

# コンピュータはどこまで速なるのか？

秋田 純一 (8,12,14,17,18,19 回 参加)

## 1. コンピュータはいつまでも速くなる・・・？

ここ数年のパソコン(PC)の急速な普及には目を見張るものがあり、それに伴って「電子メール」や「インターネット」という言葉が(正しい用語かは別として)市民権を得るなど情報化社会が非常に身近なものになってきました。このような急速なPCの普及を支えているのが、PCの継続的な性能向上と価格低下です。特にPCの性能向上は、例えばPCの頭脳にあたるCPUの性能(右図上)や主記憶装置に使われるDRAMの容量(右図下)の推移からわかるように、その進歩の度合いが指数関数的で、かつそれが~~昨年~~来継続していることがわかります。このような急速な進歩がこれほど長期にわたり続くと、他の産業にはみられないPCの構成部品である半導体)産業に特有なものです。

ところが、このような進歩をみると自然に次ぎのような疑問がわいてきます。

「PCはどこまで高性能になるんだろう？」

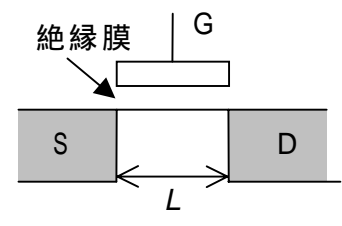
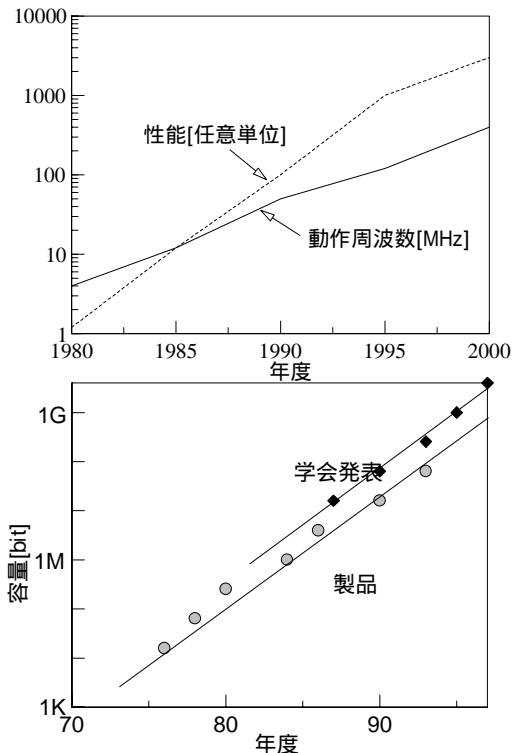
あと1年で終わると言われつつけて数十年になるものがあります。それは「石油の掘削」「核融合の実用化そしてコンピュータの進歩」です。現時点では、前者の2はまだしばらくは続そうな雰囲気ですが、はたしてコンピュータの進歩はどこまで続のでしょうか。ここではこの問題を近年の半導体技術の動向などをふまえて考えてみたいと思います。

## 2. 素子の微細化

### コンピュータの箱の中

まず最初に、コンピュータの最も基本的な構成要素についてみてみましょう。これについては、酒井香代子さんが以前連載されていた「コンピュータの箱の中」で非常に詳しく書かれていますので、詳細はそちらを参照してください。

コンピュータをどんどん構成要素に分解していくと最後は「電流が流れる」「流れない」の二つの状態を切り替えるスイッチに行きつきます。通常のデジタルなコンピュータの中では、情報はすべて「10」組み合わせて表されますので、「電流が流れる」「流れない」をそれぞれ「10」に割り当てることですべての情報が表現されています。この「電流が流れる」「流れない」を切り替えるスイッチは、通常はパチン、パチンと切り替える機械式のものではなく制御端子に加える電圧によって制御できる電子式の「トランジスタと呼ばれるスイッチが用いられます。ちなみに「トランジスタ」は trans resistor の略で、離れたところから (trans)制御できる抵抗器 (resistor) という意味)トランジスタは通常は右の図のような構造をしていて、「S」(ソース)から「D」(ドレイン排水口)へ流れる電流を「G」(ゲート)に加える電圧によって制御できます。



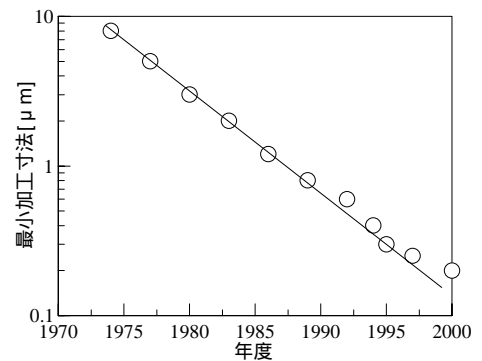
トランジスタの構造(断面図)

トランジスタを小さくすると・・・

このトランジスタは、通常はシリコンやGaAsなどの基板の上に作りこまれるわけですが、製造技術の進歩によって作ることができる最小寸法は小さくなっていきます。ではトランジスタを小さくするとどんなことが起るのでしょうか。これについては1970年代に既に詳しく考察されていて、その効果はスケールリング (scaling) 則と呼ばれています。具体的にはトランジスタやそれをつなぐ配線の寸法や電源電圧を  $1/k$  倍 (当然  $k > 1$ ) にすると次のような効果が得られます。

- 信号が伝わる時間(遅延時間) :  $1/k$  倍 (電子が移動する距離  $L$  が短くなるため) : 減少 = 高速化
- 集積度(単位面積あたりの素子数) :  $k^2$  倍 (トランジスタの占める面積が小さくなるため) : 増加 = 高集積化
- 回路の消費電力 :  $1/k^2$  倍 (回路電圧電流が減少するため) : 減少 = 省電力化

つまりトランジスタの大きさを小さくすることで、それによって作られるコンピュータの速度が速く、機能は高く、消費電力は少なくなることになります。このようにトランジスタの寸法縮小は性能向上に直結するため、半導体産業では、いかに小さいトランジスタを作るかという微細加工技術の進歩に、異常なまでの執着がみられます。実際トランジスタの最小加工寸法、右の図のように年々小さなものを作る技術が実用化されてきています。



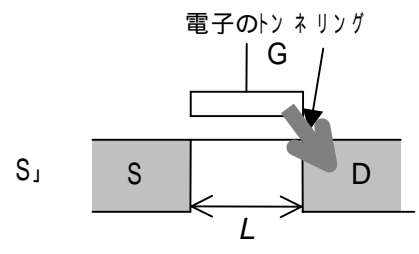
つまりこのような継続的な微細加工技術の進歩が、トランジスタの微細化と共に伴うスケールリング則が示すようなコンピュータの高性能化を支えてきたことになりました。このように、ここ30年来は幸いにも継続してよい微細な加工技術が実用化されてきたわけです。逆にあまりにも順調に技術進歩が進んできたため、この傾向が今後も永久に続いていくと考えられていた節もあります。

しかし少し考えればわかるように、トランジスタも所詮原子からできているわけで、どうがんばっても原子よりも小さいトランジスタを作ることは当然不可能です。つまりこのような継続的な微細化には、どこかに限界があることは明らかです。この微細化の限界は、すなわちスケールリング則が示すコンピュータの高性能化の限界でもあります。もちろん並列化やコンピュータのアーキテクチャの改良等による高性能化の道はまだ残りますが、あくまでも現在のコンピュータの形態までの高性能化のことです。

では、具体的にはトランジスタの微細化によって、最近は何のようなことが問題となっているのでしょうか。

量子力学的な現象

量子力学によれば、電子のような粒子でも波動としての性質をもつため、たとえ壁があっても電子はある確率でその壁を透過してしまうというトンネリング効果という現象があります。もっともこの「トンネリング」という現象は、壁が十分に厚いときにはほとんど無視できるわけですが、いままで見えてきたようなトランジスタの微細化に伴い、電子にとって「壁にあたる部分(図中の「S」)と「D」の間部分や、「G」の間絶縁膜の部分」が十分薄くなってしまい、電子はある確率でこれを通り抜けてしまいます。



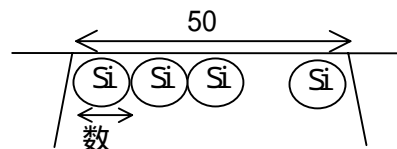
本来はこの部分が「壁」として働いてトランジスタが「スイッチ」として働いていたわけですが、こうなってしまうとトランジスタはスイッチとしての動作ができなくなってしまいます。これが、トランジスタの微細化がもたらす非常に大きな問題のひとつです。

どこまで小さくできるのか？

このシナリオは量子力学という物理学の基本的な原理に基づく現象であるため、非常に厄介です。このシナリオによてトランジスタとして働くことが不可能になってしまうのは、どの程度の大きさなのか。

これについては最近多くの研究がされていますが、比較的最新の研究結果によると「S」と「D」の間隔さ(図中のL)が0.05μm(1μm = 10<sup>-6</sup>m)程度までは、なんとかトランジスタとして動作できるといわれています。0.05μmはSiのところで、ケイ素原子の直径の10倍程度ですから

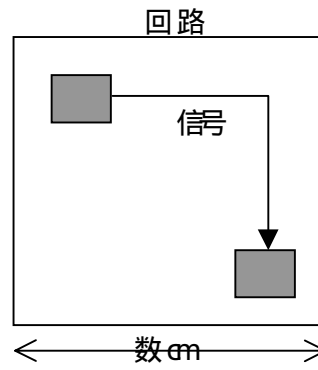
まあこれより小さいトランジスタを作ること自体ほとんど不可能でしょう。ゆえにこの辺が、トランジスタの微細化の限界といえそうです。ちなみに現在量産されているコンピュータの部品の中のトランジスタのLは0.1μm程度ですからまだまだ10分の1くらいにはなりそうな雰囲気です。



### 信号の伝わる速度

このように、トランジスタの寸法量子力学の制限によって微細化の限界があることがわかりました。では他の制限要因はないのでしょうか。実は現代物理学のもう一つの柱である相対性理論が、コンピュータの進歩を制限するもう一つの要因となっています。

前にも述べたように、コンピュータの中は「光」信号が回路中を伝わり適切に処理されることで動作するわけですが、この信号が伝わる速度は、当然のことながら光速  $c (=3 \times 10^8 \text{ m/秒})$  を超えることはできません。この光速というのは日常生活では体感できないほど大きなもので、例えば3m (=  $3 \times 10^{-2} \text{ m}$ ) 距離を光が進むのに必要な時間は  $10^{-10}$  秒となり無視できるほど短い時間のように見えます。しかし最近のコンピュータの中心部品であるCPUの動作クロック周波数は1GHzと屋敷の勢いですが、1GHzは  $10^9 \text{ Hz}$  ですからその周期は  $10^{-9}$  秒となり、これは先ほどの「光が3m進むのにかかる時間のわずか10倍でしかありません。もっとこの  $10^{-10}$  秒というのは、真空中を光が進むのにかかる時間というまに信号伝達時間の下限のことで、実際の回路内の信号の伝達はこの数倍の時間がかかっても不思議ではありません。CPU内で信号が伝わるべき距離は数cmありますからこの距離を信号が伝わるのにかかる時間はとても無視できるものではありません。



現在のCPUの設計では、回路全体が基準信号にあわせて一斉に動作する同期式と呼ばれる構成が一般的であるため、この基準信号の到達時間ずれは深刻な問題となります。実際の設計では、信号伝達時間をあらかじめ見積りそれができるだけ等しくなるように回路を配置する努力が払われていますが、このずれを直すのは容易なことではありません。

結局この信号伝達時間動作速度の向上によるコンピュータの高性能化を妨げる要因となってしまいます。これも、相対性理論という物理の基本原理に基づく現象であるため、非常に厄介です。

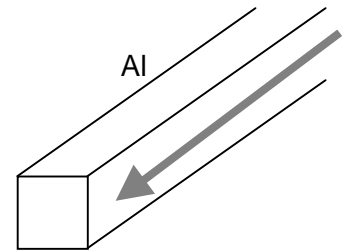
### 配線の物理的な問題

実はコンピュータの高性能化を制限するのは量子力学や相対性理論ばかりではなくもっと古典力学的な現象もあります。回路(回路)間に信号が伝わる配線は、通常金属の細い線、特に半導体ではほとんどの場合アルミニウムが使われます。

金属の中を流れる電流の実体は、電子が電界によって加速され、金属原子にぶつかって散乱されて減速され、また加速されてぶつかる、といった繰り返しです。原子の質量は電子の質量の数千倍以上ありますから通常は金属原子は静止していて電子だけが散乱される、と考えて差し支えはありません。しかし金属配線がスケール則に基づいて微細化されると、金属配線中の電流の密度(単位断面積あたりの

電流が大きくなるために金属原子に電子がぶつかる頻度が多くなり、衝突のときに金属原子が受ける衝撃が無視できないものになってきます。つまり、電子がぶつかることで金属原子が少しだけ反動で動いてしまっただけです。電流が一方向に流れていると金属原子もその方向にどんどん流されていき、ついには金属配線が切れちゃうという「エレクトロマイグレーション」と呼ばれる現象が生じてしまいます。このように「衝突」という古典力学的な現象によっても微細化が制限されてしまっただけです。

これに対しては、配線を「スケール則」に従って細くせずに強度を保つためにアルミニウムよりも丈夫な銅を使った配線を使ったりする技術が研究され、次第に実用化されつつあります。



### 3. 結局、どこまで速くなるのか・・・？

以上に見てきたように、これまでのコンピュータの高性能化を支えてきた「スケール則」に基づく微細化によって、さまざまな好ましくない現象が現れ、逆に微細化を制限する要因となりつつあります。特に「トンネリング」と信号伝達時間は、物理学の基本原則にかかわる現象であるために根本的な解決は不可能です。さまざまな研究によれば、現在の性能の1倍か倍ぐらいまでは今の延長でなんとかなりそうです。しかしその先は今の延長では行き詰まってしまうため、現在の境界の先を見越して、さまざまな研究が世界中でされています。

現在のコンピュータの中の集積回路についても、いままでの「基準信号にあわせて動作する」という同期式とは異なり、全体の基準信号をもたない「非同期式」の回路についても、その設計方法も含めて近年見なおされてきています。またコンピュータが速くなるのに伴って回路が発する熱が大きくなるため、十分な放熱を行わないと更に速くできない、という問題があります。そのため携帯電子機器の電池の寿命を長くするために研究されている、回路の消費電力を低減するための技術も、二次的ではありますが高速化につながります。（発する熱が減るのは地球環境にもやさしいですね）

また現在のコンピュータの延長ではない、まったく新しいパラダイムに基づくコンピュータも、広く研究されています。例えば「DNAコンピュータ」「量子コンピュータ」、また現在一部実用化されていますが「並列コンピュータ」といったものは非常にホットな話題です。

もちろんそれかとは思いますが、量子力学や相対性理論を超える新しい物理学が誕生すれば、これらの制約は一気になくなるかもしれません。

スケール則に基づく回路の微細化が、現在の驚異的なコンピュータの進歩を支えてきたのは間違いありません。しかしそれが物理的な制約を受けつつある今、コンピュータが新しいパラダイムへ移りつつあるのは、ある意味「コンピュータが枯れた技術になりつつあること」の証拠とも考えられます。最近のPCは、いくら安いものでも普通に使っている分には不都合を感じるものがほとんどなくなってきたのも、その裏づけと言えそうです。

これからはどんなコンピュータが求められるのでしょうか。

それによって今後のコンピュータの進む道が決まってくるようになります。

果たして1年後には、どんなコンピュータが使われているのでしょうか。

ゆっくり見守ってみるのも楽しいかもしれません。