

3.2 デバイス・ハードウェア

微細化から物理世界とのインターフェースへ

ここ数十年間、情報通信技術（IT）の根幹となるデバイスの主流は MOS トランジスタであり、その基幹研究要素はトランジスタの微細化（スケーリング）であった。微細化すれば、機能あたりのコストは低減し、速度は向上、消費電力は低下するため、コスト・パフォーマンスの急速な向上に寄与するためである。

現在の微細化は 20nm 程度の線幅が量産加工できるところまで来ており、さらに 5nm 程度までは進展するだろうと考えられている。このような微細化を推進する従来型の努力も依然重要であることはいうまでもない。しかし、このところ、研究のパラダイムシフトも起こり始めている。第一に、その微細化も永遠には続かないことが認識され始めた。第二に、今後 IT が人々の暮らしを支え、社会課題を解くためには、MOS トランジスタを主体とした半導体集積回路、半導体チップだけでは不足していることも認識され始めた。

例えば、今後の高齢化社会をより豊かで効率的にするヘルスケアサービスやロボットなどのソリューションを考えた場合、デジタルプロセッサに代表される仮想空間情報処理だけではなく、物理世界とのインタラクションがより高度になる必要があることは言うまでもない。センサー、アクチュエーター、電源、エネルギーなど情報ではない物理実体との直接的な関与がエレクトロニクスデバイスレベルで求められる。これは、微細化トランジスタだけで解決できる問題ではない。

このように、次世代の IT 社会を支えるデバイス技術の研究開発は、微細化だけ、あるいはデジタル化だけの競争ではなく、それ以外の部分により多くの研究付加価値を求める時代に移行してきている。

内向きの努力から外向きシステム指向に

このような事情を反映して、集積エレクトロニクスも半導体チップをいかに設計し、いかに製造するかというのが研究対象だった時代を終え、半導体チップ以外のシステム要素を含めて最適化するという研究が世界的に注目を集め始めている。内向きの努力から外向きの努力に、チップだけの最適化から、システム全体としての最適化が重要な時代に突入している。従って、各論で示す各種のエレクトロニクス要素研究も、システムの観点からの研究をより盛り込みながら推進する必要が出てきている。

例えば、パワーエレクトロニクスデバイスを考えた場合、パワー素子そのものの低ロス化や低コスト化に加え、システムを低ロス化、低コスト化するためには、インダクターの小型軽量化に資するシステム高速化が重要になってくる。また、システムをより安全に動作させるためには、パワー素子のみならず、パワー素子の制御などにより大きな付加価値や差別化要因があることが認識されてきている。システム指向の研究が必要になっている理由である。

IoT：個々の要素技術とアジャイル・プラットフォーム技術

このように、微細化やデジタルプロセッサだけで今後の IT 技術を支えきれず、また社会課題も解けないことが意識され始めているが、従来の集積エレクトロニクスのもう一つの弱点も認識され始めている。それは開発費の高騰である。先端チップの開発には数十億円の

研究開発費がかかると言われている。一方、今後の実空間を相手にした Internet of Things (IoT) などの ICT サービスなどでは、デバイスが使われる環境が多種多様であるため、IoT ノードの構成要素も多種多様である。センサーも多様、アクチュエーターも多様、エネルギー環境も多様、無線仕様も 4G/5G、Wi-Fi、Bluetooth、ZigBee などと多種多様だからである。

このような多種多様なシステムでは、開発費が数十億円となる集積回路開発をすべてのシステムで行うわけにはいかない。一方で、ソフトウェアで多様性に対応することは可能かと言えば、デジタルだけが問題ではなく、電源、センサー、アナログ、通信などシステム全体が問題であるため、デジタルプロセッサやメモリーをソフトウェアでカスタマイズするだけで対応することは不可能になっている。

現在では残念ながら多種多様なシステム要求を満足させる高性能なエレクトロニクス集積技術は存在していない。そのため、新しいアプリやサービスを多くの方々が独自の創意工夫で立ち上げるためのハードウェア提供には限界があり、従って新しいアプリケーションが生まれず、このところのエレクトロニクス技術の閉塞感の一因になっている。これは日本だけの状況ではなく、多くの国際学会で集積エレクトロニクスは踊り場にいることが認識されている。次の成長過程に入るためには、このような多種多様なアプリを育む集積プラットフォームの構築が重要になってきている。

プラットフォーム化というのは、ある技術のユーザーに対して、その技術の難しい理論や製造過程などを知らなくても使えるようにし、ユーザーはその中にあるコンポーネントを自由に選んで組み合わせ、カスタマイズして各自のサービスを実現できるような「場」を提供することである。そのような「場」を提供したものが技術競争に打ち勝つ時代になってきている。例えば、TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Co., Ltd.) は CMOS 技術のプラットフォームを築きあげた。そこでは、難しい半導体物理を知らなくても、設計ができる「場」が提供されている。Apple は難しい通信理論やハードウェアの詳細を知らなくてもアプリケーションをプログラムできるスマートフォンのプラットフォームを提供している。Arduino はボードを組み合わせると、ソフトウェアが自由にダウンロードして使える「場」を作り上げ、まだ大型で消費電力も大きいですが、IoT ノードのプラットフォームを目指している。

競争力のある個々のとがった技術や要素の研究や開発はもちろん重要である。しかし、それだけではユーザーに技術を提供できないことも明白になってきている。社会課題もそれだけでは解けない。個々の素晴らしい技術をユーザーに「お届けする」技術の研究、プラットフォーム化の研究も求められているのはこのためである。

例えば、電源、センサー、アナログ、通信などもすべてソフトウェア・カスタマイズできるようにするという研究なども重要である。また、日本には、集積回路技術、実装技術、リアルタイムソフトウェア技術を含め超小型化、超低消費電力化を実現させる新しい競争力あるアジャイルなマイクロ集積プラットフォームを作る潜在能力もあると考えられる。

本俯瞰区分ではエレクトロニクスやフォトリソグラフィデバイスを進化させるための技術研究分野の俯瞰をまとめている。しかしながら、このような個々の技術の基盤研究を推し進めるのみならず、上述のような状況に鑑み、システム指向やプラットフォーム化などを指向しつつ、当該分野の研究開発投資を行うことが期待される。

計算エネルギー効率の格段の向上

物理世界とのインターフェースが重要な課題になる一方で、得られたデータを処理するために一段と強力な計算能力も必須となってくる。スーパーコンピュータのようなシステムでは処理能力の限界は発熱で決まるようになっており、性能を上げるには計算エネルギー効率を向上させることが必要になる。発熱を抑えるために、より大きな施設にすると、今度は計算機間の通信が遅くなって性能が上がらなくなる。また、IoT 応用では、エネルギー供給は電池などで制限されていることも多く、計算エネルギー効率のさらなる向上が求められている。もちろん、自動運転や、センサーノードに認識動作を付加し、通信が限られた場合もシステムとして低電力でセキュアな動作を提供するといった例でも計算エネルギー効率の向上は不可欠である。計算エネルギー効率の向上には、微細化が効果的だが、それにも限界が見え始めた現在、微細化以外の方策が検討され始めた。

顕著なものは脳型コンピューターに代表されるような非ノイマン型のアーキテクチャー探究である。Deep learning などニューラルネット系のアーキテクチャーでは IBM がチップやシステムを使った検証で実績を上げ始めた。これらの系では、不揮発性記憶素子も必要となり、メモリー材料や新規メモリー原理なども研究として重要となっている。また、D-Wave なども非ノイマン型ハードウェアの例となる。その他、ノイマン型のコンピューターを駆使して脳のモデルを作り、その動作を理解した上で、非ノイマン型のアーキテクチャーを考えるとといった研究も始まっている。また、脳は 0.1V 以下の電圧領域を使った動作をしていることが知られており、ノイズにも負けずにこのような極低電圧で動作する素子やシステムなどにも期待が集まる。このような一連の脳型コンピューターあるいは非ノイマン型コンピューターの研究も世界各地で始まっており、この俯瞰の各種の技術を組み合わせた形で、次世代の IT の基礎を作る可能性がある。

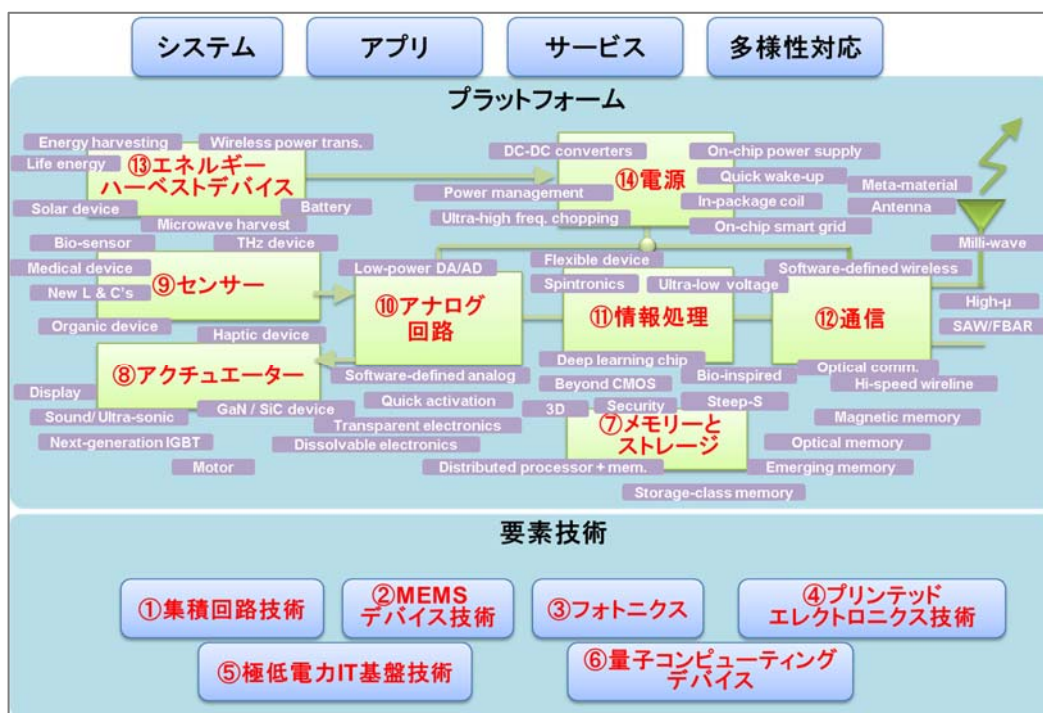


図 3.2.1 デバイス・ハードウェアの俯瞰図

研究開発領域
デバイス・ハードウェア

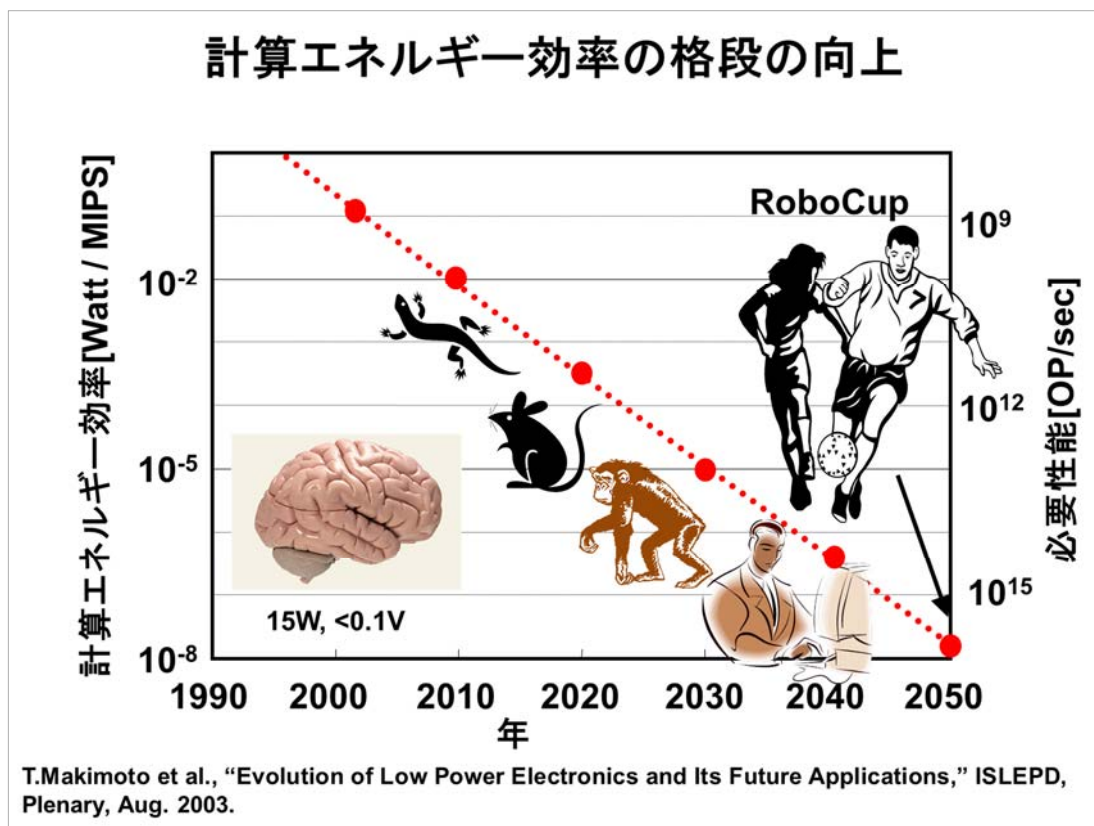


図 3. 2. 2 計算エネルギー効率の格段の向上

3.2.1 集積回路技術

(1) 研究開発領域名

集積回路技術

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

集積回路技術は、デバイス技術・プロセス技術・集積化技術などを含むハードウェア技術、回路設計技術、システムアーキテクチャ技術など、幅広い研究開発領域を含むが、本項では、集積回路を実現するためのハードウェアに絞って、その動向について述べる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

集積回路は、大まかには、ロジック LSI とメモリーLSI に分けられる。これらの LSI を実現するためのハードウェア技術としては、ロジック LSI やメモリーLSI の両方に使われる、リソグラフィなどの微細素子形成技術や 450mm 大面積ウエハー化技術などの高集積 LSI 共通技術と、ロジック LSI、メモリーLSI それぞれに固有に使われる集積化デバイス・プロセス・材料技術がある。

ムーアの法則に従って経済合理性のある集積システムを実現する上では、微細素子形成技術が最も重要である。しかしながら、現在リソグラフィ技術は大きな問題を抱えており、次世代のリソグラフィ技術である極端紫外線リソグラフィ（EUV : Extreme Ultraviolet Lithography）も、光源の寿命や信頼性を含め、多くの課題に直面している。露光装置だけではなく、レジスト、マスク、欠陥検査など多様な技術体系を含むことから、現在、各国で研究開発の支援がされている状況にある^{1),2)}。しかし現段階では、まだ EUV を用いた量産技術のめどが立たないことから、延命技術として、既存のリソグラフィ装置を用いたダブルパターンニング、トリプルパターンニングなどの技術が使われているが、コストの増加を含めて、将来の微細化の大きな制限要因となっている。

リソグラフィ技術の停滞と高コスト化の中で、Si の 450mm 大面積ウエハー化は、製造コストの削減と集積回路の経済的限界を乗り越える上で切り札となりうる技術と考えられている²⁾。ただし、装置を購入する LSI メーカーの寡占化が進む中で、半導体装置メーカーにとっては、巨額の研究開発投資を担うリスクがあるため、非常に積極的とは言えない面があるが、米国や欧州では、コンソーシアムなどによる 450 mm 化技術に対する支援が行われており、LSI 製造技術上、今後予想される大きな技術変革の一つと捉えられる。

一方、ロジック LSI、メモリーLSI それぞれに固有な集積化技術に関しても、微細化の原理的な限界が見え始めている。一方、各 LSI を製造する企業の寡占化が進行中であることから、従来のように、その集積化技術が学会などで開示されることが少なくなりつつあるため、そのデバイス・プロセス技術を、各技術世代の共通技術として捉えにくくなっている。特に、大規模集積メモリーLSI は、これまで、コモディティ製品を中心に、企業ごとの垂直統合型集積化技術により、実現されており、共通技術としての課題を抽出しにくいのが、主力製品である DRAM・NAND フラッシュ共に、平面内での微細化の限界が明確になっている。このため、特に NAND フラッシュメモリーでは、3 次元構造のセルが提案されており、すでに一部製品化されつつある。今後も、3 次元セル構造の追及により、高集積化が実現されていくものと考えられる。

メモリーLSIの最近の期待は、MRAM、ReRAM、PRAMなどの新規不揮発メモリーの進展と、これらの新メモリーLSIによる既存メモリーの置き換えやストレージクラス・メモリーなどの新しい用途の拡大である。これらの新メモリーは、現状で、セルに用いられる新材料・新構造などに多様な選択肢が存在しており、活発な研究開発が国際的に進められている。

一方、ロジックLSIの集積化デバイス技術に関しても、リソグラフィの行き詰まりと経済性の壁により、微細化の限界が見え始めており、平面内での微細化は、10nm以下の技術ノードで、早晚、停滞する可能性が高い。また、MOSFETのチャネル長は、厳しい短チャネル効果の顕在化により、近年では、技術ノードのサイズよりはむしろ長くなっており、10 nmを切ることは容易ではないと考えられている。

ロジックLSIのMOSFETにおいては、各技術世代におけるデバイス構造や特性に関する共通の課題を解決するため、デバイス・プロセス・材料技術は標準化されやすい傾向がある。近年の微細MOSFETにおける最大の課題は、低消費電力化である。低消費電力動作を実現するためには、待機時のオフ電流を低減することと電源電圧の低下により動作時の電力を抑制することの両方が必要である。この目的に対し、短チャネル効果の抑制によるSファクターの改善とオフ電流低減は、極めて効果的であり、立体型素子として、極薄SOI MOSFET、FinFET、Tri-Gate MOSFET、ナノワイヤ MOSFETなどが精力的に研究されている²⁾。Intelは、22 nm技術ノードにおいて、FinFETを実用化し、14 nm技術ノードにおいても、このデバイス構造を拡張している³⁾。一方、STマイクロエレクトロニクスは、IBMやLetiなどとの共同研究により、極薄SOIを用いたプラットフォームを提供している。

また、電源電圧の低減のためには、MOSFETの電流駆動力の向上と素子特性ばらつきへの低減も極めて重要であり、多くの研究開発が進められている。電流駆動力向上のために、Siに代わる高移動度の材料を用いたMOSFETが精力的に研究されており、高Ge濃度SiGeチャネル、Geチャネル、InGaAsなどのIII-Vチャネル材料などを用いたMOSトランジスタの研究やこれらの異種材料をSi基板上に高品質で形成するための研究開発が、先端ロジックLSIを開発している企業に加え、欧州のimecや米国Sematechなどのコンソーシアムで精力的に研究が進められており、現在の先端MOSデバイス研究の最大のトピックとなっている^{4),5)}。

ポストMOSFETスケーリングの方向性としては、MOSFETの動作原理を越えて急峻にオンオフ電流を変化できるデバイス（steep slope デバイスと呼ばれる）による集積回路とチップの3次元集積化が挙げられる。MOSFETの低電源電圧動作・低閾値化に対して、有限のSファクター（ドレイン電流を1桁変化させるために必要なゲート電圧であり、室温でおおよそ60 mV）が、その物理的限界を与えている。この限界を超えることを可能にするsteep slope デバイスの研究が、世界的に活発化している。米国では、大学を中心としたsteep slope デバイスに関する国家プロジェクトが進められており、先端LSI企業やimecなどのコンソーシアムでも、精力的に研究が行われている。現在最も有望と考えられているsteep slope デバイスは、半導体中のトンネル電流をゲート電圧で制御するトンネルFET（TFETと呼ばれる）である。

3次元集積化は、Si貫通ビア（TSV）などを用い、バックエンドプロセスや実装技術の革新によって実現する方法から、NANDフラッシュで進められているフロントエンド・プロセスで実現するものまで、多様なアプローチが考えられる²⁾。また、3次元集積技術は、異

種材料や異種デバイスを Si ウェハー上に集積するヘテロジニアス・インテグレーションを含めて、多様なシステムの実現を可能にすると期待されている⁴⁾。具体例として、光配線のためのフォトニクス部品を Si ロジック LSI と集積するシステムなどが注目されている。以上のように、3次元集積技術は、多様な技術を用い、かつ多様なシステムブロックの組み合わせが可能であり、ポスト微細化世代において、集積システムに付加価値をもたらす技術として注目されている。

（4）科学技術的・政策的課題

集積回路ハードウェア技術開発全般に言えることとして、技術体系が極めて高度化し、かつ研究開発および工場の投資が莫大であるため、技術開発を推進できる企業が世界的に見て極めて少数に限られている点にある。先端メモリー分野では、三星・東芝・Hynix など、先端ロジック分野では、インテル・TSMC・三星などの一部の巨大企業のみで遂行可能な状況にある。

この状況の中で、日本では、多くの企業が産業競争力を失いつつある。また、先端集積デバイス関連の国家プロジェクトが相次いで終了し、その後の計画のめどがたっていないため、これまで保有してきた技術優位性を急速に失う危機にひんしている。特に、この傾向が顕著なロジック LSI 分野では、産業力を回復すると共に、将来に向けての技術開発を継続していくために、微細化だけに頼らない新しいデバイス技術の創成とこれを用いた新しい集積システムの構築、その産業的出口の探索が重要と考えられる。

一方、欧州では、半導体技術の継続的重要性をよく認識しており、欧州全体として半導体分野への研究開発投資を維持しており、450mm 化技術や 3次元集積技術に対しても研究投資が進められている²⁾。このような支援の後押しもあり、imec における国際的共同研究が活性化しており、世界のコンソーシアムの中で、最も活発な共同研究開発を展開している点は注目すべきである。日本においても、優れた基礎・応用研究能力を生かし、国際的共同研究開発拠点化を図るなどの努力を進めることが必要と思われる。

（5）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）

ロジック LSI では、今後のセンサーネット分野などの新しい市場を見据えると、極低消費電力化の要求が、一層重要になると考えられ、これに対応できる steep slope デバイスの研究が活発である。また、高移動度チャネル MOSFET や光電子集積システム実現などの多様な応用を目指して、異種材料集積や 3次元集積のための研究プロジェクトも活発に進められており、欧州では、大面積 Si 上の III-V 層貼り合わせとその上のデバイス技術に関する研究プロジェクトが進行中である。

新電子材料の観点では、Graphene などの 2次元材料デバイスの研究が、米国・欧州を中心に活発であり、特に米国の大学では、バンドギャップを有する 2次元半導体である遷移金属カルコゲナイドの研究プロジェクトが、極めて活発に進められている。

更に、ビッグデータ処理や認識機能などの向上を目指して、脳型コンピューティングなどの新しいアーキテクチャーの集積回路の研究が活発化しており、IBM など企業においても研究プロジェクトが進行中である。脳型コンピューティングや認識チップに適したハードウェア、新デバイス・新材料の研究も今後活発化していると予想される。

（6）キーワード

EUV、450mm ウエハー、MRAM、RRAM、PRAM、FinFET、Tri-Gate MOSFET、ナノワイヤ MOSFET、Ge チャンネル MOSFET、III-V チャンネル MOSFET、steep slope デバイス、トンネル FET、3次元集積、ヘテロジニアス・インテグレーション、遷移金属カルコゲナイド半導体、脳型コンピューティング

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↓	近年の半導体産業全体の不振により企業での基礎研究は大きく減退している。一方、基礎研究を支えてきた国家プロジェクトは、2013-2014年に相次いで終了する一方、当該分野の新規プロジェクトは立案されないため、研究アクティビティに急ブレーキがかかっている。事情は国研や大学でもほぼ同様であり、文科省を含めて研究ファンドがほとんど枯渇しており、研究分野の変更を余儀なくされる状況となっている。現状では、これまでの研究投資により、あるレベルの研究が確保されているが、今後、基礎部分の研究アクティビティの急激な低下が危惧される。
	応用研究・開発	△	↓	近年の半導体産業全体の不振や企業再編に伴い、東芝のフラッシュメモリーを含むメモリー技術の一部を除いて、技術開発力は大きく低下している。特にロジック集積回路の先端技術開発の拠点が、国内では極めて乏しく、研究開発の空洞化がすでに起こっている。現状では、半導体装置メーカーが先端技術の応用研究をけん引している。企業では、人材の国外流出や、同じ社内でも他分野への転換も進んでおり、技術開発水準の低下が顕在化している。
	産業化	×	↓	製品化技術に関しても、近年の業績不振により、生産拠点が急速に縮小しており、東芝のフラッシュメモリー分野を除くと、産業技術力の大幅な低下がみられる。先端製造設備への投資が、長期にわたり、行われていないことから、ロジックLSI分野での競争力は、大きく失われている。我が国の産業競争力は、現状では、半導体装置メーカーに移行しているが、身近に半導体メーカーがないことに伴い、装置メーカーの競争力の維持も、長期的には難しいことが危惧される。
米国	基礎研究	○	↓	IntelやIBMなどの企業やSematechなどのコンソーシアムでは、引き続きある水準の基礎研究を維持している。ここ数年、半導体集積回路技術に関する大学への投資は極端に絞られてきている一方、2次元材料やナノバイオ分野などの研究ファンドが多く提供されているため、大学では、従来の集積回路技術とは異なる研究分野への転出が顕著であり、大学での当該分野における研究アクティビティは低下している印象がある。
	応用研究・開発	◎	→	インテルの開発力は引き続き強力であり、応用研究のリーダーシップを取っている。一方、IBMはロジック開発の世界的開発拠点の位置づけが弱まりつつある。コンソーシアムの拠点であるAlbany Nanotechnology Centerは、450 mm ウエハー技術やEUV技術などを含め、引き続き、当該分野の世界拠点の一つの位置づけにある。生産拠点が、次第にアジアにシフトする中で、産業界を中心に、引き続き、国際的技術開発をリードする役割を担っている。
	産業化	○	→	世界的にプレーヤーの数は絞られている中で、インテルは、引き続き高い水準を確保している。その他にも、メモリーの製造技術やファウンダリーの立場で、競争力のある企業が引き続き、競争優位性を保持している。ただし、先端ロジックLSIビジネスモデルが変化していく中で、今後の動向には流動的な面がある。
欧州	基礎研究	○	→	引き続き、imec、Letiなどの機関が、研究拠点として研究開発を主導している。特に、国際的共同研究機関としてimecの存在感が高まっており、基礎研究から応用研究までをカバーしている。EUのファンドによるプロジェクトや共同研究も継続されている。
	応用研究・開発	○	→	先端LSIメーカーとimecとの活発な協業、薄膜SOIのプロジェクトでのLetiとSTマイクロエレクトロニクスとの協業など、研究開発拠点としてのIBMや日本の後退を受けて、欧州内での研究・技術開発は、むしろ活性化している印象がある。また、More than Mooreなどの新応用技術などにも積極的であるように見える。
	産業化	△	→	生産拠点としての競争力に不安定要素はあるものの、STマイクロエレクトロニクスでは、最先端技術ノードを維持している。得意とする製品に特化した戦略的経営と独自技術確保に成功しており、日本よりも、産業戦略上優れた立場を保持しているように見える。

中国	基礎研究	△	↗	先端的学会や論文誌での発表件数、論文件数は順調に増えてきており、徐々に実力を備えつつあるように見える。大学や研究所では、海外から多くの教員を迎えて、国際化を図っており、このような研究グループでは、研究水準も高い。
	応用研究・開発	×	→	企業レベルでの先端的技術開発は、まだ顕在化していないように見える。
	産業化	×	→	企業的には、先端的材料や技術を開発とする段階には、まだ至っていないように見える。
韓国	基礎研究	○	↗	企業数は限定されるが、豊富な資金力と人材で高い研究水準を保っている。また、大学も力をつけており、海外での経験を積んだ教員を多く迎え、国際化も進んでおり、学会活動は、より活発になっている。
	応用研究・開発	◎	↗	製品化を意識した研究開発を、トップダウン型の指導力と豊富な資金力の下で、強力に進めている。国外の優秀な人材を、積極的に集め、効果的な技術開発が行われており、また先端分野への研究投資にも貪欲であることから、高い技術開発水準が実現されている。
	産業化	◎	→	引き続き、高い産業技術力を有している。特に、Samsungは、極めて強力な産業技術力をもつメモリー製品に加え、ロジックLSI分野でも着実に力をつけており、マーケティング力の強さも際立っている。ロジックLSIの分野で、インテル、TSMCと並ぶ世界の第三極の力をつけているが、先端ロジックLSIビジネスモデルが変化していく中で、今後の動向には流動的な面がある。
台湾	基礎研究	○	↗	国家的に半導体分野に注力しており、国研や大学での研究開発や産学連携が非常に活発である。大学の成果は、多少玉石混交の部分もあるが、質・量ともに充実している。企業においても、TSMCを中心に、豊富な資金力と人材により、意欲的に先端半導体デバイス開発を進めており、研究水準は大きく向上している。
	応用研究・開発	◎	↗	TSMCなど、企業は限定されるものの、豊富な資金力と人材により、技術開発水準をますます拡大している。Intelと共に、微細化技術、先端デバイス・プロセス技術導入に、最も積極的かつ貪欲であり、多くの海外パートナーとの連携にも意欲的である。
	産業化	◎	↗	TSMCを中心に、ファウンダリービジネスの大きな成功の結果として、豊富な資金力をベースとして、産業規模を大幅に拡大しており、追随を許さない高い産業技術力を有するに至っている。世界最大規模の半導体生産拠点としてプレゼンスは、ますます増している。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

(8) 引用資料

- 1) ITRS ロードマップ, <http://www.itrs.net/>
- 2) 津田健二（監修）、半導体 2014-2023、日経 BP 社（2013）
- 3) Intel's Newest Microarchitecture and 14nm Manufacturing Process, <http://newsroom.intel.com/docs/DOC-5677>
- 4) 高木信一，“ポストスケーリング時代の CMOS デバイス技術”，電子情報通信学会誌, vol. 92, no. 1 (2009) pp. 43-48
- 5) New materials for post-Si computing, MRS Bulletin, vol. 39, Issue 8 (2014)

3.2.2 MEMS デバイス技術

(1) 研究開発領域名

MEMS デバイス技術

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

MEMS（Micro Electro Mechanical Systems、微小電気機械システム）とは、半導体集積回路技術にマイクロ・ナノメカトロニクス的な高付加価値をもたらす More-than-Moore 技術の総称である。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

近年の半導体エレクトロニクス分野においては、ウエハー口径が増大する一方でトランジスタの設計ルールの微細化が進み、同一性能の LSI であればウエハー 1 枚から取り出せるチップ数が急速に増大している。しかしながら、そのような超微細加工に必要な設備投資に伴って LSI の製造コストが上昇しており、それに見合った応用先を見つけることにもまた苦慮している。この点において、MEMS 技術はエレクトロニクスにマイクロ・ナノメカニクス的な高付加価値をもたらす More-than-Moore 技術として注目されており、国内外の大学・研究機関・企業において、実用化を目指したさまざまな MEMS 応用素子の研究開発が進められている。

その例として、加速度センサーやジャイロスコープ、高度計（気圧計）などの物理センサー以外にも、携帯電話用のシリコン・マイクロホン、自動車のタイヤの圧力・温度センサー、ボロメタ方式の赤外線撮像素子、各種ガス・匂いセンサーの研究が挙げられる。また、画像プロジェクター用のデジタルミラーアレイ（一般にはライトバルブアレイ）、水晶振動子を置き換えるシリコン振動子、インクジェット・プリンター、カメラの自動焦点機構・シャッター、光ファイバー通信素子、高周波無線通信素子などのアクチュエーター系の MEMS も、半導体にメカ的要素を盛り込む手法として実用化研究が進められている。さらには、マクロな世界と分子原子のナノスケールの世界を橋渡しするマイクロ理工学ツールとして、DNA チップ、タンパク識別のための μ TAS (Micro Total Analysis System)、Lab-on-a-Chip などのセンサーの研究が進められている。また、これらの応用分野としては、多種多様なセンサーを必要とする自動車応用が最もけん引力が大きく、スマートフォンやディスプレイなどのコンシューマー・エレクトロニクスがそれに続いており、将来的にはバイオ・医療への飛躍が期待されている。

現在実用化されている MEMS デバイスには、主にシリコン系の材料が用いられている。特に単結晶シリコンは微細化することで機械的な柔軟性が高まり、共有結合性のバネ材であるためにクリープ現象も少なく、信頼性の高い材料である。最近では、集積回路プロセスの後工程（配線）で使用するアルミとシリコン酸化膜を構造体とした MEMS や、アモルファスシリコンをバネ材に用いる例なども開発されており、半導体シリコンプロセスだけでなく液晶フラットパネル分野で開発された TFT (Thin Film Transistor) 技術による MEMS デバイスの開発も進んでいる。ただし、従来の MEMS 技術では半導体プロセスを使用してはいるものの、回路とのモノリシック集積化はいまだに標準化技術が完成しておらず、高度な

集積化 MEMS 素子を開発する際の懸案課題となっている。

[これまでの取り組み]

MEMS 分野は米国 DARPA プログラムが立ち上げた経緯もあり、UC バークレー校、スタンフォード、MIT 等の米国の大学とその周囲の企業が 1980 年代から産学連携を積極的に推進している。米国発の主な製品として、アナログデバイゼス社の加速度センサーやテキサスインスツルメンツ社の画像プロジェクター素子 DMD などが知られている。ただし、後発の ST マイクロ社が多軸の加速度センサー・ジャイロを開発してスマートフォン応用に供給し、Qualcomm 社によるミラー型以外の画像ディスプレイ素子が開発されるなどの新たな動きもある。米国発 MEMS の特徴は、大学スピンオフやスタートアップ企業がファブレスで試作した製品から出発した例が多い。

欧州においては、CMP や MEMS CAP 等が MEMS のファウンダリサービス事業を展開しており、大学・研究機関がファブレスで研究開発することを支援している。また、フィンランド VTT 技術研究所やオランダ・トゥエンテ大学 MESA+、スイス EPFL 等に MEMS 系の研究開発拠点が整備されており、産学連携研究を推進している。

一方、我が国においては一般財団法人マイクロマシンセンターが中心となって経済産業省系の産学官連携型の国プロを主導してきており、これまでに、「マイクロマシン技術研究開発プロジェクト」（1991～2000）、「MEMS 用設計・解析支援システム（MemsONE）開発プロジェクト」（2004～2006）、「高集積・複合 MEMS（ファイン MEMS）製造技術開発プロジェクト」（2006～2008）、「異分野融合型次世代デバイス（BEANS）製造技術開発プロジェクト」（2008～2012）、「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」（2011～2014）等を実施している。これらを歴史的に俯瞰すると、材料、プロセス、デバイス、システム、通信・データ解析、サービスに至る一連の技術レイヤーに関わるプロジェクトとして発展しつつあることが分かる。現在で主に、MEMS センサーをビッグデータ・クラウドコンピューティングの入り口として位置づけて、MEMS 技術によって初めて可能となる新しいサービスへの研究開発を推進している。

また、2011 年度から 2013 年度にかけて、最先端研究開発支援プログラム「マイクロシステム融合研究開発」（東北大・産総研）、最先端・次世代研究開発支援プログラム「超高性能ポリマーエレクトレットを用いた次世代環境振動・熱発電システムの開発」（東大）、「集積化 MEMS 技術による機能融合・低消費電力エレクトロニクス」（東大）が実施されている。

[今後必要となる取り組み]

MEMS デバイスの製法は製造技術の完成度に大きく依存する。過去にも高アスペクト比ドライエッチング装置（DRIE : Deep Reactive Ion Etching）がシリコンの結晶異方性に基づくウェットエッチング技術を駆逐して SOI（Silicon on Insulator）ウエハーを使った MEMS デバイスの応用範囲を飛躍的に拡大したように、基盤的製造技術の研究開発への継続的な支援が望まれる。例として、DRIE の他にも常温ウエハー接合技術、レーザーを用いたダイシング技術、マスクレス露光器、ALD（Atomic Layer Deposition）製膜や圧電材料などの新材料成膜装置などが挙げられる。

〔関連する学会〕

MEMS 分野の学術発表は、国内では電気学会センサ・マイクロマシン部門が開催する研究会が規模として最大である¹⁾。また、国際会議としては IEEE が毎年主催する International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)²⁾と、隔年で開催する International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers)³⁾が重要学会として位置づけられる。また、Transducers が開催されない年には、そのアジア・パシフィック版である Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT)⁴⁾が開催される。

（４）科学技術的・政策的課題

従来型のエレクトロニクス産業が少品種大量生産型であるのに対して、MEMS 市場のほとんどは多品種少量生産型である。我が国のエレクトロニクス産業は大企業主導型であったため、年間100億円以上の市場に対しては積極的に投資するのに対し、年間数億～20億円程度の MEMS 市場に対しては本格的に着手していなかった。この間、米国・台湾では多くのスタートアップ企業がチャレンジングな製品開発に着手し、多産多死ではあるものの、多くの企業研究者が技術・ノウハウを蓄積して、現在のシリコン・マイクロホン、加速度センサー、画像ディスプレイ、シリコン共振子等の成功例につながっている。この点を挽回するためにも、我が国でも技術者・研究者を育成するという観点から、小規模 MEMS 研究・事業が数多く成立せしめる支援対策が必要であろう。

ただし、ナノメートルに達しようとする高度な最先端エレクトロニクス微細加工技術と、現在ではたかだかサブミクロン程度の設計精度で十分に対応可能な MEMS との整合性が良いかどうかは議論が分かれるところである。ファンディング制度においては、数年後に必要な研究開発・設備への投資と、その先を目指した学術研究のための人材育成への投資を区別した議論が必要であろう。

MEMS 分野は異分野由来の技術を融合した新たなデバイスの創成を特徴としており、いわゆる技術のすり合わせが得意な我が国の文化を有効に生かせる分野である。この点で、国プロ等を通して当該分野の研究開発を活性化し、短期長期の両面で我が国の国際的産業競争力を強化することが望まれる。

（５）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）

エレクトロニクスの大規模生産能力を背景にして、年間1兆個もの分散無線センサーを消費すると言われるトリリオン・センサー社会のあり方に関する議論が国内外で進められている。主にはセンサー、無線通信機器の小型化・分散化により、人間の周囲のあらゆる情報（気温、圧力、照度、騒音、ガス、匂い、振動等）を計測し、これを時間と位置の情報にひも付けて社会インフラの監視やヘルスケア、食品・流通管理などのビッグデータ分野に応用するものである。トリリオン・センサー社会の実現には、MEMS センサー以外にも、それらの超小型無線センサーノードに対する電源供給方法の研究開発が必須の課題となる。近年では、太陽光、熱、電磁波、風、環境振動などをエネルギー源として、そこから電力を回収するマルチモーダル型のエネルギーハーベストの研究開発が急速に進みつつあり、将来的には分散型無線センサーから電池を駆逐することを目標にしている。現在、市販あるいは研究

開発されている MEMS エネルギーハーベスタの発電能力は数十 μW 程度であり、水晶時計の LSI をようやく駆動できる程度である。しかしながら、MEMS 分野の微細加工技術の発展とその他の周辺技術の成熟を考慮して発電能力を外挿すると、2030 年には現在の 1000 倍以上の 10mW 程度の発電が予想される。

また、集積化 MEMS 技術分野では、これまでは高性能センサーの信号処理や高周波 MMIC と MEMS の融合、DNA チップなどのマイクロ流体型 MEMS と回路の集積化が主な課題であった。一方、スマートフォン用の加速度センサーに代表されるコンシューマ・エレクトロニクス MEMS においては、加速度などの物理環境下でのチップ検査に要する費用割合の上昇が問題となっている。そこで、加速度や回転、音響入力などの物理量をチップ内部の静電的な力で模擬することで、チップの自己診断・解析を実施する BIST (Built-In Self Test) や BIRD (Built-In Self Diagnosis) 機能に集積化 MEMS 技術を活用する等の新たな検討が ITRS 等で進められている。

(6) キーワード

- ・ MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)
- ・ 集積化 MEMS
- ・ マイクロアクチュエーター、マイクロセンサー、マイクロマシン

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	（一財）マイクロマシンセンターが中心となって、NEDO系の産学官連携プロジェクトを1991年から継続して実施しており、材料・プロセス・デバイス技術レイヤーでの蓄積が大きい。また、電気学会センサマイクロマシン部門（E部門）にMEMSに関する学術研究のコア研究者が集結しており、東北大学、東京大学、東京工業大学、豊橋技術科学大学、京都大学、立命館大学、兵庫県立大学、九州大学ほかで活躍している。参加人数的には、電気学会のセンサ・マイクロマシンシンポジウムには毎回500名を超える参加者があり、国内最大規模の会議である。ほかには、応物・集積化MEMS（数十名）、機械学会（数十名）がある。ただし、どの学会も若手の会員数が伸び悩んでいる。
	応用研究・開発	○	↑	上記のマイクロマシンセンター関連の産学官連携研究により、応用を目指した国プロが盛んに実施されている。ただし、これまではコンソーシアム的な研究開発色が強く、実際に製品につながった例は少なかった。例外的には、東北大学のグループがMEMS系ファウンダリーとの連携により活発に製品開発を支援している。光ファイバ分野では、富士通が2000年前後に大規模光クロスコネクトを実現した。半導体エレクトロニクス企業の製造ラインをMEMSに転用し、外部からの製品開発・生産を実施するファウンドリ企業が複数あり、開発を支援している。つくばイノベーションアリーナの施設もMEMSファウンドリ機能を有しており、ユーザー数が増えている。トリリオン・センサー分野にMEMS技術を展開する機運が高まっており、無線センサー関連技術の産学連携研究が活発になりつつある。
	産業化	○	↑	WAKO社がMEMS加速度センサーに関する包括的な特許を取得している。RF-MEMS分野では、OMRON社とアドバンテスト社が高周波用途、半導体自動計測装置用のスイッチを製品化した。中規模の企業では、サンテック社が光ファイバVOAと可変波長光源によるOCTを、MEMS技術を用いて製品化した。最近になって、シャープ社がMEMSディスプレイの製品化に着手した。
米国	基礎研究	△	↘	DARPAの研究支援が一段落しており、基礎研究分野としてのMEMSはプレゼンスが低下しつつある。現在では、MEMS・ナノテクをキーワードとした研究費は非常に獲得しづらく、大学においても産業化を意識した研究にシフトしつつある。
	応用研究・開発	○	→	2000年前後には光ファイバ関連のMEMSスタートアップ企業が50社程度あったが、現在ではほとんど消滅したか、あるいは、有望な技術を持っているスタートアップは大企業に買収された。画像ディスプレイに関してはTI社がビジネスを維持し寡占状態にあり、似たようなデバイスの開発は停滞している。
	産業化	◎	↑	Pixtronix社がTI社のDMDや液晶に代わるシャッター型のMEMSディスプレイを開発し、QUALCOMM社に売却し、同技術をSHARPが導入している。携帯電話用のシリコン・マイクロホン、加速度センサー、シリコン共振子を製品化した。
欧州	基礎研究	△	→	EU-FP7関連予算は5カ国以上の連携研究に重点的に配分されており、一研究機関あたりの外部資金は伸び悩んでいる。ただし、分野・領域・地域で共同利用できる研究施設への投資は進んでおり、MESA+（オランダ）、EPFL（スイス）、LETI（フランス）などでMEMS研究拠点の整備が進んでいる。フランスCNRSのMEMS研究は、東大との国際連携研究によるところが大きい。
	応用研究・開発	○	↑	ドイツにおいてボッシュ社が中心となってMEMSプロセス装置の開発が進められている。フォルクスワーゲン社が自動車部品の規格化を進めており、その中に圧力センサー、加速度センサー等のMEMSセンサーが組み込まれている。フラウンホーファー研究所において、画像ディスプレイ用の光スキャナーをITS用のレーザーレンジファインダーに転用する研究を進めている。
	産業化	◎	↑	携帯電話用の加速度センサー（6軸以上）はSTマイクロ社の寡占状態にある。

中国	基礎研究	△	↗	現状では特に見るところはないが、米国大学で博士号を取得した研究者が中国に帰国して、米国・欧州と国際共同研究を開始するケースが散見される。国際会議論への論文投稿件数が急速に伸びている。MEMS、トランスデューサなどの国際会議の招致件数が多い。
	応用研究・開発	△	→	中国オリジナルのMEMS製品はほとんど無い。
	産業化	◎	↘	MEMS製品の組み立てを中国で実施しているケースが多い。ただし、人件費の高騰により他国に移転するケースや、日本企業が撤収するケースが多い。
韓国	基礎研究	△	→	ソウル国立大学の半導体研究グループがMEMS研究を手がけている。また、テジョンのKAIST、光州科学技術院にもMEMS研究グループがあるが、研究者人口は少ない。MEMS研究者のほとんどは、米国で博士号を取得している。
	応用研究・開発	△	↘	LGエレクトロニクスがディスプレイ応用のMEMS研究を実施していたが、数年前に停止した。サムソン電子がマイクロ流体型の画像ディスプレイを開発しているが、製品化には遠い。
	産業化	×	→	韓国発のMEMS製品開発例はおそらく無い。

（8）引用資料

- 1) 国内研究会 電気学会「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
- 2) 国際会議 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)、毎年開催
- 3) 国際会議 Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems (Transducers)、西暦奇数年開催
- 4) 国際会議 Asia Pacific Conference on Transducers (APCOT)、西暦偶数年開催

3.2.3 フォトニクス

(1) 研究開発領域名

フォトニクス

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

フォトニクスとは、光の発生、制御、検出などに関する物理、それを実現するための材料やデバイスなどの基盤要素技術と、それに立脚した応用分野の研究を包含する研究開発領域である。情報の取得・表示、伝送や処理など、CPS/IoT サービスのさまざまな場面で、今後フォトニクス技術の活用が期待されている。ここでは、特にデータセンターやサーバー等のIT 施設・機器で活かされる情報処理フォトニクス技術を取り上げる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

フォトニクスとは、光の発生、制御、検出などに関する基礎物理・基盤技術とその広範な応用分野を研究開発対象とする技術開発領域である。また、同じ電磁波として、光と電波に共通するコンセプトや物理は多く、電波工学とも密接に関係する技術開発領域である。

図 3.2.3 は、物理や材料、デバイスに関する基盤技術を基礎とした、研究開発領域としてのフォトニクスの広がり、主にその機能に着目して示したものである¹⁾。われわれの生活に大きな恩恵をもたらしている光通信はもちろん、光を用いたセンシングや各種の高精度計測技術、照明・ディスプレイ技術や、太陽電池などの環境エネルギーフォトニクスなども、フォトニクスを形成する重要な研究領域である。また、加工や3D プリンターなどの造形技術、農業生産や医療応用も含めたバイオ技術などにおいても、フォトニクスが広く浸透しつつある。さらに、プロジェクションマッピングなどのエンターテインメントや芸術の分野においても、今後フォトニクス技術がさらに活用されていくものと思われる。また、図 3.2.3 のいくつかの機能領域にまたがる研究展開も活発に進められている。エンジンのレーザー点火や先進運転支援システムに関する各種光技術などを扱う「カーフォトニクス」や、光の量子的性質を活用した通信や計測・加工技術などを含む「量子フォトニクス」などはその例といえる。

これらのフォトニクス技術は、われわれの身の回りで欠かせないものとなっているが、実空間をカバーし発展する将来のIT 社会インフラのさまざまな場面でも、高機能化の実現、新たな可能性の創出に貢献すると期待されている。中でも、CPS/IoT サービスやビッグデータにおいて、情報の処理に関係するサーバーなどのIT 機器との関連が深い領域が情報処理フォトニクスである。

情報処理フォトニクス



図 3. 2. 3 研究開発領域「フォトニクス」のイメージ

スマートフォンなどのモバイル端末の普及、ビッグデータの活用、CPS/IoT の進展や高齢化など社会構成の変化による IT サービスの多様化に伴い、処理すべき情報量は 2030 年には 2 YB（ヨタバイト）（2012 年の 1000 倍）に達すると予想されている²⁾。この膨大な情報量を、消費電力の爆発的増大を抑えつつ、高速かつ省スペースで処理することが求められている。そのためには、エレクトロニクスとフォトニクスが両輪となり、データセンターやサーバーなどの情報処理システムにおける技術革新をけん引することが必要である。「情報処理フォトニクス」は、データセンターやサーバー等の IT 施設・機器・情報処理システムにおける、情報の演算、記憶、伝送、蓄積などの各要素で活かされる光技術を扱う領域であり、2030 年代に向け進展が期待される技術分野の一つと位置づけられている³⁾。中でも、情報の伝送を担う光インターコネクト・光配線技術は、上記課題の解決に直結する重要な研究開発分野である。

光インターコネクト・光配線とシリコンフォトニクス

爆発的に増大する情報量を高速低消費電力で処理するために、CPU 内のメニーコア化やマルチ CPU 化、サーバークラスタ化など、情報処理システムの全ての階層で並列化アーキテクチャーの導入が必要と考えられており、インターコネクトの性能が今後ますます重要となる。その中で、特にサーバーラック間、ボード間、CPU-CPU 間やメモリー／ストレージとロジックを結ぶチップ間の情報伝送において、光インターコネクション・光配線への期待が高まっている。ラック間やボード間通信についてはデータコムとして以前から技術開発が進んできたが、チップ間的高速高密度光配線についても、その必要性が認識され研究開発が加速している。また、将来的にはチップ内配線も視野にいたった野心的取り組みも、基礎研究のレベルで進行している。

ラック間、ボード間の光インターコネクトについては、アクティブ光ケーブルが利用されている。100Gbps クラスの提供も始まり⁴⁾、400Gbps を超える高速・大容量化を目指した研究開発が進んでいる。また、データセンター規模の拡大などを視野に、伝送距離の長距離化も望まれている。高速大容量化に加えて、光モジュール、トランシーバーの小型化・低コスト化・低消費電力化も重要な課題であり、シリコン光導波路を基礎に各種光機能の小型集積化を可能にするシリコンフォトニクス技術の積極的活用が進んでいる。さらに、データセンター間通信に対する需要もますます高まっており、低消費電力大容量な小型光トランシーバーの開発競争が加速している^{5,6)}。ここでもシリコンフォトニクス技術の適用が進みつつある⁶⁾。このように、ボード間より長い距離における光インターコネクトについては、実装技術をはじめとする実用化を強く意識した内容が研究開発の中心となっている。市場導入も急速に進んでおり、米国との開発競争が近く激化することが予想される。

チップ間の光インターコネクトでは、電気信号の劣化を抑制するため CPU の直近で光信号に変換し伝送することが重要であり、それを可能にする光インターポーザ技術の研究開発が注目されている。我が国においては、大型国家プロジェクトのもとで世界最高伝送帯域密度(30Tbps/cm²)を有するシリコン光インターポーザの実現⁷⁾、シリコン光インターポーザにおける 125°Cでの光リンク実証⁸⁾など、顕著な成果が達成されており、世界的な認知度・競争力も高い。この成果は、いわゆるハイブリッド実装で実現されたものであるが、IBM 等が推進するモノリシック実装⁹⁾についても、今後の進展を注視する必要がある。また、ポリマー導波路などのボード上光配線技術も、その材料探索も含めて重要な研究課題である。

欧米やシンガポールでは、シリコンフォトニクス向けファウンドリーサービスが確立されつつあることにも注目したい。プロセスデザインキット（PDK）などの各種ツールの準備も進みつつあり、プラットフォーム化が加速すると思われる。シリコンフォトニクスは、光配線以外にもさまざまな応用の可能性が検討されており、それらの研究開発の加速にも貢献すると思われる。

（４）科学技術的・政策的課題

フォトニクス全般について、我が国は国際的に高い研究レベルを有している。将来にわたりこの優位性を確保するため、主に光インターコネクト・光配線、シリコンフォトニクスに関連し重要と思われる点を述べる。

① 適用可能性の明確化

ボード間より長い距離におけるインターコネクトについては、光技術の利用が浸透しつつあり、市場を意識した取り組みが求められる段階にある。一方で、チップ間については、技術の進展により、光配線のシステム導入の可能性が真剣に議論されるべき段階にきた。電気配線やシステム技術の専門家とともに、多角的視点での比較・議論を通して、その将来像を描き出すことが望まれる。

② 技術力の維持・活用

他国でのシリコンフォトニクスファウンドリーサービスの状況も考慮したうえで、我が国の有する高い作製技術を今後いかに維持・発展させ、有効に活用していくかについて、検討・判断が必要な時期にあると思われる。

③ 次なる技術革新につながる基盤要素技術

光インターコネクト・光配線の研究開発は、全体としては、システム化・産業化を意識した応用研究、実用化のフェーズに移行している。当該分野において、我が国が引き続き高いプレゼンスを示すため、極低消費電力化や超高密度化を可能にするデバイス・回路技術、3次元集積化などの極限実装技術のほか、スイッチング／バッファリング／同期など、光配線の革新的高機能化や新たなアーキテクチャ（チップ内配線も含む）の構築につながる基盤要素技術の研究が継続的に推進することが不可欠である。また、IV族系半導体光源などの挑戦的研究も重要である。なお、これらの基盤要素技術の進展は、光インターコネクト・光配線のみでなく、将来のITインフラのさまざまな部分に革新をもたらすと期待できる。

④ 基盤技術の芽となる基礎研究への継続的支援

フォトニクス全般において、欧米および我が国がけん引している部分が多い。しかし、真に新しい概念などは、残念ながら欧米から発表されることが多いようである。フォトニクスの根幹である光と物質の相互作用に立ち返った基礎研究、新たなフォトニクス材料の探究、光を究極的に制御し利用しようとする試みなど、近視眼的評価にとらわれることなく、自由な発想に基づく基礎研究が行われる（行える）風土の醸成が必要である。これらの基礎研究が基盤要素技術へと展開し、我が国発の新たなフォトニクスの創成につながるはずであると確信する。また、個々の研究支援のみではなく、これら基礎研究を有機的に結びつける体制についても、検討が必要である。

⑤ 若手研究者の育成

フォトニクス全体に共通して、将来を担う人材の育成は極めて重要な課題である。特に情報通信やデバイス技術に関係する若手研究者（学生含む）の数は減少しているように思われる。2014年のノーベル物理学賞はフォトニクスの進展に貢献した日本人研究者が受賞した。また、2015年は国際光年である。このような機会も活用し、産学官がそれぞれの立場でフォトニクスの魅力と重要性を若い世代に示していく必要がある。

(5) 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）

本稿で扱った光インターコネクト・光配線およびシリコンフォトニクスに関連する国内大型プロジェクトとして、最先端研究開発支援プログラム（2013年度終了）、その成果を継承したNEDO「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」がある。また、米国、欧州でも大型プロジェクトが終了・進行中である。最近の動きとしては、米国では製造イノベーション研究所の一つとしてフォトニクス統合製造研究機関（Integrated Photonics Manufacturing Institute）の設立が宣言され、プロジェクト公募が行われた。マッチングファンド形式で2億ドルを超える巨額の投資が予定されている¹⁰⁾。一方、欧州ではシリコンフォトニクスの量産市場化を意識したEPSRCプログラム“Silicon Photonics for Future Systems”が、2013年12月よりサザンプトン大学で始まっている¹¹⁾。ここにはKAIST（韓国）も参画している。中国国内でもプロジェクトが進行中である。また、最近、Mentor Graphicsがシミュレーション環境の統合、シリコンフォトニクス向け次世代PDKの開発を発表¹²⁾しており、注目される。

（6）キーワード

情報処理フォトニクス、光インターコネクト、光配線、シリコンフォトニクス、光インターポーザ、ファウンドリーサービス

（7）国際比較

ここでは、「応用研究・開発」、「産業化」の二つのフェーズについては、本稿で詳しく扱った光インターコネクト・光配線、シリコンフォトニクスに関連する研究開発を対象に、「基礎研究」については、フォトニクス全般の基盤研究（物理・材料・デバイスなど）も対象に含めて、その現状とトレンドをまとめた。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	フォトニクス全般において、高いレベルにある。しかし、新しいアイデア、概念の提案は残念ながら、まだ少ないのが現状のように思われる。2014年のノーベル物理学賞を契機に、自由な発想に基づく基礎研究の重要性が再認識されることを期待。
	応用研究・開発	◎	↑	大型国家プロジェクトに主導される形でここ数年目覚ましい進歩を遂げている。シリコン光インターポーザでは世界トップの成果を達成している。また、小型光トランシーバーなどにおいても、成果が得られている。
	産業化	△	↑	一部の技術については、産業化を目指しての本格的活動がスタートしており、米国との激しい開発競争・市場獲得競争にいかにか勝ち抜くかが課題。標準化などに関する戦略も重要。
米国	基礎研究	◎	→	ファンディングに左右されるところが大きいがおおむね堅調である。おもしろいコンセプトなどの提案も多い。大学での光配線関連デバイス研究も充実。
	応用研究・開発	◎	↑	大型プロジェクトやIntelやIBMなどの企業の研究開発により、大きく進展。最近では、IP-IMIが設立され、産学官をあげた応用研究の確立とその産業展開を強力に推進する動きがみられる。
	産業化	◎	↑	実用化、市場化を意識したMellanoxやCiscoなどによりシリコンフォトニクスベンチャー企業買収が進んでいる。今後の動向に注視が必要。
欧州	基礎研究	◎	↑	米国とは対照的に、地道な基礎研究が行われている印象。量子フォトニクスなども含めて、いくつかの注目すべき成果が見られる。
	応用研究・開発	◎	↑	FP7の枠組みで複数の大型プロジェクトが進行。全般にアクティビティは高い。ザザンプトン大学ではシリコンフォトニクスの量産市場化を意識したEPSRCプロジェクトも始まった。LETIではハイブリッド実装型でのインターポーザ開発も進行中。
	産業化	○	→	米国に比べて、産業化展開での進展はあまり見えていない印象。IMECやCEA-LETIでのファウンドリーサービスの存在は重要であり、今後の動向を注視したい。
中国	基礎研究	○	↑	論文数は出ているが玉石混交。米国・欧州帰りの若手研究者が材料研究関係で頑張っている印象。新規のアイデアの発表はまだ少ない。
	応用研究・開発	○	↑	国家プロジェクトでの研究推進が進められている。日本、欧米に追随する形で独自の研究はまだ少ないように思われる。また集積チップなどの研究開発の成果はまだ見当たらない。
	産業化	×	→	現状では、独自での量産化などの動きは見られない。
韓国	基礎研究	○	→	米国帰りの若手が活躍している印象。新規のアイデアの発表はまだ少ない。シリコンフォトニクス関係でのアクティビティは低いようである。
	応用研究・開発	△	↘	光インターコネクションの研究ではあまり成果が見えてこない。KAISTがザザンプトン大学の受託しているEPSRCに参加。
	産業化	×	↘	目立った動きはない。

シンガポール	基礎研究	○	↑	新規のアイデアの発表は少ないが、米国の著名研究者のもとで学位を取得して帰国した若手が活躍している印象。NTU、Astarが中心。シリコンフォトニクスデバイスなどの研究成果の報告は見られる。
	応用研究・開発	○	→	デバイスレベル、いくつかの要素を組み合わせた光回路などの報告はみられるが、産業化につながるような集積化技術に関する報告は見られない。
	産業化	◎	↑	具体的な製品の量産などはみられないが、IMEのファウンドリーサービスなどで存在感を示している。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
 応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
 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

(8) 引用資料

- 1) 本稿では、紙面の都合などのため、広範な「フォトニクス」のごく一部分にフォーカスしたものである。全般の動向については、光産業技術振興協会が毎年発行する光技術動向調査報告書などが参考となる。
- 2) 光テクノロジーロードマップ報告書 ー情報処理フォトニクスー,光産業技術振興協会, 2012。光配線以外の情報処理フォトニクスについても議論されている。
- 3) 光産業技術振興協会: 2030 年代に向けた光テクノロジーのロードマップ策定に関するプレスリリース <http://www.oitda.or.jp/main/press/rm-j.pdf>
- 4) http://www.japanese.molex.com/molex/products/family?channel=products&chanName=family&key=quattroscale_zqsfp_aoc
- 5) S. Yamanaka et al., “100 Gb/s CFP coherent transceiver enabled by power-optimized DSP”, THPDP1-3, OECC/ACOFT 2014, Melbourne, Australia (2014).
- 6) <http://acacia-inc.com/acacia-advantage/silicon-photonics-integration/>
- 7) Y. Urino et al., “Demonstration of 30-Tbps/cm² Bandwidth Density by Silicon Optical Interposers Fully Integrated with Optical Components”, Mo.4.B.2, ECOC 2013, London, UK (2013).
- 8) Y. Urino et al., “First Demonstration of A thermal Silicon Optical Interposers with Quantum Dot Lasers Operating up to 125 °C”, Tu.1.1.5, ECOC 2014, Cannes, France (2014).
- 9) <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/39641.wss>
- 10) <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2014/10/03/fact-sheet-president-obama-announces-new-manufacturing-innovation-institute>
<http://manufacturing.gov/ip-imi.html>
- 11) <http://sotonfab.co.uk/index.html>
http://www.southampton.ac.uk/mediacentre/news/2014/jan/14_14.shtml
- 12) <http://www.mentor.com/company/news/mentor-lumerical-optical-design>

3.2.4 プリントドエレクトロニクス技術

(1) 研究開発領域名

プリントドエレクトロニクス技術

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

最適な材料を、最適な位置に、最適な量だけ配置する「コーティング+パターンニング」技術の代表例が印刷技術である。この印刷技術を用いてエレクトロニクスを構築する技術が、プリントドエレクトロニクス技術と称され、Si テクノロジーでは作製が困難な大面積、フレキシブルなエレクトロニクスを作製できることから、Si テクノロジーと相補関係にある技術として期待されている。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

プリントドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスは、Si テクノロジーだけでは実現が困難な大面積かつ自由な形状へも電子機能を持たせることができるため、相補の関係の中で、利用されることが期待されている。プリントドエレクトロニクスはその機能のみならず、製造の観点からもさまざまな優れた側面を有する。例えば、現在の Si テクノロジーを支えているフォトリソグラフィ技術は、20nm 以下の微細化を実現しており極めて優れた技術であるが、「材料を削る工程」であるため、材料の消費量が大きい。それに対して、印刷技術は、「アディティブ工程」であり、材料消費量は最低限に抑えられる。我が国は、材料や印刷技術、および印刷装置において世界最先端の技術を保有しており、これを活かしたものづくりは、極めて重要である。

その一方で、エレクトロニクスを作製するとなると、単なる材料の“印刷”だけでなく、電気伝導性や絶縁性など、電気的な性能を確保しなければならない。印刷性と電気的性能の両立は材料やプロセスに大きく依存し、両立することが極めて難しい。このような状況の中で、プリントド技術を用いたさまざまなエレクトロニクス開発が進められている。その代表例が、ディスプレイ、発光素子（LED など）、個体識別タグ（RFID タグ）、センサー、アクチュエーター、太陽電池などがある。ディスプレイ、LED などはすでに印刷技術が多用されており、マーケットを形成している。その一方で、近年では、センサー技術の開発に注目が注がれている。

少子高齢化社会、災害、エネルギー、食料など社会における課題を最適な答えにより解決へと導くことを目的とした「サイバー空間と実空間をシームレスにつなぐ取り組み（Internet of Things (IoT)、または、Cyber-Physical Systems (CPS))」が注目を集め、多種多様で膨大な数の無線、有線のセンサーノードが生活環境へ浸透し始めている。多くの場合、シリコンテクノロジーによるセンサーがこの空間にちりばめられることでセンサーネットワークを形成する。ところが最近では、実空間の大きさに合わせた大きな面を覆う形で、かつ精度の高い情報収集が必要とされ始めている。これを実現する技術として大面積、かつコスト効率の高いセンサーネットワークの構築が不可欠と考えられるようになってきている。特にインターネット技術の普及に伴い、容易に情報を得ることができる様になり、その情報をインターネットで共有し、データマイニング、モデリングを通して、実世界をより快適に、

より最適化された空間へと導くためのフィードバックまでを可能にし、ハードウェアとソフトウェアの両面から研究開発が進められている。日々の生活が多様化している中、人々の生活の中で活躍しているエレクトロニクスも多様化し、実空間の情報を的確に獲得するためのインターフェースとしてアンビエント（環境）エレクトロニクスが盛んに開発されている。現代社会を支えるシリコンテクノロジーはフォトリソグラフィ技術による微細化に伴って「高度集積化、超消費電力化、高速動作化」を実現し、猛烈な進化を遂げてきた。その一方で、生活スタイルが多様化した昨今では、これらの高性能化とは異なる性能指標、すなわち「軽い、丈夫、人々に使いやすい」、など新たな性能指標が生まれ、人々の生活に浸透し始めている。このようなシリコンテクノロジーを補完する新しい技術が“プリントドエレクトロニクス技術”、“フレキシブルエレクトロニクス技術”である。

シリコンテクノロジーを補完する特徴とは、一体何であろうか？プリントドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスを実現する技術の一つとして注目されている有機トランジスタを例に挙げるが、有機半導体以外の分子性電子材料にもほとんど共通する。すなわち、①プラスチック基材上に低温プロセスで製造できるため、軽量性・曲げやすさ、耐衝撃性、大面積性（大面積基材への製造の容易さ）を有する。②印刷プロセスによって、低環境負荷でかつ高スループットに製造できる。この特長を活かした新しい技術領域がまさにプリントドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクス、と呼ばれており、新たな応用分野の発展への期待も高まりを見せている。

では、シリコンテクノロジーを補完する特徴を活用すると、どのようなアプリケーションが実現できるのか？印刷で実現する大面積性や有機物の柔らかさを活かして、どのように機械を人にとって使い易くできるのか？分子性電子材料を使って、どのように地球環境と調和するエレクトロニクスを実現するのか？今、これらの問いに対する解を求めるための研究活動が世界中で競争となっている。

ウェアラブルエレクトロニクス

プリントドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスの出口の大本命として研究をされてきたのが、ディスプレイ、個体識別素子（RFID タグ）、そして太陽電池であろう。シリコンテクノロジーが苦手とする大面積性が重要であり、かつ面積あたりのコスト効率が高いデバイスであるため、盛んな研究が行われてきた。

ところが最近では、その大面積性や柔らかさを活かす新しい応用例が注目され始めている。その代表例が、身に着けるエレクトロニクス、すなわちウェアラブルエレクトロニクスが、特に 2014 年に入り注目を集めている。ウェアラブルエレクトロニクスはより身近に生体信号や動作を獲得するためのデバイス総称として使われており、Google Glass やインテル Mimo がその代表例であろう。これらはあらゆるヒトを対象としており、いわゆる Population health（公衆衛生）を目的としているため、適応範囲が極めて広い。少子高齢化という社会背景のみならず、来る 2020 年東京オリンピックに向けてヒトを高い確度で計測するためのウェアラブルエレクトロニクスへの期待は高まっている。

ヒトを正確に計測するためには、よりヒトに近い位置にセンサーを取り付けることが求められる。また硬いセンサーを柔らかい体表に付けると、硬さの違いから違和感が生じるため、柔らかいセンサーが好ましい。エレクトロニクスを柔らかいプラスチックフィルムやゴムと

いった機械的特性に優れた基材に作製する研究開発は、国内のみならず世界各国で精力的に進められており、フレキシブルエレクトロニクス、ストレッチャブルエレクトロニクスと総称されている¹⁾⁻¹³⁾。エレクトロニクスにおいて最も重要な「フレキシブル半導体層」の代表例として、 InGaAs/InAlAs ¹⁴⁾、単結晶シリコンナノ薄膜¹⁵⁾、金属酸化物 IGZO ¹⁶⁾、 MoS_2 ¹⁷⁾、グラフェン¹⁸⁾、ナノチューブ、アモルファスシリコン¹⁹⁾、有機半導体^{4),5),8),10)}などが用いられている。この技術を用いて、フレキシブルディスプレイ、フレキシブルセンサー、フレキシブル個体識別（RFID）タグへの応用が検討されており、市販され始めたものもある。このようなフレキシブル、ストレッチャブルエレクトロニクス技術は、生体計測用のウェアラブルエレクトロニクス技術へも応用展開され始めている。

印刷技術の産業応用

大きな面積、複雑な形状でも低コストでデバイスを作製するための印刷技術が注目されており、エレクトロニクスから医療の分野に至るまで幅広くその技術が広がり始めている。印刷技術は、必要な材料を、必要な場所に、必要量のみ塗布することができることから、低環境負荷・低エネルギープロセスである。従来の半導体製造装置などと比べても装置コストが比較的安価であることから容易に導入することができるため、その波及効果が極めて大きい。プリンテッド技術を用いた産業界の新たな取り組みを以下の通りまとめた。

プリンテッドエレクトロニクス

大面積プラスチック基材の上に、トランジスタ素子のような高精度のパターニングを要する素子をいかにして高スループットで製造するか？インクジェットなど印刷プロセスをエレクトロニクスの製造に応用することを目指したプリンテッドエレクトロニクスに近年大きな期待が寄せられている。

印刷とは、コーティングとパターニングを同時に行う技術であり、材料効率が極めて高い。一方、シリコンテクノロジーを中心とする現在のエレクトロニクスを支えているフォトリソグラフィ技術は、ナノレベルまでの微細化を実現する一方で、削るプロセスであるため、材料効率が良くない。そのため、資源に乏しい我が国において、持続可能な産業構造への改革を推し進める上で、プリンテッドエレクトロニクスの技術は、極めて重要である。

印刷で作製するプリンテッドエレクトロニクスは、（1）大面積に作製しても低コストであること、（2）フォトリソグラフィと整合性の良くない分子性ナノ材料のパターニングを行うことができること、（3）インクジェットのようなデジタルファブリケーションを使った新しい製造手法であること、という大きな特徴を有している。これら既存のエレクトロニクス作製で多用されるサブトラクト工法の代表格であるフォトリソグラフィプロセスとは全く異なり、アディティブ工法であるため、材料効率、生産効率が極めてよい。さらに、印刷技術では、インク材料から、印刷版、印刷装置までの整合性が必要であり、いずれにおいても我が国が最先端の技術を持っている。

有機材料はバラエティーに富み、さまざまな官能基や修飾を施すことで、多様な性質を示すだけでなく、溶剤に溶かし、インクやペーストとして印刷することが容易である。このためプリンテッドエレクトロニクスを実現する上で有機材料は欠かすことはできない。リソグラフィ技術に頼ることで微細化の一途をたどり成長してきたシリコンテクノロジーとは異

なり、印刷技術が得意とする数十ミクロンから数ミクロンまでのパターンニングで、低コストに大面積にエレクトロニクスを作製することを目標としている。大面積エレクトロニクスの代表はディスプレイと太陽電池であろう。実際、昔のディスプレイは奥行きのある大きな電化機器であったが、薄くなることで、大型化（大面積化）に成功してきた。最近では、薄膜化にとどまらず、フレキシブル、ローラブルといった機械的な柔軟性を目指し新たな研究開発が進められている。

プリンテッドエレクトロニクスは、インク材料、インクの基材への転写、乾燥、溶剤を含む材料同士の界面制御など、これまでのデバイス作製プロセスにはなかった新たな挑戦がある。国内では NEDO プロジェクトにおいて「次世代プリンテッドエレクトロニクス（JAPER）」を中心に精力的な研究が進められている。

フレキシブルエレクトロニクス

印刷により大面積製造する際に求められるのが、信頼性である。エレクトロニクスが大きくなると信頼性が損なわれることは容易に想像できる。このような大面積エレクトロニクス、プリンテッドエレクトロニクスをプラスチック基材に製造することによって、軽量・薄型性、落下時の耐衝撃性を改善できる。例えば、フレキシブルなディスプレイは、プラスチックシートを持ち運ぶ感覚で容易に携帯することができ、場所によらず情報を得るツールとして期待できる。家庭用テレビは大面積化が進んでいるが、今後さらに大きくなれば、玄関を通ることが困難になったり、エレベーターに乗せることが困難になることも容易に想像できる。もし、大面積ディスプレイであっても、フレキシブルであれば丸めて持ち運ぶことができ無理なく運搬、設置することができる。このような魅力に動機付けられ、企業を中心にフレキシブルディスプレイの実用化に向けて、活発な研究が行われている。

表示素子として有機 EL や電気泳動素子などが知られており、プラスチックフィルム上に作製された薄膜トランジスタ駆動回路で制御することでディスプレイながら柔軟性を兼ね備えることができる。これまでに、精細度、発光輝度などの観点から優れたフレキシブルディスプレイや電子ペーパーが数多く報告されている。例えば、リコー（株）ではオール印刷プロセスで作製した 200 ppi の高精細ディスプレイを報告しているほか、大日本印刷（株）ではカラー・フレキシブル有機 EL ディスプレイ、凸版印刷（株）では電気泳動型の大型高精細フレキシブルディスプレイを実現している。

フレキシブルディスプレイを駆動するフレキシブルバックプレーンには、金属酸化物半導体（In-Ga-Zn-O : IGZO）トランジスタ、薄膜 Si トランジスタ、有機半導体トランジスタが用いられてきたが、2014 年に開催されたディスプレイ最大の国際会議 Society for Information Display: Display Week においては、フレキシブルディスプレイ関連の成果報告の内、実に 60%が IGZO を用いたトランジスタに関するものであった。また駆動方式においては、アクティブマトリクス型有機 LED ディスプレイ（AMOLED）が 60%、電子ペーパーが 25%、アクティブマトリクス型液晶ディスプレイが 5%と、次世代フレキシブルディスプレイの研究としては、AMOLED が圧倒的に研究されていることが分かる。フレキシブルディスプレイの開発動向を国別で見ると、日本は 31.4%、アメリカと台湾が 22.9%、その後、中国、韓国、オランダ、ベルギーと続き、この分野では日本の存在感が際立っている。

フレキシブルディスプレイのバックプレーンとして多用され始めている金属酸化物半導体

IGZO は通常はスパッタにより成膜されているが、近年では塗布型による IGZO 成膜も始まっており、プリンタブルエレクトロニクスとの整合性についても検討が進んでいる。

フレキシブル RFID タグ、センサー、特にウェアラブルエレクトロニクス

フレキシブルディスプレイのみならず、フレキシブル個体識別素子（RFID）やフレキシブルセンサー、アクチュエーターに関する研究が進んでいる。フレキシブルディスプレイと並んで応用が期待されているのが RFID（Radio Frequency Identification）タグ、すなわち電波により個体識別する微小チップである。Si をベースとした RFID タグは非常によく知られており、さまざまな物流に利用されることで、近年トレーサビリティにおいて重要な役割を果たしている。最近では、プラスチックや紙などフレキシブル基材上に RFID タグを製作することで、さらに多くの用途へ活躍の場を広げつつある。材料、プロセス技術、回路技術などあらゆる側面から研究開発が行われ、実用化に向けて飛躍的に高性能化している。近い将来は、バーコードに置き換わる技術として期待されている。

フレキシブル太陽電池

ディスプレイ、センサー、RFID と並び、プリントドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスの大きな柱の一つは太陽電池である。色素増感型太陽電池で 11.9%（シャープ）、バルクヘテロ型有機太陽電池で 10.7%（三菱化学）のエネルギー変換効率が報告される中で、近年大きな注目を集めているのが鉛ペロブスカイト型太陽電池であり、初めての報告から短期間で効率が改善され、現在では 17.9%が報告されている。寿命やコストの観点から閉塞感があったフレキシブル太陽電池においては大きなブレイクスルーといえる。

印刷技術による生体造形、3D プリンターの活用

必要な材料を必要な箇所に必要量だけ対置できるという「印刷技術のオンデマンド性」は、医療の現場で大きな注目を集めている。代表的な例は、手術前に X 線 CT や MRI により患部、内臓部の形状データを取り出し、3D プリンターにより造形することで質の高い手術を提供する取り組みである。骨、臓器、血管に至る微小な形状も再現できるため、医療の現場で大きな反響を呼んでいる。単なる形状のみならず、異種材料を配置できることから臓器の硬さなども制御できる「生体質感造形」なども取り組まれている。今後は、フレキシブル電子デバイスと組み合わせることにより電氣的な生体信号を模倣する取り組みなどが検討されている。

また、デジタルデータから造形することで、鋳型を必要としたさまざまなものづくりが根本的に変化する。経済産業省は 2020 年時点での経済波及効果は約 21.8 兆円と予想している。製品が人に合わせるのではなく、人に合わせたものづくりが行われる中で、あらゆる製品が少量多品種化する傾向にあるため、3D プリンターの活用は医療や産業のみならず、あらゆる場で見いだされていくとみられる。

（4）科学技術的・政策的課題

< 科学技術的課題 >

材料の信頼性・安定性の向上

プリントドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスの実用化に向けての最大の課題は、材料の信頼性と安定性と考えられている。主要材料として使用されている有機材料はファンデルワールス力による弱い結合で形成されているため機械的な柔軟性を有するが、電気的な特性を考慮した場合には電気的特性の不安定性、イオンなどの不純物の効果など、課題が多い。しかしながら、近年の材料技術の進展によって、機械的柔軟性と電気的特性、安定性を兼ね備えた材料も開発されており、大気による劣化がほとんど問題にならないレベルまで低減されつつある。材料の本質的な安定性に加えて、酸素や水など外因的要因も無視できない。

プリントドエレクトロニクスの実用化を考えればさらに今後は、溶解性の高い半導体材料においても、より高い電気特性、信頼性、安定性が期待されている。一方で、これらの有機半導体材料の性能や安定性は、トランジスタ構造にしたとき絶縁膜や電極の組み合わせによっても異なってくる。すなわち、絶縁膜/半導体/電極との界面制御などより高度な材料間のすりあわせを進めてより高い安定性を実現する必要がある。

また、単なる保管時の安定性だけでなく、通電時の安定性、曲げたときの信頼性、動作温度の向上、静電放電対策などの信頼性試験など、実用化に向けたより高度な信頼性、耐久性試験が行われる必要がある。さらに、フレキシブルデバイスの場合、プラスチックフィルム上に作製しているため、機械的に折り曲げることが可能であるが、曲げとともに各層間には大きな歪がかかる。電気的特性のみならず各層の密着性が、フレキシブルデバイスの信頼性を決める重要な要素となるであろう。

要素技術開発からプロセスの高度化とすり合わせへ

プリントドエレクトロニクスにおけるプロセスについては、既にオール印刷で 200 ppi のアクティブマトリックスが試作されるなど、要素技術はかなりのレベルにまで到達していると言える。今後は要素技術開発からプロセスの高度化とすり合わせへの開発にシフトしていくであろう。

例えば、印刷で高精細化を進める一方で、タクトタイム、均一性、良品率、位置合わせ精度などのすべての所望の性能を同時に達成する必要がある。また、高機能デバイスを作製するためには、薄い膜や厚い層を効率よく使い分ける必要があるが、一種類の印刷プロセスで実現するのは極めて困難である。そこで、将来的には、一種類の印刷プロセスではなく、複数の印刷プロセスが使われることになるであろう。異なる印刷プロセスで、どのように品質をそろえていくかが重要となる。

また、印刷技術とロールツーロールプロセスとの融合は重要である。最近では、ロールツーロールのスクリーン印刷が、フレキシブル基材やディスプレイ用の配線に使用されており、量産ラインで 100 μm 以下の解像度が実現されている。今後、配線などの受動素子だけではなく、薄膜トランジスタのような能動素子もロールツーロール印刷プロセスで製造する技術の開発を目指して、世界中で競争となっている。

プリントドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクスを実用化する上でのもう一つの課題が、SiLSI との接続である。大面積を覆うセンサー、柔軟かいセンサーなどはインターフェースであり、それだけではサイバー空間（外部）との情報通信ができない。その

ため、プリントドセンサーやフレキシブルセンサーには SiLSI テクノロジーにより作製された情報処理回路（CPU）、無線通信回路を接続する必要がある。電圧などの電気的な接続はもとより、柔らかいセンサーと硬い SiLSI をどのように安定して接続するかなど、機械的な接続においても、すなわち実装技術でも大きな課題を抱えている。実際に、折り曲げ時のトランジスタなどアクティブ素子における信頼性試験は、これまでの Si テクノロジーで培われてきた知識だけでは網羅できず新しい学術領域とも言える。

その困難な一例をウェアラブルエレクトロニクスの開発で垣間見ることができる。人が身につけるエレクトロニクスは極力存在感、装着感を無くしたいため、フレキシブルセンサーは理想的な形であると言える。その一方で、人が常時身につけるため、絶えず動き、振動、熱、発汗に伴う湿度変化、そして外部に衝突したときの衝撃が加わる可能性があり、その信頼性試験が行われている。この際には、上述したとおり、柔らかい部分と硬い部分の接続部に大きな負荷がかかり、信頼性を低下させる要因となる。今後、産学官が連携した取り組みが必要である。

<政策的課題>

経済産業省の調べによると、我が国の 3D プリンターの累計出荷台数はわずか 3%と、アメリカや欧米諸国と比べて大きく出遅れている。この理由として、繊細な製造ノウハウが生かせる装置になっていない、高価な材料を輸入しなければならない、メンテナンスに長時間かかる等が挙げられている。アメリカ、ドイツ、中国では産学官が連携して、国の重要技術と位置づけて研究開発がなされている。我が国においても、装置の技術力、材料の技術力を結集した国を挙げての取り組みが必要であると言える。

医療機器における訴訟（PL 法訴訟）は、フレキシブル技術、プリントド技術を医療機器へ実装していく際に意識しなければならない点になる。国内ではフレキシブルエレクトロニクスやプリントドエレクトロニクスをウェアラブルエレクトロニクスへ応用する研究が精力的に進められている。目下、生体に貼り付けたときの信頼性試験を行っているフェーズである。その一方で、体内埋め込み型の研究は、欧米で精力的に進められているが、国内では大学や国の研究機関に限られており、産業界での取り組みは目立っていない。これは PL 法訴訟を懸念することに起因すると考えられている。国内の医療機器に関する PL 訴訟に関しては、一般社団法人 電子情報技術産業協会（JEITA）

医療機器分野へ参入のための医療機器への電子部品供給ガイド(2014年3月出版)より

（主査：梶田 栄 氏（株）村田製作所）に詳しく取りまとめられている。フレキシブルエレクトロニクスやプリントドエレクトロニクスを体内埋め込み型のエレクトロニクスへと展開していくためには、法律の整備も含めて取り組んでいく必要があると指摘されている。

（5）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）

3D プリンターを用いた個別化医療に関しては医学において新たな知見と新技術をもたらしている。国内では新たなイノベーションを創出する大型プロジェクトとして JST /Center of Innovation (COI) が進められており、ウェアラブルエレクトロニクスを用いた生体計測に着目したプロジェクトが東京大学、大阪大学、名古屋大学などで進められている。大阪大学では柔らかいエレクトロニクスを用いて日本人を元気にするという目標に次世代の生体イ

ンターフェースの開発が進められている。JST/ERATO 染谷生体調和プロジェクトにおいては、有機トランジスタ技術を用いたフレキシブル有機エレクトロニクスセンサの開発が進められており、次世代のウェアラブルエレクトロニクスを目指した取り組みが注目を集めている。2014 年度に発足した次世代脳研究プロジェクト「革新脳」プロジェクトにおいてもフレキシブルセンサーにより高度な社会性を持つ霊長類の脳活動を計測するプロジェクトが発足している。

国内におけるプリントドエレクトロニクス開発では、NEDO の次世代プリントドエレクトロニクス研究組合（JAPER）が中心と精力的な研究開発が進められている。

（6）キーワード

プリントドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクス、3D プリンティング、ウェアラブルエレクトロニクス

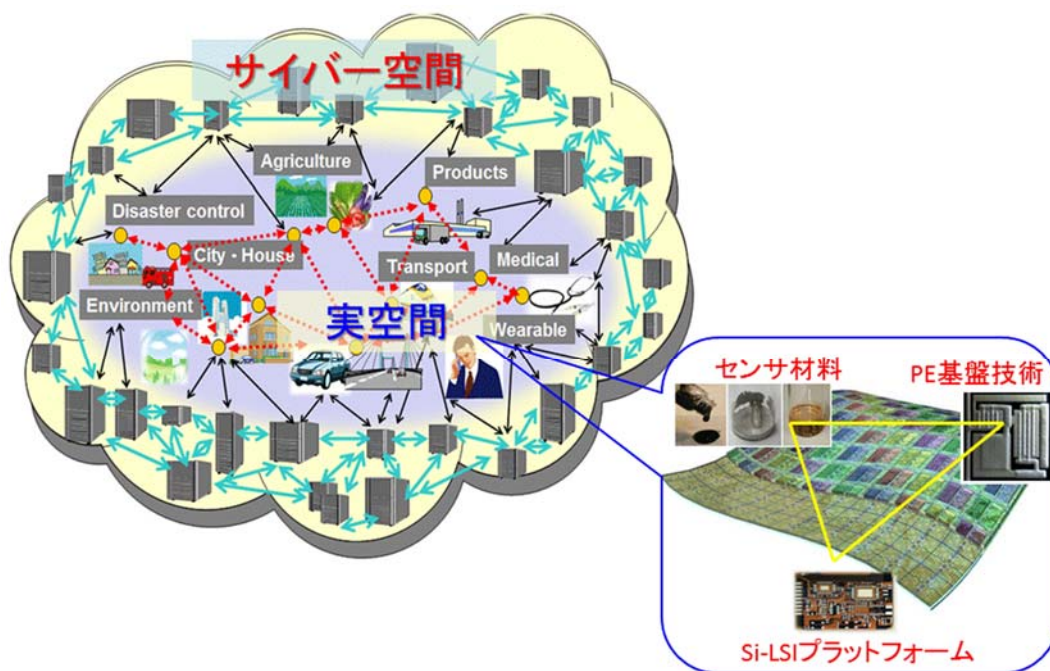


図 3.2.4 IoT (CPS) で活躍するプリントドエレクトロニクスの概念図

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	印刷解像度や生産性、耐久性においても印刷技術では世界を圧倒する技術があると言える。さらに有機材料やナノ材料開発がけん引する形で高機能インク、フレキシブル材料など最先端のエレクトロニクス材料が開発されており、世界に誇る材料群を形成している。
	応用研究・開発	◎	↑	材料にけん引されて、優れたプリントエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクス技術および材料の高機能化、デバイスの高性能化に関する研究が進められている
	産業化	◎	↑	大面積センサー、ウェアラブルエレクトロニクス、RFIDタグ、ディスプレイ、LED照明など応用研究から産業化への流れが進んでおり、その技術力は世界トップレベルにあるといえる。
米国	基礎研究	○	↑	印刷技術、インク開発能力においては日本が勝るが、日本の技術力を導入する形で今後大きく伸びていく可能性がある。
	応用研究・開発	◎	↑	DARPAなどの大型プロジェクトがけん引する形で、生体・医療に関連する極めて大規模な研究が進められている
	産業化	◎	↑	応用研究・開発と一体となり、産業化が進められている。
欧州	基礎研究	○	↑	フレキシブル材料、伸縮材料やその構造などの研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	フレキシブルではないが、ウェアラブルセンサーにおいてはベルギーのimecやオランダのHolstセンターがけん引役となり、優れた生体計測技術を提供している。
	産業化	◎	↑	応用研究・開発と一体となり、産業化が進められている。
中国	基礎研究	△	→	目立った活動は報告されていない
	応用研究・開発	△	↑	目立った活動は報告されていないが、重要なフィールドであることから、関連する国際会議などを積極的に誘致しており、今後大きな展開が見込まれる。
	産業化	△	↑	ディスプレイやスマートフォンの技術を背景に、量産技術や製品展開力には十分な力があるものと考えられる。
韓国	基礎研究	△	→	
	応用研究・開発	○	↑	フレキシブルディスプレイを中心に、積極的な研究開発が行われている。
	産業化	○	↑	ディスプレイテクノロジーの次の出口として精力的に産業化が検討されていることから、量産技術・製品展開にも注力している。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
 応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
 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

（8）引用資料

- 1) H. Gleskova et al., Appl. Phys. Lett. 75, 3011 (1999).
- 2) T. Sekitani et al., Appl. Phys. Lett., 86, 073511 (2005).
- 3) T. Sekitani et al., Appl. Phys. Lett., 87, 173502 (2005).
- 4) T. Kodaira et al., Journal of the Society of Informatin Displays 16, 107 (2008).
- 5) K. Nomura et al., Nature 432, 488 (2004).
- 6) T. Takenobu, et al., Appl. Phys. Express 2, 025005 (2009).
- 7) F. Nihey, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 41, L1049 (2002).
- 8) S.-H. Hur et al., Appl. Phys. Lett., 86, 243502 (2005).
- 9) H. Gleskova et al., J. Appl. Phys., 92, 6224 (2002).
- 10) L. Han et al., Appl. Phys. Lett. 96, 042111 (2010).
- 11) A. Jedaa and M. Halik, Appl. Phys. Lett. 95, 103309 (2009).
- 12) Y. Watanabe and K. Kudo, Appl. Phys. Lett. 87, 223505 (2005).
- 13) Y. Kato et al., Appl. Phys. Lett., 84, 3789 (2004).
- 14) T. Sekitani, et al. Nature Materials, 9, 1015 (2010).
- 15) K. Ishida, et al., IEEE Journal of Solid State Circuits, 45, 249 (2010).
- 16) K. Ishida, IEEE Journal of Solid State Circuits, 46, 285 (2011).
- 17) Y. Zhou, et al., Nano Letter, 4, 2031 (2004).
- 18) L. Han et al., Appl. Phys. Lett., 94, 162105 (2009).
- 19) M. Takamiya et al., IEEE J. Solid-State Circuits 42, 93 (2007).

3.2.5 極超低電力 IT 基盤技術

(1) 研究開発領域名

極超低電力 IT 基盤技術

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

極超低電力 IT 基盤技術は、エネルギー効率の極めて高い極超低消費電力回路・システムを実現するための統合的 IT 基盤技術である。エネルギー効率の追究には、デバイスから回路・システム、さらにソフトウェアとサービスまで含めた広範な技術の連携が求められ、アプリケーションを具体的に見据えた研究開発が重要になる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ムーアの法則の減速に伴い、研究開発の主な領域は、デバイスの微細化とそれに伴う課題の解決から、さらに回路とシステムが連携しエネルギー効率を追究する新時代に入った。エネルギー効率の高い回路・システムの研究開発なくして、これまでのように 10 年後に IT の性能が 100 倍に改善されることは望めない。以下では、回路設計、システム設計、見据えるべきアプリケーション領域、高効率回路、高効率システム、プロセス・デバイスと回路・システムの連携について、最重要課題と研究動向を述べる。

回路設計の最重要課題

回路設計の最重要課題は以下の 5 点である。

- ① 低エネルギー・低遅延のデータ転送技術：
データ転送は演算に比べて桁大きなエネルギーを消費するため優先順位が高い。
- ② ロジックと SRAM の極低電圧動作と電源回路：
エネルギー消費を最小とする電源電圧は素子特性の揺らぎやばらつきで決まる。この下限電圧をさらに下げるための回路上の工夫が求められる。特に SRAM は低電圧動作が難しい。ロジックも大規模になるほど低電圧化が困難になる。一方、効率の高い電源変換回路があれば、アナログやインターフェースの回路も効率改善できる。したがって電源回路の研究も重要である。
- ③ 素子特性の揺らぎやばらつきを考慮した回路設計手法：
揺らぎやばらつきの原因を探り削減することが求められる一方で、例えば統計確率を用いて無駄な設計マージンを削るなどの新しい設計手法も求められる。設計自動化 (EDA) やデバイス・プロセス技術との連携も重要である。
- ④ クロック分配やフリップフロップなどの低エネルギー同期設計技術：
同期のための電力が総電力に占める割合は少ない。クロック分配およびフリップフロップの高効率化は重要な研究課題である。
- ⑤ 異種技術 3 次元集積設計技術：
パッケージ内にシステムを集積することで、データの転送効率を高めエネルギー効率を改善できる。ロジック、メモリー、アナログ、センサー、発電素子などのチップを積層集積する技術の研究開発が課題である。

システム設計の最重要課題

システム設計の最重要課題は以下の3点である。

- ① エネルギー効率の高いネットワーク・オン・チップ：
従来のバス接続ではエネルギー効率が低い。効率の高いネットワーク・オン・チップの研究が重要課題である。
- ② エネルギー効率の高いメモリーシステム：
メモリーのアクセスは演算よりも桁大きなエネルギーを消費する。メモリーアクセスをできるだけ低減するシステムが求められる。
- ③ 無駄のない制御方式：
例外処理のためにエネルギーを無駄にしていることが多い。目標性能を処理速度からエネルギー効率に変えたときの制御方式の見直しが必要である。

今後関心が高まるアプリケーション領域

今後の研究開発で見据えるべきアプリケーション領域は以下の5点である。

- ① 医療・ヘルスケア：
日本は先進国の中で最も早く少子高齢化社会を迎える。
- ② グリーンエネルギー：
日本のエネルギー政策見直しに伴い検討が急務である。
- ③ 異種技術集積：
センサー端末など、実世界とのインターフェースで求められる。
- ④ サイバーフィジカルシステム：
ビッグデータ取得のためのセンサネットワーク。
- ⑤ スマート社会システム：
高度情報化社会のインフラストラクチャーになる。

高効率回路の研究動向

高効率回路の研究において、日本は世界をリードしてきた。

1995年から2005年にかけて、産業界が中心となり、電源の遮断・導通やトランジスタのしきい値電圧を制御する回路技術の研究開発が世界に先駆けて行われた。

2005年から2012年にかけては、学術基盤の構築を目指して、JSTのCREST研究領域「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」において、回路の電源電圧をトランジスタのしきい値近傍にまで下げる研究や磁界結合を用いて3次元集積する研究が行われた¹⁾。

実用化と産業育成を目指して、2009年から2012年にかけては、NEDOの「極低電力回路・システム技術開発（グリーンITプロジェクト）」において、極低電圧で問題となる素子特性の揺らぎやばらつきを解明しそれを考慮した設計技術の研究が行われた²⁾。ばらつき要因の物理的理解とばらつきを考慮した設計の知見が得られ、0.5 Vで動作するプロセッサやメモリー、電源回路が開発された。

2010年には超低電圧デバイス技術研究組合（LEAP）が設立されて、「低炭素社会を

実現する超低電圧デバイスプロジェクト」において、電源電圧 0.4 V 以下で動作し電源を遮断しても情報が失われないデバイスとプラットフォーム化の研究が行われた³⁾。

また、2008 年から 2014 年にかけては、JST の CREST 研究領域「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」において、極低電圧でも環境ノイズの中で確実に動作するフリップフロップの開発や、素子がたまたま誤動作することを認めながらもシステムの信頼性を保障するディペンダビリティの研究が行われている⁴⁾。

一方、3 次元集積の研究においては、シリコン貫通電極 TSV の研究開発に日本は早くから着手した⁵⁾。TSV を代用する回路技術として、誘導結合を用いた低エネルギーなデータ転送技術の研究でも大きな成果が得られた¹⁾。

高効率システムの研究動向

高効率システムの研究においてはアメリカが世界をリードしてきた。エネルギー効率を飛躍的に高める電子工学を創出するための基礎科学の研究が産学連携で複数の研究領域にわたり展開されている⁶⁾。「Center for Energy Efficient Electronics Science (E3S)」では、IT のエネルギー消費を数桁低減する新しい科学技術の創出を目的に、アメリカ NSF の研究資金で、カリフォルニア大学バークレー校、スタンフォード大学、マサチューセッツ工科大学などの主要大学と、IBM や Intel、HP などの産業界が連携した研究活動を 2010 年から行っている。

日本では、2007 年から 2009 年にかけて、NEDO の「メニーコア・プロセッサ技術（グリーン IT プロジェクト）の先導研究」において、メニーコア・プロセッサ基幹技術の先導研究と次世代オンチップ・ネットワーク方式の先導研究が行われた⁷⁾。

また、2011 年から 2015 年にかけて、不揮発性素子を用いた低消費電力システムの実現のための基盤技術の確立を目指して、NEDO の「ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発」において、アーキテクチャー、ソフトウェア技術、システム化技術の一体研究が行われている⁸⁾。

プロセス・デバイスと回路・システムの連携

日本の材料物性工学やデバイス工学は世界の最先端レベルにある。例えば、カーボンベース・デバイスやトンネル FET、3 次元集積技術などは、CMOS の極低電力化の限界を超える技術として高く評価されている。しかし継続的な微細化の努力で指数関数的な性能改善を期待できる時代は終わった。新型デバイスの特性を引き出す回路とシステムの技術力が求められる。これまで以上に、プロセス・デバイスと回路・システムの連携が重要である。アメリカやヨーロッパではそのような連携が強化されている。

2013 年に始まった JST の CREST 研究領域「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」⁹⁾は、まさにこの連携を重視した研究プロジェクトである。情報デバイスの超低消費電力化や多機能化の実現に向けた素材技術・デバイス技術・ナノシステム最適化技術等の融合による革新的基盤技術の創成を目指している。

（４）科学技術的・政策的課題

極低電圧回路設計の研究において日本は世界をリードしてきたが、高効率システムの研究

においてはアメリカが世界をリードしているのが現状である。学術領域間の連携、産学の連携はますます重要になる。アメリカでは、エネルギー効率を飛躍的に高めるエレクトロニクスを創出するための基礎科学的研究が産学連携で複数の研究領域に渡り展開されており⁶⁾、日本も知を結集し、科学技術力・産業競争力の強化を図るべきである。

日本のカーボンベース・デバイスやトンネル FET、3次元集積技術などは、現在の CMOS の極低電力化の限界を超える技術として高く評価されており、世界の最先端レベルにある。そのような最先端技術を有するプロセス・デバイスの研究と回路・システムの研究の強力な連携を加速させ、新型デバイスの特性を最大限に引き出せるような回路・システム技術力の強化が求められる。すでに、アメリカやヨーロッパではそのような連携の強化が始まっており、日本の科学技術や産業競争力の低下を食い止めるためにも重要な科学的・政策的課題である。

（5）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）

脳型コンピューターを IBM が発表した¹⁰⁾¹¹⁾。54 億トランジスタを使って非同期の神経回路網を集積している。Deep Learning などの機械学習の技術進歩と相まって、新たな潮流となっている。ヒトの脳は、15W の消費電力で 60PFLOPS の演算性能と言われる。一演算あたりのエネルギー消費は 0.3fJ である。一方、今日のプロセッサの演算あたりのエネルギー消費は 0.3nJ 程度で、ヒトの脳よりも 6 桁効率が悪い。ヒトの脳は約 220 億個の神経細胞を集積しているが、IC の集積度がこれを超えることは確実である。1 個の神経細胞の消費電力は 0.7nW 程度だが、1 個のトランジスタの消費電力も 1nW 程度でそれ程変わらない。つまり素子の使い方が違うことになる。脳波を調べると、周波数成分は 1~100Hz で信号電圧は数 0.1mV である。IC のクロック周波数(1GHz)や電源電圧(1V)より格段に遅くて低い。もし電源電圧を 1V から 1mV に下げることができれば、エネルギー消費は 6 桁低くなる。非常に遅い周波数で動作して高度な情報処理ができる新しい計算機原理（非フォンノイマン型）の研究に関心が集まるのはこのためである。

（6）キーワード

エネルギー高効率、極低電力、More than Moore、3次元集積、人工知能

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↓	<ul style="list-style-type: none"> 90年代から低電力技術は日本の基礎研究が世界をリードしてきた。 CREST研究領域「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」で電力を1/1000に低減する先導研究が行われた¹⁾。 NEDO「極低電力回路・システム技術開発（グリーンITプロジェクト）」で実用的な0.5 V回路技術が研究開発された²⁾。 LEAP「低炭素社会を実現する超低電圧デバイスプロジェクト」で0.4 Vデバイス・回路技術が研究開発されている³⁾。 CREST研究領域「ディペンダブルVLSIシステムの基盤技術」でフリップフロップの誤動作に対する対策などが先導研究されている⁴⁾。 NEDO「立体構造新機能集積回路（ドリームチップ）技術開発」でTSVを用いた3次元積層技術が研究開発された⁵⁾。 NEDO「ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発」で待機時電力ゼロのコンピューターを目指した研究が行われている⁷⁾。 産業力の低下から基礎研究力も低下し始めている。
	応用研究・開発	○	↓	<ul style="list-style-type: none"> 低電力が求められる携帯機器分野は日本市場が世界のリーダーである。 製品競争力の低下から応用研究にも陰りがみられる。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 高い品質や使い勝手の良い機能では高い国際競争力を有するが、新製品の提案力や国際標準を作る力は欧米より弱い。ヒット商品が出ない。 円高による経営環境の悪化や国際競争力の低下には歯止めがかかった。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 企業も大学も研究者の層が厚く高い研究水準を維持している。 活躍する若手研究者が継続的に現れている。 Center for Energy Efficient Electronics Science（E3S）で産学連携して基礎研究が行われている⁶⁾。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> システムではAppleやGoogleが、携帯用プロセッサやデジタル信号処理ではQualcommやBroadcomが世界をリードしている。 世界中から優秀な頭脳が競争力の高い会社に集合している。 開発費の増大に伴いFPGA（XilinxやAltera）の市場が広がり、プロトタイプ品がそのまま最終製品に使われる場合が増えている。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> スマートフォンや携帯端末など、システム力と併せてVLSIの開発力が非常に高い。世界への発信力が力強い。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> IMECの存在感が高まっている。医療・ヘルスケア・スマート社会など、応用を見据えた基礎研究および上位概念での研究が強い。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> EU経済圏で技術開発連携も進んでいるが、世界をリードするレベルにはない。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ARMコアは携帯機器の組み込みプロセッサの世界標準になった。 車載用半導体以外は特筆すべきものが少ない。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 中国本土は発展途上。教育の成果が現れるのには時間がかかる。 台湾は製造からシステムに転換し、医療・ヘルスケアの分野に注力。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 米国帰りの技術者が原動力になり、メディアテックなど台湾の技術レベルは高いが、研究開発力はやや陰りが見え出した。

	産業化	◎	↑	・パソコンや通信用LSI、LCDを中心に競争力がある。特に最先端から少し遅れた分野で強みを発揮している。
韓国	基礎研究	○	→	・企業も大学も研究者の層が薄い。
	応用研究・開発	○	→	・携帯電話に注力し、プロセッサ技術が蓄積されている。 ・サムスンやKAISTが活発だが、少し陰りが見えだした。
	産業化	◎	→	・海外戦略が明確である。発展途上国への進出・市場開拓に積極的である。 ・産業成長力に陰りが見えだした。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
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

(8) 引用資料

- 1) CREST 研究領域「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」：
<http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/ryoikiarchive/ulp/intro/index.html>
- 2) NEDO「極低電力回路・システム技術開発（グリーン IT プロジェクト）」：
http://www.nedo.go.jp/activities/EF_00130.html
- 3) 経済産業省「低炭素社会を実現する超低電圧デバイスプロジェクト」：
<http://www.leap.or.jp/index.html>
- 4) CREST 研究領域「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」：
<http://www.dvlsi.jst.go.jp/>
- 5) NEDO「立体構造新機能集積回路（ドリームチップ）技術開発」：
http://www.nedo.go.jp/activities/EF_00385.html
- 6) Center for Energy Efficient Electronics Science：
<http://www.e3s-center.org/>
- 7) NEDO「メニーコア・プロセッサ技術（グリーン IT プロジェクト）の先導研究」：
http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201012/20100000001819.html
- 8) NEDO「ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発」：
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100016.html
- 9) CREST 研究領域「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」：
http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-2.html
- 10) Paul A. Merolla *et al.* “A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface,” *Science* 8 August 2014: Vol. 345 no. 6197 pp. 668-673.
- 11) Robert F. Service, “The brain chip,” *Science* 8 August 2014: Vol. 345 no. 6197 pp. 614-616.

3.2.6 量子コンピューティングデバイス

(1) 研究開発領域名

量子コンピューティングデバイス

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

量子コンピューティングデバイスとは、“量子力学的な効果を用いて行う複雑な計算”（量子コンピューティング）を実現するデバイスである。量子コンピューターは、現在のスーパーコンピューターが数千年もかかって解く問題を、数秒かつ超低消費電力で計算できるようになると期待されている。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

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

最近では、量子コンピューティングを実現する装置として、量子ゲート方式（個々の量子ビットに対するゲート操作によって成り立つ方式）の量子コンピューターに加えて、量子イジングマシン方式の（量子現象を利用した）最適化装置も含めるようになった。よって本稿ではそれらを合わせて、量子コンピューティングの観点から俯瞰する。

量子コンピューターの分類

現時点で、量子コンピューティングを実現できるデバイスと総称される形態は大きく3種類に分類される。

① 量子ゲート方式の量子コンピューター

量子ビットを用意し、プログラムに沿って量子ビットにユニタリ演算や測定を施す事により解を求める計算機である。素因数分解等が超高効率で実行できるコンピューターで、量子力学的重ね合わせやエンタングルメントに基づく量子並列性によって既存の計算機での不可能の一部を可能にする装置である。ただし、素因数分解でハイパフォーマンスコンピューター（HPC）の進化を上回るためには 10^7 個以上の量子ビットを有する量子コンピューターが必要とされる。

集積化可能な量子ビットの候補として、超伝導のジョセフソン接合を用いる巨視的量子状態を利用するもの（以下、超伝導量子ビット）と、半導体中の電子スピンを利用するもの（以下、スピン量子ビット）が有力視されている。

世界初の超伝導量子ビットは、1999年に当時 NEC の蔡・中村らによって実現され、その後、我が国では NEC・理研、NTT、海外では Delft 工科大（蘭）、ETH（瑞）、サックレー研（仏）、Yale 大、NIST、UC Berkeley、UC Santa Barbara（米）などがしのぎを削りながら発展を続けてきた。当初は、量子情報が保持できる時間（コヒーレンス

時間）が短く、1回の演算に対するデコヒーレンス（量子情報の損失）も深刻であったが、現在はコヒーレンス時間が 100μ 秒まで伸び、1回の演算に要する時間が数 $10n$ 秒とすると、コヒーレンス時間内に1000回を上回る演算ができるまでに至った。しかし、既存の HPC を凌駕するためには 10^7 個以上の量子ビットを用いた計算が必要なため、各々の量子ビットの情報は少なくとも1時間といった長さで正確に保つことが望まれる。そこで導入されるのが誤り訂正で、ここでは多数の量子ビットの集合体を実効的に1つの量子ビットとして定義し（以下、実効量子ビット）、そこで誤り訂正アルゴリズムを実行し続けて1つの実効量子ビットの量子情報を保つ。すなわち、量子メモリーでは量子情報を保持するために誤り訂正という量子演算を継続的に実行する必要がある。この量子メモリーの実現に向けて注目されているのが、表面コードと呼ばれる手法¹⁾で、量子ビットを2次元に配置し、最近接量子ビット同士（2量子ビット）の演算と測定に基づき情報を保つ。そこで集積化技術を用いてシリコン基板上に超伝導量子ビットを2次元に配置し、大規模量子コンピューターを開発する事業を米 Google 社が UC Santa Barbara の Martinis の協力を得て開始した²⁾。現状では1つの実効量子ビットを構成するために100個以上の量子ビット集合体が必要とされる。これを 10^7 個用意するのであるから気が遠くなるように映るが、100万個以上のトランジスタが集積された現在の集積回路を得る道のりと同じと考えればよい。

世界初の半導体スピン量子ビットは、1996年に当時 NTT の樽茶らによって実現され、その後、我が国では NTT、東大、東工大、理研、海外では Delft 工科大（蘭）、ETH（瑞）、Copenhagen 大（丁）、Oxford 大（英）、Harvard 大、MIT、Princeton 大、Wisconsin 大（米）、New South Wales 大（豪）などがしのぎを削りながら発展させてきた。四半世紀前には、半導体中で1個の電子を初期化し、操作（演算）し、読み出すことは夢物語であったが、半導体微細加工技術の進歩と半導体物性への理解の深化が共鳴して、化合物半導体をテストベッドとした単一電子スピンの閉じ込め・初期化方法の開発、読み出し手法の確立、複数量子ビットの結合といった夢物語が次々と実現されていた。しかし、化合物半導体は、核スピンをもつ安定同位体のみで構成されるため、電子スピンのコヒーレンス時間が核スピンの揺らぎにより短くなってしまいう問題が顕在化した。そこで母体核スピンの割合が化合物半導体の100%に対して、わずか4.7%であり、微細加工技術も進んでいるシリコンが着目され、New South Wales 大の Morello と Dzurak らがシリコン中でリンドナーに束縛された1つの電子スピンを量子ビットとして初期化、演算、読み出しを実施することに2012年に成功した³⁾。ただし、この量子ビットはコヒーレンス時間が $55n$ 秒と短く、0と1の間を往復するべきラビ振動も0.3と0.6程度の間を行き来するという実用化には全く耐えない状況であった。この結果、単一スピン量子ビットがシリコン表面から数 $10nm$ に配置されると、表面酸化膜に起因するスピン欠陥や、表面の電極（金属）に起因するデコヒーレンスが避けられなく使い物にならないという悲観論が主流となった。この状況を覆したのが、慶應義塾大が作製した4.7%の ^{29}Si 核スピンをほぼ完全に除去したシリコンウエハーを用いた実験で、New South Wales 大が前出と同じリンドナー量子ビットを作製したところ、1ミリ秒ものコヒーレンス時間と、0と1の間のほぼ完全なるラビ振動が得られた⁴⁾。さらに、化合物半導体によって確立された指針に基づき、微細加工によるゲート電極のみでシリコン上に量子ド

ットを作製したところ、 ^{29}Si が除去されたウエハーによって単一電子スピンビットのコヒーレンス 1 ミリ秒以上と量子演算精度 99%以上が得られた⁵⁾。さらにゲート電圧操作に工夫を加える事で、微細加工により形成された導波路から生じるマイクロ波による量子演算に対して、共鳴（演算）するしないをそれぞれの量子ビットで自在にスイッチできることが示された。この成果により ^{29}Si 核スピンが除去されたウエハーに作製されるシリコン量子ビットが一気に注目され、これらを微細加工技術により 2 次元に高集積化して表面コードによる量子計算を開発する機運が一気に高まっている。シリコンを用いても量子情報保持時間が十分に長い 1 つの実効量子ビットを構成するためには 100 個以上の量子ビットが必要となるであろう。これを 10^7 個用意するという事は、現在のシリコンチップの 100 万個トランジスタよりさらに千倍の量子ビットを集積化することになる。しかしシリコン量子コンピューターは現在のワンチップほど小さくする必要がないので、面積を千倍（正方形の一边を 30 倍）にすれば現在の集積回路と同じ程度の集積化となる。

動作温度は、超伝導、半導体スピンともに 1K（ケルビン）以下と低い。しかし、既存のコンピューターの不可能を可能にするというスーパーな HPC という観点から低温動作は問題にならない。むしろ、対象とする問題の難しさと規格化すれば既存の HPC よりはるかに低い電力での動作が期待されている。超伝導量子ビットの利点は作製と読み出しが容易なことであり、シリコンスピン量子ビットの利点はコヒーレンス時間が十分に長いために個々の演算精度があがり実効量子ビットを形成するための量子ビット数が少なくすむ可能性があることである。

② 量子アニーリング装置

量子効果を制御して最適化したい問題の目的関数の最小値を探す装置である。量子コンピューティングが威力を発揮すると期待される問題群のなかで離散的最適化問題のみが解ける装置である。2 次元に量子ビットを配置し、すべての量子ビットの間の相互作用を切り、その上で個々の量子ビットを 0 と 1 の重ね合わせ状態に設定し、次に最近接量子ビット間の相互作用を断熱的に徐々に強めていく。このとき、相互作用をどの量子ビット間でどこまで強めるか（強めないか）がプログラミングに相当し、あとはスピン間の相互作用に任せてスピンが最低のエネルギー状態に落ち込むのを待つだけである。最適化の標準的手法であるシミュレーテッドアニーリングでは、系全体を高温からゆっくりと冷やしながらかき揺らぎを利用して基底状態への到達を目指す。量子アニーリングでは系全体を可能な限り低温に保つことで熱揺らぎを抑え、そこに量子揺らぎを与えることでトンネル効果を利用して基底状態に落ちるのを待つ。スピングラスとして知られる多数スピン間の相互作用を利用する本手法は物理用語のイジングモデルで記述できることから、その有用性が期待されている。量子アニーリングは東工大の門脇と西森が発案し⁶⁾、それを MIT の Lloyd らが断熱量子計算という用語で発表してから広く知られるようになった。通常、量子ビットで 2 値を表すためには一方が基底状態でもう一方が励起状態になってしまう。すなわち励起状態の場合でもそれを保たなければならないという点に困難が生じ、位相の保持という量子特有の状況も相まって、実効ビットの情報を

維持するために量子誤り訂正による大規模な量子操作が必要となる。量子アニーリングは基底状態に落ち込むのを待つという点において自然に逆らわないのがよい。しかし、位相を保つコヒーレンスは別問題で、コヒーレンスが失われると量子アニーリングは効果を発揮しない。

近年、量子アニーリングに世界中の注目が集まっているのは、カナダの D-Wave 社が量子アニーリング装置を開発し販売を開始したからだ⁷⁾。 ついに市販の量子コンピューターが登場したということで、一部科学者がその性能をテストしたところ、最新の 512 ビット装置では量子性による増速が確認できないという結論を導き、それに対して D-Wave 社が強く反論をする状態が続いている。焦点は 512 ビットまで増やした D-Wave 量子アニーリング装置においても量子ビット間のコヒーレンスが基底状態に緩和するまで保たれているか? である。現在、D-Wave 社の量子アニーリング装置は超伝導量子ビットの 2 次元アレイで構成されているが、シリコン中のスピン量子ビットの長いコヒーレンスを利用した方がよいという見方もある。一方、正常に動作する量子ビット作製のスループットの高さや読み出しの簡便さに関しては超伝導量子ビットに分があるという見方がある。

③ コヒーレントイジング装置

既存のデジタルコヒーレント通信技術を発展させ、組み合わせ最適問題を超高効率で解く手法である⁸⁾。光を用いるため高速で、室温で動作し、頂点数 2 万の完全グラフ問題を解くために、現代の精度保証付きのコンピューターで 20 日間かかるような問題を、1 ミリ秒で近似解が得られるとされる最適化装置である。2 万パルスのレーザーが 2 万頂点数と 1 対 1 の対応となり、レーザーのコヒーレンスをフルに活用するという点において量子コンピューターに分類されるが、実際にはエンタングルメントといった量子性は使わない点において現在の古典的レーザー技術をフル活用できるのが長所である。

(4) 科学技術的・政策的課題

① 基礎研究

固体中でたった 1 個の電子スピン、核スピン、フォトン、フォノンが量子力学的に扱えるようになった現在、この量子ビットを用いた応用をシームレスに開発するプログラムが必要である。1 つまたは少数個の量子ビットの活用となれば、現在のセンサーの不可能を可能にする量子センシングが最も現実的かつ魅力的な課題である。量子センサーは磁場、温度、歪みなどを比類なき精度と感度で測定できる可能性を有するコンセプトであり、黎明期である今こそ我が国が科学政策的に推進すべき分野である。並行して、中規模の量子アニーリングおよびコヒーレントイジング装置の開発を支援すべきであろう。その必要性の根拠は後述のとおりであるが、最適化を目的とするからには、古典的なシミュレーテッドアニーリングを中心とした最適化問題全体の開発を理論・実験の両面で支援することも望まれる。一方、 10^7 量子ビットの集積化を目指す量子コンピューティングデバイス研究は極めて長期的な課題であるため、表面コードで 1 実効量子ビットの情報に 1 時間程度以上保つことができるか? といった確認を経て、その後の投資を判断するのがよい。

② 産業化

ムーアの法則に頼るシリコンチップの高性能化が曲がり角にさしかかり、また、最新のチップはすべて海外に外注生産という状況を鑑みると、我が国は新しい発想に基づく素子のデザインと知財化に注力すべきフェーズを迎えている。量子アニーリングというコンセプトが日本で発明され、米国の研究者がそれに少しだけひねりを利かせて広めることに成功し、そこに価値を見いだしたカナダの D-wave 社がやはり日本で発明された超伝導量子ビット、磁束量子パラメトロンといった手法を組み合わせることで製品化に成功した過程を解析する事が重要であろう。1980年代に電子立国として君臨した日本は、米国で発明されたトランジスタ、酸化膜、プレーナー型接合、集積回路技術を引き継ぎ、高度な製造技術で向上させた一方、時には人まねと非難された歴史がある。量子アニーリング装置の要素技術の多くは日本の発明ということで大きく前進したが、製品化は北米が先じた。コヒーレントイジング装置も我が国の発明であるだけに、これからが産学共同の腕の見せ所である。いずれにせよ高度な基礎科学的成果をどのように組み合わせるかがイノベーションである。よって世界初の製品化を一途の目標として高度な基礎科学的成果を理解し、組み合わせることができる人材の育成が急務である。世界に通用する工学博士の育成とあってよいであろう。そのような人材育成は、我が国の大学で実行するものと、一人でも多くの日本人を世界に飛び立たせる 2 本立てで実行すべきであり、そのような政策の企画・実行が期待される。

（5）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）

量子アニーリング装置はカナダの D-wave 社が製品化に成功し販売している⁷⁾。米国の Google 社も超伝導量子ビットを用いた量子コンピューター開発を発表した²⁾。米国 IBM も超伝導量子ビットを用いた量子コンピューター開発を進めている。

基礎研究分野においては英国が quantum technologies に関して 460 億円の巨大プロジェクトを 2014 年に開始し⁹⁾、オランダ、ドイツ、デンマークにおいても数十億円レベルの支援が行われている。

（6）キーワード

ハイパフォーマンスコンピューティングデバイス、量子コンピューティングデバイス、最適化、グラフ問題

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・CREST研究領域「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」で我が国の量子情報基礎研究が総合的に立ち上がった。 ・最先端研究開発支援プログラム(FIRST)「量子情報処理プロジェクト」で我が国の基礎研究が世界のトップを走るようになった。 ・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」の一部で量子最適化装置の開発が開始している。
	応用研究・開発	○	↓	<ul style="list-style-type: none"> ・産業力の低下から企業における基礎研究が不振である。特に製品開発に結びつける力が低下している。
	産業化	×	↓	<ul style="list-style-type: none"> ・製品開発が行われていない。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・研究者の層が厚く、さまざまな基礎研究へ支援策が講じられている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・GoogleやIBMといった主要企業が量子コンピューターの開発に取り組んでいる。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・D-Wave社が世界に先駆けて量子コンピューターの生産・販売を行っている。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・英国、オランダ、ドイツ、デンマークなどで基礎研究に対する多額の支援が行われている。
	応用研究・開発	×	↓	<ul style="list-style-type: none"> ・企業による研究開発が見受けられない。
	産業化	×	↓	<ul style="list-style-type: none"> ・製品開発が行われていない。
豪州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・New South Wales大学がシリコン量子コンピューター研究で世界をリードしている。
	応用研究・開発	×	↓	<ul style="list-style-type: none"> ・企業による研究開発が見受けられない。
	産業化	×	↓	<ul style="list-style-type: none"> ・製品開発が行われていない。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・米国・欧州で学んだ研究者を活発にリクルートし、基礎研究の裾野を広げている。
	応用研究・開発	×	↓	<ul style="list-style-type: none"> ・企業による研究開発が見受けられない。
	産業化	×	↓	<ul style="list-style-type: none"> ・製品開発が行われていない。

（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

（8）引用資料

- 1) G. Fowler, M. Mariantoni, J. M. Martinis, and A. N. Cleland: Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation, *Physical Review A* 86, 032324 (2012).
- 2) Google 社ホームページ : <https://plus.google.com/+QuantumAILab/posts>
- 3) J. J. Pla, K. Y. Tan, J. P. Dehollain, W. H. Lim, J. J. L. Morton, D. N. Jamieson, A. S. Dzurak and A. Morello: A single-atom electron spin qubit in silicon, *Nature* 489, 541 (2012).
- 4) J. T. Muhonen, J. P. Dehollain, A. Laucht, F. E. Hudson, R. Karla, T. Sekiguchi, K. M. Itoh, D. N. Jamieson, J. C. McCallum, A. S. Dzurak and A. Morello: Storing quantum information for 30 seconds in a nanoelectronic device, *Nature Nanotechnology* 9, 986 (2014).
- 5) M. Veldhorst, J. C. C. Hwang, C. H. Yang, A. W. Leenstra, B. de Ronde, J. P. Dehollain, J. T. Muhonen, F. E. Hudson, K. M. Itoh, A. Morello and A. S. Dzurak: An addressable quantum dot qubit with fault-tolerant control fidelity, *Nature Nanotechnology* 9, 981 (2014).
- 6) T. Kadowaki and H. Nishimori : Quantum annealing in the transverse Ising model, *Physical Review E* 58, 5355 (1998).
- 7) D-wave 社ホームページ : <http://www.dwavesys.com>
- 8) K. Takata, S. Utsunomiya, and Y. Yamamoto : Transient time of an Ising machine based on injection-locked laser network, *New Journal of Physics* 14, 013052 (2012).
- 9) 英国 EPSRC のホームページ : <http://www.epsrc.ac.uk/research/ourportfolio/themes/quantumtech/>

3.2.7 メモリーとストレージ

(1) 研究開発領域名

メモリーとストレージ

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

小型・高速・高信頼性・低電力の利点からスマートフォンやパソコン、サーバーなどの記憶装置（ストレージ）のみならずエンタープライズストレージでも使われるようになってきているフラッシュメモリーを用いたソリッド・ステート・ドライブ（SSD）と SSD を使いこなすための周辺技術について説明する。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ビッグデータの活用には実世界の膨大な情報をセンサーを通じてリアルタイムに収集、即座に解析・検索を行うストレージが必要になる。ストレージがハードディスクドライブ（HDD）からソリッドステートドライブ（SSD）になることで、リアルタイムのデータ処理の実現が期待されるが、現在のデータベースは HDD に対して最適化されており、高速な SSD を活かし切れていない。今後は不揮発性メモリー（フラッシュメモリーやストレージ・クラス・メモリー）の特徴に合わせ、データベースのアプリケーションソフトウェアやストレージエンジンなどのミドルウェア、OS、メモリーコントローラと言った多様な階層が密接に連携し、全体で最適な性能を実現することが必要になる。すなわち、データのサイズ、属性、書き換え頻度など、ストレージに対するデータのアクセスパターンがアプリケーションによって大きく異なるため、アプリケーションに応じた、ミドルウェア、OS、およびメモリーコントローラのメモリー制御アルゴリズムの最適化が重要になる¹⁾。

SSD で必要とされる高信頼性や小さい書き込み単位（ランダムライト）での高速動作を実現するため、フラッシュメモリーデバイスの研究に加え、メモリーの不良を系統的に救済する誤り訂正符号技術、フラッシュメモリーを制御するコントローラ技術、OS の最適化、などのシステム技術の重要性が増している。また、現在のコンピューターシステムでは、DRAM（メインメモリー）とストレージ（HDD・SSD）の間に大きな性能のギャップがあり、システム全体の性能を決めるボトルネックとなっている。性能ギャップを埋めるために、DRAM に近い性能をもちつつストレージに近い大容量を実現する SCM（ストレージクラスメモリー）を使った新しいメモリーアーキテクチャーが必要となっている。SCM としては ReRAM、PRAM、MRAM などがある²⁾が、従来のストレージクラスメモリーデバイスの研究に加えて、誤り訂正技術や、フラッシュメモリーとのハイブリッドメモリーシステムなど、ソフトウェアやシステムの研究も必要になっている。ビッグデータを収集するセンサーでは、バッテリーレスなどの超低電力動作を実現する、低電力なマイコンに混載できる不揮発性メモリーが求められている。

ストレージの高信頼化に関しては、複数のサーバーの間・複数の SSD の間・各 SSD 内といった、各層で独立した高信頼技術が用いられている。各階層が独立に RAID、ECC、リダンダンシーといった高信頼性技術を用いているために、機能が重複し性能やコスト面で非効率であるのに加え、十分に高い信頼性を確保できていない。今後はメモリーセルの位置や蓄えるデータの内容によってエラーの確率が異なるといった、フラッシュメモリーの不良の特

徴を把握した上で、各層を一元管理する統合ストレージシステムが必要になる。

新しい不揮発性メモリーの有力な用途として、ビッグデータを格納するストレージに加えて、データを収集するセンサーネットワークの端末側に使われるメモリーがある。IoT（Internet of Things）と言われるように、道路、橋、トンネル、鉄道、ビルなどの社会インフラの老朽化診断や農林水産業の最適制御、気象モニターなど社会の至る所にセンサーが配置されデータの取得が行われる。現在のクラウドシステムでは端末で取得したデータをセンターのサーバーに転送するケースが多いが、データ量の増大とともに、データをサーバーに転送するネットワークの負荷が増大している。その結果、アクセス時間や電力が増大する。今後は端末側でも溢れかえるデータを取捨選択する分散処理型のネットワーク（エッジヘビーアーキテクチャー、フォグコンピューティング、エッジコンピューティング等）が進むと考えられる。現在でも監視カメラで取得している画像データの全てが必ずしもセンターに送られるわけではなく、一定時間後に端末でデータが捨てられる場合もある。こうした分散コンピューティングに適したストレージ技術が必要になる。

IoT用途ではインフラの寿命（10年以上）に匹敵する長時間に端末がメンテナンスフリーであることが求められる。すなわち、メモリーに関しても携帯電話やPCなどの情報端末に比べて極めて長い信頼性が求められる。また、端末のバッテリーの持続時間が長いほどメンテナンスコストが下がることから、メモリーにも極めて低い電力が必要とされる。センターのストレージほど大容量が必要とされないこと、スタンバイ電流が削減できることから低電力、高速、大容量な不揮発性メモリーとしてMRAM、ReRAM、PRAMなどの新しい不揮発性メモリーの実用化が必要とされる。こうしたセンサーネットワーク端末ではメモリー単体だけでなく、小容量のメモリーとロジックが混載されるマイクロコントローラ（マイコン）の形でメモリーが使用されることが多い。MRAM、ReRAM、PRAMなどはCMOSを試作した後の製造のバックエンドで作成でき、CMOSロジックプロセスとの親和性が高い。すなわち、新メモリーはIoTのロジック混載デバイスとして使えるメリットがある。IoTにおいて長時間のバッテリー保持、電池フリーを実現するには、既に実用化の段階に入ったエネルギーハーベスト技術を用いて発電することが想定される。例えば端末の周辺に存在する環境電波を用いて発電する場合は得られる電力は数10 μ W程度であり、メモリーには μ Wクラスの低電力動作が必要とされる。MRAM、ReRAM、PRAMなどの不揮発性メモリーの書き換え電力は100 μ W以上であり、材料・デバイス・回路技術を駆使した極限までの低電力化が望まれる。

以上のようなストレージやセンサー端末で使われるフラッシュメモリー、ストレージ・クラス・メモリーの研究は材料探索からシステムまで幅広い領域で研究が行われている。従来は、ReRAM、PCRAM、MRAMなどの物性・材料やデバイスの研究が日本・米国・韓国を中心に行われていたが、メモリーの潜在力を活かし実用化するためには、物性、材料、デバイス研究のみならず、SCMの特長を生かすためのメモリーアーキテクチャーやOSなどのシステム技術の革新が重要になってきている。

（4）科学技術的・政策的課題

データセンターで使われるストレージデバイスは汎用的なデバイスというよりは、アプリケーションの特性に合わせて多様な構成になる。例えばチケットの購入や金融取引など、頻

繁にデータを更新し、リアルタイムの応答が必要とされるトランザクション処理を実行するリレーショナルデータベースのストレージでは、高速でリアルタイム性に優れたストレージが必要とされる。一方、ソーシャルネットワークサービス（SNS）でユーザーが画像を格納する場合は、データ量は大きい更新頻度は低く、より低コストなストレージが必要とされる。更に、10年、100年といった、超長期にデータを高信頼に保管する安価なアーカイブメモリーも必要になる³⁾。このように用途によってストレージへの要求が多様になることから、メモリー自体の開発に加えて、メモリーの組み合わせ方（アーキテクチャー）やメモリーを制御するソフトウェア（ファイルシステムやメモリーコントローラ）のアルゴリズムもアプリケーションに合わせて最適化する必要がある。

すなわち、データセンターのストレージは多様な構成となることに伴い、アプリケーションソフトウェア、ファイルシステム（OS）も各アプリケーション、ストレージの構成に最適化したものが必要になる。また、従来のDRAMにデータを格納する高速なインメモリーデータベースは記憶媒体としてDRAMを使用するために扱えるデータサイズに制約があり、大きな電力を消費する。またDRAMは揮発性メモリーのために電源遮断時にはデータを失うという問題がある。高速な不揮発性メモリーであるストレージ・クラス・メモリーとフラッシュメモリーで構成するストレージの出現により、データ量の制約がほぼなくなり、リアルタイム性を持った新しいアプリケーションが切り拓かれると期待される。すなわち、自動車の無人自動運転、動画をやり取りするソーシャルネットワークサービス、台風や竜巻など気象災害の予測、廃棄物・欠品ゼロの食品流通システムなど、高速でリアルタイム性に優れたビッグデータのサービス実現をもたらすと期待される。

このように日本が強みを持つ、自動車や社会インフラ事業の競争力を高めるためにも、高速で高信頼なストレージ、データ処理基盤が必要になる。この分野ではメモリーメーカー（Micron）やマイクロプロセッサメーカー（IntelやQualcomm）、ITシステム・ソフトウェアのIBM、Microsoft、Google、Amazon.com、Oracle、Appleなどの企業や米国西海岸の大学・ベンチャー企業など、米国で研究開発が盛んになってきている。また、当該分野の国際会議では、韓国の大学や企業（Samsung、Hynix）からの論文も急増しており、日本としても産官学をあげて強化すべき分野である。

（5）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）

ビッグデータやIoTのアプリケーションでは、データの量が膨大なものになり、データがDRAMからストレージにあふれ、従来のインメモリーデータベースでは対応できない。また、同時多発的に膨大な端末（クライアント）から同時にストレージアクセスされる。このように膨大なデータを膨大な端末から同時にアクセスする時には、従来のフォンノイマン型のコンピューターでは対応できなくなる。すなわち、ストレージのデータにアクセスする時間でシステム全体の性能が決まるため、CPUの高速化やマルチコア化では対応できない。メモリーやストレージのアクセスのボトルネック（フォンノイマンボトルネック）を解消、超並列に演算する新しいコンピューター・アーキテクチャーの研究が米国や韓国を中心に盛んになってきている。IBM社の提唱するData Centric Model⁴⁾、HP社が提唱するThe Machine⁵⁾のように、フラッシュメモリーやストレージ・クラス・メモリーを使い、メモリーのアクセスの高速化を狙った新しいコンピューター、ストレージの研究が盛んになっている。

研究対象はメモリーデバイス、データベースソフトウェア、OS（ファイルシステム）、ストレージシステムと多岐にわたるため、各分野に強みを持つ産学が連携したプロジェクトが行われるようになってきている。HP社は「30年ぶりのコンピュータ・アーキテクチャーの変革」と提唱しているように、クラウドITシステムの次の時代のビッグデータ、IoTのデファクトスタンダードとなる、新メモリーを活用した情報処理システムの研究の取り組みが盛んになってきている。

（6）キーワード

SSD、ストレージ・クラス・メモリー、IoT、データセントリック、フラッシュメモリー、ReRAM、PRAM、MRAM

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	MRAM、ReRAM、PRAMなどの主に材料の研究には強いものの、新メモリーを使ったストレージシステムやメモリー制御ソフトの研究の層が薄い。
	応用研究・開発	○	→	3ビット以上のデータを蓄える超多値化や3次元メモリーなど、メモリーの開発では先行しているものの、ストレージシステムの開発では遅れている。
	産業化	◎	→	東芝のフラッシュメモリーは市場シェアは33%で世界2位だが今後成長が見込めるストレージでは存在感は薄い。SSD販売に注力しており、今後の挽回が期待される。
米国	基礎研究	◎	↑	メモリーデバイスからストレージシステム、OS（ファイルシステム）まで、全ての研究領域において研究が盛んである。
	応用研究・開発	◎	↑	応用研究や開発もメモリーデバイスからストレージシステム、OS（ファイルシステム）まで、全ての研究領域において強力である。
	産業化	◎	↑	Intel、Micronの合弁会社IM Flashはフラッシュメモリーの市場シェアは17%と横ばい（世界第3位）。ストレージやデータベースではEMC、オラクル、HP、IBMなど世界で最も強力。
欧州	基礎研究	○	→	IMECを中心にメモリーデバイスの基礎研究を盛んに行っている。
	応用研究・開発	△	↘	事業化という意味では成果が顕在化していない。
	産業化	×	↘	半導体メーカーはメモリー事業から撤退し、ロジック混載メモリーが残るのみ。ストレージに関しても存在感は無い。
中国	基礎研究	○	↑	台湾工業技術研究院(ITRI)で新不揮発性メモリーの研究アクティビティが上がっている。
	応用研究・開発	○	↑	台湾ではメモリーの自社開発力は弱いものの、外国企業からファンドリへのメモリーの技術移転が行われており、技術水準が上がっている。
	産業化	○	↑	台湾のファンドリ（TSMC、UMC）ではMRAMやReRAMなどの不揮発性メモリーを混載したロジックプロセスが開発されてきており、実用化に近づいている。また台湾のフラッシュメモリーコントローラーの開発も盛んである。
韓国	基礎研究	◎	↑	すべての種類のメモリーデバイスに対して多方面からアプローチしている。メモリーシステムやOS、メモリー制御ソフトの研究も盛んになってきており、学会で多くの発表が行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	特筆すべき技術ブレークスルーは無いが、メモリーの微細化レースや3次元メモリーの開発でトップ集団につける。
	産業化	◎	↑	SamsungとHynixの市場シェアをあわせると、DRAM、フラッシュメモリーとともに世界の半数を占めトップ。ストレージではまだ存在感は無い。

（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

（8）引用資料

半導体メモリーおよびストレージの総論に関しては以下の文献を参考とした。

- 1) 半導体ストレージ 2014, 日経 BP 社
- 2) ITRS ロードマップ, <http://www.itrs.net/home.html>
- 3) JST CRDS 戦略プロポーザル「デジタルデータの長期安定保存のための新規メモリ・システムの開発」 <http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2012/SP/CRDS-FY2012-SP-07.pdf>
- 4) Data Centric Systems: A new paradigm for computing,
<http://ibmresearchnews.blogspot.jp/2014/11/data-centric-systems-new-paradigm-for.html>
The Machine: A new kind on computer,
<http://www.hpl.hp.com/research/systems-research/themachine/>

3.2.8 アクチュエーター

(1) 研究開発領域名

アクチュエーター（特に情報制御されたパワーエレクトロニクスデバイスに特化）

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

本格的な電気の時代に、情報通信と密接に関係付けられたパワーエレクトロニクスのキーデバイスであるパワー半導体デバイスと関連する技術は、21世紀の主要課題であるエネルギー融通、省エネルギー化、ネガワット、さらにサイバーフィジカルシステム、制御と電力およびアクチュエーションを関連付ける制御技術とパワー半導体デバイス技術、さらにデバイス関連材料技術にわたる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

21世紀は情報と電力によるアクチュエーションが融合する高度電力化の時代である。LEDや携帯機器のディスプレイ、CPUへの電力供給から工場の大型モータやロボットの駆動および制御、風力発電、電力潮流制御などさまざまな電気電子機器やシステムで、センシング、プロセッシング、アクチュエーションのリアルタイム化、広域化、高度化が確実に進んでいる。

高度電力化社会の実現には、インターネット等を構成するIT技術とモータ駆動や電力ネットワーク制御等を行うパワーエレクトロニクス(PE)技術の融合によるサイバー世界と実世界(フィジカル世界)の融合が必要不可欠である。特にパワー半導体チップとデジタルチップの高度な電子的結合による一体化、さらに一体化されたPEユニットの莫大な数の普及を促す、集積化を前提とした量産技術の確立、それらのネットワーク化と結合プロトコルの確立が重要となる。また半導体材料技術、実装・パッケージの材料技術、革新的な放熱技術、250°C動作を視野に入れたパワー半導体高温動作技術、集積化技術、高周波スイッチング技術による超小型化と普及拡大で重要となる高信頼化技術とノイズ抑制技術(新しい試験方法およびその国際標準化も含む)、信頼性およびノイズに関連する技術は従来の対症療法的な手法から、CADによる設計に組み込む手法へと急速に変化している。

パワー半導体デバイスでは、ワイドバンドギャップ半導体の技術開発が進み高性能化が期待されている。シリコンパワー半導体はパワーMOSFETおよびIGBTで、数十Vから数kVの電圧域において、15年間で単位面積当たりの抵抗が10分の1に低減されており、確実に高性能化が進んでいる。またシリコンパワー半導体デバイスの製造インフラが急速に300mmラインに移行し始めており、量産性が飛躍的に拡大する。パワー半導体デバイス用の300mmシリコンウエハの高品質化も進んでいる。特にIGBT用ウエハの品質向上はデバイスの基本特性改善に欠かせない、戦略的コア技術である。MEMSや微細加工技術など、シリコン半導体の新しいプロセス技術、材料技術がパワー半導体に応用されることにより、従来では考えられなかった高性能化が実現されてきている。

[技術分野を構成するフレーム] ^{1), 2), 3)}

上に述べた複合技術を構成する3つの技術領域：

1. 基本技術レイヤー

- ・ CPS（サイバーフィジカルシステム）を志向したパワー（エネルギー）ネットワーク
- ・ 極限電力変換技術
- ・ 極限材料・デバイス技術

2. レイヤー間融合技術

- ・ パワーエレクトロニクス制御用の新プロトコル技術
- ・ イミューンティ化技術（電圧絶縁、ノイズ耐性）
- ・ パワーエレクトロニクス多重化回路・制御技術
- ・ 信頼性設計、ノイズ設計を含む統合設計技術

3. レイヤー固有技術

- ・ 高品質ウエハー、高機能ウエハー技術
- ・ 受動部品材料技術
- ・ ミクロレベル信頼性評価技術と標準化

[新しいパワー半導体デバイスならびにパワーエレクトロニクスの指標の必要性]

21世紀の高度電力化社会では「効率改善」技術と「普及」によるネガワット（省エネ、節電）の拡大が必須でありネガワット・コスト削減を、環境調和型発電と同じ指標で研究開発ビジョンの柱として導入する可能性の検討が必要である。ネガワット・コスト指標に基づく研究企画および研究成果の評価、さらに指標の国際標準化が必須。ECPEなどが中心となって欧州もインデックスの立ち上げについて検討を始めている様子であり、日本主導によるネガワット・コストの指標化とネガワット革命の方向付けが重要。

[業界動向]

ABB、シーメンス等欧州企業が重電分野では世界を席卷している。彼らはエンジニアリングによる摺合わせ技術での差異化と、標準化によるプラットフォーム化を組み合わせ市場を拡大している。欧州企業はアカデミアを含めて競合他社間で前競争領域での研究連携を強力に進めており、パワー半導体用ウエハーから送配電用のパワーエレクトロニクス回路方式まで領域をまたいだEUプロジェクト、国プロジェクトによる研究が行われている。

旧シーメンスから分離した半導体部門インフィニオン社は、現在パワー半導体に特化しており、さらに最近米国のパワー半導体大手のインターナショナル・レクティファイア（IR）を買収した。圧倒的にシェアを拡大したパワー半導体巨大企業が成立した。高耐圧が得意なインフィニオン社と、低耐圧・制御・集積化が得意なIRの一体化は日本企業にとって非常に脅威である。インフィニオンもIRもいずれもR&D性の高い企業であり、日本のパワー半導体企業のポジショニングを完全に取り囲む形になっている⁴⁾。標準コモディティはフェアチャイルド社やVishay社（アジアファウンドリも活用）、R&D性の高い製品はインフィニオン社。電力ネットワークやCPSではABB、シーメンスが先頭を走っている。

（４）科学技術的・政策的課題

〔エンジニアリングの価値を最大化した欧米のアカデミアと無視してきた日本のアカデミア〕

2014年1月16日のノースカロライナ州立大学でのオバマ大統領演説は1984年以来続く米国NSF⁵⁾のエンジニアリングリサーチセンター（ERC）制度のパワーエレクトロニクス分野での成功を印象付けた。ERCでは、エンジニアリングの下に基礎研究と技術を集結したシステム志向（System motivated）な仕組みを前提としている。欧米はエンジニアリングを技術革新の中核に置き、我が国が得意とする「成長の木」モデルから「コンカレント」モデルにいち早く移行していた^{6),7),8)}。ERC制度で生み出された人材（エンジニア）の雇用状況のサーベイを行いERCの人材育成面での制度設計へフィードバックしている。過去に設立された多くのERCがNSF資金終了後も、企業等からの資金により世界をリードするセンターとして活動を続けている⁹⁾。コンカレントモデルのため、産業化出口を明確にした研究がなされており、多くの企業がアカデミアに研究資金を提供している。また、それを可能にする契約方法の研究も進んでいる。欧州の場合は、ECPE¹⁰⁾などの企業主導のコンソーシアム法人が成立する前から、大学と企業の間での人材交流が盛んであることはよく知られている。また、世界的なコンソーシアムの設立と維持に地方自治体が積極的にかかわっている。政府、自治体の関わり方も含め、世界的な取り組み状況の比較調査が強く望まれる¹¹⁾。

（５）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）

〔欧州〕

独インフィニオン社が米IR（インターナショナルレクティファイア）社を買収し、世界最大のパワー半導体メーカーが出現した。買収の目的は、多くのマスコミが伝えている化合物パワー半導体技術の確保ではなく、インフィニオン社が得意とする比較的大容量のパワー半導体とIRが得意とするコントロールICおよび小中容量パワー半導体の相互補完および、以下に述べる莫大な300mm生産インフラに対するマーケットチャンネルの確保であろうと考えられる。EU資金も確保し、100億円以上の規模によるシリコンパワー半導体製造の300mm化研究を進めている。パワー半導体用の高品質シリコンウエハー基礎研究も進む。アカデミアも連携して超高電圧直流送電用高性能シリコンIGBTの研究企画も始まっている。

〔米国〕

米政府、140M\$をパワーエレクトロニクスおよびパワー半導体（化合物）へ投資することを決定した。多くのベンチャー企業が資金獲得に動いている。シリコンパワー半導体では日、欧に後れを取っており、化合物パワー半導体に研究資金を集中している。パワーエレクトロニクス技術全般の方向付けはFREEDM¹²⁾、CPES⁹⁾などのNSF/ERCコンソーシアムが先導している。またARPA-E(DoE)によるプロジェクト（例えばSWITCHES：パワー半導体による米国の対中国モノづくりコスト競争力強化）が進んでいる。

〔中国〕

ワイドバンドギャップ半導体の国プロがいくつも進んでいる。また、新幹線向けの3.3kVのIGBTは試作が完了している。主要な学会等への論文投稿が急速に伸びている。国内需要だけで莫大な市場がある。主要な国際学会を誘致。

〔台湾〕

政府研究資金による化合物パワーデバイスの研究開発が企画されている。GaN は 8 インチによるファウンドリービジネス化を狙っている模様。車載用パワーIC 等はファウンドリービジネス化を完了。高耐圧 IGBT も企業ならびに大学で開発。

〔韓国〕

台湾と同様。サムソン、現代系の企業がパワー半導体に参入を狙う。90 年代から米フェアチャイルド社のパワー半導体工場（IGBT 主力工場）が仁川にあり、8 インチ化はすでに完了。

（6）キーワード

CPS（サイバーフィジカルシステム）、パワーエレクトロニクス用通信プロトコル、新世代シリコンパワーMOSFET、新世代 IGBT、信頼性設計、ノイズ設計、統合設計技術、コンカレントモデル、高品質・高生産性パワー半導体用ウエハー、信頼性評価技術、ネガワット・コスト

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	パワー半導体、パワーエレクトロニクスの新規コンセプト発表が、欧州に一步遅れている。
	応用研究・開発	○	→	高耐圧シリコンデバイス技術は欧州と肩を並べ世界をリード。低耐圧は徐々に後退が始まっている。システム化研究は欧州に遅れが始まっている。CPU電源など低電圧系では米国に遅れが始まっている。新材料パワー半導体では米国、欧州に遅れ。
	産業化	◎	→	パワー半導体の300mm化に対応できる企業の不足。大容量・高電圧パワーエレクトロニクス産業が世界トップ企業になりきれていない。CPU電源などでは、米国、台湾に遅れ。水平分業では台湾・韓国に遅れ。
米国	基礎研究	◎	→	化合物パワー半導体が突出して高い研究レベルを維持。市場の大半のシリコンでは欧、日に遅れ。CPSではMITなどが研究を始めており、今後先頭に行くポテンシャルあり。人材の排出には力を入れており、低電圧・小容量パワーではベンチャーが多く生まれている。次の世代が育ちつつある。
	応用研究・開発	◎	→	GEなどが本格的にパワー半導体からシステムまでを再構築。GEが得意としている分野、航空機、PC、防衛、宇宙などで研究が盛ん。CPU電源は依然として強い。インテルなどが先導。
	産業化	○	↑	水平分業を活用したデザインベンチャーは活性化だが、現状コモディティのみ。最近ではクリーンルームを買収する例も増えており、インフラや自動車への参入の機会を狙い始めている。化合物の市場自体はまだ小さい。
欧州	基礎研究	◎	↑	シリコンパワーデバイス、化合物、パワーエレクトロニクス回路、ネットワークすべての領域でバランスよく研究が行われている。この20年間でコンカレント型研究が定着。コンソーシアムなどを通じてロードマップ構築を世界的にリード。
	応用研究・開発	◎	↑	EUのフレームワークプログラム（FP）等の支援で、多岐にわたる研究を行っている。パワーエレクトロニクスコンソーシアム（ECPE）によるロードマップでも先導。応用から信頼性までいち早く標準化を行っている。
	産業化	◎	↑	ABB、シーメンスといった大手が堅調。インフィニオンはEU資金も獲得し、パワー半導体に特化した300mmウエハー試作工場を世界で初めて整備。
中国	基礎研究	△	↑	新幹線や発電などインフラの輸出を考えており、キーデバイスの一つであるパワー半導体およびパワーエレクトロニクス研究を国プロで活性化（化合物、シリコンパワー（特にIGBT））。拠点大学が研究を加速。基礎研究での米国との結びつきが強い。3kV級のデバイス試作は完了。
	応用研究・開発	○	↑	企業が拠点大学と連携して研究を行っており、基礎研究と応用研究・開発が一体化。
	産業化	○	↑	外国企業の誘致も含め活性化。コモディティでは生産拠点になっている。インフラ系、CPSでは日米欧に遅れ。
韓国	基礎研究	△	↑	方向性が見えにくいだがパワー半導体およびパワーエレクトロニクスの重要性は認識。海外の研究者を呼び情報収集。
	応用研究・開発	○	→	状況が見えにくいだが、大手企業内で研究・開発が進んでいる模様。
	産業化	○	→	フェアチャイルドの工場があり、米国とのチャンネルも強固。

台湾	基礎研究	△	↑	TSMCおよびその傘下の企業が一部非公開で研究開発。清華大学、台湾国立大学が中心に研究が活発化。ITRIも積極的に先導。韓国に比べ研究者間の連携が強い印象。化合物には政府資金が入る。
	応用研究・開発	△	↑	コモディティ電源で非常に強い企業があり、それらが米国大学や企業と連携して研究を進めている。
	産業化	○	↑	コモディティ電源等での強みを生かしつつ、今後確実に中国の産業用、自動車用市場を狙ってくる。

(8) 引用資料

- 1) 「2050年における省エネルギー社会の実現に向けた電気エネルギー有効利用に関わるエレクトロニクス技術の調査」 NEDO 平成 19 年度調査報告書
- 2) 「2050年における省エネルギー社会の実現に向けた電気エネルギー有効利用に関わるグリーンエレクトロニクス技術」に係る調査研究、NEDO 平成 20 年度調査報告書
- 3) 「2030年に向けた低炭素社会実現のためのエレクトロニクスの役割」 NEDO 平成 23 年度調査報告書
- 4) 「次世代パワーエレクトロニクスとそのシステム」 SHIQ PRESS、VOL. 22, 2012
- 5) Science The Endless Frontier-A Report to the President by Vannevar Bush, Director of the Office of Scientific Research and Development, July 1945, United States Government Printing Office, Washington: 1945.
- 6) National Innovation Initiative, “Innovate America”, Council on Competitiveness (CoC), 2005
- 7) “Best Practical Manual”, NSF/ERC, erc-assoc.org.
- 8) 大橋弘通「日本型オープンイノベーション」、科学技術未来戦略ワークショップ「革新電池オープン・イノベーション」報告書、CRDS-FY2012-WR-17, 2013
- 9) CPES, <http://www.cpes.vt.edu/> (Center for power electronics and systems, NSF-ERC)
- 10) ECPE, <http://www.ecpe.org/> (European center for power electronics)
- 11) 「(鼎談) 日米欧に見るパワーエレクトロニクスの新潮流」オーム社 技術総合誌 OHM 2007 年 10 月号(Vol. 94 No.10) 2007.
- 12) FREEDM, <http://www.freedm.ncsu.edu/> (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management Systems Center, NSF-ERC)

3.2.9 センサー

(1) 研究開発領域名

センサー

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

半導体デバイスを基盤とするセンサー技術開発は、インターネットにすべてのものがつながり (IoT: Internet of Things)、大量のデータ解析に基づくビッグデータビジネスの情報の入口としてますます重要性は増している。特に実空間に埋め込まれるセンサーは、災害リスク、健康維持などをはじめとする様々な地球的課題解決に資すると考えられるが、少量多品種であるセンサーに関する用途に合わせた製作技術、並びに用途開拓などに研究開発課題がある。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

“センサー” デバイスは、インターネットにすべてのものがつながり (IoT: Internet of Things)、大量のデータ解析に基づくビッグデータビジネスの情報の入口として、その重要性は、今後益々重要性を増すと考えられる。特に、WSTS (WORLD SEMICONDUCTOR TRADE STATISTICS: 世界半導体市場統計) 2014 において、半導体市場はドルベースで前年比+4.8%の堅調な伸びである一方、センサー市場は+9.1%と顕著な成長が予想されている¹⁾。その要因として、センサーが IT 機器、ロボット・車などへの情報入力装置として重要であることは広く知られているが、今後は、医療・ヘルスケア、農業・環境、インフラ（橋梁、道路、トンネル等）その他、全てのものにセンサーを設置しばらまくことで大きな市場規模で利用することが予想されるからである。その重要性は産業界・研究者の皆が認めるところであるが、新規デバイス（センサー）開発・製品化に向けた国内の産業界の動きは一部を除いて鈍い。その原因としてセンサー自体の既存マーケットが多品種・少量という特性に起因している。一方その概念を打ち破るようなビジネスモデルが国内外で出てきている。日本の産業競争力の強化に深い関心を持つ産業界の有志が集まる産業競争力懇談会の 2013 年度の報告書でも、「社会的課題の解決」や「人と環境との調和」へ向けた「機能」の追求が求められはじめており、異業種とのアプリドリブンの研究開発が必要であるとの提言がなされている。今後センサー技術開発は、アプリケーション分野との縦型連携プロジェクトによる社会実装が益々重要となる²⁾。その世界的に代表的な動きが“トリリオンセンサーユニバース”という、1兆個のセンサーをばらまいて、様々な情報を取得するというコンセプトが生まれてきたことであろう³⁾。そのコンセプトでも課題とされているのが、低価格化と新規センサーの開発である。低価格化については、フレキシブルエレクトロニクスによる解決法が期待されている⁴⁾。また、新規センサーの必要性は誰もが考えていることであるがセンサー事業化には約20年必要とされており、“普及が先か低価格化が先か”という問題に直面しており、その活動は国内外でも鈍い。最近の注目動向については、(5)を参照されたい。

(4) 科学技術的・政策的課題

今後、様々なセンサーが社会に実装されることを考えると科学技術的課題として個々のセンサーの長寿命化と電源開発、さらには生産技術が考えられ、それらの革新的な技術開発が

必要となる。土砂崩れ、自然災害、インフラの寿命、さらに我々の健康が損なわれるなどの社会的課題の前兆を捕らえるためには、ビッグデータ解析技術と共に、複数種類のセンサーを、インフラに埋め込んだり、非侵襲（さり気なく）に取りつけたりする必要がある。しかしながら、一度埋め込んでしまうとケースバイケースではあるが 10 年以上、インフラであれば 50 年以上そのセンサーが壊れないか、もしくは壊れたときはそのアラートを出す必要がある。自立的にセンサーが長期間駆動するためにエネルギーハーベストデバイスと組み合わせるなど、電源に関する研究開発が今後重要となる。さらにビッグデータ技術を元にした前兆のセンシングの為には、微小チップに複数種類のセンサーを集積化した、少量多品種のセンサーにおける問題の解決にもつながるマルチモーダルセンサー製作技術など生産技術の検討が必要である。

マイクロ流体デバイス、ナノポア技術など活用した、バイオセンサーの基礎開発など、国内の一部の機関で研究は開始されているが、基礎研究を行っている工学分野研究者と医療分野開発者（臨床医師を含む）との連携による異分野融合開発体制の構築が必須である。異分野・許認可（倫理委員会、プリミティブな成果を検証するための仕組み。医学部などの医者に加えて看護系の研究者との連携など）に関する支援が必要となる。また、製作技術の面から考えると従来のセンサーは、半導体 MEMS 基盤技術を基に、車や電気製品、IT 関連での使用を想定して開発されてきた。しかしながら、今後開発すべき IT とヘルスケア・生命・環境をつなぐセンサーは、土壌、河川、生体内、医療環境分野において Wet 環境での使用が必須となり、革新的な製作技術の誕生が必要である。これまでのセンサーは半導体微細加工技術を基盤に進められており、Wet 環境での信頼性、耐久性を含めた技術的な課題が存在している。欧米において 10 年ほど前から MEMS・バイオセンサーデバイスをプラットフォームとした細胞・生体高分子の研究用デバイス、細胞・組織両方を対象とする再生医療用センシングデバイスが重要と考えられ研究が続けられているが、マーケットが不明確なため基礎研究の域を出ることができない。また、再生医療の重要性が急激に高まることを予想すると、細胞・生体と IT（情報化社会）をつなぐためのプラットフォームの研究開発を政策的に行うことが必要である。さらにこれらが実現できれば生体分子や細胞と電子デバイスを融合したハイブリッドセンサー（感受部は生体分子、信号処理部は電子デバイス）が実現可能である。その実現のためには、半導体・MEMS 等に代表される半導体（無機物）と生体との界面について学問的に捕らえるための基礎研究が必要と考える。

低コスト、少量多品種製造技術、例えばプリンテッドエレクトロニクス技術、モジュール式、低コストロールツーロールプロセス、インクジェット、CMOS イメージセンサーや加速度センサーを除いたセンサーのマーケットの特性は“少量・多品種”といえる。それを解決する方法として、国内外での印刷技術やロールツーロールプロセスにより低価格で製作するプロセス技術の検討やセンサーに必要な様々な部品をモジュール化して組み立てる技術、ラミネート加工によるパッケージ技術の開発が始まっているが、産業化を見据えた製造技術の検討が今後ますます必要となる。

（5）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）

アプリケーションドリブンでセンサー業界の市場拡大を図る急先鋒が Dr. Janusz Bryzek が提唱する現在の 100 倍規模、年間 1 兆個を上回るセンサーを活用する社会を作るという、“トリリオンセンサーユニバース”というコンセプトに基づいた動きである。このビジョンに日米欧の産業界・研究機関を巻き込み、数ヶ月に 1 度の、“TSensors Summit”という会議で頻繁に情報交換を行いながら、2023 年を目標に 1 兆個のセンサーが出荷され、社会に実装されるというシナリオに基づいたロードマップ作成に取り組んでいる。コンセプトが先行し具体的な方策については今後の課題ではあるが、これまでセンサー業界の課題であった“少量多品種”を製造プラットフォームの共通化、標準化によって打破することを考えている。大量のセンサーをばらまいて情報を取得するという概念は、UC バークレイ校が提唱した“Smart Dust”が IoT 社会、ビッグデータ処理・ビジネスが顕在化した現在ならではの提案であると考えられる。

国内では JST（科学技術振興機構）の COI プログラムにおいて、アプリケーションドリブンなプロジェクトが展開されている⁵⁾。このプロジェクトは国内の企業と大学・公的研究機関が連携して進めるプロジェクトであり、センサーを活用した医療・ヘルスケア関連のサービスを目指して健康長寿社会を実現することに注力されている。中でも東北大学が中心となり進めている課題は、従来のセンサーに加え超小型センサーの開発とそれを用いた個人行動、ゲノム情報を一元に管理することを目指しており、その成果に注目したい。また、内閣府が主導する科学技術施策である戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）において、インフラの維持管理・更新・マネジメント技術に関するプログラムが立ち上がり、社会インフラの老朽化対策に IT で貢献する上で、センサーを活用し老朽化対策に寄与するための検討が開始されているが、具体的な課題抽出は今後の課題となっている⁶⁾。一方、農林水産省においては、“攻めの農林水産業の実現に向けた、革新的技術緊急展開事業”の中で、センサーを活用し革新的な生産技術の確立を目指したプロジェクトが始まっている。農業に関しては、通信事業者、大手電機メーカー、機械メーカーなど国内の企業の参入が活発化している⁷⁾。また、新たな医療センシングシーズとして、人体から放出される臭いやガスなどの気体や、生体中のイオンなどの不可視情報の可視化技術についての研究が活発化している。

（6）キーワード

トリリオンセンサー、インフラセンサー、フレキシブルセンサー、オンサイトモニタリング用センサー、センサーの長寿命化、エネルギーハーベストセンサー、生体センシング、再生医療用センシング、CMOS 集積化センサー技術

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・MEMS技術を利用としたセンシングデバイスに関する研究は、米国に並んで活発に研究が進んでいる。米国に比べて、バイオセンシング、生体埋め込みセンサーに関する研究が後発的ではあるが、慣性力センサーやイメージセンサーに関しての優位性は保っている。
	応用研究・開発	○	↑	・NEDOのグリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクト、JSTのCOIストリーム、SIP等で検討開始 ・IT農業関連への応用研究が活発化
	産業化	◎	→	・自動車関連センサー、携帯電話用センサーなどの開発に力点が置かれているが、10-20年後に必須となる生体埋め込みセンサー、バイオセンサーに関連の事業化が遅れている。現在農業に関する動きが活発化
米国	基礎研究	◎	→	・体内埋め込みセンサーに関して生物とロボットとのインターフェースに向けたセンサー開発は依然活発 ・ナノ材料とシステムを集積化したナノ材料の本格的な実用化がNSFのプロジェクトとして始まっている。
	応用研究・開発	◎	↑	・印刷技術やロールツーロール、モジュール化により、安価で大量にセンサーデバイスをつくるプロジェクトが進んでいる。 ・トリリオンセンサーユニバースをはじめとするビジネスモデルの検討が活発化（標準化をねらう）
	産業化	◎	→	・CMOSによりアレイ化したバイオセンサー（水素イオンセンサー）とこれまで米国の研究グループが行ってきたマイクロ流体デバイス技術ならびにDNAシーケンシング技術が結びつき、100ドル、20分で個人のDNAシーケンシングができる装置の販売が始まっている。（Life Technology社）
欧州	基礎研究	○	→	・欧州のセンシングに関するプロジェクトはEPoSS：European Technology Plathome on Smart System Integration のプロジェクトの一つとして展開されている。
	応用研究・開発	○	→	・EPoSSプロジェクトによる応用を目指す企業、研究機関とプラットフォームを持つ機関との共同研究を推進している。 ・IMECにおいてシリコン技術を基盤した複数種類のセンサーと集積回路を一体化するウェアラブルセンサー端末検討
	産業化	◎	→	・STMicroが進めているMEMSセンサー事業（加速度センサー、圧力センサー、慣性力センサー）は堅調に行われており、さらに健康、バイオセンサー事業への展開を進めている。
中国	基礎研究	△	→	・バイオセンサーに関するセンサー開発については、国際会議などの発表を見る限りレベルも低く古典的な手法にとどまっている。
	応用研究・開発	○	↑	・中国の課題にソリューションを与える社会基盤を構築するためにセンシングネットワーク研究について、国を挙げた研究が進められている。
	産業化	○	↑	加速度センサーなど生産拠点が日本から中国に移行している。携帯電話、車などへの搭載が主な市場のため。

韓国	基礎研究	△	↘	韓国研究機関でのセンサーデバイスの研究者人口は増えていない。理由はディスプレイ、LED関連に注力しているため。
	応用研究・開発	△	→	ベンチャー中心、グルコースセンサーなどの開発が行われているが大きな動きはない。韓国大手企業は米国などのシーズを取り入れる傾向。
	産業化	○	→	サムソンを中心としてセンサーの産業化が進んでいるが、その中心的なテーマはイメージセンサーになる。
台湾	基礎研究	○	→	台湾の研究機関によるバイオセンサー関連の研究が少数ではあるがすすんでいる。
	応用研究・開発	△	→	センシングを中心として大きな動きは認められない
	産業化	○	↑	センサー・MEMSデバイスを作製するためのプラットフォームとして、台湾CMOSファウンドリー大手（TSMC）が力を入れている

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

(8) 引用資料

- 1) 産業競争力懇談会 2013 報告書：<http://www.cocn.jp/report/index.html>
- 2) JEITA 半導体技術部会報告，WSTS 2014 年春季半導体市場予測について：
<http://semicon.jeita.or.jp/statistics/docs/20140603WSTS.pdf>
- 3) TSensor Summit for Trillion Sensor Network：<http://www.tsensorssummit.org/>，日経エレクトロニクス，4-28（2014）“1兆個のセンサー社会，始動”
- 4) <https://www.parc.com/services/focus-area/flexible-and-LAE/>（印刷技術）
- 5) センター・オブ・イノベーション（COI）プログラム：<http://www.jst.go.jp/coi/site/site.html>
- 6) 戦略的イノベーション創造プログラム（SiP）：<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>
- 7) “攻めの農林水産業の実現に向けた，革新的技術緊急展開事業：（例えば）
<http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/131226.htm>，
<http://www.delica.co.jp/data/20140623.pdf>，日経エレクトロニクス 9-1（2014）農業と作る電機の未来。

3.2.10 アナログ回路

（1）研究開発領域名

アナログ回路

（2）研究開発領域の簡潔な説明

実世界（Physical）と計算機（Cyber）の間の取り持つインターフェースとなるアナログ回路の重要性が増してきている。たとえば、今後発展が期待されているセンサーネットワークの構成要素であるセンサーノードにおいては、極低電力動作や種々のセンサーデバイスに対応するためにチップ製造後に特性をフレキシブルに変えることができるアナログフロントエンド回路の実現が期待されている。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

〔背景〕

近年の技術動向として、種々の情報端末で収集したビッグデータをクラウドコンピューティングで解析し様々な分野で応用する試みが大きな注目を集めている。現状は、例えば PC やスマートフォンが情報収集端末の主役であり、検索エンジン等で人が入力したデータを収集しているが、将来、無線インターフェースを有するさらに小型のセンサー端末が実用化されると、自然界や人間の活動に関するこれまでとは桁違いに大量の信号を人の手の介在なく収集することが可能となる。これらのデータを活用することで、医療、教育、農業、環境、交通、防災、等々の分野において新たなサービスが提供され社会システムが大きく変わると考えられている。最近、Trillion sensors universe¹⁾というキーワードが良く使われるようになってきているが、将来年間 1 兆個のセンサーデバイスが流通すると考えられている。より小型のセンサー端末が普及するためには、端末の中で太陽電池や振動発電といった環境発電素子を使って動作する、超小型、極低消費電力のインターフェース回路の実現が鍵を握る。また、センサー端末にはセンシングする信号に応じて様々なセンサーデバイスが用いられるが、その信号を読み取るためのインターフェース回路であるアナログフロントエンド回路に要求されるスペックも多岐に渡る。これらの要求仕様に応じたセンシング回路の専用設計は、開発期間やコストの増大につながり普及の阻害要因となる。低消費電力動作を実現しつつ、様々な要求仕様にフレキシブルに対応できるようなアナログ回路、究極的にはソフトウェアで動作を定義できるようなプログラマビリティを有するアナログ回路技術が必要となる。また、センシングする信号の周波数は信号の種類により大きく異なるため、対象信号の帯域に応じて回路の動作速度も変え、常に最適な消費電力で動作させることができるパワースケーラブルな特性が重要となる。さらに、センサーノードではセンシングをするときのみ端末を起動し、それ以外の時間はスリープ状態に入れることで消費電力の削減を図ることが期待されるが、そのためにはできるだけ短時間で回路を起動できなければならない。このような高速起動も要求される重要な特性の一つである。

〔これまでの取り組み〕

プログラマブルなロジック回路として用いられる FPGA（Field Programmable Gate Array）は、特にラピッド・プロトタイピングや少量多品種製品において不可欠なデバイスと

なっている。

アナログ回路においてもプログラマビリティを有するデバイスとして、FPAA（Field Programmable Analog Array）が1991年にトロント大学のLeeらのグループから提案され実験結果が報告されている²⁾。提案では、差動対、電流源、スイッチから構成されるCAB（Configurable Analog Block）がアレイ状に配置され、スイッチ等の接続状態を再構成することで特性可変性が実現されていた。アクティブフィルタの構成で頻繁に現れるGmセル間の信号帰還のトポロジーを効率よく構成できる六角格子状にCABを配置する方法が考案され、100MHz程度で動作する帯域通過フィルタも実現されている³⁾。ただし、消費電力は70mWと大きい。製品レベルでは米モトローラが1997年に発表した製品の技術を引き継ぎ、英Anadigm社からFPAAの製品が販売されている。信号帯域は2MHz程度であり、増幅、加減算、乗算、フィルタリングの機能が実現されている。消費電力はSmall circuit modeで15mA程度、High Power modeで73mA程度である。

一方で、FPAAよりも粒度を荒くして、再構成の自由度を狭める代わりに、性能の改善を図るアプローチとしてPSoC（Programmable System-on-Chip）と呼ばれるものがある。可変ゲインアンプ、フィルタ等の特性可変な多種アナログIPコアとマイコンを混載している場合が多い。米Cypress Semiconductor社が2002年に製品販売を始めている。また、同様のアプローチを用いてルネサスエレクトロニクスからSmart Analogと呼ばれる製品ラインナップが2012年から販売されている。DAC（Digital to Analog Converter）の消費電流は1.5mA、利得帯域幅（GB：Gain Band width product）積が2MHz程度の可変ゲインアンプが0.5mAで動作する。センサーデバイスの型番を設定するとそのセンサーに最適なゲイン、遮断周波数が設定され、ユーザーが煩雑な設定をしなくても、多種類のセンサーに対応したアナログフロントエンドを使えるようになっている。アナログにおいても、プログラマブルなデバイスの普及には、このようなユーザービリティを向上されるためのプラットフォーム、開発環境をセットで提供することが重要となる。

[今後の取り組み]

前述のとおり、プログラマブルアナログの研究は早くから行なわれており、2000年前後からは実際に製品の販売も始まっている。ただし、プログラマビリティを得る代償として、消費電力、帯域、回路面積のオーバーヘッドが生じることもあり、デジタルにおけるFPGAのように広く普及しているとは言いがたい。しかしながら、今後特にセンサーネットのような少量多品種に対応でき短期間に開発することが必要となるアプリケーションが有望視される中、FPAAやPSoCのような製品の普及が進むものと思われる。一方で、環境発電デバイスでの駆動を狙ったような微小センサー端末においては、プログラマビリティを確保しつつ、やはり消費電力を極限にまで低減することが不可欠であり、当分野での研究開発のいっそうの加速が必要となる。

FPAAにおいてはブロック間を接続する配線の寄生容量等で、帯域が制限される。初期の頃は連続時間系回路の実装が主流であった。これは、離散時間系ではスイッチトキャパシタ回路におけるセットリング時間に要する時間が長くなり、扱える信号帯域が連続時間系よりも狭くなるためである。しかし、最近、米MITのLajevardiらがコンパレータによるZero-Crossing方式を用いた、再構成可能なAD変換器、スイッチトキャパシタフィルタ、

可変ゲインアンプを提案してテストチップによる実証を行なった⁴⁾。ポイントは従来のオペアンプのような消費電力の大きな回路ブロックを排し、コンパレータのような比較的シンプルな回路で実現している点であり、テクノロジースケーリングへの親和性の観点からも有効な手法である。いずれも離散時間系のアナログシステムである。AD変換器有効分解能が8bit、サンプリング周波数が50MS/secのAD変換器と、遮断周波数1MHz、3次のバターワース特性を有する低域通過フィルタの構成が3mW程度の消費電力で実現できており、まだ専用設計した場合に比べて電力は大きいとはいえ、消費電力の削減および帯域の拡大が図られている。また、センサー用のアナログフロントエンドではないが、2004年に米TIから発表された、主に受動素子（キャパシタとスイッチ）で構成された離散時間フィルタ⁵⁾もその低電力動作、特性可変性、広帯域動作の観点から、再構成可能なアナログフロントエンド回路への適用が期待できる手法である。初段のアクティブ回路以外はDC電力を消費しないため、パワースケーラブルな特性を出しやすい。

（4）科学技術的・政策的課題

周知のとおり、FPGAの分野では米国の企業がほぼ全てのシェアを占めており、ゆるぎない技術的な優位性を有している。FPGAにおいては、単にデバイスの開発だけではなく、ユーザーにとって使いやすい開発環境等のプラットフォームを提供することも極めて重要である。これまでFPGAは消費電力やコストのオーバーヘッドがある程度許容されるニッチな分野、例えば、プロトタイプ品の開発や通信系の基地局等での適用が主であったが、近年はLSI製造コストの高騰に加え、少量多品種のアプリケーションに短期間で製品を開発する必要性に迫られるケースが増えてきていることもあり、これまではASICが用いられてきた分野でもFPGAに置き換えられるケースが増えてきている。例えば、最近では米Lattice SemiconductorのFPGAが腕時計に使用されるに至っている。

FPAAやPSoCにおいても、専用回路に対して、消費電力、コスト（回路面積）、動作帯域のオーバーヘッドが大きく適用範囲は限られてきた。特にデジタルに比べて、アナログはプログラマビリティを持たせることによる、性能へのしわ寄せが大きくFPGAよりも普及は進んでいない。しかしながら、産業、社会に対する波及効果の極めて大きな将来のアプリケーションと目されるセンサーネットワークにおいては、センサーノードは多種多様の信号をセンシングするため、必然的に少量多品種の性格を持つ。一方で、低消費電力や低コストに対する要求は非常に厳しい。これらのトレードオフをうまく両立させることができる、再構成可能なアナログ回路の実現が必要となる。再構成可能なアナログ回路の研究開発においても独創的なアイデアは米国発であるケースが多い。また、開発環境を含むプラットフォームの構築、提供能力も優れている。一方、日本は低電力回路技術の分野で先行しており、また、新たなアプリケーションを使用することに対する国民の興味関心も高い。これからは、専用回路での低電力回路技術を突き詰めるだけでなく、たとえば再構成可能な回路における低消費電力の技術体系を構築すること、さらに、それらのハードウェアをユーザーが簡便に使えるようにする環境の開発に注力することが重要である。

（5）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）

米国は、2000年よりも前にワイヤレスセンサーネットワークの概念であるSmart dust⁶⁾

が UCB から提唱されているように、以前から低電力回路の研究が盛んに行なわれてきた。技術的な課題から実用化はされていないが、2013 年に The Trillion Sensors Universe が UCB および Fairchild から提唱され、以降 TSensors Summits が頻繁に開催されるなど、センサーネットワーク普及の機運が高まってきている。極低電力センサーノードの実現に向けた大学、企業の取り組みも非常に活発である。また、2013 年に BRAIN イニシアチブが発表され、その中に Brain Machine Interface(BMI)の研究が組み入れられているが、インターフェースにアナログ回路技術が重要な位置をしめる。

欧州では EU の FP7 (Framework Programme 7)の枠組みで研究プロジェクト予算がつき、センサーネットや低電力回路技術に関しても多額の研究資金が提供されている。例えば、Zero Power Sensor Systems を目差した Guadian Angels⁷⁾プロジェクトの準備が進められている。また、EURO-DOTS (European Doctoral Training Support in Micro/Nano-electronics)という仕組みが存在し、博士課程学生のトレーニングがなされている。

(6) キーワード

極低電力回路、極低電圧動作、アナログフロントエンド、再構成可能、プログラマブル、ソフトウェア定義、無線センサーネットワーク、環境発電、間欠動作、高速起動

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	NEDO「極低電力回路・システム技術開発（グリーンITプロジェクト）」で0.5V回路技術が開発された。東大、東工大、慶大、神戸大、静岡大等から継続的に研究報告が行なわれているが、学術としての体系的化が弱い。
	応用研究・開発	○	→	低電力技術が求められる応用分野が日本には多いが、現状、大学での研究と実用化の間に距離がある。
	産業化	○	↘	ルネサスなどの半導体メーカーに一定の技術力はあるが、全体としてはプレゼンスが弱い。
米国	基礎研究	◎	→	UCB, Stanford, MIT, Oregon大学など低電力アナログ回路においてユニークな提案がなされ、さらに体系的な研究が継続し、学会発表も盛んである。
	応用研究・開発	◎	→	高周波での離散時間アナログ信号処理やなどが、いち早く製品化されるなど、基礎研究から応用への移管がうまく行っているケースが多い。
	産業化	◎	→	Analog Devices, Texas Instrumentsのようなアナログ回路技術の強い大手の老舗企業が大きなシェアを維持する一方で、ベンチャー企業が多数起こされている。1980年代以降に設立されたベンチャーで現在では大手の一角を占めるQualcommやBroadcom、中堅のMaximやLinear Technologyなどアナログに強みを持つ企業が多く競争力は抜き出ている。
欧州	基礎研究	◎	→	IMEC, KUL, Delft, Eindhoven, Twente工科大学等、ベルギー、オランダの大学、研究機関で継続的にトップクラスの性能の回路の報告がなされている。特にIMEC (Eindhoven)は無線センサーノード用の低電力回路に力を入れて研究を進めている。
	応用研究・開発	○	→	IMECが世界各地の企業と研究プロジェクトを行っており、応用を意識した研究を行なっている。
	産業化	○	→	STマイクロエレクトロニクスがMEMSセンサーに力を入れており、センサー用のアナログフロントエンドICのラインナップも多く揃え、常に一定のシェアを確保している。
中国	基礎研究	△	↑	中国本土では、目立った研究が継続的に報告される域には達していない。台湾では、国立台湾大学やMediaTekから性能ではトップクラスの低電力データコンバータの報告が頻繁になされるようになってきている。
	応用研究・開発	○	↑	ECG等で実用化を意識した完成度の高いチップの報告がなされるようになってきた。
	産業化	△	↑	低コスト向けスマホのチップセットでシェアを拡大しているMediaTekが無線トランシーバチップの提供を始めるなど、アナログ技術にも力を入れてきている。
韓国	基礎研究	○	→	KAISTでBody Area Network(BAN)やヘルスケア用の低電力アナログ回路の研究が継続的になされ、学会発表件数も増加している。PostechやSamsungからのPLL等の研究報告も多い。
	応用研究・開発	○	↑	実用志向であり、回路の獨創性というよりは実装力が強い。大学の研究においてもデモが可能なレベルのSoCに仕上げてくる。
	産業化	△	→	個別ICでの製品は少ない。

(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ренд

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) <http://www.tsensorssummit.org/>
- 2) E.K.F.Lee and P.G. Gulak, "A CMOS field-programmable analog array," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 26, No.12, pp.1860-1867, (1991).
- 3) Joachim Becker, et.al., "A Field-Programmable Analog Array of 55 Digitally Tunable OTAs in a Hexagonal Lattice," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 43, No.12, pp.2759-2768, (2008).
- 4) Payam Lajevardi et.al., "Zero-Crossing Detector Based Reconfigurable Analog System," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 46, No.11, pp.2478-2487, (2011).
- 5) K. Muhammad et.al., "A Discrete-Time Bluetooth Receiver in a 0.13μm Digital CMOS Process," ISSCC 2004
- 6) J. M. Kahn, R. Katz and K. Pister: "Next century challenges: mobile networking for "Smart Dust"", Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 271-278 (1999).
- 7) Zero Power Sensor Systems <http://www.ga-project.eu/>

3.2.11 情報処理

(1) 研究開発領域名

情報処理

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

様々な情報・データを目的・用途に合わせて処理するプロセッサやコンピューターやその方式に関する研究開発。また単なるデータだけでなく、多様で多層の意味を含む情報に対してその認識や判断、理解といった高度な処理を行なう方式の研究開発も含む。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

情報処理は、ソフトウェアを実行することによって各種様々な情報・データを柔軟に処理するプロセッサやコンピューターの研究開発領域である。言うまでもなく、サーバーや情報通信機器、ロボットや自動車・産業機器の自動制御・自動運転の中核として欠かせない領域である。この領域では、情報処理の高速化、即ち大量のデータや大規模なソフトウェアをいかに短時間で処理するかが基本的な研究開発課題である。また、プロセッサやコンピューターがパーソナル・モバイル機器や産業機器、自動車、通信ネットワークなどに組み込まれて大量に社会に導入された結果、情報処理エネルギーの総合的な低減も極めて重要な研究課題となっている。

従来のプロセッサ、コンピューターでは、データやデータ・ストリームを入力し、これをソフトウェア実行により処理した結果を新たなデータやデータ・ストリームとして出力する、いわゆるフォン・ノイマン型が基本構造（アーキテクチャー）となっている。これに対して、主に半導体技術の革新により更に大量の入力データの高速処理が可能になる技術トレンドを踏まえて、単なるデータやデータ・ストリームではなく、多様な意味を含んだ情報を直接入力し、その認識や判断などのより高度な情報を出力する新たなプロセッサ・アーキテクチャー、コンピューター・アーキテクチャーの可能性が高まっている。このような研究課題もこの領域に含まれる。このように情報処理は、コンピューター開発の歴史と未来そのものと言うべき研究開発領域である。

現在、この領域は単一のコンピューターによる情報処理からネットワークに接続された大規模なコンピューター群による情報処理へと大きな転換点を迎えている。今まさに、従来のコンピューター・アーキテクチャーより上位の新たなレイヤーで、省エネルギー化や産業・自動車・社会システム応用に多くの実績を持つ日本の特色を生かしたプロセッサ・アーキテクチャー、コンピューター・アーキテクチャーの研究開発の可能性、重要性が高まっている。また他の領域の基盤として、この領域の研究開発を強化して日本の持つ課題やニーズ、日本がこれまで積み上げてきた問題解決の枠組みや概念、実績を反映させることが、日本の産業競争力の強化や影響力の拡大につながるものと期待される。

この領域は、主として次の3つの技術トレンドによって研究開発が牽引されている。

- ・ 微細化による高集積化

半導体の微細化製造技術により、チップ上の信号伝播は高速化し、低電力化する。

これはプロセッサの高速化と低電力化に直結する。更に、チップ上に占めるプロセッサの面積は縮小し、その結果、フォン・ノイマン・アーキテクチャーの最大の課題であるプロセッサ・メモリー間ボトルネックの緩和のために大容量のメモリーをチップ上に集積することが可能になる。これもまた、ソフトウェア実行の高速化と低電力化につながる。

更に半導体の微細化が進んだ結果、2003年頃からの10年間、1つのチップ上に多数のプロセッサ+メモリーの組合せ（コア）が搭載されるようになった。1チップ化されたマルチコア・プロセッサである。マルチコアでのソフトウェア実行には、1つのソフトウェアの処理を各コアにバランスよく割り当てて分担、協調させるソフトウェア制御技術の研究開発が必須だが、その結果、マルチコアもまたソフトウェア処理の高速化につながる。このようなマルチコアのコンピューター・アーキテクチャーと、マルチコアで幅広いソフトウェア処理をいかに高速化するかの研究開発が重要であり、その発展がしばらく続く。

- ・ ダウンサイジング、パーソナル化、モバイル化

半導体の微細化によるもう一つの大きな効果がコンピューターの小型化・低コスト化、いわゆるダウンサイジングである。以前は大型のコンピューターでしか実現できなかったソフトウェア処理が、今やPCやスマートフォンでごく普通に実現され、加えてパーソナル・ユースに即した多数の新たなソフトウェアが開発されている。更に、微細化による低電力化に支えられた情報処理機器のモバイル化もこのトレンドの一側面である。

ダウンサイジングのトレンドに沿った研究開発として今後ますます重要になるのが、ユーザーという「人」だけでなく社会や家庭、自然界の環境下の「もの」とのインターフェースをとるプロセッサ「組み込みプロセッサ」と、これらを有線・無線のネットワークでクラウドとつないだ大規模でオープンなコンピューター・システム、「IoT (Internet of Things)」や「CPS (Cyber Physical System)」と呼ばれるシステムである。このようなシステムでは、社会の中に大量に存在するIT機器や産業機器、ディスプレイや表示装置、各種のカメラやセンサー、情報インフラをネットワークで接続し、クラウド上のソフトウェア処理と連携することによって大局的な最適化や総合的なサービスを実現する。そのため、「もの」に内蔵された組み込みプロセッサは24時間常時「もの」とのインターフェースをとるとともに、その一つ一つは「人」の数より圧倒的に多く存在するので、消費エネルギーや動作管理、更にセキュリティや安全性の面での自律性を実現する研究開発がますます重要になる。

また、IoTやCPSでは、ネットワークでつながれたプロセッサやコンピューター一つ一つだけでなく、ネットワーク接続のプロトコルやネットワークでつながれたコンピューター群全体の制御、管理によってサービスを実現する。このように、コンピューター群全体を制御することによって機能を実現したり、消費エネルギーをコンピューター群全体というマクロ視点で削減したりするようなコンピューター・アーキテクチャーの研究開発が重要になっている。

- ・ ソフトウェア化

コンピューターによるソフトウェア処理の高速化の結果、必要な機能・性能を実現するソリューションの中でソフトウェアによって実現できる領域が格段に広がった。その結果、すべてソフトウェアで実現できる機能や、ハードウェア化による性能向上が少ない機能では、専用ハードウェア開発の意義は薄れ、より柔軟で開発期間・開発コストの点で優位なソフトウェアに置き換わってきた。

一方、IoT や CPS では、組込みプロセッサは「もの」が発信する物理信号、アナログ信号と直接インターフェースをとる。センサーと組込みプロセッサを組み合わせたノードをネットワークでつないだ「センサーネットワーク」である。センサー自身やセンサーとのインターフェースはどうしてもハードウェアになる。「人」とは異なり「もの」は用途に応じて多種多様な物理信号を発信するため、センサーに関するハードウェアは多種多様である。しかし、多種多様なハードウェアの開発は開発期間・開発コストの点でますますハードルが高い。このような課題に対し、機能や性能、基本パラメータをソフトウェアで変更できるリコンフィギュラブルなハードウェア、フレキシブル・デバイスの研究開発の意義がある。

[これまでの取り組み]

情報処理領域の研究開発、またプロセッサやコンピューターのアーキテクチャーの研究開発は、これまで欧米が先行し、日本が追いかけてきた。PC やサーバーで先行し、市場を開拓してきた Intel や IBM、携帯電話やスマートフォンの ARM や Qualcomm、グラフィックス・イメージ処理プロセッサの NVIDIA や Imagination Technologies はこのような欧米の例である。

これに対して日本は、市場競争力が強かったコンシューマ、自動車、産業機器市場向けの組込みプロセッサの研究開発で欧米を追いかけてきた。組込みマイクロコンピューターのルネサスエレクトロニクスがその例である。研究開発という意味では、富士通のスーパーコンピュータ用プロセッサの開発もその例に加えることができる。

情報処理に関して、韓国、台湾、中国などの新興国は明確にターゲット市場を志向した応用研究に重点をおき、政府や大学、国立研究所もそれを支援してきた。MediaTek や Samsung がその例である。情報処理領域の研究開発に大きな影響を与えるようになったのが研究開発資産のオープン化、ライセンス化の加速である。ARM のプロセッサ・アーキテクチャー、Linux や Android の OS、各種のソフトウェア開発ツールがライセンス化、フリー化された結果、研究開発の重点はこれらを構成要素として使ったアプリケーション技術やインテグレーション技術に移ってきている。これにより、プロセッサやコンピューターの基盤技術を独自開発できる日本の強みが相対的に薄れ、欧米だけでなく、新興国とのアプリケーション技術の研究開発競争が激しくなっている。

[今後必要となる取り組み]

情報処理の研究開発では、マルチコアや IoT、CPS といったプロセッサ群やコンピューター群で、産業分野や生活環境、社会インフラに必要な機能やサービスを如何に実現するかが今後ますます重要になる。例えば、ロボットや自動車の安全で効率的な自動運転や、セン

サーネットワークで社会環境や生活環境から集められた 24 時間リアルタイムの膨大な情報「ビッグデータ」の分析による様々な社会的サービス、個人へのサービスの実現である。

このためのプロセッサやコンピューターは、高速で大容量なネットワークにつながれたプロセッサ群、コンピューター群として有機的に動作することが必須となる。またネットワークとしては、マルチコアのようにチップ上やモジュール、クラスタに近接して配置されるものもあれば、センサーネットワークのように無線で広範囲に展開されるものもある。いずれにしてもネットワークに接続されるプロセッサやコンピューターの数は増える一方で、それにスケラブルに対応できるネットワークの研究開発が不可欠である。更に、1つ1つのプロセッサやコンピューターでのソフトウェア処理を制御するだけでなく、群としてのプロセッサやコンピューターの全体を高性能化や省エネルギー化、高信頼化に向けてマクロに管理する技術の研究開発が今後ますます重要になる。

（４）科学技術的・政策的課題

欧米では、自動車の自動運転やロボット、CPS など戦略的なターゲット分野を定めて国レベルで IoT 世代の情報処理システムのアーキテクチャーの研究開発を推し進めており、これをスマートに効率よく実現するためのプロセッサやコンピューターに関する研究開発もあわせて推進している。また韓国、台湾などの新興国は、従来、デバイス製造の低コストの強みを生かしたプロセッサやコンピューターの高集積化や多機能のインテグレーションに集中してきたが、今や PC やスマートフォンだけでなく、自動車や医療&ヘルスケア、電力、交通といった社会インフラなど戦略的な応用分野を設定した情報処理の研究開発投資を進めている。

日本は、製造業からサービス業まで幅広い産業インフラを持ち、それを実現するデバイス技術、ハードウェア技術、アーキテクチャー技術、ソフトウェア技術など、欧米以外ではほぼ唯一、独自技術を生み出す研究開発基盤を有している。しかし、日本の国家プロジェクトの多くは個別のデバイス技術やハードウェア技術、あるいは特定の応用に対するソフトウェア技術やシステム技術の研究開発に重点を置いてきた。IoT 世代の研究開発で重要な、戦略的ターゲットを設定し、センサーなどのデバイスから組み込みプロセッサでの情報処理、ネットワークやクラウド上でのソフトウェアなど多次元の研究開発を連携させる取り組みにおいて、欧米だけでなくアジアの新興国に対しても遅れてきている可能性がある。あわせて、IoT 世代の日本の競争力強化には、大学や公的研究機関、産業界、地方公共団体など、情報処理のデバイスから応用、サービスの研究開発の連携の場作りと活発化、発展の仕組みを支援することが重要である。

（５）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〕

2014 年 8 月、IBM が SyNAPSE チップ¹⁾と呼ばれる新しい非フォン・ノイマン型のコンピューター・チップを発表した。このチップは、人間の脳の情報処理からヒントを得て神経回路網での信号伝播を模擬した情報処理を行ない、明示的なプログラミングをしなくても機械学習（Machine Learning）によって物事や対象物の認識や識別を行なう人工知能的な情報処理を実行する。チップ自体は 100 万個のニューロンとこれを結合する 2 億 5600 万個の

シナプスを搭載した一種のマルチコア・プロセッサで、1つ1つのコアはニューロンの機能を模擬し、マルチコア全体で神経回路網の機能を模擬するように構成されている。その結果、画像イメージのように多層の情報を持ったデータをそのまま入力し、神経回路網にあたるマルチコア全体で総合的に処理し、イメージに含まれた物事や対象物という意味情報を出力するという情報処理を目標としている。また、このチップのソフトウェアは、個々のコアで実行されるニューロンの機能のレベルとは別に、既存の膨大な画像イメージからの機械学習の結果としてマルチコア全体にプログラミングされたものが一種のソフトウェアとなる。同じく脳の神経回路網を模擬した技術として、最近、Deep Learning²⁾という機械学習の技術が画像認識で高い成果を上げたと注目を集めている。このように半導体の高集積化、高速化、低電力化を生かし、人間や生物の信号処理や情報処理からヒントを得て新たな情報処理の方式やコンピューター・アーキテクチャーを構築する研究開発に最近、成果が出始めており、新たな情報処理方式の性能を追求する方向とともに、この新たな技術の応用として産業的に何が可能になるのか、どんな技術分野の応用に適しているのか、汎用性はどこまであるのかといった方向での研究開発の活発化が期待される。

（6）キーワード

- ・ マルチコア
- ・ IoT (Internet of Things)、CPS (Cyber Physical System)、センサーネットワーク
- ・ フレキシブル・デバイス、リコンフィギュラブル・デバイス
- ・ スーパーコンピューター、ビッグデータ、クラウド、クラウド・コンピューティング
- ・ 非フォン・ノイマン (非ノイマン)
- ・ ニューラルネットワーク、ニューロコンピューター
- ・ 機械学習 (Machine Learning)、ディープラーニング (Deep Learning)

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・組み込みプロセッサや組み込み制御用OSでオリジナルな研究開発と技術開発基盤を有し、大学・企業研究機関の研究レベルは高い。 ・またスーパーコンピュータ用のプロセッサやソフトウェア開発技術でも高い研究開発、技術開発レベルを保っている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・コンシューマ・通信機器、自動車・産業機器、社会インフラ（電力、交通、ホームなど）の各分野で幅広く応用研究、応用開発が実施されている。ただし、医療分野では医療と情報処理の連携が不足。 ・また、IoTやセンサーネットで応用、サービスとデバイス、情報処理を連携させる取り組みがまだ足りない。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・機器の産業化は活発だが、サービスと組み合わせたビジネスモデルの開発を活性化する必要あり。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・オリジナルのプロセッサやOSを有し、大学・公的機関・国防省・企業などの研究レベルは総合的に高い。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・自動車、ロボット、医療、サービス、社会インフラ（電力、交通等）の各分野で幅広く応用研究・開発が行なわれている。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・インターネットに基づくサービスのビジネス化が活発。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・オリジナルのプロセッサ（ARM）やOSを有し、大学・公的機関・企業などの研究レベルは総合的に高い。更に、EUプログラムやiMECで、関連する研究開発の相互連携を適切に図っている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・自動車、医療、社会インフラ（電力、交通等）の各分野で幅広く応用研究・開発が行なわれている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・機器の産業化は活発だが、サービスと組み合わせたビジネスモデルの開発を活性化する必要あり。
アジア (台湾、韓国、中国)	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ARM等のライセンス技術をベースにした応用研究が中心。国家プロジェクトの支援を受けて大学・公的機関・企業の研究レベルは高い。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・スマートフォン・デジタル家電(韓国)、PC・デジタル家電(台湾)をベースに自動車、医療、社会インフラに応用市場を拡大する研究開発が活性化。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・個別機器、半導体のビジネスが中心。

（8）引用資料

- 1) <http://www-06.ibm.com/jp/press/2014/08/0801.html>
- 2) 連載解説「Deep Learning（深層学習）」，人工知能学会誌, Vol. 28 No. 3 (2013年5月)から隔月連載

3.2.12 通信

(1) 研究開発領域名

通信

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

インターネットの進展、スマホに代表されるモバイル機器のリッチコミュニケーション、さらに今後は Internet of Things への展開と、通信にかかる負荷はこれまで以上に大きくなることが予想される。そのニーズに応えるために通信領域では、大容量通信を支えるデバイスから方式まで幅広い技術の集積が求められる。本項では、その中から光通信の鍵を握るシリコンフォトニクス、無線通信の重要技術であるメタマテリアルアンテナ、ミリ波デバイス技術に関して現状の技術動向、課題などについて述べる。

(a) シリコンフォトニクス

(a)–1. 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

シリコンフォトニクスは、電子集積回路(LSI)で用いられるシリコンプロセスを用いて、光機能回路を実現する技術や実現された光機能回路をさす。光機能回路としては、たとえば光ネットワーク機器で使われる光信号の複数分岐、異なる波長の多重や分離、光信号経路のスイッチング、電気信号から光信号あるいは光信号から電気信号への変換などである。光回路の素材にシリコンを採用することで、小型な光回路と、安価な製造を実現する。

現在は石英素材で実現されている光機能回路に、シリコンを用いることで光の閉じ込めが強くなり、導波路（光の通り道）をきわめて細くできたり、急激に曲げたりでき、回路を大幅に小型化できる。さらに、成熟した CMOS シリコンプロセスで作ることができるため、製造コストの削減が期待される。シリコンフォトニクスの研究領域では、以上の小型、低コスト性を活かしながら、ユーザーが必要とする性能を実現するために必要となる導波路の設計・製造技術や光回路の設計・製造技術の確立を目的として進められている。研究開発は、当初石英を用いた光回路の置きかえを目的としたテレコム向けの活動が見られたが、現在ではシリコンによる低価格性に期待したデータセンター内外の数 10 ギガビット級での超高速接続への応用が期待されている¹⁾。特に、電気通信では実現の厳しい大容量の通信を必要とするボード間、CPU 間などの高速接続に対する技術開発での期待が大きい。シリコンフォトニクスの研究開発は、国内外ともに活発に行われている。わが国は、欧州と同様に、大学や企業研究所における基礎研究を、複数の研究機関が連携した国家プロジェクトで応用実用化する動きが進められている。米国では、同様な動きに加えてベンチャー企業を軸とする実用化の動きがみられる。中国（台湾）は、シリコンファブ機能をシンガポールとともに担っているが、回路設計については特徴的な動きは見られない。韓国では、かつて取り組みが見られたものの、現在のところ顕著な動きは見られない。

(a)–2. 科学技術的・政策的課題

シリコンフォトニクスでは、これまでの垂直統合を軸とした光デバイス産業と異なり、システム要求、デバイス設計、製造、実装が分業すると想定されている。しかし、分業体制が確立している電子回路と異なり、アナログ性能が必要される領域であるため、分業の境界に

おける協同スキームの確立がカギとなる。これにむけては、企業間努力を超えた枠組みが不可欠であり、そのような背景から各国で国家プロジェクトを軸とした投資が行われ、国家競争力の源泉への育成が期待されている。

(a)－3. 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）

シリコンフォトニクス製造については、一部を除きこれまで研究開発機関による小規模製造が中心であったが、ここへきて大規模シリコンファブの参入が開始されている²⁾。その1つにフランス STmicroelectronics がある。国内では、実用化に向けた技術研究組合 PETRA (Photonics Electronics Technology Research Association) が結成され、データセンター向け高速光接続技術の研究開発を大規模に進めている。米国では、DARPA がチップ間やチップ内の高速光接続、欧州では FP7 がデータセンター内のラック間、ボード間の高速光接続やシリコンフォトニクス製造に関わるプラットフォーム整備などの国家プロジェクトとして積極的な支援が行われている。

(a)－4. キーワード

シリコン、導波路、光ネットワーク、高速光接続

(a)－5.国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	東大（光源）、横浜国大（ナノフォトニクス）、東工大（化合物とのハイブリッド技術）、京大（フォトニック結晶）などの活動が顕著
	応用研究・開発	◎	↑	PETRA、NTT、NEC、富士通、沖電気、日立、産総研などでの取組が見られる
	産業化	△	→	製造の主要となるファブはまだ登場していない
米国	基礎研究	◎	↑	MIT（シリコンゲルマ光源）、UCSBなどの活動が顕著。その他多数のナノフォトニクス研究機関の活動が見られる
	応用研究・開発	◎	↑	コンピューター系のIntel、IBM、Oracle、HP、通信系のALU、Ciscoが継続的に活動。
	産業化	◎	↑	Luxtera（短距離トランシーバー）、Molex（パッケージ）FreeScale、BAESystems（FAB）など活発な活動が見られる。
欧州	基礎研究	○	↑	ナノフォトニクスで多数。
	応用研究・開発	◎	↑	ベルギーimec（研究用ファブ）、フランスLetiの活動が非常に顕著。ドイツIHP等も研究用ファブ活動を活発化。
	産業化	◎	↑	STMicrosystemsがファブとしての活動を本格化
中国	基礎研究	○	↑	CAS、清華大、北京大（ナノフォトニクス）など多数の活動あり。
	応用研究・開発	○	↑	CASはスパコン向けインターコネクタに取り組み。通信系ベンダーでも興味を示しているとの動きがみられる。
	産業化	○	↑	SMIC（ファブ）、TSMC（ファブ、台湾）の活動が顕在化しつつある。
韓国	基礎研究	－	－	目立った動きは見られない。
	応用研究・開発	△	→	Samsung、ETRI（チップ間接続）の研究発表は見られるが、全体として少数。
	産業化	－	－	目立った動きは見られない。
シンガポール	基礎研究	△	→	IME（ナノフォトニクス技術）の活動が非常に顕著
	応用研究・開発	◎	↑	IMEが、研究拠点、研究用ファブとて顕著に活動
	産業化	○	↑	ファブとしてGlobal Foundriesが継続的に活動。

(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

(a)－6.引用資料

- 1) 一般社団法人レーザー学会、「シリコンフォトニクスの最新の研究動向」特集号、レーザー研究、第42巻第3号（2014年3月）
- 2) 一般財団法人光産業技術振興協会、「光技術動向調査報告書」、2014年3月

(b)メタマテリアルアンテナ

(b)－1.研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

メタマテリアルとは、広義には、波長よりも小さなスケール（例：マイクロ波帯では数mmから数cmのスケール）の金属・誘電体などの構造体を配置することにより、媒質の実効的な誘電率、透磁率を制御した人工的な材料である。無線通信の必須コンポーネントであるアンテナにメタマテリアルを適用することにより、アンテナの小型化や高機能化が可能となるため、産業界への応用を見据えた研究開発が各国で進展している。

適用領域としては、携帯端末や無線 LAN 機器などのコンシューマ用途、また、基地局や衛星・航空通信用のインフラ・パブリック用途などがあり、主にマイクロ波、ミリ波領域において取り組みがなされている。

メタマテリアルアンテナは、電磁波を放射するアンテナ素子そのものにメタマテリアルを用いた構成、もしくはアンテナ素子の周囲にメタマテリアルを配置した構成に大別される。前者の代表例としては、左手系右手系複合線路(Composite Right/Left Handed Transmission line: CRLH-TL)を用いた漏れ波アンテナ、物理長に依存しない0次共振現象を用いたアンテナ、波長と周波数の関係（分散関係）を人工的に制御したマルチバンドアンテナなど^{1, 2)}が挙げられる。後者の例としては、アンテナ反射板の反射条件を制御した低背化アンテナ、誘電率・透磁率を人工的に制御したレンズの配置による指向性アンテナ³⁾などが該当する。

近年の無線機器の小型化や、無線通信のマルチバンド化に伴い、小型・高機能なアンテナへの需要は高まり、メタマテリアルアンテナの研究開発への期待が高まっている。米国では、DARPA が主催のメタマテリアルワークショップ(2000年開催)を契機として、大型の研究プロジェクトが開始され、基礎研究を中心とした研究開発が進んでいる。現在では、主にベンチャーや企業を中心に応用研究も進展しており、衛星通信用アンテナへの応用など、商用化への動きが見られ始めている。欧州では、通信機器のベンダーにおいて、基地局・携帯端末向けのメタマテリアルアンテナ研究の取り組みがなされている。日本においては、基地局向けアンテナ研究として、企業と大学が産学連携を進めており、また、産業化としてコンシューマ向け無線機器製品へのアンテナ搭載が進んでいる。

(b)－2.科学技術的・政策的課題

メタマテリアルアンテナにおける技術的な課題の一つはアンテナ素子における電力損失の低減である。電力損失は、アンテナ性能の重要な指標である利得や放射効率に影響を与えるため、低損失化は重要なファクターとなる。

低損失化のアプローチとしては、最近では、厳密にはメタマテリアルとは異なるが、メタマテリアルの一部構造のみをアンテナの放射素子として活用したメタマテリアル応用小型・低損失アンテナ^{4, 5)}の取り組みがなされている。また、メタマテリアルを形成する低損失材料の開発も期待が高まっている。

メタマテリアル技術は、周波数に応じて構造の大きさを変えるスケーリング則を適用できるため、新たに設定した周波数でもスケーリングによりアンテナを実現できる。したがって、政策的に無線周波数が新たに追加、変更されても、対応は可能である。ただし、波長の長いマイクロ波領域に比べ、ミリ波、テラヘルツ波領域では、波長が数mm～数百μmオーダー

と極小なため、メタ材料の構造体形成には高い寸法精度が要求され、安価で高い精度で加工可能な製造プロセスが必要となる。

(b)－3. 注目動向

マイクロ波・ミリ波領域では、近年、産業応用の動きが数多く見られる。米国のベンチャー企業であった Rayspan のメタ材料アンテナが、2008 年に NETGEAR(米国)のワイヤレスルータに、2009 年に LG(韓国)のスマートフォンに使用された。以降、数年の間、産業への展開に対しては表立った動きは見られなかったが、2012 年より、NEC(日本)からメタ材料応用の小型アンテナが無線機器製品に搭載、商用化されている。また、米国の Kymeta は、衛星との通信用途向けにメタ材料アンテナを開発したことを発表している⁶⁾。

研究関連の新たな注目動向としては、メタ材料アンテナの動作帯域を広帯域化するため、アクティブ素子を用いて帯域を大幅に広げる試みがなされている⁷⁾。また、マイクロ波領域で確立した設計技術を、テラヘルツ波や光の領域へ拡張した研究についても新たな試みがあり、メタ材料研究の大きな潮流となっている^{8),9)}。

なお、アンテナ分野に限定されたものではないが、メタ材料分野としてみると米国、欧米の各国では、数億円規模の予算が継続的に投入されており、技術革新に対する期待度が高いと言える。日本においても、科研費新学術領域研究「電磁メタ材料」として、2010 年より今年度まで研究プロジェクトが進行中である。

(b)－4. キーワード

メタ材料、左手系、アンテナ、マイクロ波、ミリ波

(b)－5.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	○	→	メタマテリアルアンテナの基礎研究は行われているが、米国の研究から派生した事例が多い。
	応用研究・開発	○	→	企業と大学が共同研究を行うなど産学連携の動きが見られる。基地局向けアンテナなどの研究が進んでいる。
	産業化	◎	↗	NECから無線モジュール、無線LANルータへの搭載事例あり。
米国	基礎研究	◎	→	メタマテリアル分野で著名な研究グループを多く擁し、UCLA、Arizona大をはじめ、メタマテリアルアンテナの基礎研究でも世界をリードしている。
	応用研究・開発	○	↗	衛星・航空・防衛分野の企業を中心に衛星通信向け等の応用研究の事例が目立つ。
	産業化	○	↗	過去には、無線LANルータへの適用事例がみられる。最近では、衛星通信アンテナへの応用に向けた活動が活発化してきている。
欧州	基礎研究	○	→	インペリアル大を中心にメタマテリアル研究をリードしているが、アンテナそのものの研究では米国ほどの成果は見られない。
	応用研究・開発	○	→	通信機器ベンダーにおいて、メタマテリアルアンテナの基地局・携帯端末向けの研究を行っている。
	産業化	×	→	メタマテリアルアンテナの実用化では、目立った動きは見られない。
中国	基礎研究	○	→	メタマテリアルアンテナの基礎研究は数多く行われているが、米国の研究から派生した事例が多い。
	応用研究・開発	○	→	中国最大のメタマテリアル研究開発機関であるKUANG-CHIグループが衛星通信向けアンテナの関連特許を多数出願。但し他の機関からは目立った動きは見られない。
	産業化	×	→	メタマテリアルアンテナの実用化では、目立った動きは見られない。
韓国	基礎研究	○	→	メタマテリアルアンテナの基礎研究は行われているが、米国の研究から派生した事例が多い。
	応用研究・開発	○	→	Samsungなどにより、主に端末向けアンテナの開発が行われている。
	産業化	×	→	過去にLG electronicsによる携帯端末への搭載実績あり。ただしそれ以後実用化では、目立った動きは見られない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
 応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
 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

(b)－6.引用資料

- 1) Lai, C. Caloz, and T. Itoh, “Composite Right/Left-Handed Transmission Line Met-amaterials”, Microwave Magazine, 34-50, 2004
- 2) A. Sanada, C. Caloz, and T. Itoh, “Novel Zeroth-order resonance in composite right/left handed transmission line resonators”, in Proc. Aisi-Pacific Microwave Cnference, 1588-1592, 2003

- 3) C. Mateo-Segura, A. Dyke, S. Haq, and Y. Hao, "Flat Luneburg Lens via Transmission Optics for Directive Antenna Applications", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.62, pp.1945-1953, 2014
- 4) M. Antoniadou and G. Eleftheriades, "A Broadband Dual-Mode Monopole Antenna Using NRI-TL Metamaterial Loading", *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.*, vol.8, 258-261, 2009
- 5) M. Antoniadou and G. Eleftheriades, "A Compact Multiband Monopole Antenna With a Defected Ground Plane", *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.*, vol.7, 652-655, 2008
- 6) <http://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/intellectual-ventures-invents-beamsteering-metamaterials-antenna>
- 7) H. Mirzaei, and G. Eleftheriades, "A Resonant Printed Monopole Antenna With an Embedded Non-Foster Matching Network", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 61, 5363-5371, 2013
- 8) N. Liu, F. Wen, Y. Zhao, Y. Wang, P. Nordlander, N. Halas, and A. Alu, "Individual nanoantennas loaded with three-dimensional optical nanocircuits", *Nano Lett.*, vol. 13, 142-147, 2013
- 9) A. Alu, and N. Engheta, "Wireless at the Nanoscale: Optical Interconnects using Matched Nanoantennas", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 104, 213902, 2010

(c) ミリ波デバイス技術

(c)-1. 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

スマートフォンの普及や、動画伝送などの無線サービスの出現により無線トラフィックは年率約70%で増大しており、10年で500-1000倍に増大すると予想されている。こうした背景のもと大容量無線通信の需要が高まっているが、6GHz以下の周波数は逼迫しており、広い周波数帯域を確保できるミリ波帯(30-300GHz)を用いたギガビット級通信への期待が高まっている。特に、60GHz帯を用いた高速無線LAN(WiGig/IEEE802.11ad)や70/80GHz帯を用いたモバイルバックホール(MBH)向け固定無線システムなどの市場拡大が期待されている。

ミリ波通信用のデバイスとして、かつては高周波特性に優れるGaAsやInP等のIII-V族化合物半導体が主流であった。しかしながら、近年の半導体製造ルールの微細化によって、SiGeやCMOSなどのSi系デバイスでもミリ波帯での動作が十分可能になっている^{1),2)}。無線LAN等のコンシューマ機器では、大量生産時の低コスト化に有利なことや、デジタル回路との集積が可能であることから、65-40nm級のCMOSが主流になっている。一方、MBH向けなどのインフラ機器では、依然としてGaAs ICが使われているが、今後は、SiGeやCMOSによる集積化も進むと考えられる。ただし、インフラ機器向け高出力増幅器に関しては、化合物半導体が使われ続けると予想され、特にGaN FETの微細化によるミリ波領域への適用が期待される。

米国では、無線LAN用ICで実績のあるBroadcom社³⁾やミリ波専門のWilocity社(Qualcomm社が買収)等が、既にWiGig/11ad対応のCMOS ICを製品レベルで開発済みである。日本では、パナソニック⁴⁾、東芝⁵⁾、東工大⁶⁾などが60GHz帯無線通信用CMOS ICの学会発表を行っているが、産業化の観点では、前述の米国のチップベンダーほど積極的な動きは見えていない。

(c)－2. 科学技術的・政策的課題

コンシューマ機器向けのミリ波 CMOS IC における技術的な課題の一つは消費電力の低減である。現状、ミリ波 CMOS IC は 1W 前後の電力を消費しており、バッテリー駆動のモバイル機器に搭載するには大きすぎる。また、高い周波数特有の基板や配線に起因する損失を最小にするために、アンテナと IC を一体化したモジュールや実装技術も重要になる。ミリ波は直進性が強く、遮蔽物のない見通し内でしか通信できないという電波としての使いにくさの克服という課題もある。こうしたミリ波の欠点を考慮したうえで、ミリ波の大容量通信の利点を活かせる通信機器設計と、アプリケーション開発の両方がミリ波通信の普及に向けて重要である。

周波数政策もミリ波通信の普及に大きく影響する。日、欧では 57G~66GHz が、米、韓、加では 57G~64GHz が通信向けに免許不要で使用することができ、コンシューマ向けは 60GHz 帯を中心に実用化が進んでいる。一方、固定無線システムについては、2012 年に国際電気通信連合 (ITU-R) が 70/80GHz、90GHz の勧告を制定し、各国で法整備が進んでいる。これらの周波数は、普及を促進する目的で簡易型の免許の導入が進んでおり、70/80GHz 帯の固定無線システムは小セル用の MBH として実用化が進んでいる⁷⁾。今後も、さらなる高周波帯の開拓が必要と考えられ、各国の事情を踏まえたうえで、適正かつ速やかな制度化が望まれる。

(c)－3. 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）

今後、注目すべき技術動向として、100GHz を超える周波数を利用して 10Gbps を超える大容量通信を目指す動きがある。日本では NTT⁸⁾、海外では Fraunhofer 研究所 (独)⁹⁾ などが 120-300GHz 帯で 10-100Gbps 級の通信デモを行っている。さらに、300GHz を超えるテラヘルツ帯の開拓も進んでいる。これらの超高周波数でも化合物半導体から Si 系デバイスに移行する動きがある。

60GHz 帯を用いた高速通信に関して注目すべき業界動向は、2013 年に無線 LAN の業界団体である WiFi Alliance と、60GHz 帯を用いた高速無線通信の業界団体 Wireless Gigabit Alliance が合併したことである¹⁰⁾。WiFi Alliance は、WiGig の相互接続認証プログラムを 2014 年末にも開始することを発表し、ミリ波通信を搭載したコンシューマ機器とデバイス市場が急速に成長する可能性がある。

ミリ波通信で注目すべき別の業界動向として、第 5 世代携帯電話 (5G) がある。5G では、大容量通信を行うために、ミリ波もしくは準ミリ波 (10G~30GHz) を導入することが議論されている。周波数割り当てが決まるのは、2018-19 年の世界無線通信会議 (WRC18/19) と予想されるが、エリクソン、サムソン、ノキアといった大手通信機器ベンダーは、それに先立ってミリ波通信デモを行っている。欧州では、MiWEBA など 5G 向けのミリ波技術開発を推進する国家プロジェクトが発足しており、日本の総務省とも連携している。巨大産業である携帯電話でミリ波通信が標準化されると、デバイス技術も一気に進展する可能性がある。

(c)－4. キーワード

<キーワード>

ミリ波、CMOS、無線 LAN、WiGig、IEEE802.11ad、固定無線システム、第 5 世代携帯電話

(c)－5.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	○	→	60GHz帯までのミリ波通信は実用化フェーズ。基礎研究は、100GHz～テラヘルツ通信向けのデバイス、IC、システムに移行。
	応用研究・開発	○	→	パナソニック、東芝、東工大などがミリ波CMOS ICの学会発表を行っている。総務省の国プロでも、様々なミリ波応用研究を進めている。
	産業化	○	→	コンシューマ向けCMOS ICの産業化の動きは、やや停滞している感あり。MBHインフラ向け固定通信システム機器では、一定の世界シェアを確保。
米国	基礎研究	◎	→	ミリ波通信は軍需もあり、GaNなど化合物半導体の微細化や新材料・デバイス開発、テラヘルツなどの基礎研究も、産学で手厚く行っている。
	応用研究・開発	◎	→	複数の大学や企業において、ミリ波CMOS ICの低電力化やビームフォーミング技術に関する応用研究が継続して進んでおり、産学の距離も近い。
	産業化	◎	↑	ミリ波無線LAN市場が急速に立ち上がる気運が盛り上がり、有力無線チップベンダーにおいてCMOS IC製品化の準備が進んでいる。
欧州	基礎研究	◎	↑	Fraunhofer研究所（独）をはじめ、高周波デバイスやICの基礎研究では伝統的に存在感を示しており、100GHz超の高速通信の研究でも主導。
	応用研究・開発	◎	→	大学や研究機関(IMECなど)からミリ波ICやモジュールの発表は継続してある。大手通信機器ベンダーは第5世代携帯電話向けのミリ波活用にも積極的。
	産業化	○	→	コンシューマ向けミリ波通信の産業化の目立った動きはない。ミリ波に関しては、通信よりも自動車レーダーの方が盛り上がりを見せている。
中国	基礎研究	×	→	高周波の新デバイスや、100GHz超の新技术など基礎研究では目立った活動なし。
	応用研究・開発	○	→	台湾の大学から、ミリ波CMOS ICに関する発表は一定数、継続してある。
	産業化	○	→	CMOS、化合物半導体共に世界的なファウンダリー企業あり。Huaweiはミリ波通信機器を製品化。MediaTek等は、ミリ波無線LANに参入すると予想。
韓国	基礎研究	×	→	高周波の新デバイスや、100GHz超の新技术など基礎研究では目立った活動なし。
	応用研究・開発	△	↘	ミリ波CMOS ICの発表は少ない。サムソンは第5世代携帯電話向けの準ミリ波通信のデモを行うなど、インフラ向けミリ波通信を強化。
	産業化	△	↘	サムソンは、かつてWiGigやWireless HD等の製品開発に積極的であったが、現在、コンシューマ向けの製品化の動きは下火である。

(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

(c)－6.引用資料

- 1) 丸橋建一 「ミリ波デバイス技術の新展開」 電子情報通信学会誌 Vol.93, No.2, p.100-

- 105(2010)
- 2) 藤島 実、永妻忠夫、渡邊 祐、岡田健一 「ミリ波・テラヘルツハハードウェア最新動向」
Microwave Workshops & Exhibition (MWE2013) Digest, p.121-134, (2013)
 - 3) M.Boers et al., “A 16TX/16RX 60GHz 802.11ad chipset with single coaxial interface and polarization diversity,”2014 IEEE Solid-State Circuits Conference Digest, p. 344-345(2014)
 - 4) T. Tsukizawa et al., “A PVT-variation tolerant fully integrated 60 GHz transceiver for IEEE 802.11ad ,”2014 IEEE Symposium on VLSI Circuits Digest , p.1-2 (2014)
 - 5) S. Saigusa et al., “A fully integrated single-chip 60GHz CMOS transceiver with scalable power consumption for proximity wireless communication ,” 2014 IEEE Solid-State Circuits Conference Digest, p. 348-349(2014)
 - 6) K. Okada et al., “A 64-QAM 60GHz CMOS transceiver with 4-channel bonding,” 2014 Solid-State Circuits Conference Digest, p.346-347(2014)
 - 7) 大槻信也、植田由美、平田明彦 ITU-R 新報告「固定無線方式の利用と将来動向」
ITU ジャーナル Vol.44, No.3, p.6-13(2014)
 - 8) H. Takahashi, et al., “120-GHz-Band Fully Integrated Wireless Link Using QPSK for Realtime 10-Gbit/s Transmission” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.61, no.12, pp.4745-4753(2013)
 - 9) I. Kallfass, et al., “All active MMIC-based wireless communication at 220 GHz,” IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol.1 no.2, pp.477-487(2011)
 - 10) 「滑走路にたどり着いた 60GHz 帯の民生活用」
日経エレクトロニクス 2013年12月9日号 p.30-43

3.2.13 エネルギーハーベストデバイス

(1) 研究開発領域名

エネルギーハーベストデバイス

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

環境中に存在する光、振動、温度差、電波などの様々なエネルギーを電気エネルギーに変換するデバイス。無線センサーノード等のインテリジェントな分散ノードの無給電化を実現するキーデバイスとして期待される。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

モノのインターネット、サイバーフィジカルシステム、トリリオンセンサーなどの言葉で表現される、高度にネットワーク化、インテリジェント化された世界を実現するためには、リアルな世界とサイバー世界との接点となる膨大な数のインテリジェントな分散ノードが、世界のあらゆる場所で長期間機能し続ける必要がある。それらの分散ノードは必ず電源を必要とする。あらゆる場所への電源配線敷設や電池交換がコスト的にすべて正当化される可能性は低いため、代替となる低コストで普遍的な電源技術の確立は急務である¹⁾。

このような代替電源技術は、大きく分けて3種類に分類される。第1のカテゴリは、インテリジェントノードが敷設される環境中にもともと存在する各種のエネルギー（光・電波などの電磁波、振動などの力学的エネルギー、温度差、ポテンシャル差、生化学物質等）を、その場で電気エネルギーに変換して利用する技術である。これがエネルギーハーベスティング技術と呼ばれている。周りの環境中に利用可能なエネルギーが存在する限りは、電気エネルギーを生み出し続けるポテンシャル（可能性）がある。第2のカテゴリは、インテリジェントノードに対して、外部からワイヤレスでエネルギーを供給する技術である。このカテゴリに含まれる技術としては、RFIDを含む電磁波・電磁界による無線給電技術、超音波などの振動やレーザー・LEDなどによるエネルギー供給技術がある。第3のカテゴリは、インテリジェントノードの稼働時間中に必要なエネルギーをすべて内包し、そのまま使い捨てられる技術である。このカテゴリに含まれる技術としては、放射性物質などを利用した完全にクローズドな系の技術、胃酸や尿、樹液などを電解質として取り込んで利用する開放型の技術などがある。これらは、一次電池の一種ではあるが、エネルギーハーベスティングという言葉で表現されていることがある。本項の「エネルギーハーベストデバイス」は、第1のカテゴリのみを対象とする。

エネルギーハーベストデバイスの発電量を決める要因は、大きく分けると2つある。ひとつは、環境からデバイスに供給されるエネルギー流速密度である。デバイスの大きさ、重さや設置場所が決まると、エネルギー流束密度から、最大発電可能量が決まる。実際の発電量をいかにこの理論的な最大値に近づけるかが、研究開発の目標となる。もうひとつは、インテリジェントノードの消費電力である。ノードの消費電力が下がれば下がるほど、エネルギーハーベストデバイスの活用可能領域・アプリケーションは広がり、さらなるデバイスの小型化も可能となる。これらの2要因に影響をおよぼす条件は非常に幅広く、目標値等が一意に定まるものではないが、おおまかな目安、たとえば10マイクロワットというような発電

目標量の数値が、インテリジェントノードの無給電化を目指す研究開発の方向性を大きく規定するものとなっている。

一方、電力の安定供給、温室効果ガス排出量削減といった環境・エネルギー問題を克服するための技術のひとつとして、いわゆる自然エネルギー、再生可能エネルギー技術（太陽電池、水力発電、地熱発電、風力発電、波力発電、潮力発電等）の研究開発・実用化が進められている。エネルギーハーベストデバイスは、コスト的にも発電量的にも、これらの技術の範疇に含まれるものではなく、発電によって直接的な省エネルギー効果をもたらすものではないが、インテリジェントノードの普及を促進することによって、エネルギー生産・流通・消費の効率を改善し、間接的に大きな省エネルギー効果を生み出すことが期待される。

モノのインターネット、サイバーフィジカルシステム、トリリオンセンサーを実現するためのキーデバイスとなるエネルギーハーベストデバイスにおいて、我が国が研究開発や製品化・事業化の主導権をとることができれば、日本の産業の活性化・競争力強化につながることを期待される。一方、その取組みが諸外国に遅れることがあれば、日本の産業の競争力低下につながることを危惧される。

【これまでの取り組み】

エネルギーハーベストデバイスが実用的な意味を持つのは、それを利用する機器の消費電力と発電量とのバランスが取れるときであり、トランジスタの低消費電力化、とくにCMOS回路の発明～普及がその契機となった。クォーツ式腕時計の実現（1969年 セイコー）により、1970年代には早くも太陽電池駆動の腕時計が発売され、1980年代には手首の動きで発電する腕時計、1990年代には体温と外気温の温度差で発電する腕時計が国産メーカーにより次々と商品化された。他にも1970年代に発売された太陽電池駆動の電卓、1980年代に発売されたトイレの自動水栓（水流で発電し、赤外センサーと電磁バルブに給電）など、20世紀終わり頃には、我が国の民生品がエネルギーハーベストデバイスを活用した製品で世界をリードしていた。このような製品化が実現するためには、発電技術の開発のみならず、電源回路・蓄電技術、低電圧駆動IC、各種の低消費電力技術との統合が必要であり、半導体技術を含め我が国のものづくりの強みが発揮された結果であった。

一方、米国においては、軍事技術としてのエネルギーハーベスティング技術研究開発の歴史が長く、DARPAやNASAがスポンサーとなって各種の要素技術の開発が行われてきた。一時期、1990年頃にエネルギーハーベスティング技術への注目が高まったが、当時の電子デバイスに要求される発電量とのギャップもあり、実用化は進まなかった。その後、最近では再びDARPA等を通じて多くの資金が研究開発に供給されるようになっており、多くの大学や大学発のベンチャー企業を中心に、各種関連技術の研究開発が盛んに行われている。また、一部民生転用された製品も販売されている。1999年にカリフォルニア大学バークレー校のJ. M. Kahnらによりスマートダスト（無給電の数ミリ角のセンサーノードによる無線センサーネットワーク）が発表され、当時実用化されることはなかったが、このコンセプトが現在のモノのインターネット、サイバーフィジカルシステム、トリリオンセンサーの原点となっている。

欧州のエネルギーハーベスティング技術への取り組みは、米国よりも遅かったが、環境問題への注目が高まる21世紀に入ってから、EUで大規模な研究開発資金の供給が続けら

れているばかりでなく、さらに EU 各国も独自に自国の大学・企業向けに研究開発の支援を行っており、現在、エネルギーハーベストデバイス研究の層の厚さと幅広さでは、米国をも凌駕している。例えば、2014 年 4 月の時点で調べたところ、EU の研究開発プログラムのうち、エネルギーハーベスティング関係のプロジェクトが、少なくとも 51 本、同時に実施中であった²⁾。材料開発や新規原理のデバイス開発から、無給電ネットワークアプリケーションの開発実証まで、様々なプロジェクトが産官学の連携で進められている。欧州にはエネルギーハーベストデバイスの開発や利用を進める企業も多い。

アジア地域においては、中国（香港を含む）、台湾、韓国、シンガポールなどでエネルギーハーベスティング技術開発の取り組みが進められている。中国では、物聯網（モノのインターネット）の推進が国家戦略となるなど、政府としての取り組みがみられる。アジア諸国の大学が欧州や米国との共同プロジェクトに参画することも増え、論文の発表数も増えてきている。

[今後必要となる取り組み]

エネルギーハーベストデバイスの実用化・事業化が進展するために必要となる研究開発面の取り組みとしては、単体デバイスとしての効率向上、入力変動に対する動作安定化、信頼性・寿命の向上、用途に応じた形状等の最適化、低コスト化などがある。

エネルギーハーベストデバイスの効率向上については、3 つの要素に分解できる。まず、外部環境のエネルギーをデバイスに取り込むときの効率を向上させることが必要である。例えば光発電であれば、表面の反射率を低下させる表面加工技術、複数波長を吸収するマルチジャンクション（多接合）技術、色素増感太陽電池のラフネスファクター（実表面積の倍率）を増大する技術、フレネルレンズなどの集光技術などにより、光エネルギーをデバイスに取り込む効率を向上させることができる。力学的エネルギーを利用した発電であれば、てこ構造、風レンズのような増速機構、ジャイロ構造などを利用して機械的インピーダンスのマッチングをとることで、デバイスに力学的エネルギーを取り込む効率を向上させることができる。温度差を利用した発電であれば、ヒートシンクの高性能化や適切な熱設計によって、熱インピーダンスのマッチングをとることで、デバイスに熱エネルギーを取り込む効率を向上させることができる。

次に、デバイスに取り込んだエネルギーを電気エネルギーに変換する効率を向上させることが必要である。例えば光発電であれば、バンドギャップの最適化、再結合の抑制、電気抵抗の低減など、力学的エネルギーを利用した発電であれば、バネ等内部構造の最適化やエネルギー変換材料の電気機械結合係数等の特性向上など、温度差を利用した発電であれば、熱電変換材料の性能指数等の特性向上などによって、電気エネルギーへの変換効率を向上させることができる。

さらに、発電した電気エネルギーを二次電池やキャパシターなどの蓄電デバイスに蓄積する効率を向上させることが必要である。単に、電氣的インピーダンスのマッチングをとるだけでなく、発電機構にフィードバックをかける SSHI (Synchronized Switch Harvesting on Inductor) 技術などによって、さらに効率が向上する。

環境中のエネルギーは常に一定しているとは限らないため、入力変動に対する動作安定化の技術を開発していくことも重要である。エネルギー源の変動に対応する技術としては、例

例えば光発電では光源の移動などに対応できる静的・動的機構、力学的エネルギーを利用した発電では周波数チューニングや広帯域化機構、温度差を利用した発電ではバイメタル等を利用した構造最適化技術などがある。さらに、各種インピーダンスのマッチング状態を維持する制御技術（MPPT：Maximum Power Point TrackingやMPTT：Maximum Power Transfer Tracking など）、変動する発生電圧や蓄電電圧に応じて充電回路を最適制御する制御技術なども挙げられる。エネルギーハーベストデバイス側で環境のエネルギー変動を完全に吸収できない場合、あるいはそのような制御が全体コストを上昇させる場合には、電力消費側のアプリケーションに発電・蓄電状態を伝えてアプリケーション動作を最適化するエネルギーウェア技術も必要となる。

信頼性・寿命の向上のためには、材料、構造、製造プロセスなどの研究開発の他に、試験方法の確立も必要となる。用途に応じた形状等の最適化も利用可能性を拡大するためには重要であり、小型化・軽量化・薄型化・フレキシブル化等も求められる。普及のためには低コスト化も必須であり、一次電池等の競合技術に対する価格優位性の確保が求められる。

以上のように、エネルギーハーベストデバイスが低コストで信頼性のある電源として広く活用されるためには、多くの取り組みが必要となる。特に、単体の技術開発だけでなく、それらを統合した全体最適化の観点からの取り組みが必要とされる。

（４）科学技術的・政策的課題

欧米中韓等の諸国が国主導でエネルギーハーベスティング技術の研究開発を推進している状況にあって、我が国の政策的取り組みの遅れは顕著である。20世紀の終わり頃には、我が国は民生用途でのエネルギーハーベスティング製品展開で諸外国に先行したが、その後、電子機器の消費電力の低下がさらに進み、特に低消費電力無線技術と組み合わせた無線センサーネットワーク技術等への適用可能性が急速に拡大する近年、我が国では政策的な取り組みがほとんど行われてこなかった。個別の要素技術においては、我が国にも優れたシーズが存在するが、エネルギーハーベストデバイス全体としての研究開発や製品化・事業化の取り組みでは、欧米に対する遅れは顕著であり、その要因のひとつは、政策的な取り組みの差であると考えられる。

腕時計への適用で象徴されるように、エネルギーハーベストデバイスは、潜在的には我が国産業の強みが発揮できる分野である。まだモノのインターネット市場の立ち上がりが顕著ではない現時点において、強力な政策的取り組みを立ち上げることで、市場が顕在化する時期において我が国のエネルギーハーベストデバイスの普及をはかり、もって我が国産業の競争力を向上させることができると期待される。

個別の要素技術の開発ばかりでなく、それらを統合化・最適化する技術の開発、さらには製品化につなげるためのプロセス改善や量産技術の確立まで、産学連携によりシームレスにつなげる体制の構築、そして政府の需要喚起策による市場創造とグローバル展開の支援を一体として進めることができれば、先行する諸外国へのキャッチアップと国際競争力の強化が期待できる。

エネルギーハーベストデバイスの標準化については、諸外国においても試行錯誤が続いている。性能や信頼性の評価基準については、米国の Energy Harvesting Workshop における

標準化委員会、欧州の Metrology for Energy Harvesting プロジェクト、ISA (the International Society of Automation) の 100.18WG などでも研究開発や議論がされているが、国際標準化されたものはない。IEC の TC47 において、韓国から圧電式振動発電、熱電発電、電磁誘導式振動発電の標準化提案がなされ、審議中であるが、内容としては不十分なものである。実環境における性能・信頼性を評価できる基準の有無は、研究開発や実用化、普及の鍵となるものであり、早期の取り組みが望まれる。

(5) 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] ³⁾⁴⁾⁵⁾

光発電では、2013 年に最も注目されたのはペロブスカイト型太陽電池の急速な効率向上であり、Science や Nature が取り上げることとなった。2009 年に桐蔭横浜大学で発明された技術ではあるが、現在は欧州や韓国が効率競争を進めている。

振動発電では、実環境にある広帯域の振動に対応できる技術の研究開発が非常に盛んになっている。振動発電デバイスが広く普及するかどうかの鍵となる技術である。

有機系の熱電材料が注目されている。理論的に性能指数 ZT が 15 を超える可能性があるとして発表されて以来、研究が活発化してきた。ここ数年で ZT が 15 の材料が実現する可能性は低いと考えられるが、もしも実現すれば体温等の熱源からヒートシンク不要で発電できるようになり、ウェアラブル用途への展開が期待される。

ハーベスティングデバイスと組み合わせる電源回路の研究も活発である。SSHI (Synchronized Switch Harvesting on Inductor) 関連技術をはじめとして、電源回路の工夫によってハーベスティングデバイスの性能を向上させられることが実証され、実用化に向けた研究が加速している。

エネルギーハーベスティングデバイスと組み合わせるのに適した蓄電デバイスの開発は遅れている。低い内部抵抗、低い自己放電率、良好な充放電サイクル特性と長寿命、温度範囲の広さなどを兼ね備えた新たな蓄電デバイスの開発・実用化が期待される。具体的には、電気二重層キャパシタの低リーク化・大容量化、リチウムイオン二次電池の充放電サイクル性能向上・内部抵抗低下、リチウムイオンキャパシタなどの新規蓄電デバイスの改良などの方向性が考えられる。現在、スマートグリッドや交通システム向けに大容量の蓄電デバイスの開発が盛んに行われており、それらの技術成果のエネルギーハーベスティング用途への転用にも期待がかけられている。

[大規模プロジェクトの動向]

我が国においては、太陽電池や熱電材料の研究開発プロジェクトは実施されているが、エネルギーハーベストデバイスという切り口での大規模プロジェクトはほとんど実施されていない。「ナノエネルギーシステム創生の研究」(学術創成研究費、平成 18 年度～22 年度)が実施されている程度である。

一方、米国や欧州では、多くのプロジェクトが実施されている。米国は軍関係の予算の場合実態が明らかでないが、年間 100 億円程度の研究開発支援が継続的に行われているという(英国 Perpetuum 社の Roy Freeland 氏による)。欧州では、50 件以上のエネルギーハーベスティング技術研究開発プロジェクトが同時並行で実施されている。大規模なプロジェクト

（ここでは仮に、200 万ユーロ以上の支援が行われているプロジェクトとする。）の一部を以下に挙げる²⁾。

- **NEMESIS (Novel Energy Materials: Engineering Science and Integrated Systems)**
強誘電体材料及び圧電材料を利用した、広帯域環境振動、温度変動からの発電技術開発、水分解技術開発（EU 支援額：2,266,020€）
- **MANPOWER (Energy Harvesting and Storage for Low Frequency Vibration)**
低周波（100Hz 以下）でチューニング可能な振動発電デバイスと高エネルギー密度の小型スーパーキャパシタを開発し、人体に埋め込み可能な永久自立電源エレクトロニクスシステムの実証を行う。（EU 支援額：3,946,939 ユーロ）
- **SINAPS (Semiconducting Nanowire Platform for Autonomous Sensors)**
周囲の光からエネルギーをハーベストし、単体で動く塵サイズ（立方ミリ未満）の化学センシングプラットフォームを開発する。（EU 支援額：2,369,999 ユーロ）
- **MESOLIGHT (Mesoscopic Junctions for Light Energy Harvesting and Conversion)**
色素増感太陽電池の効率向上と多接合化（EU 支援額：2,046,000 ユーロ）
- **SOFT-MAP (Stretching soft matter performance: From conformable electronics and soft machines to renewable energy)**
柔構造のエレクトロニクス、ソフトマシン、エネルギーハーベスタを開発する。ハーベスタとしては水を誘電体とした可変容量コンデンサ構造に注目する。（EU 支援額：2,494,800 ユーロ）
- **DSENSY (Doping, Charge Transfer and Energy Flow in Hybrid Nanoparticle Systems)**
異種材料を単一のハイブリッドナノシステムへ組み合わせるナノ結晶科学分野でフロンティアを狙う。光発電、生物の標識付け、センシング、などへのインパクトが期待される。（EU 支援額：2,499,000 ユーロ）
- **THERMOMAG (Nanostructured energy-harvesting thermoelectronics based on Mg₂Si)**
ナノ構造のバルク Mg₂Si をベースとした新しい熱電材料の開発とモジュール化、実証を行う。（EU 支援額：3,986,980 ユーロ）
- **WIBRATE (Wireless, Self-Powered Vibration Monitoring and Control for Complex Industrial Systems)**
自動車製造、航空宇宙および鉄道産業分野において、振動発電を自立電源とした振動の無線モニタリング・制御システムを開発・実証する。（EU 支援額：2,849,883 ユーロ）
- **SENSATION (Self Energy-Supporting Autonomous Computation)**
エネルギーハーベスティングと消費電力のバランスをとる製品レベルの無給電システムの開発を目指す。（EU 支援額：2,100,000 ユーロ）
- **POLYWEC (New mechanisms and concepts for exploiting electroactive POLYmers for Wave Energy Conversion)**
波力発電のための電気活性エラストマ材料の最適化、構造設計、シミュレーション、小規模プロトタイプ開発、経済的・環境的アセスメントを実施する。（EU 支援額：2,059,156 ユーロ）
- **MATFLEXEND (MATERials for FLEXible Energy harvesting Devices)**

逆エレクトロウエッティングの原理によるエネルギーハーベスタ技術・蓄電技術を開発する。（EU 支援額：3,849,050 ユーロ）

- **DYNXPERS (Plug and Produce Components for Optimum Dynamic Performance Manufacturing Systems)**
スマート材料を使用し、環境条件に適応するインテリジェントな振動発電センシングシステムを開発する。（EU 支援額：3,449,195 ユーロ）
- **MERGING (Membrane-based phononic engineering for energy harvesting)**
フォノン工学に基づき薄膜熱電材料と小型熱電モジュールを開発する。ZT=2.5 が目標。（EU 支援額：2,849,654 ユーロ）
- **PILOTMANU (Pilot manufacturing line for production of highly innovative materials)**
メカニカルな合金化設備および粉末材料製造設備を試験ラインにアップスケールする。代表的アプリケーションは、水素貯蔵用の Mg 水素化物、熱電材料、難燃性繊維、急速プロトタイピング用のポリマーナノ合成物。（EU 支援額：4,014,465 ユーロ）
- **MSP (Multi-Sensor-Platform for Smart Building Management)**
CMOS とセンサーの 3D 統合技術開発。高効率なハーベスタ（太陽光発電、圧電発電）、各種センサー（ガス、パーティクル、IR、光、UV-A/B）を低コストで大量生産できるプラットフォーム技術を開発する。（EU 支援額：12,505,467 ユーロ）
- **CONVENIENT (Complete Vehicle Energy-saving Technologies for Heavy-Trucks)**
長距離貨物輸送車両の燃料消費を 30%削減する。トラックやセミトレーラーのルーフに取り付けられた太陽電池のようなエネルギーハーベスティングデバイス、セミトレーラーの新しいハイブリッド動的エネルギー回収システムなどを含む。（EU 支援額：9,897,169 ユーロ）

これらのように、材料開発からシステム開発実証まで、さまざまな大規模プロジェクトが実施されている状況である。さらに、国のレベルでもプロジェクトが実施されており、我が国との格差は大きい。

（6）キーワード

太陽電池、レクテナ、振動発電、電磁誘導、圧電効果、静電誘導、エレクトレット、逆磁歪効果、熱電発電、熱光発電、熱電子発電、熱音響発電、焦電発電、バイオ燃料電池、バイオ微生物電池、無給電、自立電源、無線センサーネットワーク、モノのインターネット、IOT、サイバーフィジカルシステム、CPS、インダストリアル・インターネット、トリリオンセンサー

(7) 国際比較 ^{3),4),5),6)}

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	○	↑	欧米と比較すると全体的に研究者の層は薄い。エレクトレット材料、圧電材料、磁歪材料など、材料分野では一部優位性がある。発電機構や回路技術でも、特定研究者の研究に見るべきものはあるが、研究者が少なく、広がりには欠ける。
	応用研究・開発	○	↑	企業でのプロトタイプ開発は増えており、海外と比較して技術的な優位性がみられるものもある。
	産業化	△	→	応用研究・開発が大企業中心であり、顕在化した市場がない現状で産業化は停滞している。
米国	基礎研究	◎	→	DARPAやNASAの支援による研究開発の歴史が長く、研究者層・技術シーズが厚い。 MIT、スタンフォード、ジョージア工科大、バージニア工科大などは研究者も多く、多様なシーズ開発が行われている。
	応用研究・開発	◎	→	大学発のベンチャー企業が多く、プロトタイプの開発は活発である。 MicroGen Systemsなど量産間近の企業もある。
	産業化	◎	↑	ベンチャー企業中心に、製品化が進む。市場拡大にともなって、ベンチャー企業を、より大きな企業が買収し始めている。（Linear Technology、Laird tech、Lordなど）
欧州	基礎研究	◎	↑	EUレベルや国レベルの積極的な支援もあり、基礎研究は非常に盛んである。発電技術だけでなく、電源回路技術やトータルなシステム最適化の研究も厚みがある。英国、フランス、ドイツ、イタリア、スイスに研究者が多い。
	応用研究・開発	◎	↑	産学連携のプロジェクトによるプロトタイプ開発・実証も盛んに行われている。自動車会社、航空会社なども実用化に取り組む。
	産業化	◎	↑	製品を販売するベンチャー企業は増えており、市場は拡大傾向にある。大企業の取り組みも増えてきた。（ABB、Philips、ST Microelectronicsなど）
中国	基礎研究	△	↑	政府からの潤沢な資金供給が行われている模様（清華大学研究者より）。論文発表数は増えている。
	応用研究・開発	△	→	ASTRI（香港）などでのプロトタイプ開発は行われているが、近年大きな動きは見られない。
	産業化	△	→	熱電材料や圧電材料のメーカーが活動しているが、エネルギーハーベストデバイス市場での存在感は薄い。
韓国	基礎研究	△	↑	発表論文数は顕著に増えつつある。
	応用研究・開発	△	↑	サムスンやLGなどが研究開発を加速している。国際標準化に向けた活動も活発である。
	産業化	×	→	未だ製品化には至っていない。

(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

（8）引用資料

- 1) 調査報告書（IDTechEx、Winter Green Research、Yole など）
- 2) EU の FP7 プロジェクトについては CORDIS（Community Research and Development Information Service）ウェブサイト（http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html）で検索可能
- 3) 国際会議報告（PowerMEMS、Transducers、SENSO Conference など）
- 4) Energy Harvesting Network（<http://eh-network.org/>）
- 5) Energy Harvesting Journal（<http://www.energyharvestingjournal.com/>）
- 6) 海外イベントでの発表（Energy Harvesting & Storage USA、Energy Harvesting & Storage Europe、Sensors Expo など）

3.2.14 電源

(1) 研究開発領域名

電源

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

バッテリー等のエネルギー源から供給される直流または交流電圧を電子機器が必要とする直流電圧に変換するデバイス・回路・システムに関する研究開発。ただし、100W 以上を扱うパワーエレクトロニクスは本研究開発領域の対象外とする。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

電源回路技術は電子機器の多機能化・低電力化・小型軽量化を実現する上での基盤技術として、近年、重要さを増している。図 3.2.5 に、今後、重要になると考えられる電源回路の 5 つの技術トピックを示す。

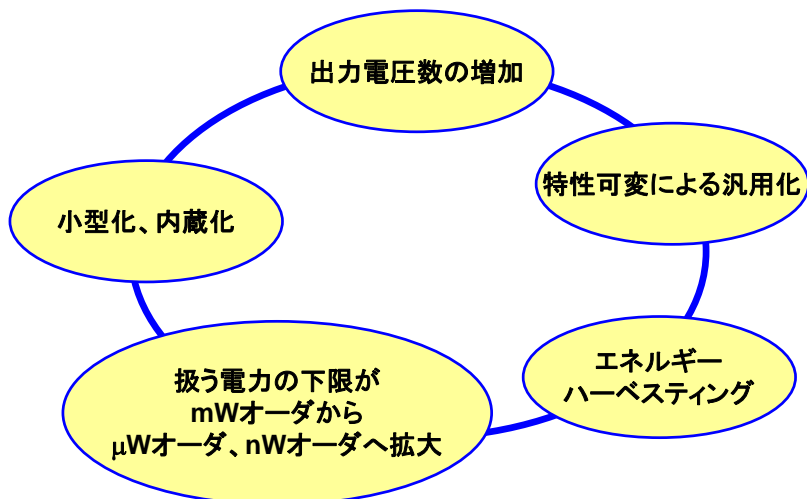


図 3.2.5 電源回路の 5 つの重要な技術トピック

①出力電圧数の増加

電子機器の低消費電力化はアプリケーションを問わず共通課題であるが、低消費電力化を実現するためには、多数種類の電源電圧が必要となる。そこで、電源回路をプリント基板上または LSI 上に多数個搭載することが求められる。また、時々刻々変化する電子機器の要求性能に応じて、電源電圧を動的に変化させることにより低消費電力化することができるため、電源電圧を俊敏に（例えば ns オーダーで）変化させることも重要となる。

②小型化、内蔵化

前述の電源回路の個数を増やすのはコスト・スペースの観点から通常は許されない。そこで、複数種の電源電圧を実現するためには、電源回路の小型化が必須となる。一般に電源回路の大きさ（体積）を決めるのは、インダクター、キャパシターのようなディスクリートの受動部品である。従来、インダクターは、プリント基板上にチップ

部品として実装されてきた。チップ部品は体積が大きいため、電子機器の小型化の障害となっている。そこで、インダクターを小型化する手段として、スパイラルインダクターをパッケージに内蔵する方法がある。パッケージ内蔵のスパイラルインダクターを利用した DC-DC コンバーターを搭載した例として、電源業界にインパクトを与えたのがインテルの 22nm CMOS を用いた Haswell プロセッサ¹⁾である。プロセッサのパッケージ外部からは 1 つの電源供給で、パッケージ内部で 12 種の電源電圧を生成している。これを用いてプロセッサのコア毎に電源電圧をきめ細かく制御することによりプロセッサ全体としても低消費電力化を実現するだけでなく、プリント基板上のインダクター、キャパシターの搭載数を減らすことによりプリント基板の電源回路領域の面積を削減することにも成功している。将来技術として究極の小型化としては、スパイラルインダクターを LSI 上に内蔵する方法がある。しかし、LSI 上の配線の厚さは約 $1\mu\text{m}$ と薄く寄生抵抗が高いため、インダクターの抵抗損による電源回路の効率低下が課題である。

③扱う電力の下限が mW オーダーから μW オーダー、nW オーダーへの対応

現在、市販されている典型的な降圧型 DC-DC コンバーター（Buck コンバーター）の出力電圧は 0.6V 以上、出力電流は 1mA 以上であるので、扱う電力の下限は 1mW 程度である。しかし、今後は電源回路が扱う電力の下限を μW オーダー、nW オーダーにする必要性が高まる。理由は 2 点ある。第 1 には、スリープモードへの対応である。低消費電力技術として、機器が使われていない場合に回路をスリープさせる技術が重要である。スリープ時には消費電力が mW オーダー以上から μW オーダーへと下がるために、 μW オーダーでも高効率な電源回路が求められる。第 2 には、 μW オーダー、nW オーダーで動作する無線センサーノードへの対応である。IoT（Internet of Things）の世界を実現するためには、超低消費電力で小型の無線センサーノードを実現する必要があるが、これらの無線センサーノード全体の消費電力は典型的には μW オーダー、要素回路の学会レベルの報告としては nW オーダーである。

④エネルギーハーベスティングへの対応

バッテリーで動作する多数個の無線センサーノードを設置した場合、バッテリーの交換・充電コストが運用上の問題となる。そこで、光、振動、温度差などの環境エネルギーを電気エネルギーに変換して利用するエネルギーハーベスティング技術が、バッテリー交換不要の無線センサーノードを実現する技術として注目されている。現在、多種多様なエネルギーハーベスティング源が研究開発されているが、得られる電力が不安定で、扱いにくい電圧・電流であることが多いのが問題である。そこで、これらの問題を電源回路と蓄電素子（バッテリー、キャパシター）を含むパワーマネジメント技術で解決することが重要な研究課題である。

⑤広範囲動作または特性可変による汎用化

③で述べたように、今後、電源回路の電圧範囲・電力範囲は拡大していく。また、④で述べたように、エネルギーハーベスティングのような新しいアプリケーションに

対応した電源回路も増えるであろう。ここで問題になるのが、電源回路の品種数の爆発である。現在は、ユーザーのニーズに細やかに応えるために電源回路の品種数は多い。例えば、Texas Instruments の web にてパワーマネジメント IC の品種数を調べると、DC/DC スイッチング・レギュレーターで 1213 品種、リニア・レギュレーター (LDO) で 1362 品種ある（2014 年 10 月時点）。これまでに述べてきた電源回路の将来のニーズに対応するために、電源回路の品種数をさらに増やすことはビジネス上好ましくない。そこで、今後は、電源回路の動作電力範囲を広げたり、FPGA のようにソフトウェアによって電源回路の特性を可変にすることによって 1 つの電源 IC で多種多様のニーズに応えることが期待される。

（４）科学技術的・政策的課題

- ・パワーエレクトロニクス分野では日本でも海外でも大規模研究開発プロジェクトが多数実施されているが、電子機器向けの電源回路分野にフォーカスした大規模研究開発プロジェクトは見当たらない。
- ・日本としては、(1)世界的シェアの高いキャパシター・インダクターなどの部品メーカー（京セラ、村田製作所など）、(2)材料分野の研究開発力（インダクター向けの磁性材料など）、(3)世界トップクラスのパワーエレクトロニクス・パワーデバイス（GaN、SiC、Si）の 3 つの強みを生かして電子機器向けの電源回路の技術力を高める必要がある。

（５）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）

- ・Brain Machine Interface (BMI) や人工臓器、カプセル型内視鏡などの応用に向け、人間の脳や人体に埋め込んだ小型の医療機器に対する体外からのワイヤレス給電や、体内でのエネルギーハーベスティング向けの電源回路の学会発表が米国・台湾・香港の大学から相次いでいる。高齢化先進国の日本において医療・ヘルスケアは重点分野であるため、医療・ヘルスケア分野の電源回路技術の強化は急務である。

（６）キーワード

- ・電源、パワーマネジメント IC、DC-DC コンバーター
- ・エネルギーハーベスティング
- ・ワイヤレス給電

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	電源回路を研究対象とする大学研究室はあるが、数は少ない。
	応用研究・開発	○	→	電源ICを扱う半導体メーカー各社が開発を行っているが、特筆すべき成果は見当たらない。
	産業化	◎	→	リコー、セイコーインスツル、トレックス・セミコンダクター、ローム、新日本無線、東芝 セミコンダクター&ストレージ社、旭化成エレクトロニクス、新電元工業、ルネサス エレクトロニクスなど電源ICを扱う半導体メーカーの数は多いが、各社の製品ラインアップは広くない。
米国	基礎研究	◎	→	マイクロプロセッサ向けのオンチップ電源、超小型無線センサーノード・生体埋め込み機器向け電源回路など様々なアプリケーションの観点から電源回路を研究対象とする大学研究室があり、研究の多様性に富んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	マイクロプロセッサ向けのオンチップ電源としてIntelがBuckコンバーターを、IBMがスイッチトキャパシター電源回路の研究開発を精力的に推進している。
	産業化	◎	→	世界的に著名な多くの電源ICメーカー（Texas Instruments、Linear Technology、Maxim Integrated Products、Analog Devicesなど）が存在し、産業化の観点では世界をリードする。エネルギーハーベスティング向け電源回路の分野ではLinear Technologyが著名である。
欧州	基礎研究	◎	→	IMEC、フライブルク大学において、エネルギーハーベスティング向け電源回路の研究が活発に行われている。
	応用研究・開発	○	→	当該分野の活動・成果が見えない。
	産業化	◎	→	パワーエレクトロニクスの分野で世界シェア1位のドイツのInfineon（Siemensから1999年にスピンオフして設立）が電子機器向けの電源回路の分野でも一定の存在感を示している。同じくSiemensからスピンオフして2001年に設立されたEnOceanはエネルギーハーベスティング向け電源回路と無線回路をセットで提供し、エネルギーハーベスティング分野で著名である。
中国	基礎研究	◎	→	香港理工大の電源回路、ワイヤレス給電の研究レベルは非常に高い。
	応用研究・開発	△	→	当該分野の活動・成果が見えない。
	産業化	△	→	当該分野の活動・成果が見えない。
台湾	基礎研究	◎	↗	電源回路を研究対象とする大学研究室の数が日本よりも多い。Richtekと産学連携した台湾交通大学の研究活動が目立っている。
	応用研究・開発	△	→	当該分野の活動・成果が見えない。
	産業化	○	↗	台湾の電子産業の上昇に伴い、電源ICメーカー（Richtek、Taiwan Semiconductor）の活動も活発化している。
韓国	基礎研究	○	→	KAISTの電源回路、ワイヤレス給電の研究レベルは非常に高い。しかし、KAIST以外の研究グループの活動は見えない。
	応用研究・開発	△	→	当該分野の活動・成果が見えない。
	産業化	△	→	Samsungが電源回路、ワイヤレス給電の開発を行っている。Samsungで以外の活動は見えない。

（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

（8）引用資料

- 1) N. Kurd et al., "Haswell: A Family of IA 22nm Processors," IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 112-113, 2014.