

ユビキタス社会に向けた ナノエレクトロニクス技術への期待

Expectations for Nanoelectronics Technologies toward Ubiquitous Network Society

石川 正行 平岡 俊郎

■ ISHIKAWA Masayuki

■ HIRAOKA Toshiro

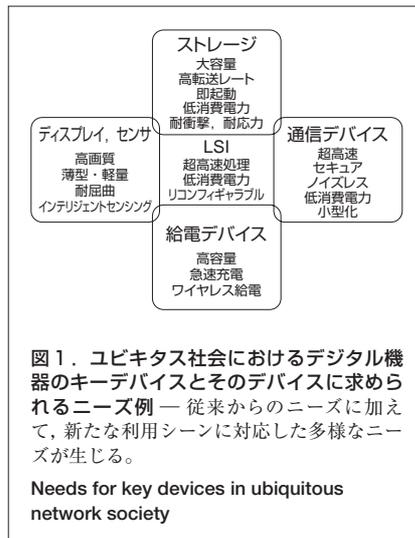
ロードマップに沿った性能向上が、エレクトロニクス技術の飛躍的な進化の原動力となってきた。しかし今後、このようなロードマップによるエレクトロニクス技術の進化は物理的な限界を迎えると予測される。こうした“ロードマップの限界”をきっかけに、ユビキタス社会におけるニーズの高度化と多様化に牽引(けんいん)される形で、エレクトロニクス技術はこれまでにない大きな変化を起こすと考えられる。その際、エレクトロニクス技術は“ロードマップの限界を越える”方向と“新たな価値軸を加える・変える”方向の二つの方向で展開できる可能性がある。2010年から2020年にかけて訪れるこの変化は、ナノテクノロジーに基づく技術革新による、多種多様なイノベーションが生まれる起点になると期待される。

Performance improvement along a road map is driving the development of electronics technologies. However, it is predicted that the road map of electronics technologies will encounter technological limits. New developments in electronics technologies due to the limits of the road map and the wide array of needs in the ubiquitous network society are therefore expected. Electronics technologies will develop in two directions in this context: toward surpassing the limits of the road map on the one hand, and toward adding or changing the value axis on the other. A wide diversity of innovations by revolutionary nanotechnologies will appear due to these developments around 2010-2020.

ユビキタス社会の 多様なニーズと新市場への期待

ユビキタス社会におけるデジタル機器のキーデバイスには、従来からのニーズに加えて、新たな利用シーンに対応した、様々なニーズが生ずると考えられる(図1)。こうしたニーズ群は、多種多様なアプリケーションの源泉となり、ユビキタス社会において大きな市場を形成することが期待される。総務省によれば、ユビキタスネットワーク関連の市場規模は2010年に約84兆円⁽¹⁾まで成長すると試算されており、波及効果も含めれば、その市場規模は巨大である。

ユビキタス社会におけるニーズは、高度化と多様化に大別される。高度化のニーズの代表例は、通信速度や処理速度の高速化である。インターネット及び携帯電話の普及によって、個人が日常的に扱うデジタル情報の量が急激に



増大している^(注1)。この増大は、情報が画像データ中心になり、しかも静止画から動画へとシフトすることによって、質的な変化を伴って更に加速すると考えられる。加えて、これら多量のデータを携帯電話などのモバイル機器に蓄積す

る必要から、ストレージデバイスに要求される記憶容量も増加の一途をたどっている。またデジタル機器のユビキタス化には、大幅な低コスト化も必要である。すなわち高速化、高容量化、低コスト化といった従来どおりのニーズは今後も変わらず存在し、かつこれまで以上の高度化が求められる。

加えて、ユビキタス社会におけるエレクトロニクス機器の新たな利用形態に対応した、新しく、かつ多様なニーズが生ずると予想される。例えば、モバイル機器は継続的に使用できて、行動の自由を阻害しないことが求められる。このためには電池も単に高容量化だけではなく、すばやく充電できる急速充電性が重要となる。小型燃料電池のように、燃料補給するだけで継続的に給電できる発電デバイスも同様の効果が期待できる。また、そもそも電池切れのないワイヤレス給電性も、モバイル用途での重要度を増す可能性がある。

また、センサタグなど十分な給電が期待できない用途においては、CPUなど

(注1) 総務省のデータによれば、1998年に306 G (ギガ: 10^9) バイトであったインターネットのコンテンツ量(JPドメインだけで集計)は、2004年には約44倍の13.6 T(テラ: 10^{12}) バイトに達している⁽²⁾。

処理回路の大幅な低消費電力化が必要になる。これはパソコン(PC)用のCPUにおける発熱量低減のための低消費電力化とは目的とレベルが異なる。更に、様々な利用環境に対応して柔軟に回路を書き換えて機能を最適化できるリコンフィギュラブル性も、CPUに対するニーズとして重要性を増す可能性がある。

ハードディスクなどのストレージデバイスにおいても、大容量化が進めば進むほど高信頼性や長期保存安定性が重要になる。大容量になればなるほど、破損によって多量の情報を喪失するリスクが高まるためである。モバイル用途では耐衝撃性や耐応力性も重要となる。

ディスプレイについても、従来の薄型テレビにおける大画面化、高画質化のニーズに加えて、モバイル用途などにおける耐屈曲性など、新たな特性が求められるようになって予想される。

見えてきたロードマップの限界

一方、エレクトロニクス技術はこれまで、主に人々に提供する価値を増大させることを目的として進化を遂げてきた。例えばエレクトロニクス技術の根幹をなすLSIは、トランジスタの素子サイズの微細化によって高速化と低コスト化を実現してきた。また、ハードディスク及び光ディスクなどのストレージデバイスも、記録ビットサイズの微細化によって、記憶容量の向上とビット単価の低減を進めてきた。すなわち、微細化という定まった進化の方向性(ロードマップ)に沿って、高速、大容量、低コストといった人々に提供する“価値”をひたすら増大させてきたのがこれまでのエレクトロニクス技術の進化といえる。こうした進化が長期にわたり可能だったのは、技術的な側面もさることながら、多くのケースにおいて、顕在化した市場ニーズが存在していたことが大きい。顕在ニーズに向けて、研究開発から生産、営業にわたる効率的なリソース投入を行えたことが、これまでの継続的

な進化を支えてきたと考えられる。

しかし、こうしたエレクトロニクスの進化にそろそろ限界が見えつつある。エレクトロニクスの微細化は既にナノ領域に突入して久しく、シングル nm (10 nm 未満)、更にはサブ nm (1 nm 未満)の世界へと進みつつある。例えば、国際半導体技術ロードマップ(ITRS)^(注2)によれば、2020年にはトランジスタのゲート長は6 nmにまで微細化が進むとされている(囲み記事参照)。しかし、この程度のサイズになると、電子の量子性によって室温におけるリーク電流

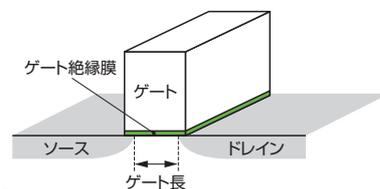
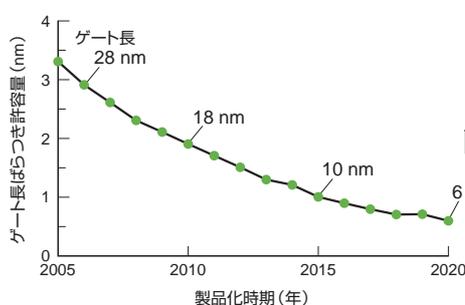
が制御不能になり、トランジスタの動作が難しくなると予想されている。またハードディスクにおいても、記録面密度の増大に伴い記録マークの微細化が進んでいる。2010年ころには記録密度が1 Tビット/in²を超える可能性があり、記録マークの大きさを20 nm角以下に微細化する必要がある。ところが記録マークがこのサイズになると、熱擾乱(じょうらん)の影響により、磁気的に書き込んだ信号が自然に消失するおそれがある。

もちろん、これまでもいわゆるロード

分子サイズにせまる、LSIの加工精度への要求

トランジスタの微細化によって、LSIの集積度は指数関数的に増大してきた。チップ当たりのトランジスタ数は、ムーアの法則が提唱された1965年から2005年までの過去40年間に、6けた近くもの伸びを示している。LSIの世界ではITRSに代表される技術ロードマップが策定され、微細化の指標として位置づけられている。ITRSの2005年版では、2006年には28 nmのゲート長が、2020年には実に6 nmまで微細化すると予測されている。図は、ゲートを製造する際に許容されるサイズばらつきの推移をプロットしたものである。6 nmのゲートを製造するためには、ゲート長のばらつきを0.6 nm以下にする必要があるとされている。LSIの微細パターンは、レジストと呼ばれる感光性材料に、写真を撮

るときのようにパターンを焼き付けて形成する。ところが0.6 nmというサイズは、もはやレジストを構成する分子の大きさと同等以下になってしまう。水分子でさえその大きさは0.3 nm程度あり、レジストを構成する代表的な構造であるベンゼン環にいたっては、0.5 nm近い大きさをもつ。つまり目の粗いがさがの紙に、細かい文字を描こうとするようなもので、たとえトランジスタは作れても、素子特性が不均一でLSIとして動作しないおそれがある。このようにトランジスタの微細化には、動作原理に基づく限界のほかにも、製造プロセス上の限界も存在する。自己組織的に分子を整列させるボトムアップ型プロセスなど、ナノテクノロジーを駆使した新たなプロセス技術の開発も必要となっている。



ゲート長のばらつき許容範囲推移 — ばらつきを分子の大きさと同程度以下に抑える必要がでてくる。

(注2) 国際半導体技術ロードマップ(ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors) 日米欧韓台の世界五地域が共同で作成する、半導体技術に関する国際的なロードマップ。

マップの限界と呼ばれるものは存在した。そして、その限界を打破することによって、エレクトロニクス技術の進歩があった。しかし、今後遭遇する限界の多くは、各デバイスの動作原理自体に根ざした物理的な限界であるという点で、これまでの限界とは様相が異なる。すなわち、先に述べたトランジスタを例にとれば、ソースドレイン間の電流をゲート電圧で制御するという動作原理自身が限界に達しようとしている。同様にハードディスクの例でも問題になっているのは、磁性膜に磁気的なビットを書き込むという磁気記録の原理そのものである。今後のエレクトロニクス技術の進化を考えるうえで、コストの壁とともに、2010年から2020年ころには訪れる、これら物理的限界を避けて通ることはできない。

エレクトロニクス技術の新たな展開

上述したようなロードマップの限界をきっかけに、ユビキタス社会におけるニーズの高度化と多様化に牽引される形で、エレクトロニクス技術はこれまでにない大きな変化を起こすことが予想される。ロードマップの限界は進化の障害ではなく、むしろ技術革新の駆動力となる。また、ユビキタス社会におけるニーズの高度化と多様化は、新市場の可能性を広げるイノベーションの土壌と考えられる。2010年から2020年にかけて訪れるこの変化は、まさに多種多様なイノベーションが生まれる起点になると期待される。

この変化に際して、エレクトロニクス技術は二つの方向で展開できると考えられる。一つは“ロードマップの限界を越える”方向である。ニーズの更なる高度化に対応して、限界を越えて性能追求を進める(図2)。人々に提供する価値の種類、すなわち価値軸は変わらないが、従来のシステムのままでは物理的限界を越えることはできない。

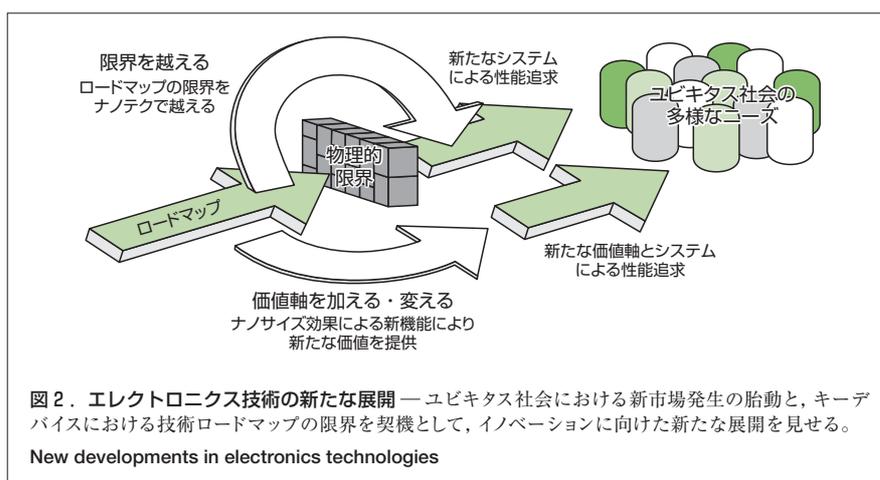


図2. エレクトロニクス技術の新たな展開—ユビキタス社会における新市場発生の胎動と、キーデバイスにおける技術ロードマップの限界を契機として、イノベーションに向けた新たな展開を見せる。
New developments in electronics technologies

物理的限界がシステムの作動原理そのものに起因するからである。よって限界を越えるには、従来のシステムを離れ、新しいシステムを構築することが必要である。

例えば電池の高容量化において、炭素材料を負極に用いたリチウムイオン電池を従来システムとすると、シリコン(Si)ナノ粒子など新しい負極材料を用いた新型電池が、新システムに相当する。従来システムが直面する高容量化の限界を、新しい負極を持つ新システムを構築することによって、越えることが可能になる。

エレクトロニクス技術が展開するもう一つの方向は、“価値軸を加える・変える”方向である。新機能の発現によりニーズの多様化を可能とし、その機能の性能追及を進める。この場合、必ずしも限界を越える必要はない。なぜなら限界に直面しているのは、従来の価値軸に沿った性能追求だからである。新たな価値軸に乗り換えることによって、その軸に沿った性能追求が可能になる。新たな価値軸に乗り換えるためには、新しい機能が必要である。新機能によってまったく新しい市場を開拓する(価値軸を変える)方法、及び新機能を従来の機能に付加することによって差異化を図る(価値軸を加える)方法が考えられる。

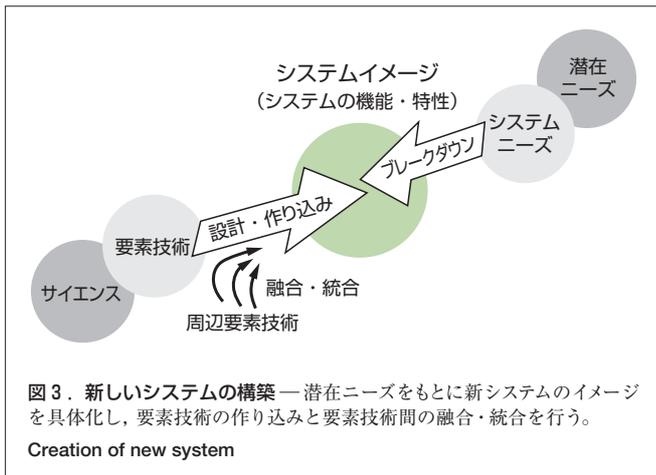
新機能の発現には、新しいシステムの構築が前提となる。電池を再び例に

とると、一般的なリチウムイオン電池が従来システムに相当する。急速充電が可能な急速充電電池は新システムであり、急速充電性が新機能に相当する。この場合、価値軸を高容量化から急速充電性に変えることで、新たな市場を開拓することが可能になる。そのうえ、高容量化とは別に、急速充電性という新たな価値軸に沿った性能追求が可能になる。

このように、エレクトロニクス技術を展開させる方向には、ロードマップの限界を越えるケースと、新機能の発現により価値軸を加える・変えるケースとが考えられる。そしていずれのケースにおいても、新システムを構築することが大前提となる。

イノベーションに向けた研究開発

上述のように、イノベーションに向けたエレクトロニクス技術の展開において、新システムの構築が前提条件となる。新システムはニーズを基に設計される。ところが、ユビキタス社会において、どのようなニーズが生ずるのかは必ずしも明確ではない。更に、人々の欲求が量から質へと変化していることを背景として、ニーズが多様化するとともに潜在化してきている。すなわち新システムの構築には、「人々が本当に欲するものは何か?」という人間中心の考えに立ち戻り、潜在ニーズを掘り起



こす必要がある。

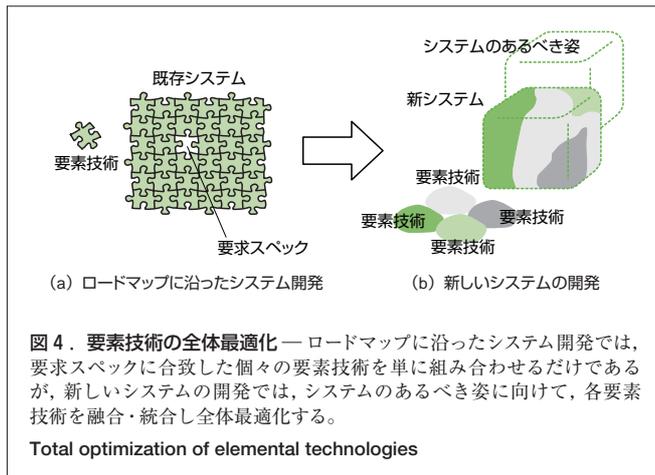
掘り起こした潜在ニーズをもとに、そのニーズに応える新システムのイメージを具体化する。具体化された新システムのイメージに向けて、要素技術の作り込みと、要素技術間の融合・統合を行う(図3)。価値あるシステムを構築するためには、潜在ニーズの顕在化だけでなく、融合・統合を行う要素技術もサイエンスの深い理解に基づくものである必要がある。

ロードマップに沿ったシステム開発では、要求スペックに合致した個々の要素技術を組み合わせる。各要素技術は、決定済みの要求スペックに特性を合わせ込んだ、ジグソーパズルの単なる一片でしかない(図4)。ところが、新システムの開発にあたっては、既存システムが存在しない。そこにはニーズから外挿された新システムの輪郭、すなわちアプリケーションのイメージが存在するだけで、システムの構成、つまり個々の要素技術がどのように組み合わせられるかが決まっていない。当然のことながら、個々の要素技術に対する要求スペックも、要素技術の構成によっていかようにも変化しうる。こうした状況においては、要素技術ごとの個別の最適化や性能追求は意味を成さない。システム全体を俯瞰(ふかん)し、全体設計に基づいて、あたかも粘土を練り合わせるように、各要素技術を統合し、全体最適化するアプローチが必要になる。

ナノテクノロジーの役割

この全体最適化の際には、各要素技術の特性を合目的に設計することが求められる。すなわち各要素技術には、その特性を全体設計に合わせてコントロール可能な、非常に高度なテーラード性が求められる。このテーラード性こそが、ナノサイズ効果による新機能の発現とともに、エレクトロニクスにおいてナノテクノロジーに期待される重要な役割である。

ナノテクノロジーとは、ナノスケールの構造をチューニングして、所望の機能を実現する究極のテーラード材料・デバイス技術ととらえることができる。微細な構造制御という観点では、1 nm以下の構造制御技術は分子の有機合成において特に製薬分野では十分な蓄積がある。また、数十nm～数μmレベルの構造制御技術は、半導体加工におけるリソグラフィー工程などとして十分検討されてきている。ところが、この両者をつなぐ、シングルnmを中心としたサブnm～数十nmレベルの構造制御は、今後のエレクトロニクスの主戦場となるにもかかわらず、まだまだ発展途上と言える。これは、この領域が有機合成のようなボトムアップ型プロセスと、リソグラフィー工程のようなトップダウン型プロセスのはざまにあたるのも一因であろう。しかし、近年の微細構造の測定技術やシミュレーション技術



の進展も後押しとなり、この領域の研究開発は今、開花前夜の状態にある。ナノテクノロジーのテーラード性とナノサイズ効果を武器に、エレクトロニクス技術は今後、ナノエレクトロニクスとして大きく花開くと考えられる。

この特集では、東芝における“ロードマップの限界を越える”，及び“価値軸を加える・変える”方向でのナノエレクトロニクス技術への取組みを紹介する。

文献

- (1) 総務省. ユビキタスネットワーク技術の将来展望に関する調査研究会 報告書. 2002-06.
- (2) 総務省. 平成16年版 情報通信白書.



石川 正行
ISHIKAWA Masayuki

研究開発センター 次長(LSI・ストレージ技術領域、ナノ材料・デバイス領域担当)。応用物理学会、電子情報通信学会会員。
Corporate Research & Development Center



平岡 俊郎
HIRAOKA Toshiro

研究開発センター 研究企画室 企画担当参事。ナノ加工用の自己組織化材料など有機機能性材料の研究・開発に従事。
Corporate Research & Development Center