

暮らしとナノエレクトロニクス

電気電子工学専攻 准教授 土屋 英昭

1. はじめに

エレクトロニクス（電子工学、電子技術）は、古くはトランジスタラジオやVTR、CDプレーヤを生み出し、その後、パソコン、インターネット、携帯電話、デジタルカメラ、カーナビゲーションに代表されるようなIT（情報技術）革命を引き起こしました。最近では、ETC（道路通行料自動徴収システム）や指紋検出による個人認証システムまで登場しました。将来は、「いつでも、どこでも、だれとでも」コミュニケーションができるユビキタス社会が実現すると期待されています。

このようにエレクトロニクスの発展は、人々のライフスタイルを一変させて来ましたが、一方で、地球環境の保全にも貢献しています。エレクトロニクスを駆使して、ビルや店舗の照明や空調をきめ細かく制御することで省エネルギー化が可能になります。トヨタのプリウスで有名なハイブリッド車を実現したのもカーエレクトロニクスです。

このようにエレクトロニクスが我々の生活環境と地球環境の両面で大きく貢献できたのは、半導体技術の進化が直線的ではなく指数関数的であり、それが過去40年間以上にわたって持続してきたことが大きな要因となっています。半導体技術の進化はまだまだ続き、将来は、ナノテクノロジーと融合した「ナノエレクトロニクス」が、人々の生活の快適さを支え、環境を守る上で大きな役割を果たすと考えられています。本講座では、暮らしとナノエレクトロニクスという観点で、豊かな未来を創造するエレクトロニクス研究の最前線を紹介したいと思います。

2. 暮らしに広がる半導体技術

半導体はあらゆる工業製品に使われ社会システムの基盤を形成するとともに、地球環境保護にも貢献しています。代表的な例を図1に示します[1]。(a)はユビキタス社会で鍵となる半導体技術、(b)は地球を守るための鍵となる半導体技術を紹介しています。我々の身の回りに半導体技術が浸



図1. 半導体は社会基盤を支え、地球環境保護に貢献 [1].

透している様子が分かるかと思
います。

自動車为例に取ってみます[2]。
現在の自動車は「走るコンピ
ュータ」と呼ばれるほどにマイクロ
コンピュータを満載しています(図
2)。マイクロコンピュータは、
半導体で作られた小さなコンピ
ュータです。その数は高級車で約
60個、大衆車でも30個は使われて
います。カーナビゲーションシス

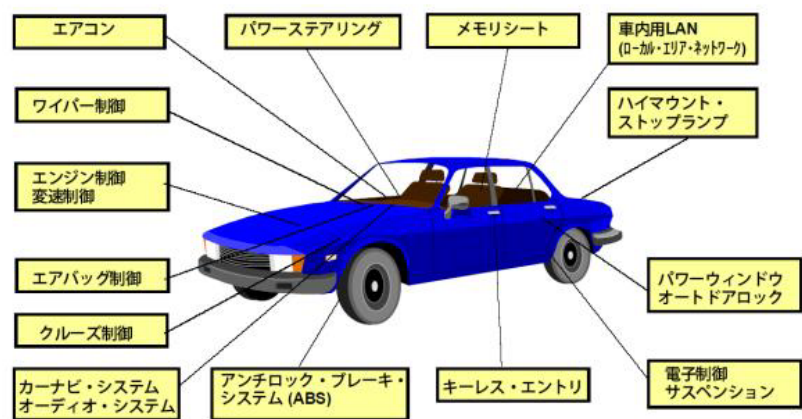


図2．自動車は走るコンピュータ [2] ．

テムやアンチロックブレーキシステム、エアバッグシステムなどにマイコンが使われていることは想像できるかも知れませんが、パワーステアリング、パワーウィンドウ、オートドアロック、各種警報装置などにもマイコンが使われています。今やハイブリッド車の価格の約1/3は、電子部品が占めると言われています。ハイブリッド車とは、車を動かす動力源としてエンジンのほかに電動モータを搭載しています。走行中の自動車がスピードダウンするとき、エンジンのエネルギーは過剰なものとなって捨てられてしまいます。そのエネルギーを電気エネルギーとして蓄えておいて、次に加速するときにはモータ用として使おうという発想がハイブリッド車を生みしました。この制御をマイクロコンピュータが行っています。この技術のおかげで、ハイブリッド車の燃費性能は普通車の約2倍、つまりCO₂の排出量は約半分になりました。ハイブリッド技術は今後ますます発展して行くことが予想されます。

自動車が「走るコンピュータ」になったと書きましたが、道路そのものもIT（情報技術）によって「知的なもの」にしようとする研究があります。ITS（高度道路交通システム）というものがそれです。たとえば、道路にセンサーを設置して、不自然な動きをする車を自動的に止める仕組みが考えられています。運転中に気分が悪くなって事故につながるということが防げるかも知れません。また、事故に遭遇したときも自動的に通報され直ちに救助隊が駆けつけてくれる。高齢化社会を迎えてお年寄りのドライバーが増えている日本では是非とも必要な技術です。

3．半導体集積回路（LSI）の発展

上で述べてきたように、半導体技術は人々の生活を快適・安心にし、仕事の効率性を高めることに貢献するだけでなく、今では、地球環境保護を含めた新しい時代の社会システムを支える基盤技術にもなっています。この半導体技術の心臓部にあたるのが半導体集積回路（LSI）です。

図3に一例として、LSIの代表的な応用製品である携帯電話に使われているLSIを紹介しています。最近のLSIでは一つのチップ上に、メモリ、音声処理、ビデオ処理、インターフェース等の様々な機能を集積化したシステムオンチップ（SoC）という回路技術が重要になってきています。これに

より、より小さく、そして高速化、高信頼化、高機能が実現されてきました。1993年にNTTドコモがデジタル方式のサービスを開始したのが「ケータイ元年」と呼ばれていますが、それからわずか15年ほどの間に携帯電話が爆発的に普及した背景には、このようなLSI技術の驚異的な進歩があった訳です。

LSIは半導体集積回路と呼ばれるように、実にさまざまな電子部品が集積化されています。その中で、情報の記憶や演算（データ処理）といった最も重要な機能を掌っているのが「MOSトランジスタ」です。MOSトランジスタの構造と動作原理を図4で説明しています。

MOSトランジスタは三つの電極を持っていて、それぞれソース、ゲート、ドレインと呼ばれます。電流はソースとドレインの間を流れます。その電流の大きさを中央のゲート電極に加える電圧でオン・オフ制御するのが動作原理です。ゲート電極は、電流が流れるシリコン基板からは薄い酸化膜により絶縁されていて、そのゲート電極との容量結合によって電流の制御を行っています。このような金属ゲート（Metal） - 酸化膜（Oxide） - 半導体（Semiconductor）の頭文字を取ってMOSトランジスタと呼んでいます。動作原理を例えて言いますと、ソースを水源、ドレインを排水路としますと、ゲートは水門の高さを変化させ流れる水量を調節する役目を担うということです。したがってゲート電極はとても大切な役割をしており、特にLSIとして集積化する際には、ゲートの長さと酸化膜の厚さを如何に設計するかが重要なポイントの一つになってきます。

実際にどのように設計されてきたかと言いますと、電界一定スケールとよばれる比例縮小則で設計されてきました。これは電圧を固定して単純にゲート長だけ短くすると、高電界による材料破壊が起こったり、電流制御不能が起こってきますので、電界が常に一定になるように、各パラメータを比例縮小してやるという

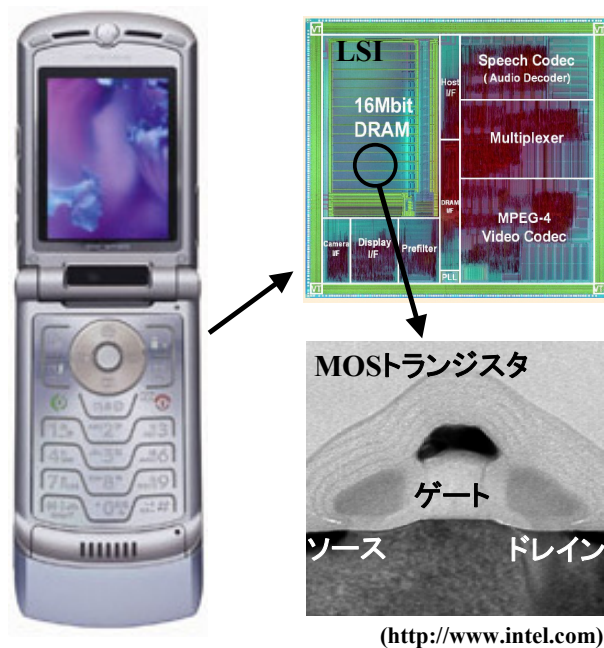
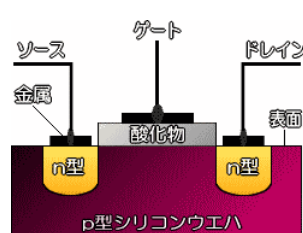
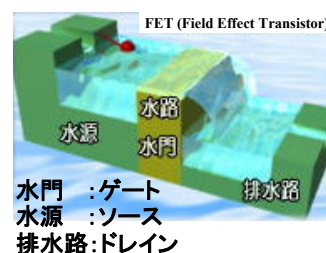


図3．半導体集積回路（LSI）とMOSトランジスタ．



構造



水門：ゲート
水源：ソース
排水路：ドレイン

動作原理

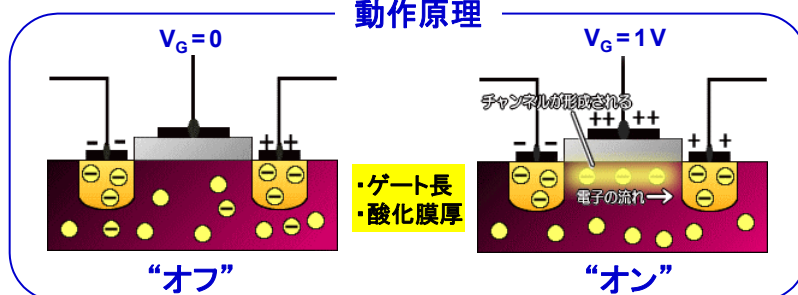


図4．MOSトランジスタの構造と動作原理．

ごく自然な考え方です。しかしこのスケーリング則の持つ重要な意味はそれだけではなく、比例縮小するとLSIの回路性能が向上できるということがあります。例えば、トランジスタの各サイズを $1/k$ にし同時に電圧の大きさも $1/k$ に比例縮小してやりますと、回路のスピードが k 倍に速くなる一方で、単位面積当たりの消費電力は増加しないという大変有難いメリットをもたらしてくれます。このようなことが指導原理となって、MOSトランジスタはこれまでスケーリング則に従ってひたすら微細化が進められてきました。

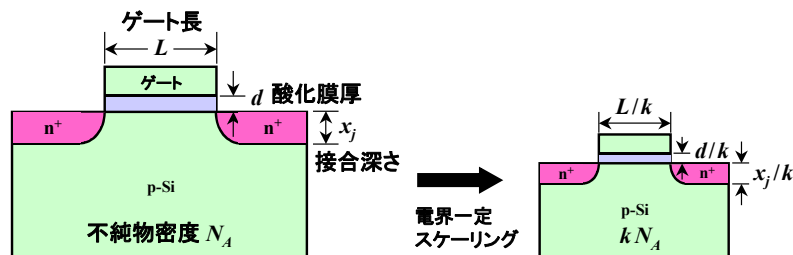


表. 回路パラメータ.

回路性能	縮小係数
電流 I	$1/k$
ゲート容量 C	$1/k$
スイッチング時間 CV/I	$1/k$
消費電力 VI	$1/k^2$
消費電力密度 VI/A	1

デバイス性能および
回路性能の改善
⇒ LSIの微細化
(指導原理)

図5. スケーリング (比例縮小) 則.

その微細化の様子を時系列で示したのが図6です。左の縦軸にMOSトランジスタの集積数を底が2のlogでプロットしています。すなわち、MOSトランジスタの集積度は毎年2倍ずつ増大するという指数関数的な技術進化が40年間以上続いていることを表しています。また右の縦軸にはゲート長をとって、MOSトランジスタの微細化とともにLSIの性能向上を実現し、従来では考えられな

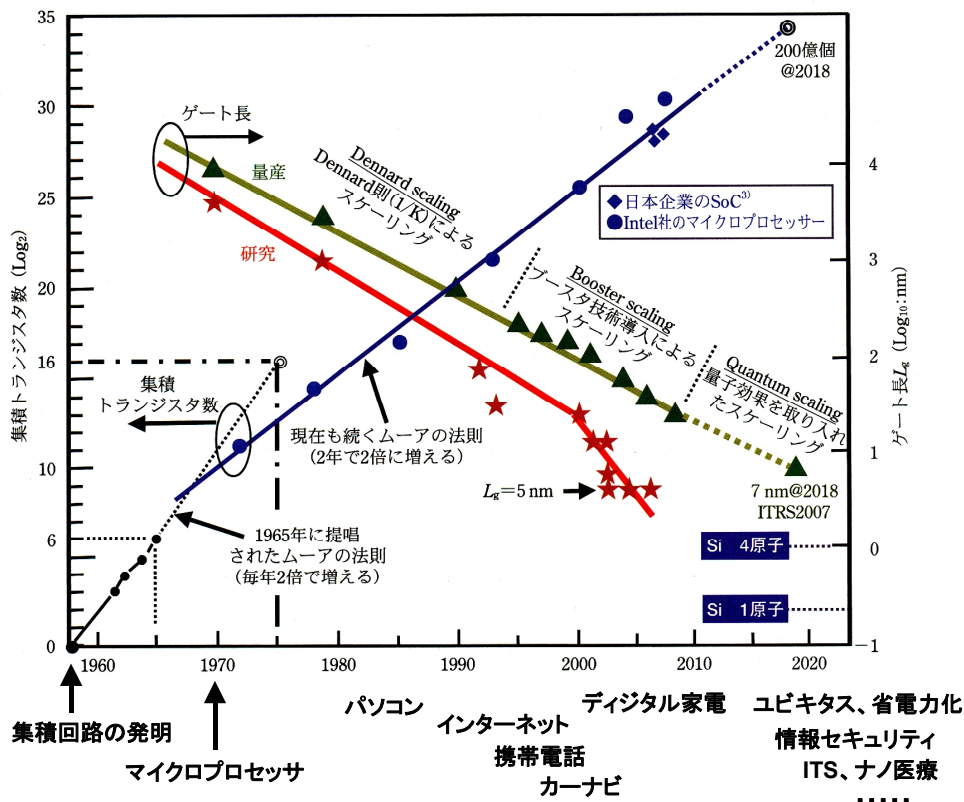


図6. スケーリング (比例縮小) 則 [3].

かったようなエレクトロニクス製品を次々に生み出し、人々の生活を快適にしてきたことが分かります。

4．ナノエレクトロニクス

冒頭でも述べたように、将来は、地球環境保護を含めた新しい時代の社会システムを支える基盤技術としても、LSI技術は、その高性能化・高機能化が引き続き強く求められており、MOSトランジスタの更なる微細化が追求されています。ユビキタス、省電力化、情報セキュリティ、ITS、ナノ医療等に代表されるQOL（生活の質）向上技術が、本公開講座の副題にある「ロハスな生活」を支えるためには、ナノスケール（ナノメートル(nm)は 10^{-9} メートル）の寸法にまで微細化されたMOSトランジスタの開発が不可欠と考えられています。しかしながらナノスケールという

のは、原子が数個から数十個だけ並んだ程度の大きさですので、現在の技術では1個のMOSトランジスタを作るだけでも大変なことに加えて、LSIでは、特性の揃ったMOSトランジスタを何十億個以上集積化しないといけません。ここで問題となるのが製造段階でのバラつきです。例えば、ゲート長を設計通りに狙って作ったとしても、原子スケールのバラつきを完全に無くすことは不可能です。このため現在では、このバラつきを抑えるMOSトランジスタ構造や作製方法の見直し等が精力的に研究されています。

またナノスケールでは、電子のミクロな性質、いわゆる量子力学的効果という新しい物理現象が顔を出すことになります。量子力学的効果というのは、「電子が粒子であり波でもある」という大変不思議な性質に基づくもので、多くの場合、MOSトランジスタの性能を劣化させてしまいます。現在最も深刻な量子力学的効果の影響は「トンネル効果」と呼ばれるもので、電圧をゼロにしたトランジスタのオフ状態でも、ゲート酸化膜を電子がすり抜け電流が流れてしまう現象です。これは例えば、携帯電話の待ち受け時の消費電力を増大させバッテリー持続時間を短くしてしまうなど、実際のエレクトロニクス製品においても既に深刻な影響を及ぼし始めています。これを防ぐためにゲート酸化膜の材料を、従来の酸化膜（シリコン酸化膜： SiO_2 ）から高誘電体絶縁膜（ハフニウム酸化膜： HfO_2 ）に置き換える研究が世界中で進められており、

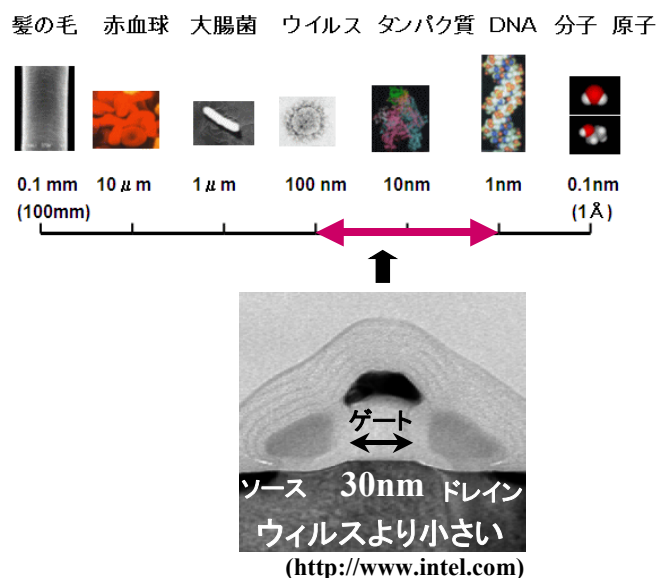


図7．ナノスケールの大きさのイメージ．

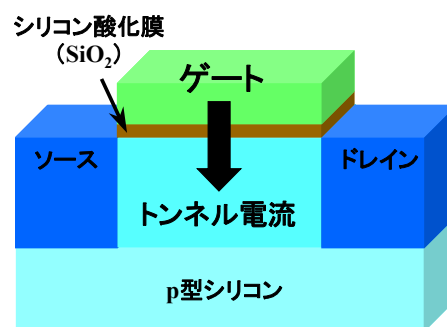


図8．LSI の消費電力を増大させるゲートトンネル効果．

実用化に近い段階に来ていると言われています。このような新しい材料を導入することでMOSトランジスタの性能を向上させる試みが、近年脚光を浴びています。

さらに、現在のLSIに集積化されるMOSトランジスタは、すべてシリコンという半導体で作られています。微細化の極限ではシリコンの材料物性の限界が存在しますので、これを打破し更なる進化を遂げるために、シリコンに代わる新しい材料の研究が行われています。その一つがカーボン（炭素）系材料です。カーボンはシリコンと同じIV族材料で、通常の状態では金属になりますが、最近の研究によると、これをナノ構造に加工することによって、シリコンと同じ半導体に変化させることが可能であることが分かってきました。さらに、私の研究室の学生による計算機シミュレーションによると、最適設計を施すことで、シリコンに比べて約2～3倍高性能で、かつ低電圧動作による低消費電力化が可能であることが最近分かりました。「カーボンエレクトロニクス」は、情報処理応用だけでなく、地球環境保護と生体応用への可能性も感じさせてくれる大変魅力的なエレクトロニクス分野とすることができます。

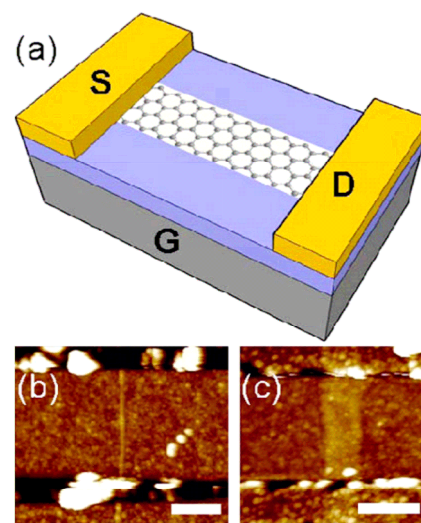


図9．カーボンナノトランジスタ [4]．

5．おわりに

エレクトロニクスが人々の生活環境と地球環境の両面で大きく貢献できたのは、半導体技術、すなわちLSIの進化が指数関数的であったことが大きな要因です。半導体技術の進化はまだまだ続き、将来は、カーボンエレクトロニクスに代表されるナノエレクトロニクスが、生活の利便性や仕事の効率性の向上だけにとどまらず、安全・低エネルギー消費化社会・地球環境保全・最先端医療等の面でも、人々の暮らしを支える基盤技術となることは間違いなく、その目標に向けた研究開発の一端を本講座で感じ取っていただければ幸いです。

参考文献

- [1] “未来を切り拓く半導体技術”、日経マイクロデバイス特別編集版(2008, 2009)。
- [2] “21世紀IT社会を拓く—半導体産業からのメッセージ—”、電子情報技術産業協会(JEITA)、2003年。
- [3] 渡辺久恒：“半導体産業の進化”，応用物理学会誌，2008年8月号。
- [4] X. Wang et al., Phys. Rev. Lett., vol. 100, 206803, 2008.