイヤトランジスタなど新構造導入により性能向上を図る等価的な二次元スケールリングとともに、異なる機能をもつ半導体あるいは異種材料でできた複数のチップを複合して一つのチップ状に加工する異種機能三次元ヘテロ集積回路技術が注目されている。

異種機能・異種材料を有する複数のチップを積層する三次元集積化において、例えば、メモリとロジックを積層できれば、チップ面積が縮小するだけでなく、メモリとロジック間の通信速度を飛躍的に向上することが可能となり、低消費電力と高速性の両方が実現できる。またメモリ同士を複数積層することが出来れば、等価的にムーアの法則に則ったさらなる集積化が実現できる。

具体的な事例をあげると、メモリとプロセッサ間を10Gbpsでデータ転送するのに要する電力は、従来の実装技術で製造できる12ビットI/Oを用いた場合には2000mW必要であるのに対し、積層接続して512ビットI/Oにすることで150mW程度まで低減できる。また、高周波の通信機能やイメージセンサ、加速度センサなどの異なる機能を積層することによって、チップの小型化、携帯機器の小型化による新たな応用展開も期待できる。このように、従来技術の延長では今後の社会要求に応えることが困難と予想される中、異種機能三次元ヘテロ集積回路が今後の新しいサービスの原動力になると期待される。

[研究開発の動向]

国内では、三次元集積化の中核要素技術であるシリコンウェーハの薄膜化、貫通ビア配線 (TSV)、マイクロバンプによる相互接続技術など、技術組合超先端電子技術開発機構 (ASET) で実施した電子 SI (Silicon Integration) プロジェクト (1998 ~ 2002 年) およびドリームチッププロジェクト (2008 ~ 2012 年) で先駆的な研究が進められ、プロセスインテグレーション、デジタル・アナログ混載技術など、多くの成果を生み出した。2013 年からは、これらの成果を受けた製品開発が民間企業によって進められている。その他、九州でのコンソーシアム研究開発事業 (2005 ~ 2007 年)、民間企業を含むアライアンスによる研究、大学等による研究などが進められ、オリジナリティの高い技術が開発されてきた。例えば、東北大学が「スーパーチップ」と称する異種三次元集積のコンセプトを提案し、CMOS デバイス上に化合物半導体、フォトニックデバイス、スピンドバイスを三次元集積したチップの試作に成功している。また JST の CREST 「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」では、慶応大学の黒田チームが、近接場磁界結合により 128 枚のチップを積層してデータ通信が出来ることを実証し、電力を従来の 1000 分の 1 程度 (10fJ/b) まで低減することに成功した。

日本を追うように米国、欧州、韓国、台湾でもプロジェクト研究が行われた。米国では、IBM や Intel がナノ材料・デバイス技術、3D IC 形成技術、LSI 設計技術、システム設計技術を手掛け、また、ベンチャー企業が積極的に投資を行っている。例えば、Maxim Integrated 社がウェーハレベルでキャパシタやオプティカルセンサを三次元集積したアナログ向けチップの試作に成功しており、高性能を実証している。また、Monolithic 3D Inc がプログラマブルロジックの開発を目的にモノリシック三次元 LSI の開発を目指してしている。欧州の IMEC や LETI などは自分自身で高い CMOS 技術を持ちながら、光-電子融合分野でも研究を行っており、次を見据えて三次元集積化に対して精力的に活動している。韓国では、Samsung が DRAM、NAND フラッシュメモリの積層に取り組んでいる他、Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) でも TSV 技術開発が進められている。シンガポールでは Institute of Microelectronics (IME) と Nanyang 工科大学でアクティビティが認められる。台湾では、Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) と Industrial Technology Research Institute (ITRI) にて TSV に関する技術開発が進められた他、National Nano Device Laboratories が SRAM とロジック回路のモノリシック三次元チップの試作を行った。

国内外ともにそれぞれに特徴を有する一連の要素技術を確立し、製造装置、デバイス、材料ともに競争段階に入っていると見られる。それを反映して、国際電子デバイス会議 (IEDM) などの会議での基礎研究の発表はほぼ完了した状況にあり、技術的な内容は 3D System Integration Conference (3DSIC) などの専門家会議、あるいは Electronic Components and Technology Conference (ECTC) 等の実装技術を中心テーマとする会議で討議がなされる状況にあるが、それらにおいても個別の要素技術に関わる発表数は減じている。一方、国際固体回路会議 (ISSCC) などにおいてこれらの技術を応用した先端集積回路の発表がなされる状況にある。ロジック系の製品応用では、Xilinx 社が 2011 年に学会発表した FPGA が既に事業として成長している。この FPGA はシリコンインターポーザを利用して、FPGA チップを 4 つ集積化したものである。大面積化による歩留まり低下を補って低コストで機能向上が行えるという 3D 化のメリットを活かしたものと見える。FPGA は 28nm ノードの、シリコンイン

ターポーザは 65nm ノードのテクノロジーを使って製造を開始し、さらなる微細化も進んでいる。最近では、メモリチップも同様に混載して機能向上も果たした製品も出荷している。メモリ応用では、3D化が一般化してきたと言える。社会のデジタル化が加速度的に進む中、3D化技術によるメモリの高性能化が価値を増している。三次元 NAND フラッシュメモリについては、Samsung および東芝が引き続き積層数を増大している。多結晶シリコン薄膜トランジスタを積層して利用するこの三次元 NAND フラッシュは、従来のフラッシュメモリの高密度化の限界を打破するとともに、微細化に依らずにビットコストを下げられる革新的な技術である。最近では、96層を積層した 512 ギガビットメモリを東芝メモリ社が開発し、2018年2月の ISSCC で発表した。データセンターの省電力化に今後も大きく貢献するものと期待される。一方、DRAM での 3D化による応用製品も拡がりを見せている。DRAM の場合、ビットコストの低減よりは HBM (High Band Memory) や HMC (Hybrid Memory Cube) と呼ばれる TSV を使った積層により、高速化と低電力化性能の増大が価値を生み出している。これらの高速・低電力メモリは、人工知能、HPC (High Performance Computing)、高度グラフィックス、サーバーシステムなどといった広範囲な用途に用いられており、需要が急拡大している。製品例としては、Samsung 社が第二世代の HBM2 方式で 307GB/s のデータ転送速度をもつ容量 8GB の DRAM を生産している。このデータ転送速度は、従来方式の最先端 DRAM の性能 (36GB/s) のほぼ 10 倍に匹敵する。この製品では、一つのダイ (半導体チップ) に 5000 個を超える数の TSV で接続しており、全体は 8 万個を超える TSV で接続している。また、SK hynix 社も最近、1.2V と低い動作電圧で 341GB/s の転送速度をもつ TSV 積層型の DRAM を開発し、ISSCC2018 で発表した。インテル社は、HBM2 方式の DRAM とマイクロプロセッサ、グラフィックプロセッサをシリコンインターポーザ上に集積した PC 向けエンジンの製品発表をしており、今後、エッジコンピューティングやコンシューマー向けにも利用が拡大することが期待できる。イメージセンサは、シリコンウェーハの積層による性能向上で大きな成功をおさめた例であり、機能を切り分けたウェーハの薄膜化、貼りあわせ、ドーピング等のプロセス技術の発展を先導してきたと言える。TSV 技術を応用することでウェーハサイズでのマイクロレンズまでの集積化を可能にし、カメラモジュールの小型化と低価格化を同時に実現し、携帯機器へのカメラの爆発的普及に貢献した。一方、3D 集積化は高機能化にも革新的進歩をもたらしつつある。ソニー社は、センサ、アナログ機能デジタル機能を 3D 化積層してピクセルごとに 14 ビットと高い分解能で AD 変換し、グローバルシャッタ機能をもたせた高性能イメージセンサを ISSCC2018 で発表した。台湾 TSMC 社も高性能 CMOS イメージセンサを開発している。他にも、Olympus 社が、400 万接点の積層接続 (マイクロバンプ接続) 技術を開発し、16M ピクセルで動画の歪みを抑えたイメージセンサを開発している。化合物半導体を光検知層にしたイメージセンサの開発も InGaAs のフォトダイオードアレイとシリコン読み出し IC の積層集積化による近赤外域を中心に高解像度化技術が進展を見せている。

独 Fraunhofer 研究所は、メモリとロジックの三次元集積化による高速データプロセッシング向け回路の開発に注力している。一方、仏 CEA-LETI は More than Moore の方向を指向し、NoC (Network on Chip) と呼ぶアーキテクチャのプロセッサ、IntAct と名づけたスマートインターポーザを用いた異種機能の集積技術の開発を進めている。米国 DARPA は、COSMOS (Compound Semiconductor Materials on Silicon) Program および DAHI (Diverse Accessible Heterogeneous Integration) Program で異種材料の 3 次元集積化の研究開発を推進してい

る。開発事例として、QバンドのVCO（電圧制御発信器）増幅器がある。シリコン CMOS と InP ヘテロ接合バイポーラトランジスタ発信器、および GaN パワー増幅器を積層集積化し、35GHz 帯で 2 GHz の周波数可変域を有するチップを開発している。

シリコンの三次元集積化とその成功事例の創出を受け、今後は、化合物半導体とシリコン CMOS、MEMS とシリコン CMOS などの異種基板・異種機能の集積化が新たな価値を生み出すことが期待される。車の自動運転の実現を目指し、高精度の集積化 LiDAR の開発が東芝などの国内企業はもとより、デルフト工科大などの欧州、アナログフォトンクス社などの米国企業において開発が進められているのもその一例と言えよう。異種材料の積層集積化を実現するためには、ナノ材料技術、ナノデバイス技術、ウェーハの常温接合や新たな封止材、真空封止法など基礎・基盤的な研究が装置開発も含めて必要である。そこでのキーワードは「低温でのプロセス技術」である。また、3D LSI 設計技術、システム設計技術、さらにそれらの融合分野の科学的知識を統合する必要がある。そのため、異種基板という大きなプラットフォームの中で、LSI プロセス関係、光関係、MEMS 関係、回路関係などの人が集まって技術開発を進めることが必要である。近接場磁界結合を利用したメモリの積層技術に関しては、H27 年度から JST の ACCEL プロジェクト黒田課題で本格的な研究開発がスタートした。DRAM を何層にも積層することで、消費電力の大幅な低減のみならず、大規模メモリとアクセラレータ間の高バンド幅接続が可能になると期待される。また、この積層技術は SRAM にも適用できる。これらは、いわゆるフォン・ノイマンボトルネックの解消に繋がり、究極のターゲットである人間の脳の実現に近づく、ニューラルネットワークの開発に資すると期待される。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

IEDM、VLSI Symposium に代表される電子デバイス・回路に関する主要国際会議において、三次元集積に関するセッションが設けられ、カーボンナノチューブ等を用いたチップ間配線技術、光 TSV、チップ間を容量結合や誘導結合（磁界結合）を用いて無線通信する三次元集積化技術などが発表されていたが、最近では応用研究のフェーズへ移行してきている。産業技術総合研究所グリーンナノエレクトロニクスセンタ（GNC）が III - V 族の n 型 MOSFET と Ge の p 型 MOSFET をウェーハスケールで三次元に積層した CMOS インバータの実証に成功し注目を集めている。また、バックエンドプロセス（BEOL）に埋め込まれるロジックおよびメモリ開発に進展が認められ、超低電圧デバイス技術研究組合（LEAP）が原子移動スイッチを利用した再構成可能な不揮発プログラマブルロジックの開発に成功している。この技術開発は、その後 JST のナノエレ CREST（桜井領域）の中で一つのテーマとして、引き続き研究開発が行われている。

上述したように、ロジック、メモリともに異種機能の集積にはシリコン製またはガラス製のインターポーザが大きな役割を果たしている。これは、シリコンやガラス基板を用いることで貫通配線も含めて微細で高密度の再配線を形成できるからである。樹脂基板の場合には、従来技術では貫通孔の径を数十ミクロンとするのが限界であった。一方、最近の NEDO プロジェクトの成果として、樹脂基板でも直径 5 ミクロン程度の貫通孔を形成することが可能になっており、異種機能の混載による高性能化を多くの応用に対して提供できる技術基盤が整いつつあ

ると言える。

三次元集積化技術の進展を受けて、生体の情報処理を模したニューラルネットワークによる認知コンピューティングや人工知能のハードウェア実装に関する研究が活発化してきている。日本では1990年代前半に一時研究が盛んになったが、技術的な困難性からその後は一部の研究者による研究に留まっている。その後、不揮発性メモリ材料や技術に関する知見が進み環境は変化したといえる。IBMは相変化メモリ材料をCMOS技術と組み合わせてシナプスを作製する技術を発表しており、今後の動向が注目される。

一方、製造技術の観点では、可変量生産を可能にするものとして注目されるのが、経済産業省プロジェクトして産総研で推進しているミニマルファブシステムである。ここ2年程度で後工程を実行する装置群の開発も進み、製造のデモンストレーションを行っている。三次元集積用の装置開発も進められている。このファブシステムと異種機能ヘテロ三次元集積チップは相性が良く、従来型のメガファブと連携して新たなサプライチェーンを創り出すことによって、半導体産業の新たな展開を図れる可能性がある。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

300mm ウェーハを使って三次元集積化技術の実用化開発を行える日本のGINTI（Global Integration Initiative、東北マイクロテック）が進めるチップからウェーハまでの三次元集積化技術開発と試作サービスが注目される。フランスのCEA-LETIやベルギーのIMECが進めるオープンパートナーシップによる技術・装置開発の成果も注目される。IMECではCMOREプラットフォームが整備され、200mm ウェーハの0.13 μ m CMOSプロセスを用いて、MEMSやイメージャ、フォトリソ集積のサービスを開始している。

異種機能ヘテロ集積化では今後光と電子の融合が進むと期待できることから、技術研究組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）が平成24年度より10年間の予定で進めている経済産業省プロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」の成果も注目される。一方、この種の技術の応用として有力なセンサ関連では、Trillion Sensor Initiativeと呼ばれるセンサ応用をオープンに議論する会議が米国主導で発足し、活動を活発化している。新たな社会サービスが発掘される可能性があり、注目すべき動きの一つである。H27年度から始まったJSTのACCELプロジェクト黒田課題では、磁界結合を利用してDRAMやSRAMなどの積層技術を開発しており、メモリとの高バンド幅結合を可能にするニューラルネットアクセラレータの新しいアーキテクチャを考案し、実際にLSI設計・試作も行っている。これらは近接場接合による広帯域メモリ接続応用を視野に入れたものである。

（5）科学技術的課題

日本における異種機能ヘテロ三次元集積チップの研究を進める上での課題としては、国内に最先端のCMOS加工技術をラインとして有しているオープンな研究開発用クリーンルームが少ないことである。欧米の協力で進んでいる「3DIC Multi-Project Wafer Service」の様な異種機能ヘテロ三次元集積化デバイスの開発を手助けするファウンドリやCEA-LETIの「Open 3D™ Initiative」にあるような研究機関の構築が日本でも要望されていたが、平成28年度からのNEDO事業「IoT技術開発加速のための設計・製造基盤開発」などで、つくばイノベーションアリーナ（TIA）のコアインフラに三次元積層を可能にするプロセス装置を備えた研究開発

環境が整備された。今後、中堅、中小あるいはスタートアップなどが利用しやすい運用体制が構築されることを期待したい。一方、産業界は、これまでに開発が進められてきた三次元実装の研究開発成果やその分野における研究開発人材を自社に抱えることなく研究開発拠点に集約し、大学あるいは国立研究開発法人等の中立的機関を中核とした体制を構築することで国際競争に勝てる体制を構築できるものと期待される。

(6) その他の課題

異種機能ヘテロ三次元集積化チップは、多様な電子機能を創り出すことが可能である。そこでは、個人の発想が大きな事業に発展することが大いに期待される。新事業の創生には優位であり、地方創生にも利用できる可能性がある。そのためには、政策的に大学や国研に小型の三次元試作ラインを構築し、誰もが利用できる環境を整備することが有効であろう。また、この分野のベンチャー育成の政策も望まれる。

(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	◎	↓	異種機能ヘテロ三次元集積チップ製造の基礎技術について日本は高い技術水準にある。メッキや液体金属の埋込による TSV 埋め込み技術や触媒エッチング技術、高速ウェットエッチング技術などの新しい技術が装置メーカーやベンチャー企業および大学などから発表されてきた。自己組織化を利用した新しい位置整合技術等の話題性の高い技術が東北大等から発信されている。MEMS 等の部品技術については、大学を中心に新型センサ、製造技術に関する先端研究が続けられている。スパコンのアーキテクチャ研究者も三次元集積チップの熱問題などに取り組むなど、様々な要素についての基礎技術を築き上げており、応用・開発段階に移行している。
	応用研究・開発	◎	→	東北マイクロテックの GINTI における 300mm ウェーハを使って試作まで行える開発環境が整い、大口径シリコンウェーハを用いた応用開発が加速されつつある。TSV を使ったインターポーザ技術も民間企業を中心に開発成果の発表が増えている。ガラス製のインターポーザ技術についても国内ガラスメーカーが米国メーカーの積極的な動きを追随している。近接場磁界結合を使ったメモリチップの積層化技術開発も進んでおり、将来のスパコンや車載用 LSI への応用が期待される。 集積回路製品に関しては、東芝の三次元 NAND フラッシュメモリの事業の成長に併せて次世代技術の開発が精力的に進められている。ソニーのイメージセンサ開発も 3D 化による高機能化に挑戦的に臨んでいる。メモリについては広帯域 3 次元 DRAM などの海外半導体メーカーの動向に応じて、装置や材料供給に関する開発、実用化に進捗が認められる。

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

米国	基礎研究	◎	→	DARPA は、COSMOS (Compound Semiconductor Materials on Silicon) Program および DAHI (Diverse Accessible Heterogeneous Integration) Program で異種材料の3次元集積化の研究開発を推進している。開発事例として、QバンドのVCO(電圧制御発信器)増幅器がある。シリコンCMOSとInPヘテロ接合バイポーラトランジスタ発信器、およびGaNパワー増幅器を積層集積化し、35GHz帯で2GHzの周波数可変域を持つチップを開発している。IBMは人工知能のハードウェア実装に向けて、異種材料・機能を利用したニューラルネットワーク研究に着手している。 欧州FP7の下、Compound Semiconductors for 3D Integrationプロジェクト、通称COMPOSE3がスタートしている。IBMが主導し、STマイクロエレクトロニクス、LETI、グラスゴー大学、Tyndall National Instituteなどが参加して、シリコンに代わる新材料を3次元積層する技術を開発し、製造可能なレベルまで高める取り組みがスタートしている。
	応用研究・開発	◎	↗	XilinxやAltera社の積層型再構成型ゲートアレイ(FPGA)の成功を受け、メモリも集積化するなどして積極的な製品開発を展開している。一方、コーニング社がガラスインターポーザの開発と応用に多くの資源を投入し始めている。Xilinx社は発表から数年で積層型FPGAを事業化しており、展開が速い。メモリに関しても、Micron Technology社がバンド幅の大きなメモリを製品化するとともに、米国Tezzaron Semiconductor社がハイエンドアプリケーション向けにWafer on Wafer技術とそれを使った積層DRAMを開発した。一方で、Maxim Integrated社がウェーハレベルでアナログ向け3次元集積チップの試作に成功している他、Monolithic 3D Incがモノリシック3次元LSIを目指しており、ベンチャー企業の存在感が増している。
欧州	基礎研究	◎	→	Fraunhofer IZMやIMEC、CEA-LETIを中心として、3次元集積化要素技術の研究が引き続き活発に行われている。Fraunhoferはオーソドックスにメモリ、ロジック混載技術の研究を進めている。CEA-LETIは、異種機能集積に注力した開発を行っている。
	応用研究・開発	◎	→	IMEC、CEA-LETIでは、300mmの3次元集積化技術研究開発ラインが構築され、試作サービスも含むオープンコンソーシアムで実用化開発を加速している。IMECでは、CMOREプラットフォームの整備を終え、200mm 0.13μm CMOSプロセスを用いて、MEMSやイメージャ、フォトニクス集積のサービスを開始している。MEMSセンサなどの競争力の高い製品を保有するST Microが、健康、医療、自動車、社会システム向けに製品化意欲が旺盛である。
中国	基礎研究	×	→	北京大学などがTSVに関する研究を行っているが、オリジナルな技術発信はない。
	応用研究・開発	×	→	目立った情報はないが、国および地方政府の半導体産業推進事業でメモリを中心に大きな資金が投じられていることから、今後の動向は注視しておくべきと思われる。
韓国	基礎研究	△	↘	KAISTなどでTSV技術の研究を行っているが、オリジナリティの高い技術発信はない。Samsung社等の民間企業は基礎研究についての情報発信は最近ではほとんどない。
	応用研究・開発	◎	↗	Samsung、Hynix社ともに、TSVによる広帯域積層DRAMで事業を展開しつつ、高性能化開発によって新たな用途の開発を積極的に進めている。 Samsung社はまた、3次元NANDフラッシュメモリについても事業展開に併せて高性能化開発を積極的に進めている。
台湾	基礎研究	○	↘	ITRI (Industrial Technology Research Institute : 工業技術研究院)が3次元集積化技術の開発を精力的に行ってきたが、最近では新たな情報発信はない。
	応用研究・開発	◎	→	技術開発に関する目立った情報発信は最近無いが、TSMC社がTSVの高アスペクト化や極薄インターポーザをさらに発展させ、OSAT(後工程請負)と一体となった開発体制が強化・加速されるものと思われる。 TSMC社のTSVを入れたプロセスインテグレーション技術の完成度は高い。TSVインターポーザを製造し、FPGAウェーハと併せてXilinx社向けにファウンダリサービスを提供している。OSATの技術開発も連動している。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、絶対評価である。

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) Mitsumasa Koyanagi, "Heterogeneous 3D Integration – Technology Enabler toward Future Super-chip," *2013 IEEE International Electron Devices Meeting*, 2013. doi:10.1109/iedm.2013.6724539
- 2) H. Kudo et al., "High Performance Closed-channel Cooling System Using Multi-channel Electro-osmotic Flow Pumps for 3D-ICs," *2013 IEEE International Electron Devices Meeting*, 2013. doi:10.1109/iedm.2013.6724720
- 3) S. L. Chua et al., "3D CMOS-MEMS Stacking with TSV-less and Face-to-face Direct Metal Bonding," *2014 Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology) : Digest of Technical Papers*, 2014. doi:10.1109/vlsit.2014.6894410
- 4) Chang-Hong Shen et al., "Monolithic 3D Chip Integrated with 500ns NVM, 3ps Logic Circuits and SRAM," *2013 IEEE International Electron Devices Meeting*, 2013. doi:10.1109/iedm.2013.6724593
- 5) T. Irisawa et al., "Demonstration of InGaAs/Ge Dual Channel CMOS Inverters with High Electron and Hole Mobility Using Staked 3D Integration," *2013 Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology) : Digest of Technical Papers*, 56, 2014.
- 6) T. Irisawa et al., "Demonstration of Ultimate CMOS Based on 3D Stacked InGaAs-OI/SGOI Wire Channel MOSFETs with Independent Back Gate," *2014 Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology) : Digest of Technical Papers*, 2014. doi:10.1109/vlsit.2014.6894395
- 7) M. Miyamura et al., "First Demonstration of Logic Mapping on Nonvolatile Programmable Cell Using Complementary Atom Switch," *2012 International Electron Devices Meeting*, 2012. doi:10.1109/iedm.2012.6479020
- 8) S. Okamoto et al., "Bidirectional TaO-Diode-selected, Complementary Atom Switch (DCAS) for Area-efficient, Nonvolatile Crossbar Switch Block," *2013 Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology) : Digest of Technical Papers*, 242, 2013.
- 9) Arkadii V. Samoilov et al., "3D Heterogeneous Integration for Analog," *2013 IEEE International Electron Devices Meeting*, 2013. doi:10.1109/iedm.2013.6724688
- 10) Y. Takemoto et al., "Characterization of 4 million micro bump interconnections at 7.6 um pitch for 3D stacked 16 M pixel image sensor," Proc. 2016 Asia-Pacific Workshop

- on Fundamentals and Application of Advanced Semiconductor Devices, B1-1, 2016.
- 11) Takanori Shuto et al., "Room-temperature Bonding of Heterogeneous Materials for Near-infrared Image Sensor," *Japanese Journal of Applied Physics* 53, no. 4S (2014) . doi:10.7567/jjap.53.04eb01
 - 12) Andy Heinig et al., "Current and Future 3D Activities at Fraunhofer," *2015 International 3D Systems Integration Conference (3DIC)*, 2015. doi:10.1109/3dic.2015.7334466
 - 13) Pascal Vivet et al., "3D Advanced Integration Technology for Heterogeneous Systems," *2015 International 3D Systems Integration Conference (3DIC)*, 2015. doi:10.1109/3dic.2015.7334468
 - 14) Daniel S. Green et al., "Path to 3D Heterogeneous Integration," *2015 International 3D Systems Integration Conference (3DIC)*, 2015. doi:10.1109/3dic.2015.7334469
 - 15) Chung H Lam, "Neuromorphic Semiconductor Memory," *2015 International 3D Systems Integration Conference (3DIC)*, 2015. doi:10.1109/3dic.2015.7334566 / Technical Digest of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) , 2012, 2014.
 - 16) Masaki Sakakibara et al., "A Back-illuminated Global-shutter CMOS Image Sensor with Pixel-parallel 14b Subthreshold ADC," *2018 IEEE International Solid - State Circuits Conference - (ISSCC)*, 2018. doi:10.1109/isscc.2018.8310193
 - 17) Augusto Ronchini Ximenes et al., "A 256×256 45/65nm 3D-stacked SPAD-based Direct TOF Image Sensor for LiDAR Applications with Optical Polar Modulation for up to 18.6dB Interference Suppression," *2018 IEEE International Solid - State Circuits Conference - (ISSCC)*, 2018. doi:10.1109/isscc.2018.8310201
 - 18) Jin Hee Cho et al., "A 1.2V 64Gb 341GB/S HBM2 Stacked DRAM with Spiral Point-to-point TSV Structure and Improved Bank Group Data Control," *2018 IEEE International Solid - State Circuits Conference - (ISSCC)*, 2018. doi:10.1109/isscc.2018.8310257
 - 19) Kodai Ueyoshi et al., "QUEST: A 7.49TOPS Multi-purpose Log-quantized DNN Inference Engine Stacked on 96MB 3D SRAM Using Inductive-coupling Technology in 40nm CMOS," *2018 IEEE International Solid - State Circuits Conference - (ISSCC)*, 2018. doi:10.1109/isscc.2018.8310261
 - 20) Kai Zoschke et al., "Development of a High Resolution Magnetic Field Position Sensor System Based on a Through Silicon Via First Integration Concept," *2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2018. doi:10.1109/ectc.2018.00141

2.3.7 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。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

ロボット、ロボット技術、サービスロボット、手術支援ロボット、Surgery 4.0、アクチュエータ、センサ、自律制御、人工知能 (AI)、機械学習、陽的制御、陰的制御、身体と環境の相互作用、ソフトロボティクス、フレキシブルエレクトロニクス、高分子材料

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

産業用ロボットでは日本の技術力が高く世界をリードしているが、今後少子高齢化・労働力不足が進む中で、このロボット技術は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10兆円となることが予想されている。例えば、手術支援ロボットだけでもその市場が、2014年の4000億円から2021年には2.5兆円に達するとの予想がある。最近の産業用ロボットでも人との協働を前提に安全性に配慮したものが開発されているが、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、安全性とともに人とのコミュニケーションができるなど、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、様々な応用分野へのロボット技術の導入を目指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、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。

ロボットの要素技術・基盤技術としては大きく分けると、動力系技術（アクチュエータ）、センシング技術（センサ）、制御技術になるが、今後のサービス分野などで利用されるロボットは人間と共生することが前提となるため、高性能化・高機能化、低価格化などとともに、小型軽量化、安全性向上、スマート化などが求められる。これらを考慮した柔らかい材料の利用や柔軟な動作を可能とするソフトロボティクスや、環境変化へのリアルタイムの自律的応答が可能な新たな制御手法が求められる。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、進展の大きな情報通信（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。

[研究開発の動向]

産業用ロボットの開発では、ハードウェアの構成方法が成熟し、人型ロボットのように複雑な多関節ロボットも実現できるようになっており、先端的研究は大量のセンサ情報を利用した

知的な制御に移りつつある。また、人との共同作業における安全性の確保から、ロボット本体の軽量・小型化が重要になってきている。一方、サービス分野などでの利用が期待されるソフトロボティクスの開発については、ハードウェアの構成法についての課題がまだ多く、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、外部環境の把握などのためのセンサ開発、柔らかい体や腕を精度良く制御するための制御技術などの研究が活発に行われている。

電磁モータや油圧・空圧シリンダとは異なる柔らかい駆動源（ソフトアクチュエータ）の研究は、やわらかさが必要とされる介護福祉機器への強い期待や、機能性ソフトマテリアルの開発研究の裾野の広さから、日本で活発に進められている。代表的な例として、空気圧駆動（マッキベン型空気圧人工筋肉、Flexible Microactuator など）や形状記憶合金ワイヤによるものがある。この他に、イオン導電性高分子アクチュエータや、誘電エラストマーアクチュエータなどのソフトアクチュエータの研究も進んでいるが、取り出せる変位や力が小さいため、ロボットへの応用はまだ限定的である。

柔軟体の変形や外界との接触を検出するセンサの開発は、フレキシブルエレクトロニクス分野において、薄型・柔軟・伸縮可能といった特性を持つ有機半導体やカーボンナノチューブなどのナノ材料を用いた電子デバイスの開発が進んでいる。

現在、典型的なソフトロボットはシリコンラバーで製作されている。その他、風船のように内圧で支えられた膜構造を用いるインフレータブルロボットや、生きた細胞やハイドロゲルなどを使ったロボットもある。このような柔軟材料の利用は、そのモデル化や制御について新しい問題を提起する。ソフトロボットの物理シミュレーションや運動制御は、情報科学技術の観点からも興味深い対象となっている。この運動制御では、連続体の変形や、無数の接触を扱う必要があり、従来の制御の理論体系が適用できないという根本的な課題がある。制御入力と運動の関係を正確に記述することが難しいことから、多数の試行にもとづいて運動制御を行う機械学習の手法は有望なアプローチのひとつである。

さらに進んだ自律制御研究の重要な点として、これまで研究開発が進められてきた技術の応用手法の確立と、その技術の適応範囲限界がはっきりとしてきたことが挙げられる。これまでの自律制御研究の技術が実利用可能なのは、依然として環境が完全に既知である“閉じた環境”に限られている。産業用ロボットは閉じた環境において生産性の向上に役立っているが、最近では複数のロボットが相互にコミュニケーションをとりながらタスクを行う自律制御も可能になってきた。自動車やドローンの自動運転技術も、現在のトレンドは高精度3次元地図を作成し、走行環境を可能な限り閉じた世界に落とし込むという手法である。一方、環境に煩雑さの残るいわゆる“開かれた環境”に対しては、Amazon Picking Challenge や DARPA Robotics Challenge (2015年) などでチャレンジが行われているが、いまだ自律ロボットは実用段階に至っていない。

サービスロボットの重要な応用分野ですでに市場がある手術支援ロボットの動向も注目される。これまで、米国 Intuitive 社 da Vinci に代表される手術支援ロボットは、手術室内において単独での使用がほとんどであった。これは Surgery3.0 と位置づけられているが、da Vinci の主な特許が 2019 年で切れることから、次世代の開発競争が各国で活発となっている。また、Surgery 4.0 (the enabling of a digital surgical platform coupled with robots.) の標語の下、デジタル化とクラウド化を促進し、人工知能による診断支援などを実装する次世代システムの

研究開発が加速している。また、手術支援ロボット分野では、米国を中心に自動化、自律化の研究開発が進んでいる。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

産業用ロボット用の要素技術として、金属材料から高分子材料への転換が進んできている。ロボットをポリウレタン材料で被覆して緩衝材として利用したり、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics : 炭素繊維強化プラスチック) とアルミを接合させて軽量飛行ロボットに役立てたりしている。

2014年にソフトロボティクスを扱う初の学術雑誌 (Journal of Soft Robotics) が創刊されたが、2016年に発表されたこの Soft Robotics のインパクトファクターは、他の全てのロボット関連ジャーナルを上回るトップのスコアであった。Science 誌の姉妹誌として Science Robotics が 2016年に創刊されたが、この中でもソフトロボティクス研究は一定数を占めている。2018年4月には、RoboSoft という国際会議がイタリアで初めて開催され、今後も開催国を変えながら継続的に開催される予定になっている。

開かれた環境での完全自律制御の実現をするための前段階として、部分自律制御が積極的に研究されて成果を挙げている。例えば、手術者が体内に針を挿入する際に、最適な経路を自律的に判断して術者のサポートをしている。また、前腕電動義手の手首の回旋動作を残存する肩の運動から人の運動意図を推定することで、自律的に制御し効率的な動作を実現している。このような足りない部分を補い合う相互自律協調が実現できるようになった背景には、人の運動制御系に対する理解が進んだことが挙げられる。一方、近年急速に発展している機械学習を取り入れた研究は、煩雑な環境における物体認知において極めて大きな発展を見せており、ロボットの煩雑環境での認知への大きな貢献が期待される。

医療用ロボットにおいては、Nature 誌の姉妹誌として、2017年1月に Nature Biomedical Engineering が発刊され、ロボット、医用工学、AI への注目の高まりを象徴して 2019年より Nature Machine Intelligence が発刊予定である。手術支援ロボットとしては、韓国において da Vinci と同様のマスタスレーブ型手術支援ロボット (Revo-I) が 2017年に実用化され、日本 (メディカロイド社、リバーフィールド社)、米国 (Auris surgical robotics 社)、シンガポール (EndoMaster 社)、英国 (CMR Surgical 社)、オランダ (Preceyes 社) などで、開発が進められている。また、米国の J&J と Google が設立した Verb surgical において Surgery4.0 に向けた新しい手術支援ロボットのプラットフォームが開発中である。

2015年に政府によって策定された「ロボット新戦略」に基づき、2020年に World Robot Summit (ロボット国際大会) が開催される。競技種目は、ものづくり、サービス、インフラ・災害対応などであり、2018年10月にはプレ大会が開催された。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

米国では、NSF で National Robotics Initiative 2.0: Ubiquitous Collaborative Robots (NRI-2.0)、Disability and Rehabilitation Engineering (DARE)、Information and Intelligent Systems (IIS) などのプログラムが行われている。また、2018年に Continuum, Compliant, and Configurable Soft Robotics Engineering (C3 SoRo) という領域を設定して研究提案を募

集している。

EUでは、Horizon 2020により多くのロボット研究が支援されており、SoMa - Soft-bodied intelligence for Manipulation (ソフトロボティクス、2015年～)、EDEN2020 (低侵襲脳神経手術のための統合技術プラットフォーム、2016～2020年)、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)、SMARTsurg (ウェアラブル操作デバイスによるロボット遠隔手術、2017～2019年)、CYBERLEGS++ (ロボット義足・外骨格、2017～2020年)、SARAS (AIによるロボット手術支援、2018～2020年)、MyLeg (埋め込み型の筋電ロボット義足、2018～2021年) などがある。

中国では2015年に「中国製造2025計画」を発表し、ロボットやAIの研究開発に注力している。KUKAに代表されるように、中国企業による海外のロボット関連企業の買収や投資が活発である。

韓国では、Bioeconomy戦略の一環として、AIやロボティクスを応用した次世代型医療デバイスの開発を行う9つの研究チームに対し、5年間で420億ウォン(3679万ドル)を投資している。

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様々なプロジェクトが立ち上がっている。その中で、要素技術開発を目的としたものとして、経産省の「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」(2015年～2022年)がある。また、科研費新学術領域「ソフトロボットの創成:機電・物質・生体情報の有機的融合(代表:鈴木康一)(2018年～2022年)」が発足し、5年間のソフトロボティクス関連研究が推進される。その他、特定の応用に取り組むものとしては、内閣府のImPACT(2014年～2018年)における「タフ・ロボティクス・チャレンジ」、「重介護ゼロ社会を実現する革新的サイバニックシステム」、「バイオニックヒューマノイドが拓く新産業革命」、JSTのERATO「石炭共生ヒューマンロボットインタラクションプロジェクト(2014年～2019年)」、「稲見自在化身体プロジェクト(2017年～2022年)」、CREST「環境を友とする制御法の創成(2014年～2019年)」、AMEDの「ロボット介護機器開発・導入促進事業」、「ロボット介護機器開発・標準化事業や未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業」、などがある。

(5) 科学技術的課題

人と協働するロボットの実現には、安全性やエネルギー効率を高めるためにもアクチュエータを含めた動力部の軽量化が重要であり、高性能な磁石材料の開発による電磁モータのさらなる小型・軽量化が望まれる。また、軽量化に適する新たなアクチュエータの開発については、高出力化が大きな技術的課題となっている。空気圧アクチュエータはコンプレッサなど周辺機器が大型になりがちであり、システム全体としての小型・軽量化が期待される。形状記憶合金ワイヤによるアクチュエータ、イオン導電性高分子アクチュエータ、誘電エラストマーアクチュエータなどについても、高出力化、高速動作、動作範囲の拡大などに取り組む必要がある。

ソフトロボットの運動探索、運動創発、運動制御は大きな課題である。変形や接触に関する膨大な感覚情報をどのように取り込み、運動指令をどのように生成するかについては、大自由度システムに適用できる学習手法の開発や、分散的・階層的に運動制御を行なう取り組みが望まれる。また、従来からの明示的な知能(脳神経系や高機能計算機に実現された高度な制御則:陽的知[表脳])だけでなく、身体と環境との相互作用に埋め込まれている非明示的な制御機

能（陰的知 [裏脳]）を理解することも重要である。

自律制御の範囲を拡大するには、煩雑な開かれた環境に適応する技術と環境情報処理法の確立が不可欠である。開かれた環境への適応は、深層学習のようなデータドリブンのトップダウン的な行動学習と、環境とロボットの相互作用の中で未知の状態へ適応していくボトムアップ学習の融合が求められる。

現状のソフトロボティクス研究は、柔軟材料を用いた様々な形態の実験的な探索にとどまっており、設計手法が確立されていない。3Dプリンタなどのデジタルファブリケーション技術と組み合わせた自動設計技術や、ソフトロボットの振る舞いの予測ができるシミュレーション技術の開発が求められる。柔軟材料に対応した3Dプリンタを用いたロボットの自動製造が有望視されるが、現状ではまだ材料の選択肢が少なく、強度や耐久性について材料の改良が不可欠である。計算機内で柔軟ロボットの動作を扱うには、非線形な大変形や、接触・衝突のモデル化と高速なシミュレーションが必要となる。柔軟物のモデリングと制御の視点では有限要素法は適していない場合が多く、実時間制御に適し計算手法が容易で全体の見通しも利くモデルと理論の構築が必要である。

（6）その他の課題

日本国内でソフトロボティクスに関する先駆的な研究例があったにも関わらず、現状では北米やヨーロッパが主な先端的研究の発信源となっている。これは、先進的ロボティクス研究に、北米では DARPA、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背景となっている。我が国ではソフトロボティクスのような萌芽的分野への先行的かつ継続的な取り組みが課題といえる。

2017年5月に欧州での医療機器に関する規制、欧州医療機器規則 MDR の新たなガイドラインが発行された。従来、医療機器は欧州での承認が速いとの認識であったが、約20年ぶりの大幅改編で規制が非常に厳しくなっている。また、ロボット関連技術における倫理的問題に関する議論が盛んになっている。ロボットの倫理的問題に関するプロジェクト REELER (<http://reeler.eu>) が Horizon 2020 により支援されている。2017年には、ブレインマシンインターフェース (BMI) の研究で知られるドイツのテュービンゲン大学の研究者らを中心としたメンバー（スイス、米国、カナダ、日本の研究者を含む）により、BMI の倫理綱領に関する声明が Science 誌に発表された。これらの動向には注意する必要がある。

（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	○	→	日本ロボット学会、日本機械学会、計測自動制御学会などの学術講演会でソフトロボティクスのセッションが作られており、ソフトアクチュエーターの開発や、フレキシブルエレクトロニクスの研究、柔軟高分子材料の開発など、広範な研究が行われている。強力集束超音波とロボットを組み合わせた治療システムの開発が行われている。
	応用研究・開発	○	→	介護福祉機器の開発が盛んである。ソフトアクチュエーターを使ったリハビリロボットや、ウェアラブルデバイスの開発が行われている。外骨格ロボット等を利用し、部分自律を利用したリハビリテーションへの応用が進められている。各国で様々な手術支援ロボットが実用化あるいは実用段階に近づいている中で、我が国の動きはやや弱い。

米国	基礎研究	◎	↗	実用化を目指す大学、企業間の共同研究は活発である。 ハーバード大学 WYSS Institute でシリコンラバーを使った軟体ロボットの研究が行われ、継続的に成果が発表されている。また、MIT、タフツ大学、スタンフォード大学、カリフォルニア大学サンディエゴ校でも関連研究が活発である。 マイクロロボット、ソフトロボットの開発が活発。また、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	◎	→	現状の産業用ロボットの問題解決意識を持ったベンチャー企業の活動が活発である。 Amazon picking challenge のように、ユーザー側からのロボット技術改良の力が作用し、応用研究開発が進展している。 ソフトグripperやウェアラブルデバイスで応用研究が進んでおり、スタートアップの新陳代謝も盛んである。 単孔式手術支援ロボット da Vinci Sp が実用化された。また、ベンチャー AURIS 社での軟性内視鏡手術支援ロボットの開発などがある。
欧州	基礎研究	○	→	EU によるファンディングシステムがよく機能し、ソフトロボティクスをはじめ、応用と結びついた基礎研究が積極的・継続的に進められている。また、RoboSoft という名称で、複数の組織をまたがったコミュニティがある。 タコ型ロボットのような生物規範型ロボットや、柔らかい身体に根ざした知能に関する研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	ドイツのスタートアップ KBee 社の 7 軸の協調ロボット「FRANKA EMIKA」が本格的に販売されようとしている。 タコ型ロボットから派生した医療用ロボットアームの開発などが行われている。また、医療・リハビリへの応用が積極的に進められており、EU 内での協力関係がよく機能し、倫理的問題の検討も継続して行われている。 Preceyes 社が眼科手術支援ロボットの治験に成功し、2019 年の実用化を目指している。
中国	基礎研究	△	→	地方政府が多額の研究開発費をロボットに投入している。 西安交通大学や清華大学において、高分子材料を用いたソフトアクチュエーターの開発が行われている AI を活用したコンピュータビジョンや、運動計画、新型アクチュエータなどの研究成果の発表が盛んである。
	応用研究・開発	△	→	ロボットと AI の市場規模が急速に成長しており、これに伴い手術支援ロボット、産業用ロボットやサービスロボットなどの応用研究・製品化が推進されている。
韓国	基礎研究	○	↗	ARPA Robotics Challenge でも見られるように自律制御の基礎的な部分から応用につなげる研究をきちんと行っている。 Seoul National University において、人工筋肉や、フレキシブルセンサ、おりがみロボットなどに関する研究が活発である。 複数の大学が参加するソフトロボティクス研究センターが設立された。 KAIST において、単孔式手術用の軟性内視鏡用ロボット K-Flex の研究開発が行われている。
	応用研究・開発	○	→	制御においては従来技術を利用した応用を目指している。 ウェアラブルデバイスの研究開発が行われている。 マスタスレーブ型手術支援ロボットシステム Revo I が実用化された。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、絶対評価である。

◎：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、×：活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) *Surgical Robots Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, 2015-2021* (WinterGreen Research Inc., 2015) .
- 2) 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, April* (1991) : 1622–27.
- 3) R. F. Shepherd et al., "Multigait Soft Robot," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, no. 51 (2011) : 20400. doi:10.1073/pnas.1116564108
- 4) Hubertus Feußner and Adrian Park, "Surgery 4.0: The Natural Culmination of the Industrial Revolution?" *Innovative Surgical Sciences* 2, no. 3 (2017) : 105-108. doi:10.1515/iss-2017-0036
- 5) Guang-Zhong Yang et al., "Medical Robotics—Regulatory, Ethical, and Legal Considerations for Increasing Levels of Autonomy," *Science Robotics* 2, no. 4 (2017) . doi:10.1126/scirobotics.aam8638
- 6) Alberto Favaro et al., "Automatic Optimized 3D Path Planner for Steerable Catheters with Heuristic Search and Uncertainty Tolerance," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018. doi:10.1109/icra.2018.8461262
- 7) Shintaro Oyama et al., "Biomechanical Reconstruction Using the Tacit Learning System: Intuitive Control of Prosthetic Hand Rotation," *Frontiers in Neurobotics* 10 (2016) . doi:10.3389/fnbot.2016.00019
- 8) Jens Clausen et al., "Help, Hope, and Hype: Ethical Dimensions of Neuroprosthetics," *Science* 356, no. 6345 (2017) : 1338-1339. doi:10.1126/science.aam7731

