

パソコンメモリの価格に関する 電子工学的かつ経済学的な考察

～なぜメモリは安くないか～

秋田 純一 (8 12 14回参加)

学校、職場、自宅で、パソコンを使う機会というものは非常に多くなりました。それと共にパソコンというものは日常生活に非常に深く浸透し、「パソコンのある風景」というのがごくふつうのものとなってきましたし、つい先日のWindows95発売のお祭り騒ぎを見てみても、さすがにやりすぎの感があるにしても社会現象の一つになったのは確かなようです。

しかしこのWindows95に代表されるような最近のパソコン用プログラムというのは、どんどん巨大化の一途をたどっています。例えば、ほんの10年前には64Kバイト(65,536バイト)のメモリ(記憶装置)をもっているパソコンであれば、「そんなにたくさんのメモリをどうするの?」と言われたものでした。しかし今では、「32Mバイト(32Kバイトの約1,000倍)じゃ、足りなくて何もできないよ」と言われることもしばしばありそうです。ほんの10年で「メモリ容量の常識」は3ケタも大きくなってしまったのです。

そのようなメモリ容量の増大を助けた最も大きな要因は、半導体技術の進歩によるメモリの低価格化といえるでしょう。確かに数年前までは、メモリの値段というのは急激に安くなっていき、それに伴って、パソコンの価格の低下にもかかわらずパソコンに標準で搭載されるメモリの容量は増加してきました。

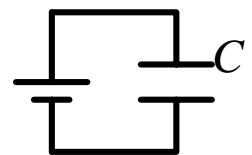
しかしここ数年のメモリの価格を見てみると、単位容量あたりの価格というのは以前ほどは安くなっていないようです。確かな市場調査のデータは手元にはないのですが、雑誌の広告でみるメモリの値段はほぼ横ばいを保っているようです。

なぜメモリの低価格化が止まってしまったのでしょうか?

あるいは、なぜ今まではメモリは安くなってきていたのでしょうか?

その原因を電子工学的な側面と経済学的な側面の両方から考えてみたいと思います。

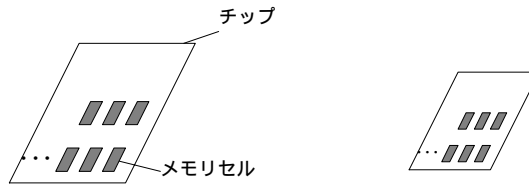
まず、半導体メモリの構造からみていくことにしましょう。半導体メモリが情報を記憶する原理は、右のようなコンデンサー(高校の物理で習いましたよね?)です。このコンデンサーに $Q=CV$ という電荷が充電されている状態と、



電荷がなくて放電されている状態とがあるので、この二つの状態を区別することで1または0の情報(1ビット)を記憶することができます。これがDRAM(でいーらむ、と読む)と呼ばれるメモリ素子の原理で、この基本単位(「メモリセル」と呼びます。細胞 = cell と同じですね。)をたくさん集めて一つの素子(IC)にします。メモリセルの数は、「ビット(bit)」という単位で表します。

通常は、シリコン(Si)の小さな単結晶(ふつうは1cm角程度の断片にするので、「チップ」といいます)に1,000万個以上のメモリセルを作り込みます。科学技術の進歩によって、どんどん小さいメモリセルを効率よくたくさん作ることができるようになってきて、最近ではメモリセルの大きさは0.2 μm 四方(一辺の長さは原子の大きさの1000倍程度!)程度か、それよりも小さくなってきています。(これは可視光の波長よりも短いので光学顕微鏡では見えません。)

メモリセルが小さくなる、ということは、チップの面積が同じならば、チップの中のメモリセルの数が多くなることとなります。これをもう少し定量的に考えてみましょう。

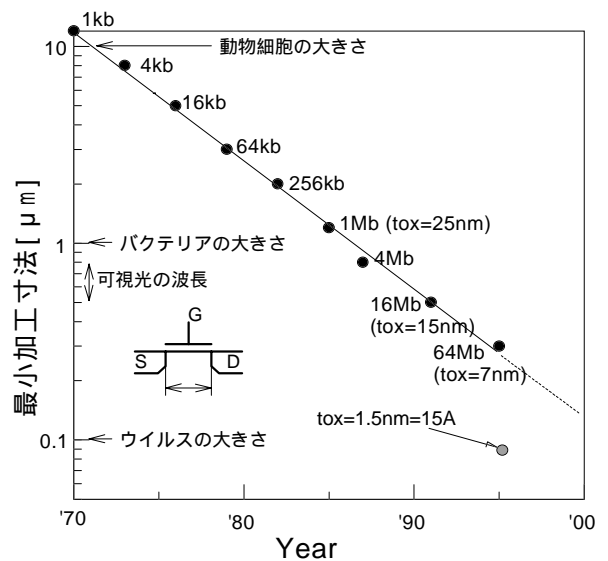


	今年	1年後
メモリセルの一辺の長さ	x	$x' = r_x \times x$: 前年の r_x 倍
チップの面積	S	$S' = r_S \times S$: 前年の r_S 倍
チップ上のメモリセルの数	N	$N' = r_N \times N$: 前年の r_N 倍

ちょっと待ってください。メモリセルの数や大きさは、毎年毎年、前の年の何倍あるいは何分の1、というような倍々ゲームの等比数列のように増えていったり小さくなっていくものなのでしょうか。

実は、不思議なことに半導体技術の進歩は、ここ数十年にわたってこのような傾向を現実のものにしています。メモリセルの大きさが小さくなるのも、「そろそろ限界」と言われ続けてかれこれ20年、これからまだ10年ほどはこのペースで進んでいく可能性が示されています。

例えば右のグラフはメモリセルの加工寸法の変遷ですが、縦軸が対数目盛であることに注意してください。対数グラフで直線ということは、等比数列的に寸法が小さくなっていることを表わします。この公比は上の表の r_x に相当しますが、右のグラフから $r_x = 0.937/\text{年}$ であることがわかります。つまり、メモリセルの寸法 x は毎年0.937倍になっていることになります。



では、チップ上のメモリセルの数 N はどのように変化しているのでしょうか。これについては「ムーアの法則」と呼ばれる次のような法則が知られています。

「チップ上の素子の数は、18ヶ月ごとに2倍になる」

ちなみにこの法則を発見したのはゴードン・ムーアという人で、この人はマイクロプロセッサの市場で非常に大きなシェアをもつ米インテル社(Intel Corp.)の創設者の一人ですが、実際にここ20年はこのペースで進み、これから10年はもこのペースで進むめどがたっています。

この法則を言いかえると、 N は3年ごとに4倍になることとなるので $r_N = \sqrt[3]{4} = 1.587/\text{年}$ となります。(実は N はそのままメモリの容量になります。)

さて残るチップ面積 S ですが、メモリセル1個の面積が x^2 で、これがチップ上に N 個あることを考えれば $S = Nx^2$ となるので、 $r_S = r_N \times r_x^2 = 1.393/\text{年}$ となることとなります。

たくさんの数字が出てきたので、ここでまとめておきましょう。

- $r_S = 1.393 / \text{年}$: チップ面積は毎年1.393倍
- $r_N = 1.587 / \text{年}$: チップあたりのメモリ容量(ビット数)は毎年1.587倍
- $r_x = 0.937 / \text{年}$: メモリセルの大きさは毎年0.937倍

さて、そろそろ本題のメモリの価格について考えましょう。半導体素子の価格というのは不思議なもので、ほとんどチップ面積 S のみで決まってしまうことになります。つまり材料の単結晶シリコンの量で、価格がほとんど決まってしまうこととなります。半導体技術が進歩したミソはまさにここで、メモリセルを小さくすることで、同じチップ面積 (= 同じ価格) により多くのメモリセルを入れることができるため、同じ価格ならば容量が増え、同じ容量ならば価格が下がることとなります。ということは、メモリの価格 C も毎年 S と同じように等比数列的に増えていくはずで、その公比 r_C は r_S と等しくなるはずで。

では同じメモリ容量ならば、どの程度価格は下がるのでしょうか。これは単位容量あたりの価格 C_0 を求めればよいのですが、これは価格 ÷ 容量、つまり C/N で与えられるので、単位容量あたりの価格の公比 r_{C0} は、 $r_{C0} = r_S / r_N = r_x^2 = 0.878 / \text{年}$ と求められます。

つまり単位容量あたりのメモリの価格は、毎年前年の0.878倍となるはず、ということになります。しかし最初の方で述べたように、実際にはこれほどは安くなっていません。

ここで、実際の統計データを見てみましょう。少々古いデータしか手に入らなかったのですが、右のようなデータがでています。

1992年から1993年にかけては、不況のために電子産業全体の国内生産額が減少していますが、メモリ素子を含む集積回路の分野は二桁近い成長を続けていることがわかります。また、表の下半分を見ると、メモリの生産額、素子数ともに二桁近い成長を続けていることがわかります。

余談になりますが、半導体は俗に「産業のコメ」と言われたりします。ここで、世界で消費される本物のコメ(米)の粒を計算してみましょう。

1杯の茶碗の中の米粒の数を、まあおおざっぱに2000粒としましょう。つまり 2×10^3 粒です。世界の人口を50億人 (5×10^9 人) として、仮に全員が毎日三食、米飯をたべるとしましょう。(かなり無理な仮定ですが。) すると、一人年間 $365 \text{日} \times 3 \text{食} = 1 \times 10^3$ 食の米飯を食

国内生産額	1992年	1993年	1994年	
電子産業全体	22.00	20.76	21.32	[兆円]
集積回路(IC)	2.75	2.88	3.29	[兆円]
メモリ素子	0.89	0.95	1.15	[兆円]

メモリ素子	1992年	1993年	1994年	
総生産額	0.89	0.95	1.15	[兆円]
総素子数	17.0	17.8	20.0	[億個]
総メモリ容量	2.9	4.2	7.5	[$\times 10^5$ ビット]
チップあたりの容量	1.71	2.36	3.75	[Mビット]
チップあたりの価格	523	534	575	[円]
Mビットあたりの価格	307	226	153	[円]

べることになりますので、世界で年間に消費される米粒の数は、 $2 \times 10^3 \times 5 \times 10^9 \times 1 \times 10^3 = 10^{16}$ [粒] ということになります。表中の日本で生産される総メモリ容量は年間 7.5×10^{15} ビットということですから、数字の上でも半導体はまさに「産業のコメ(米粒)」ということができるのではないのでしょうか。

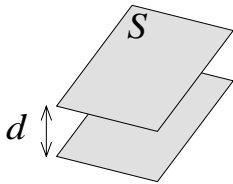
さて話を戻して、この表から求められる成長率（成長の公比；幾何平均）と、先ほどの理論値とを比べてみると次のようになります。

公比	理論値	統計値	意味
r_N	1.587 / 年	1.481 / 年	チップあたりの容量の増加率
$r_S = r_C$	1.393 / 年	1.049 / 年	チップ面積（＝チップあたりの価格）の増加率
r_{C0}	0.878 / 年	0.706 / 年	単位容量あたりの価格の増加率

データが3年度分しかないためデータの精度には不安が残りますが、このデータから判断する限りでは、チップあたりの容量はほぼ理論どおりに増加していますが、チップあたりの価格と単位容量あたりの価格は理論値以上のペースで低下していることとなります。

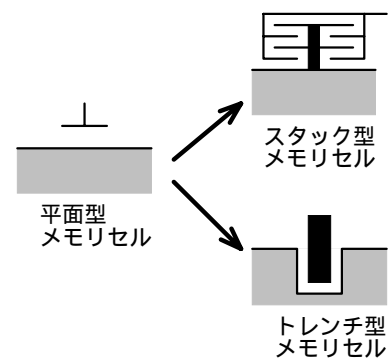
つまり、メモリの価格は理論予測よりも安くなっているのです。

メモリの価格が理論予測よりも安くなっている理由としては、メモリセルの面積が予定よりも急速に小さくなり、したがってメモリ容量（メモリセルの数）の増加にもかかわらず、チップ面積（＝チップ価格）の増加が緩やかになったということが考えられます。



つまりメモリセルの加工寸法が一定でも、より小さな面積でメモリセルを構成できるようになったということになります。メモリセルの基本構造は前述のとおりコンデンサーです。平行平板コンデンサーの容量 C は、電極の面積を S 、電極間の距離を d とすれば $C = S/d$ で与えられますから（高校の物理で習いますよね）、コンデンサー全体の大きさが相似的に $1/r$ に小さくなれば電極面積 S は $1/r^2$ になってしまうため、容量は $1/r$ になってしまうこととなります。

ということはコンデンサにたまる電荷 $Q = CV$ も $1/r$ になってしまいますが、あまり電荷が少ないと外来のノイズで消えてしまう恐れがあるので、あまりメモリセルを小さくはできないこととなります。そこでメモリセルの面積自体は小さくしても、右の図のように立体的な電極構造をとることで電極間の面積を増やし、情報記憶に十分な容量を確保する努力が続けられています。



ちなみに、このようなメモリセルの改良を含む半導体技術の高度化は、技術開発費や設備投資費の急激な増加も引き起こしています。実際、新しい半導体製造ラインをつくらうとすると数千億円という額が必要になるといわれていますし、半導体メーカーの毎年の設備投資額は、半導体製品生産額の20%近いという統計もあります。つまり半導体産業は巨額な投資産業となりつつあり、大学の研究室（特に貧乏な国立大学）ではそのような設備はとてとても持たず、もっぱらシミュレーションや設計方法の研究が主になってしまいます。（こんなこと書くと電子工学科に進学する人が減っちゃうかな？）

このような努力により、メモリ容量の増加にもかかわらずチップ面積の増加は抑えられ、したがって価格はさらに安くなっていることとなります。

では、どうして秋葉原とかで売っているメモリは安くないんでしょうねえ？？

誰か、どこかでぼったくってるんじゃないんですかねえ？？

暴利をむさぼってるのは、いったい誰なんでしょうねえ？？