

3.4 情報通信・エレクトロニクス

ナノテク・材料は、IoT (Internet of Things)、ビッグデータ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の一つは、ナノ CMOS とスピンドデバイス、フォトニックデバイス、MEMS/NEMS、バイオセンサ (デバイス)、パワーデバイスなどを組み合わせて融合した、ハイブリッドナノデバイスの実現である。そこでは異種機能三次元集積化技術が鍵となる。

それとともに、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へのアプローチが重要となる。さらに、従来の材料にはない新しい機能の活用も考える必要がある。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が期待される。

以上の観点から、今後の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。ナノ CMOS 融合技術は、将来の IoT 社会の実現に不可欠な超高速・超高性能のコンピュータ技術の開発に資するとともに、MEMS/NEMS、無線デバイス、有機エレクトロニクス素子、マイクロエネルギーデバイスなどとの融合を経て、トリリオンセンサー時代の基盤となるナノセンサーネットワークの実現につながると期待される。また、パワーデバイスと各種エレクトロニクスの融合で、将来の低炭素社会実現の鍵となるスーパースマートグリッドの実現へとつながっていく。

3.4.1 超低消費電力ナノエレクトロニクス

(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

[背景と意義]

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、消費電力化と利便性の向上とにつながる。

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。特に、量子力学に関わる物理・化学・バイオなどの一般的に多くの計算量を必要とする問題へのアプローチが期待される。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、メモリ分野では東芝やサムソンがその研究開発を加速している。

[これまでの取組み]

・ロジック素子

米国では NRI(ナノエレクトロニクス研究イニシアチブ) が中心になって研究開発を推進している。従来は NRI 主導で4つの地域の大学で、トンネルデバイス、スピンドデバイス、グラフェンなどのテーマに対して集中的な研究を行っていたが、2013年に刷新され、3つの NRI 研究センター (CNFD、INDEX、SWAN) と3つの STARnet (Semiconductor Technology Advanced Research network) 研究センター (FAME、C-SPIN、LEAST) になった。この STARnet が米国 DARPA と協力して運営されることは注目される。これらの研究センターでは、エネルギー効率の高い原理として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く。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性変化デバイス、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」(2010-2013) 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。

・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、IBM は「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(資金的面も含めて)募っている。サムソンは、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。

・スピントロニクス

理論から応用研究まで、多くの先駆的研究が日本から生まれてきた分野であるが、大型国プロやメジャー企業の大型投資により、急速に海外での研究が活発化してきている。米国では、スピン利用の情報処理（メモリ、ロジック、コンピューティング）に対し、DARPA, NRI, NSFなどの予算がついている。また、様々なスピン利用ロジックデバイスがアーキテクチャを含めて提案・検討されている。日本では、科研費特定領域研究「スピン流」（2007~2010）の中で関連する基礎研究が行われた他、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」の中でMTJ (magnetic tunnel junction) を用いた不揮発性ロジックの検討が行われた。

・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も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。

・量子情報関係

複数の量子ビットを組み合わせた回路で、数ビット規模の量子演算が実現している。目下の課題は、このような回路で量子誤り訂正アルゴリズムを実現し、最終的に誤り耐性をもつ演算回路を実現することである。それに向けたアーキテクチャの研究が進められている一方で、これらの量子状態制御技術の進展を他の量子系の制御・観測に応用する研究も進んできている。国内では、量子情報科学におけるまとまった研究支援が2003年からJSTのCREST・さきがけ、2008年からFIRSTを通じて行われてきており、国内の多くの研究チームが参加している。また、新学術領域研究「量子サイバネティクス」も2008年から5年間の計画で実施されてきたが、2014年3月を持って終了した。

[今後必要となる取組み]

・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る。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<60mV/dec）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) 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る。このメモリの候補としては、MONOS、ReRAM、CNT を使った RAM、現在の Flash メモリの改造などが候補に挙げられている。

・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。

・スピントロニクス

基盤技術となるスピントロニクスデバイス技術、集積プロセス技術、回路技術の確立や、不揮発性ロジックなどの待機電力ゼロを実現する高度エネルギーマネージメント技術の確立も必要になる。また、現在、主流の電流注入による磁化反転 (スピン注入磁化反転) では、書き込み (磁化反転) に大きな電力、エネルギーを消費するため、低消費電力動作のためには電圧駆動 (電界) による磁化反転 (スイッチング) 技術の研究開発も期待される。

・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。

・量子情報

デコヒーレンス要因の理解とコヒーレンスの改善、より堅固な人工量子系の探索、量子制御のための周辺エレクトロニクスの開発、人工量子系を用いた大規模量子演算回路へ向けたアーキテクチャの最適化、有用な量子アルゴリズムの開発、様々な量子系との融合などが必要である。量子シミュレーションなどへの中期的な出口戦略も求められている。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。

(3) 科学技術的・政策的課題

今後の超低消費電力ナノエレクトロニクスの目指すべき方向は、従来の考え方の延長・延命ではなく、システムレベルから新たな枠組み・方式を構築することにあると考えられ、日本でも、レイヤー（アーキテクチャ、回路、デバイス、材料）間の垣根を取り払った研究プロジェクトの実現は必須である。特に、新型メモリと新型トランジスタの両方を（3次元で）混載し、両方の特徴を生かしたアーキテクチャの実現が必要であり、システム（回路）の専門家とデバイスの専門家の協調が不可欠である。例えば、産業界による大規模メモリの実現と長期信頼性試験、大学（公的研究機関）によるメモリ機構の研究と長期信頼性モデルの構築、産業界と大学（公的研究機関）の共同開発による新材料探索（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。

デバイス試作のファウンドリ機能の強化が望まれ、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。

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-nano 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量子計算を実用化するためには、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。

(4) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

〔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: アクセラレータ的)、などを検討している。

しかしながら、基本素子だけ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が引き続き盛んに行われている。
- ・スピントロニクス関係では、強磁性体から Si へのスピン注入、スピン蓄積、及びスピン伝導が室温で確認されつつある。強磁性体から Si に高効率にスピン注入するために必要な界面構造・材料・バンドギャップエンジニアリングが具体化してきた。また、スピン注入源となる高スピン分極率の材料 (ハーフメタル) が、CMOS プロセスと親和性のある製法を含めて実用化検討が進められている。
- ・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。

- 量子情報関係では、超伝導量子ビットのコヒーレンスの改善が進み、100 μs 超のコヒーレンス時間を実現している空洞共振器中の量子ビットのみならず、基板上の平面型共振器と結合した量子ビットでも 50 μs 近くのコヒーレンス時間を実現している。この進展を受けて、量子ビットの制御・観測の精度が飛躍的に高まり、今年に入り表面符号型誤り耐性量子計算コードの実現に必要なとされるような 99%超の精度を持つ量子ゲート制御や量子ビット読み出しの報告がなされている。同時に量子フィードバックに関する実験も複数報告されている。これらは量子エラー訂正アルゴリズムの本格的な実証につながる動きであり、実際大規模な量子誤り耐性アーキテクチャを目指した研究が始まっている。一方で、2013年にカナダの D-Wave 社は 512 量子ビットで構成された量子アニーリングに基づく量子コンピュータ 2 号機を Google、NASA および USRA に納入し、Google らはこれを核として量子人工知能研究所を設立し、研究を開始している。D-Wave 計算機の古典計算に関する優位性には激しい議論が続いているが、まだ収束には至っていない。

[注目すべきプロジェクト]

2013年1月に始まった EU Flagship グラフェンプロジェクトは「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 EU の参加国が総力を上げて取り組む 10 億ユーロの 10 年プロジェクトで、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、米国や欧州では 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。

量子計算関係においては米国が圧倒的な層の厚さをもっており、軍事予算を通じた研究サポートもある。現在、超伝導量子ビットや半導体量子ドット、イオントラップなどいくつかの系については大きなプロジェクトが走っている。IARPA を中心に集中的な活動が行われ、2009 年より 5 年間の大規模プロジェクトである Advanced Materials and Fabrication for Coherent Superconducting Qubits Program では超伝導量子ビットのコヒーレンス時間を向上するための材料・プロセスの研究に集中している。また並行して走っている Multi-Qubit Coherent Operations (MQCO) Program ではひとつのテーマとして超伝導量子ビット集積回路が取り上げられ、IBM と BBN Technology が共同で受託している。また上記のように Google が参入したということで、産業界の注目も集

まっている。Microsoft も以前から UCSB に研究所を運営しているが、D-Wave を成功例に、今後さらに民間の資金が投入されると予想される。欧州では SCALEQIT という超伝導量子ビット集積化と量子情報処理に向けたプロジェクトが 2013 年より開始されている。日本においては、革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) 「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実現」において継続して研究開発が行われる。

(5) キーワード

- ・待機電力、リーク電流、低消費電力、不揮発性メモリ、不揮発ロジック、不揮発性トランジスタ、待機電力ゼロ、リーク電流
- ・インスタント・オン、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
- ・スピントロニクス、磁化反転、スピン、電圧駆動、電界誘起、スピン MOSFET、スピン伝導、スピン流、スピン注入、スピン蓄積、スピンドバイス、スピンロジック
- ・CNT、グラフェン (Graphene)、GNR、単原子欠陥、トポロジカル絶縁体
- ・脳型コンピュータ、脳型素子、自律的学習、非ノイマン型、ニューロン、シナプス
- ・量子情報処理、量子計算、量子通信、量子光学、量子計測、量子シミュレーション
- ・原子物理学、超伝導、シリコン、原子レベル計算

(6) 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、新チャン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。スピントロニクス関係の評価では若手を中心に多くの成果が出ている。
	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。 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。また、ソニーは米国のMicronと共同で、ReRAMの研究開発を行っており、次世代メモリ開発では海外メーカーとの共同開発が一般化している。 産官学連携の研究開発として、つくばTIA-nanoを活用し、産業技術総合研究所の300mmウエハ試作ラインを用いて集積化検証を行う試作環境が整備された。これは、不揮発メモリを配線工程として埋め込むための試作環境であり、新材料を用いたデバイスの検証を行うことができる。しかし、これは時限的なプロジェクトとして推進されてきたものであり、プロジェクトが終了する2015年以降の活用が課題である。 デバイス技術以外では、スピントロニクスによる磁気メモリや不揮発性論理回路への応用研究・開発などに国からの集中投資がなされ研究が活発化している。
	産業化	○	→	汎用のロジックデバイスでは日本企業として儲かる道筋が描けていない。 高集積メモリの分野では、19nm技術を用いたNANDフラッシュメモリが製品化されている。15nm技術を用いたNANDフラッシュメモリの量産化も始まっており、従来の浮遊ゲート構造を用いたフラッシュメモリの微細化路線が続いている。DRAMでは、旧エルピーダメモリが20nm技術を用いた8GbDRAMの製造やそれ以降のDRAMの開発を行っており、Micronに買収された後も、高い技術力が評価されている。 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28nm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、40nm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。しかし、製造は海外ファウンドリとの提携を想定しており、デバイス製造という観点での技術力の維持が懸念されている。
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。 メモリ分野においては、新しい材料やデバイス・プロセス研究の萌芽は見られない。
	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作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、ベンチャー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。

米国	産業化	○	→	ロジックではIntel、メモリではMicronなど国内で各分野1社あるいは数社が生き残り、未だこの分野での産業化の意欲も高い。 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。これは、現在研究開発が盛んに行われている垂直磁化を利用したSTT-MRAMではなく、平面磁化を用いたものであり微細化の観点では劣るが、量産技術に仕上げるだけの高い技術を有していることを示している。垂直磁化STT-MRAMでは、8Mbであるが完全動作するものを試作したという発表があり (TDK Headway)、STT-MRAMも集積化に関する初めての成果であり、量産化技術でも進んでいることをアピールした。 一方で、マイクロンは相変化メモリ (PCM) の生産を中止すると発表しており、新メモリビジネスの難しさを示している。
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ニクス技術を含む技術開発が新世代システム開発として実施される。
	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多い (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行っている。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。
	産業化	△	→	基本的には、メモリメーカーがほとんど無いため、メモリに関する産業化の勢いは感じられない。マイクロンのPCMが新規の受注をストップしたことは、PCMを担当してきた欧州部門には大きな打撃である。
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。中国はPC分野では世界一であり、通信機器でも大きな飛躍を見せている。これらの製品開発を通して、メモリなどの分野でも発言力を増す可能性が高い。デバイスメーカーが育てば、応用研究・開発のアクティビティも高まるものと思われる。
	産業化	○	→	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Qualcomが、28nm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RRAMの報告があり、開発にも力を入れていると思われる。
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、サムソンが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。サムソンのグラフェンセンターは、大きな規模でグラフェンを成長させる技術を発表している。また、サムソンは最近、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。サムソンもMRAMなどに多くの人数を投入して研究開発を行っている。

	産業化	◎	↗	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、サムソン、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。サムソンは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と共同研究を行っているが、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。
	産業化	○	→	メモリ分野では、台湾のメーカーが先頭を切って量産化をしているような製品はみあたらない。

(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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(量子情報関係)

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	◎	→	最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」、新学術領域研究「量子サイバネティクス」の支援を中心に研究が行われてきた。超伝導量子ビットに関しては、NEC/理研、NTTの2グループが主になって研究を行ってきた。前者では近年超伝導量子ビットを人工原子として用いたマイクロ波量子光学の研究や、新しいタイプの量子ビットであるコヒーレント位相スリップ量子ビットの実証で成果を挙げている。後者ではダイヤモンド中のNV中心の持つスピンと超伝導量子ビットを結合したハイブリッド量子系の研究を行っている。東大にも新しいチームが発足し、超伝導量子回路およびハイブリッド量子系の研究が立ち上がりつつある。電子スピンを用いた量子ビットに関しては、半導体量子ドット、半導体中のドナー電子、ダイヤモンドNV中心などを用いた研究が、東大・慶応大・阪大などを中心になされている。大学における研究チームが少なく、海外に比べて学生・若手研究者の育成に遅れがある。理論面では理研チームが、海外研究者と活発に交流し成果を挙げている。ただし国内他のチームへの広がりが少ない。
	応用研究・開発	×	→	特筆すべき活動はない。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。

米国	基礎研究	◎	↗	<p>UC Santa Barbara (UCSB) チームと Yale 大学のチームなどにより、この10年間に急速な発展を見せている。UCSB では位相量子ビットと超伝導共振回路を用いた量子計算のための集積化アーキテクチャを提案し、2011年に4ビット+5共振器の回路で Shor のアルゴリズムの実証を行った。Yale 大学は2004年に回路量子電磁力学のアイデアを実証するとともに2007年に transmon 型量子ビットを発明した。2011年には空洞共振器中の transmon 量子ビットが非常に高いコヒーレンスを示すことを実証した。2014年にはUCSBが、5量子ビット回路上で99%超の量子ゲート演算精度を実証し、誤り耐性量子計算へ向けた研究が行われている。Boulder の NIST と JILA では超伝導量子回路を用いたナノメカニクスの量子力学的振る舞いの制御と観測が行われ、さらにオプトナノメカニクスとの融合が図られ、マイクロ波と光の間の量子インターフェースの実現を目指している。JILA 同様、UC Berkeley (UCB)、Princeton、Chicago、Wisconsin などの各大学に続々と UCSB、Yale の卒業生がグループを立ち上げそれぞれ新たな成果を挙げている。APS March Meeting でも発表件数がますます増加している。</p> <p>企業では IBM が UCSB や Yale 大学の OB を中心に20名近くのチームを構成し、研究を進めている。IBM はBBN Technology と一緒に IARPA の Multi-qubit project を受けて超伝導量子計算回路のスケールアップを目指している。他にNorthrop-Grumman も低電力消費型の単一磁束量子論理回路を量子ビット回路の制御に用いる研究を行っている。</p> <p>IARPA は別のプロジェクト Coherent superconducting qubits も走らせていて、UCSB を中心として超伝導量子ビットのコヒーレンスを改善するための材料・プロセス研究を大規模に進めている。こちらは5年のプロジェクトの後半にかかっているが、当初15ぐらいあった研究チームが現在は3つ (UCSB、Yale、UCB) に絞り込まれている。理論研究では Yale 大学の他に、UC Riverside、Northwestern、カナダの McGill、Sherbrooke などのチームが活躍している。また IBM では量子情報理論のチームと超伝導回路のグループが密接に連携している。</p>
	応用研究・開発	◎	↗	<p>カナダのベンチャー企業 D-wave が、断熱量子アニーリングマシンを開発し、2011年に米国 Lockheed-Martin 社に128量子ビットモデルの1号機を販売した。U. South California (USC) に運営を委託し研究に供している。また D-wave では Web 上で詳細を公開し、外部からの試用も推奨している。さらに2013年に512ビットモデルの2号機を Google、NASAらが購入し、量子人工知能研究所を設立して研究に供している。</p>
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。
欧州	基礎研究	◎	→	<p>EU のプロジェクトおよび各国独自のプログラム、また European Research Council の研究者個人対象のプロジェクトなどでサポートされている。世代交代が進み、40才以下の比較的若い研究者が中心的役割を担うようになってきている。基礎物理的な研究が主流であり、原子物理や量子光学などとの交流も多い。2013年からEUの SCALE-QITという超伝導量子ビット集積回路を目指したプロジェクトが発足した。資金面では英国で、量子情報研究全体に300億円という政府予算がついたということが話題になっている。</p> <p>スイスの ETH Zurich にも Yale 大学 OB が研究室を構え、30名近くの大きなグループで精力的に研究を行い、回路量子電磁力学の研究で多くの成果を挙げている。オランダの Delft 工科大学にも Yale 大学の OB が着任し、量子フィードバックや量子エラー訂正の研究を進めている。同大学では新たに量子計算研究センターを設立し、電気工学科も巻き込んで大規模化を目指している。フランスの CEA Saclay 研究所はこの分野の草分け的存在であり、固体中のスピン集団を用いた量子メモリの研究など現在も高いレベルの研究を行っている。Ecole Normale Supérieure にも新しいチームが立ち上がりマイクロ波量子光学、量子フィードバック などの研究が行われている。スウェーデンの Chalmers 工科大学ではマイクロ波量子光学に関する成果として、理研の理論グループとの共同研究による dynamical Casimir 効果の観測が報告された。フィンランドの Aalto 大学は現在超伝導ナノメカニクスの量子的振る舞いの研究に力を入れている。ドイツでは Erlangen、Aachen 大学に強力な理論のグループがある。実験では Karlsruhe およびMunich工科大学が力を入れている。</p>

	応用研究・開発	×	→	特筆すべき活動はない。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。
中国	基礎研究	△	↗	清華大学、中国科学技術院などに活発な理論グループがあり、理研との交流が多い。 実験グループは清華大学、南京大学、浙江大学などで米国帰りの研究者が立ち上げているが、まだ独自の優れた成果を出すには至っていない。しかし北京に計算科学研究センター、上海に超伝導研究センターが設立され新しいグループが立ちあがるなど、相変わらずふんだんな資金が投入されている。 学生層は厚く、欧米、日本へ留学している学生・ポストクも多い。今後の伸びが予想される。
	応用研究・開発	×	→	特筆すべき活動はない。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。
韓国	基礎研究	×	→	目に見える活動はない。
	応用研究・開発	×	→	特筆すべき活動はない。
	産業化	×	→	特筆すべき活動はない。

(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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

(7) 参考資料

(ロジック・メモリ関係)

- 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-memory>
- 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://thegadgetsites.com/2011/05/innovative-silicon-closing-doors-for-good/>.
- 19) <http://www.nanoctr.cn/>.
- 20) <http://www.kaist.edu/edu.html>.
- 21) http://www.skhynix.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?SIItem=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>.

(量子情報関係)

- 1) Quantum computing: An IBM perspective, M. Steffen *et al.*, IBM J. Res. & Dev. **55**, 13 (2011).
- 2) Superconducting Circuits for Quantum Information: An Outlook: M. H. Devoret and R. J. Schoelkopf, Science **339**, 1169 (2013).
- 3) <http://www.chalmers.se/mc2/scaleqit-en>
- 4) <http://qurope.eu/projects/qute-europe>
- 5) European Research Council <http://erc.europa.eu/>
- 6) D-wave http://www.dwavesys.com/en/dw_homepage.html
- 7) <http://www.nas.nasa.gov/quantum/>
- 8) Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance: R. Barends *et al.*, Nature **508**, 500 (2014).

3.4.2 二次元機能性原子薄膜（グラフェンなど）

(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動向

[背景と意義]

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さ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。

[これまでの取り組み]

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(1300億円)、韓国が350億円、シンガポールが150億円、英国100億円、米国が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Sung Kyunkwan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法によるエピタキシャルグラフェン製膜(九大)やSi基板上へテロエピグラフェン製膜(東北大)などで先導している。

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らのプラズモニック応用に関する論文[A.N. Grigorenko et al., Nature Photonics. 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。

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(日本の企業、研究機関はトップ10に入っていない)。

グラフェン実用化の動向

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 の三社であり、全て米国である。すでに年間数トンから数十トン（さらに 100 トンという話しもある）の供給能力があり、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、現在のところ上記 3 社からは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まもなく開始すると思われる。

CVD で製造するグラフェン原子層膜の供給は、用途開発に供するという観点では実質的に米国の Bluestone Global Tech 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 300~600Ω（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は移動度 2000~4000 cm²/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 80,000USD 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 4 社（および英国の 1 社）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、グラフェンのキラーアプリケーション確立の大きな障害となっていると言える。

[今後必要となる取組み]

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。

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产化高品質成膜技術、**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、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) 科学技術的・政策的課題

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、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進める取り組みが求められる。

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。

(4) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

[新たな技術動向]

新しい材料としてトポロジカル絶縁体などの研究も盛んに行われている。原子層オーダーで膜厚が制御されたグラフェン、**h-BN**、ダイカルコゲナイド半導体二次元機能性原子膜を連続的にヘテロエピ成長する製膜技術と材料構造・物性評価技術のリンケージ開発が新たな技術動向として注目されている。

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 **MoS₂**、**WSe₂** 等の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 (2014年6月米国開催の第72回 **Device Research Conference** では全74件のオーラル講演のうち18%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、大面積量产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、**MoS₂** や **WS₂** 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** の量产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。

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・フォトニック結晶を含むプラズモニックデバイス開発が進展し、その後増幅器、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我が国（東北大）が実験検証も先行しているが、独 Max Plank Institute, ベルリン工科大、米 Columbia 大、Cornell 大等が、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、グラフェンの重要な国際会議 RPGR 2013 が日本で開催され、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。

EU では Graphene Flagship（2013 年 10 月発足、約 1300 億円、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。

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。

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（2013/5/8 発表、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: : 半導体、ナノテク関連の連携組織 ; GLOBAL FOUNDRIES, IBM, Intel, Micron Technology and Texas Instruments)、グラフェン導電性インク工場建設計画 (2013/2/14~、NSF から Volbeck Materials Corporation への助成、グラフェン導電性インク(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、導電性インクは、フレキシブルエレクトロニクスの量産化に向けて使用されている (同社のコア技術はプリンストン大が開発したプロセスを用いた導電性インクの製造)) という、大きくはないが的をしぼ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。

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。

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¹。【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 億円規模) 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。】

(5) 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、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

1 <http://jp.cq.gov.cn/government/OfficialRelease/2013/12/31/1171842.shtml>

(6) 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、シリセンでもエピ製膜で最先端の位置を確保している。2013年科学研究費新学術領域「原子層科学」プロジェクトがスタートし、化学、物理、材料科学分野の研究者が連携して研究を推進する基礎ができた。
	応用研究・開発	○	↑	Si上へ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ようやく軌道に乗りつつある。
	産業化	○	↑	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。グラフェンRoll-to-roll製膜技術は韓国に並び世界トップレベルにある。タッチパネルディスプレイ・太陽電池電極応用、LSI配線応用で産業化へ展開をはかっている。グラフェン製膜・装置ベンチャーGraphene Platform Corp.が国内大手LSI-CAD、プリンティングメーカーと連携するなど、産業応用が多面的に展開されつつある。
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。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。
	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IBMが先駆的成果を上げ、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。MoS2等ダイカルコゲナイド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いっている。
	産業化	○	↑	グラフェンの産業化等、企業活動は活発に行われており、特許登録数も中国に次いでいるが、グラフェンデバイス研究を牽引していたIBMに産業化の兆しはまだ見えない。CVDグラフェン、MoS2、WS2等を製膜・販売するGraphene Supermarket Inc.や3Dプリンタ技術でグラフェンコンポジット材料の商用化を開始したGraphene-3D-Lab Inc.のように、ベンチャー企業による産業化が活発で今後も増大傾向にある。
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。

欧州	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1300億円)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（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。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。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。
	産業化	◎	↑	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、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	○	↑	応用研究も活発に行われており、今後も強まる傾向にある。グラフェン関連の学術論文出版数では第5位であった2008年から年間で世界第一に飛躍した。
	産業化	○	↑	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。デバイス関連での産業化の兆しはまだ見えない。
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年アジアで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。欧米の研究機関との共同によって、基礎研究レベルを向上させる戦略を取っている。
	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。
	産業化	○	↑	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。Samsungを中心に精力的な技術開発が行われているが、この1社しか産業化推進企業が存在しないので、裾野の広がりが見られない。

(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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 × : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑ : 上昇傾向、 → : 現状維持、 ↓ : 下降傾向

(7) 参考資料

- 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

3.4.3 スピントロニクス

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

電子のもつ 2 つの性質である電荷とスピンの両者を利用するエレクトロニクスの分野を「スピントロニクス」と呼ぶ。以下では、(a) 磁性半導体と光スピントロニクス、(b) スピントロニクスデバイス、(c) スピン流の 3 つに分けて記載する。

スピントロニクスの領域の中で最近急浮上してきたのがスピン角運動量の流れ、すなわち、スピン流の考え方である。純粹スピン流は電荷の移動に伴うジュール熱の発生を伴わないため、情報の伝送にエネルギーを要しない、また、磁界中でのスピンの歳差運動の回転方向が決まっていることから、量子整流効果に基づくスピントロニクス効果などなど新しい現象が見いだされるなど発展途上の分野である。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

(a) 磁性半導体・光スピントロニクス

磁性半導体は、半導体ベース構造やデバイスに磁性やスピンを持ち込み、半導体技術(光や電場)で磁性を制御するために必須となる基幹材料として位置づけられる。

(b) スピントロニクスデバイス

現在のコンピュータ・IT 機器の基盤であるメモリ (DRAM、SRAM など) やトランジスタ (CMOS) は、全て動作時あるいは待機時の消費電力が大きく、省電力化には本質的な限界がある。その結果、スマートフォンなどのモバイル IT 機器は頻繁な充電が必要となり、電力消費の増加と利便性の低下を引き起こしている。これらの問題を根本的に解決するために、スピントロニクス技術によるメモリや情報処理の不揮発化・超省電力化、無充電で長期間使用できる IT 機器および分散型 IT システムの実現などが望まれている。

(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。最近ではスピンの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。

[これまでの取り組み]

(a) 磁性半導体・光スピントロニクス

1960 年代以来研究が進められ、20 世紀末に我が国の研究者によって開発された III-V 族化合物半導体をベースとする磁性半導体は、遍歴電子系と局在電子系の境界領域における磁性の探索および制御という学術的意義のもとに研究が進められた。(Ga,Mn)As を中心として室温強磁性を目指す研究が 2000-2010 年にかけて世界的に展開されてきた。

現在は、キュリー温度は 210 K くらいで飽和しており、新たなブレイクスルーを模索する研究が欧州と日本で継続されているが、以前の勢いは見られない。米国陣営はこの分野からほとんど撤退し、多くはトポロジカル絶縁体やマルチフェロイック材料開発に向かった。日本で見いだされた Co 添加 TiO₂ に代表される酸化物系薄膜の室温強磁性は実験的に確立しているが、応用出口が明確でないため広く認知されていない。欧州陣はバランス良く進めている。

一方、光スピントロニクスは、「光と物質の角運動量を互換にするためデバイス創出」という側面と、電磁波、特に、超高周波である可視光による「秩序スピンの超高速制御」の追究という 2 つの側面をもつ。前者は、キラル合成化学、3次元ディスプレイ、量子通信などへの応用が控えており「スピン緩和のエンジニアリング」という学術的意義をもつ。後者は、光演算、超高速スピントロニクス、超高密度記録への応用が控えており、「非平衡状態における電子軌道・格子・スピン相互作用の体系的理解」という学術的意義をもつ。

金属系材料を中心に、磁化の光励起超高速現象の追究が、欧州（オランダ、ドイツ、その共同研究先）ならびに米国主導で進んでいる。彼らの主たる実験手法は超高速 X 線分光であるが、新規材料・構造は、日本とロシアの研究者が提供している場合が多い。先鋭的研究は、フランス、オランダ、日本において進行中で、日本では、磁性半導体ならびに金属系多層膜で弱励起での超高速磁気現象の探究と応用研究を進めている。電磁波あるいはプラズモンによる秩序スピンの操作研究も米国 Kwan が大型予算を使ったプロジェクトを展開中である。2000 年以降の半導体スピン注入の研究に隠れているが、円偏光発光・受光デバイスの創出が連綿と続いており、最近では、光デバイス研究者らにもその重要性和新規性が認知され始めている。

新潮流としては、新たなフォトニック材料開発をめざして、磁性絶縁体（磁性ガーネット）の薄膜化研究が、中国、ロシア、ポーランド、日本で盛んになり始めている。

(b) スピントロニクスデバイス

磁性／非磁性金属多層構造膜における巨大磁気抵抗効果(GMR)、磁性金属／絶縁体／磁性金属におけるトンネル磁気抵抗効果(TMR)は、ハードディスクの高密度化に寄与したほか、不揮発性磁気記録素子 MRAM などのスピントロニクスデバイスとして実用化された。さらにスピン移行トルク(STT)が見出され、STT-MRAM として高密度不揮発記録素子のみならず、ロジック素子に組み込みメモリとして導入されつつある。これには、酸化物を障壁層とする TMR 素子をベースとする不揮発性記録素子をロジック回路に持ち込んだ新たなスピントロニクスデバイスが大きく貢献している。さらに、最近になって、これまでの電流によるスピン制御から、電圧印加によるスピン制御のできるスピントロニクスデバイスが見いだされ、さらなる省電力化の道筋が拓かれつつある。

スピントロニクス技術の応用研究開発に関する日本のこれまでの大きな取り組みとしては、(i)「NEDO スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」(2006-2010)および「NEDO ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発」(2011-2015)、(ii)FIRST プログラム「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)、(iii)JST の研究成果展開事業 (S-イノベ) 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-現在) などが行われてきた。これらの取り組みによって、日本は基

礎研究のみならず、基盤技術を産業界に橋渡しする応用研究でも世界をリードするに至っている。特に、産業応用の中核となる高性能 MgO-MTJ 素子および垂直磁化 STT-MRAM は日本発の技術であり、橋渡し応用研究でも日本が世界をリードしている。

また、スピン移行トルクを利用したスピントルク振動子、スピンドイスなど、新たなスピントロニクスデバイスが生まれている。

Datta, Das の提案したスピントランジスタは、スピン注入の困難さから実現してこなかったが、最近の研究により、シリコン、ゲルマニウム、グラフェンなどにスピン偏極した電子を注入し、ゲートに印加した電圧によってスピン蓄積を制御する技術が確立し、実現に向かって一歩進展した。ここでも日本の研究者の寄与が大きい。

(c) スピン流

近年のナノテクノロジーの進展によって、スピン流の減衰長よりも短いスケールの物性が探索され、スピン流のもたらす現象が次々と発見された。特に 2000 年頃以降、スピン流による磁化反転現象の実験が世界中で報告されるようになり、室温で安定動作する磁気メモリの書き込み原理として瞬く間に実用化レベルに到達した。これによりスピン流の概念の有用性が示され、スピン流の物性研究が本格的に開始された。

スピン流に関する物性研究の初期段階では、電流について知られている現象のスピン流版を探す研究が行われた。2006 年には、逆スピンホール効果と呼ばれるスピン流の電気的測定方法が日本及び米国のグループによりほぼ同時に発見された。この現象は、2004 年に発見されたスピンホール効果の逆効果であり、アンペールの法則のスピン流版と見做すことができる。逆スピンホール効果の発見によってスピン流が定量的な実験科学の対象となり、この測定方法を用いてスピン流の新現象が次々に発見された。

スピン流の生成原理としては、スピンプンピングと呼ばれる、磁化ダイナミクスからスピン流が誘起さ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。現在は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、理論構築においても日本の研究者が重要な役割を果たした。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可能性が生まれ、実証実験が進められている。

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。

スピントロニクス（特にスピン流）に関する研究開発においては、基礎・応用の両面において日本の研究グループが多大な功績を挙げており、我が国で発見されたスピン流の電磁現象も多い。我が国の研究者が世界をリードしているスピントロニクス分野の更なる発展により、日本の産業競争力の源泉となってきたエレクトロニクスの国際的な競争力回復・強化に繋がることも期待される。

[今後必要となる取組み]

(a) 磁性半導体・光スピントロニクス

新規な発想・目標による材料創出（例えば、光感受性の高い反強磁性半導体薄膜の創出、制御された磁性金属界面を豊富に内包する複合ナノ構造の創出と界面磁性の電子制御、半導体基板ならびにガラス基板上での酸化物系磁性半導体・絶縁体結晶薄膜の作製法の追究）が必要である。このような発想に基づく研究は、半導体を母体とする系だけでなく、金属系や絶縁体系を母体とする材料系でも広く展開する価値のあるものである。

III-V 族強磁性半導体の研究の深化のための材料開発（例えば、n 型強磁性半導体、発光する機能を備えた磁性半導体や磁性絶縁体、光波長としては、分子選別として有用な赤外光から医療・生物応用までを網羅する紫外光領域まで）。このような材料研究では、重点的な研究費投入よりは、細くても長期的な研究費投入（極端に言えば、経験を積んだ研究者 1、2 名による先端的な研究）を行うべき領域と考える。

このほか、光スピントロニクスの分野では、高機能な円偏光発光・受光デバイスの創出（室温化を含む）、スピン交換相互作用、ならびに、スピン軌道相互作用の光励起制御の学理構築、磁化の不揮発性を光励起で生じる非平衡状態で動的に制御することで生じる新機能を応用する研究。例えば、偏光による光信号変調・遅延や一時的記憶などが挙げられる。

(b) スピントロニクスデバイス

スピントルク (STT) 書き込みの次に来る究極の省電力書き込み技術として、電界誘起磁気異方性変化現象を用いた「電圧トルク」書き込みが期待されている。これは 2012 年に大阪大学のグループが初めて実現した日本発の技術である¹⁾。このような日本初の技術を世界に先駆けて実用化に結びつけるには、早い段階から橋渡し応用研究に投資することが重要となるが、電圧トルク書き込みの応用研究については、2014 年度後半から開始する ImPACT「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」（プログラムマネージャ：佐橋政司）の最重要テーマとなっており、日本が世界に先駆けて産学官連携の研究開発をスタートする体制が整っている。

(c) スピン流

スピントロニクスの有効理論の建設が必要である。エレクトロニクスは電磁気学の基礎の上に成り立っており、物質中の電磁場の性質を記述する膨大なパラメータの中から少数の本質となる情報を抽出した有効理論「物質の電磁気学」を用いて、応用の学理やテクノロジーの体系が構築されてきた。スピン流科学の幅広い応用を推し進めるためには、このような簡便で扱いやすい有効理論の建設が重要である。

(3) 科学技術的・政策的課題

(a) 磁性半導体・光スピントロニクス

新規な発想・目標による材料創出、高機能な円偏光発光・受光デバイスの創出を支える仕組みとして、熟練研究者と若手研究者を組み合わせ、新しい視点を有する細くても息の長い材料・物性研究のサポートが必要である。また、III-V 族強磁性半導体研究のさらなる深化、光スピントロニクスのさらなる展開を支える仕組みとして、光デバイス研究者とスピン物性研究者の交流フォーラムの構築（たとえば、小規模で息の長い国際シンポジウム）があるとよい。

(b) スピントロニクスデバイス

不揮発性メモリ MRAM や HDD 再生磁気ヘッドの中核技術である磁気トンネル接合 (MTJ) のトンネル磁気抵抗効果 (TMR 効果) は、1995 年に東北大の宮崎照宣教授が世界で初めて室温で実現した技術である。しかし、MRAM は航空宇宙・軍事技術として DARPA の支援を受けていち早く実用化に取り組んだフリースケール社（現 Everspin Technologies 社）が世界に先駆けて実用化に成功し、現在もニッチマーケットではあるが世界をリードしている。一方、日本企業は民生品と大規模市場に重きを置いているため、未成熟な基礎研究の段階では実用化を見据えた本腰を入れた研究開発に取り組みにくい環境がある。また、まずはニッチマーケットを目指した製品開発の手法としてベンチャー企業が有効であるが、日本がベンチャー企業に不向きな環境であることは周知の通りである。このため、折角の日本発の革新的技術であっても、製品化で米国の後塵を拝することがよくある。日本においても、挑戦的なベンチャー企業を育成するための規制改革、税制改革が求められる。

(c) スピン流

エレクトロニクスの単なる焼き直しではなく、電流では不可能なスピンならではの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。

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り、このような場を提供するプロジェクトを策定しなくてはならない。

(4) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

[新たな技術動向]

・電圧誘起磁化反転を用いた電圧トルク MRAM

電流（スピントルク STT）を書き込みに用いる STT-MRAM は磁界書き込み型のトグル MRAM に比べて格段に低消費電力であるが、それでも書き込み電流に伴うジュール熱

によるエネルギー浪費は避けられない。これに対して、電界誘起磁気異方性変化によるトルク（電圧誘起トルク）を書き込みに用いる新しい不揮発性メモリ「電圧トルク 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 桁小さなエネルギーでの書き込みが可能となる。ただし、電圧トルク書き込みは原理実証実験に成功したばかりの未成熟な技術であるため、電圧トルク MRAM の実用化に向けて解決すべき課題が山積している。純粋な電圧トルク MRAM に移行する前の第一段階として、スピントルクと電圧トルクの併用型 MRAM の実用化が期待される。

- ・ハードディスクの瓦記録(Shingled Magnetic Recording: SMR)と二次元磁気記録(Two Dimensional Magnetic Recording: TDMR)

現在の HDD は、MgO-MTJ 素子を用いた TMR 再生磁気ヘッド、垂直磁気記録媒体、および単磁極型の記録ヘッドによって構成されており、その面記録密度は 750 Gbit/inch²を超えている。現在の記録方式では、記録媒体上のトラック幅≒記録・再生ヘッドの横幅となっている。現在、トラック幅が 30 nm まで微細化しており、これ以上トラック幅が狭まると (i) 微細な記録ヘッドでは十分な書き込み磁界が発生できない、(ii) 微細な記録ビットからの微弱な磁界信号を高 S/N 比で再生することが困難になる、という問題が生じるため、これ以上の高記録密度化は困難な状況にある。これらの問題の早急な解決策として、瓦記録(Shingled Magnetic Recording: SMR)と二次元磁気記録(Two Dimensional Magnetic Recording: TDMR)の近い将来の実用化が見込まれている。瓦記録 SMR では、トラック幅よりも横幅の広い単磁極記録ヘッドを用いて大きな書き込み磁界を発生させ、記録ヘッドをトラック幅分だけ横にずらしながら記録を行うことにより、記録ヘッドの片側の角だけを用いて書き込みを行う技術である。屋根瓦を重ねるように記録ビットを書き込んでいくことから、瓦記録と呼ばれる。一方、二次元磁気記録 TDMR は、再生ヘッド中に複数の TMR ヘッド用 MTJ 素子を近接させてトラックをまたぐように配置し、記録トラックからの信号磁界を差動読み出しすることによって、狭トラックからの微弱な磁界信号を高 S/N 比で読み出す技術である。SMR も TDMR も既存の素子技術に基づいているため、実用化に向けた障壁は比較的 low、近い将来の実用化が見込まれる。これらの技術によって、HDD の記録密度は 1 Tbit/inch²を超えるものと期待される。

- ・HDD の熱アシスト磁気記録(Heat-Assisted Magnetic Recording: HAMR)、マイクロ波アシスト書き込み(Microwave-Assisted Magnetic Recording: MAMR)

SMR・TDMR の次の新技術として、熱アシスト書き込み(HAMR)の実用化が期待されている。HAMR は、書き込み瞬間だけ記録媒体の記録箇所にレーザーを照射して加熱し、書き込みにくい高磁気異方性媒体に書き込みを行う技術である。これにより、超微細化しても長期間の記録保持が可能な高磁気異方性媒体への書き込みが可能となり、さらなる高記録密度化が可能となる。すでに米シーゲイト社は HAMR を用いた HDD 試作品のデモを行っており、長期耐久性などの残された問題が解決されれば実用化可能な技術である。一方、熱の代わりにマイクロ波を照射することで高磁気異方性媒体に書き込みを行う技術がマイクロ波アシスト書き込み MAMR である。MAMR は HAMR に比べて理論的にはメリットが多いが、まだ基礎研究段階にあるため、実用化の目処はま

だ立っていない。

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。

・マグノニクスの新展開

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。

[注目すべきプロジェクト]

- ・科学研究費新学術領域「スピン変換科学」(H26.9月発足)
- ・ImPACT「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」(プログラムマネージャ：佐橋政司)
- ・NEDO「ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発³⁾参照)」
- ・科研費特定領域研究「スピン流」(2007-2010) および 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)：これらを通じて、スピン流物理の基盤が構築された。
- ・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。
- ・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)
- ・JST 研究成果展開事業 S-イノベ「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-) この事業では、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。

海外の状況

・IMEC STT-MRAM プロジェクト

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。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。

・シンガポール A*STAR と Global Foundries の連携

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。これに、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⁴⁾が連携し、300mm ウェハ、

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。

・ スピン流と熱の融合研究

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エレク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み始められている。

(5) キーワード

スピントロニクス、光スピントロニクス、磁性半導体、スピン偏極、スピン流、スピン伝導、スピン注入、スピン蓄積、スピン軌道相互作用、スピン波、マグノン、マグノニクス、スピンホール効果、逆スピンホール効果、スピンゼーベック効果、スピンポンピング、熱電変換、熱揺らぎ、磁化反転、不揮発性メモリ、スピンロジック、磁気抵抗効果、スピン移行トルク、磁壁、磁気ボルテックス、強磁性体、フェリ磁性体、絶縁体、薄膜、電圧トルク、MRAM、STTMRAM、HDD、HAMR、MAMR

(6) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<p>磁性半導体・光スピントロニクス：現状維持だが、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。</p> <p>スピントロニクスデバイス：大阪大学グループによる世界初の「電圧による双方向磁化反転の実現」¹⁾、産総研、NIMS、東北大グループなどによる新材料開発など、MRAM・磁気記録関連の基盤技術の研究開発で顕著な成果が創出されている。</p> <p>スピン流：科研費特定領域研究「スピン流」(2007-2010)の中で関連する基礎研究が行われた他、JST-ERATO「齊藤スピン量子磁気整流」が新たに展開</p>
	応用研究・開発	◎	↗	<p>磁性半導体・光スピントロニクス：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</p> <p>スピントロニクスデバイス：NEDOノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発、ImPACT「無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現」など、基礎研究成果の産業界への橋渡しを目指した産学官連携プロジェクトが盛んに行われている。</p> <p>スピン流：JST研究成果展開事業(S-イノベ)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-)の中でスピン流の新たな革新的応用可能性を探ることを目的とした研究が行われている。電機・材料メーカーを中心に、スピン流効果(特にスピンゼーベック効果)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。</p>
	産業化	◎	→	<p>光スピントロニクス：企業における光・マイクロ波アシスト磁気記録</p> <p>スピントロニクスデバイス：不揮発性メモリに関しては、東芝ハイニクス連合のSTT-MRAM開発は世界をリードしている。HDD新技術の事業化に関しては個々の部品メーカーの活動が中心で、目立った動きは見られない。MRAM、HDD関連の製造装置開発は、世界トップレベル。</p> <p>スピン流：かつての勢いは見られないものの、数多のデバイスメーカーが存在するため、産業化を行う潜在能力は極めて高い。しかし、現時点で産業化に向けた具体的アクションを起こしている企業は少ない。</p>

米国	基礎研究	◎	→	<p>磁性半導体・光スピントロニクス：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。</p> <p>スピントロニクスデバイス：Cornell大学を中心としたスピントルク(STT)やスピンホール効果の基礎研究、カリフォルニア大学を中心としたSTT誘起のスピンダイナミクスの基礎研究など、世界をリードする基礎研究が進められている。</p> <p>スピン流：米国国立科学財団 (National Science Foundation: NSF)、米国合衆国エネルギー省 (The U.S. Department of Energy: DOE)、DOE傘下のNational Energy Research Scientific Computing Center (NERSC)、さらには米国海軍研究事務所 (Office of Naval Research: 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。</p>
	応用研究・開発	△	↘	<p>磁性半導体・光スピントロニクス：シリコンスピンエレクトロニクスもやや下火</p> <p>スピントロニクスデバイス：STT-MRAM関連のDARPAプロジェクトが終了し、最近では目立った動きは見られない。一方、MRAM関連のベンチャー企業が盛んに設立されており、米国における応用研究開発はベンチャー企業を中心に大学・産業界が連携する形で進められている。</p> <p>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。</p>
	産業化	◎	↗	<p>スピントロニクスデバイス：現在唯一のMRAMメーカーであるEverspin Technologiesによる次世代型STT-MRAM開発、MRAM研究の老舗であるIBMとマイクロン・サムソンとの連携、混載メモリ応用を狙ったIntelやQualcommの参入など、産業化に向けた動きが目立ってきている。また、HDD新技術の産業化を目指した活動が、米国大手HDDメーカーによって精力的に進められている。</p> <p>スピン流：現時点でスピン流デバイスの産業化に関する情報は無いが、同国内にはIntel、Micron、IBM、Motorolaなど世界的なデバイスメーカーが割拠しており、一旦産業化の目処がつけば、一気に市場を支配する潜在能力を有している。</p>
欧州	基礎研究	○	↗	<p>光スピントロニクス：X線分光学と超高速分光学の融合が進みつつあって極めて元気</p> <p>スピントロニクスデバイス：不揮発性メモリ・磁気記録関連の基礎研究はフランスの国立研究機関を中心に進められている。また、最近、米IBMの著名研究者が独MPI-Halleにディレクターとして赴任し、これから大きなグループを設立するため、今後の動向が注目される。</p>
	応用研究・開発	○	↗	<p>磁性半導体・光スピントロニクス：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。</p> <p>スピントロニクスデバイス：仏グルノーブルのSpintec(Letiの下部組織)を中心とした熱アシスト型MRAMや高周波発振器の研究開発、ベルギーIMECを中心としたSTT-MRAMプロジェクトなどが進められている。</p>
	産業化	○	↘	<p>IMECのSTT-MRAMプロジェクトには欧州域内の企業はほとんど関わっていない。産業化に関しては、前出のSpintecとCrocus社(ベンチャー企業)の連携が中心。</p>
中国	基礎研究	△	↗	<p>磁性半導体：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</p> <p>スピントロニクスデバイス：これまでのところ顕著な成果は出ていないが、米国で活動する中国系研究者との連携が増加傾向にあり、研究者人口も増えている。</p> <p>スピン流：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。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を行っているため、潜在能力は高い。</p>
	応用研究・開発	△	↗	<p>スピントロニクスデバイス：表立った動きは特に見られないが、米国のMRAM関連ベンチャーと中国の半導体ファウンドリとの連携が進められている模様。</p> <p>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。</p>

	産業化	○	↑	スピントロニクスデバイス： HDD部品および完成品の世界的な生産拠点。 スピンドロニクス：現時点でスピンドロニクスデバイスの産業化に関する情報は無い。また、世界的に競争力のあるデバイスメーカーが無い。ただし、簡便な作製手法が適用可能なスピンドロニクスデバイスの場合、これは問題とならない。従って、かつて太陽電池メーカーが乱立したように、参入する企業が急速に増える可能性はある。
韓国	基礎研究	○	→	磁性半導体：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 スピントロニクスデバイス：これまでのところ実験研究では顕著な成果は出されていないが、理論・シミュレーション研究では高麗大学グループが世界的に見ても高水準の研究を行っている。 スピンドロニクス：現時点でスピンドロニクスに関する研究例はまだ少なく、プレーヤーはKIST (Korea Institute of Science and Technology) 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	△	↓	スピントロニクスデバイス：MRAMに関する国家プロジェクトが終了した以降、目立った動きはない。学术界と産業界の隔たりが大きく、産学連携があまり上手くいっていない模様。 スピンドロニクス：現時点でスピンドロニクスの応用研究・開発に関する情報は無いが、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。
	産業化	◎	↑	スピントロニクスデバイス：サムソンによるSTT-MRAM事業化を目指した積極投資、ハイニクスー東芝連合によるMRAM開発専用300mmファブ設立など、製品化に向けた動きは日本よりも活発。 スピンドロニクス：現時点でスピンドロニクスデバイスの産業化に関する情報は無いが、デバイスメーカーの国際競争力が高いため、産業化の道筋が見えた場合の爆発力は侮れない。

(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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑ : 上昇傾向、 → : 現状維持、 ↓ : 下降傾向

(7) 引用資料

- 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) Y. Shiota *et al.*, Nature Materials **11**, 39 (2012).
- 4) <http://www.jst.go.jp/impact/program04.html>
- 5) <http://noff-pj.jp/>
- 6) http://www.everspin.com/PDF/press/PR1_Global_Foundries_Everspin_FINAL_20141027.pdf
- 7) <http://grantome.com/grant/NSF/DMR-1262253> ,
<http://grantome.com/grant/NSF/ECCS-1231598> ,
<http://grantome.com/grant/NSF/CBET-1133589> ,
<http://grantome.com/grant/NSF/ECCS-1305586> ,
<http://grantome.com/grant/NSF/ECCS-1305574>
- 8) <http://researchnews.osu.edu/archive/thermospin.htm> ,

<http://researchnews.osu.edu/archive/giantseebeck.htm>

9) <http://www.jst.go.jp/inter/sicp/country/uk.html>,

<http://www.jst.go.jp/report/2009/100225.html>

10) <http://www.spincat.info/>

11) http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-10-BLAN-1011

http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-11-BS10-0003

http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-13-BS10-0005

http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-13-BS10-0016

http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-11-NANO-0016

(8) 参考資料 (磁性半導体・光スピントロニクス関係)

- Proceedings of MORIS 2013 (Dec.2-5, 2013) at Omiya, Japan
- Proceedings of Moscow International Symposium on Magnetism (June 30 - July 3, 2014) at Moscow, Russia
- Proceedings of Ultrafast Conferece 2013 (Nov.1-5, 2013) at Strasburg, France
- Proceedings of Novel Trend in Physics of Ferroics (July 4-6, 2014) at St. Petersburg, Russia
- Proceedings of Spintronics VI (Aug.25-29, 2013) at San Diego, USA
- Proceedings of SSDM 2013 (Sept. 24-27, 2014) at Fukuoka, Japan
- Proceedings of SSDM 2014 (Sept. 8-11, 2014) at Tsukuba, Japan
- Proceedings of Spintronics VII (Aug.17-21) at San Diego, USA

3.4.4 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研究開発領域である。光の技術は情報通信、医療・バイオ、加工、分析・計測、映像、照明、発電などの幅広い応用分野への適用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動向

[背景と意義]

光技術は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。現代の情報社会を支えるインターネットには高性能の光ファイバーを用いた光通信技術が必要不可欠であり、高機能通信用レーザーにより高速・大容量な情報通信が可能となっている。また、レーザーは半導体基板の切断や 3D プリンタなど加工にも利用されるほか、医療機器にも多く利用されている。近年は照明の LED 化により節電が進んでいるほか、太陽電池による発電は家庭への普及も進んでいる。今後もこれらはさらに発展し、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いくと考えられる。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・材料技術を中心に述べる。

ネットワークをバックボーンとして支える光通信技術においては、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の一途を遂げるものと考えられる。光通信の伝送容量は、光ファイバー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り、現状の光ファイバー 1 本で伝送可能な容量は 100 Tbit/s とされている¹⁾。その一方で、インターネットトラフィックは年率約 40% の速度で増大しており²⁾、2030 年頃には 1 Pbit/s (10¹⁵ bit) の伝送速度が予測されている。その結果、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り、対策が必要である。また、容量限界の克服に加え、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。今後 20 年の間に IT 機器の電力消費量は 1000 億 kWhr 近く増大すると言われており³⁾、これは発電所の年間発電量 10 基分以上に相当する。以上の課題を踏まえ、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、デバイスレベルにおいては、通信用のトランシーバ/レシーバを中心に光技術の集積化が進められており、2000 年頃から光集積技術は急激に立ち上がり、現在ほぼトランジスタにおけるムーアの法則と同じレートで集積度が増加している。しかし、現在の光集積は従来型のデバイスを集積する形で進んでいるため、光集積度は既に光デバイスそのもののサイズに起因する限界に近づきつつある。光集積技術が今後もこのレートを

維持するためには、電子集積技術と同様に継続的に新たなブレークスルー技術の導入が必須である。

データセンター等で処理・伝送される情報量も爆発的増大が継続すると予測され、LSI チップ間やチップ内のような比較的短距離の配線でも電気配線の代わりに光配線を使うことが検討されており、光配線の小型化・低コスト化が望まれている。巨大なシリコン電子デバイス産業のリソースを活用することができるシリコンフォトニクスは、チップ間やチップ内光配線に適用できるほど小型化・低コスト化が出来る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いる。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が、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。

波動としての光には、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。また、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。

[これまでの取組み]

・光通信技術

光ファイバー増幅器 (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 年の間に 3 桁以上の大容量化を達成してきた。光通信技術の動向をネットワークのレイヤーごとにみると、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ている。100 Gbit/s 伝送用デジタル信号処理 LSI は、我が国が総力を挙げて世界に先駆け実用化に成功し、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た⁴⁾。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。100G の実用化を受け、次世代の伝送システムとして 400G/1T に向けた研究開発がスタートしている。メトロ系においては、光ノードである ROADM の多機能化(C/D/C: Colorless, Directionless, Contentionless)、WSS 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ている。最近では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⁵⁾。また加入者系に関しては、40~100 Gbit/s への大容量化に向けた取り組みが始まっている。さらにデータコム分野においても、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、データセンター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

ている。

・ナノフォトニクス

近年、様々なナノフォトニクス技術がデバイスに応用され始めている。発光デバイスとしては、ミクロンスケールまたはそれ以下の超小型レーザーが様々なシステムで実現されている。極小体積の活性層を埋め込んだ化合物半導体フォトニック結晶に横方向 pin 接合を形成したナノ共振器構造を用いて、極低閾値での室温連続電流注入レーザー発振が達成されている。また、シリコンフォトニック結晶中のナノ共振器を用いてラマン利得を用いたシリコンラマンレーザが光励起によって室温で極低閾値で発振している。近年プラズモニクス構造のレーザーへの適用の研究も活発に行われており、波長よりもはるかに小さいサイズのレーザー発振動作が報告されている。光受光器としては、特にプラズモニクスをベースとした様々な超小型受光器が研究されており、プラズモニクスによる光アンテナ効果を利用した小型化が図られている。光変調器、スイッチ関連では、シリコンフォトニクスを中心に様々な電気光学変調器が開発されているが、近年プラズモニクス構造をベースとして非線形ポリマーを組み合わせた素子が発表されて、注目を集めている。光スイッチとしては、フォトニック結晶ナノ共振器を利用した素子でアトジュール領域でのスイッチング動作が達成されている。光メモリとしては、微小共振器を用いた双安定レーザー型が欧州で研究され、日本ではフォトニック結晶ナノ共振器を用いた光非線形双安定スイッチ型が研究されている。このようにナノフォトニクス技術により、従来の技術では不可能な超小型サイズと超低消費電力動作が達成され始めているが、いずれも単一素子の性能達成にとどまっている。日本ではフォトニック結晶技術がいくつかのバルク型光部品に応用されて商品化されているが、それ以外ではまだ技術は研究段階にあり、特に集積化応用に関しては基礎研究段階にあると言える。

・シリコンフォトニクス

1985年頃の Soref らの研究に起源があると思われるが、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、EU の 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 ePIXfab⁴³⁾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いつつある。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) で実施された「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⁴⁵⁾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、30Tbps/cm²の世界最高の伝送密度を実証した。ここで開発した技術は、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⁴⁶⁾に引き継がれ、シリコンフォトニクスの事業化に向けた活動が継続されている。

・フォトニクス応用に関連するナノ材料

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 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た。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きた。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た。グラフェンでは伝導度による光検出や強い非線形光学効果などが報告されており、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がある。グラフェンやナノチューブを飽和吸収体としたパルスレーザーの開発も進んでいる。

[今後必要となる取組]

無線通信システムが高効率で且つスマートなネットワークへと進化を遂げていく中で、今後の光ネットワークにはさらにグリーンでかつ高信頼性まで含めた高度化が社会的要請として強く求められている。そのためには、光のもつ潜在能力として、電気信号を凌駕する「高速」、「広帯域」、「低遅延」などの優れた特性を最大限に引き出すことのできるシステム・デバイスの創出が一層求められる。その一方で、デジタルコヒーレント光伝送技術の急速な進展に伴い、光がマイクロ波と同じコヒーレントな電磁波として扱えるようになりつつある今日、今後の光伝送システムは広いレイヤーにわたってデジタル信号処理・ソフトウェアとの親和性を高め、光・電気の互いの弱点を補い合い、シームレスに一体化したスマートな ICT システムへ発展していくことが強く期待される。

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) の適用が検討され始めている⁵⁾。SDN によりネットワークの仮想化を推し進め、柔軟性をさらに高めていく必要がある。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⁷⁾。WDM-PON のような大容量加入者網をこのような用途にいかに関展させていくかに注目が集まっている。現状の情報通信網では光ネットワーク（固定系）と無線ネットワーク（移動系）がそれぞれ独立に構成されているため、ネットワーク全体とすれば柔軟性や回復力さらには経済性の観点からも最適化されているとは言い難く、今後は光か無線かの媒体依存から脱却し、ネットワーク一体として仮想化していくことが極めて重要である。

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 ピ

ットを超える光 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。インターコネク機能に限れば、シリコンフォトニクスの各要素デバイスの研究開発では、光源の集積化の取り組みが重要である。高集積化の観点からは、光源はモノリシック集積されることが望ましいが、モノリシック集積光源は格子不整合の問題があり実用レベルに達するにはまだ長期間の研究開発が必要である。現時点で実用化に近いものは化合物半導体レーザーのハイブリッド集積であるが、電気から光へのエネルギー変換効率は高々20%程度で投入電力の約80%が発熱に費やされており、高密度集積した場合には排熱が問題になり、レーザーのエネルギー変換効率の抜本的な改善が必要になる。また、スイッチングやルーティング機能で重要な光信号を電気信号に変換せずに処理できる光スイッチや光ルータをシリコンフォトニクスで実現する取り組みも重要になる。さらに、インターコネク機能やルーティング機能を統合したネットワーク・システムをシリコンチップ上に集積するいわゆるネットワーク・オン・チップ(NoC)に向けたネットワーク・アーキテクチャの研究も重要になる。このようなシステムを実現するためには、エレクトロニクス・フォトニクス・パッケージング等が一体となった設計ツール、製造ファブ、評価ツール等の整備が重要であり、幅広い分野の連携を組織的に行う必要がある。

光技術を用いた量子情報デバイスの研究開発には、GaAs系などの自己組織化量子ドットを用いたプロトタイプとしての高度な量子情報操作の実証実験が必要であり、また、室温での動作を目指した窒化物半導体やダイヤモンドのNVセンターなどでの研究も期待される。

光技術の新たな材料としての原子層・ナノカーボンでは、バンドギャップがないグラフェンでは難しいデバイスを、ギャップを持つ遷移金属ダイカルコゲナイドやナノチューブで実現していくことなども重要である。また、光とスピン・熱・機械振動といったほかの自由度との結合が強いナノデバイスによる、新たな変換原理の開拓に向けた取り組みも重要と考えられる。

(3) 科学技術的・政策的課題

フォトニックネットワーク技術は「グリーンイノベーションの推進」をけん引していくうえで「ICT そのものの省エネルギー化・低炭素化」のための中核技術の一つと位置づけられており（総務省の研究開発戦略マップ）⁶⁾、2020年を目指して「CO₂排出量削減目標688万t」、「現在の10倍（毎秒100ギガビット）の伝送を現状技術の1/3以下の低消費電力で動作する設備の実現」、「現在の電気通信ネットワークから光信号のままに伝送・交換を行うネットワーク（オール光ネットワーク）への抜本的な転換」、「通信機器の1端子あたり毎秒10テラビットの超大容量化と超低消費電力化の実現」等が政策目標として掲げられている。さらに、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は、現状の光通信技術におけるハードウェア的な限界（ファイバー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ェーズ現象、光増幅器の帯域限界など）をいかにして打破するかが挑戦的な課題となっている¹⁾。これらの課題に対し、政策的に有効な手段を明確にし、早期に取り組むことが重要である。

ナノフォトニクスデバイス作製には微細加工が必須であり、日本ではナノテクノロジープラットフォームなどにより支援され状況は改善しつつあるものの、米国の NNIN などと比較するとまだ十分とは言い難い。特に、シリコンフォトニクスの試作に関しては、EU には ePIXfab⁴³⁾ (ファブは IMEC/LETI)、シンガポールには IME、米国には OpSIS⁴⁴⁾ (ファブは IME) というファウンドリ (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。このようなファブには世界中から人、金、技術、情報等が集まるハブとして機能をもつため、ファブを国内に持つことは、シリコンフォトニクスに限らず、ナノフォトニクス、更にはナノテク全般で国の競争力を強化するために重要である。このような共同利用の仕組みを構築し、持続可能な形で運営していくには、少なくともファブの維持費を賄える程度の多数の参加者を世界中の多様な分野から集める必要があり、国・学会・業界等のリーダーシップが重要になる。

(4) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

[新たな技術動向]

光通信システム・デバイス技術の革新として期待されるものが 3 つの Multi 技術であり、超多値変調(Multi-level)、マルチコア(Multi-core)ファイバー、多モード(Multi-mode)制御技術) である¹⁾。特に後者の 2 つは「空間分割多重」(SDM: Space Division Multiplexing)と称されて、SDM 用の新たなデバイスが次々に生み出されており、世界各国で研究開発が急速に進展している。

シリコンフォトニクスで扱う信号のシンボルレートは、実用レベルで 28Gbps、研究レベルでは 56Gbps 程度となっており、周辺電子回路の能力や消費電力も勘案するとこの辺で限界になると予測される。そのため、更なる高速化・広帯域化のために、波長多重、空間多重、偏波多重、モード多重等の多重化技術や位相変調を含めた多値化技術の適用が検討されている。また、光回路と電子回路それぞれに最適なテクノロジーノードを適用するために、光回路と電子回路は別のウエハで作製し、3次元または 2.5次元実装を用いてモジュール化するハイブリッド集積が今後の主流になっていくと予測される。シリコンフォトニクスの個別デバイスについては、これまでは CMOS 互換性が最重視されていたため、新しい材料の導入には消極的な面があったが、光材料としてのシリコンの限界が顕在化しつつあり、新しい材料への関心が高まりつつある。従来からヘテロエピ成長または接合による化合物半導体の導入の研究は盛んであるが、新しい動向として、シリコンと同じ IV 族であるグラフェンの導入が検討され始めた。まだ基礎研究の段階ではあるが、シリコンに比べて高い移動度を持つグラフェンを用いて光変調器や受光器をより小型化・低消費電力化しようとする研究報告が増えつつある。

グラフェン、カーボンナノチューブ、半導体ナノワイヤなどのナノ材料をナノフォトニクスと組み合わせデバイス動作させる試みが増加している。代表的なものとして、グラフェンとシリコンフォトニクス、フォトニック結晶を組み合わせた超高速光変調器や光受光器の研究が米国の大学や IBM において開発されている。また、グラフェン、MoS₂、WSe₂ など遷移金属ダイカルコゲナイドの原子層の材料は、単層にすることで間接遷移半導体から直接遷移へと変化して発光効率が 4 桁も上がることや、スピンとバレー自由度が結合している特殊なバンド構造を持つこと、光学遷移の選択則によりバレー選択励

起が可能なことなどが相次いで報告され、原子層材料によるフォトンクス・オプトエレクトロニクスの研究のみならず、量子コヒーレンスの研究も進められている。

量子情報デバイスの研究においては、SiCにおける欠陥でNVと類似の性質を持つものが報告されており、量子制御の研究が進んでいる。SiCは工業利用がすでに進んでいるため、インチスケールの基板が市販されており、集積化への期待も大きい。

[注目すべきプロジェクト]

幹線系における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「超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発」において400 Gbit/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⁹⁾。従来のQPSKからQAMへの変調多値度の拡大に加え、ナイキストフィルタリングやスーパーチャネルによる周波数利用効率の向上、さらには適応変復調技術による省電力化・柔軟性の向上が検討されている。これにより、現在の情報通信に要する電力の1/3に相当する78億kWhの消費電力削減を目指している¹⁰⁾。

次世代の光通信インフラ構築に向けた動きとしては、EXAT研究会の活動を受けて、国内では情報通信研究機構が2010年度から委託研究を順次立ち上げている（「革新的光ファイバー技術の研究開発(i-FREE)」¹²⁾「革新的光通信インフラの研究開発(i-Action)」¹³⁾「革新的光ファイバーの実用化に関する研究開発(i-FREE2)」¹⁴⁾）。EXATを通じて産学官連携体制がいち早く構築されたことにより、日本がこの分野を牽引する立場にある。欧州においても欧州第7次フレームワークプログラム(EU FP7)においてModeGapと呼ばれる産学連携プロジェクトが推進されている¹⁵⁾。米国においてはAlcatel Lucent（旧ベル研）およびファイバメーカが中心的役割を果たしており、世界中で競争が激化している。

光ネットワークの高度化・省電力化に関しては、総務省の委託研究「フォトニックネットワーク技術に関する研究開発」において、高速光スイッチや光バッファなど、光信号のままノード処理を行うオール光ネットワークのための開発が推進されている¹⁰⁾。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）において産学連携の研究体制が構築されている¹¹⁾。

シリコンフォトンクスに関しては、日本では「技術組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）³⁶⁾」をベースに、超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術（光エレ実装）⁴⁶⁾を目指した2022年までの大型国家プロジェクトが進行中である。このプロジェクトでは、シリコンフォトンクスのデバイス技術および集積化技術は2014年3月に終了した「フォトンクス・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⁴⁵⁾で開発した技術を引き継ぎ、更に光ファイバーやLSIとの実装技術等を追加で開発し、光トランシーバや光インターポーザ等の事業化を目指している。欧州ではIMECおよびEindhoven工科大学を中心に複数のEUプロジェクトが進行しており、特にシリコンと化合物半導体を融合したナノフォトンクスプラットフォームに関する研究が活発化している。また、2014～2020年で実施される研究プログラムHorizon 2020の中で、Photonics PPP (Public-Private Partnerships)が全体で8つのPPPの内の一つに

なり、約 7 億ユーロ (2014~2015 年で 1.8 億ユーロ) の資金が供給される予定である。現時点でまだ詳細は発表されていないが、この中にシリコンフォトニクス関係の研究開発も含まれると予想される。米国では、2013~2015 年で DARPA の Photonically Optimized Embedded Microprocessor (POEM) プロジェクト⁴⁷⁾が活動中である。このプロジェクトでは MPU-DRAM 間をシリコンフォトニクスで接続することを目指しており、Micron、MIT、IBM、Oracle 等が参加している。また、先進製造 (NNMI: National Network for Manufacturing Innovation) の一つの Institute として Integrated Photonics Manufacturing Institute の設立されることになった。米国でのフォトニクスのエコシステム構築を目指し、国内ファウンダリへのアクセス、集積設計ツール、パッケージング・組立・テストの自動化、技術者育成などが含まれる。予算規模は \$200M 以上 (政府が \$100M 出資のマッチングファンド) である。

ナノフォトニクスに向けたナノ材料に関しては、欧州では「Graphene Flagship」が立ち上がっており、グラフェンのみならず BN やダイカルコゲナイドも含む原子層材料の研究が進められている。日本では新学術領域研究として「原子層科学」が立ち上がっている。

(5) 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、モバイル光ネットワーク、量子暗号通信
- ・インターコネクト、光電子融合、光配線、光インターポーザ、光トランシーバ、光スイッチ、ハイブリッド集積、3次元実装
- ・レーザー、フォトダイオード、光検出器、光変調器、光合分波器、光導波路、微小共振器
- ・LED、太陽電池
- ・ナノフォトニクス、シリコンフォトニクス、フォトニック結晶、プラズモニクス、メタマテリアル、大規模光集積、コンピュータコム、フォトニックネットワークオンチップ
- ・ナノマテリアル、ナノカーボン、カーボンナノチューブ、グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイド、MoS₂、MoSe₂、WS₂、WSe₂、原子層、原子欠陥、NV 中心

(6) 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ており、デジタルコヒーレント、光QAM、マルチコアファイバ、光パケット・パス統合ノードなど、日本発のオリジナルな技術が創出されている。ナノフォトニクスの研究チームの数は多くないが、高い国際的競争力を持つ強力なチームが活発に活動し、存在感をはなっている。東大、東工大を中心にシリコンと化合物半導体や磁性材料等の接合技術、京大、横国大を中心にフォトニック結晶を用いた高性能光デバイス等の研究開発で世界をリードしている。ただし、プラズモニクス分野では出遅れ感がある。量子情報関連、ナノカーボン材料では有力グループが複数存在する。
	応用研究・開発	○	→	光通信では、100G DSP-LSI開発の成功を受け、400Gへの高速化、さらにその先を見据えた研究開発が、総務省、経済産業省が主導する強固な産学官連携体制のもと推進されており、高い国際競争力を維持。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。PECSTプロジェクトが2014年3月に終了。30Tbps/cm ² の世界最高伝送密度や125°Cの最高温動作を実証。開発した技術はNEDO光エレ実装プロジェクトに引き継がれ、PETRAにて事業化を目指している。AISTの液浸ArFを用いた光導波路加工技術は世界トップレベルの低損失と均一性を実証している。ナノカーボン材料では産総研がナノチューブなどの国際会議でも強い存在感を發揮している。
	産業化	○	→	100G伝送装置では世界市場を獲得し、国内生産額が大幅に増加している。一方、これまでFTTHが牽引してきた加入者系は固定回線離れの影響が大きく市場は飽和傾向にある。光ノードも市場シェアの巻き返しを狙っている。ナノフォトニクスの単体素子では、近年商品化が進んでおり、世界的に見ても先行している。ただし、集積ナノフォトニクスに関してはまだ産業化の段階ではない。PETRAが100/400GbE向けにシリコンフォトニクストランシーバ等の標準化活動中である。フジクラが長距離通信用光変調器を発表している。全体的に、米国と比べると産業化が遅れている。
米国	基礎研究	◎	↗	ナノフォトニクスの基礎研究に関しては、MIT、Stanford、UCSBなどに各分野において世界をリードする研究者がおり、活発な研究を行っている。特に近年プラズモニクスの研究が活発化している。2013~2015年で実施中のDARPAのPOEMプロジェクトではMPU-DRAM間をシリコンフォトニクスで接続することを目指しており、MIT、Micron、IBM、Oracle等が参加している。遷移金属ダイカルコゲナイドなど新しい分野における進展が目覚ましい。特に、U. Washingtonのグループが数多くの重要な成果を上げており、フォトニック結晶との融合ではStanfordとの共同研究も見られる。光物性ではColumbiaやUCB、ナノデバイスではCornellが存在感を發揮している。単一欠陥準位の研究ではChicago大のグループがSiCで新しい方向性を打ち出している。
	応用研究・開発	◎	→	Alcatel-Lucent (旧ベル研) の存在感が依然大きく、他社の追従を許さない。なおSDMに関しては日本がマルチコアで強みを有するのに対し、欧米はモード多重に注力している点が大きく異なる。ナノフォトニクスのバイオ、センサおよび太陽エネルギー応用に関しては活発な活動があるが、大規模集積化をベースにした情報処理応用に関しては停滞気味である。IBMは90nm世代の技術を用いて、スパコン応用と見られる電子回路と光回路のモノリシック集積を実現している。また、IntelがシリコンフォトニクスのトランシーバとCorning製のマルチモードファイバの組み合わせで、データセンター応用と見られる25Gbps、820mの伝送を実現している。ナノ材料に関しては、NorthwesternからのスピノフであるNanoIntegrisが分離ナノチューブやグラフェンを市販し、Rice大のスピノフがナノチューブ評価装置などを開発している。

米国	産業化	◎	↗	<p>OTN用伝送機器・スイッチでAlcatel-Lucent、Ciena、Infinera、Cisco等が世界市場の上位を占める。Google、IBMなどデータセンター向けへも市場拡大の兆しがある。</p> <p>光集積を駆使した素子を商品とする有力な会社が存在し、IBMやIntelは光インターコネクートを本格的に研究開発しているが、ナノフォトニクスに限定するとまだ産業化への道筋は明確ではない。</p> <p>Freescaleの130nm、200nmラインではLuxteraの光トランシーバ等が量産されている。先行していたLuxtera、Lightwire、Kotura等のベンチャーがそれぞれMolex、Cisco、Mellanox等の大手企業に買収され、新たにAcacia、Aurrion他の多数のベンチャーが創業した。</p>
欧州	基礎研究	◎	→	<p>ModeGapのような大規模なEUプロジェクトが推進されており、厚い研究者層を誇るとともに、研究領域もシステムからデバイスまでバランスがとれており裾野も広い。ただし、ModeGapは2014年度で終了し、Holizon2020への継続性・発展性は不透明である。</p> <p>Imperial College等でメタマテリアル、プラズモニクス関連の純粋基礎研究に関しては伝統的に強く、理論研究者が指導的な立場を果たしている。</p> <p>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。</p> <p>NV中心ではシュツットガルト大のグループが中心的な役割を果たしている。</p>
	応用研究・開発	○	→	<p>FP7の後継フレームワークプログラムであるHolizon2020が2014年より開始し、将来ネットワークに関する大規模な産学連携が予想される。</p> <p>IMEC、Eindhoven工科大、LETI等にナノファブリケーションの技術が結集し、特にシリコンフォトニクスと化合物半導体ナノフォトニクスの融合をベースとしたデバイス応用研究が進んでいる。FP7の中で2008～2012年に実施されたPhotronics electronics functional integration on CMOS (Helios) プロジェクトでは、シリコンフォトニクスの主要なコンポーネントの開発が行われた。引き続き2012年に開始されたPhotonic Libraries And Technology for Manufacturing (PLAT4M) プロジェクトでは、CMOSプロセスによる製造方法の標準化を目指している。</p>
	産業化	△	→	<p>研究開発の活発さと比べると、産業化に関しての動きは控えめであり、100Gへの動きも日本・米国ほど活発ではない。特に加入者系の固定網は遅れをとっているが、2020年にかけてモバイルバックホールを意識した新たなアクセス網の構築を計画するなど、今後EUが得意とする無線分野との連携が目される。</p> <p>ナノフォトニクス関係では、企業の研究活動が少なく、直接産業化を目指した動きは見えない。</p> <p>Ghent大とIMECのシリコンフォトニクスの技術を用いた光トランシーバの製品化を目指してスピンオフしたCaliopa社は中国のHuawei社に買収された。STMicroelectronicsの65nm、300nmラインではLuxteraの光インターポータ等の量産準備が進んでいる。</p>
中国	基礎研究	△	↗	<p>海外の技術に依存しているのが現状である。</p> <p>近年、学会・学術雑誌等での発表件数が増加しているが（特にプラズモニクス、メタマテリアル関係）、数値計算の論文が主体でレベルの高い論文は少なく、ISCASの高速光変調器等の少数を除いて他国に比べて顕著な成果は見えていない。一方、Chinese Academy of Science (CAS)を中心に最先端の加工技術装置が導入されており、作製技術も急速に立ち上がりつつある。</p>
	応用研究・開発	△	↗	<p>欧米から帰国した研究者を中心に応用を目指した研究も立ち上がりつつあるが、まだ目立った成果は見られていない。</p> <p>Huawei、ZTEからの成果発表が増大しており、近年国際会議で徐々に頭角を現しつつある。</p>
	産業化	△	→	<p>HuaweiがOTN伝送用機器の世界市場で急成長している。中国国内でも40G/100Gの導入が加速し、加入者系も光化が進み、モバイルバックホールも含めて今後大きな発展が見込まれる。</p> <p>Huawei等の中国系企業はナノフォトニクス、シリコンフォトニクス研究開発にも力を入れつつあるようだが、当該の分野に関しては目立った活動は見られない。</p>

韓国	基礎研究	△	→	KAIST, ETRIが基礎研究を牽引し、研究のレベルは高いものの、研究者数が少ないのが現状であり、学会でのプレゼンスはまだ高いとは言えない。また、産業化に繋がるような成果は見られない。
	応用研究・開発	○	→	光通信のデジタルコヒーレントやSDMなどの革新技術のスタートにやや遅れをとっているが、近年キャッチアップしつつある。Samsungを中心にナノフォトニクスの応用研究が活発に行われている。特にディスプレイ、発光素子の分野での応用例が目立つ。また、CPUとメモリ間をシリコンフォトニクスで繋ぐ開発を行っており、2016年頃の実用化を目指している。グラフェンデバイス開発も行われている。
	産業化	△	→	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たが、その他の領域に関しては目立った動きは見られない。ひと段落しつつあるディスプレイ用を除くと、その後の産業化の動きは不透明である。

(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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

(7) 引用資料

- 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」
http://www.scats.or.jp/research/SCAT_research1303.pdf
- 6) 総務省「研究開発戦略マップ」
http://www.soumu.go.jp/main_content/000125084.pdf
- 7) 谷口友宏, 飯田大輔, 可児淳一, 桑野茂, 寺田純, 吉本直人「将来無線アクセス・モバイル光ネットワークを支える光アクセスシステムに求められる技術要件」信学技報, vol. 113, no. 397, MWP2013-88, pp. 209-214, 2014 年 1 月.
- 8) 「我が国基礎・基盤研究の現状～NICT EXAT 研究会～」ITU ジャーナル, vol. 39, no. 5, pp. 3-25 (2009).
- 9) 「世界最高水準の 400 ギガビット級光伝送技術実用化に向けた共同研究開発に着手」
<http://www.ntt.co.jp/news2012/1212/121211a.html>
- 10) 総務省「ICT による成長戦略について」
http://www.kiai.gr.jp/PDF/ict_2012/1.pdf

- 11) 光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点 <http://www.aist-victories.org/>
- 12) 「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
- 13) 「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
- 14) 「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
- 15) ModeGap, <http://modegap.eu/>
- 16) M. Smit et al. “Moore’s law in photonics”, Laser Photonics Rev. 6, 1 (2012).
- 17) D. A. B. Miller, “Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips”, Proc. IEEE 97, 1166 (2009).
- 18) B. G. Lee et al. “High-Performance Modulators and Switches for Silicon Photonic Networks-on-Chip”, J. Lightwave Technol. 16, 6, (2010).
- 19) K. Takeda et al., “Few-fJ/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photonic-crystal lasers”, Nature Photonics 7, 569 (2013).
- 20) Y. Takahashi et al. “A micrometre-scale Raman silicon laser with a microwatt threshold”, Nature 498, 470 (2013).
- 21) M. Khajavikhan et al. “Thresholdless nanoscale coaxial lasers”, Nature 482, 204 (2012).
- 22) Yu-Jung Lu et al., “Plasmonic Nanolaser Using Epitaxially Grown Silver Film”, Science 337, 450 (2012).
- 23) M. W. Knight et al. “Photodetection with Active Optical Antennas”, Science 332, 702 (2012).
- 24) L. Cao et al. “Resonant Germanium nanoantenna Photodetectors”, Nano Letters 10, 1229 (2010).
- 25) A. Melikyan et al., “High-speed plasmonic phase modulators”, Nature Photonics 8, 229 (2014).
- 26) K. Nozaki et al., “Sub-femtojoule all-optical switching using a photonic-crystal nanocavity”, Nature Photonics 4, 477 (2010).
- 27) L. Liu et al. “An ultra-small, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip”, Nature Photonics 4, 182 (2010).
- 28) K. Nozaki et al., “Ultralow-power all-optical RAM based on nanocavities”, Nature Photonics 6, 248 (2012).
- 29) 株式会社フォトニックラティス <http://www.photonic-lattice.com/>
- 30) 浜松ホトニクスプレスリリース「フォトニック結晶レーザ」
<http://www.hamamatsu.com/jp/ja/news/products/20130926000000.html>
- 31) J. Sun, “Large-scale nanophotonic phased array”, Nature 493, 195 (2013).
- 32) E. Kuramochi et al. “Large-scale integration of wavelength-addressable all-optical memories on a photonic crystal chip”, Nature Photonics 8, 474 (2014).
- 33) M. Liu et al. “Graphene-based broadband optical modulator”, Nature 474, 64 (2011).

- 34) A. Pospischil et al. "CMOS-compatible graphene photodetector covering all optical communication bands", *Nature Photonics* 7, 892 (2013).
- 35) M. D. Birowosuto et al. "Movable high-Q nanoresonators realized by semiconductor nanowires on a Si photonic crystal platform", *Nature Materials* 13, 279 (2014).
- 36) 技術研究組合光電子融合基盤技術研究所 (PETRA) <http://www.petra-jp.org/outline.html>
- 37) The Past, Present, and Future of Silicon Photonics,
http://tera.yonsei.ac.kr/class/2011_1_STOC/lecture/20110307_STOC_M.-J.%20Lee_R.%20Soref_Si%20Photonics.pdf
- 38) White Paper: Introducing Intel's Advances in Silicon Photonics,
http://www.intel.la/content/dam/www/public/us/en/documents/intel-research/Intel_Advances_Silicon_Photonics.pdf
- 39) Demonstration of a High Speed 4-Channel Integrated Silicon Photonics WDM Link with Hybrid Silicon Lasers,
http://www.hotchips.org/wp-content/uploads/hc_archives/hc22/HC22.23.330-1-Alduino-Intel-SiP-Link.pdf
- 40) Silicon CMOS-Integrated Nanophotonics Technology,
http://www.semiconwest.org/sites/semiconwest.org/files/docs/SW2013_Wilfried%20Haensch_IBM.pdf
- 41) Competing for the Future: Unlocking Small Wonders for Tomorrow's Nanoelectronic Uses, http://www.atp.nist.gov/iteo/nanoenan_final.pdf
- 42) Integrated High-Complexity Systems in Silicon Photonics,
<https://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/387970>
- 43) ePIXfab, <http://www.epixfab.eu/>
- 44) OpSIS, <http://opsisfoundry.org/>
- 45) 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/>
- 46) 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/
- 47) Photonically Optimized Embedded Microprocessors (POEM),
[http://www.darpa.mil/Our_Work/MTO/Programs/Photonically_Optimized_Embedded_Microprocessors_\(POEM\).aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/MTO/Programs/Photonically_Optimized_Embedded_Microprocessors_(POEM).aspx)
- 48) Funding opportunities for photonics in Horizon 2020 work programme 2014-15,
http://www.photonics21.org/download/Photonics_Information_Event/T.Skordas-Introduction-16JAN2014.pdf
- 49) Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC)
- 50) European Conference on Optical Communications (ECOC)
- 51) Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)
- 52) International Conference on Group IV Photonics (GFP)
- 53) 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ・シリコンフォトニクス研究会 (siph)
- 54) IEEE Optical Interconnects Conference (OI Conference)
- 55) International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC)

3.4.5 有機エレクトロニクス

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

有機材料を用いて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研究開発領域である。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、有機太陽電池などが注目されているが、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動向

[背景と意義]

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、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。

また、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、近年の、モバイルを前提とした多様なパーソナル電子デバイスの隆盛により、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。

[これまでの取組み]

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、市場が拡大しつつある。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、照明用途ではユニカミノルタが世界最高発光効率となる 131 lm/W の白色パネルを開発

し¹⁾ (2014年3月)、本格的な事業化を発表している (2014年7月)。また、東芝、三菱化学なども商品ブランドを立ち上げ実用化に向けて動き出している。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²⁾ (2014年7月)、産業化に向けて巻き返しを図っている。

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³⁾、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⁴⁾。

有機薄膜太陽電池の分野では、東芝が単層セルで 11.2%、5cm 角モジュールで 9.9% を達成し⁵⁾ (2014年7月)、実用化に向けたテストも行われている。学術研究においては、ここ数年続いた劇的な性能向上は一段落し、性能制限因子の解明や新システム材料の探索など、裾野を広げる研究が中心になってきている。

海外において、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。

[今後必要となる取組]

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。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 (励起子拡散長の増大、電荷分離に伴う電圧損失の低減など) が必要と考えられる。

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涵養する試みが求められる。具体的には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。

技術的には、分子集合体の制御に取り組む必要がある。単一分子レベルの物性は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いる。

(3) 科学技術的・政策的課題

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。

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。

(4) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

[新たな技術動向]

有機 EL の分野では、九大の安達グループによって報告された熱活性型遅延蛍光 (TADF) 現象⁶⁾に基づいた発光材料の研究が裾野を広げ、燐光を使わない新たな高性能材料群を形成し始めている。また、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 の研究が山形大の城戸ら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。また、有機 EL 照明において、住友化学は 2014 年に、高分子材料を基にした 2 色を発光できる照明用パネルの量産技術の確立を発表した。コニカミノルタは 2014 年にフレキシブルな有機 EL 照明パネルの量産を発表した。同じく、三菱化学とパイオニアが、発光層を製造コストの低い塗布法で作製する有機 EL

照明パネルの量産を発表している。

有機トランジスタ分野では東大の染谷グループを中心に、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⁷⁾。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見えてきている。

有機太陽電池分野に関しては、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新たな材料開発の可能性が開かれつつある。

[注目すべきプロジェクト]

国内では、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」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」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。

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。

(5) 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
- ・プリンテッド・エレクトロニクス、フレキシブルデバイス

(6) 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、広島大・理研のグループによる世界最高の材料と、阪大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、産総研や東京大学がリードしている。
	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。
	産業化	△	↑	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、大型有機ELテレビの実用化は遅れているが、モバイルを中心とした中小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が産業化に向けて先行している。有機太陽電池については、各社が興味を示しているが、産業化については様子見の状況にある。有機トランジスタについては、具体的な応用ターゲットを模索している段階にある。
米国	基礎研究	◎	→	有機EL分野においては、1998年にリン光材料先駆けて開発し、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（プリンストン大、UDC (Universal Display Corporation)）。有機薄膜太陽電池の研究開発も非常に活発であり、特に高分子系ではカリフォルニア大学バークレー校、ロサンゼルス校などが中心となって基礎研究を牽引している。
	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、大学における基礎研究成果を活用してベンチャー企業 (Solarmerなど) が活躍している。
	産業化	○	→	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Solarmer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有り、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。英国では、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。EU全体にまたがるプロジェクトを通じて、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る。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プ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。
	産業化	○	↑	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	○	↑	現段階では、海外の研究機関などの追跡研究が主体であり、新しい潮流を生み出すものや独創的な研究成果は限定的である。しかし、材料関係を中心に研究の裾野は広がってきており、研究水準は着実に上昇している。今後、大規模な研究資金の投入などによって猛烈な研究水準の進歩が予想される。現在は、多くの大学や研究所において有機EL技術の研究が展開されている。
	応用研究・開発	○	↑	中国はこれまでに有機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。また、有機EL材料および有機太陽電池材料を中心に、バリエーションを増やす研究は非常に盛んである。
	産業化	○	↑	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。サムソン、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。
	応用研究・開発	◎	↑	サムソン、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。サムソンは中小型の高精細ディスプレイや大型テレビ、LGは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。

韓国	産業化	◎	↗	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、サムスンとLGの争いという構図になっている。サムソンは有機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テレビを発売開始（2014年9月）するとしている。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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

(7) 引用資料

- 1) 「世界最高発光効率 131 lm/W を達成した白色有機 EL 照明パネルを開発」

http://www.konicaminolta.jp/about/release/2014/0304_02_01.html

- 2) 「有機 EL ディスプレイパネルに関する統合新会社（会社名：株式会社 JOLED）設立について」 <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201407/14-0731/>

- 3) "Ultra-high mobility transparent organic thin film transistors grown by an off-centre spin-coating method", Nature Communications, **5**, 3005 (2014).

- 4) "Fully-printed high-performance organic thin-film transistors and circuitry on one-micron-thick polymer films", Nature Communications, **5**, 4147 (2014).

- 5) 「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」

http://www.toshiba.co.jp/rdc/detail/1407_02.htm

- 6) "Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence", Nature, **492**, 234 (2013).

- 7) "An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics", Nature **499**, 458 (2013).

3.4.6 MEMS/NEMS

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

半導体微細加工技術を基盤にし、深掘りエッチング技術に代表される立体加工技術や接合技術を利用して、マイクロ・ナノ構造を形成し、センシングを行ったり化学反応や光を制御したりする各種デバイスを実現する総合技術である。LSI との複合化によって“More than Moore”のためのキーテクノロジーとしても期待されている。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景、意義]

MEMS/NEMS 技術は、半導体微細加工技術に基づいて、ウェハ上に様々な材料で様々な微細構造（システム）を作り込む技術であり、情報通信機器、自動車、産業機器、医療機器など幅広く応用先で様々なセンサ・アクチュエータを実現する。微細構造で発現する特性を活かし、超小形かつ高性能なデバイスが実現できるだけでなく、それらをウェハ上に一括して大量生産できることが MEMS 技術の特長であり、それゆえに新しい応用に広く展開・普及して、世の中を変える可能性を有する。

現在、社会の安全安心やエネルギーの見える化、健康モニタリングなど社会の安定化にとって重要な課題解決型技術として、センサに自立電源と通信機能を持たせて分散配置するセンサネットワーク技術が期待されている。このような技術が進展すると、社会のすみずみでセンサが使われることになるが、そのようなセンサの大部分は大量生産性に優れる MEMS になると考えられる。また、自動車の自動運転システム、介護用ロボット、ドローン、バーチャルリアリティシステムなどのイノベーション起すと期待される機器には、高性能かつ消費者に受け入れられる価格のセンサが求められており、MEMS に期待が集まっている。

[これまでの取組み]

MEMS は成長著しい産業であり、主たる製品はスマートフォン・携帯電話用のマイクロフォンと慣性センサ、自動車用の慣性センサや圧力センサ、プロジェクトに用いられるマイクロミラーデバイス、インクジェットプリンタヘッド、無線通信用周波数制御デバイス（フィルタやクロック共振子）、赤外線センサなどである。その中でマイクロフォンは 2013 年に 24 億個出荷され、20%程度と高い市場成長率を示している。また、高度な実装技術によって複数のセンサが 1 つのパッケージングに入れられたコンボセンサがスマートフォンなどに広く普及しており、異要素集積化技術や高度なウェハレベルパッケージング技術によって、さらに高度かつ小形なセンサが実現される方向に研究開発が進んでいる。

我が国には、MEMS/NEMS に関する多くの研究資産が蓄積されており、技術的实力は高いにもかかわらず、産業化のための仕組みの構築は欧米に比べて遅れていた。しかし、最近では東北大学に見られるように、企業が大学の拠点と研究室を活用して効率良く製品開発から小規模生産までを行う例が出てきており、これは日本型の産学連携の好例と言える。

一方、最近、メインストリームとなっている MEMS、あるいは新規 MEMS の開発と

実用化は、ほとんど欧米で行われている。欧州では、MEMS 分野の覇者である STMicroelectronics と Bosch が、大規模研究拠点 (IMEC、CEA-LETI Minatec、Fraunhofer Institute など) も活用して活発に研究開発に投資している。米国では、本分野を牽引するのはベンチャー企業で、スマートフォン・タブレット用ジャイロスコープで 2 割のシェア (残り 8 割は STMicroelectronics) を有する InvenSense、小さな補聴器メーカーから MEMS マイクロフォンのトップ企業となった Knowles などが成功例として挙げられる (現在、Knowles のマイクロフォンはソニーが受託生産している)。

アジアでは、台湾が学術分野とファウンドリ産業で成長目覚ましく、一方、韓国は産学とも停滞ぎみである。中国では、トップレベルの研究機関から世界水準の成果が出始めており、今後、ファウンドリを中心に産業化も進むと思われる。

[今後必要となる取組み]

新技術の産業化では、米国では大学のトップ研究成果をいち早く市場トライアルにつなげるベンチャー企業とファウンドリの存在が大きく、また、欧州では大学、公的研究機関および企業が拠点を形成して密接な連携を可能にするシステムがうまく機能している。このような現状を見るに、今後、我が国にある研究開発拠点を強化し、企業の研究開発リスクを下げて、実用化へのハードルを下げる役割を大学と公的研究機関が担う必要性は一層高まっている。たとえば、前述の東北大学のような日本型の産学連携システムをより発展させることが有効であろう。産業技術総合研究所には、TIA、最先端研究開発支援プログラム (FIRST)、BEANS プロジェクト、グリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクトなどの資金が集中し、8 インチの MEMS ラインが整備されている。一連の設備は、集積マイクロシステム研究センターによって研究開発に利用される他、マイクロ・ナノ・オープンイノベーションセンター (MNOIC) として外部共用に供されている。大規模な施設整備が一段落したこれからが重要であり、産業界のニーズにあった運営方法の改革を大胆に行うことが期待される。

(3) 科学技術的・政策的課題

日本の企業でも、欧米のベンチャー企業買収や海外研究機関へのまとまった研究開発委託が増えており、その結果、国内の基礎研究が孤立・空洞化する恐れがある。これを防ぎ、さらに基礎研究を実用化に繋げるためには、我が国の研究開発拠点の継続的な強化が欠かせない。一方、MEMS/NEMS の基礎研究では、多様な研究機関の参加も重要である。これは、MEMS/NEMS の応用分野と利用技術が多岐にわたり、多様なアイデアの試行錯誤が欠かせないからである。このような多様性を担保するためには、研究開発環境に恵まれない研究室でも自らのアイデアを実証できる環境が必要であり、東北大学の試作コインランドリやそれを支援する国家プロジェクト (ナノテクノロジープラットフォーム事業) の役割が大きい。この事業を維持・発展させることは、有力拠点の研究開発力強化とともに重要な政策的課題の 1 つである。

MEMS/NEMS 分野に限らないが、産業界からの学会や講演会への参加が減少し、学会への新規加入が伸び悩んでいるという状況がある。特に、MEMS 分野は基礎と応用とが一体化しており、企業の研究開発の委縮は分野全体に大きな負の影響を及ぼす。電気学

会・日本機械学会・応用物理学会の連合による MEMS・センサ・マイクロナノ技術に関するシンポジウムの開催、日本機械学会でのマイクロ・ナノ工学部門の発足などがあるが、こうしたアカデミアセクターの主体的な活動は極めて重要で、産官学がこれに積極的に参画する必要がある。

(4) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

年間に出荷されるセンサの数が現在の 100 倍、1 兆個になるような社会を 10 年後に実現しようという「Trillion Sensors」と呼ばれる動きが米国を発信地として世界に広がりつつある。米国の産業界が旗振り役となり (代表は Fairchild Semiconductor の Janusz Bryzek 氏)、センサの新規応用発掘、センサの研究開発の促進、政府への働きかけ、産産・産学の連携などがロードマップに沿って進められるという。センサネットワーク、ビッグデータなどと組み合わせ、大きなイノベーションに繋がりうる技術的動きである。1 兆個ものセンサは MEMS 技術を駆使しなければ製造不可能であり、MEMS 技術に関連する動向として注目される。

MEMS/NEMS に関する技術動向・産業動向としては、次のような事項を押さえておく必要がある。

- MEMS マイクロフォンが市場成長し、スマートフォンの機能拡張や音声認識システムの応用拡大によって今後も高い成長が望めること。
- 屋内ナビゲーションの登場で気圧センサがスマートフォンに組み込まれ、センシング機能が 10 軸 (加速度 3 軸、回転 3 軸、地磁気 3 軸、圧力) に高度化し、それにともない集積化が進むこと。
- 自動車の情報表示がヘッドアップディスプレイ化され、MEMS ミラーデバイスが使われること。ヘルスマonitoringシステムが普及し、活動量計を中心に MEMS が使われること。
- キャリアアグリゲーションやコグニティブ無線などの高度な通信技術が登場し、また、3.5 GHz 帯が供用され、高度な周波数制御デバイスに MEMS 技術が使われること。

(5) キーワード

センサ、センサネットワーク、ヘルスマonitoring、マイクロフォン、集積化

(6) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	MEMSに関する国際学会などでの日本のプレゼンスは高く、採択率が1/3程度の高水準の国際学会で日本からの発表数が首位の米国に次いでいる。主要な大学の基礎研究用研究設備について、我が国が他国に劣っていることはない。バイオ関連MEMSの研究者が最大多数勢力であることは他の国（特にアジア諸国）と同様であるが、米国で活発に研究されている高性能慣性センサの研究がほとんどないなど、メインストリームに手薄なところがある。
	応用研究・開発	○	→	いくつかのプロジェクトによって、実用化を想定した試作品の開発などを行える施設としてみた大学や公的研究機関の開発環境は向上した。今後、これらの拠点が継続的に強化、活用されれば、実用化に繋がる成果が出ると期待される。大学や公的研究機関の産学連携力の強化とともに、拠点の活用に関して企業の意識改革が必要である。
	産業化	○	→	スマートフォンや携帯電話用のMEMSセンサの世界市場は大きく、成長を続けているが、我が国のシェアは低い。受託製造分を含むマイクロフォンのシェアは大きい。また、インクジェットプリンタヘッド、自動車用MEMSセンサなどでは実力を維持している。振動ジャイロ、インクジェットプリンタヘッドなどで用いられるPZT MEMSは我が国の成功例の1つである。ニッチながら、医療関係のMEMSも実用化例が出てきた。MEMSファウンドリのビジネスは全体的には低調であり、ベンチャー企業の育成も進んでいない。
米国	基礎研究	◎	→	MEMSに関する国際学会などでの米国のプレゼンスは、引き続き他国を寄せ付けない。バイオ関連MEMSが最も多くの研究者の興味を引き付けているが、その他のセンサ、たとえば、航空宇宙用・軍用MEMSもダブルユースとして広く研究されている。特に、自動運転、ロボット制御、高精度ナビゲーションなどに利用される高性能慣性センサの研究は、DARPAプロジェクトとして強力に実施され、圧倒的優位にある。
	応用研究・開発	◎	→	大学や公的研究機関の研究成果がベンチャー企業に移管され、実用化を目指した研究開発が行われるという流れがうまく働いている。公的施設と民間ファウンドリ（米国内とは限らない）が、そのようなベンチャー企業を支えている。さらに、大学の共用設備を使って研究開発の受託サービスを行っているベンチャー企業もある。
	産業化	◎	→	ファブレスのベンチャー企業などが、国内外のファウンドリを使って開発と生産を行うビジネスモデルが定着している。FBARフィルタのAvago、MEMS慣性センサのMEMSICやInvenSense、MEMSタイミング発振器のSiTime、MEMSマイクロフォンのKnowles、マイクロミラーデバイスのMicro Visionなどが新しいMEMS市場を拓いたが、ベンチャー企業を中心に成功例が継続的に出ている。新しいデバイスの実用化は米国発であることが多い。TIやAnalog Devicesといった大手企業も実力を維持しているが、従来の成功デバイスから撤退する例もある。
欧州	基礎研究	○	→	一見地味だが、堅実でよく考えられた研究開発が多い。欧州では、1人の教授やリーダーのもとに多くの研究者や技術者がヒエラルキーを作って組織されていることが多く、米国のように玉石混合の新しいアイデアで次々と論文が出るわけではないので、国際学会などでの論文数だけで比較すると、基礎研究力を見誤る。
	応用研究・開発	◎	→	大学、公的研究所も上記のように組織されており、目標をはっきりさせ、デバイスやシステム、あるいは製造技術を開発するとき、その速度と完成度は非常に高い。TSVのようにLSIに取り入れるMEMS的技術、LSI上に集積化するMEMSなど、大規模な研究開発については、組織力のある欧州の公的研究所が実力を発揮している。

	産業化	◎	↗	スマートフォンや携帯電話に用いられるセンサの最大手は、仏伊合同のSTMicroelectronicsであり、ドイツのBoschが続く。市場が成長しているため、両社のMEMS事業も拡大している。両社とも欧州発の共通技術を用いており、両社でシェアの7割程度を占める。この技術は大学と公的研究機関との共同で開発され、Boschが実用化したものであるが、上記の研究開発システムがうまく働いている実例である。MEMS用製造機器では、Boschの特許に基づきエッチング装置を実用化したSTS (現SPTS)、SussMicrotecなどの技術力のある企業が世界的に活躍している。
中国	基礎研究	○	↗	トップ研究機関を中心に研究水準の向上は目覚ましく、そこだけを見れば、日欧米と同じ土俵で競争している。中国からのジャーナルや国際学会への論文投稿量は多い。その半数以上は採択に至らないものであり、全体レベルは発展途上であるが、採択の絶対数は多く、また、注目すべき論文もある。高水準の国際会議が中国で開催されることも多くなっている。
	応用研究・開発	△	↗	後発の中国は最初から応用開発志向であり、トップ研究機関の研究水準の向上、および下記の産業化の動きによって、今後、産業化に繋がる中国発の成果が出る可能性がある。
	産業化	△	↗	MEMSマイクロフォンの工場が中国で操業され、今後も生産量は増える。このようなことを足掛かりに、MEMS産業が育つ可能性がある。
韓国	基礎研究	○	↘	国際学会などでの論文数を見ると、韓国は米国、日本、欧州に続く位置にいたが、最近では台湾や中国に追いつかれ、抜かれつつある。韓国国内で、この分野への政府投資が細まっていると思われる。
	応用研究・開発	△	→	国家の集中的な投資によって、実用化開発に利用できる大規模な研究施設が整備されているが、産業化に繋がった顕著な成功例は聞かない。サムソンをはじめとする巨大企業は、MEMSを大量に利用しているものの、外部調達すればよい部品の1つと捉えており、韓国国内での産学連携に影を落とす。
	産業化	△	→	MEMSに関して独自技術が実用化された例は目立たない。市場規模が大きくなり、さらなる発展が予想されるスマートフォン用等のMEMSには、大手企業が子会社を通じて興味を示すが、技術蓄積がなく、独自開発は難しい。ただし、今後、海外の技術を導入して、産業化とビジネスで成功する可能性はある。

(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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、
△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

3.4.7 異種機能三次元集積チップ

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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ハの薄膜化、高信頼のウェハボンディング(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動向

[背景と意義]

家電製品の一層の低消費電力化、スマートフォン、タブレット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今後の課題のひとつである。これまでは、ゲート長縮小に代表される2次元的なスケールリングによりトランジスタの微細化、高速化、低消費電力化を実現し、LSIの高集積化・高機能化を進めてきた。しかし、最近になって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2次元スケールリングとともに、異なる機能をもつ半導体あるいは異種材料でできた複数のチップを複合して一つのチップ状に加工する異種機能三次元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、高周波の通信機能やイメージセンサ、加速度センサなどの異なる機能を積層することによって、チップの小型化、携帯機器の小型化による新たな応用展開も期待できる。このように、従来技術の延長では今後の社会要求に応えることが困難と予想される中、異種機能三次元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。

[これまでの取組み]

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ハの薄化、シリコンウェハ貫通ビア配線(TSV)、マイクロバンプによる相互接続技術については、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、ディジタル・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、スピンドバイスを三次元集積したチップの試作に成功している。

日本を追うように米国、欧州、韓国、台湾で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、ハイパフォーマンスを実証している。また、Monolithic 3D Inc がプログラマブルロジックの開発を目的にモノリシック三次元 LSI の開発を目指してしている。欧州の IMEC や LETI などは自分自身で高い CMOS 技術を持ちながら、光-電子融合分野でも研究を行っており、次を見据えて三次元集積化に対して精力的に活動している。韓国では、Samsung がメモリのトップメーカーとして 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)、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いる。メモリ応用では、三次元化の効果の大きな NAND フラッシュメモリについて、Samsung および東芝が三次元 NAND フラッシュメモリの量産開始を 2013 年 8 月に相次いで発表した。一方、DRAM は三次元化技術を使って入出力インターフェースを広帯域化 (Wide I/O、ワイドアイオー) することで大容量化と低電力化を強力に進めることができ、TSV を利用したワイドアイオーの世界標準規格が JEDEC により 2012 年に定められたが、従来技術の改良による LPDDR 方式の登場で 1 ビット当たりの転送エネルギーが 1/3 に下がった (約 15pJ⇒約 5pJ) ことで三次元化は進んでいない。三次元集積回路が普及するには、三次元化に伴うコスト増を補償する三次元化による効用を生み出す必要があり、その方法としては、(1)従来技術では達成できない機能を集積化する、(2)三次元化によりそれぞれのチップ面積を縮小しチップの良品率 (歩留まり) を向上させ三次元化によるコスト増を補償する、ことなどが考えられる。後者の考え方をを行ったのが、Xilinx 社の FPGA (再構成可能論理集積回路) である。同社は TSV 技術を使ってシリコンの再配線基板 (インターポーザ) を作製し、マイクロバンプによる接続技術を使ってシリコンインターポーザ上に FPGA チップを複数個集積するという方法 (「2.5 次元技術」と呼ばれる) を提案した。チップの歩留まりはチップ面積の増大にともない指数関数的に減少するため、良品の小さなチップを複数個集積することで、シリコンインターポーザによるコスト増大 (25%程度) を含めてもコスト的な効果がある。

[今後必要となる取組み]

シリコンの三次元集積化については、基礎技術開発の第一ステージは終わりを迎え、応用開発のステージに移ったと言える。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ており、ナノ材料技術、ナノデバイス技術、ウェハの常温接合や新たな封止材、真空封止法など基礎・基盤的な研究や装置開発も含め新たな技術開発が必要になってくる。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。

新たな産業として期待できる応用領域としては、車載、ウェアラブルデバイス、健康医療、社会システムなどがあり、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。今後は、このような応用を念頭の置き、それらに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) 科学技術的・政策的課題

日本における異種機能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

一方、異種機能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。大量生産、大量消費を前提とする事業とは一線を画するため、新事業の創生には極めて有効な立ち位置を提供していると言え、地方創生にも多いに利用できる可能性がある。そのためには、大学等に小型の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。

(4) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

[新たな技術動向]

International Electron Device Meeting (IEDM)、VLSI Symposium に代表される電子デバイス・回路に関する主要国際会議において、三次元集積に関するセッションが設けられ、カーボンナノチューブ等を用いたチップ間配線技術、光 TSV、チップ間を容量結合や誘導結合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ー (GNC) がⅢ-V族の n 型 MOSFET と Ge の p 型 MOSFET をウェ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。

ウェハボンディング技術、マイクロバンプなどを使って三次元集積をしていくという三次元貼り付け技術といわれるものが注目されている。シンガポール Nanyang 工科大学などの研究チームは、TSV を用いることなく、face-to-face の直接メタルボンディングによって MEMS 上に CMOS 回路の積層を実証している。

可変量生産を可能にする上で注目されるのが、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。このファブシステムと異種機能三次元集積チップは相性が良く、従来型のいわゆるメガファブによる生産も取り込んで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と期待できる。

[注目すべきプロジェクト]

三次元集積化技術の実用化に向けて、日本の GINTI (Global Integration Initiative) が進めるチップからウェハまでの三次元集積化技術開発と試作サービスが注目される。フランスの CEA-LETI やベルギーの IMEC が進めるオープンパートナーシップによる技術・装置開発の成果も注目される。IMEC では CMORE プラットフォームが整備され、200mm ウェハの $0.13\mu\text{m}$ CMOS プロセスを用いて、MEMS やイメージャー、フォトリソ集積のサービスを開始している。

異種機能集積化では今後、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。

(5) 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、高周波回路、パワーデバイス
- ・光電融合、シリコンフォトリソ、MEMS、イメージセンサ
- ・シリコン貫通ビア (TSV)、ウェハボンディング、プラズマ表面処理、熱設計

(6) 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。低コスト化をねらって、例えば従来のめっき法に代わり液体金属の埋込によってTSVを形成する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相次いで発表されている。集積化技術については、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。製造技術研究の進展に牽引されるように、三次元回路の設計技術についても大学を中心に研究が活発化している。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	○	↗	ドリームチッププロジェクトの技術開発成果を活用した応用デバイスの開発プロジェクトが開始した(2013年～)。東北のGINTIによるオープンな試作検証環境が整い、大口径シリコンウェハを用いての応用開発が加速されると見込まれる。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。 産総研GNCがIII-V族n型MOSFETとGe p型MOSFETをウェ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ている他、超低電圧デバイス技術研究組合(LEAP)がアトム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。 高度集積を目指して異種機能集積の協調設計・試作・検証が一体で行える体制を整備して応用研究を加速する時期にある。しかし、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といった課題がある。
	産業化	△	↗	三次元集積チップでは、東芝が2013年夏に三次元NANDフラッシュメモリの量産を発表した。異種機能混載技術によるヘルスケア製品を東芝が上市するなど、三次元集積化を牽引する動きも活発化しつつある。
米国	基礎研究	◎	→	引き続きSEMATECH、IBMを中心に薄化ウェハの三次元集積化に関して先端的な位置を堅持している。例えばIBMは、Controlled Spallingと呼ぶ独創的なシリコンウェハ薄化技術を発表し、回路層移載に適用できることをデモしている。大学では、ノースカロライナ州立大、スタンフォード大、ジョージア工科大などがそれぞれの得意なところを活かしながら、設計から信頼性まで実用化を強く意識した研究を進めている。 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	◎	→	IBM社の三次元ロジックや三次元メモリ、XilinxやAltera社の積層型再構成型ゲートアレイ(FPGA)など、応用デバイスの研究が盛んである。加えて、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。
	産業化	◎	↗	Xilinx社の最新FPGA製品にはTSVを使った2.5次元集積化技術が有効に使われていること、JEDECのワイドアイオー規格の標準化を受けてMicron Technology社などがモバイル機器向けメモリ開発に三次元技術を用いるなど、事業化に関する競争が一段と活発化している。一方で、Maxim Integrated社がウェ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をディレクションしており、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。最近では、信頼性に関わる研究が比重を増してきている。
	応用研究・開発	◎	→	IMEC、CEA-LETI では、300mm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、200mm 0.13μm CMOSプロセスを用いて、MEMSやイメージャー、フォトニクス集積のサービスを開始している。
	産業化	○	↑	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。
	産業化	×	→	産業化事例は見えない。
韓国	基礎研究	△	↘	KAISTなどでTSV技術の研究を行っているが、オリジナリティの高い技術発信はない。Samsung社等の民間企業は基礎研究についての情報発信は最近ではほとんどない。
	応用研究・開発	○	↑	Samusug、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	○	↑	Samsung社が2013年夏に三次元NANDフラッシュメモリの量産化を発表したのに続き、2014年夏にはTSVを使った64GBのDDR4型DRAM(速度/電力比が従来の4倍)の量産を発表するなど、メモリに関する三次元集積化で他国に先行している。
台湾	基礎研究	○	↑	2008年、ITRI (Industrial Technology Research Institute : 工業技術研究院) が国際的三次元集積化技術のコンソーシアム (Sd-STAC) を設立し、ウェハレベルの積層技術を進めている。
	応用研究・開発	◎	↑	TSMCがチップ・オン・ウェーハ技術を軸に研究開発を進めており、相次いでTSV技術を発表している。高アスペクト比三次元TSV技術、および極薄インターポーザを用いた三次元TSV技術を開発した。今後ますます研究機関やファウンドリ、OSAT (後工程請負) が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。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。
	産業化	○	↑	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 (2010年IEDM発表)。また、XilinxやAlteraと共同で、異種機デバイスの開発を行っており、OSATも量産化を目標に開発を進めている。

(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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註 2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド

↑ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

(7) 参考資料

- 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) Technical Digest of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2012, 2014.
- 14) Proceedings of IEEE 2013 Three Dimensional System Integration Conference (3DIC).
- 15) Proceedings of IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2013, 2014.
- 16) <http://www.tsensorssummit.org/> トリリオンセンサーに関するホームページ
- 17) <http://www.samsung.com/global/business/semiconductor/news-events/press-releases/detail?newsId=1> Samsung 社の TSV 採用 DDR4 型 DRAM 量産のニュースリリース(2014年8月28日)

3.5 基盤科学技術

応用分野を支えるとともに、それぞれの分野の最先端研究を牽引する「共通基盤技術」として、先端的な「加工・合成」、「計測・解析」、および「理論・計算科学」がある。

「加工・合成」については、トップダウン型プロセスの典型である超 LSI 微細加工技術に対して、ボトムアップ型プロセスの典型として、スループットの視点からは欠かすことのできない自己組織化がある。原子・分子から出発して材料やデバイスを逐次積み上げていくことを想定した場合、生体は自律的かつ階層的に構造形成が進む点で「階層的自己組織化」が実現されており、このプロセスの理解と応用がボトムアップアプローチの究極の目的の一つとなる。新しい材料として、ナノ・マクロの空間を制御した超分子材料、機能性ゲル、DNA 折り紙などが研究されてきたが、ナノテクノロジーとしてその成果を総体的に見ると、応用への展開は未熟である。自己集合の階層的発展の理論、非平衡開放系における時間・空間上の散逸構造の解明、平衡論と速度論の使い分け、ゆらぎの効果などサイエンスを巻きこんだ基本課題について出口からの位置付けが必須となる。

「計測・解析」については、選択したナノ領域を直接見る電子顕微鏡や SPM に加え、放射光・X 線、中性子、ミュオン、陽電子などの粒子線ビームが用いられる。放射光は構造解析や光電子分光、元素分析をはじめとする種々の用途に、中性子は重元素と軽元素が混在している結晶の解析や中性子の持つスピンを利用した磁気散乱による磁気構造の同定などに用いられる。ミュオンは磁性秩序や電子状態の測定あるいは元素分析などに、陽電子は格子欠陥の検出や空孔サイズの測定、あるいは結晶表面の解析などに用いられる。今後のナノサイエンスには、これらによる三次元計測、動的・リアルタイム計測、界面および内部計測などが必須であり、また、プロセスの微視的解明のためには、使用環境下でのその場計測技術に高いニーズが存在する。例えば、生体の細胞表面や細胞内部の三次元的観測、触媒や燃料電池の内部反応状態の解明に必要である。他にも高温、ガス環境、電場、磁場、応力などの「環境下」の問題がある。

「計算科学」も、今後、ナノテクノロジーの基盤的技術として本質的に重要な役割を果たす。特に目的機能を持つ新材料を創成するために必要となる動的過程のシミュレーション技術などには不可欠の武器である。特に、量子力学を考慮した第一原理計算による分子動力学は、原子数が数十万個程度の系を対象にできるようになり、存在感が急激に増している。今後は、理論モデルと計算を合わせたハイブリッドな方法で現実の複雑な系を追い込んでいくこと、特に非平衡開放系の現象をどう表現するかが重要な課題となる。データベースやインフォマティクスと結合したマクロ複雑系のシミュレーションによる現象解析に向けて、計算科学への期待は益々高まりつつある。

上記の共通基盤技術群の上位レイヤーとして、ナノテクノロジー・材料全体に関与する特有の「設計・制御概念・技術」がある。具体的には、「マテリアルズ・インフォマティクス」、「元素戦略」、「分子技術」、「空間制御」や「界面制御」、「バイオミメティクス」等であり、これらはいずれも目的とする機能を実現させるための構造の設計・制御手法として、サイエンスの新局面を拓くことによって社会・産業に貢献しうる領域である。

－ マテリアルズ・インフォマティクス：計算科学による特性予測、それを実証するハイスループット材料合成と評価、それらのデータを統合管理する材料データベースや機