

3.3 ICT・エレクトロニクス応用

ナノテク・材料を基盤とした ICT・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、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やトポロジカル絶縁体のような二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。もう一つは、ナノ CMOS とスピンドバイス、フォトリソグラフィデバイス、MEMS/NEMS、バイオセンサ（デバイス）などを新しい配線接合技術である TSV（貫通シリコンビア）や近接場磁界結合などの新規実装技術を使って異種機能のデバイスを三次元的に集積化する技術である。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。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。特に日本では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。

3.3.1 超低消費電力（ナノエレクトロニクスデバイス）

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

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き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、低消費電力化と利便性の向上につながる。

また、消費電力を抑えながら高度な情報処理が可能になれば、従来の計算機では事実上解くことが不可能であった問題を解くことで、様々な分野における科学技術の発展を支えることが期待される。さらには、我が国の産業競争力の源泉となってきた半導体集積エレクトロニクス産業の国際的な競争力回復につながることも期待される。

国際半導体技術ロードマップ（ITRS）で示されている基本素子（トランジスタ）としての 3 次元構造デバイスは、ロジック分野ではインテルや TSMC が、メモリ分野（NAND Flash）では東芝や三星がその研究開発を加速している。デバイス積層技術の進歩はすさまじい勢いで進んでおり、不揮発性メモリの 3 次元化、イメージセンサと論理回路の積層化はもはや最先端製品には不可欠であり、さらなる高度化が求められている。また、ここ数年の最も大きな変化はビッグデータ社会の到来に向けて、センサ、エネルギーハーベスタに対する期待が高まっていることである。さらに、非ノイマン型アーキテクチャやそれを実現するデバイス・材料技術も注目されている。

以下にこれまでの取組みの概要を記す。

- 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、原理的に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）」があり、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、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実用化技術の開発が進められてきた。

不揮発性メモリに関係する最近のプロジェクトとしては、産総研の IMPULSE（2013-2015）と内閣府の革新的研究開発推進プログラム ImPACT（2014-）がある。IMPULSE では、電圧制御スピン RAM、トポロジカル RAM（超格子相変化メモリ）、強誘電抵抗変化 RAM の 3 種類の不揮発性メモリ研究を推進している。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」では、SOT（spin-orbit torque）-MRAM と電圧駆動 STT-MRAM（電圧制御スピン RAM と同じ）の次世代磁気メモリの 2 つの研究テーマを行っている。

- カーボン材料

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。世界中をキャラバンして参画者を（資金面も含めて）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で日本はトップ集団にいるが、応用では遅れを取っている。米国では国家プロジェクトを既に始動させており、それらを融合して脳型コンピュータを開発しようとしている。

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 $<60\text{mV/dec@RT}$ ）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（PRAM or PCM）、スピン MRAM（ex. STT-MRAM）など不揮発メモリの研究開発を加速していく必要がある。また、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も必要になろう。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、メモリとしては、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。

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 STT-MRAM（電圧制御スピン RAM）、FTJ（ferroelectric tunnel junction）や FeFET-RAM といった強誘電体利用メモリが候補である。また、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

が期待される。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。

- 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。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も重要になってくる。

- 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。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

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・高性能に行うダイナミックなシステム）、などを検討している。しかしながら、基本素子だけで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、「Memory on Logic」は世界的な動向になりつつある。ロジックとメモリのデバイス・システムレベルでの協調設計（デバイスの性能や信頼性にまで配慮した設計）が重要になる。

- 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、ナノワイヤトランジスタや FinFET 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) 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、最近、国内で実証された。スピントロニクス素子や PCM、ReRAM などのアナログ的抵抗変化特性を有する不揮発性メモリ素子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れつつある。最近では 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されている。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。このチップが実用化すれば、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、クロスポイント型メモリセル開発が一段落し、セレクトタに研究開発の中心がシフトしている傾向が伺える。2 端子セレクトタによるメモリセルの自己選択性が鍵となる。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。候補材料としては、 HfO_x 系がメインである。これらは 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、 HfO_2 系 ReRAM の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。この傾向が進めば、NAND Flash 代替としてのストレージタイプ SCM (storage class memory) の用途も見えてくるかもしれない。現状のアプリ狙いは、SSD のバッファメモリとしてのメモリタイプ SCM 用途である。

PCM 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、進化のロードマップが描けており、将来性は有望である。

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人工シナプスデバイス（メモリスタ）などである。これらは、Logic on Memory で表現されるようなロジックとメモリの実装レベルでの融合とは異なる概念である。

不揮発性メモリ開発の活動は、米国が他地域と比べ群を抜いている。他地域の研究機関との共同が多いものの、IEDM2015 で 12 件、VLSI2016 で 6 件の発表があった。ちなみに、日本は 2 件／7 件、欧州は 6 件／4 件、中国は 2 件／1 件、韓国は 2 件／1 件、台湾は 3 件／6 件となる。台湾の躍進が目覚ましい。質の高い論文が多く、独創的提案も目を引く。

[注目すべきプロジェクト]

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。

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 Neuromorphic Computing に関するプロジェクトが新たに立ち上がりつつある。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。

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、平成 28 年度より、スピン軌道トルク（SOT）MRAM と電圧トルク MRAM の 2 テーマに集約して活動する予定である（5 プロジェクト体制を 2 分科会に改組）。

(4) 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を目指すべき方向は、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（系統的・網羅的な材料探索は産業界、メモリ機構の深い理解に基づく従来の延長線では考えにくい新材料の提案・実証は大学）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。

(5) 政策的課題

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（特に材料技術、回路製造技術など）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。

(6) 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、集積半導体、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）、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

(7) 国際比較

(ロジック、メモリ関係)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	ロジック関係では、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。 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。
	応用研究・開発	○	→	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。 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との共同開発が一般化している。 ReRAM は、いまだ信頼性問題がクリアになっていない。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。 ReRAM の PUF 応用が検討されている（パナソニック）。 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。 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 20 nm φ 以下まで進んでいる。 マイコンに混載されるフラッシュメモリの分野では、ルネサスエレクトロニクスが 28 nm 技術を用いたマイコン内蔵用フラッシュメモリを開発したと発表している。これは、40 nm 技術を用いた製品の次世代を担う製品であり、マイコン業界では群を抜く製品である。
米国	基礎研究	○	→	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。 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。 メモリ分野においては、PCM 用の新材料、結晶粒界近傍のみを相転移させる新原理スイッチング等の研究が IBM を中心に進められている。 Beyond CMOS として、スピントロニック・ロジック回路の研究が続けられている。
	応用研究・開発	◎	↑	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。 HP が 2008 年に第 4 の受動素子として発表した memristor は、メモリ適用を目指して SK-Hynix と共同開発を行ってきたが、2014 年 6 月に、memristor を活用し、さらには photonics を組み込んだチップを 2016 年までに作ると発表した。抵抗変化メモリの分野では、積み重ねた CNT が作る膜に電圧を印加することで発生する抵抗の違いを利用するメモリ（Nantero）や、金属が電解質膜中にする金属架橋を利用したメモリ（Adesto）に関して、量産化可能であることを示すデータが出されており、ベンチャキャピタルなどの資金を活用した製品化に向けた開発が行われている。 CNT-RAM は、Nantero 社から 2015 年度は報告なし。ReRAM はクロスポイント型の多層化の研究が進展。HfO_x 系材料が研究の中心。セレクト材料の研究が進み、メモリセルと一体化し、自己選択性及び集積化が向上している。シナプスデバイスへの応用研究も活発で、Low power の STDP とパターン学習（機械学習）への適用が期待される。PUF への応用研究も堅調。STT-MRAM は、熱揺らぎ耐性と書き込み電流低減の両立を目指したデバイス・材料開発が IBM 等を中心に進められている。 double MTJ 構成により、$\Delta/I_c=10$ (kBT/μA) という報告もある。クロスポイント型メモリ実用化にはセレクトの完成度の高さが重要であることが認知されつつあり、メモリセルとともに研究開発が活発化している。両材料を積層一体化し、セルの自己選択性が著しく向上。MRAM の分野では、最初に製品化した Everspin から STT を用いた 64Mb のサンプルが出荷された。

欧州	基礎研究	○	→	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ン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。強誘電体に HfO_x を使った FeFET RAM の研究で世界をリード(ドイツ中心)。多値化の可能性も示唆。スピントロニック・ロジック回路として多数決ゲートの研究が進められている。
	応用研究・開発	○	→	日米の企業からの発表減少もあり、IMEC (ベルギー) からの論文発表数が目立っている (2013 年 6 月 VLSI Technology Symposium : 9 件、2013 年 12 月 IEDM : 15 件、2014 年 6 月 VLSI Technology Symposium ; 10 件)。メモリ関係テーマとしては、ReRAM の発表が多い。CEA-Leti (仏) はメモリデバイスの研究にも注力しており、従来型の電荷蓄積型メモリから抵抗変化型まで、幅広く研究開発を行っている。イタリアの大学は、抵抗変化型メモリの動作機構や信頼性の基礎を、シミュレーションで検討する研究を継続的にやっている。Infineon が自動車用途を目的に、MRAM の開発を行っていることを 2014 年の VLSI Technology Symposium で発表しており、MRAM の技術的な進歩に伴い、混載不揮発メモリとして再び注目する会社が出てきたことを示している。 ReRAM は信頼性や特性改善に関する研究が中心になってきており、製品化検討に入っていることを伺わせる (IMEC が主導的)。
中国	基礎研究	○	→	メモリ関係では目立った発表はない。
	応用研究・開発	○	→	精華大学、北京大学などからの発表が増えており (IEDM2013 ; 9 件、VLSI2014 ; 4 件、ただし、海外との共同研究と思われる発表を含む)、成果が出つつあると思われる。発表には ReRAM 関係も含まれている。中国科学院が 3D-ReRAM の開発を進めている。材料は HfO_x 系。積層膜の端面を利用する独自の構造を提案。合わせて、セレクト材料の研究も進めている。 スマートフォンやタブレット用の MPU、BB チップの最大のメーカーである Qualcomm が、28 nm の技術で SMIC と提携したと報道されており、この分野では、中国の巨大市場を狙った戦略的な提携が増えて行くと思われる。それに伴って製品開発や産業化の力も付いてくるのではないかと予想される。VLSI2014 では、その SMIC から ReRAM の報告があり、開発にも力を入れていると思われる。 Intel が、3D-Xpoint (PCM) を中国で量産すると発表。SSD 向けの SCM (storage class memory)。
韓国	基礎研究	○	→	基礎研究重視の政策による予算の増加を反映して、Nature 誌に掲載された論文数が 2013 年増加したという報告がある。また、Samsung が 2013 年に、大学における基礎研究支援プログラム (1500 億円) を発表しており (10 年間)、大学を通じた基礎研究促進にも力を入れていることがよくわかる。また、Samsung は最近、SiGe やナノワイヤの発表を行っており、FinFET 以降を見据えたトランジスタの開発を行っていると思われる。
	応用研究・開発	○	↑	メモリに関して活発な開発を行っているのが SK-Hynix である。HP とは ReRAM の共同開発を行い、東芝とは DRAM 代替を狙った MRAM の研究開発を行っている。また、PCRAM に関しては IBM と共同開発することを発表した。Samsung も MRAM などに多くの人数を投入して研究開発を行っている。微細化限界を迎えつつある NAND フラッシュメモリにおいて、更なる集積度向上策として注目されてきたのが、メモリ領域を積層する 3 次元構造のメモリセルである。東芝の BiCS を先駆けとして、Samsung、SK-Hynix も同種のメモリセルを発表し、2014 年が量産化の年としてきた。Samsung は 2014 年 7 月に、32 層を積層したメモリを作り、それを SSD に実装したと発表し、量産化の先頭に立った。
台湾	基礎研究	○	→	メモリ関係では目立った発表はない。
	応用研究・開発	◎	↑	台湾におけるメモリ分野での応用研究・開発では Macronix がコンスタントに学会発表を行っている。PCM に関して IBM と共同開発を行っているが、最近では、ReRAM や 3 次元の NAND フラッシュなどに関する発表も行っている。 IBM/Macronix PCRAM Joint Pj にて PCM を精力的に開発中。二律背反する switching 速度と data retention をともに改善する GST に代わる新材料の他、GST の結晶粒界近傍のみを相転移させる新原理スイッチングの研究を行っている。後者は PCM のスイッチング電流を著しく低減させる注目の技術である。 米国、中国の研究機関と共同で、3D-ReRAM の開発に取り組んでいる。自己選択メモリセルを 4 層重ねたクロスポイント型で、積層膜の端面を使う ReRAM ならではの構造を採用。FinFET Dielectric RRAM (FIND RRAM) という 1T1R の新構造 ReRAM の提案もある (National Tsing Hua Univ. と TSMC)。

(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レベル

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）のレベル

(註 2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 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) <http://www.nature.com/news/2011/110308/full/news.2011.143.html>
- 2) <http://spectrum.ieee.org/robotics/artificial-intelligence/moneta-a-mind-made-from-memristors/>
- 3) C. Yoshida et. al. “Demonstration of non-volatile working memory through interface engineering in STT-MRAM,” 2012 Symposium on VLSI Technology, p. 59, 2012.
- 4) J. Tominaga et. al., “The first principle computer simulation and real device characteristics of superlattice phase-change memory,” 2010 IEEE International Electron Devices Meeting, p. 22.3.1, 2010.
- 5) http://www.toshiba.co.jp/about/press/2011_07/pr_j1306.htm.
- 6) <http://www.elpida.com/pdfs/pr/2012-02-27j.pdf>.
- 7) <http://www.elpida.com/ja/news/2012/01-24r.html>.
- 8) <http://www.leap.or.jp/index.html>.
- 9) <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn120515-1/jn120515-1.html#1>.
- 10) http://japan.renesas.com/edge_ol/special/01/index.jsp.
- 11) <http://eetimes.jp/ee/articles/1202/01/news020.html>.
- 12) <http://www.kavlifoundation.org/science-spotlights/how-atomic-scale-devices-are-transforming-electronics>.
- 13) http://www.rambus.com/us/news/press_releases/2012/120206.html.
- 14) <http://eetimes.jp/ee/articles/1205/10/news089.html>.
- 15) <http://investors.micron.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=692563>.
- 16) http://www2.imec.be/be_en/press/imec-news/imeciedm12papers.html.
- 17) http://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/tohokuuniv-press20120615_01.pdf.
- 18) <http://thegadgetsitesite.com/2011/05/innovative-silicon-closing-doors-for-good/>.
- 19) <http://www.nanoctr.cn/>.
- 20) <http://www.kaist.edu/edu.html>.
- 21) http://www.skhyun.com/en/pr_room/news-data-view.jsp?search.seq=2072&search.gubun=0014.
- 22) <http://jp.reuters.com/article/technologyNews/idJPTYE83105F20120402>.
- 23) http://www.itri.org.tw/eng/econtent/research/research03_01.aspx?SItem=1.
- 24) W. C. Chien et. al. Digest, IEEE Symposium on VLSI Technology, P.153.
- 25) F. M. Lee et. al. Digest, IEEE Symposium on VLSI Technology, p.67.
- 26) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20120501/215675/?P=2>.

- 27) IEDM 2015 : 3.5, 3.6, 7.5, 7.6, 7.7, 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 26.1, 26.2, 26.3, 26.4, 26.8, 32.5, 32.6
- 28) VLSI symposium 2016 : Technology 2.4, 3.3, 3.4, 6.5, 8.3, 8.4, 8.5, 12.1, 12.2, 12.3, 12.4, 14.1, 14.2, 14.3, 14.4, 14.5, 18.2, 18.3, 18.4, Circuit 2.3
- 29) Intel & Micron の 3D Xpoint (PCM) :
<https://www.micron.com/about/emerging-technologies/3d-xpoint-technology>
- 30) 産総研 STAR シンポジウム講演資料 : <https://unit.aist.go.jp/eleman/info/impulse/>
- 31) ImPACT : <http://www.jst.go.jp/impact/sahashi/technical/index.html>

3.3.2 スピントロニクス

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

スピントロニクスの研究は、基礎から応用まで幅広く、両者が密接に関連しながら発展してきている。その一例が、巨大磁気抵抗（GMR、TMR）の機能を用いた磁気センサデバイスで、ハードディスク用の読み出し磁気ヘッドのセンサ素子として不動の地位を築いたほか、スピン注入磁化反転を利用した不揮発性磁気メモリ（STT-MRAM）の実用化がすすんでいる。スピン機能を半導体エレクトロニクスへ導入することをめざした半導体スピントロニクスの研究においては、新しい室温強磁性半導体の発見があったほか、不揮発性機能をもつ半導体アーキテクチャーの研究にも着実な進展が見られている。スピン流の散逸の機構は電流のそれと大きく異なることから、電流駆動のエレクトロニクスでは実現不可能だった超低消費電力の電子デバイス・量子情報伝送を実現できる可能性を秘めている。最近では、スピンが有する量子力学的な整流作用を利用した熱電変換が実証され、新原理のエネルギーデバイス技術として注目されている。

最近急浮上してきたのが、量子物質の一つ「トポロジカル絶縁体・トポロジカル物質群」である。これらは、既存のバンド絶縁体とは全く異なる電子構造を有する物質群であり、その特徴的な電子構造に由来する新規物性の発現が期待されている。たとえば、薄膜素子などの伝導特性においてトポロジカル絶縁体特有のスピン運動量ロッキングや量子異常ホール効果といった性質が観測されるようになっており、電気的・磁氣的性質などの基礎物性評価も進んでおり、将来的なデバイス利用に向けた基礎の確立が進められている。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

(a) スピントロニクスの基礎とデバイス応用

スピンと電気伝導の研究は 1960 年代の強磁性半導体の研究、1975 年のトンネル磁気抵抗素子の研究にさかのぼるが、スピントロニクスという概念が意識されるようになるのは 1988 年の強磁性金属多層膜における巨大磁気抵抗効果（GMR）の発見以降である。GMR 効果はほどなく、米国・日本を中心にハードディスクの読み出しセンサに应用され、記憶容量の爆発的な増大（年率 60%）をもたらした。その後の基礎研究により、強磁性金属の中では↑スピン電子と↓スピン電子とでは電気伝導度が異なること、強磁性金属中でスピン偏極された電子が非磁性金属の中に注入されたとき、スピンの向きをしばらく保ちスピン流を形成すること、電流径路と電圧測定系に別々の端子を用いる「非局所配置」のデバイスでは、非磁性金属細線に電流を伴わない純スピン流が流れることが実証された。その後、2 つの強磁性金属でトンネル障壁層を挟んだトンネル磁気抵抗（TMR）素子において大きな磁気抵抗効果が発見され、ハードディスクの記憶容量のさらなる増大に寄与した。

スピン流の概念が認識されるとほぼ同時にスピン流の注入によるスピン移行トルクによって磁化を反転できることが理論的に予言され、GMR 素子、TMR 素子においてスピン注入磁化反転が実証された。強磁性細線においては電流駆動により磁壁が移動することが発見された。スピン注入磁化反転を用いた不揮発性メモリ STT-MRAM は既に小規模なものが市場に出荷され、現在では DRAM 置き換えを狙う大規模なものや SRAM 置き換えを狙う高速なものも開発が進んでいる。スピン注入による磁化の振動であるスピントルク発振（STO）も見いだされ、マイクロ波領域の超小型発振器としての研究

開発が進んでいる。

磁気抵抗素子は、ハードディスク（HDD）の読み出し用磁気ヘッドの磁気センサ、車載のエンコーダー用のセンサなどに広く実用化されている。最近では、磁気抵抗素子を集積化して超高感度の心磁計、脳磁計として用いる研究も進められている。

記録素子における磁気セルの磁化をスピン移行トルクによって反転するには相当量のスピン流の注入を必要とする。これを減少させるために、スピン軌道相互作用の大きな金属層と強磁性層との積層構造薄膜を細線に加工しこれに通電すると、金属を流れるキャリアは散乱により界面を通して隣接した強磁性薄膜に注入されると同時に、スピンホール効果によって強磁性層にスピン流が注入される。さらに、そのキャリアが強磁性金属と非磁性金属の間を往復して角運動量を運ぶことにより、1個のキャリアが隣接する強磁性層に与える角運動量は非常に大きくなる。スピンホール効果による磁化反転が最近実験的に検証され、これを利用した不揮発性SRAMが重要な研究課題となっている。

もう一つのアプローチがラシュバ効果の利用である。強磁性金属と絶縁体との界面には仕事関数の違いから強い電界が発生しており、そこに電流を流すとスピン軌道相互作用によりラシュバ・トルクが発生するので、これを用いた磁化反転の制御も検討されている。

スピンホール効果やスピン軌道トルクは磁壁の運動にも影響を与える。磁壁の運動においては、ジャロシンスキー守谷相互作用（DMI）が重要な役割をはたす。これは強磁性体界面の対称性の破れとスピン軌道相互作用により生じる反対称交換相互作用である。最近、薄膜表面に生じる界面DMIによって、高速で動く特殊な磁壁が作られることが明らかになった。これを利用した応用を見出すことも重要な課題である。

強磁性薄膜界面に電界を印加するとスピン軌道相互作用により磁気異方性が変化する。このことを利用すると、電流によらず電圧で高速に磁化反転することが可能となるので、スピン流注入磁化反転に比べて大幅な省エネルギー化が期待できる。しかし、実用化が期待される10 nm程度の大きさの磁気記録セルにおいて、現状の電圧印加磁気異方性変化は小さく、求められる磁気セルの磁化反転には不十分であることが課題である。

最近、反強磁性スピントロニクスが注目される。反強磁性体は巨視的な磁化を示さないため、従来応用上ほとんど顧みられなかったが、磁気抵抗素子スピンバルブの登場で反強磁性体が応用されるようになった。スピンバルブは、フリー層とピン層の2種類の強磁性層が非磁性体を挟んでいるが、ピン層においては、反強磁性層を接触させ、強磁性層との界面に働く交換結合を用いて磁化の向きを一方向に固定している。さらに反強磁性体は漏れ磁場を出さないため超高密度磁気記録の材料として興味をもたれるだけでなく、磁気共鳴によるスピン波の周波数がTHzから遠赤外に至ることでも興味のもたれる物質である。今後の発展が期待される。

スピントロニクスは、基礎から応用研究まで、多くの先駆的研究が日本から生まれてきた分野である。我が国においては、科研費特定領域研究「スピン流」（2007-2010）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」（2007-2013）において、スピン流物理の基盤が構築された。その後、科学研究費新学術領域「スピン変換科学」（2013-）へと引き継がれた。トポロジカル量子科学の基礎研究については、科学研究費新学術領域「対称性の破れた凝縮系におけるトポロ

ジカル量子現象」(2010-2014)、および、FIRST「強相関量子科学」(2010-2013)、最先端・次世代研究開発支援プログラム「トポロジカル絶縁体による革新的デバイスの創出」代表：安藤陽一教授(2010-2013)が行われた。最近では、科学研究費新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」(2015-)が進められている。応用面では、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」(2010-2013)、ImPACT「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」(2014-2018)など大型の研究プロジェクトが行われている。

海外のスピントロニクスデバイスの動向としては、ベルギー IMEC STT-MRAM プロジェクトにおいて IMEC が中心となった産官学連携の STT-MRAM 基盤技術開発プログラムが進んでおり、IMEC の 300mm ファブを拠点に、民間企業 (Qualcomm、Global Foundries、キヤノンアネルバ、東京エレクトロン)、ベルギーおよびフランスの大学などが参画している。また、シンガポール A*STAR と Global Foundries の連携が注目される。これは、シンガポールの国立研究機関 A*STAR の Institute of Microelectronics (IME) 内に半導体ファウンドリ大手 Global Foundries との共同ラボを設立し、STT-MRAM の共同開発を行う計画で、現在唯一の MRAM メーカーである米 Everspin Technologies と Global Foundries の共同研究開発が連携し、300mm ウェーハ、28 nm および 40 nm プロセスを用いた STT-MRAM 技術開発が行われる模様である。フランスでは、自然現象を用いた計算を議論するネットワーク型研究プロジェクト BioComp Network (2015-) が、2020 年に EU において大型のプロジェクトを立てることを目指して活動している。

(b) 半導体スピントロニクス

エレクトロニクスや情報処理デバイスの中核材料である半導体と整合性のよいスピン機能材料の開発が特に重要であると考えられ、これまでに多くの研究がなされている。

半導体で磁性をもつ材料の研究は、1960 年代の第 1 世代の磁性半導体 (EuS, CdCr_2Se_4 など) に始まり、1980 年代以降には、第 2 世代の磁性半導体として II-VI 族の化合物半導体に遷移金属元素を添加した希薄磁性半導体 (DMS) とも呼ばれる混晶半導体が研究された。この材料の磁性は常磁性またはスピングラスであるが、室温で大きなファラデー効果を示し、1990 年代には CdMnTe や CdHgMnTe のバルク結晶を用いた 0.98 μm 帯用の光アイソレータが実用化された。その後、1990 年代半ば以降、非常に活発に研究が行われるようになったのは III-V 族をベースとした第 3 世代の磁性半導体である。代表的な物質として (In, Mn)As、(Ga, Mn)As、(In, Ga, Mn)As があり、低温 MBE 成長によって数～20% 程度の Mn 濃度を含む混晶が作製され、強い p 型の試料については低温で強磁性を示すことが明らかになった。その後の研究で T_c は 130K まで上昇したが室温に届いていない。

2000 年以降、ワイドギャップ半導体および酸化物半導体などに遷移金属を数%以上添加した物質において室温を越える高い T_c を示す物質が相次いで報告されたが、ナノスケールでの強磁性金属の偏析の可能性もあり、真に強磁性半導体であるかが議論されている。

2002 年以降、シリコン技術と整合性がよいと期待される IV 族ベースの磁性半導体として、Ge 系遷移金属化合物半導体 (GeMn , GeCoMn , GeFe) が研究され強磁性が報告されている。 GeFe では、ダイヤモンド構造を保った混晶の強磁性半導体が形成され、

最近では作製条件の最適化により GeFe の T_c が 210K に達することなどが示された。2000 年以降に作製されたこれらの新物質における強磁性のメカニズムについては、まだ十分に理解されていない。

2012 年以降になって、Mn に代えて Fe を添加した狭ギャップ強磁性半導体の研究が進展した。これまで困難とされた n 型の III-V 族強磁性半導体である (In, Fe)As が実現、さらに超薄膜ヘテロ構造・量子井戸構造において明瞭な量子サイズ効果が観測された。また、電気的手法により磁性を制御できることが示され、低い消費電力での高速の動作が期待されている。最近、p 型 (Ga, Fe)Sb において $T_c=340K$ が実現した。

強磁性金属と半導体のヘテロ構造は室温で動作するので半導体エレクトロニクスとして重要である。1990 年代からは室温より高い T_c をもつ Mn 化合物の強磁性金属の薄膜を半導体基板上に堆積することで強磁性金属/半導体ヘテロ構造が形成され、強磁性結晶の方位や磁気異方性を制御して、異常ホール効果や磁気抵抗効果等を利用した不揮発性メモリへの応用可能性が示されたほか、スピントランジスタ構造としての検討が行われている。

磁性半導体 (Ga, Mn)As を高温熱処理することにより、偏析で生じたナノスケールの NiAs 型 MnAs 微粒子が半導体 (GaAs) 中に埋め込まれたグラニュー構造が形成される。これは超常磁性を示すほか、室温で大きな磁気光学効果、磁気抵抗効果、強磁性トンネル接合での TMR が観測されるなど、興味深いスピン関連現象が報告されている。

エレクトロニクス・デバイスに、スピン自由度を付加することで、不揮発性、書き換え可能性、非相反性、量子性などの機能を付加できる。強磁性トンネル接合を用いた MRAM は高速大容量の不揮発性メモリとして、低消費電力、書き換え可能性、そして繰り返し耐性が高い。スピン MOSFET と再構成可能な論理回路の提案があり、少ない素子数で不揮発性ロジックが実現できるとされる。特徴的な機能が光の非相反性である。この性質を利用して、光集積回路に不可欠である半導体レーザーなどと集積化可能な導波路型光アイソレータが試作されている。スピン注入による円偏光の面発光レーザー発振、円偏光を検出するスピンプォトダイオードなどの提案と試作もなされている。スピンの量子性を利用するのが量子情報処理技術である。1 個の電子スピンは理想的な二準位系をつくる。電子スピンのみならず、非常にコヒーレンス時間が長い核スピンの利用も考えられており、電子スピンと核スピンの相互作用、フォトンと電子スピンとの相互作用も視野に入れた研究が展開されている。

(c) スピン流

電子は電荷とスピンを持っていることから、電流のスピン版ともいえるべきスピン流（電子スピン角運動量の流れ）を考えることができる。しかし、スピン流は物質中ではごく短い距離（スピン拡散長）で減衰してしまうため、最近までスピン流による物理現象は知られていなかった。スピン流は基本的な対称性が電流と異なり、散逸の機構が電流と大きく異なることから、電流駆動のエレクトロニクスでは実現不可能だった超低消費電力の電子デバイス・量子情報伝送を実現できる可能性を秘めている。最近ではスピンが有する量子力学的な整流作用を利用した熱電変換なども実証されており、新原理のエネルギーデバイス技術としての研究開発も始まっている。

スピン流の生成原理として、磁化ダイナミクスからスピン流が誘起されるスピンプン

ピングと呼ばれる現象が見出された。また、非一様な磁化運動からスピン流が作られることも明らかになり、これはファラデーの電磁誘導のスピン版に相当していることが日本の研究グループによって示された。現在では、スピン流を物質中の電磁気学に組み込む研究も行われている。磁壁や磁気ボルテックスがスピン偏極電流で動く現象も観測されており、磁壁を（磁場を用いずに）電気的に高速に動かせるため、情報記憶素子への応用が期待されている。

電気だけでなく、熱、光、音などからスピン流が作られる現象も続々と発見されている。代表的な例がスピンゼーベック効果であり、磁性体／金属界面に温度勾配を加えるとスピン流が生成されることが2008年に我が国の研究者によって見出された。スピンゼーベック効果を利用した新しい熱電変換技術に関する応用研究も始まっている。スピンゼーベック効果の原理を応用することで、熱のみならず音や光など自然界の様々な揺らぎを整流できることが実証されてきている。

スピン流は、力学的な運動によっても生成されることが、スピン流体発電の実証によって示された。これは古典的な機械運動から量子力学的なスピン流が生成されることを示しており、スピン流が運ぶ角運動量が力学的な回転と相互に変換されることを意味する。この発見によって、動力を生む全く新しいメカニズムが示唆され、スピン流が電気と運動を相互に変換する物質機能を担うことが示されつつある。スピンによって機械運動を制御したり検出したりする試みが、MEMSとスピントロニクス融合分野として現れ始めていることは注目に値する。

以上のように、スピン流の概念を足掛かりに新しい現象が次々に発見された。スピンホール効果に関する考察から、トポロジカル絶縁体やラッシュバ相互作用の強い系におけるトポロジカル表面状態の利用などの新しい展開も生まれている。更には従来から知られていたスピントロニクス現象の多くもスピン流の概念を用いて見通し良く整理されることがわかり、スピン流は物性物理において重要な概念となっている。

JST 戦略的創造研究推進事業 ERATO「齊藤スピン磁気整流」領域（2014-2020）がスタートし、本格的なスピン流の研究が開始された。JST 研究成果展開事業 S-イノベにおいて「スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた技術開発」（2011-）が行われているが実際にはスピン流に直接関連したテーマは採択されていない。海外のスピン流の基礎研究に関しては、米国ではアメリカ国立科学財団（NSF）、欧州ではドイツ研究振興協会（DFG）、英国工学・物理科学研究会（EPSRC）、フランス国立研究機構（ANR）などを中心にプロジェクトが進行している。欧州や米国では、スピン流と熱の融合研究、特にスピンゼーベック効果に関する研究プロジェクトも立ち上がっている。2010年には、ドイツで大型プロジェクト「SpinCaT」が立ち上がり、現在ドイツやオランダのスピントロニクス研究者のかなりの割合がスピンゼーベック効果の研究に参入している。米国でもこの分野の大きな予算が組まれ始めている。

(d) トポロジカル絶縁体・トポロジカル物質

研究開発領域は狭義のトポロジカル絶縁体からトポロジカル物質群へと拡張されるとともに、トポロジカルな物性研究への広がりを見せている。物質の性質を知る上で電子構造を理解することが重要であり、トポロジカル物質群の研究では理論計算と電子構造の実験研究が重要な役割を果たしている。

2005年の理論予測から二次元トポロジカル絶縁体の概念が始まった。特に、試料端

に形成される一次元エッジチャネルが上向きと下向きの二つのスピン偏極を示し、それぞれのエッジチャネルの運動方向に一意的対応関係を持つことが特徴となっており、このチャネルが量子スピンホール効果の起源となっている。半導体超格子や二次元層状物質のバンド構造についての理論計算が進められるとともに、量子スピンホール効果の実験検証からエッジチャネルの新たな活用方法の検討も急速に進んでいる。

HgTe/CdHgTe 超格子、InAs/GaSb 超格子においては量子スピンホール効果とともに、エッジチャネルが存在することが理論的に予測され実験的に検証された。これらの超格子では、量子井戸の厚さを調整することにより、伝導帯の量子準位と価電子帯の量子準位のエネルギー位置を逆転させることができる。このバンド反転を実現した上で、フェルミ準位をその 2 つのバンドの間に位置できると、二次元トポロジカル絶縁体としての性質を示す。電気伝導特性でエッジの伝導を検出することが研究の主流となっており、非局所測定を行うことでエッジチャネルの存在が確かめられている。量子スピンホール効果の活用先が検討されている。

二次元層状物質群では、様々な物質が二次元トポロジカル絶縁体の候補として理論的に予測されているが、試料合成が困難な状況が続いている。量子スピンホール効果を観測するためには絶縁性基板上への試料製作が求められる。

三次元トポロジカル絶縁体では、固体内の絶縁体的なバルク状態と固体表面近傍の金属的な二次元表面状態を持つことが特徴となっている。この表面状態の特異な性質を活用するため、ディラック電子系、スピン、磁性、光物性の観点から研究が進められている。2009 年のテトラジマイト構造群 (Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 など) のバンド計算から物質合成研究が活性化され、トポロジカル物質群とも呼ぶべき物質探索へと拡張されている。三次元トポロジカル絶縁体の特徴は、絶縁体的なバルク状態と金属的な表面状態を持つことである。三次元トポロジカル絶縁体の表面状態はディラック電子系としてグラフェンとの対比で議論される。グラフェンとの違いは、電子スピンの方向と運動量方向が直交する関係にあり、これをスピン・運動量ロッキングと呼ぶ。この性質は高効率スピン流生成源として活用できることが検証され、スピン流関連素子への実証研究が急速に進んでいる。

三次元トポロジカル絶縁体は、伝導帯と価電子帯のバンド反転が起きるために大きなスピン軌道相互作用を有することが要請され、原子番号の大きい Bi, Sb, Se や Te を構成元素としている。ARPES (角度分解光電子分光法) や STS (走査型トンネル分光法) によって、表面状態のバンドが線形分散を持つことが実験的に観測され、金属的な表面状態をもつことが実証されている。 $(\text{Bi,Sb})_2(\text{Se,Te})_3$ の混晶、 $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ が注目され、バルク高絶縁性が確認された。最近では、電界効果型素子においてフェルミ準位の制御による伝導特性評価が可能となっており、表面状態の線形分散に由来する伝導特性や量子ホール効果が報告されている。

また、結晶格子の対称性から生じるトポロジカル結晶絶縁体 (TCI) が存在する。 $(\text{Pb, Sn})\text{Se}$ や $(\text{Pb, Sn})\text{Te}$ が TCI であることが実験的に検証されている。電界印加や圧力印加によるトポロジカル相転移の制御可能性から、新しいデバイスとして期待される。

トポロジカル絶縁体の概念は、最近では、ワイル半金属という物質群へと拡張されている。グラフェンと同様に線形分散型の電子構造をもち、質量を持たないディラック電子系と呼ばれる電子状態が存在する。ワイル半金属の分野では電子相関の強さを制御さ

れた Ir の酸化物やディラック半金属の分野では Cd_3As_2 や Na_3Bi などの新しい物質がこれらに分類されることが明らかになっており、さらなる物質探索が急速に進んでいる。

上記のトポロジカル物質群に表れる物性ととともに、トポロジカルな超伝導やトポロジカルな光学特性、トポロジで保護された磁気構造に関する研究が展開されている。

トポロジカル超伝導体として、 Sr_2RuO_4 や Cu 添加された Bi_2Se_3 、In 添加された SnTe などの研究が進められている。現時点ではこれらの候補物質の超伝導状態の基礎物性を詳細に評価して s 波 BCS 超伝導体と異なる波動関数の対称性を持つことを確認する研究が進められている。トポロジカル超伝導体の新たな研究対象は、マヨラナ粒子（粒子と反粒子が区別できない状態）の観測と制御である。2012 年に、通常の s 波 BCS 超伝導体と半導体ナノワイヤの接合試料端を利用したマヨラナ粒子状態の観測が報告されて以降、これらの実験試料におけるマヨラナ粒子検証の研究が進行している。マヨラナ粒子は、三次元トポロジカル絶縁体状態の HgTe と s 波超伝導体との接合においても観測されており、物質系の広がりや詳細な議論へと急速に発展している。今後、超伝導におけるマヨラナ粒子の検証を進め、メゾスコピック素子の制御へと進むことが期待される。生成されたマヨラナ粒子を外場などで操作、もしくは生成消滅の制御などへと発展させることで、将来的な量子コンピューティングへの基礎技術となることが期待される。

トポロジカルな光学特性については、2005 年に Haldane によって理論予測がなされ、2009 年にはマサチューセッツ工科大のグループから一方向の光伝搬を実現するフォトリック結晶が報告された。フォトリック結晶の周期を設計することで、任意の波長の光に対してトポロジカルな性質を引き出す試みが成功している。光の伝搬方向を制御する技術として、トポロジとの観点から新しい光学素子応用が期待される。フォトリック結晶は日本での実験研究があまり行われていないため、共同研究などを通じた研究者の増加が期待される。特に、マグノンやフォノンなど様々な波長領域での研究が進行するものと思われるため、複合領域での発展を見据えた連携研究が増えることが望ましい。

磁気構造では、トポロジによって保護された磁気スキルミオンの研究が進められている。B20 型構造の FeGe などでは磁気スキルミオンが格子をつくり、一つのスキルミオン半径は数十 nm 程度にまで微小になることが報告されている。このスキルミオンは電界もしくは電流で駆動、生成や消滅の制御でき、今後の低消費電力・高密度メモリへの展開が期待される。スキルミオンは日本においても研究展開されており、電流や電圧での駆動技術、室温安定化や生成・消滅の制御技術が重要になると考えられる。外部磁場を必要としない状況で磁気スキルミオンを安定化させることも実素子への適用という観点では重要と考えられる。

トポロジカル量子科学に関しては、米国 Moore foundation Emergent Phenomena in Quantum Systems (EPiQS) プロジェクトが注目される。これは、Moore foundation が支援するプロジェクトで、米国内の著名な固体物理学関連研究者約 30 名で構成される。5 年間で 90millionUS\$ の支援が決まっている。また、若手研究者約 10 名を中心とする人材育成プログラムも同時に進行している。カナダでは CIFAR-QM プロジェクトでこの分野を支援している。中国では、SCCP プロジェクトで、理論計算と実験研究の両面でスピーディに展開されている。このプログラムの目的は、物性物理と量子情報の境界領域に研究フロンティアを形成することである。欧州の EPS-CMD では、ドイ

ツやスペインなどの連携において、トポロジカル絶縁体関連の共同研究体制が整いつつある。

(3) 注目動向

□電圧駆動 MRAM

現在、実用化が進んでいる 2 端子のトンネル磁気抵抗素子に通電して書き込みを行う 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が、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。これに対して、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みができるため、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、特に注目を集めるようになった。実験では 500psec 程度のパルスが使われ歳差運動によるダイナミックな書き込みが行われた。パルスのタイミングにより双方向書き込みをおこなうため書き込みエラーが現時点では 10^{-3} 程度あり、これをどこまで小さくできるかが課題となる。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など課題が多い。

□スピントルク MRAM

スピンホール効果あるいはラッシュバトルクを用いると STT-MRAM に比べて高効率の MRAM が作れるとの期待から研究が進んでいる。この素子は原理的に 3 端子なので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。その一方で、素子サイズが大きくなるという問題もある。今後の進展が期待される。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が進むものと期待される。

□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。スピントルク発振器を微小な磁場センサやレーダーに応用しようという研究が進んでいる。最近、位相ロックループ（PLL）制御に成功したことは大きな進展といえる。

□狭ギャップ強磁性半導体の新しい展開 — n 型と高い T_C —

2012 年、東大グループにより、Fe を添加した狭ギャップ半導体 InAs において、n 型で電子誘起の強磁性を発現すること、(In, Fe) As を含む超薄膜ヘテロ構造・量子井戸構造において明瞭な量子サイズ効果が観測されること、量子井戸構造中の波動関数を電気的手法により操作することによって磁性を制御できることも示された。また、p 型においても新しい強磁性半導体 (Ga, Fe) Sb が作製され、構造評価、磁気特性、磁気光学効果、および磁気輸送測定から真性の強磁性半導体であると報告された。(Ga, Fe) Sb のキュリー温度 T_C は Fe の濃度の増大とともに単調に増大し、Fe 濃度が 20% で 230 K、23% で 300 K、25% で 340 K という III-V 族強磁性半導体では最も高い T_C が得られた。これらの III-V 族狭ギャップ強磁性半導体における新しい実験結果は、従来多くの研究者に使われてきた平均場 Zener モデルによる強磁性の発現機構と T_C の理論があてはまらないことを意味している。

□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 gm 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、素子数の少なさと不揮発性により低消費電力動作が期待できる。まだ理想的な出力特性を得るには至っていないが、これまでいくつか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であろう。

□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 I_D 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 の動作とかなり大きな磁気抵抗比 60% を示した。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。

□絶縁体のスピン波スピン流

2010 年に、スピン流が金属や半導体のみならず、絶縁体においても存在できることが明らかになった。これは、スピン波やマグノンと呼ばれる準粒子にスピン角運動量を輸送させることによって実現され、絶縁体中のスピン波スピン流を介した電気信号伝送や、絶縁体におけるスピンゼーベック効果およびこれを用いた熱電変換などの新機能が実証されている。絶縁体中のスピン流には基本的にジュール損失も存在しない。これらは、電流に基づくエレクトロニクスでは実現できない機能であり、今後の展開が期待される。

□マグノニクスと脳型コンピューティング

また、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、磁性体の非線形応答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。

□量子異常ホール効果

一次元のエッジチャネルは非散逸な伝導チャネルとして活用できることが期待される。従来の量子ホール効果では、エッジ状態を形成させるため強い磁場を印加する必要がある。そのため、標準抵抗としての応用以外には、電子素子などへの展開を検討することが困難であった。

□磁性トポロジカル絶縁体

三次元トポロジカル絶縁体に磁性不純物を添加して磁性を付与することにより、表面の線形分散型電子構造にギャップが形成され、異常ホール効果が量子化し、試料端に散逸のない一次元のエッジチャネルが形成される。このエッジチャネルは、半導体二次元電子ガスに強い磁場を印加した状態で観測される量子ホール効果由来のエッジチャネルと同等である。実験では、Cr や V を添加することで強磁性が発現することも確認されており、これらの薄膜素子でフェルミ準位制御が実現され量子異常ホール効果の観測が可能となっている。現在のところ、低温での基礎物性研究が進められている段階であるが、強磁性転移温度の上昇やさらなる精緻な伝導性制御が実現されることで、低消費電力素子への基礎技術に発展する可能性がある。

□三次元トポロジカル絶縁体による高効率スピン流生成

三次元トポロジカル絶縁体の表面状態が持つ、スピン運動量ロッキングを活用したスピン流生成の研究が進められている。従来、物質中のスピンホール効果によるスピン流生成が知られているが、スピン運動量ロッキングではスピン偏極表面電流を通した高効率スピン流生成源としてのデバイス活用が期待される。実際に、スピントルク強磁性共鳴などの実験手法で高効率スピン流生成が観測されている。

□マヨラナ粒子の検証実験

半導体ナノワイヤや三次元トポロジカル絶縁体を用いた実験検証が進められている。半導体ナノワイヤでは 2012 年の観測報告以来、様々な手法でマヨラナ粒子の確証を得るための研究が進められている。三次元トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合素子では、HgTe 薄膜を用いた素子での研究が進められている。しかしながら、量子コンピューティングを目指すためにはまだ発展途上の状況であり、マヨラナ粒子としての確証をより強固にするための基礎特性の理解を進めるとともに、制御に向けた技術開発が待たれる。

□室温でも安定なスキルミオン

実空間でトポロジーに保護された磁気構造としてスキルミオン生成と制御に関する研究が盛んに行われている。B20 型構造におけるスキルミオン格子の直接観察以来、スキルミオンのメモリ活用に向けた研究が進められている。さらに、金属積層構造においても界面のジャロシンスキー守谷相互作用を活用した磁気スキルミオン動作のための研究も展開されており、物質群の拡張とともにデバイス展開が期待される状況にある。

(4) 科学技術的課題

(a) スピントロニクス基礎とデバイス応用

基礎の部分では、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おり国内では物理学会を中心に活発に議論されている。一方、デバイス応用については、これまで磁気ヘッドと MRAM 中心であったが、近年、高周波・センサ・脳型計算などと広がりを見せ日本磁気学会・応用物理学会などで議論されている。前者はゲージ理論の影響を強く受けており基礎からの理解がますます重要となっている。後者では、確率微分方程式や非線形ダイナミクスなどの数理物理の知識が重要となってきた。

(b) 半導体スピントロニクス

磁性半導体をはじめとする材料開発については、高い T_C を得るための指針を確立すること、そのための実験的方法として結晶成長機構の解明、欠陥の制御と低減、キャリ

ア濃度制御方法の開発が必要である。また、バンド構造と強磁性発現機構の理解、そうした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。

半導体へのスピン注入、輸送、検出など半導体中のスピン物性と機能に関わる物理的機構についてはまだ議論が多く、完全に解明されていない。効率の良い半導体へのスピン注入、輸送、検出技術の確立が必要である。また、スピン MOSFET などスピndeバイスの研究については、着実に進歩しているものの、室温動作、満足すべきトランジスタ性能、平行磁化と反平行磁化の違いによる十分大きな磁気抵抗比（磁気電流比）など、すべてを満足するデバイスを作製することは、今後の重要な課題である。

(c) スピン流

エレクトロニクス単なる焼き直しではなく、電流では不可能な機能の実現が最も重要である。スピン流が有する新機能を利用することで、飛躍的な消費電力削減や高効率なエネルギー変換、超高速演算などを実現できる可能性があり、原理実証のみならず、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やプロジェクトが必要であろう。

(d) トポロジカル量子科学

二次元トポロジカル絶縁体においては、量子スピンホール効果の応用展開がより現実的な観点からの出口イメージとして見えてくると大変興味深い。日本では、元素の制約から HgTe 系についてはほとんど研究者がいないが、InAs 系については半導体積層技術が活用できるため、特別な用途でも応用研究へと展開していける可能性がある。GaAs 系などの経験豊富な研究者がこれらの研究に参入することを後押しするような施策があれば、日本でも活発になっていくことが期待される。

三次元トポロジカル絶縁体においては、バルク物質探索および分光技術による概念創出研究と薄膜素子による物性観測研究が実施されているが、日本発の研究論文数が諸外国に追いついていない状況にある。セレン化物やテルル化物という点が高い参入障壁になっている可能性があるが、熱電研究や赤外線検出器などの分野では企業でも扱っている元素なので世界の開発速度と同水準で日本発の技術を見出すべく、施策を検討する必要がある。スピン—運動量ロッキングを活用したスピントロニクス分野への応用などは、出口をイメージしやすく、原理検証とともに応用の際のメリットを見定めるような検討が有用である。

トポロジカル絶縁体のギャップは、スピン軌道相互作用によるバンドの反転により形成されるものであるため、スピン軌道相互作用によって制限されている。室温での素子活用のためには、バルク絶縁性を確保しうる大きなバンドギャップを持つ物質の探索が重要である。一方、表面準位は室温においても安定に存在するため、バルクとの並列伝導であっても、スピン運動量ロッキングの性質を活用することができる。したがって、スピントロニクス分野における高効率スピン流生成源としての性能を比較し、デバイスとしての活用先を探索することが期待される。

(5) 政策的課題

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するわけではない。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をいかに結集し学際的な土壌をさらに豊かにしていくかが重要な課題となっている。このためには若手の学際的な教育が特に重要と考えられ、大学院後期課程から、博士研究員程度の学生・研究者のためのスクールの開催などが望まれる。周辺のトポロジカル物質群の研究は、物質探索と分光法による実験検証研究が主体となって展開していくと考えられるが、日本では計算科学による物質予測と合成、評価の連携が海外の共同研究による速度に敵っていない。異分野間連携を加速する施策を立てることで、物質探索の点から優位に立つべく、方向性を検討する必要がある。

日本のスピントロニクス分野には厚い技術・人材蓄積があり、若手研究者が世界的に注目を集める研究成果を挙げた例も多い。一方で、スピン流に関する研究の大半は物性物理分野の研究者によって行われているのが現状であり、萌芽的段階にあるスピン流の応用研究については、産学官での十分な研究・人材交流が行われていない。スピン流が有する特徴を生かしたデバイスアーキテクチャを構築するためには、システム（回路）・デバイスの専門家との協調や産学連携の強化が不可欠である。

トポロジカル物性に関しては、超伝導分野においてマヨラナ粒子の実験的検証の推進が望まれる。この分野は新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学」に多くの研究者が参加しており、そこでの連携研究の展開が期待されている。量子コンピューティングを目指す上では、これまでの技術との関わりも踏まえ、相互発展を促すような施策が期待される。

磁気スキルミオンなどの実空間におけるトポロジカル物性は、出口イメージも見えつつあり、実際のデバイス化に向けた実験検証の進展が待たれる。磁性金属薄膜を用いたメモリ分野は、日本が強い分野なので、スキルミオン活用を見据えた可能性を検証するなどの強化策が期待される。

フォトニック結晶を設計して、光学特性のトポロジーを制御する技術が海外では盛んに研究されている。しかしながら、日本にはフォトニック結晶作製の高い技術がありながら、当該分野への参入はほとんど見られない。基礎と応用の研究者間の情報交換や連携を促すような施策が求められる。フォトニック結晶の周期性を制御することで様々な波長でのトポロジー制御が可能になっていく可能性も示唆されていることから、可視光分野以外でも、マグノンやフォノンなどの分散制御に向けて拡張すれば応用先が広がると考えられる。

(6) キーワード

スピン軌道相互作用、スピン流、スピン波、スピンホール効果、スピンゼーベック効果、不揮発性メモリ、スピンロジック、スピン移行トルク、電圧トルク、トポロジカル絶縁体、スキルミオン、マヨラナ粒子、ディラック半金属、ワイル半金属

(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	◎	→	スピントロニクス基礎とデバイス応用：新学術 [16]、斎藤 ERATO、ImPACT の一部などで良質な基礎研究が継続的に進められている。 半導体スピントロニクス：磁性金属・絶縁体系における光・マイクロ波関連現象の研究は活発化していくと思われる。 スピン流：科研費特定領域研究「スピン流」(2007-2010)、JST 研究成果展開事業 (S-Iノベ) の「スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた技術開発」(2011-)、トポロジカル量子科学：新学術領域が 2010 年以降、分野を牽引している。特に、トポロジカル超伝導体に関する理論と実験に強み。スキルミオンについても国内に先駆的な研究推進グループが存在。
	応用研究・開発	○	↘	スピントロニクス基礎とデバイス応用：ImPACT などの応用研究が行われているが、企業の寄与が相対的に下がっている。 半導体スピントロニクス：円偏光発光・受光素子、光・マイクロ波アシスト磁気記録ならびにマグノニクス（既存フェライトエレクトロニクスのナノ版）への展開 スピン流：電機・材料メーカーを中心に、スピン流効果を研究している企業は多い。国からの産学連携に向けた支援は今のところ得られていない。 トポロジカル量子科学：エッジ伝導の制御と応用への可能性を検討。スピン運動量ロッキングを活用した高効率スピン流生成とその活用方法の検討
米国	基礎研究	◎	↑	スピントロニクス基礎とデバイス応用：スピンホール効果 [6] などにおいて良質な研究成果を出し続けている。 半導体スピントロニクス：半導体系研究者がトポロジカル絶縁体研究に移行した。希土類添加の半導体発光素子が面白くなる可能性はある。 スピン流：NSF、DOE、DOE 傘下の NERSC、ONR からの手厚い支援のもと、純スピン流および巨大スピン熱流変換現象の基礎研究が盛んに行われている。 トポロジカル量子科学：バルク物質群の探索がプリンストン大学を中心に盛ん。化合物半導体薄膜の研究者が多数トポロジカル絶縁体薄膜研究にシフトしており、強い分野になりつつある。その薄膜を用いた共同研究も盛ん。スピン運動量ロッキングの活用についても積極的。
	応用研究・開発	○	→	スピントロニクス基礎とデバイス応用：キャッチアップが早く、電圧トルクについても多くの応用研究が始まっている。 半導体スピントロニクス：シリコンスピンエレクトロニクスもやや下火 スピン流：現時点でスピン流の応用研究・開発に関する情報は無い。
欧州	基礎研究	◎	→	スピントロニクス基礎とデバイス応用：スピン軌道トルクの解明などで大きな寄与をしている。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。 スピン流：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。SpinCat は、2008 年に日本で発見されたスピンゼーベック効果に逸早く注目したプロジェクトであり、現在も多くの基礎研究成果を挙げている。 トポロジカル量子科学：Molenkamp グループの薄膜試料を用いたマヨラナ粒子検出やエッジ伝導制御の研究が進行。Fert グループを中心に、金属積層薄膜に生成されるスキルミオンの電流駆動など、制御技術開発が進められている。
	応用研究・開発	×	→	スピントロニクス基礎とデバイス応用：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。 半導体スピントロニクス：既存フェライトエレクトロニクスの研究者が、マグノニクスへの展開を模索中。要監視対象と思われる。 スピン流：現時点でスピン流の応用研究・開発に関する情報は無い。
中国	基礎研究	○	↑	スピントロニクス基礎とデバイス応用：量子化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た。 半導体スピントロニクス：個別研究レベルでは酸化物磁性絶縁体薄膜の研究に着目したい。 スピン流：スピン流に関する研究例はまだ少なく、グラフェン中のスピン流に関する理論研究などが見受けられる程度である。大きな大学や国立研究機関には、かなりの最新機器が揃い米国・欧州帰りの研究者が活発に研究を行っており、潜在能力は高い。 トポロジカル量子科学：理論によるバンド計算と物質予測に加え、実験研究との共同研究がスピーディに展開されている。

中国	応用研究・開発	△	↑	スピントロニクス基礎とデバイス応用：トンネル磁気抵抗素子などが自国で作製できるようになってきた [19]。 半導体スピントロニクス： スピン流：現時点でスピン流の応用研究・開発に関する情報は無い。しかし、ひとたび宇宙・軍事用途に関わる重要なデバイスが提案されれば、国家的事業として重厚な支援のもと一気にアクティビティが高まる可能性がある。
韓国	基礎研究	○	↑	スピントロニクス基礎とデバイス応用：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た [20]。 半導体スピントロニクス：個別研究レベルでは半導体スピントロニクスで秀逸な研究が存在する。 スピン流：現時点でスピン流に関する研究例はまだ少なく、プレーヤーは KIST や、大学の一部に限られている。しかし、大きな大学や国立研究機関には、かなりの最新機器が揃い米国・欧州帰りの研究者が活発に研究しているため、潜在能力は高い。
	応用研究・開発	○	↑	スピントロニクス基礎とデバイス応用：Samsung やハイニクスが MRAM 研究に力を入れている [21]。 スピン流：現時点でスピン流の応用研究・開発に関する情報は無い。しかし、財閥系企業などからの潤沢な資金をもとに応用研究・開発を活発に行う素地はある。

(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レベル

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）のレベル

(註 2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 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

スピントロニクス基礎とデバイス応用

- 1) https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/
- 2) <https://www.everspin.com/64mb-spin-torque-mram-ddr3-dram-compatible>
- 3) https://www.toshiba.co.jp/rdc/detail/1602_02.htm
<http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/event/1006727.html>
- 4) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2015/pr20151214/pr20151214.html
- 5) <http://www.apph.tohoku.ac.jp/spin/innova/>
- 6) L. Liu, C.-F. Pai, Y. Li, H. W. Tseng, D. C. Ralph, R. A. Buhrman Science, .336, .555 (2012).
- 7) A. Thiaville, S. Rohart, É. Jué, V. Cros, A. Fert, Europhys. Lett. 100, 57002 (2012).
- 8) 鈴木義茂・野崎隆行・塩田陽一・縄岡孝平・三輪真嗣, 固体物理 50, 643 (2015).
- 9) http://www.aist.go.jp/aist_j/highlite/2015/vol8/index.html
- 10) <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20160322/>
- 11) <http://www.anandtech.com/show/9866/hard-disk-drives-with-hamr-technology-set-to-arrive-in-2018>
- 12) http://www.toshiba.co.jp/rdc/detail/1507_01.htm
- 13) http://www.konicaminolta.jp/about/release/2015/0723_02_01.html
- 14) <http://www.fujidenolo.co.jp/technology/mi-sensor-technology.html>
- 15) J. Grollier and M. Stiles, Proc. IEEE, 104, 2024 (2016).
- 16) <http://www.spinconversion.jp/pub.html>

半導体スピントロニクス

- 1) J. K. Furdyna, J. Appl. Phys. **64**, R29 (1988).
- 2) K. Onodera, T. Matsumoto, M. Kimura, Electronics Lett. **30**, 1954 (1994)
- 3) H. Munekata, H. Ohno, S. von Molnar, A. Segmuller, L. L. Chang L. Esaki, Phys. Rev. Lett. **63**, 1849 (1989)
- 4) H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, and H. Iye, Appl. Phys. Lett. **69**, 363 (1996);
- 5) S. Ohya, Y. Higo, H. Shimizu, J.M. Sun, M. Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys. **41**, L24 (2002)
- 6) S. Ohya, H. Kobayashi, M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **83**, 2175 (2003)
- 7) Y. D. Park, A.T. Hanbicki, S.C. Erwin, C.S. Hellberg, J.M. Sullivan, J.E. Mattson, T.F. Ambrose, A. Wilson, G. Spanos, and B.T. Jonker, Science **295**, 651 (2002).
- 8) F. Tsui, L. He, L. Ma, A. Tkachuk, Y. S. Chu, K. Nakajima, T. Chikyow, Phys. Rev. Lett. **91**, 177203 (2003).
- 9) Y. Shuto, M. Tanaka, S. Sugahara, J. Appl. Phys. **99**, 08D516 (2006).
- 10) Y. K. Wakabayashi, Y. Ban, S. Ohya, M. Tanaka, J. Appl. Phys. **116**, 173906 (2014)
- 11) P. N. Hai, L. D. Anh, S. Mohan, T. Tamegai, M. Kodzuka, T. Ohkubo, K. Hono, M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **101**, 182403 (2012)
- 12) L. D. Anh, P. N. Hai, M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **104**, 042404 (2014).
- 13) N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **108**, 192401 (2016).
- 14) M. Tanaka, J.P. Harbison, T. Sands, T. L. Cheeks, V. G. Keramidas, and G. M. Rothberg, J. Vac. Sci & Technol. **B12**, 1091 (1994).
- 15) J. De Boeck, R. Oosterholt, A. Van Esch, H. Bender, C. Bruynseraede, C. Van Hoof, G. Borghs, Appl. Phys. Lett. **68**, 2744 (1996).
- 16) H. Akinaga, S. Miyanishi, K. Tanaka, W. Van Roy, K. Onodera, Appl. Phys. Lett. **76**, 97 (2000).
- 17) M. Tanaka, S. Sugahara, IEEE Transactions on Electron Devices **54**, 961 (2007).
- 18) 羽生貴弘, 応用物理 **76**, 1388 (2007).
- 19) S. Matsunaga, J. Hayakawa, S. Ikeda, K. Miura, H. Hasegawa, T. Endoh, H. Ohno, and T. Hanyu, Appl. Phys. Exp. **1**, 091301 (2008).
- 20) T. Amemiya, H. Shimizu, P. N. Hai, M. Yokoyama, M. Tanaka, and Y. Nakano, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 205 (2007).
- 21) H. Ando, T. Sogawa and H. Gotoh, Appl. Phys. Lett. **73**, 566 (1998).
- 22) T. Kondo, J. Hayafuji and H. Munekata, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, L663 (2006).
- 23) 伊藤公平、応用物理 **73** 巻第 6 号, 782 (2004).
- 24) Y. Aoki, M. Kamenno, Y. Ando, E. Shikoh, Y. Suzuki, T. Shinjo, M. Shiraishi, Phys. Rev. B **86**, 081201 (2012).
- 25) T. Sasaki, Y. Ando, M. Kamenno, T. Tahara, H. Koike, T. Oikawa, T. Suzuki, M. Shiraishi, Phys. Rev. A **2**, 034005 (2014).
- 26) T. Tahara, H. Koike, M. Kamenno^{1,2,3}, T. Sasaki, Y. Ando, K. Tanaka, S. Miwa, Y. Suzuki, and M. Shiraishi, Appl. Phys. Exp. **8**, 113004 (2015).

スピン流

- 1) http://www.jst.go.jp/s-innova/research/h23theme06/h23theme06_PO.pdf
- 2) <http://jpn.nec.com/techrep/journal/g13/n01/pdf/130109.pdf>
- 3) <http://grantome.com/grant/NSF/DMR-1262253>
- 4) <http://researchnews.osu.edu/archive/thermospin.htm>
- 5) <http://researchnews.osu.edu/archive/giantseebeck.htm>
- 6) <http://www.jst.go.jp/inter/sicp/country/uk.html>
- 7) <http://www.jst.go.jp/report/2009/100225.html>
- 8) <http://www.spincat.info/>
- 9) http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-10-BLAN-1011

トポロジカル量子科学

- 1) トポロジカル絶縁体入門 安藤陽一著 講談社
- 2) スピン流とトポロジカル絶縁体 齊藤英治・村上修一著 共立出版
- 3) M. Z. Hasan & C. L. Kane, Review of Modern Physics **82**, 3045 (2010).
- 4) C. Beenakker & L Kouwenhoven, Nature Physics **12**, 618 (2016).
- 5) N. Nagaosa & Y. Tokura, Nature Nanotechnology **8**, 899 (2013).
- 6) L. Lu *et al.*, Nature Photonics **8**, 821 (2014).
- 7) L. Lu *et al.*, Nature Physics **12**, 626 (2016).

3.3.3 二次元機能性原子薄膜

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

従来のバルク材料や単なる薄膜材料とは異なる特性・構造を持ち、新しい機能や従来材料の特性を凌駕する機能を発現することが可能な、原子の二次元的結合構造、あるいは、それと等価な二次元的電子状態を表面・界面などに有する機能性を持った原子薄膜材料を研究開発の対象とする領域である。次世代の電子デバイス・システムに求められる大幅な低消費電力化、小型化およびそこに付加される新機能の創出などが期待される。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

1947 年のトランジスタの誕生以来、半導体集積デバイス（LSI）の低消費電力化・高速化はスケールリング則に従う微細化・高集積化により達成されてきた。しかし、近年、物理的並びに経済的に微細化の限界が近づき、新材料・新原理に基づく新規デバイス、あるいはデバイスの三次元化や超並列化へと研究開発の指向性はより多面的な広がりを見せている。一方、光通信産業を中心とするナノフォトニクスデバイス分野では化合物半導体からシリコンフォトニクスへの代替が、また、ディスプレイ、太陽電池、燃料電池、蓄電池等の分野では、レアメタルフリー化が大きな潮流となっている。グラフェンを中心とする二次元機能性原子薄膜は、それらいずれの分野においても新材料、新原理の導入をもたらしうる大きなポテンシャルを秘めている。

グラフェンは、2004 年、Manchester 大学の A. Geim と K. Novoselov が炭素一原子層のシートであるグラフェンの単離に成功し、その電子構造が質量のない相対論的 Dirac 電子としての特徴を有することを解明したことで急速に脚光を浴びた。この歴史的な研究成果により、両氏は 2010 年ノーベル物理学賞を受賞した。グラフェンのもつ質量の無い電子、究極の二次元機能性原子薄膜、炭素原子間の強い結合力、エッジの電子的・化学的活性といった特徴は、基礎科学の興味深い研究対象であるとともに、高速電子、スピン自由度、格子自由度はエレクトロニクス／スピントロニクスデバイスへの応用、力学的に強い二次元原子薄膜は力学材料、透明電極材料として、化学的活性は触媒応用へと、様々な応用への発展の可能性を秘めており、多くの産業応用が期待されている。このような背景のもと、EU、米国、韓国、シンガポール、中国等、世界各国では基礎科学から応用研究、産業実用化までを目指す大型プロジェクトや産業界での実用化に向けた展開が行われている。また、研究交流の場として、欧州を中心に Graphene 20XX、Graphene Week、アジア太平洋地域を中心として、International Conference on Recent Progress in Graphene Research (RPGR 20XX) 等の大きな国際会議が開催されている。

また、グラフェンや関連 2 次元原子膜の活発な研究活動を反映して、2014 年にイギリス物理学会が出版をスタートしたジャーナル 2D Materials は既に IP = 9.6 (JCR®) と高いインパクトファクターを記録している。

日本でのグラフェンや関連二次元原子膜系の研究は、従来、科学研究費等による個人研究への財政的支援が主体であり、その中で多様な研究が物理、化学、材料科学の分野で展開されてきた。この中で、一部、JST の CREST や科学研究費特別推進研究等の大型研究の推進も行われてきた。

産業界では、世界的なグラフェン研究の展開のなかで、その応用と産業化での関心が

高まり、2010 年、化学技術戦略推進機構で企業の情報交換の場としてのグラフェン研究会が設けられた。その後、2011 年には技術研究組合単層 CNT 融合新材料研究開発機構 (TASC) グラフェン事業部が企業 5 社と産業技術総合研究所により設立された。現在、電気、化学関連企業を中心に研究開発が行われている。また、産総研グラフェンコンソーシアムが 2013 年に立ち上げられ、企業、行政、大学・研究機関の情報交換、連携の場として機能を果たしている。

グラフェンや原子膜の政府主体のプロジェクトは、2011 年、NEDO の「希少金属代替材料開発」(H23 年度) が最初であり、その後、2012 年、NEDO「革新的ナノカーボン材料先導研究開発」(H24 年度)、NEDO「低炭素社会を実現する革新的カーボンナノチューブ複合材料開発プロジェクト／グラフェン基盤研究開発」(H24 - H26 年度)、2013 年文部科学省科学研究費新学術領域「原子層科学」(H25-29 年度)、2014 年 NEDO「低炭素社会を実現するナノ炭素材料実用化プロジェクト」(H26 - H28 年度)、JST の CREST プロジェクトとして、「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」(H26-33 年度) が推進されてきており、2013 年以降、組織的で大きな取り組みが展開され始めている。

一方、海外に目を向けると、世界の主要国では、EU が Graphene Flagship (10 億ユーロ)、韓国が 350 億円、シンガポールが 150 億円、イギリス 100 億円、アメリカが 50 億円／年と競って、グラフェンと関連物質の産業化を目指して大型の研究プロジェクトを走らせている。グラフェン製膜技術では、韓国 Samsung Electronics と Sungkyunkwan 大の共同による大面積グラフェンシートの Roll-to-Roll 製膜技術の開発 (2012 年) は透明電極材料として ITO を駆逐しうるポテンシャルを示した 1 つの画期的な成果であった。しかし、透明性と低抵抗性 (高導電率性) を性能指標として、現状では ITO を凌駕するには至っていない。グラフェン製膜技術の改良は CVD 法においては米国テキサス大、SiC 熱分解法では米国ジョージア工科大等の外国勢が先導してきたが、我が国の技術水準は高く、CVD 法および SiC の熱分解法によるエピタキシャルグラフェン製膜 (九大、東北大) を実現し、それらの高い結晶品質は他の追随を許していない。また、Si 基板上ヘテロエピタキシャルグラフェン製膜 (東北大) でも先導している。グラフェンを中心とする二次元機能性原子薄膜のテラヘルツデバイス応用は、ノーベル賞受賞のマンチェスター大 K. Novoselov らのプラズモニク応用に関する論文 [A.N. Grigorenko et al., Nature Phonon. 6, 749 (2012)] を 1 つの契機として、世界的に研究が過熱している。

表面・界面しか存在しない二次元物質グラフェンを導入して機能性デバイスを構成するためには絶縁体、半導体、金属との接合が不可欠であり、h-BN (ヘキサゴナルボロンナイトライド) や DLC (ダイヤモンドライクカーボン) などの絶縁材料と、MoS₂ や WS₂ をはじめとする遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体材料が半金属のグラフェンとのヘテロ接合に適する相補的二次元材料として注目され、シリコン二次元原子膜シリセンやトポロジカル絶縁体を含めて、グラフェン単体の研究から Beyond Graphene の研究へと世の中の潮流がシフトしている状況にある。

我が国のファンデルワールス二次元原子薄膜材料作製技術の水準は高く、特に、NIMS の谷口、渡辺らによる独自の超高压法による高品質バルク h-BN は、その高い結晶品質で他の追随を許さず、世界中の研究者に提供され、二次元原子薄膜ヘテロ接合デバイスの作製に欠かせない材料となっている。今後は、CVD 法や MBE 法等の技術によって h-BN

や TMD 材料の高品質ヘテロエピタキシャル成長技術の進展に期待がかかる。

デバイスへの応用としての具体的な取り組みとしては、新規な物理現象、化学現象を信号処理機能としてデバイスに応用するための基礎基盤研究の強化、二次元原子・分子薄膜ヘテロ接合材料としての超高品質ヘテロエピタキシー製膜技術および工業的量産化高品質成膜技術、In-Situ およびデバイス実動作状態下での材料・界面の物性評価解析技術、デバイスプロセス技術、Si-CMOS や Si フォトニクス of 延長線上にある集積デバイス・集積回路技術、デバイス応用に関する研究開発力向上のための人材育成、研究開発施策などが重要である。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

従来の絶縁体、半金属、超伝導体になかった電子機能の宝庫として、トポロジカルな電子状態をもつ物質に注目が集まっている。中身は絶縁体で、表面にはグラフェンに類似した質量ゼロで高移動度の 2 次元金属状態をもつトポロジカル絶縁体は、応用に向けた研究のフェーズに入ってきている。低いバルク絶縁性のために表面だけにある特殊金属状態の利用が妨げられるという大きな問題があったが、これを克服できる「高絶縁性トポロジカル絶縁体」の組成が確立しつつある。また、量子ホール効果を外部磁場無しで実現できる「強磁性トポロジカル絶縁体」の薄膜作製技術も進展しており、この量子異常ホール効果が観測される温度は 1 桁向上した。トポロジカル絶縁体と従来絶縁体の電子構造をつなぐ境界には、バルク全体でバンドギャップの閉じた 3 次元グラフェンと見なせる電子状態の出現が予想されている。通常はスピン縮退した「3 次元ディラック半金属」と呼ばれる電子状態をもつが、結晶構造の空間反転対称性の破れや強磁性による時間反転対称性の破れが重畳すると、スピン縮退の解けたディラック電子分散がキラルな対として現れ、これは「3 次元ワイル半金属」と呼ばれる。これらの電子状態をもつ数種類の化合物が発見され、非磁性物質にも関わらず異常に大きな磁気抵抗（10 テスラの磁場で約 100,000%）を示すことなどからも大きな注目を集めている。「トポロジカル超伝導体」では、新原理の量子計算を可能にするマヨラナ粒子（自身と反粒子が一緒に従来にない統計性をもつ未発見の準粒子）を表面にもつとして、実験実証を目指した研究競争が活発化している。最近日本からも有力な候補物質の発見が報告された。

2011 年頃まで加速度的に拡大・進展したグラフェンのトランジスタチャネル材料応用研究は、今や完全に MoS_2 、 WSe_2 等の遷移金属ダイカルコゲナイド系原子薄膜をチャネル材料とする FET デバイス研究にシフトしている（2016 年 6 月米国開催の第 74 回 Device Research Conference では全 63 件のオーラル講演のうち 19% が二次元原子薄膜デバイスであった）。

素材の産業応用としては、大面積量産化グラフェン製膜技術によるグリーンエネルギー応用のタッチパネル・太陽電池用透明電極、および蓄電池応用が先行し、 MoS_2 や WS_2 等の二次元ダイカルコゲナイド半導体によるフレキシブル TFT の量産化がさらに続くであろう。

機能デバイス応用研究では、グラフェン単体の各種物性応用から、グラフェン (G)/h-BN/グラフェン (G) ヘテロ接合を介した共鳴トンネリングやスピン注入など、二次元機能性原子薄膜ヘテロ接合に発現する物性機能応用へと研究動向が進化している。ま

た単層のみならず、多層の h-BN が、グラフェンおよび二次元材料を利用した実デバイスで必要となる誘電体層、原子レベルで平坦でダングリングボンドがない基材として望まれている。そのような中で、多層 h-BN の CVD による大面積合成技術の開発も精力的に進められており、2015 年にはある程度の見通しが立ってきた（韓国 Dongguk 大、Sungkyunkwan 大、米国 MIT など）。半導体集積デバイスに関連する最大・最高権威の国際会議として認知されている第 50 回 IEEE International Electron Devices Meeting 2016（2015/12/7-9, 米国ワシントン D.C. 開催）では、220 件に上るオーラル発表のうち、約 9% が二次元原子薄膜材料デバイスに関する内容であり、特に MoS₂ 等遷移金属ダイカルコゲナイドの FET チャンネル応用の研究が加速しており、ポスト Si-CMOS テクノロジーとしての議論が活発化している。研究動向は、単体デバイスから集積デバイスへの展開が広がりを見せている。

超高周波ミリ波・テラヘルツ波・光波領域の光電子デバイス分野では、光検出器・変調器・フィルタ・ミキサ等のメタマテリアル・フォトリソニック結晶を含むプラズモニクデバイス開発が進展し、その後に増幅器、レーザー光源、スピントロニクス等の能動デバイス開発が続く。

利得媒質としてのテラヘルツレーザー応用は日本発の理論提案で、2016 年 6 月開催の国際会議 CLEO（Conference Lasers and Electro-Optics）及び DRC で電流注入によるテラヘルツレーザー発振実現が初めて報告され、我が国（東北大）が実験検証も先行している。一方、物性としての非平衡キャリアダイナミクスの実験研究で先行する独 Max Planck Institute、ベルリン工科大、米 Columbia 大、Cornell 大等が、デバイス研究開発に本格参入し、国際競争が過熱してきている。

また、上述したアジア太平洋地域における最大規模のグラフェン関連の重要な国際会議 RPGR が 2013 年に日本で開催され、世界各国から 420 名の参加者があった。RPGR 2013 は日本で最初のグラフェンに関する大型国際会議であったが、それを契機として我が国の当該学術分野におけるプレゼンスが高まっている。

[注目すべきプロジェクト]

2013 年以降、日本においてもグラフェンと関連分野の研究での急速な進展が出てきている。2013 年度にグラフェン関連領域：文部科学省科学研究費新学術領域「原子層科学」（H25-29 年度）が採択され、さらに、2014 年度に NEDO の「低炭素社会を実現するナノ炭素材料実用化プロジェクト」（H26-28 年度）、JST の CREST 新領域として、「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」（H26-33 年度）が発足するに至り、ようやく、国家規模での研究開発投資体制が整ってきた。

2013 年に企業、行政、大学・研究機関の情報交換、連携の場として産総研グラフェンコンソーシアムが設立された。また、日本と EU（Graphene Flagship）との情報交換の場、Japan-EU Workshop on Graphene and Related 2D Materials は 2015 年 10 月に第 1 回が東京で開催され、2017 年 5 月には Barcelona で開催予定である。日欧双方の第一線研究者が一堂に会しての情報の共有を踏まえて、日本、EU のそれぞれの得意分野を基礎に共同研究、研究者交流の推進を計画している。

EU では Graphene Flagship（2013 年 10 月発足、10 億ユーロ、74 研究機関、17 ヶ国）の他、グラフェンの CVD 合成技術開発での遅れを取り戻すべく GLADIATOR（2013.11.15

～、3.5 年、173 億円、民間企業 8、大学・研究機関 6）で大面積合成、製造コスト低減、デバイス開発に取り組み、さらに GRAFOL（2011.10.1－2015.9.30、15 億円）で CVD の合成温度の低温化、ロール・ツー・ロール合成技術、デバイス開発などに取り組んでいる。また、関連するプロジェクトとして、FLAGERA が基礎科学への支援（10M€／2 年）を行っている。

Flagship では、16 分野中 1 分野が beyond graphene を含む基礎科学、5 分野がデバイスに関連（高周波／光電子／スピントロニクス／センサ／フレキシブルエレクトロニクス／エネルギーデバイス）している。デバイス研究では、beyond graphene ヘテロ接合デバイス応用のマンチェスター大、オプトエレクトロニックデバイス応用のケンブリッジ大等が先導している。

これらに加えて英国では独自に Graphene Hub(2012 ～、104 億円、マンチェスター大)、Print Graphene Technology（2014 ～、43 億円、ケンブリッジ大）でフレキシブルエレクトロニクス、バッテリー、キャパシタ、高速通信デバイスなどの応用技術開発を進めている。また、Graphene Engineering プロジェクト（£1.5－2M／年）が開発研究への支援を行っている。

更に、スペインでは、Graphene Flagship とは独立に、2016 年に、新たなプロジェクト“Graphene & 2D Materials” EUREKA Cluster を立ち上げる計画をしており、企業 100 社、研究機関 60 が参加する予定であり、このプロジェクトは、韓国、カナダ、オーストラリア等、国際的な連携も進めている。

シンガポールでは、Graphene Research Centre を活動の中心として、US\$ 150 M の研究費が支援されていたが、2014 年には、新たに US\$ 50 M（10 年間）が支援され、Graphene Research Centre は、多様化した 2 次元膜の研究展開を踏まえ、Centre for Advanced 2D Materials (CA2DM) と改名され、beyond graphene の研究を展開している。

韓国では Korea Graphene Hub project（2012 ～、6 年、210 億円）でタッチパネル、有機 LED、エレクトロクロミック窓、2 次電池、スーパーキャパシタ、コンポジット、などの開発を実施中である。2014 年には、Graphene Commercialization Technology Roadmap を立上げ、CVD グラフェン、グラフェンフレーク材料を用いた 6 の戦略分野（透明電極、ガスバリアー、エネルギー、熱放射材料、コンポジット材料、エレクトロプリンティングインク）の応用技術の展開を進めている。

中国は 2013 年 12 月に「重慶グラフェン産業パーク」建設の計画を発表した。【以下発表資料より：重慶グラフェン産業パークはグラフェンタッチスクリーン、グラフェン製電子チップ用ラジエーター（放熱材）、グラフェンリチウム電池用電極材料、グラフェン半導体管などの産業方向を巡って、グラフェン産業上下流の応用技術の研究開発と応用製品模範拡販を通して、応用企業を主体とし、産学研をコンビナートした産業チェーン集団を構築する。産業パークは約 5 年間をかけてグラフェン応用研究開発企業を 20 社以上培養し、上下流の応用生産企業 100 余社を招致し、発展させ、生産値 1000 億元（1 兆 6690 億元規模）の国家級グラフェン産業化模範基地を目指す計画をしている。】<http://jp.cq.gov.cn/government/OfficialRelease/2013/12/31/1171842.shtml>

さらに 2016 年 6 月の nature materials には、以下のような中国でのグラフェンの研究開発状況のレポートが掲載された（参考文献 7 参照）：中国国立科学財団（NSFC）は 2014 年までに US\$ 60 M 以上をグラフェンプロジェクトに投資した。2015 年 8 月末ま

でグラフェンに関する論文の 34%は中国からで、米国の 19%を越えている。また中国からのグラフェン技術に関する特許は世界のグラフェン関連特許の 38%を占めている。科学技術省がオーナーとなり、工業界-大学-研究機関によるグラフェンの商品化をサポートする目的の研究共同組合、China Innovation Alliance of the Graphene Industry (CGIA) が 2013 年に設立された。世界最大の情報通信装置メーカー Huawei Technologies Co. Ltd. も参画している。中国最大の Changzhou（常州市）グラフェン工業パーク（面積 6 km²）が 2013 年に設立された。ここでは応用研究にフォーカスする Jiangnan（江南）Graphene Research Institute が 3 億ドルでセットアップされた。現在 70 社以上が集まって地域グラフェン工業クラスターを形成している。ここには Sixth Element 社（耐食性コーティングやポリエステルやゴムとのコンポジット用にグラフェンパウダー 100 トン/年）や 2D Carbon 社（タッチパネルやウェアラブル電子デバイス用のグラフェンフィルム 50,000 m²/年）が含まれる。同様のグラフェン工業パークが Wuxi（無錫）および Qingdao（青島）にもある。これまで最大の投資として 2012 年、2013 年に、Ningbo Morsh 社および Chongqing Moxi 社に Shanghai Nanjiang グループからそれぞれに対して 37 百万ドルが拠出された。Ningbo Morsh 社は Li イオン電池とスーパーキャパシタ用途にグラフェン粉末 300 トン/年、Chongqing Moxi 社はタッチパネルやウェアラブルデバイス用途にグラフェンフィルム 1,000,000 m²/年のキャパシティがある。2015 年には、グラフェンタッチパネルを用いた初めての 2,000 台のスマートフォンが販売され、また、海上貨物船エンジン用オイルへのグラフェン添加剤によりオイルの寿命を 1,000 マイルから 5,000 マイルに延ばした。さらにグラフェンベースキャパシタがバスに使用された。

米国からは上記のような大規模プロジェクトの話は聞こえてこないが、Beyond CMOS（2013 年-、5 年間、5MUSD、SUNY'S College of Nanoscale Science、the University of Nebraska-Lincoln、University of Texas at Austin の 3 大学に配分、マルチ大学ネットワーク（34 大学、17 州が参画）、NRI（Nanoelectronics Research Initiative）、GLOBAL FOUNDRIES、IBM、Intel、Micron Technology and Texas Instruments）や、グラフェン導電性インク工場建設計画（2013 年-、NSF から Volbeck Materials Corporation への助成、年 40 トン超までの生産能力の拡大、応用製品：導電性塗料、電池材料など）など、大きくはないが的をしばった公的資金による応用開発を実施中である。

さらに NRI が主導するプロジェクトとしては、AFOSR（Air Force Office of Scientific Research）が支援する基礎科学研究 10 課題の 1 つとして“2D Materials and Devices beyond Graphene”（代表 Prof. Ajayan, at Rice Univ.）を 10 億円規模で推進中である。CVD による MoS₂ 原子膜の SiO₂/Si 基板上直接成膜やグラフェン/h-BN/グラフェンナノキャパシタの製膜・解析を報告するなど、二次元原子薄膜ヘテロ接合構造体の製膜とデバイス応用で先導している。

グラフェン関連ベンチャー企業数は米国が圧倒的にリードしている（少なく見積もっても 29 社以上ある。第二位は英国および中国の 8 社。日本は 2 社である）。したがって、グラフェンの実用化研究が最も進んでいるのは米国であると言える。これは米国の公的資金によるベンチャー企業スタートアップの仕組みによるところが大きい。

IP から見た実用化動向は、2013 年の調査資料によると、公開件数のランキングは中国（2204 件）、米国（1754 件）、韓国（1160 件）、英国（54 件）である。企業別には Samsung（400 件以上）、IBM（<140 件）となっている（残念ながら日本の企業、研究

機関はトップ 10 に入っていない。

グラフェンの実用化研究開発の進捗状況を推し量るうえで、世界的なグラフェンの大規模プロジェクトでの用途開発に実質的にどこから材料供給がなされているかがもう一つの指標となる。現在までに数多くのグラフェンの製造方法が開発されてきた。このうち、商業ベースで材料供給までたどり着いたのは、酸化グラフェンを基本技術とするグラフェン分散溶液（さらに紛体）、および CVD によるグラフェン原子層膜の二種類である。

グラフェン分散溶液を供給する企業として重要なのは、Angstrom Materials、Vorbeck Materials Corporation、XG Sciences の米国の三社、および中国の企業である。すでに年間数トンから数十トン、さらに前述のように中国では 100 トンを超える供給量があると言われている。複合材料、バッテリー、スーパーキャパシタ、導電性インク、などの用途開発を実施している。グラフェン分散溶液を原料として多岐にわたる用途が期待されているが、これまでのところ実用化が公になったのはテニスのラケットのみである。テニスラケット一本に使用するグラフェンは数mgと極少量であるため、現在のところ供給過多にあると言わざるを得ない。より大口の用途を見つけるためには、グラフェン分散溶液の導電性を如何に高めるかにかかっている。酸化グラフェンを出発材料とする手法では、どうしても導電性に劣るため、最近では酸化グラフェンを経ないグラフェン分散溶液の製造方法が開発されてきている。その中で最近特に注目されるのは、Thomas Swan 社（英国）の回転ホモジナイザーを用いた黒鉛の剥離方法である（Trinity College Dublin の Coleman 教授が開発した手法）。同社はこの手法を用いて、ある程度の導電性を有するグラフェン分散溶液の供給を開始している。

CVD で製造するグラフェン原子層膜の商業ベースの供給は、用途開発に供する大面積という観点では実質的に英国の BGT Materials 社のみである。同社は可視光透過率 97% 以上（ほぼ単層グラフェン）でシート抵抗 300 ~ 600 Ω （ドーピングなし）のグラフェンを販売している。CVD の基材である銅箔から転写してドーピングなしの状態で移動度 2000 ~ 4000 cm^2/Vs を保証している。性能としては高いレベルにあると言えるが、課題は価格である。同社の HP では、24 インチ×300 インチの銅箔基材に積層したグラフェンを 55,000 £ GBP で販売している。A4 サイズに換算して約 11 万円と高価格であり、例えば ITO 透明導電フィルムと価格では全く競争にならない。スループットの低い熱 CVD による製造が高価格の原因である。

以上のように、現在、グラフェンの材料供給に関して、用途開発に資するという観点で重要な企業は、米国の 3 社、英国の 2 社、および中国企業である。いずれにしても現状において、用途開発に資する高品質グラフェン材料の大量生産法が確立されているとは言えない状況にある。このため用途開発を試行錯誤するための材料供給が不十分であり、グラフェンのキラアPLICATION 確立の大きな障害となっていると言える。

このような状況において、日本企業からもグラフェンを利用した製品販売の発表がなされている。2015 年 7 月 31 日に(株)カネカは技術研究組合単層 CNT 融合新材料研究開発機構および NEDO と共同で、樹脂フィルムの高温処理で作製する厚さ 1 μm の多層グラフェン膜を高エネルギー加速器のビームセンサ用材料として販売を開始する旨、発表した。さらに 2016 年 7 月 14 日に日立マクセル(株)はグラフェンコート振動板を採用したハイレゾリユーション・オーディオ対応ヘッドフォンの発売を発表した。

(4) 科学技術的課題

日本のグラフェン・二次元機能性原子膜の研究開発については、研究への関心、予算規模、また、産業界の活動等、世界の先端からは大きく水をあけられている。一方、日本では従来から裾野の広い研究が行われており、グラフェンと関連物質の研究開発には大きなポテンシャルを有しており、大きな優位性を持っている。このことを生かして、研究の組織的な展開を促すとともに、産業界との強い連携をより一層推進する取り組みが求められる。

(5) 政策的課題

新材料創製、デバイス学理創造には、基礎物理、基礎化学に立ち帰った基礎基盤研究の推進が欠かせない。二次元機能性原子薄膜材料を科学技術イノベーションとして将来の新産業創出に結実させ、我が国がこれを主導するためには、デバイスからシステム応用までを俯瞰した目的志向型の材料・プロセス技術の革新が求められる。これらを相補的に推進するためには、省庁の垣根を越えた柔軟な産学官連携研究の推進体制・制度の構築が不可欠である。

(6) キーワード

グラフェン、二次元機能性原子薄膜、相対論的 Dirac 電子、h-BN、ダイカルコゲナイド、トポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導体、マヨラナ粒子、機能デバイス、エレクトロニクス／スピントロニクスデバイス、透明電極、力学材料

(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	○	↑	従来から日本はグラフェンや二次元薄膜の研究では、先導的な多くの業績があった。電子顕微鏡を始め原子オーダーの構造解析では世界最先端と言える。h-BN は日本のオリジナルであり、シリセンでもエビ製膜で最先端の位置を確保している。2013 年に科学研究費新学術領域「原子層科学」プロジェクト、2014 年に JST-CREST「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」研究領域がスタートし、化学、物理、材料科学、デバイス工学分野の研究者が連携して研究を推進する体制の強化が進んでいる。
	応用研究・開発	○	↑	Si 上ヘテロエピグラフェン製膜と光電子デバイス応用、グラフェンバンドギャップエンジニアリングと電子デバイス応用、グラフェン金属の界面化学・物理と電子デバイス応用、スピン注入制御、バイオセンシング応用、テラヘルツレーザ応用等の分野で日本は世界のトップレベルである。Beyond Graphene 材料のデバイス応用も層が厚い。2014 年、JST の CREST プロジェクトとして、「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」がスタートし、基礎的研究から応用研究への展開が推進されてきている。また 2014 年から NEDO「低炭素社会を実現するナノ炭素材料実用化プロジェクト」（H26 - H28 年度）も開始され、実用化に向けたプロジェクトが軌道に乗り、その成果が出はじめている。2013 年、産総研グラフェンコンソーシアムが立ち上げられ、企業、行政、大学・研究機関の情報交換、連携の場として機能を果たしている。
米国	基礎研究	◎	↑	光電子量子スピン基礎物性、非平衡キャリア緩和と多岐にわたり、欧州とならんで基礎研究に強い。グラフェン、二次元原子膜の物理、化学、材料科学等で伝統的に優れた研究成果を生み出しており、裾野は広い。個人研究が主体であり、プロジェクト的な研究は行われていない。ファンドの主体は DARPA、NSF で、研究費総額は基礎、応用を含めて、およそ 50 億円／年程度である。

米国	応用研究・開発	◎	↑	基礎研究から応用研究まで、研究の展開が行われており、優れた研究成果を生み出している。研究費総額は基礎、応用を含めて、およそ 50 億円／年程度である。トランジスタデバイス応用は当初、IBM が先駆的成果を上げ、その後多くの大学・民間研究機関が世界を先導している。NRI (Nanoelectronics Research Initiative) が主導する半導体・ナノテク関連の Funding Agency として AFOSR (Air Force Office of Scientific Research) が支援する基礎科学研究 10 課題の 1 つとして “2D Materials and Devices beyond Graphene” を 10 億円規模で推進中。MoS ₂ 等遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) 半導体二次元製膜技術とそのトランジスタ応用、G/h-BN/G ナノキャパシタを中心とする二次元原子膜ヘテロ接合形成でも最先端を走っている。TMD をチャンネル材料とする FET デバイス応用研究が加速しており、ポスト Si-CMOS テクノロジーとしての議論が活発化している。研究動向は、単体デバイスから集積デバイスへの展開が広がりを見せている。
欧州	基礎研究	◎	↑	基礎物性ではノーベル物理学賞受賞者を輩出した英国、応用光電子物性ではドイツ、スピントロニクス・製膜ではフランス、プラズモニクスでは英国・スペインと世界トップの実績を出している。各国が特色ある強みを持っている。Graphene Flagship のプロジェクトは、基礎研究を応用展開に結びつける役割を果たすと期待されている。
	応用研究・開発	◎	↑	2013 年に EU での大型プロジェクト Graphene Flagship (2013-2022、総額 10 億ユーロ) がスタートし、多くの大学、研究機関の参加のもと応用に向けた様々な分野での研究が展開されており、独自の研究開発でリーダーシップをとりつつある。Flagship では 16 分野中 1 分野が beyond graphene を含む基礎科学、5 分野がデバイスに関連している。これら 6 分野を毎年 50 億円規模で 10 年間に亘り支援する。Graphene Flagship には Airbus、NOKIA 等、様々な企業が参加、参加予定をしており、応用研究での成果の産業化、商品化への展開が今後期待される。Manchester 大からの Spinout による Graphene Research Com. や 2-DTECH をはじめ、ベンチャー企業化が活発である。
中国	基礎研究	○	↑	応用研究に比較すると基礎研究力は低いが、徐々に大きくなってきている。2011 年より第 12 次 5 か年計画において、戦略的振興産業（全 7 産業）として「新素材」を指定。重大科学研究計画で「ナノ研究」を指定。基礎研究も規模・質ともに向上している。
	応用研究・開発	○	↑	グラフェンの産業化も活発に進められており、特許登録数も世界でトップとなっている。The Sixth Element 社および Ningbo Marsh 社がグラフェン材料製膜・サプライヤとして主要企業とされるが品質は欧米日に劣るとの評価。グラフェンの商品化をサポートする目的の研究共同組合、CGIA が 2013 年に設立され、70 社以上が集積して地域グラフェン工業クラスターを形成している。
韓国	基礎研究	○	→	各大学、研究機関で材料科学、物理等のグラフェン研究が盛んに行われており、KIAS で 2009 年アジア最初の大規模なグラフェンの国際会議が開催された。Institute of basic science program (2013-2022、総額 90 億円) がスタートし、この中では、外国の著名な研究者も参加している。
	応用研究・開発	◎	↑	Global Frontier Program : Soft electronics (2011-2020、総額 81 億円) のプロジェクトがスタートし、約 30 の研究グループが参加し、新しいプロセス、デバイス等、フレキシブルエレクトロニクスを目指した研究が展開されている。2012 年の Samsung と Sung Kyunkwan 大の共同による 30 インチのグラフェンシートの Roll-to-roll 製膜はディスプレイ応用に特化した先導的成果として有名。KAIST、National Seoul 大もグラフェン・二次元薄膜デバイス応用の研究拠点になっている。R&D strategic program (2013 ~ 2019、総額 110 億円) のプロジェクトが行われ、タッチパネル、OLED、エネルギーデバイス等のグラフェン応用の商品化に向けた研究が行われている。

(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レベル

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）のレベル

(註 2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 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) Technical Digest of the 72th Annual Device Research Conference.
- 2) NRI (Nanoelectronics Research Initiative) Home Page Web Site
<https://www.src.org/program/nri/>
- 3) NNI (National Nanotechnology Initiative), USA, Home Page Web Site
<http://www.nano.gov/>
- 4) AFOSR (US Air Force Office of Scientific Research) Basic Research Initiative Fact Sheet
<http://www.wpafb.af.mil/library/factsheets>
- 5) Graphene Flagship Home Page Web Site
<http://graphene-flagship.eu/>
- 6) Lux Research, “Fishing for Carbon Gems in a Vast Sea of Oversupply: Assessing China’s Carbon Nanotube and Graphene Landscape,”
https://portal.luxresearchinc.com/research/report_excerpt/15397
- 7) “Graphene commercialization”, X. Xiao, Y. Li & Z. Liu, Nature Materials 15 (2016) 697-698

3.3.4 フォトニクス

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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・システムを実現する。光の技術は情報通信、医療・バイオ、加工、分析・計測、映像、照明、発電などの幅広い応用分野への適用とさらなる高性能化が注目されるが、用いる材料の高品質化、デバイス構造の最適化、光デバイスの小型化・集積化、低消費電力化、超短パルス化、超精密計測、分解能の向上などの研究開発課題がある。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

光技術は光通信、レーザー加工、LED 照明、太陽光発電など幅広い応用分野で多岐にわたって利用されており、不可欠な技術領域となっている。今後もこれらの応用分野はさらに発展し、光技術に対してはさらなる高性能化・低消費電力化などの要求が高まってくると考えられる。このように光技術の応用範囲はかなり広いが、ここでは少し範囲を絞り、「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）との関わりが強い光通信技術、コンピュータやサーバーの光配線技術、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。

スマートフォンやタブレットに代表される高機能ブロードバンド携帯端末の急速な普及、クラウドサービスの進展、さらに近い将来予想される IoT（Internet of Things）、ビッグデータ時代の到来により、ネットワークを行き交うデータトラフィックは今後ますます増加し、データセンタ等で処理される情報量のニーズは今後も爆発的に増大すると予測される。

ネットワークをバックボーンとして支える光通信技術は、光ファイバ増幅器（EDFA）や波長多重技術（WDM）、デジタルコヒーレント伝送技術などの数々の技術革新を経て、過去 30 年で 3 桁以上の大容量化を達成してきた。しかし、光通信の伝送容量は光ファイバや光増幅器の物理的制約により急速に限界に近づきつつある（光ファイバ 1 本で伝送可能な容量は 100 Tbit/s 程度）。一方、インターネットトラフィックは年率約 50% の速度で増大しており、2030 年頃には 1 Pbit/s (10^{15} bit) の伝送速度が予想されており、ネットワーク流通する情報量は 20 年以内に光通信の最大伝送容量を超えてしまうことになる。また、今後 20 年の間に IT 機器の電力消費量は 1000 億 kWh 程度に増大すると言われており、ネットワーク機器における消費電力の抑制も重要な課題として浮かび上がってきている。このような課題に対し、消費電力を抑えつつ、増大する通信容量を収容するために、次世代の光通信ネットワークには量的・質的な技術革新が強く求められている。

一方、情報を処理するプロセッサ LSI やスイッチ LSI 等のデバイスの高性能化の速度は鈍化してきており、システム・ニーズの伸びとデバイス性能の伸びのギャップは年々大きくなっている。このギャップは主にプロセッサ等のデバイスの並列化・分散化によって埋められているが、そのような大規模な並列化・分散化システムでは、プロセッサ間のインターコネクトの帯域幅や遅延時間がシステム全体の性能を律速してしまう。LSI チップ間のインターコネクトの電気配線はその限界が顕在化しつつあり、光配線（特にシリコンフォトニクス）によるチップ間インターコネクトの広帯域化・低遅延化・小型化・低消費電力化・低コスト化が望まれている。シリコンフォトニクスは、設計・製造・組み立て・検査等の全ての段階で、既存のシリコン電子デバイスとの互換性を図ることにより、既存

のシリコン・エレクトロニクスの膨大なリソースを活用することが可能になり、チップ間やチップ内光配線に適用できる小型化・低コスト化技術として期待されている。

光デバイスの小型化や高性能化に向けては、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が重要になってくる。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、シリコンナノフォトニクスといった分野に分かれて、主に基礎物理的な研究として立ち上がってきた。近年は様々なデバイスに適用されつつあり、次世代の光集積技術の候補として期待されている。

光には、波長・強度・帯域・偏光・位相といった多様な自由度があるが、これらを制御する技術を更に高め、高効率化・小型化を実現することにより、上で述べたような広範な分野におけるインパクトのみならず、新たな応用分野の出現も期待できる。スクイーズド光やもつれ光子源など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や、光から電気・磁気・熱・機械振動・化学反応など他の自由度への変換技術の向上・開拓により更なる応用分野の広がりも期待できる。

ネットワークの幹線系においては、デジタルコヒーレント伝送装置の商用化により 100G システムの導入が世界各国で急ピッチに進められた。世界に先駆けて 100 Gbit/s 伝送用デジタル信号処理 LSI の実用化に成功した我が国は、ITU、OIF などの国際標準を獲得し世界的な市場展開を達成し、既に世界各国の幹線系や光海底ケーブル網に採用され、世界市場の半分ほどのシェアを占めている。現在は次世代の伝送システムとして 400G/1T に向けた研究開発が行われている。超多値変調 (Multi-level)、マルチコア (Multi-core) ファイバ、多モード (Multi-mode) 制御技術の 3 つの Multi 技術で性能向上を目指している。メトロ系においては、光ノードである ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) の多機能化 (C/D/C: Colorless, Directionless, Contentionless)、WSS (wavelength selective switch) の大規模化、小型・集積化が進展し、ネットワークの高機能化とフレキシブル化が図られ、スペクトル資源の有効活用を目的としてフレキシブルグリッドの導入が積極的に検討されている。

データコム分野においては、現状の電気伝送の限界を克服するために光インターコネクが浸透しつつあり、データセンタにおける機器間の接続からボード内、チップ間の接続に至るまで幅広いスケールにわたる用途への適用が本格化しており、シリコンフォトニクスによる光トランシーバの基本構成要素である光導波路、光変調器、受光器などの開発が進められている。シリコンフォトニクスは 2000 年前半に電気配線の限界を打破する技術として注目され始め、Intel や IBM 等の北米の半導体メーカーや大学を中心に光導波路、光変調器、受光器等の性能向上が報告されるようになった。欧州では、FP6 の中で 2004 ~ 2008 年に実施された ePIXnet プロジェクトにおいて、IMEC および LETI の半導体ファブを使ったシリコンフォトニクスのシャトルサービスが構築され、現在では後継の PIXfab の中で光変調器や受光器などのアクティブデバイスも製造可能になり、光源以外のほぼ全てのデバイス要素が揃う。また、同様のシャトルサービスはシンガポールの IME でも行われている。日本では、2010 ~ 2014 年に最先端研究開発支援プログラム (FIRST) のフォトニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発 (PECST) プロジェクトで、光源も含めた全ての光要素をシリコン基板上に集積したシリコン光インター

ポーザにおいて 30 Tbps/cm²の世界最高の伝送密度を実証し、この技術を 2012 年から開始された NEDO の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（光エレ実装）プロジェクトに引き継ぎ、事業化に向けた活動が継続されている。

ナノフォトニクス技術における発光デバイスでは、ミクロンスケールまたはそれ以下の超小型レーザーが、化合物半導体フォトニック結晶によるナノ共振器構造、プラズモニクス構造の利用など様々なシステムで実現されている。光受光器としては、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、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などが開発されている。光スイッチでは、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。光メモリでは、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。

フォトニクス応用に関連するナノ材料としてこれまで中心的な役割を果たしてきたのは無機半導体のナノワイヤや量子ドットなどであり、化学合成や自己組織化の手法により多種多様な半導体のナノ発光材料が実現している。半導体基板上に形成される自己組織化量子ドットはデバイス化に適しており、フォトニック結晶など光構造との融合や、ゲート電界制御などが報告されており、低温での量子光学実験が数多く行われてきた。また、ダイヤモンド中の NV 中心（欠陥）の発光特性を利用した量子情報・磁気検出の研究がここ 10 年ほど集中的に進められてきており、NV 中心をリング共振器やフォトニック結晶と結合させる試みも行われている。カーボンナノチューブやグラフェンといったナノカーボンも材料の質の向上に伴い、光物性・フォトニクス研究が進められてきており、グラフェンでは伝導度変化による光検出や強い非線形光学効果などが報告され、ナノチューブでは pn 接合形成による発光や複数キャリア生成の報告もある。

(3) 注目動向

コア系においては、デジタルコヒーレント伝送技術の高度化として、総務省の委託研究「巨大データ流通を支える次世代光ネットワーク技術の研究開発」において 1 Tbit/s 級光伝送技術の実現を目指した研究開発がスタートしている。シンボルレート的高速化、直交振幅変調（QAM）の変調多値度の拡大、キャリア数の最適化に加え、適応的な変復調方式・信号処理方式・誤り訂正処理方式の可変技術、伝送歪みに対する静的・動的等化、およびそれらを組み込んだデジタル信号処理回路の研究開発を通じて、1 Tbit/s へ的高速化ならびに従来比 1/4 以下の低消費電力化を目標としている。

メトロ・アクセス系においては、光ネットワークの高度化・省電力化に関して、情報通信研究機構の委託研究「エラスティック光アグリゲーションネットワークの研究開発」、「エラスティック光通信ネットワーク構成技術の研究開発」でフレキシブルグリッドを用いた柔軟なネットワーク構築を可能とするリンク・ノード技術、およびコア系全体まで包含したエラスティックネットワークの制御・管理・転送技術の開発が推進されている。また、産業技術総合研究所を拠点とする「光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点」（文部科学省「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成」プログラム）において、産学官連携の研究拠点が構築されている。

次世代の光通信インフラ構築に向けた動きとしては、国内では情報通信研究機構が

2010 年度から委託研究「革新的光ファイバ技術の研究開発 (i-FREE)」 「革新的光通信インフラの研究開発 (i-Action)」 「革新的光ファイバの実用化に関する研究開発 (i-FREE²)」を順次立ち上げており、日本がこの分野を牽引する立場にある。欧州においても Horizon 2020 の中で、SAFARI と呼ばれる日欧連携プロジェクトにおいて、再構成可能なインフラのためのスケーラブル・フレキシブル光通信技術の研究開発がスタートしている。アメリカにおいては Nokia Bell Labs（旧ベル研）およびファイバメーカーが中心的役割を果たしており、世界中で研究開発が活性化している。

シリコンフォトニクスに関しては、100 Gbps (25 Gbps × 4 並列または 4 波長多重) のトランシーバの製品リリースが複数のベンダーから発表されており、少数ではあるが 200 Gbps (50 Gbps × 4 並列) も発表されている。今後の開発ターゲットは 400 Gbps に移ると想定されるが、駆動電子回路の高速化だけでは困難であり、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、フィウモードファイバを用いたモード多重等のいずれかとの組み合わせで実現されると予想される。また、シリコンフォトニクスのチップと光ファイバを接続する部分の構造やその工程に関する研究、2 次元 MEMS とシリコン導波路を組み合わせた低損失な光スイッチの研究などが活発化している。ファンディング動向としては、米国で 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。既に New York 州立大学 (SUNY) 内に 300mm ウエハのファブが稼働しており、2016 年 9 月からメンバー向けのシャトルサービスを開始すると発表している。

ナノフォトニクスに関しては、様々な機能性材料をナノフォトニクスに適用する研究が増加している。電気光学ポリマーを用いたプラズモニクス電気光学変調器は、著しい高性能化が進み、長さ 20 ミクロン以下のデバイス長で 70 GHz を超える動作周波数が達成されている。また、相変化材料とナノフォトニクスの組合せが様々な系で試されはじめており、例えば GST (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て超小型の不揮発性光メモリの実現が報告されている。ナノフォトニクスの情報処理への応用として、光演算に応用しようとする研究が開始されている。メタマテリアル、プラズモニクス、フォトリソグラフィなど手法は様々であるが、いずれも光により超低遅延の演算を実現し、CMOS の限界を打破することを狙っている。ナノフォトニクスを熱工学に利用しようとする動きが世界的に活発化している。例えば、Stanford 大では特殊なナノフォトニクス構造を用いて直射日光にさらされている状況下において、放射冷却のみで温度を下げるができる構造を考案し実証しており、ビルの冷房に利用する事業を立ち上げようとしている。また、MIT では、特殊なナノフォトニクス構造でタングステンフィラメントを囲むことにより、熱輻射を制御し白熱電球の効率を 40% に向上できる可能性を指摘している。もう一つ新たな動向として、ナノフォトニクス技術によって特殊なトポロジを持つ構造を実現し、そのトポロジに由来する特異な光物性を追究する Topological Photonics と呼ばれる分野の研究が世界的に活発化している。日本におけるナノフォトニクス関連のプロジェクトとしては、JST の戦略的創造研究推進事業 (ACCEL) でフォトリソグラフィ結晶レーザー (京都大学)、フォトリソグラフィ結晶スローライトを利用した光レーダー

（横浜国立大学）があり、平成 27 年より始まった 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基盤技術」領域にも複数ある。

フォトニクス応用に関連するナノ材料として、グラフェンに類似した h-BN、MoSe₂、MoS₂、WSe₂ 等の単原子層 2 次元物質をナノフォトニクスに適用する報告が増加しており、それらの物質が持つ大きな非線形性や巨大な励起子効果、偏光制御性などの物性が利用されつつある。またこれらの物質は Van der Waals 結合により多彩な材料を多層化してヘテロ接合を作ることができるため、新しい物性制御の可能性としても注目されている。カーボンナノチューブの研究でも、共振器構造との結合による発光特性の制御についての研究が多様化・高度化しており、積層型ファブリペロー共振器による強結合状態とポラリトン生成の報告や、走査ファイバ型ファブリペロー共振器によるパーセル効果の制御の報告などがある。また、ゲート制御による光パルス列生成や、チップ上に超伝導単一光子検出器と集積したナノチューブ電界発光素子におけるアンチバンチング観測などがある。材料面からは、欠陥導入技術が進展しており、オゾンによる欠陥導入から多様な有機分子を用いた欠陥導入へと展開しており、発光特性や単一光子生成効率の向上が認められる。ダイヤモンド NV 中心においては、2013 年に 3 m 離れた NV スピン間での量子もつれを実現して注目された Hanson が、2015 年の実験でこの距離を 1.3 km に大幅に延長して見せた。ダイヤモンド以外の材料中でも NV 中心と同等以上の光学・スピン特性を持つものを見つけることも活発化しており、炭化ケイ素 (SiC) 中の単一の複空孔 (divacancy) やイットリウム・アルミニウム・ガーネット中の単一希土類不純物 (Ce³⁺) において、ミリ秒のスピンコヒーレンス時間を観測している。欧州の Horizon 2020 においては、ダイヤモンド中の NV 中心や炭素の有する核スピンの分極率を大幅に増大させて MRI の超高感度化を図る目的で、HYPERDIAMOND プロジェクトが立ち上げられている。

(4) 科学技術的課題

2030 年頃に予想されるペタビット級のトラフィック需要に対応するために、現状の光通信技術におけるハードウェア的な限界であるファイバへの挿入パワーの増大に伴う非線形光学効果やファイバそのものが損傷するファイバフューズ現象、光増幅器の帯域限界などを如何にして打破するかが挑戦的な課題となっている。光ネットワークにおいては、CDC、ROADM やフレキシブルグリッド等の要素技術が今後本格的に導入されるのに伴い、それらの性能を最大限に発現するために SDN (Software Defined Network) を適用し、ネットワークの仮想化を推し進めて柔軟性をさらに高めていくことが課題である。加入者系においては、3.9 世代のブロードバンド無線アクセスが FTTH の契約数を上回っており、今後は急増する無線のトラフィックをバックホール回線 (基地局とコア網をつなぐ光回線) に効率よく収容するための光と無線のシームレスな融合が大きな課題である。

光インターコネクト応用を目指すシリコンフォトニクスにとって重要な指標は、高帯域密度 (Tbps/cm²、Tbps/cm)、低消費電力 (mW/Gbps、pJ/bit)、低コスト (\$/Gbps) である。高帯域密度化のためには高速化と高密度化が必要であり、前者は 400 Gbps 実現に向けた取り組みが行われているが、後者は特に光トランシーバに接続する光ファイバのピッチによって制限されていることが多く、この部分の研究開発を加速する必要がある。消費電力は主に LSI と光変調器/受光器間の電気配線の静電容量と電圧振幅で決まるため、低消費電力化の鍵はこの電気配線を短縮する実装構造・方法を電子デバイスの実装構造・方法

と整合させることにある。低コスト化のためには、シリコンフォトニクス製品を、既存のエレクトロニクス産業に整合させる必要がある。

ナノフォトニクスを応用した単体素子に関しては、近年多くの成果が得られており、劇的な小型化と低消費電力化が達成されているが、集積化に関してはまだ本格的な試みは少ない。MIT でシリコンフォトニクス技術を駆使して大規模な集積型フェーズドアレイを実現し、NTT で波長の異なるナノ共振器を 100 個以上集積することにより 100 ビット超える光 RAM の集積に成功している例はあるが、今後は集積化の本格的な取り組みが必要である。

ナノ材料を用いたデバイス研究では、完全に同一の構造を再現することが困難であるという根本的な課題がある。原子層の積層構造では、原理的には積層方向には同じ構造を再現可能であるが、面内方向のサイズまで揃えるためには単層膜を準備する段階で同一形状のものを量産する必要がある。カーボンナノチューブの研究では分光測定自動化により千本単位でカイラリティを同定することにより同一構造のみを測定対象とすることが実現しており、今後は評価技術の高度化も含めた作製プロセスの検討が必要である。一方、量子情報への応用として期待されるダイヤモンド NV 中心の研究における最大の課題は、ダイヤモンド薄膜とその中に存在する NV 中心の品質である。NV 中心を自由に制御できるようにするために、CVD 成長薄膜における NV 中心生成機構の解明と、成長条件の最適化が非常に重要である。

(5) 政策的課題

ビッグデータ・IoT に代表される超スマート社会の将来を見据えて、光ネットワークの高速大容量化・低消費電力化技術の確立に官民一体となって取り組む必要がある。高度な情報通信システムの研究開発は民間企業単独ではリスクが高いため、各機関が有する技術を結集し、国際標準化・製品化で我が国が主導権を握り国際競争力を維持・強化するための戦略的な研究開発が必要である。

シリコンフォトニクスの試作に関して、EU には Europractice (旧 ePIXfab)、シンガポールには IME、米国には AIM Photonics のファウンドリ (シャトル) サービスがあるが、日本には対応するものが無いのは大きな課題である。このようなファブは世界中の人、金、技術、情報等が集まるハブとして機能するため、シリコンフォトニクスに限らず、次世代の技術として期待されるナノフォトニクスやダイヤモンド NV 中心利用の量子情報デバイスなどの研究分野も含め、我が国の技術競争力向上、優秀な人材の確保・育成のためにも重要になる。

フォトニクス用のナノ材料の研究開発や、新たな研究領域としての量子情報に向けたダイヤモンド NV 中心などの研究開発においては、この領域が学際的な領域であることから、分野横断で多様な発想を持つ研究者が技術と知識を持ち寄る必要がある。分野横断的な研究を推進・奨励する研究環境作りを制度面から整えていくことが望まれる。

(6) キーワード

デジタルコヒーレント、多値変調、空間多重、SDN、オール光ネットワーク、シリコンフォトニクス、光配線、光インターポーザ、大規模光集積、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、ナノカーボン、ダイヤモンド NV 中心、量子情報、量子もつれ

(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	◎	→	- 次世代光通信技術の基礎研究が活性化し、デジタルコヒーレント、光 QAM、マルチコアファイバなど、日本発のオリジナルな技術が創出されている。 - 東大、東工大などでシリコンと化合物半導体や磁性材料等の接合技術、京大、横国大などで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。 - JST CREST でナノフォトニクス関連のプロジェクトが複数あり、プラズモニクス分野の研究が増加している。 - ナノチューブフォトニクス関連で京大、東大、産総研などが活躍している。 - 京大、横国大で量子情報の成果を上げつつある。NIMS、AIST の CVD ダイヤモンドは世界の試料供給の一端を担っている。
	応用研究・開発	◎	→	400G/1T への高速化に向けた研究開発が総務省、経済産業省主導で推進されている。また、主要な国際会議の発表件数から見ても存在感を示している。 - PETRA が NEDO 光エレクトロニクスプロジェクトで開発した光 IO コアの事業化を目指している。 - JST ACCEL においてフォトニック結晶のデバイス応用が複数ある。 - JST CREST で生体磁気計測システム開発、JST 先端計測分析技術・機器開発プログラムでポータブル NV センサの開発が進行している。
米国	基礎研究	◎	→	- シリコンフォトニクス・デバイス集積化で MIT、UCSB 等を中心に幅広い優れた研究が行われ、AIM Photonics を中核としてコミュニティも充実している。 - ナノフォトニクスに関して、MIT、Stanford 大などに世界をリードする研究者がいる。特に近年プラズモニクスや熱工学応用の研究が活発化している。 - ワシントン大学、スタンフォード大学、コロンビア大学、コーネル大学などで原子層材料のヘテロ構造デバイスの研究が著しい。 - NV 中心研究において、Harvard、Chicago 大学などで量子情報、高感度センシング研究で顕著な成果を上げており、層が極めて厚い。
	応用研究・開発	◎	↑	- Cisco、Ciena、Infinera が牽引してきた従来の伝送機器・スイッチに加え、Google、IBM、Intel 等によりデータセンタ用途へも研究開発が広がっている。 - AIM Photonics で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。光トランシーバで Luxtera、Mellanox が販売し、Intel 製品化を発表した。 - ナノフォトニクスのバイオ、センサ、太陽エネルギー応用で活発である - NV 関連のベンチャー・スタートアップが複数立ち上がっている。
欧州	基礎研究	◎	→	- Horizon 2020 の大型プロジェクトが推進され、厚い研究者層を誇っている。 - シリコンフォトニクスはベルギーの 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が伝統的に強く、理論研究者が指導的な立場を果たしている。 - ナノチューブフォトニクス関連でドイツ、フランスが成果を出し活発である。 - Stuttgart 大学、Ulm 大学が量子情報研究、高感度センシング研究の両方で世界をリードし、Delft 工科大学が量子情報研究で優れた成果を上げている。
	応用研究・開発	○	↑	- ネットワークに関する大規模な産学連携を展開している。 - Horizon2020 の中で総額 20M€ 程度のシリコンフォトニクス関係に当てられており、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、LETI 等にナノファブリケーション技術が結集し、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。 - Element Six 社が NV 中心研究の高品質ダイヤモンド試料供給を担っている。NV 関連のベンチャー・スタートアップが立ち上がっている。

中国	基礎研究	△	→	・近年、学会・学術雑誌等での発表件数が増加しているが、ISCAS の高速光変調器等の少数を除いて顕著な成果は見えていない。 ・プラズモニクス、メタマテリアルの論文発表は多いが、レベルの高い論文は少ない。一方、CAS などに最先端の加工技術装置が導入されている。 ・北京大学にナノチューブ材料やデバイス関連で複数の有力グループがある。 ・中国科学技術大学が量子情報研究、高感度センシング研究を行っている。
	応用研究・開発	○	↗	・Huawei、ZTE からの成果発表が増大している。 ・SMIC にシリコンフォトニクス用の製造ラインを構築している。 ・欧米から帰国した研究者を中心に応用研究が立ち上がりつつある。
韓国	基礎研究	△	→	・KAIST、ETRI が光通信の基礎研究を牽引し、研究のレベルは高いものの、研究者数が少なく、学会でのプレゼンスはまだ低い。 ・KAIST ではシリコンフォトニクス、ナノフォトニクスの基礎研究が行われており、数人の傑出した研究者が活躍している
	応用研究・開発	○	→	・光通信の先端技術の研究開発では遅れているが、加入者系は日本と同じく GE-PON がいち早く導入され、高いブロードバンド普及率に貢献している。 ・Samsung が CPU とメモリ間をシリコンフォトニクスで繋ぐ開発やナノフォトニクスの応用研究を活発に行っている。

(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レベル

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）のレベル

(註 2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 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) 中沢正隆，鈴木正敏，盛岡敏夫（編）「光通信技術の飛躍的高度化」オプトロニクス社（2012）
- 2) 総務省「我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算」
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000077.html
- 3) 株式会社 NTT データ経営研究所「平成 24 年度 我が国情報経済社会における基盤整備（IT 機器のエネルギー消費量に係る調査事業）報告書」
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2013fy/E002741.pdf
- 4) 鈴木扇太ほか「光通信ネットワークの大容量化に向けたデジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発」電子情報通信学会誌，vol. 95，no. 12，pp. 1100-1116（2012）。
- 5) テレコム先端技術研究支援センター「最近のフォトニックネットワーク技術の進展」
- 6) ePIXfab, <http://www.epixfab.eu/>
- 7) OpSIS, <http://opsisfoundry.org/>
- 8) フォトニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発, <http://www.pecst.org/>
- 9) 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,
http://www.petra-jp.org/pj_pecjs/
- 10) 総務省「巨大データ流通を支える次世代光ネットワーク技術の研究開発」
www.soumu.go.jp/main_content/000356283.pdf
- 11) NICT「エラスティック光アグリゲーションネットワークの研究開発」「エラスティック光通信ネットワーク構成技術の研究開発」
http://www.nict.go.jp/collabo/commission/itaku_4th_chuki.html
- 12) 光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点 <http://www.aist-victories.org/>

- 13) NICT 「革新的光ファイバ技術の研究開発」
http://www2.nict.go.jp/collabo/commission/keikaku/h22/146_keikaku.pdf
- 14) NICT 「革新的光通信インフラの研究開発」
http://www2.nict.go.jp/collabo/commission/keikaku/h23/150_keikaku.pdf
- 15) NICT 「革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発」
http://www2.nict.go.jp/collabo/commission/keikaku/h25/170_keikaku.pdf
- 16) SAFARI, <http://www.ict-safari.eu/>
- 17) AIM Photonics, [http:// www.aimphotonics.com/](http://www.aimphotonics.com/)
- 18) Haffner et al. “All-plasmonic Mach–Zehnder modulator enabling optical high-speed communication at the microscale”, *Nature Photonics* 9, 525 (2015).
- 19) Heni et al. “108 Gbit/s Plasmonic Mach–Zehnder Modulator with > 70-GHz Electrical Bandwidth”, *J. Lightwave Technol.* 34, 393 (2016).
- 20) Rios et al. “Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory”, *Nature Photonics* 9, 725 (2015).
- 21) Papaioannou et al. “Two-dimensional control of light with light on metasurfaces”, *Light Science & Applications* 5, e16070 (2016).
- 22) Raman et al. “Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight”, *Nature* 515, 540 (2014).
- 23) Zhu et al. “Radiative cooling of solar absorbers using a visibly transparent photonic crystal thermal blackbody”, *Proceedings of National Academy of Science* 112, 12282 (2015).
- 24) Illic et al. “Tailoring high-temperature radiation and the resurrection of the incandescent source”, *Nature Nanotechnology* 11, 320 (2016).
- 25) Lu et al. “Topological photonics”, *Nature Photonics* 8, 821 (2014).
- 26) Wu et al. “Monolayer semiconductor nanocavity lasers with ultralow threshold”, *Nature* 520, 69 (2015)
- 27) 桑野茂 「モバイル光ネットワーク」 電子情報通信学会誌, vol. 99, no. 7, pp. 678-683 (2016).
- 28) H. Bernien et al., “Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres”, *Nature* 497, 86 (2013).
- 29) B. Hensen et al., “Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres”, *Nature* 526, 682 (2015).
- 30) D. J. Christle et al., “Isolated electron spins in silicon carbide with millisecond coherence times”, *Nature Materials* 14, 160 (2015).
- 31) P. Siyushev et al., “Coherent properties of single rare-earth spin qubits”, *Nature Communications* 5, 3895 (2014).
- 32) Horizon 2020, HYPERDIAMOND, <http://www.hyperdiamond-project.eu/>

3.3.5 有機エレクトロニクス

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

有機材料を用いた高性能でフレキシブルなエレクトロニクスデバイスを実現する。プラスチック基板などの利用による大面積化・フレキシブル化・軽量化、塗布や印刷プロセスなどにより安価な作製が可能な有機トランジスタ回路、有機 EL ディスプレイ、有機 EL 照明、有機太陽電池、有機熱電変換などが注目されている。これらの実用化のためには移動度向上、発光効率向上、特性のばらつき改善、長期安定性の確保、低温プロセス、塗布・印刷プロセスの再現性・安定性向上、パターンの高精細化などの研究開発課題がある。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

有機分子を半導体材料として用いる有機エレクトロニクスは、従来の半導体では難しいガラスやプラスチックなどの基板にもデバイス作製が可能である。軽量化、超薄膜化、大面積化、フレキシブル化、低コスト化などが期待できる技術として注目を集めている。特に、従来の半導体製造プロセスとは異なり印刷法などの溶液プロセスを適用して素子の作製が可能であり、素子の面積化に加え製造プロセスの飛躍的な省エネ化・低コスト化の実現が期待される。これらの優れた特徴から、将来的に世界規模で広く普及し、大きな市場の形成が期待される分野である。有機エレクトロニクスは、有機固体の弱い凝集力を利して低温・低エネルギープロセスで製造できることが特徴であり、有機材料ならではの無限の分子設計の可能性を秘めており、各種のエレクトロニクス分野への適用が可能である。主な研究開発ターゲットとしては、有機 EL (Electro Luminescence)、有機トランジスタ、有機太陽電池の三分野があるが、近年、熱電変換に関する研究もさかんになってきている。これらはいずれも、モバイル用途を前提とした多様なパーソナル電子デバイス、さらには近年急速に広がりを見せる IoT (Internet of Things) の隆盛により、薄く・軽く・安いといった特徴を持つ有機デバイスの実用化が期待されている。2030 年の有機エレクトロニクスの世界市場は、ディスプレイや照明の拡大と、有機系の太陽電池や半導体などが本格化し、約 7 兆円と予測されている。

実用化に成功した有機 EL ディスプレイ、実用化に向けて本格始動した有機 EL 照明、実用化を指向した有機太陽電池など、有機エレクトロニクスの分野でも実用化が現実のものとなってきている。このような動向の背景には、単に有機半導体材料による従前のシリコンエレクトロニクスの代替ではなく、有機エレクトロニクス特有の機能性を最大限に活かしたデバイス開発があると言える。有機エレクトロニクスの中核的デバイスである有機 EL は、他の用途に先駆けて実用化が進み、市場が急速に拡大している。有機エレクトロニクスの発展・普及には、既存製品とのコスト競争や更なる技術課題の克服が求められるが、近年の大幅な効率や素子寿命の改善等により普及への道筋も見えてきている。

有機 EL 分野では、継続的な材料開発により着実に性能および信頼性の向上が見られている。照明用途ではコニカミノルタが本格工場による樹脂基板フレキシブル有機 EL 照明パネルの量産開始を発表した（2014 年 3 月）。また、三菱化学とパイオニアは共同事業会社による発光層塗布型の有機 EL 照明モジュールの量産開始を発表した（2014 年 3 月）。ディスプレイ用途については、産業化において韓国・台湾に遅れを取っているが、ソニーとパナソニックが共同で JOLED 社の設立を発表し（2014 年 7 月）、主に中型以上のディ

スプレイをターゲットとして数年以内の量産化を計画している。

有機トランジスタ分野では、日本に端を発する材料と成膜技術により、塗布膜の方が蒸着膜よりも高移動度となることが半ば常識化してきている。米ネブラスカ大学らのグループからは塗布膜の有機 FET で移動度 $43 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ が報告されるなど、有機半導体材料のポテンシャルがかなり高いものであることが示されてきている。実用化面においては、より広い領域をカバーする「プリンテッド・エレクトロニクス」分野との融合により、電極や封止層などを含めて「オール印刷で」作製する技術が確立されてきている。従来検討が進められてきたフレキシブルディスプレイの駆動回路よりも、近年は、生体センシングなどのバイオエレクトロニクス分野への展開が進んでいる。

有機薄膜太陽電池の分野では、東芝が単層セルで 11.2%、5 cm 角モジュールで 9.9% を達成し（2014 年 7 月）、実用化に向けたテストも行われている。三菱化学と 3M は、半透明で窓に貼り付けることができるフレキシブル有機太陽電池を roll-to-roll で生産する技術を確認し、実証試験を始めている（2015 年 8 月）。有機薄膜太陽電池の具体的なターゲットとして、建材への応用例が多くなってきている。学術研究においては、劇的な性能向上は一段落した感があるが、理論限界を意識した性能制限因子の解明や新系統材料の探索により、つぎのブレークスルーに向けた検討が行われている。

有機熱電変換の分野は、1990 年代から基礎研究が続けられてきたが、導電性高分子である PEDOT:PSS 系を改良することで性能が飛躍的に向上し注目を集めるようになった。廃熱を有効に利用するためには大面積、フレキシブルという有機材料の性質は利点が多く、今後の発展が期待される。本分野は、日本が研究をリードしている点も注目に値する。

光電変換技術を環境発電（エネルギー・ハーベスティング）へ展開する新たな試みも進んでおり、リコーが室内の微弱な光源における発電性能を大幅に向上させた完全固体型色素増感太陽電池を開発している。

海外動向として、米アップル社が 2018 年にも同社スマートフォン（iPhone）に有機 EL ディスプレイを採用する見通しであることが報じられ（2015 年 11 月）、これまで液晶パネル一色であったディスプレイ業界の潮目が大きく変化しつつある。有機 EL ディスプレイ分野では韓国および台湾勢が強く産業化が進んでおり、Samsung ではスマートフォンへの搭載が常套化する一方、LG エレクトロニクスが初の普及価格帯での 55 インチ有機 EL テレビを発売（2015 年 11 月）、Lenovo がノートパソコンのディスプレイに採用する（2016 年 8 月）など、小型から出発した実用化は着実に大型化の道を進んでいる。一方、欧州においては、EU 圏全体にまたがる有機エレクトロニクスプロジェクトが継続して走っており、大学・企業・ベンチャーが密接に連携してさまざまな実用化の試みが行われている。欧州では、有機エレクトロニクス分野からプリンテッド・エレクトロニクスへとターゲットを広げて、新たな産業として実用化に結びつけようという強い姿勢がうかがえる。

今後の有機エレクトロニクスの研究開発は、従来以上に開発スピードが上がると考えられ、早期の戦略的な取組みが極めて重要となる。本格的な市場形成を志向する場合、新たな枠組みでの産官学連携による取組みが必要であり、技術力の高い日本だからこそ創造できる新しい社会や市場を見据えたトータルシステムとして捉えていくことが重要である。有機 EL ディスプレイをはじめとした有機エレクトロニクス技術が産業化し「ダーウィンの海」を越えるためには、材料面および製造面での革新的技術を創出して、大幅なコスト

削減を行い、低価格化を実現することも必要である。有機 EL のディスプレイでは大型基板への製造に対応するため、照明では LED 照明に対抗して決定的にコストを下げるために、いずれも本格的に塗布プロセスへのシフトが必要である。有機 EL ディスプレイは画面面での評価は得られているが、消費エネルギーについてはまだ十分とは言えないため、液晶に対して決定的な優位性を発揮するためにも省電力化（高効率化）が重要となる。有機トランジスタ分野については、フレキシブル・プリンタブルを武器に、本当に有機半導体回路でしか実現できないようなキラーアプリケーションを探索する必要がある、バイオエレクトロニクス分野での本格的な実用化が今後の鍵を握ると考えられる。有機薄膜太陽電池については、ペロブスカイト系太陽電池の勃興も踏まえ、実用的太陽電池のベンチマークである変換効率 20% を実現する新たな取り組みが必要であり、特に、電荷分離に伴う電圧損失の低減、厚膜にしても性能が低下しない材料の開発が必要と考えられる。併せて、環境発電分野への展開を早期に進めていくことも重要である。

一方、有機 EL、有機太陽電池、有機トランジスタ等の直近の実用化を指向した研究とは別に、将来を見据えた息の長いシーズ志向型の有機エレクトロニクス研究を推進することも必要と考えられる。国家プロジェクト等の施策や企業連携等の総合的な取組みで競争力を強化する試みが求められる。具体的には有機熱電変換、有機半導体を用いたタッチパネルなどのデバイス、電子ペーパー、デジタルサイネージ、RFID やセンサなどが考えられている。また、有機エレクトロニクスの特徴である薄さや柔軟性を活かし、曲面に設置できる意匠性に優れた太陽電池や人体に沿う形状の医療用センサなど、これまでにない製品の実現やアプリケーションの創出が期待される。超軽量・フレキシブル・安価という有機エレクトロニクスの特徴は、急速に発展しつつある IoT 分野との親和性が高いと考えられるため、今後、新たに現れる応用分野に有機エレクトロニクス技術を迅速に投入していくフットワークが重要になってくると考えられる。

材料技術的には、塗布プロセスとの親和性を意識した分子集合体の構造制御に取り組む必要がある。単一分子レベルの物性は計算科学・シミュレーション技術の向上によりかなり予測可能となり、高精度な分子設計が行えるようになってきているが、薄膜などの分子集合体の構造制御については、適用範囲がまだ限られている。有機エレクトロニクスで使われる π 共役電子系は平面的で本質的に異方性が強いことから、この分子集合体の制御こそが、今後の性能向上のブレークスルーに必要となってきた。

(3) 注目動向

有機 EL の分野では、九大のグループによって報告された熱活性型遅延蛍光 (TADF) 現象に基づいた発光材料の研究が大幅に進展し、貴金属を含む燐光材料を用いない新たな高性能発光材料群を形成し始めている。特に高性能青色発光材料については、有機 EL の実用化の観点からも開発動向に注目が集まっており、大きな変化が起こることが予想される。低コスト生産にむけて本格的に塗布積層型の高効率有機 EL の研究については、引き続き山形大のグループで進められており、素子レベルの効率で見た場合、蒸着系との差は縮まってきている。

有機トランジスタ分野では東大のグループを中心に、フレキシブル回路の概念を究極的に推し進めることにより、「しわくちゃにしても壊れない」「身につけても気付かない」というレベルにまで昇華できることが実証されてきている。これにより、生体適合回路やバ

イオセンサなどの新たな応用分野が開拓されてきている。また、山形大のグループではオール印刷によるフレキシブル有機トランジスタ回路の作製技術が確立されてきており、これらを使った生体センサへの応用が検討されている。トランジスタ用材料としては近年ポリマー材料の性能向上がめざましく、 $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える極めて高い移動度の材料が報告されている。高分子材料の本来の特徴である、高分子鎖内伝導の活用が今後のブレークスルーとなる可能性がある。

有機太陽電池分野に関しては、バルクヘテロ型素子の成熟が進むにつれて、光吸収エネルギーに対する開放端電圧のロス（光電圧ロス）が問題視されるようになってきており、その損失メカニズムの解析と軽減するための材料開発がさかんになっている。一方、これまでフラーレン系誘導体一辺倒であったアクセプタ（n 型半導体）材料について、非フラーレン材料の探索が急速に進みフラーレン誘導体に匹敵する性能も報告されてきている。また、環境発電分野への展開も進みつつある。

注目すべきプロジェクトとしては、国内では引き続き、JST の「戦略的イノベーションプログラム」において、有機 EL 照明、有機薄膜太陽電池、有機トランジスタを用いた印刷回路のプロジェクトが走っており、学術研究の牽引役となっている。また、JST の ERATO「染谷生体調和エレクトロニクスプロジェクト」（東大、2011 年～）では有機半導体回路の柔らかさを活かした新たな応用に向けて、「安達分子エキシトン工学プロジェクト」（九大、2013 年～）では、TADF に基づくさらなる有機 EL の飛躍に向けた取り組みが進められている。JST の COI プログラム「フロンティア有機システムイノベーション拠点」（山形大、2013 ～）においては、有機エレクトロニクス技術を総合的に利用した、快適社会実現への取り組みが進められている。関連して、キューラックス、パイクリスタル、フューチャーインク、コロイダル・インクなどの大学発ベンチャー企業の設立も近年活発化してきており、今後の動向が注目される。

欧州においては、EU の第 7 フレームワークプログラム（FP7）に基づき、有機 EL 照明に関する IMOLA（Intelligent Light Management for OLED on foil Applications）プロジェクト（2011 年～）や、本格的な実用化研究を行う COLAE（Commercialisation of Organic and Large Area Electronics）プロジェクト（2014 年～）がスタートし、EU 圏全体を巻き込んで、有機エレクトロニクスおよびその周辺分野の実用化を強力に推進している。米国においては 2015 年に、米国防総省が主導する官民共同プロジェクトとして FlexTech Alliance が設立され、シリコンバレーのサンノゼを中心に、有機エレクトロニクスに限らずフレキシブルでウェアラブルなデバイスを実現することを目指して大規模な研究開発がスタートしている。

（4）科学技術的課題

さまざまな分野での応用への期待から、有機エレクトロニクスのグローバル競争が近年激化している。国を挙げての研究開発支援も活発化しており、日本では経済産業省が有機 EL やプリンテッド・エレクトロニクス技術に、米国ではエネルギー省が有機 EL に、欧州では欧州委員会の研究助成制度においてディスプレイ、電子ペーパー、RFID に、韓国では知識経済部が有機 EL に大規模な研究投資を行ってきた経緯がある。このような状況の中で、日本の強みである材料・素材開発を核として、どのようにして優位性や独自性を保ちつつ市場形成を行っていくかが、今後グローバル競争で勝利する鍵となる。また、次

世代有機エレクトロニクスの特長を活かした新規アプリケーションの開発による、新規需要の創出も同時に進めていくことが強く求められる。

(5) 政策的課題

国内においては、個々の研究グループ及び企業は高い技術を有しているものの、実用化、産業化に舵を切るためには「オールジャパン体制」を実現するための強い求心力が必要である。EUのような巨大水平連携、韓国のような強力な垂直統合に太刀打ちできる政策が必要であり、基礎研究から実用化研究まで、プレイヤーを増やして研究の裾野を広げ、実用化に向けた産学連携の仕組みの構築や拠点形成、ベンチャー企業創出の支援などが必要不可欠と考えられる。

(6) キーワード

有機 EL、有機トランジスタ、有機半導体、有機太陽電池、有機熱電変換、プリンテッド・エレクトロニクス、フレキシブルデバイス、バイオエレクトロニクス

(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	◎	↑	日本の有機エレクトロニクス分野の基礎研究は、これまで個別の研究機関や企業の継続的な努力によって高い水準を維持しており、現在も活発である。有機 EL 分野においては、九州大学と山形大学が基礎から応用研究までを牽引してきている。九大のグループは熱活性化型遅延蛍光という新概念を提案し、新しい材料の潮流を作っている。有機トランジスタ材料およびプロセスに関しては、理研のグループによる世界最高の材料と、東京大学や産総研による新たな成膜技術により、塗布膜で移動度 $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上が実現されている。有機太陽電池に関しては材料分野が強く、基礎的な物性や解析などについてはやや後れを取っている。フレキシブル・エレクトロニクス関連では、東京大学や産総研がリードしている。
	応用研究・開発	◎	↑	有機 EL 照明に関しては、産官学での応用研究・開発に対する取組が活発である。塗布型有機 EL 照明を実現するための新しい材料群と、高性能化には必要不可欠な塗布積層膜の作製技術の提案が山形大のグループで行われている。有機トランジスタ分野については、東大のグループを中心に、極薄、超フレキシブルな回路の開発が行われており、生体適合回路への展開が検討されている。また、山形大ではプリンテッド・エレクトロニクスとの融合を本格的に進めて、オール印刷回路を実現している。有機薄膜太陽電池においても企業（三菱化学、東レ、東芝など）を中心とした精力的な応用研究が進められ、世界最高水準の 10% 以上の変換効率が得られてきている。これらの優れた基礎・応用研究成果を産業化へと結びつけていく国家的な取組みや施策が望まれる。 基礎研究では高い優位性を有しているが、技術開発成果が出始めた頃に日本企業は相次いで有機 EL ディスプレイ事業から撤退した経緯もあり、有機エレクトロニクス分野全般に対して日本勢は実用化に対しては慎重姿勢である。有機 EL ディスプレイについては、材料では出光興産が安定的にビジネスを展開しているが、パネルの実用化については遅れている。中型ディスプレイをターゲットとして JOLED が設立されるなど、産業化に向けての準備が整いつつある。有機 EL 照明についてはコニカミノルタや化学メーカーを中心に商品化が相次いでおり、今後の発展が期待される。有機太陽電池については、フレキシブル・半透明を武器に実証試験の段階でまで来ているが、商品化にはもう少し時間がかかりそうである。有機トランジスタについては、フレキシブルに重点を置いて多数の企業が参画しているものの、未だ実用化には至っていない。
米国	基礎研究	○	→	有機 EL 分野においては、1998 年にリン光材料を先駆けて開発し、大幅な発光効率の向上を実現しており、着実に技術開発を進めている（UDC（Universal Display Corporation）など）。 有機薄膜太陽電池の研究開発は依然活発であり、特に高分子系ではカリフォルニア大学バークレー校が中心となって基礎研究を牽引している。しかしながら全体としては、大学の基礎研究の割合はやや減少する傾向にある。

米国	応用研究・開発	◎	→	米国エネルギー省（DOE）の予算で、「Solid State Lighting（固体照明）」が、2020 年までの長期目標で進行中であり、有機 EL 照明の研究開発が進められている。有機太陽電池の研究開発では、バルクヘテロ素子のルーツである UCSB や UCLA などのグループが、近年の急速な高効率化の中心となっている。また、産業化に直結するわけではないが、新しい展開を生み出すような挑戦的な応用研究も多数行われている。例えば、Stanford 大のグループは有機結晶薄膜を作製するさまざまな手法を提案している。また、米国防総省の主導で FlexTech Alliance が設立され、有機に限らず、フレキシブル・プリンタブルエレクトロニクスの大規模な実用化研究開発プロジェクトがスタートしている。 塗布型有機薄膜太陽電池を実用化した米国ベンチャー企業 Konarka は 2012 年に倒産している。産業化を行っている米国をベースとする当該分野の大企業は少ない。ベンチャー企業としては、有機 EL 材料を提供する UDC、有機半導体材料を提供する PolyEra、有機太陽電池を製造する Solamer などが挙げられる。
欧州	基礎研究	◎	→	有機 EL、有機トランジスタ、有機太陽電池、いずれの分野においても、大学を中心とした主要な拠点が複数あり、先端技術の裾野を広げるような基礎研究が盛んである。特に、デバイスの基礎物性や理論的な解析などに強い。ドイツのザクセン州には 20 の研究施設および約 40 社の企業を含む、欧州最大規模の有機エレクトロニクス、フレキシブル・エレクトロニクスのクラスターが形成されている。イギリスでは、ロンドン大学、マンチェスター大学、ケンブリッジ大学などに、プリンテッド・エレクトロニクス COE 拠点（Center of Excellence）が設けられている。フランスでも仏 CNRS などを中心として拠点形成が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	EU の国際競争力強化プロジェクトである FP7（2007 年～ 2013 年）において、「有機材料と大面積エレクトロニクス、表示およびディスプレイシステム（Organic and large area electronics, visualization and display systems）」の技術開発が進められた。2004 年に設立され、現在 230 以上の企業が参加する Organic and Printed Electronics Association（oe-a）が安定的に運営されており、Fraunhofer Institute や IMEC のような実用化研究拠点と大学が密接な連携を取る体制ができています。産業化がまだ進んでいない有機トランジスタ分野などにおいてもハイレベルなプロトタイピングが行われており、それらの技術が無理なくベンチャー企業などへとつながっている。また、大手エレクトロニクス企業（フィリップスなど）がプリンテッド・エレクトロニクスの技術開発に力を入れている。 EU 圏全体にまたがるプロジェクトにより、材料から生産プロセスに至るまで、各工程に対応するベンチャー企業が多数立ち上げられており、産業化に向けて極めて具体的で実践的な検討が進んでいる。大手メーカーとしては、独 Osram や独 Siemens などが有機 EL 照明を中心に製品化を行っている。 ドイツの化学系企業 BASF は有機系材料を重視しており、有機 EL（OLED）、有機薄膜太陽電池（OPV）、プリンテッド・エレクトロニクスの 3 つを重点技術開発テーマに掲げている。EU 加盟 27 カ国は「2012 年までの白熱電球廃止に合意」しており、有機 EL 照明にも力を入れている。
中国	基礎研究	○	↑	膨大な論文発表数を背景に、徐々に独創的な研究成果も増えてきている。特に材料開発においては、その圧倒的な研究スピードにより多くの新規材料が生み出され、特に有機トランジスタ用高移動度材料では存在感を増している。豊富な資金を背景に、大規模な設備投資・研究拠点形成が推進されており、今後、研究水準はさらに上がってくると考えられる。依然として、大学や研究所における研究の中心は EL デバイスにあるが、有機太陽電池や有機トランジスタに関する研究も増加している。
	応用研究・開発	○	↑	基本的には、性能向上のための材料バリエーションを増やす研究が中心であるが、フレキシブル化や集積化などの応用研究も増えてきている。中国はこれまで有機 EL 分野（ディスプレイパネルおよび照明）に対して様々な支援を行ってきており、研究対象の中心は有機 EL ディスプレイパネルであったが、最近では照明分野への展開に向けての支援も拡大している。 中国では有機 EL 照明分野はまだ立ち上がったばかりであるが、ディスプレイパネル分野では活発な動きを見せている。2011 年に国内有機 EL 企業関連企業が参画し「中国有機 EL 産業連盟」を設置しており、今後有機 EL 用材料の開発にさらに注力し、政府もサポートを強化すると考えられている。
韓国	基礎研究	○	→	韓国は、ディスプレイ業界における地位高めるための国家的戦略に基づいて特に有機 EL 分野の研究開発を強く推進してきた経緯がある。samsung、LG などの財閥系大手企業が、垂直統合で基礎研究まで行う傾向が強いため、応用研究を補完するような基礎研究が多く、根本的に新しい研究は少ない。

韓国	応用研究・開発	◎	↑	Samsung、LG やその系列会社による、有機 EL 用の高効率・長寿命材料の開発、有機トランジスタを用いたバックプレーンの開発、フレキシブル回路の開発など、実用化に直結する応用研究が非常に盛んである。Samsung は中小型の高精細ディスプレイ、LG は大型・湾曲型や半透明ディスプレイなどの高付加価値製品の開発を指向している。大学においても有機 EL ディスプレイおよび照明に関する多数のプロジェクトが進められている。 日欧米の有機 EL の基礎技術開発の成果をテコにして、有機 EL ディスプレイ事業における産業技術の集積化、巨額投資により、現在のところ独占状態を誇っており、Samsung と LG の争いという構図になっている。Samsung は有機 EL ディスプレイを自社のスマートフォンへ採用することにより事業化に成功しており、LG は 77 インチ 4K の湾曲型有機 EL テレビを普及価格帯で発売している。また、次世代照明の開発と普及／促進も進めており、有機 EL 照明の実用化も着実に進んでいる。
----	---------	---	---	---

(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レベル

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）のレベル

(註 2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 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) コニカミノルタ㈱、「世界初 樹脂基板フレキシブル有機 EL 照明パネル量産工場を建設 ロール・ツー・ロール方式で本年秋より量産開始」(2014/3/18)
http://www.konicaminolta.jp/about/release/2014/0318_01_01.html
- 2) パイオニア㈱、「発光層塗布型有機 EL 照明モジュールの量産出荷を開始」(2014/3/19)
<http://pioneer.jp/corp/news/press/2014/pdf/0319-1.pdf>
- 3) ソニー㈱、「有機 EL ディスプレイパネルに関する統合新会社（株式会社 JOLED）設立について」(2014/7/31) <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201407/14-0731/>
- 4) “Ultra-high mobility transparent organic thin film transistors grown by an off-centre spin-coating method”, Nature Communications, 5, 3005 (2014).
- 5) “Fully-printed high-performance organic thin-film transistors and circuitry on one-micron-thick polymer films”, Nature Communications, 5, 4147 (2014).
- 6) ㈱東芝、「有機薄膜太陽電池モジュールで世界最高効率 9.9%を達成」(2014/7/31)
http://www.toshiba.co.jp/rdc/detail/1407_02.htm
- 7) 三菱化学㈱、「シースルー有機太陽電池フィルムの市場開拓を開始」(2015/8/7)
<http://www.m-kagaku.co.jp/newsreleases/00274.html>
- 8) “Engineered doping of organic semiconductors for enhanced thermoelectric efficiency”, Nature Materials, 12, 719 (2013).
- 9) ㈱リコー、「室内光に適した高性能の完全固体型色素増感太陽電池の開発に成功」(2014/6/11) https://jp.ricoh.com/release/2014/0611_1.html
- 10) 「アップル、iPhone に有機 EL 採用」、日本経済新聞、2015/11/26 朝刊
http://www.nikkei.com/article/DGKKASDZ25I3A_V21C15A1MM8000/
- 11) “Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence”, Nature, 492, 234 (2013).
- 12) “An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics”, Nature 499, 458

(2013).

13) “Non-Fullerene Polymer Solar Cells Based on Alkylthio and Fluorine Substituted 2D-Conjugated Polymers Reach 9.5% Efficiency”, J. Am. Chem. Soc., 138, 4657 (2016).

14) ㈱ Kyulux、<http://www.kyulux.com/ja/index.html>

15) パイクリスタル㈱、<http://pi-crystal.com/>

16) 科学技術振興機構、<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20160517-2/>

17) ㈱ C-INK、<http://cink.jp/>

3.3.6 MEMS・センシングデバイス

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

高速な無線通信機能に加え高度な演算機能・タッチパネルなどを備えたスマートフォンが普及したことで、容易にモバイルセンサシステムを組むことができるようになってきた結果、加速度、温度、気圧などの様々な物理センサがカメラや GPS と共にスマートフォンに組み込まれ、人々の役に立つデータを容易に活用できる環境が整ってきた。また、様々なセンサを社会インフラや部品・装置・工場などに設置し、それらの情報から効率的な保守管理やバリューチェーンの構築に利用する動きが活発化している。このように近年では様々なセンサからの情報を活用する IoT が急速に注目を集めており、今後のスマート社会 (Society 5.0) においては IoT が果たす役割は極めて大きい。これは製造業革新を目的とした GE の Industrial Internet やドイツの Industry 4.0、米国のセンサ業界 (MSIG : MEMS & Sensors Industry Group) による Trillion Sensors の活動とも共通する。IoT の社会的意義は、超高齢化社会における予防医療促進と医療費削減、老齢化が進む社会インフラの効率的維持、エネルギー消費の効率化と CO₂ 排出削減、交通の効率化による渋滞・交通事故・大気汚染などの諸問題解決、農業や漁業のハイテク化による食糧問題の解決、地震・台風・噴火等の災害への対策とそれによる減災など極めて広範に渡る。

IoT を構成する主要な技術要素は、センサ、ネットワーク (Fog、Cloud)、およびビッグデータ解析システム・人工知能 (AI) であり、かつてはセンサネットワークとも呼ばれていたように、センサが重要な役割を果たす。現在、年間 100 億個以上のセンサが出荷されており、それらの多くがスマートフォン等を介してインターネットに接続されている。Trillion Sensors はこのセンサの数を 2025 年頃までに 100 倍 (1 兆個) にしようとするものである。これを推進している MSIG は関連する企業の経営者や技術トップ、および業界のキーパーソンのネットワークを形成し、ビジネス機会を提供しており、我が国の MEMS 業界ボランティアが主催する MEMS Engineer Forum (MEF) とも連携している。

現在、センサのほとんどが MEMS 技術によるものである。最新のスマートフォンを例にとると、マイクロフォン、加速度センサ、ジャイロスコープ、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。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 などのセンサも搭載されている。今後、セキュリティの問題がより重要になると考えられ、MEMS 指紋センサの導入や、高性能マイクロフォンによる声紋認識、画像解析による認証なども利用される。

近年、これらのセンサの技術革新が進み、低コスト化が進んでいる。たとえば、加速度センサの大きさは、最近 5 年でダイの面積は 1/10 になっており、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にはパラダイムシフトをもたらし、その代表例がスマートフォンであり、次が IoT と考えられる。今後も技術革新による低コスト化が最も重要な研究課題の 1 つである。

センサを必須とする応用分野は IoT の他にも、自動運転、ロボット、健康・医療、音声認識による自動翻訳などがある。自動運転には高性能ジャイロスコープ、高精度 GPS、LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)、赤外線イメージャー、運転者の状態を把握するセンサ（視線センサ、アルコールセンサ、心拍センサなど）が必要である。また、ロボットにおいても工場で人間と協調して作業を行ったり、介護、生活支援など生活の場で利用されたりすることから、人間とのスムーズな連携や安全性の確保のために、より多くの触覚センサ、超音波センサ、加速度センサなどが必要になる。自動運転やロボット用センサでは、現時点では高性能化や高機能化が大きな研究課題であるが、同時に低コスト化も大きな課題である。高性能ジャイロスコープなど従来の高価なセンサが MEMS 技術によるものに置き換えられ、破壊的な低コスト化がもたらされることが期待される。米国 DARPA が注力している MEMS の研究開発対象は、継続して高性能ジャイロスコープと高精度時計（原子時計など）である (Microscale Rate Integrating Gyroscope [MRIG] program)。

健康・医療分野では、上述の物理的なセンサだけでなく、化学的に検出する化学センサが必要である。医療分野で使われる化学センサの多くは一般的な物理センサと比べ複雑であり、また使用や保管に当たり専門的な知識を必要とする場合が多いため、高価な分析機器には使えても個人ユースに使えるような化学センサは極めて限られている。物理センサと同程度に使い易くなる可能性を持つ化学センサには、イオン感応性電界効果トランジスタ (Ion-Sensitive Field Effect Transistor: ISFET) がある。これは MOSFET におけるゲート電極部分で溶液中のイオンの電荷を検出するものであり、Twente 大学の Bergveld により 1970 年に発明され、1971 年に東北大学の松尾、江刺らにより参照電極設置などの改良が行われ、定量的なイオンセンサとして実用化された。ISFET は MOSFET と類似の構造を持つため、多数の物質を同時に測定するマルチセンサに適していると考えられたが、複数のイオンに対して高い選択性を保つ界面の開発が困難であり、LSI 技術によるマルチイオンセンサの実用化は見送られている。ISFET はゲート絶縁膜上に酵素、抗体、核酸などの分子認識素子を固定化することで特定の生体物質を検出するバイオセンサになる。抗体は高いターゲット分子選択性を持つが、所望の抗体が必ず得られるとは限らず低温での保管が必要等の欠点を持つ。一方、人工核酸アプタマは SELEX 法と呼ばれる進化工学的手法により高い確率でターゲットと特異的に結合するものを合成でき、室温保管が可能である。さらに、負の電荷を持つためターゲット分子が電荷を持たなくても捕捉した時のアプタマの変形が電気信号になるため、アプタマと ISFET の組み合わせは将来のマルチバイオセンサに適していると期待される。

IoT 社会では、大量のセンサがインターネットに繋がり、大量のデータがインターネット上でやり取りされる。このとき、通信容量、特に無線通信容量の不足が大きな課題である。無線通信に適した周波数は数百 MHz から 6 GHz の領域であり、新たに無線通信に割り当てられる帯域はあまり残されていない。次世代通信規格 5G では、3.5 GHz 帯と 5 GHz 帯の一部、さらに高い 28 GHz 帯が新たに使えるようになる予定であるが、周波数が従来

の 900 MHz ～ 2 GHz 帯より高いため、周波数選択フィルターの高い技術が要求される。現在、周波数選択フィルター（デュプレクサーも含む）には、SAW（Surface Acoustic Wave）フィルターと BAW（Bulk Acoustic Wave）フィルターが使われているが、高い周波数には後者の MEMS 技術による FBAR（Film Bulk Acoustic Resonator）フィルターが有利である。ただし、薄板上に伝播する弾性波を用いた SAW フィルターと BAW フィルターの中間の構造のフィルターも開発（たとえば、村田製作所、東北大学）され、極めて高い性能を示している。また、その先には、割り当て済みの周波数（デジタルテレビ帯域など）を空いているときに限って WiFi や携帯電話に 2 次利用するコグニティブ無線の実現も期待されており、周波数選択デバイスはチューナブル化されるなど、より複雑・高度になる。現在、年間 80 億個程度の弾性波フィルターが出荷されているが、需給がひっ迫し ASP（Average Selling Price）は高止まりである。今後は、より高度なフィルターが大量に求められるため、研究開発競争は国際的に（米国・日本・欧州で）益々激しくなっている。ビジネスの観点からは、弾性波フィルターはいくつかの周波数分をまとめ、さらにアンプなどと組み合わせたモジュールとして販売する必要があるため、開発には一昔前より桁違いに多くのリソースが必要とされている。このため、2015 年に FBAR フィルタ最大手の Avago Technologies（米国）が Broadcom（米国）を約 370 億ドルで買収したり、TriQuint Semiconductor（米国）と RF Micro Device（米国）が合併して Qorvo が誕生したりしており、業界再編も激しい。

（3）注目動向

（IoT のプラットフォーム）

ディープラーニングなど AI 研究が活発になり、関連するハードウェアとソフトウェアが急速に進歩しているが、それに基づくイノベーションとして注目を集めているのが音声認識である。たとえば、すでに情報端末として製品化されている Amazon Echo には、センサとして MEMS マイクロフォンが 7 つ搭載され、フェーズドアレイ技術によって発声の方向を特定し、離れたところからでも高い聞き取り精度を実現している。さらに、このようなプラットフォームにレーザーや超音波によるレンジファインダー機能が搭載されれば、多彩で自然なインターフェースが可能になるだけでなく、会話と合わせて人の動きや生活の様子もデータとして集めるシステムとなる。このようなレンジファインダーも MEMS 技術を用いて実現でき、米国ではベンチャー企業による事業化も進んでいる。

現在、IoT のプラットフォームであるスマートフォンからのデータを牛耳れる最も優位な立場にあるのは、OS を提供している Apple と Google である。スマートフォンに並ぶデータ収集のプラットフォームのハードウェア（MEMS センサの塊）を持ちうるかどうかは大変重要であり、Google が 32 億ドルでハイテクサーモスタットのベンチャー企業 Nest を買収した意図はそこにある。

（プリンテッドエレクトロニクス）

現在、品質の揃ったセンサを大量かつ低コストに製造できる技術は MEMS 技術だけである。ウェハー技術で作られる MEMS は、他の半導体デバイスと同等にダイが小さいほど安くなるが、裏を返せば、大きな MEMS デバイスはほとんどの場合は経済的に成立しないことを意味する。したがって、アンテナ、身体の一部領域を覆うパッチ型デバイス、タッ

チセンサなど広い面積をカバーする必要があるデバイスとしては、一般的にはMEMSは不向きである。例外としては、バス通信機能を持ったLSIと集積化して、バスネットワークで広域をカバーするMEMSセンサがある（東北大学）。このような大面積デバイスには、プリントエレクトロニクス技術が好適である。この分野の代表例としては、JST ERATO「生体調和エレクトロニクスプロジェクト」があり、厚さ2 μm の極薄電子回路などが実現されている。また、旭化成は、Roll-to-Rollプロセスでサブミクロン幅のパターニングに成功し、現実的な動作速度の電子回路を形成するための加工技術で先行している。東京大学の染谷教授らは、フィルムの上に電子回路、センサ、LED、太陽電池など、様々な要素が形成できることを実証し、これらを組み合わせればフィルムだけの真のフレキシブルエレクトロニクスが実現できることを示した。しかし、多くの応用ではフレキシブルエレクトロニクスとシリコンデバイスとを組み合わせる形態が現実解になると思われ、LSIやMEMSなどのシリコンデバイスとフレキシブル／プリントエレクトロニクスとは補完関係にある。プリントエレクトロニクスのもう1つ重要な特徴は、面積あたりの加工費を桁違いに低くしうることがある⁵⁾。仮に比較的小さな面積（たとえば1 cm 四方）で実用的に意味があるデバイスが製作できれば、従来より桁違いに安くできる可能性を秘めている。

(4) 科学技術的課題

MEMS・センシング分野の代表的な技術的挑戦課題は、ダイ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。この中で、S/N比を上げるためには、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。

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、おおそ物理的センサである。しかし、バイオマーカーの検出、呼気の分析、空気中汚染物質の濃度測定などを低コストで行うためには、ソリッドステート化学センサが必要である。実用的なソリッドステート化学センサとしては、ISFET (Ion Sensitive FET)、触媒燃焼型ガスセンサなどがあるが、必要な性能を発揮させるためには、前者は使用前のキャリブレーションを必要とし、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ず、省消費電力化は難しい。また、ほとんどのものがドリフト、戻りの応答、繰返し性能、信頼性などに問題をかかえている。現状のこのようなセンサはIoT用途には向かず、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。

(5) 政策的課題

(データ所有権の課題)

個人所有のセンサ（たとえば、スマートフォンのセンサ）から生み出されるデータは誰のものであるのかといったデータ所有権の問題は、今後のIoTの普及を左右しう問題である。装着型ヘルスマonitoringデバイスによって生み出されるバイタルデータについては、プライバシーの問題もあってすでに議論され始めている。

たとえば、社会インフラである橋梁のヘルスマニタリングを行う場合、全ての橋梁に多くのセンサを取り付けて、インターネット経由でデータを集める方法が考えられる。一方、橋梁を通過する車に搭載された加速度センサ、あるいは運転者のスマートフォンの加速度センサのデータを集めて解析する方法も考えられる。スマートフォンにはセンサが既に搭載され、インターネットに接続されており、GPS や慣性センサによって場所は容易に特定でき、電源供給やセンサの維持管理の問題はないため、後者が実現できれば前者の方法より簡単で低コストである。しかし、このようなサービスを事業化するには、データの所有権の問題を解決し、たとえば、公共の場所にデータが開放されている必要がある。

IoT はセンサ、ネットワーク、データ解析システムで構成されるが、多くのデータを収集して強い立場にある IT 業界の巨人（Apple、Google、通信キャリアなど）の態度によっては、バリューチェーン内での利益分配がいびつになり、IoT 全体の発展が停滞する危険性がある。このため、データの所有権の問題については、単にビジネス上の問題というだけでなく、公共の利益、公正な競争などの観点からも議論が必要である。

（公的研究投資と研究拠点に関する課題）

MEMS・センシングの研究開発は産業に直結し、その進歩や展開は非常に速い。従来型の研究開発プロセスは、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ものである。しかし、このプロセスの開発速度および成功確率では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。事業化の芽、あるいは育成して売却できそうなシーズがあると、ベンチャーキャピタルから多くの資金が投入され、普通なら 6 か月かかる開発が 3 か月で終わることも少なくない。欧州では、Fraunhofer 研究機構（ドイツ）、Leti（フランス）、IMEC（ベルギー）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、我が国の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 2～3 割程度である。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。我が国においても、欧米のやり方を参考にして、既存のやり方、仕組み、組織にとらわれず、この分野の研究開発における公的研究資金や民間資金の投入方法、研究拠点の運営方法を変えていく必要がある。

（6）キーワード

MEMS、センサ、IoT、Trillion Sensors、Industry 4.0、プリンテッドエレクトロニクス（Printed Electronics）、フレキシブルエレクトロニクス（Flexible Electronics）、音声認識、人工知能（AI）、自動運転、ロボット、ビッグデータ、低コスト化

(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	○	→	アカデミックの基礎研究は全体として盛んである。主要国際会議での論文数は依然として多いが、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。この状況は韓国のそれと似ているが、その他の国の状況とは異なる。
	応用研究・開発	○	→	日本の部品メーカーの実力は高く、MEMS マイクロフォン、弾性波フィルター、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、事業に直結するメインストリームでも実力を見せている。Robert Bosch や InvenSense はこれらの大学と共同研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	↑	慣性センサのベンチャー企業 InvenSense は、10 年間で数百億円を売り上げる主要なセンサ企業に成長した。その後も、成功しそうなベンチャー企業が次々と現れている。シリコンバレーでは、この分野への投資熱も高い。FBAR フィルターの上位 2 社 (Avago Technologies, Qorvo) の成長率が著しい。
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	◎	↑	センサ・MEMS 業界の王者である Robert Bosch 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 Fraunhofer 研究機構とも共同研究を積極的に行っている。STMicroelectronics は首位を Robert Bosch に譲ったものの、引き続き先頭集団にいる。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。また、国内に実装メーカーがたくさんあり、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。大型研究拠点 SITRI (上海) の 8 インチラインの立ち上げは 2017 年に遅れている。従業員の定着率が悪いことが、技術的蓄積を必要とする分野で中国が成功しない大きな理由であり、巨額投資に見合った成果が出るかどうか不明である。
韓国	基礎研究	△	↓	韓国は、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、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、成功例がない。

(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レベル

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）のレベル

(註 2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 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) 田中秀治, IoT 社会の中での MEMS, 日本機械学会誌, Vol. 119, No. 1174 (2016) pp. 506-509.
- 2) Rich Ruby, A Snapshot in Time, IEEE Microwave Magazine, Vol. 16, No. 7 (2015) pp. 46-59
- 3) Ken-ya Hashimoto, Tetsuya Kimura, Takeshi Matsumura, Hideki Hirano, Michio

- Kadota, Masayoshi Esashi, Shuji Tanaka, Moving Tunable Filters Forward: A “Heterointegration” Research Project for Tunable Filters Combining MEMS and RF SAW/BAW Technologies, IEEE Microwave Magazine, Vol. 16, No. 7 (2015) pp. 89-97
- 4) 野沢哲夫, 音声対話が世界を揺るがす, 日経エレクトロニクス, 2016 年 8 月号, pp. 25-50
 - 5) 三宅常之, IoT に印刷の力, 日経エレクトロニクス, 2016 年 2 月号, pp. 26-32
 - 6) TSensors Summit Abstracts for Trillion Sensor Roadmap, October 23-25, 2013, <http://www.tsensorssummit.org/Resources/TSensors%20Summit%20Abstracts.pdf>
 - 7) 大橋啓之, 黒岩繁樹, 秀島翔, 中西卓也, 逢坂哲彌: 生体バランス物質のさりげないセンシングに関するレビュー, 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌), Vol.136 No.8 pp.357-361 (2016).
 - 8) P. Bergveld, Development of an Ion-Sensitive Solid-State Device for Nuerophysiological Measurement, IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-17, 70 (1970).
 - 9) 松尾正行, 江刺正喜, 飯沼一浩, 電気関係学会東北支部連合大会 (1971)
 - 10) J. Kimura, T. Kuriyama, and Y. Kawana, An Integrated SOS/FET Multi-Biosensor, Sensors and Actuators, 9 (4), pp.373-387 (1986).
 - 11) Jonathan M. Rothberg, An Integrated Semiconductor Device Enabling Non-optical Genome Sequencing, Nature, 475, pp.348-352 (21 July 2011).
 - 12) 伊藤善孝, ISFET-pH 計の新展開, Chemical Sensors, 25 (1), 13 (2009).
 - 13) C. Tuerk, L. Gold, Systematic Evolution of Ligands by Exponential Enrichment: RNA Ligands to Bacteriophage T4 DNA Polymerase. Science, 249, 505–510 (1990).
 - 14) N. Kaneko, et al., Aptamer-based Biosensors for rapid Detection of Stress Markers, ISNAC 2016.

3.3.7 エネルギーハーベスティング

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

環境中に存在する光、振動、温度差、電波などの様々なエネルギーを電気エネルギーに変換し、無線センサノード等のインテリジェントな分散ノードの無給電化を実現する。新たな原理のエネルギー変換技術、特性や機能を飛躍的に向上させる材料・デバイス構造・プロセス技術、微弱なエネルギーを効率的に集め、発電し、蓄電するシステム技術、などの研究開発課題がある。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

モノのインターネット（IoT）、トリリオンセンサ（Trillion Sensors）、サイバーフィジカルシステム（CPS）などの言葉で表現される高度にネットワーク化／インテリジェント化された世界を実現するためには、リアルな世界とサイバー世界との接点となる膨大な数のセンサを含むインテリジェントな分散ノードが、世界のあらゆる場所で長期間機能し続ける必要がある。これらの分散ノードにはセンサやデータ処理、通信用などへの電源供給が必要であるが、電源供給ラインがない場所や、電池の交換が難しい場所などもあるため、環境中のエネルギーを利用して分散ノード自体で発電する技術、離れた場所からのエネルギーを供給し発電する技術、分散ノードの利用期間全体をカバーできる新たなエネルギー源を内包し発電する技術などの開発が望まれる。このような代替電源技術の中で、インテリジェントノードが敷設される環境中にもともと存在する各種のエネルギー（光・電波などの電磁波、振動などの力学的エネルギー、温度差、ポテンシャル差、生化学物質等）を、その場で電気エネルギーに変換して利用する技術がエネルギーハーベスティング技術である。周りの環境中に利用可能なエネルギーが存在する限りは、電気エネルギーを生み出し続けることができる。

エネルギーハーベスティングにおいて、発電量を決める要因としては、環境からデバイスに供給されるエネルギー流速密度と、インテリジェントノードの消費電力がある。デバイスの大きさ、重さや設置場所が決まると、エネルギー流束密度から、最大発電可能量が決まる。実際の発電量をいかにこの理論的な最大値に近づけるかが、研究開発の目標となる。また、ノードの消費電力が少ないほどエネルギーハーベスティング用として利用可能なデバイスの種類や活用可能領域が広がり、さらなるデバイスの小型化も可能となる。これらの 2 要因に影響をおよぼす条件は非常に幅広く、目標値等が一意に定まるものではないが、おおまかな目安、たとえば 10 マイクロワットというような発電目標数値が、インテリジェントノードの無給電化を目指す研究開発の方向性を規定するものとなっている。

エネルギーハーベスティングに利用される主な発電技術としては、光発電、振動発電、温度差発電、電磁波発電があり、それぞれのこれまでの取り組みについて簡単に紹介する。

エネルギーハーベスティング技術としての光発電（太陽電池）は、必ずしも直射日光が照射される環境で使われるとは限らないため、要求される特性は再生可能エネルギーとしての太陽電池とは異なる。たとえば、日陰や曇天、雨天時の間接光や、室内照明、街路灯などの人工照明が照射される環境においても機能するものが求められる。また、フレキシブルなデバイスが求められる場合もある。このような、エネルギーハーベスティング技術

として代表的な技術がアモルファス・シリコン太陽電池である。アモルファス・シリコン太陽電池は、吸収スペクトル特性が可視光にマッチしていること、低照度環境でも発電効率が落ちにくいことから、室内光環境での使用に適している。薄型・フレキシブルなフィルム状のアモルファス・シリコン太陽電池が、日本企業によって量産されており、腕時計や電卓などの電源として普及している。

我が国においては、長らく太陽電池の研究開発・普及支援政策がとられているが、再生可能エネルギーとしての活用にはフォーカスしたものであり、エネルギーハーベスティング用途を想定したものではない。これは諸外国においても同様である。最近では、室内光環境下で、アモルファス・シリコン太陽電池よりも発電効率の高い太陽電池技術の研究開発が進んでいる。たとえば、薄膜 GaAs 太陽電池、色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池、ペロブスカイト太陽電池などである。特に、ペロブスカイト太陽電池については、近年、発電効率が急速に向上したことで、有機系太陽電池の産学研究者の参入が相次いでいる。これらの詳細についてはこの俯瞰報告書の太陽電池の研究領域を参照されたい。

取り込んだ力学的エネルギーを電気エネルギーに変換することで発電するのが振動発電である。そのやり方としては、剛性のある筐体を持ち、外部環境に発生する振動や衝撃によって内部の錘に印加される加速度を入力エネルギー源とするもの、外力で変形することによりエネルギーを取り込むもの、空気流や水流などの流体から往復振動や回転運動を生じさせる形でエネルギーを取り入れるものなどがある。力学的エネルギーから電気エネルギーへの変換原理は、磁場の時間変化からコイルに誘導電流を生じさせる方法と、電場の時間変化から電流を発生させる方法とに二分される。力学的エネルギーによって磁場の時間変化を生じさせる発電方式には、磁石とコイルの相対位置を変化させる方式（電磁誘導発電）と、磁歪材料に外力を加える方式（逆磁歪発電）とがある。また、力学的エネルギーによって電場の時間変化を生じさせる発電方式には、エレクトレット材料を用いて対向電極の相対位置変化などで静電容量を変化させる方式（静電誘導発電）と、圧電材料に外力を加える方式（圧電発電）とがある。

電磁誘導発電は、一般的な発電機の発電方式であり、エネルギーハーベスティング用途の小型発電機も市販されている。デバイスとしては、まだ改良の余地は大きい、概ねエンジニアリングの領域であり、特殊な磁性材料の開発などの基礎的な研究開発要素はあまりない。

逆磁歪発電は、研究の歴史が浅く、一般に市販されている発電デバイスはない。磁歪材料の特性向上がひとつの研究開発テーマであり、Galfenol ($\text{Fe}_{81.4}\text{Ga}_{18.6}$) や Terfenol-D ($\text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Fe}_2$) といった既存の磁歪材料よりも特性の良い材料を目指した研究開発が続けられている。

静電誘導発電においては、半永久的に帯電させたエレクトレット材料をコンデンサの一方の電極とし、対向する電極との相対運動で発電するエレクトレット発電、摩擦帯電（接触帯電）を利用した方式、電気活性ポリマーを利用した方式が研究されている。無機・有機の電極材料、帯電方式、デバイス設計などが研究開発要素である。我が国では、2006 年から総務省および NEDO プロジェクトでポリマーエレクトレットの高性能化に関する研究が行われ、従来のポリテトラフルオロエチレン (PTFE) などよりも 5 倍の表面電荷密度を実現するアモルファスフッ素樹脂「サイトップ EGG」が開発され、商品化されて

いる。

圧電発電は、エネルギーハーベスティング用途で市販されているデバイスが最も多い。無機圧電材料としては、PZTの性能が高いが、鉛を含むため、非鉛の圧電材料（AlN、KNN [(KNa) NbO₃]、BaTiO₃ など）の研究開発も進められている。有機圧電材料としては、PVDF、多孔性ポリマー材料などの研究開発が進められている。圧電ポリマーエレクトレットはポーラス・ポリプロピレンが多く検討されてきたが、層を重ねてデバイスを構成することにより、大きさの揃った空隙を形成する試みが多く行われている。

米国では、振動発電に限らず、エネルギーハーベスティング技術全般の研究開発に対する支援が行われており、振動発電では、圧電発電の研究開発及び実用化、磁歪材料の研究開発、摩擦帯電発電の研究開発などに強みがある。欧州においても同様であり、振動発電分野では、非鉛圧電材料、屈電（Flexoelectric）材料、電気活性ポリマーなどの材料開発から、振動センシング分野への応用などに亘る政策支援が行われている。

国内では、東京大学（エレクトレット、圧電ポリマー）、神戸大学（圧電）、兵庫県立大学（エレクトレット、電磁誘導）、金沢大学（逆磁歪）、静岡大学（エレクトレット）などでプロトタイプ開発の取り組みが行われている。また、産業界では、オムロン（エレクトレット）、パナソニック（圧電）、スター精密（電磁誘導）、アダマンド（電磁誘導）、北陸電気工業（エレクトレット）などでエンジニアリングサンプルの開発が進んでいる。

温度差のエネルギーを電気エネルギーに変換する発電デバイスとしては、熱電効果（ゼーベック効果）を活用した熱電発電が最も知られている。ランキンサイクルなどの一般的な熱機関は熱媒体の循環を必要とし、小型化、温度差縮小によって効率が低下するが、熱電材料の特性にはこのようなスケールアップ効果がないため、エネルギーハーベスティング用途の小型デバイスでは優位性がある。変換効率は数%とまだ低い、エネルギーハーベスティング用途であれば、腕時計、集蚊器、無線センサ用電源モジュールなどとして実用化されている。室温付近では、性能が高いBiTeが使われることが多いが、毒性や資源量の問題もあり、代替材料の研究開発が進められている。特に、近年は、有機系の熱電材料への期待が高くなっている。より高い温度帯、排熱利用の用途では、酸化物系、シリサイド系など、別の熱電材料が使われる。熱電変換素子技術の詳細については、この俯瞰報告書の熱電変換の研究領域を参照されたい。

熱電発電以外の主な温度差発電として、熱磁気発電、熱音響発電、熱電子発電、スピンゼーベック発電なども研究開発されている。熱磁気発電は、原理的には熱電発電に対する優位性があるものの、未だ特性の良い材料が見つかっていない。熱音響発電は材料にはあまり依存せず、シミュレーションによる形状最適化が重要な課題であるが、計算機能力の向上により実用化が加速される可能性がある。熱電子発電は、電極間の狭ギャップ化と、低温側からの電子逆流阻止が効率向上には必要である。スピンゼーベック発電については、各国で研究開発が活発化しているが、現状ではまだ性能が低い。

環境中に飛び交うテレビ、ラジオ、携帯電話などの電磁波（電波）から発電する電磁波発電は、100年前に米国でラジオの公共放送が開始された当時に使われていた（鉱石ラジオの原理）。近年は、パッシブRFIDが普及する欧州や米国を中心に研究開発が活発化している。電波エネルギーからのハーベスティングは、情報も電波を用いてやり取りをして

いるため、回路・システムの親和性がよい。電磁波発電はもともと他の用途のために発生させた電波の未利用分をハーベストしているが、エネルギーを送る専用もしくは情報との兼用で電波を発生させ、アクティブに無線で送ることも可能であり、この場合は「無線電力伝送」や「ワイヤレス給電」と呼ばれるシステムとなっている。

受電デバイスはアンテナとダイオードを用いた整流回路を組み合わせたもので、レクテナ（Rectenna：Rectifying Antenna の略）と呼ばれている。電波エネルギーのハーベスティングに求められる技術は、応用が期待される無線センサノード等におけるアンテナや回路等基本的に同じ技術であり、研究開発要素も共通性がある。そのため、電源としてのハーベスティングの技術と無線情報技術が一体として開発することが可能で、将来の小型化、低コスト化に有利である。

2010 年頃から様々なワイヤレス給電技術に注目が集まるようになり、マイクロ波無線電力伝送とエネルギーハーベスティングの研究開発が活発になった。日米はこれまでの研究の蓄積を基に研究者の裾野が大きく広がり、欧州は RF-ID の研究者を中心に無線電力伝送とエネルギーハーベスティングの研究を行なうようになった。米国 IEEE MTT-S（Microwave Theory and Techniques Society）を中心として 2011 年より IEEE Wireless Power Transfer Conference（WPTc）が運営されている。日本でも 2014 年に電子情報通信学会通信ソサイエティに無線電力伝送研究会（WPT 研）が設立され、年間 150 件近い研究発表がある。

(3) 注目動向

欧州では、Horizon2020 プログラムの中で、エネルギーハーベスティング関連の大規模プロジェクトが多数実施されている。現在進行中（2017 年以降終了予定）のプロジェクトのうち、400 万ユーロ以上の支援が行われているものとしては、EnSO（Energy for Smart Objects）、smart-MEMPHIS（Smart MEMs Piezo based energy Harvesting with Integrated Supercapacitor and packaging）、LaWin（Large Area Fluidic Windows）、OPTEUS（Optimised Energy Management and Use）、microMole（Sewage Monitoring System for Tracking Synthetic drug Laboratories）、TransFlexTeg（Large area transparent thin film thermoelectric devices for smart window and flexible applications）、などがある。

ここ数年でのペロブスカイト太陽電池の効率向上は目覚ましく、NREL（National Renewable Energy Laboratory）によれば、エネルギー変換効率 22.1% に達している。これは、アモルファス・シリコン太陽電池（13.6%）や色素増感太陽電池（11.9%）の記録をはるかに上回る。また、封止の必要がない全固体の色素増感太陽電池の開発が進み、製品化が間近となっている。室内照明下での太陽電池の標準的な評価基準については検討が遅れていたが、2016 年に我が国で JEITA 規格 ET-9101「屋内光下での太陽電池の評価方法」が策定された。

振動発電デバイスの特性測定方法に関する国際標準化が進展している。韓国は IEC TC47/WG7 で圧電振動発電や電磁誘導振動発電などの国際標準化提案を次々に行い、標準規格化が進められている。日本は、2016 年に JEITA 傘下に TC47/WG7 国内対応委員会を設置し、振動発電の国際標準化提案に向けた準備を行っている。また、摩擦帯電発電については、耐久性や再現性の問題などが指摘されながらも、研究開発が進展し、近年、

中国や韓国などで、多くの企業（数十社）が実用化研究を進めている。

材料としては、非鉛圧電薄膜材料、エレクトレット材料、圧電ポリマーエレクトレットが注目されている。非鉛圧電薄膜材料としては、JST CREST「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」のH28年度採択テーマ（研究代表者：神野伊策，H28-H31）において、(KNa) NbO₃系、Ba (Zr,Ti) O₃- (Ba,Ca) TiO₃系、BiFeO₃- (Bi,Na) TiO₃系などを候補材料とし、コンビナトリアルスパッタ技術による検討が開始された。エレクトレット材料では、上述のJST CRESTのH27年度採択テーマ（研究代表者：鈴木雄二，H27-H30）で、有機・無機ハイブリッドエレクトレット、セラミックス・エレクトレットの高性能化の研究が行われている。

実用デバイスでは広周波数帯域のランダム振動に対しても大きな発電量が得られることが望ましいが、そのための工夫として、国内外で双安定性、ダイナミックダンパ、振動周波数増大などを用いたデバイスのプロトタイプが試作されている。

熱電材料の性能指数ZTは着実に向上し、バルク材料でもZTが1を超えるものは珍しくなくなった。薄膜熱電発電モジュールの開発で先行したベンチャー企業が倒産したが、新規企業が次々に現れている。マンホール裏にとりつけ、熱電発電で給電する下水道氾濫検知ソリューションが実用化された。

電磁波発電では、欧州でRF-IDの研究者が核となり、ワイヤレス給電の実用化を推進するためのコンソーシアムが2013年度～2017年度の活動期間でスタートした。また、米国ではシアトルのワシントン大学でWISP（Wireless Identification and Sensing Platform）と名付けたエネルギーハーベストとワイヤレス給電のプロジェクトを推進している。また、ワイヤレス給電のベンチャー企業も多く設立されており、日本のKDDIから出資を受けているOssia社やEnergous社等、積極的にワイヤレス給電の実用化を推進している。

日本では、コンソーシアム方式で実用化を目指す動きが活発である。ワイヤレス給電の実用化を目指すワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアムWiPoT（2013年設立）や、エネルギーハーベスティング一般の実用化を目指すエネルギーハーベスティングコンソーシアムEHC（2010年設立）、などがある。特にブロードバンドワイヤレスフォーラムBWFは総務省と協力してワイヤレス給電の法制化のために積極的に活動している。また、政府支援によるエネルギーハーベスティングやワイヤレス給電研究プロジェクトがいくつか始まっている。

アジアでも非接触給電やマイクロ波無線電力伝送の研究や実用化の機運が高まっており、いくつかのベンチャー企業も起業されている。中国や韓国は日本のBWFとの連携でワイヤレス給電に関するChina-Japan-Korea Joint Meetingも行われ、法制化やITU対応を共同で行っている。

（4）科学技術的課題

光発電の色素増感太陽電池では、高耐久性かつ気密性の高い封止材（特にシートデバイス向け）や、安価で安定性の高い脱鉛増感色素および電解液、低抵抗導電性プラスチック基板などの開発、耐熱性の確保、耐光性の確保（屋外使用の場合）などが課題として挙げられる。室内照明のスペクトルとのマッチングによる発電効率向上も課題であるが、もう一步進めて、人工照明の場合には、照明と太陽電池とをセットで開発して最適化するとい

うアプローチも考えられる。例えば、照度一定の条件下で発電効率を最大化するように LED 照明と室内用太陽電池とを一体開発することや、LED 通信（可視光通信）を活用することでセキュアな双方向通信を超低消費電力で実現する無線ネットワーク技術を開発することなどが考えられる。

振動発電では、低環境負荷かつ高効率、高耐久性、低コストの材料開発が課題である。特性の非線形性が強い磁歪材料については、デバイス設計も重要な課題である。起電力が小さい電磁誘導発電や逆磁歪発電向けや、逆に起電力が大きい静電誘導発電や圧電発電向けの整流回路・電圧調整回路の設計も課題である。また、振動発電普及の鍵となる広帯域振動への対応については、各国で研究開発が進むものの、決定版といえるものは現れていない。電気機械結合定数が大きい発電デバイスでは、電気回路の状態が発電デバイスの物理状態にフィードバックされるため、メカニカルな機構と電源回路の一体設計による最適化が求められ、マルチフィジックス・シミュレーションが必要となる。

熱電発電においては、環境負荷が小さく希少元素フリーで性能指数が高い熱電材料開発は重要な開発課題である。また、材料開発からモジュール開発、システム開発へとつながる線が細いことが実用化の障害となっている。熱電材料開発の研究者がモジュールやシステムの開発まで自ら行うことは難しく、デバイス化や熱設計に通じた研究者・技術者との連携も乏しいのが現状であり、これらの研究者・技術者を密につなげ、材料開発からシステム開発までを同時に行い、その中で実用化の障害となる技術課題を明確にしてそれぞれの研究開発フィードバックをしていくような研究体制が望まれる。

電磁波発電においては、レクテナがまず必要不可欠な技術要件であり、レクテナを高効率化、小型化、低コスト化することが最大の課題である。アンテナの小型化と大きな電力を得ることは相反するが、このジレンマを解決する唯一の方法が実際のアンテナの大きさよりも大きな有効開口面積のアンテナを作れる可能性のある「スーパーゲインアンテナ」である。アンテナそのものの改良だけでなく、メタマテリアルなど新材料を利用した有効開口面積の向上も可能であり、この開発が期待される。また、整流回路用のダイオードの高効率化のために、ダイオードの形状の工夫や GaN などの新規な半導体材料を用いたダイオードの開発が求められる。回路方式の工夫においても、低入力で高効率の整流を実現することが可能であり、インピーダンスマッチング手法の深化による低入力高効率整流回路の開発、同手法による広帯域整流回路の開発、ダイオードの代わりに HEMT を用いた新しい整流回路の開発等、新しいアプローチの回路開発が必要である。さらに、レクテナはその出力電力／電圧が入力電波強度や接続負荷に大きく依存し、電源としてみると単独では利用しにくいいため、レクテナに適した低電圧で高効率の DC/DC コンバータの開発が必須である。

(5) 政策的課題

エネルギーハーベスティング用途を想定した太陽電池の要素技術・システム化技術の研究開発・普及に関しては、今まで政策支援の取り組みがなかったが、海外も同様であり、諸外国に先んじて政策支援を進めることで、日本の産業の活性化、国際競争力強化につながる可能性がある。たとえば、人工照明と室内用太陽電池を組み合わせたシステム化開発のような新しいアプローチが考えられる。

振動発電デバイスの要素技術に関しては、日本の研究レベルは高く、企業の優位性も見

られる。ただ、材料、機械、電気の全てに通じた人材は限られ、単独企業等で取り組める範囲には限界がある。実環境振動に対して、発電デバイスの構造設計、電源回路設計を最適化するためのマルチフィジックス・シミュレーション基盤を構築できれば、他国に対する優位性が高められることが期待される。

熱電発電は、排熱のエネルギーは多くともエクセルギーは少ないことや現状の効率が低いことにより、再生可能エネルギーとしてはコスト競争力が弱く魅力的とは言えない。しかし、材料や新原理によるデバイスのブレークスルーにより効率が高くなれば、様々なエネルギー回収用途に使われる可能性もあり、魅力的な応用であるエネルギーハーベスティング用途を中心とした政策支援の枠組みを構築することが望まれる。

日本では電波法の制約により、電波によるワイヤレス給電が困難である。電波法の改正により、ワイヤレス給電市場が活性化すれば、技術の共通要素が多く、補完的に使用できる電磁波発電の普及も進むと期待される。

(6) キーワード

エネルギーハーベスティング、光発電、振動発電、温度差発電、電磁波発電、太陽電池、逆磁歪、静電誘導、圧電、熱電、熱磁気、スピンゼーベック、熱音響、熱電子、エレクトレット、マルチフィジックス・シミュレーション、レクテナ

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	・ JST の CREST・さきがけ複合領域「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」（平成 27 年度～）が始まり、今後の成果が期待される。 ・ 非鉛圧電材料、エレクトレット材料、熱電材料など材料面での基礎研究は世界を凌駕している。 ・ 世界的に見て研究の歴史が長く、研究者の層も厚い。
	応用研究・開発	○	↑	・ JST の A-STEP、ERATO、NEDO の「エネルギー・環境新技術先導プログラム」などの関連プロジェクトが始まっている。 ・ 上場企業が振動発電の商品開発に真剣に取り組んでいる。 ・ 電磁波発電では法整備の問題などで、実用化は遅れている。
米国	基礎研究	◎	→	・ DARPA や NASA の支援による研究開発の歴史が長く、研究者層・技術シーズが厚い。 ・ MIT、スタンフォード、ジョージア工科大、バージニア工科大などは研究者も多く、多様なシーズ開発が行われている。 ・ 電磁波発電は学会や大学レベルでの研究の勢いがあり、もともとの電波回路技術の高さもあり、研究が急速に発展している。
	応用研究・開発	◎	→	・ 大学発のベンチャー企業が多く、プロトタイプの開発は活発であり、量産間近の企業も増えてきた。 ・ 標準化活動も活発であり、実用化を推進している。
欧州	基礎研究	◎	→	・ EU レベルや国レベルの積極的な支援もあり、基礎研究は非常に盛んである。 ・ 発電技術だけでなく、電源回路技術やトータルなシステム最適化の研究も厚みがある。 ・ 電磁波発電では、RF-ID 等類似分野の研究者が転進した例が多く、研究者の層が厚い。
	応用研究・開発	◎	↑	・ 産学連携のプロジェクトによるプロトタイプ開発・実証も盛んに行われている。 ・ 2016 年には、総額約 100 億円の大規模プロジェクト EnSO が開始された。 ・ ベンチャー企業中心の取り組みであるが、いくつかは既に商品化がなされており、環境発電デバイスの社会の受容性も高い。 ・ RF-ID という類似技術からのアプローチで電磁波発電は着実に実用化を推進している。
中国	基礎研究	○	↑	・ 基礎研究の水準が向上し、論文発表も増加している。 ・ デバイス開発の基礎研究は散見されるが、材料まで立ち戻った検討は少ない。

中国	応用研究・開発	○	↑	・熱電発電に関しては大規模プロジェクトの成果が出ている。 ・産業界でも環境発電デバイス試作の機運が高まってきている。ベンチャー設立もあり、今後発展する可能性がある。
韓国	基礎研究	△	↑	・論文数が増加しており、今後発展する可能性がある。 ・デバイス開発の基礎研究は散見されるが、材料まで立ち戻った検討は少ない。
	応用研究・開発	△	↑	・Samsung や LG などが研究開発を加速している。 ・国際標準化に向けた活動も活発である。 ・ベンチャー設立もあり、今後発展する可能性がある。

(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レベル

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）のレベル

(註 2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 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) 調査報告書（IDTechEx、Winter Green Research、Yole など）
- 2) EU の Horizon 2020 CORDIS (Community Research and Development Information Service) (http://cordis.europa.eu/projects/home_en.html)
- 3) 国際会議報告（PowerMEMS、Transducers、SENSO Conference、SPIE Smart Structures NDE、ITC/ETC、MRS Meeting など）
- 4) Energy Harvesting Network (<http://eh-network.org/>)
- 5) Energy Harvesting Journal (<http://www.energyharvestingjournal.com/>)
- 6) 海外イベントでの発表（Energy Harvesting USA、Energy Harvesting Europe、Sensors Expo など）
- 7) K. Wasa et. al, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. vol. 59, pp. 6-13, 2012.
- 8) Y. Sakane et al., J. Micromech. Microeng., Vol. 18, Issue 10, No. 104011, 6pp (2008).
- 9) K. Kashiwagi et al., J. Micromech. Microeng., Vol. 21, Issue 12, No. 125016, (2011).
- 10) X. Qiu, J. Appl. Phys., Vol. 108, 011101, (2011).
- 11) 上野・山田, 日本 AEM 学会誌, Vol. 20, pp. 168-173 (2012).
- 12) S. Yamaura et al., Mater. Sci. Eng., Vol. 193, pp. 121-129 (2015).
- 13) Naoki Shinohara, “Wireless Power Transfer via Radiowaves (Wave Series)”, ISBN 978-1-84821-605-1, ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc., Great Britain and United States, 2014.1
- 14) 篠原真毅, 小紫公也, “ワイヤレス給電技術—電磁誘導・共鳴送電からマイクロ波送電まで—(設計技術シリーズ)”, ISBN978-4-904-77402-1, 科学情報出版, 2013.2
- 15) 篠原真毅 (監修), “ワイヤレス電力伝送技術の研究開発と実用化の最前線”, ISBN 978-4-7813-1175-3, シーエムシー出版, 2016.8
- 16) PowerCAST corp. <http://www.powercastco.com/>
- 17) IEEE MTTTS Technical Committee 26 <http://www.mtt-archives.org/~mtt26/>
- 18) IEEE WPTc2016 <http://www.wptc2016.org/>
- 19) 電子情報通信学会無線電力伝送研究会 <http://www.ieice.org/~wpt/>

- 20) COST-WiPE <http://www.cost-ic1301.org/>
- 21) WISP by Univ. of Washington <http://sensor.cs.washington.edu/WISP.html>
- 22) Ossia inc. <http://www.ossia.com/>
- 23) Energous corp. <http://www.energous.com/>
- 24) WiPoT <http://www.wipot.jp/>
- 25) EHC <http://www.keieiken.co.jp/ehc/>
- 26) BWF <http://bwf-yrp.net/>
- 27) 情報通信技術の研究開発（総務省）「電磁波のエネルギー回収技術の研究開発」
http://www.soumu.go.jp/main_content/000151339.pdf
- 28) 電波資源拡大のための研究開発（総務省）「ワイヤレス電力伝送システム等における漏えい電波の影響評価技術に関する研究開発」
http://www.soumu.go.jp/main_content/000206846.pdf
- 29) ICT 重点技術の研究開発プロジェクト（総務省）「スマートなインフラ維持管理に向けた ICT 基盤の確立（局所集中型低消費電力無線通信技術）」
http://www.soumu.go.jp/main_content/000284840.pdf
- 30) IoT 推進ラボ
https://iotlab.jp/common/pdf/160301_finalist.pdf?date=1603011617
- 31) JST ERATO「川原万有情報網プロジェクト」
https://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/15663117.html
- 32) JST CREST・さきがけ「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」
https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunyah27-2.html
- 33) JST A-STEP「IoT、ウェアラブル・デバイスのための環境発電の実現化技術の創成」
https://www.jst.go.jp/a-step/kadai/h27-2s1/h27_senryaku01.html
- 34) <http://www.nrel.gov/ncpv/>

3.3.8 三次元ヘテロ集積

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

複数の異なる機能を持つエレクトロニクス回路を効果的に集積し、集積回路チップの高機能化・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、低電圧ロジック、メモリ、イメージセンサ、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集積して特性向上の確認を行うなど原理実証、システムレベルの研究開発課題がある。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

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ヘテロ三次元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／ロジック間の通信速度を劇的に上げることが可能となり、低消費電力と高速性の両方が実現する。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／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 2000 mW 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 150 mW 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、異種機能ヘテロ三次元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。とりわけ、IoT (Internet of Things) 時代に必要とされるエッジやクラウドでの大量データの低電力処理、ならびに少量多品種が要求されるスマートセンサノードの構築に異種機能ヘテロ三次元集積が大きな価値を生み出すと期待できる。

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、シリコンウェーハ貫通ビア配線 (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 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、スピンデ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（10 fJ/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 がナノ材料技術、ナノデバイス技術、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 がメモリのトップメカとして 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 of Taiwan (ITRI) にて TSV に関する技術開発が進められている他、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に成功している。

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) などの電子デバイス全般を扱う会議での基礎研究の発表は減っており、技術的な内容は 3D System Integration Conference (3DSIC) などの専門家会議で討議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 が早くも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だといえる。FPGA は 28 nm ノードの、シリコンインターポーザは 65 nm ノードのテクノロジーを使って製造しており、より微細化したものの開発も進んでいる。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。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。多結晶シリコントランジスタを利用する方式の三次元 NAND では 48 層 ～ 64 層の積層を目指した開発が進められている。DRAM の場合、ビットコストを下げ

るにはそれぞれのレイヤの歩留まりを極めて高くする必要があるが、BIST (Built in Self Test) 技術の発達でその問題を緩和しつつ、3D 化によるバンド幅の増大と低電力化を実現している。具体的には、Micron Technology が HMC (Hybrid Memory Cube) と呼ばれる TSV を使った方式の高速・低電力 DRAM を開発し、ビット当たりの電力を DDR4 方式の約 1/2 に低減した。一方、米国 Tezzaron Semiconductor 社は Wafer on Wafer 方式による DRAM を開発している。TSV は不要で、薄化・積層したウェーハに後から縦方向のタングステン Via 配線を形成する方式である。サブミクロンの Via 配線も可能で、Tbps 級の超広帯域データ伝送を可能にしている。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。Olympus 社は最近、400 万接点の積層接続（マイクロバンプ接合）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た。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発展を見せている。

独 Fraunhofer 研究所における三次元集積化技術開発は、メモリとロジックの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。異種材料の積層集積化を実現するための、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。平成 28 年度から NEDO 事業として産業技術総合研究所が「IoT 技術開発加速のための設計・製造基盤開発」を実施する。異種材料、機能の集積化技術研究開発に対して深い理解による設計と製造のプラットフォームを提供し、中堅、中小企業も含めた多くの新たな事業の創出につながることを期待したい。

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り、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。

IoT は、個々の応用領域としては車載、ウェアラブルデバイス、健康医療、社会システムなどの多方面にわたり、各種のセンサを集積したチップが重要になると考えられる。最適な機能の組み合わせを考慮した技術開発・知の集積、デザイン環境の構築、少量多品種に対応可能な生産技術（可変量生産技術）の研究開発などを併せて進めることが重要である。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

IEEE の International Electron Devices Meeting (IEDM)、VLSI Symposia 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）を用いた無線通信方式による三次元集積化技術などが発表されている。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。

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が図れる可能性がある。

[注目すべきプロジェクト]

300 mm 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、200 mm 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、フォトニクス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 を 10 層程度積層し、512 GB/s の超高バンド幅を持つ積層 DRAM の実証を目指している。さらにその技術をスパコン開発にも適用し、Green500 のトレンド予測より 5 倍高い、100 GFLOPS/W の電力効率を有するコンピュータの実現を目標としている。

（4）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研究開発用クリーンルームが少ないことや、つくばイノベーションアリーナ（TIA）のコアインフラには、三次元積層を可能にするプロセス装置が十分整備されていないことがある。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必要である。産業界はすでに開発が進められている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、大学あるいは研究開発独法等の中立的機関を中核として国際競争に負けない体制を構築する必要がある。この点に関しては、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」などで研究開発環境が整備されることを期待したい。

（5）政策的課題

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多いに期待される。新事業の創生には優位であり、地方創生にも大いに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ための政策も望まれる。

（6）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 chip stack、3D-IC 設計技術、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、ウェーハボンディング、熱設計

(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。液体金属の埋込による低コスト 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み始めるなど、基礎的研究の裾野は広がっている。
	応用研究・開発	○	↗	東北マイクロテックの GINTI における 300 mm 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ての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、前回調査時の東芝の三次元 NAND フラッシュメモリの発展以外に目立った動きはないが、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。
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 2 GHz 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三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三次元集積チップの試作に成功している他、Monolithic 3D Inc がモノリシック三次元 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、三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、300 mm の三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、200 mm 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 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。

韓国	応用研究・開発	○	↑	Samsung、Hynix 社等のメモリメーカーに加えて、Amkor Korea 社が TSV を使ったインターポーザ技術、三次元集積化技術の開発に多くの資源を投入し始めている。産業化では、Samsung 社の三次元 NAND フラッシュメモリ、TSV を使った DRAM など、メモリに関する三次元化集積化で先行部隊にいる。
台湾	基礎研究	○	→	ITRI（Industrial Technology Research Institute：工業技術研究院）が三次元集積化技術の開発を精力的に行ってきたが、最近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だ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レベル

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）のレベル

(註 2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価である。

◎ 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. Koyanagi, “Heterogeneous 3D Integration - Technology Enabler toward Future Super-Chip”, *IEDM*, 8 (2013).
- 2) H. Kubo, et al., “High Performance Closed-Channel Cooling System Using Multi-channel Electro-osmotic Flow pumps for 3D-ICs”, *IEDM*, 735 (2013).
- 3) S. L. Chua, et al., “3D CMOS-MEMS Stacking with TSV-less and Face-to-Face Direct Metal Bonding”, *Symposium on VLSI Technology*, 148 (2014).
- 4) C.-H. Shen, et al., “Monolithic 3D Chip Integrated with 500ns NVM, 3ps Logic Circuits and SRAM”, *IEDM*, 232 (2013).
- 5) T. Irisawa, et al., “Demonstration of InGaAs/Ge Dual Channel CMOS Inverters with High Electron and Hole Mobility Using Staked 3D Integration”, *Symposium on VLSI Technology*, 56 (2013).
- 6) T. Irisawa, et al., “Demonstration of Ultimate CMOS based on 3D Stacked InGaAs-OI/SGOI Wire Channel MOSFETs with Independent Back Gate”, *Symposium on VLSI Technology*, 118 (2014).
- 7) M. Miyamura, et al., “First Demonstration of Logic Mapping on Nonvolatile Programmable Cell Using Complementary Atom Switch”, *IEDM*, 247 (2012).
- 8) S. Okamoto, et al., “Bidirectional TaO-Diode-selected, Complementary Atom Switch (DCAS) for Area-efficient, Nonvolatile Crossbar Switch Block” *Symposium on VLSI Technology*, 242 (2013).
- 9) A. V. Samoilov, et al., “3D Heterogeneous Integration for Analog”, *IEDM*, 609 (2013).
- 10) 米国 Monolithic 3D Inc. : <http://www.monolithic3d.com/>
- 11) 欧州 IMEC Heterogeneous integration and Prototyping サービス :
http://www2.imec.be/be_en/services-and-solutions/prototyping-serviceheterogeneous.html

- 12) 欧州 FP7 COMPOSE3 プロジェクト : <http://compose3.eu/index.html>
- 13) Y. Takemoto, N Takazawa, M. Tsukimura, H. Saito, T. Kondo, H. Kato, J. Aoki, K. Kobayashi, S. Suzuki, Y. Gomi, S. Matsuda, Y. Tadaki, “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.
- 14) T. Shuto, K. Iwanabe, M. Ogura, K. Nishida, and T. Asano, “Room-temperature bonding of heterogeneous materials for near-infrared image sensor”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 53, No. 4S, 04EB01 (2014).
- 15) A. Heinig, M. W. Chaudhary, P. Schneider, P. Ramm, J. Weber, “Current and Future 3D Activities at Fraunhofer”, Proc. 2015 Int. 3D Systems Integration Conference, FS4.1, 2015.
- 16) P. Vivet, C. Bernard, F. Clermidy, D. Dutoit, E. Guthmuller, I. M. Panades, G. Pillonnet, Y. Thonnart, A. Garnier, D. Lattard, A. Jouve, F. Bana, T. Mourier, and S. Cheramy, “3D Advanced Integration Technology for Heterogeneous Systems, Proc. 2015 Int. 3D Systems Integration Conference, FS6.1, 2015.
- 17) D. S. Green, C. L. Dohrman, J. Demmin, T. H. Chang, “Path to 3D Heterogeneous Integration”, Proc. 2015 Int. 3D Systems Integration Conference, FS7.1, 2015.
- 18) C.H. Lam, “Neuromorphic Semiconductor Memory”, Proc. 2015 Int. 3D Systems Integration Conference, KN3.1, 2015. Technical Digest of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2012, 2014.
- 19) <http://www.tsensorssummit.org/> トリリオンセンサに関するホームページ
- 20) http://www.kuroda.elec.keio.ac.jp/accel_kuroda/ JST ACCEL プロジェクト黒田課題のホームページ

3.3.9 量子コンピューティング

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

量子コンピュータとは、量子力学的な状態の重ね合わせを用いて並列性を実現し、演算を実行するコンピュータである。従来のコンピュータの論理ゲートに代えて、量子ゲートを用いて量子コンピューティングを行う量子ゲート・タイプと、量子状態間に起きるトンネル現象を積極的に利用して組合せ最適化問題を高速に解く量子アニーリング・タイプの2種類に大別される。いずれも現在のスーパーコンピュータでは有意な時間では解く事が困難な問題を、短時間かつ超低消費電力で計算でき、超スマート社会を牽引する人工知能の開発に欠かせない機械学習やディープラーニングを超高速化するとともに、他分野でも新薬や新物質の開発、複雑な組合せ問題の最適化、ロボティクスなどへの応用が期待されている。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

乱数の素因数分解や最適化（例えば巡回セールスマン問題）といった問題では、計算時間（ステップ数）が問題の規模に対して指数関数的に増大するものがあり、それらは計算不可能な問題とされる。そこで、現在のコンピュータの不可能の一部を可能にする計算手法として量子コンピューティングが期待されており、それを実現するデバイスの開発が望まれている。また、現在のハイパフォーマンスコンピューティング（HPC）で多大な時間と消費電力を有する問題の一部も量子コンピューティングによって短時間で解ける可能性があり、スーパーコンピュータセンターの省電力化への寄与が期待される。

量子コンピューティングを実現する装置として、量子ゲート方式（個々の量子ビットに対するゲート操作によって成り立つ方式）の量子コンピュータ、量子イジングマシン方式の（量子現象を利用した）最適化装置がある。

① 量子ゲート方式の量子コンピュータ

量子ビットを用意し、プログラムに沿って量子ビットにユニタリ演算や測定を施す事により解を求める計算機である。素因数分解等が超高効率で実行できるコンピュータで、量子力学的重ね合わせやエンタングルメントに基づく量子並列性によって既存の計算機では不可能とされるタイプの計算を演算可能にするコンピュータである。

集積化可能な量子ビットの候補として、超伝導のジョセフソン接合を用いる巨視的量子状態を利用するもの（超伝導量子ビット）がある。

超伝導量子ビットの特徴は、リソグラフィにより作製される、巨視的で人工的な電気回路上に実現する量子系であるという点である。マイクロ波帯のエネルギー準位間隔を持ち、雑音を避けるため、約 10 mK の低温環境下で制御されるという制約があるものの、基板上に集積化可能であり、既存の希釈冷凍機中でも 100 ～ 1000 量子ビットの集積回路実装が可能であると考えられている。まだ本格的な量子コンピュータ実現に十分とは言えないが、最も先進的なテストベッドシステムとして、誤り耐性量子計算の基本実証に向けた取り組みが進められている。

集積化を目指した研究と並行して、超伝導量子ビットの巨大な双極子モーメントを活かした人工量子系に対する量子力学の研究が盛んに行われている。また、マイクロ波量子光学の基礎学理や（ダイヤモンド量子ビットなどと組み合わせた）ハイブリッド量子

系に関する研究も盛んである。量子ビットや超伝導共振器の量子状態の非破壊測定が実現されており、観測とデコヒーレンスやフィードバックに関わる基礎研究が行われている。またマイクロ波量子状態制御・観測ツールとして、パラメトリック増幅器や単一光子源・単一光子検出器などが開発され、標準量子限界を超える高感度な計測技術への応用も期待されている。

② 量子アニーリングマシン

東京工業大学の西森秀稔教授と門脇正史氏（現筑波大学教授）の考案した量子アニーリング理論に基づき、量子効果を制御して最適化したい問題の目的関数の最小値を探す装置である。ここでは、量子ビットを 2 次元に配置し、すべての量子ビットの間の相互作用を切り、その上で個々の量子ビットを 0 と 1 の重ね合わせ状態に設定し、次に最近接量子ビット間の相互作用を断熱的に徐々に強くする。このとき、相互作用をどの量子ビット間でどこまで強くするか（強くしないか）がプログラミングに相当し、あとはその量子スピン系全体のエネルギーの最小状態を見つける問題に置き換えることで解を求める。個々のスピンは量子ビットに対応し、超伝導回路で具現化される。スピン間の相互作用は超伝導回路から成るプログラマブル磁気メモリで構成され、組合せ最適化問題に応じて相互作用の大きさを設定し、問題を解く。

最適化の標準的手法であるシミュレーテッドアニーリングでは、系全体を高温からゆっくりと冷やしながら熱揺らぎを利用して基底状態への到達を目指す。量子アニーリングでは系全体を可能な限り低温に保つことで熱揺らぎを抑え、そこに量子揺らぎを与えることでトンネル効果を利用して最低エネルギー状態に到達するのを待つ。スピングラスとして知られる多数スピン間の相互作用を利用する本手法は物理用語のイジングモデルで記述できる。巡回セールスマン問題といった離散的最適化問題がイジングモデルにマッピングできることから、その有用性が期待されている。通常の量子ビットにおいては位相の保持という量子特有の状況も相まって、論理量子ビットの情報を維持するために量子誤り訂正による大規模な量子操作が必要となるが、量子アニーリングは最低エネルギー状態に到達するのを待つという点において自然に逆らわない点が特徴である。しかし、位相を保つコヒーレンスが失われると量子アニーリングは効果を発揮しないことにも留意する必要がある。

③ コヒーレントイジングマシン

既存のデジタルコヒーレント通信技術を発展させ、組み合わせ最適化問題を超高効率で解く手法である。光を用いるため高速で、室温で動作し、頂点数 2 万の完全グラフ問題を解くために、現代の精度保証付きのコンピュータで 20 日間かかるような問題を、1 ミリ秒で近似解が得られるとされる最適化装置である。2 万パルスのレーザーが 2 万頂点数と 1 対 1 の対応となり、レーザーのコヒーレンスをフルに活用するという点において量子コンピュータに分類されるが、実際にはエンタングルメントといった量子性は使わない点において現在の古典的レーザー技術をフル活用できるのが長所である。

(3) 注目動向

[日本]

内閣府革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) において「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の構築」(山本喜久 PM、H26-30) においては、NTT 物性基礎科学研究所、国立情報学研究所 (NII)、スタンフォード大学、大阪大学が中心となって、時分割多重した数万～数十万ノードの縮退光パラメトリック発振光パルスの大規模ネットワークの構築と応用開拓が推進されている。2016 年、 $N=2,000$ ビットの全結合のイジングマシンが完成した。一方で、日立製作所中央研究所においては、量子的な重ね合わせではなく、大規模並列化が得意な CMOS チップなどを用いてシミュレーテッドアニーリングを実装するイジングチップの開発が進められている。これまでに、 $N=20,000$ の 2 層 2 次元イジングモデルが発表され、低消費電力デバイスとして注目されている。この日立イジングチップ開発を中心とした、NEDO「組み合わせ最適化処理に向けた革新的アニーリングマシンの研究開発」が 2016 年に開始した。このプロジェクトでは CMOS アニーリングのみならず、NII、産総研、早稲田大学により、超伝導回路を用いた量子アニーリング及びコヒーレントイジングマシンの実装開発と応用問題開拓が進められている。

また、2016 年に JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」研究領域(研究総括: 荒川泰彦・東京大学教授)、さきがけ「量子の状態制御と高度化」(研究総括: 伊藤公平・慶應義塾大学教授)、ERATO「中村巨視的量子機械プロジェクト」(研究総括: 中村泰信・東京大学教授)が発足した。

[米国]

米国では、2011 年に Lockheed-Martin が 128 量子ビットを搭載した D-wave one を D-Wave Systems 社より購入した。その後 D-Wave Systems 社は 512 量子ビットの D-wave two を発表し、Google と NASA-Ames 研究所が共同で、D-wave two を設置した量子人工知能研究所 (QuAIL: Quantum Artificial Intelligence Laboratory) を設立した。Google においては、2014 年より UCSB の研究チームを自社に取り込んで研究を開始するなど、これまでの大学の研究室を中心とした取り組みから、大企業を巻き込んだ大規模な研究開発が始まっている。また、Office of the Director of National Intelligence の下で活動する IARPA (The Intelligence Advanced Research Projects Activity) で下記 2 つのプロジェクトが進行中である。

- ・ QEO (Quantum Enhanced Optimization)

2015 年開始の 5 年間のプロジェクトであり、従来型のコンピュータでは実質的に計算困難な組合せ最適化問題を、量子アニーリング法で解くことを目標とする。3 次元的に接続された 100 個の超伝導量子ビット、アーキテクチャ、演算操作で構成されるテストベッドの開発により、従来コンピュータに対して 10,000 倍の高速演算優位性の実証を目指している。

- ・ LogiQ (Logic Qubits)

量子ゲート回路方式による量子コンピュータの実現を目指している。

[英国]

2014 年 12 月より EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council) が National Quantum Technologies Programme を開始した。4 つの拠点 (Birmingham 大学、Glasgow 大学、Oxford 大学、York 大学) からなり、Birmingham 大学では量子計測標準技術、Glasgow 大学では量子センシング・イメージング技術、Oxford 大学では量子コンピュータとシミュレーション技術、York 大学では量子通信技術の研究開発を推進している。ハブ整備のために、総額 27 億ポンドの中から 5 年間で 12 億ポンドの資金を投入する。この投資によって英国は量子技術分野で主導的地位を確実にし、通信、医療、安全保障など数兆円規模の世界市場の形成に向けた取組みを先導することを目指している。

[オランダ]

2015 年 1 月、オランダ量子技術研究機関 QuTech を National Icon に指定した。QuTech は 2013 年にオランダ科学研究機構 (NWO)、オランダ物質基礎研究所 (FOM)、オランダ技術財団 (STW) の支援を得て、Delft 工科大とオランダ応用科学研究機構 (TNO) の共同機関としてスタートした。QuTech の先導的立場を強化し、オランダの企業や研究者が量子技術の利益をより早い段階で享受することを目指している。さらに、2015 年 9 月に Intel は QuTech との共同開発に 10 年間 5,000 万ドルを投資することと発表した。

[中国]

中国では、Alibaba の支援を受けた中国科学技術大学を中心として、複数の大学に米国帰りの PI による新しい研究チームが複数立ち上がり、急速に成果を挙げ始めている。すでに 4 ビット程度の実験に関する報告を行っている。

以上のように、カナダの D-Wave Systems 社による量子コンピュータの商用化に刺激を受け、近年、欧米を中心に量子コンピュータ研究の国家プロジェクトが次々と立ち始めている。これらの研究開発においては、日本で最初に動作実証がなされた超伝導量子ビット技術、また同じく日本で提唱された量子アニーリング理論が中心となっている。特に米国では Google、Microsoft、IBM、Lockheed Martin などのグローバル企業が研究開発を進めており、また MIT、UCSB (カリフォルニア大学サンタバーバラ校)、USC (南カリフォルニア大学) などを中心に基礎的な研究がなされ、特に MIT ではデバイス試作の高度化が着々となされている。日本ではパイオニア的な仕事の後、それをフォローする研究体制が十分でなく、今や日米の技術差は大きい。日本としての国際的な観点に立った研究開発の戦略構築が急務であろう。

(4) 科学技術的課題

超伝導量子演算回路の研究開発においては、デコヒーレンス要因の理解と一層のコヒーレンスの改善、量子制御のための周辺エレクトロニクスの開発、誤り耐性量子計算を実現するためのより効率的な方法の開発、量子ビットの集積化および実装方法の開発などが必要である。中期的な出口となる小規模かつ有用な量子プロトコル・アルゴリズムの開発も求められている。量子通信応用に向けては、マイクロ波帯で動作する超伝導量子回路と光

量子通信技術の間を取り持つ量子インターフェイス技術の開発が重要である。一方、マイクロ波帯における量子光学技術の応用に向けた展開も期待される。学術的には、開放量子系の物理・量子情報熱力学・トポロジカル物性などとの接点が興味深い。いずれの課題に対しても、実験と理論の両面から協力して研究を進めることが必須である。

量子アニーリングにおける重要な課題としては、本質的な量子効果を実現する回路を組み込むことにより演算がどれだけ高速になるかということである。D-Waveマシンで実現されている横磁場イジング模型と呼ばれる理論模型は、原理的には古典コンピュータで効率よくシミュレートできることが知られているため、量子力学を使った本質的な高速化がどのような回路を用いてどのような問題設定を行えば実現されるかを明らかにする必要がある。また、現実のマシン上に必ず存在するノイズの効果の軽減も重要な課題である。一方で、人工知能や機械学習に活用する観点からは、熱雑音を積極的に利用して、本来の意味での組み合わせ最適化問題の厳密な解決から踏み出して近似解もある確率で許すことで効率よく実行できるのではないかとということも議論され始めている。

イジング型計算機のハードウェア実装の技術的な課題としては、超伝導量子ビットやレーザーなどイジングスピンを物理的に結合させる際に配線が非常に煩雑になり、大規模な全結合実機を作ることが困難である点である。コヒーレントイジングマシンでは、時間方向にレーザーを多重化することで配線数をオーダー N^2 からオーダー N に落とすと、その分計算時間が線形に増加してしまうといった課題がある。

量子コンピュータの実現を阻む大きな壁である計算中に生じる誤りを低減するための量子誤り訂正コードの開発、それを利用した誤り耐性量子計算を高度化し、できる限り少ない計算リソースで信頼性のある量子計算を達成できる理論的枠組みの構築およびその実験の実現も重要な課題である。

(5) 政策的課題

国内においては、限られたリソースを最大活用するために産官学連携・府省連携が重要である。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（特に材料技術、回路製造技術など）を新たな研究に有用に活かすことが重要となる。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型の研究開発を進めるとともに、優秀な研究者の国際的な循環に入り込めるような仕組が求められる。

(6) キーワード

量子コンピュータ、量子アニーリング、量子ビット、超伝導量子ビット、ジョセフソン接合、量子ゲート、量子スピン系、組み合わせ最適化問題、イジングマシン、コヒーレントイジングマシン、CMOS アニーラー

(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	○	↑	・東工大を中心に先端的な理論研究、理研・東大を中心に超伝導量子回路、マイクロ波量子光学およびハイブリッド量子系の研究が行われている。
	応用研究・開発	○	↑	・内閣府の ImPACT「量子人工脳」プロジェクトにおいてコヒーレントイジングマシンの大規模化、NEDO では産総研、理研の超伝導量子ビットを用いた量子アニーリング、イジングマシンの開発、日立では CMOS を用いたイジング型アニーリングマシンを 2011 年頃から開発しているが、大規模な投資による応用開発研究は行われておらず、米国やカナダにおける民間企業を中心とする大きな流れからは決定的な距離がある。
米国	基礎研究	◎	↑	・南カリフォルニア大学、Google 量子人工知能研究所、NASA Ames 研究センター、Los Alamos 国立研究所、MIT、テキサス A&M 大学などの拠点に多数の優秀な人材が集積し、理論および実験研究を遂行している。 ・IARPA の Quantum Enhanced Optimization プログラム開始でさらに活性化が進むと予想される。 ・Google と IBM は大規模なチーム体制で研究開発を行っている。 ・(カナダ) D-Wave 社において装置開発の指針となる基礎研究が長期間にわたって推進されており、McGill 大学、Sherbrooke 大学に強力な理論グループがある。実験に関しては IQC Waterloo に 3 つのチームがあり、マイクロ波量子光学や集積化へ向けたアプローチを行っている。
	応用研究・開発	◎	↑	・NASA Ames 研究センターを始め理論物理学者、計算機科学者らが、ソフトウェアの開発検証を進めている。 ・Google は量子人工知能研究所にハードウェアラボを設置し、超伝導量子ビット製造技術の第 1 人者である John Martinis 教授を UC Santa Barbara から引き抜いて開発を推進する体制を整備している。 ・Intel は、オランダの研究機関 QuTech との量子コンピュータの共同開発費として 10 年間で 5000 万ドルの投資を決定。 ・IBM は 2016 年 5 月に「The IBM Quantum Experience」というウェブサイトを開設し、5 個の量子ビットからなる超伝導デバイスをオンラインサービスとして一般公開。 ・(カナダ) 複数のスタートアップ企業が設計・シミュレーションツールの開発を行っている。 ・(カナダ) D-wave 社は米国にも拠点を構え、量子アニーリングマシンを製作している。第二世代は N=1024 量子ビット、次世代である 2,000 量子ビットを搭載した「D-Wave 2,000Q」を 2017 年 1 月に発売した。 ・(カナダ) D-wave 社が世界展開を目指し、D-wave International Inc. を設立。実社会の応用に向けて 1Qbit などがソフトウェア開発を進めている。
欧州	基礎研究	◎	↑	・オランダの Delft 工科大学のグループが小規模な表面コードの実験に成功し、オーストリアの Innsbruck 大学ではイオントラップ方式で小規模なカラーコードの実験が行われている。 ・スイス ETH Zurich およびイタリア・Trieste 理論物理学研究所において基礎的な理論研究が盛んである。 ・フランスの CEA Saclay 研究所、ENS Paris、CEA Grenoble、Joseph Fourier 大学ではマイクロ波量子光学・ハイブリッド量子系などの基礎研究が活発である。 ・ドイツでは Karlsruhe 工科大学、TU Munchen、Jena 大学、英国では Oxford 大学、London 大学、オーストリアでは Innsbruck、IST Wien などでも実験研究が盛んに行われている。 ・EU の Flagship「Quantum Technology」プロジェクトが 2018 年開始を目指して計画されている。
	応用研究・開発	◎	↑	・Intel がオランダの研究機関 QuTech との量子コンピュータの共同開発に 10 年間で 5000 万ドルを投資することが決定。 ・スイス IBM Zurich が応用研究を開始し、Delft 工科大学とともに IARPA LogiQ プロジェクトに参画している。ETH は計測器メーカー Zurich Instruments と共同で量子ビット制御のための装置開発を進めている。

中国	基礎研究	○	↑	・中国科学技術大学を中心に量子情報分野の研究が活発化している。特に、表面コードに関連した複数の実験が近年盛んである。 ・清華大学、中国科学技術院、北京計算科学研究センターなどに活発な理論グループがある。 ・USTC、清華大学、南京大学、浙江大学などで主に米国帰りの研究者が実験グループを立ち上げており、最近、成果が次々と出始めている。 ・学生層も厚く、欧米、日本へ留学している学生・ポスドクも多い。今後のさらなる伸びが予想される。
	応用研究・開発	△	↑	・現時点ではまだ顕著な研究活動は見られないが、IT業界で中国最大のアリババグループが中国科学院と共同で量子計算分野に大規模な投資を開始しており、近い将来に量子アニーリングにおいて本格的な研究に乗り出す可能性がある。
韓国	基礎研究	×	→	・韓国標準科学研究院（KRISS）に唯一の実験チーム、韓国高等科学院（KIAS）に理論チームがあるが、顕著な成果は生まれていない。
	応用研究・開発	×	→	・特筆すべき活動は見られない。

(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レベル

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）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 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) V. S. Denchev, S. Boixo, S. V. Isakov, N. Ding, R. Babbush, V. Smelyanskiy, J. Martinis and H. Neven, “What is the Computational Value of Finite Range Tunneling?”, Preprint: <http://arxiv.org/abs/1512.02206v4> (2016年3月16日アクセス)
- 2) ITpro by 日経コンピュータ “D-Waveの量子コンピュータは「1億倍高速」、NASAやGoogleが会見”、<http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/news/15/120904017/?ST=system> (2016年3月16日アクセス)
- 3) P.W. Shor, “Algorithms for quantum computation: Discrete log and factoring”, Proceedings of the 35th Annual IEEE Symp on Foundations of Computer Science, (1994): 124.
- 4) P.W. Shor, “Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer”, *SIAM Journal on Computing* 26, (1997): 1484.
- 5) T. Kadowaki and H. Nishimori, “Quantum annealing in the transverse Ising model”, *Phys. Rev. E* 58, (1998): 5355.
- 6) Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, J. S. Tsai, “Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box”, *Nature* 398, (1999): 786.
- 7) Google Research Blog “When can Quantum Annealing win?”, <http://googleresearch.blogspot.jp/2015/12/when-can-quantum-annealing-win.html> (2017年1月20日アクセス)

3.3.10 ロボット基盤技術

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

少子高齢化が進むこれからの社会において、負担の少ない高齢者介護、持続可能な社会インフラ保守管理、災害やテロに対するセキュリティ強化などの課題の解決には、人間が苦手な作業の代行や人間の能力を強化するロボットの活用が望まれる。ロボットは 1980 年代に産業用ロボットとして実用化され、現在は掃除ロボットや無人機（ドローン）などが製品化されるとともに、自動運転、災害救助、社会インフラメンテナンス、介護など様々なサービス分野で活躍するロボットが注目されている。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おり、政府は 2015 年 1 月にロボット新戦略を策定し、ロボットの早期実用化やシステム・サービスの強化を図ろうとしている。これまでも、ものづくり・サービス分野、介護・医療分野、農林水産業・食品産業分野、社会インフラ・災害対応分野など多様な応用分野に対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サービス分野でのロボットの産業競争力を強化するためには、コアとなる材料や部品、モジュールの開発を通して、ものづくり力で世界をリードすることが必要になってくる。

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、人間と密接に関わるサービス分野のロボット基盤技術には従来の産業用ロボットとは異なる機能や性能の要求がでてくる。例えば、人間と共生することが前提となるため、スマート化、高性能化、低価格化などとともに、小型軽量化や安全性向上が求められ、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な対応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と考えられる。それぞれの専門領域の技術を深めることに加え、情報通信、ナノテク・材料、ライフサイエンス・バイオなど異分野を含む他のロボット要素技術・基盤技術の研究者、ロボットシステムやサービス分野の技術者などとの連携による、新たな形態の技術開発の仕組みが求められる。

米国では DARPA や防衛関係の組織によってロボットの基礎研究開発に資金が投入されてきた。近年では、DARPA Grand Challenge（2004, 2005）、Urban Challenge（2007）、DARPA Robotics Challenge（2013, 2015）など注目すべき取り組みがある。また、人間と協働するロボットの開発と利用の加速を掲げている National Robotics Initiative（NRI）が発表され、NSF、NIH、NASA、USDA、DoD の共同公募が実施されている。

NSF の Robotics-VO (Virtual Organization) のプロジェクトでは、ジョージア工科大学、カーネギーメロン大学、ペンシルベニア大学、南カリフォルニア大学、スタンフォード大学、UCB、ワシントン大学、MIT などの大学と産業界が連携して「A Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics 2013 Edition」をとりまとめるなど、アカデミアと産業界が連携した取り組みが活発である。

欧州では Horizon 2020 の産業界のリーダーシップ確保 (LEIT) における ICT 分野の Work programme の 6 つの柱の一つがロボティクスであり、2014 年～2015 年の予算規模は 154M ユーロとなっている。また、欧州技術プラットフォーム (ETP) でもある euRobotics の下に、企業と研究機関が結集して 2014 年に世界最大の民間ロボット開発計画 SPARC を立ち上げるなど取り組みが活発化している。

中国では、科学技術部が公表した国家第 12 次 5 ヶ年科学技術発展計画の専門計画である①スマート製造科学技術発展専門計画、②サービスロボット科学技術発展専門計画などがロボットの研究開発の取り組み強化を宣言している。また、韓国では、第 3 次科学技術基本計画 (2013 年～2017 年) における 5 つの戦略分野の一つ「High 5 科学技術基盤の雇用創出」において、創造経済を支える専門家・職業群を育成すべき新産業分野の一つとしてロボットが掲げられている。

日本では、政府の「ロボット新戦略」やロボット革命イニシアチブ協議会 (2015 年 5 月発足) の動きとともに、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」がある。また、内閣府の ImPACT「タフ・ロボティクス・チャレンジ」では超高出力油圧ロボットなどの研究開発が進められている。

近年の具体的な基盤技術の研究開発としては以下のようなものがある。アクチュエータについては、広く使われているモータに加え、形状記憶合金、油圧アクチュエータ、空気圧アクチュエータなどの研究開発が進められている。センサについては、外界の情報を取り込むためのセンサとしてカメラ、レーザーレンジファインダー、ジャイロ、超音波センサ、圧力センサなどがあり、ウェアラブルに向けた開発も盛んになっている。制御関係では、マイクロプロセッサやコンピュータの計算・処理能力が高まってきたことや高速通信環境が整備されてきたことから、画像認識、AI・ディープラーニング (深層学習)、自律制御、生物の動作に学ぶ制御などの研究開発が進められている。

サービスに向けたロボットの基盤技術の開発をする上では、柔らかい素材を利用し柔らかい動きを実現するソフトロボティクスや、予測できない環境の変化にも対応できる生物の行動を模倣するといった大きな技術開発の流れを見た取り組みが今後必要である。

ソフトロボティクスに関しては、以下のような整理をした上で目的の機能や動作に最適な素材ややり方を考えて取り組む必要がある。また、ここでは柔らかいというだけでなく、軽量化の視点も重要であり、従来の金属材料に代わる CFRP など新素材の検討も必要である。

- ・センサフィードバックによる柔軟化：従来のリンクや関節が「剛」のロボットに対し、手先または関節に力／トルクセンサを搭載し、この外力／トルクの信号からモータを駆動させ、見かけ上ロボットの関節を柔軟にする。
- ・エンドエフェクタ柔軟化：既存の「剛」のロボットに対し、エンドエフェクタに相当す

るロボットハンド部分のみを柔軟とする。柔軟化の方法として、金属製バネを利用する方法が RCC (Remote Center Compliance) として知られており、ハンドを高分子材料で製作する方法は近年注目を集めており、ジャミングハンドなどが報告されている。

- 駆動の柔軟化：ロボットのリンクは剛体として、各関節を機構的に柔軟にするものであり、主に①ダイレクトドライブモータ、②減速器つき電動モータの出力軸にバネを介して出力リンクと結合、③空気圧アクチュエータ、④高分子アクチュエータなどがある。
- リンクなど構造の柔軟化：剛体リンクを柔軟材料で被覆する方法と、リンク自体を柔軟にする方法がある。リンクを柔軟にする方法では、薄板構造、インフレータブル構造などがある。

生物の行動を模倣するロボット、すなわち予測の難しい環境の変化にも対応するロボットの開発に関しては、どのような位置づけ・目的で生物模倣をするのかを明確にしておく必要がある。

- (1) 人間の意図を取り込む能力
- (2) 外界の様子や内界の様子を取り込む能力
- (3) 取り込んだ意図を自身の身体の動きに変換する能力
- (4) 内界・外界の様子を自分のなすべき行動の文脈で理解する能力
- (5) 指示された行動（意図された作業など）を実現する制御系
- (6) 指示された行動（意図された作業など）を実現するために適した身体

上記の (3) (4) (5) については、AI・ディープラーニングが重要になると考えられ、人間の脳神経を模倣した動作を行うためのソフトウェア、あるいはそのアルゴリズムによる電子回路、動作に適するデバイスなどの開発への取り組みが重要になる。また、環境変化への実時間での対応を可能にするような、身体と環境との相互作用をうまく利用したような制御方法の検討にも取り組むことも必要である。

(3) 注目動向

高分子材料利用のロボティクス研究が活発になっている。高分子材料を利用するロボットは柔軟な生物に学ぶ考えかたとして 1960 年代から研究者の興味を引き付けてきたが、耐久性、運動性能、センシング性能などで既存の他の方法に比して十分でないことから、実際にロボットに利用されることは無かった。しかし、2010 年ごろからソフトロボティクスへの関心が高まり、国際ジャーナル「Soft Robotics」が刊行された。また、世界最大のロボットの研究者会員を有する IEEE に「Soft Robotics」の HP サイトが開設され、2014 年と 2015 年にワークショップなどが開催されている。多くはポリマー材料を利用したセンサ、アクチュエータ、構造に関する研究である。アクチュエータでは、空気圧駆動、水／油圧駆動、ポリマー静電型、イオン電導型、電導性ポリマー、ポリマー熱駆動型などが研究開発されている。センサでは、高分子材料の熱、電気、光などの特性変化を計測することによって多様なセンサが柔軟材料によって実現可能となる。なお、ソフトロボティクスの実用化を目指し、東工大鈴森らは直径 2 mm と細径化を実現した空気圧ゴム人工筋アクチュエータの開発に成功し、ベンチャー企業を設立した。

近年、特に高分子材料を利用するロボットの研究発表が多くなった理由の一つに、3D プリンタの普及がある。例えば、最も実現性が高いと予想される空気／水／油などの流体駆動型アクチュエータの多くは、型にシリコンゴムなどを流し込み成型する方法で作製す

る。従来は金属製の型を製作してシリコンゴムなどで実現していた。金属製の型の製作は費用と時間がかかり、多数の形状を試験することが困難であった。しかし、3Dプリンタの利用によりABS樹脂製などの型をCADデータで様々な形状に容易に実現でき、世界的に広まった。さらに、柔軟な高分子材料を直接3Dプリンタで製作することが可能となり、さらに製作が容易となっている。液体と固体を同時プリントできる3Dプリンタを用いて、液体駆動アクチュエータと構造体を一括製作するロボットも提案されている。

制御技術に関して日本で大きな流れになっているのが、近年のセンサの高性能化と計算機パワーの増加を意識した制御方法である。移動ロボットを例にすると、自己位置推定と地図構築を同時に行い、さらにお互いを関連づけることで両方の推定精度を向上させようとする方法である。このような流れに沿ったプロジェクトとして、平成28年度から始まった新学術領域「人工知能と脳科学の対照と融合」がある。これは構成論的アプローチをとってきた人工知能と解析的アプローチをとってきた脳科学の融合を目指したプロジェクトである。

一方、上述した流れとは正反対の思想で制御を考える流れも出てきている。環境によっては、その場に行かないとわからない情報も多く存在する。例えば、環境の形状などは視覚装置を用いれば事前に入手できるが、柔らかさあるいは硬さなどはそこに立ってみないとわからない。このようなあらかじめ規定できない環境（無限定環境）の中を移動しようとする、どうしても実時間環境適応能力が必要になり、そのような制御は上述の方法とはなじまない。むしろ、身体と環境との相互作用を巧みに利用している昆虫などの生き物の行動原理にその秘訣を見出すべきだと考えられる。このような考え方は、表面的にみえる脳的な制御を「陽的制御」と呼ぶならば、影の作用なので「陰的制御」と呼ばれ、精神的に展開されようとしている。考え方に沿ったプロジェクトとしては、JSTのCREST「環境を友とする制御法の創成」がある。

センシング技術においても注目動向があるが、センサはロボットだけでなくIoTや自動運転など他の分野にも密に関わっているので、このセンシング技術についてはこの報告書の研究領域「MEMS・センシングデバイス」を参照されたい。

(4) 科学技術的課題

ロボット用の新たな要素技術・基盤技術に関する科学技術課題として、動力系、センシング系、制御系について以下のものが必要である。

動力系の技術としては、軽量、高効率、高出力の新たなアクチュエータの開発が重要である。人間に近い動きの自由度や滑らかさの実現や柔らかい素材の構造体を動かすことなどの多様な要求に対応できるように、流体の圧力、圧電効果、電気化学、形状記憶合金など新たな動作原理に基づくアクチュエータなどの研究開発に取り組む必要がある。また、ソフトロボティクスの研究においては空気圧駆動を用いた研究が活発であるが、その供給圧源となるコンプレッサの小型化、軽量化も課題である。従来のように容積を圧縮する方法ではなく、化学変化や相変化を用いた方法などの検討も重要である。

センシング技術としては、小型・軽量、低価格で、高い信頼性や安定性・再現性を持つセンサの開発が重要である。また、低消費電力特性や、実装時の扱いやすさ、触覚などでは点だけでなく面での計測に適するもの、アクチュエータとの一体化を可能とするものなどの開発が重要である。

制御系の技術としては、自律的動作や他のロボットや周辺機器との協調動作を可能とする周辺状況の観測・認識技術、姿勢制御技術、高速な通信技術の開発、状況変化の適切な予測技術などが重要である。これらには、多くのセンサからの情報を集めて高速に処理できる新たなアーキテクチャを組み込んだ集積回路や、ディープラーニングなどの人工知能技術が必要になる。また、予測していない環境の変化に対し、これまでの経験から反射的に安全に対応できるような、生物の認識や行動の原理を模倣しモデル化した新たな制御手法の開発も重要である。さらに、最近注目されているソフトロボティクスの実現に向けて、これまではロボットの構成部品として扱い難かったプラスチックやゴムなどの柔らかい材料を精度良く制御する技術も必要であり、材料、駆動系、センサ、制御の研究者・技術者が一体となった技術開発が望まれる。

(5) 政策的課題

ロボット基盤技術の研究開発には、国として中長期的な戦略的な取り組みが必要である。特に、異分野融合での新たな要素技術・基盤技術の開発とともに、これらの技術を統合したモジュールレベルの機能実証やその試験的利用ができるプラットフォームの構築と、このプラットフォームを活用する産学官が連携して研究開発を行うオープンな研究開発拠点の構築が必要である。これらにより、アカデミアの持つ多様な要素技術・基盤技術がさらに進化・向上し、これらの融合・統合により利用側から求められる新たな機能の実現が期待される。向上した技術や得られた知見はそれに参加したアカデミアに新たな知識として蓄積され、若手研究者・技術者の人材育成にも活かされるようにすることも重要である。

また、国際的優位性を確保するためには、グローバルな視点でのニーズ把握、日本の強みである材料技術や省エネ技術などを活かした技術開発、安全性や ELSI（Ethical, Legal and Social Issues；倫理的・法的・社会的問題）の視点での対策および国際標準化を進めることも重要である。

ロボット技術開発はこれからの大きな技術トレンドであるため、短期的な取り組みに終わらず日本の強い技術として育成するために、新しいロボット技術の領域を作り上げそれを進化させていくことが重要であり、府省の連携による継続的な枠組みが肝要である。例えば、日本は伝統的に化学、材料の分野には優れた研究成果があり、その成果をロボットに利用することが考えられる。一般に高機能材料の製法の模倣は容易でないことから、日本のロボット技術の優位性を維持することにもつながると考えられる。

(6) キーワード

ロボット技術、サービスロボット、手術支援ロボット、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、実時間制御、自律・協調制御技術、人工知能（AI）、ディープラーニング、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、高分子材料、CFRP

(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	○	→	・ CREST で人間と調和した創造的協働を実現する知的情報処理システムの構築などが行われている。 ・ 10 年以上前から日本ロボット学会、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いる。 ・ 脳科学などの基礎研究が行われているが、人工知能に関する原理探求型の研究は少ない。
	応用研究・開発	◎	→	・ 空気圧ゴム人工筋などソフトアクチュエータを用いたロボットの研究開発が活発である。 ・ ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジ、バイオニックヒューマノイドが拓く新産業革命などでロボットの研究開発が進められている。 ・ 即効性のある機械学習やデータ駆動型制御方策などの実用化に向けた研究が盛んになっている。
米国	基礎研究	◎	→	・ DARPA や防衛関係の組織によってロボットの基礎研究開発に資金が投入されてきた。 ・ MIT、ハーバード大学、スタンフォード大学等に研究者が集積し、ソフトロボティクスの研究が活発に行われている。 ・ ブルックスなどが身体と環境との相互作用に知の源泉があると主張し、その流れは継続している。
	応用研究・開発	◎	→	・ National Robotics Initiative (NRI) が発表され、DARPA Robotics Challenge の活動などがある。 ・ 手術支援ロボット分野においては、産学連携の研究を含め非常に活発に行われている。 ・ Otherlab や SOFTROBOTICS などのベンチャー企業も設立されており、基礎研究成果が蓄積されると早く事業展開される。 ・ ディープラーニングやビッグデータなどの研究を精力的に進めており世界をリードしている。
欧州	基礎研究	○	→	・ Horizon 2020 の Excellent Science の Future Emerging Technologies (FET) でロボットや CPS (Cyber Physical Systems) の将来の認知システムのための基礎的な研究が支援されている。 ・ スイス・チューリヒの ETH ではソフトロボティクスの基礎研究が活発であり、多くのアクチュエータやセンサが開発されている。イタリアの IIT ではリハビリや人との機械的接触を目的とするソフトロボティクス研究が盛んである。 ・ 柔軟連続体を用いた自律駆動するカテーテルロボットの研究プロジェクトが実施されている。
	応用研究・開発	◎	→	・ Horizon 2020 の Leadership in Enabling and Industrial Technologies (LEIT) における ICT 分野の Work programme の 6 つの柱の一つがロボティクスとなっている。 ・ ドイツの FESTO 社は空気圧駆動のソフトロボットを積極的に製作している。 ・ STIFF-FLOP (STIFFness controllable Flexible and Learn-able Manipulator for surgical OPERations) というプロジェクトを立ち上げて投資している。 ・ 群ロボットなどのように自律分散的な制御方法も進められている。
中国	基礎研究	○	→	・ 人工知能 (AI) に注力しており、人工知能ロボット産業団地を造る構想などが進んでいる。 ・ 他の諸外国に対して、材料と関係するソフトロボティクスの研究は少ないが、柔軟性をロボットに導入する研究は多い。
	応用研究・開発	○	↑	・ 豊富な資金力でハードを準備し、それを用いたソフトの研究開発が進められている。 ・ 柔軟材料を利用する 3D プリンタの試作会社などビジネスと直結した開発が活性化している。
韓国	基礎研究	○	→	・ 第 2 次知能型ロボット基本計画などが進められている。 ・ 韓国内のみでは本分野の研究者数は少ないが、2016 年から Soft Robotics Engineering Research Center を開設する計画であり、世界から客員教授を募集して国際的な共同研究組織を作ろうとしている。
	応用研究・開発	○	→	・ KAIST で開発された災害対応人型ロボット Hubo が 2015 年に DARPA ロボティクスチャレンジで優勝するなどの成果を挙げている。 ・ 教育用ロボット製作会社 Robotis などの活動は活発である。 ・ ヒューマノイドロボットなど技術は高いものになってきている。

(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レベル

- 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）のレベル
 (註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
 ◎ 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) Remote Center Compliance, BLAUTOTEC.LTD :
<http://www.bl-autotec.co.jp/fa/rc/rcc/index.html>
- 2) John R. Amend, Jr., Eric Brown, Nicholas Rodenberg, Heinrich M. Jaeger, and Hod Lipson, "A Positive Pressure Universal Gripper Based on the Jamming of Granular Material", IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 28, NO. 2, APRIL 2012.
<https://www.eng.yale.edu/brown/ABRJL12.pdf>
- 3) TEIJIN てるぷよハンド : <http://www.teijin-eng.co.jp/telpyohand/>
- 4) ダイレクトドライブモータ :
https://www.iai-robot.co.jp/product/new/new_dd_131004.html
- 5) Baxter, Rethink Robotics : <http://www.rethinkrobotics.com/>
- 6) Festo press photo CC_46_12_ExoHand_1.tifExoHand :
https://www.festo.com/net/fr-ch_ch/SupportPortal/Press.aspx?cat=4195&tab=11&offset=210
- 7) 導電性高分子アクチュエータ, イーメックス株 :
<http://www.eamex.co.jp/features/koubunshi/koubunsi/>
- 8) 新版ロボット工学ハンドブック コロナ社
- 9) Hye-Jong KIM, Yuto TANAKA, Akihiro Kawamura, Sadao Kawamura and Yasutaka NISHIOKA, "Improvement of Position Accuracy for Inflatable Robotic Arm using Visual Feedback Control Method", Proc. of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2015), pp.767-772, Busan, Korea, July 7-11, 2015.
- 10) http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial_robots/sensitiv/start.htm
- 11) <http://www.liebertpub.com/overview/soft-robotics/616/>
- 12) <http://www.ieee-ras.org/soft-robotics>
- 13) Soft Robotics - The Next Industrial Revolution? [Industrial Activities]
 Jonathan Rossiter; Helmut Hauser Publication Year: 2016, Page(s): 17-20
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7565693>
- 14) <http://www.brain-ai.jp/>
- 15) https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research/nenpou/h26/JST_1111084_14531869_2014_YR.pdf
- 16) 和田昭允：物理学は越境するゲノムへの道，岩波書店，p.83, 2005
- 17) 佐々木正人：アフォーダンス入門・知性はどこにうまれるか，講談社学術文庫，2014
- 18) マイケル・ポランニー：暗黙知の次元，ちくま学芸文庫，2003
- 19) ロルフ・ファイファー，クリスチャン・シャイアー（石黒，細田（翻訳））：知の創成

- 一身体性認知科学への招待，共立出版，2011
- 20) ロドニー・ブルックス（五味訳）：ブルックスの知能ロボット論—なぜ MIT のロボットは前進し続けるのか？，オーム社，2006
- 21) 清水博：生命知としての場の理論・柳生新陰流に見る共創の理，中公新書，1996
- 22) 浅田稔：共創知能システム，http://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/akc_PJ.html，2005
- 23) 石黒浩：共生ヒューマンロボットインタラクション，http://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/ikh_PJ.html，2014
- 24) <http://www.jst.go.jp/impact/program/07.html>
- 25) <http://www.stiff-flop.eu>
- 26) Morteza Amjadi et.al., Stretchable, Skin-Mountable, and Wearable Strain Sensors and Their Potential Applications: A Review, *Advanced Functional Materials*, 26, 1678-1698, 2016
- 27) http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100415.html
- 28) <http://softroboticstoolkit.com/>
- 29) <http://www.nsf.gov/pubs/2016/nsf16517/nsf16517.htm>
- 30) D. Rus and M.T. Tolley, Design, fabrication and control of soft robots, *nature*, 521:467-475 28 May 2015
- 31) Azad Shademan et.al., Supervised autonomous robotic soft tissue surgery, *Science Translational Medicine* 04 May 2016
- 32) <http://www.titech.ac.jp/news/2016/035222.html>
- 33) R. MacCurdy et.al., Printable Hydraulics: A Method for Fabricating Robots by 3D Co-Printing Solids and Liquids, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2016*
- 34) <http://www.ieee-ras.org/publications/t-ase/special-issues/special-issue-on-cloud-robotics-and-automation>
- 35) https://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/ikh_PJ.html
- 36) http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah26-2.html
- 37) Burgner-Kahrs J. et.al., Continuum Robots for Medical Applications: A Survey, *IEEE Trans. Robotics*, 31-6:1261-1280, 2015
- 38) European Commissions CORDIS, Cognitive Autonomous Catheter operating in Dynamic Environments http://cordis.europa.eu/project/rcn/106651_en.html