

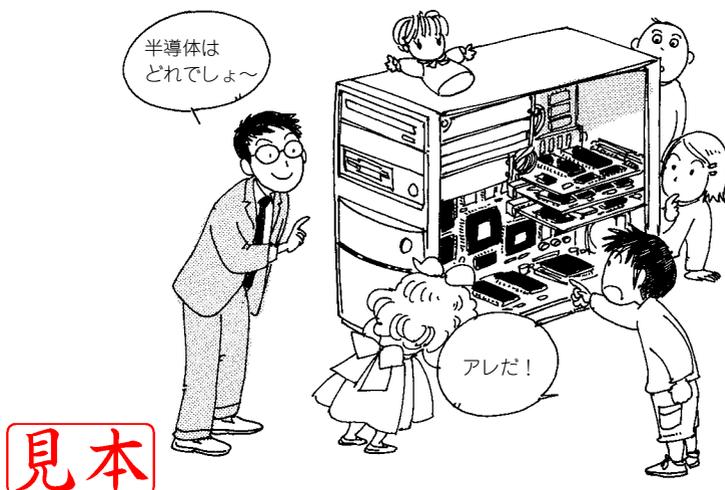
第1章

はじめまして半導体

半導体はエレクトロニクス製品の中にたくさん入っています。代表的な例として半導体のかたまりとも言われているパソコンの中をのぞいてみましょう。

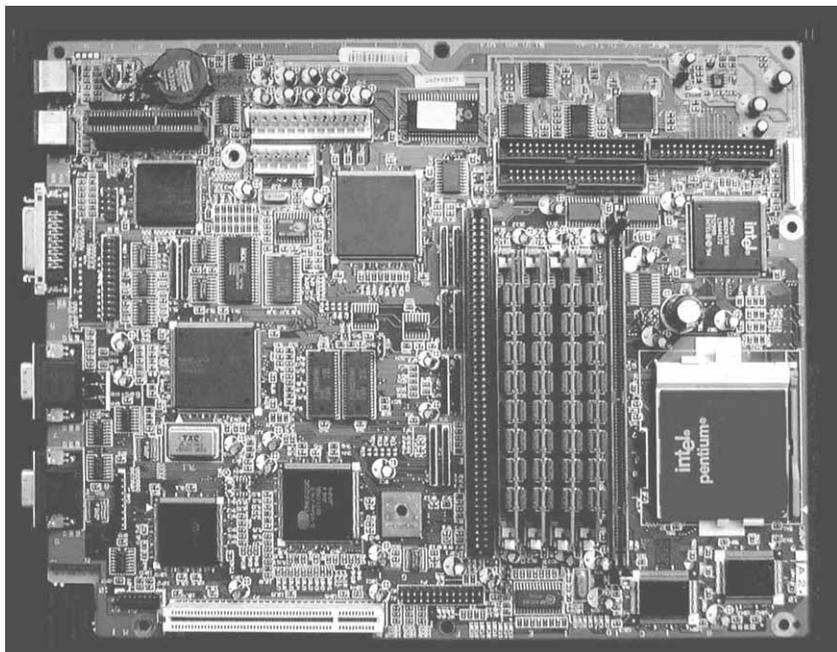
● 半導体はどこにいる？

デスクトップパソコン本体のケースのねじを外して開けてみると、写真1-1のような樹脂（プラスチック）でできた薄緑色のプリント基板が見えます。基板を取り外すとその上にいろいろな電子部品が並んでいます。この中で約85個が半導体です。そのうち64個は中央右側に固まって縦型に取り付けられているのが見えます。これはメモリと呼ばれる半導体をさらに小さなプリント基板に取り付けたもので



見本

半導体はどこにいる？



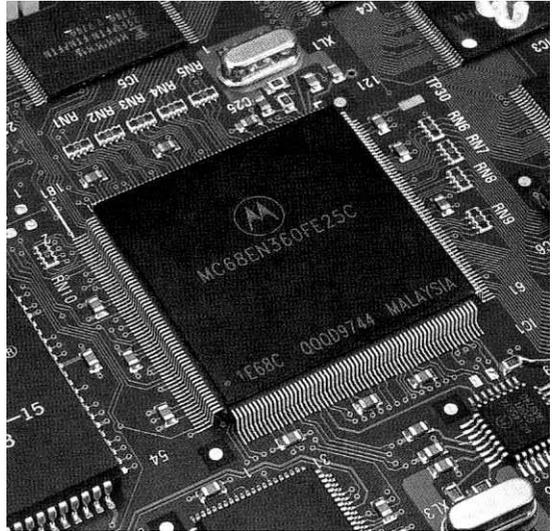
〈写真1-1〉 デスクトップパソコンのプリント基板

す。

半導体は黒色または茶褐色の四角形や矩形の形をした樹脂またはセラミックの容器(パッケージ, packageと呼ぶ)に入っていて, その周りからは金属の細いリード線が何本も出ています。

ここで覚えておきたいのが写真右下にあるいちばん大きい正方形の半導体で, マイクロプロセッサ(中央処理装置, Central Processing Unit, 略して **CPU**)と呼ばれています。パソコンの心臓部ともいえる, もっとも有名で重要な半導体です。その隣に縦型に固まって付いているのが**メモリ用半導体**(dynamic random access memory, 略して **DRAM**)で, 情報を一時的に記憶しておく半導体です。そのほかの半導体はディスプレイに画像を送ったり, キーボードの信号を受け取ったり, プリンタを動かしたりするためのものです。

見本半導体に近づいてみましょう。写真1-2の半導体のパッケージはもっともホビュウなもので, **QFP**(Quad Flat Package, 四角くて平らなパッケージと



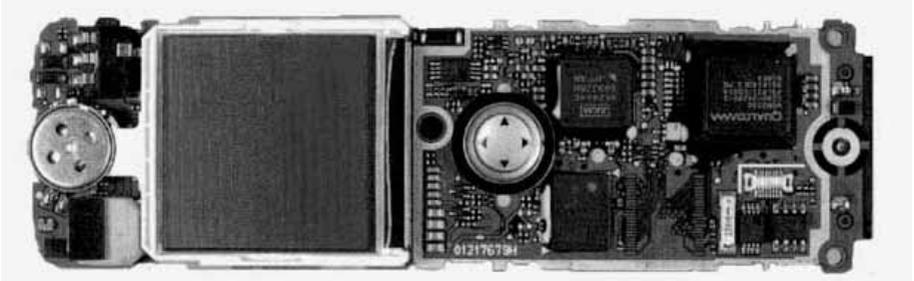
〈写真1-2〉
プリント基板に取り付けられている
半導体 (QFPパッケージ)

いう意味)と呼ばれています。1辺が約3.5cm、厚さが約4mmのエポキシ樹脂でできています。この半導体パッケージの周辺からは約300本もの細いリード線が出ていて、きれいにそろって曲げられ、プリント基板とはんだ付けされています。半導体パッケージの外側には抵抗やほかの半導体パッケージが配置され、細い配線で接続されています。

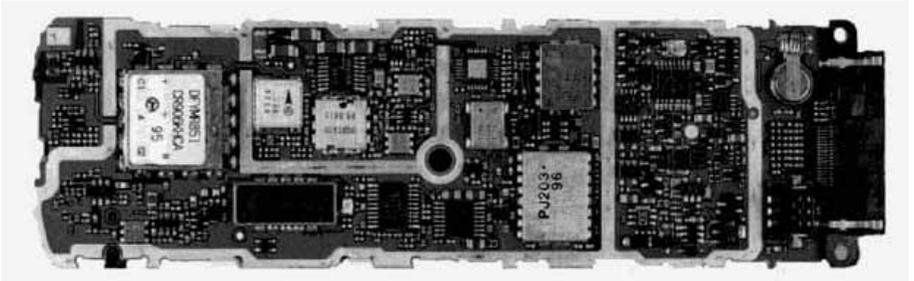
こうして見ると、パソコンの中はそれほど複雑ではないと感ずるかもしれません。しかし、半導体パッケージの内部にあるシリコンチップ (silicon chip) は想像を絶するほど複雑で小さくできています。このような基板上的配線と、チップの中の複雑な回路が協力して、皆さんがパソコンのキーボードやマウスを使って命令した仕事を、まちがいに忠実に実行し、ディスプレイやプリンタにその結果を出力しているのです。

もう一つ半導体を使った製品の例として、携帯電話機の基板を見てみましょう。携帯電話はパソコンよりもずっと小さく、押しボタンや液晶パネルも付いているので、プリント基板の面積にはあまり余裕がありません。

見本プリント基板は写真1-3のように小さく、軽くできていますが、やはり半導体が中心です。基板が小さいので、半導体もできるだけ薄く作り、基板の裏にも半導



(a) 表面



(b) 裏面

〈写真1-3〉携帯電話機のプリント基板

体を載せています。

友人の電話番号や呼び出しメロディを覚えておくメモリや液晶画面を作る半導体、声を聞くためのスピーカやマイクロホンを動かす半導体、また、電波を作って送る特別な半導体も必要です。

携帯電話は急速に性能が向上しているので半導体への要求が厳しくなり、特別な半導体やパッケージも数多く使われています。

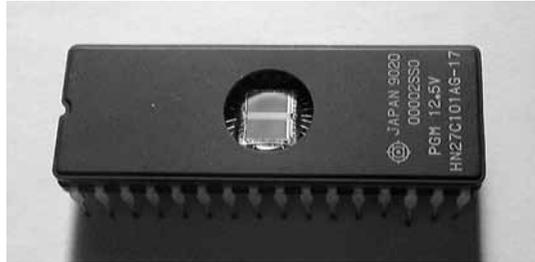
● チップが中に入っている

半導体チップそのものは写真からわかるように、黒い樹脂やセラミックで固められているので、外からは見えません。理由の一つは、光が当たると半導体が光に反応して誤動作するからです。

見本 ところがわざと光が入るようにしてある半導体もあります。メモリ(記憶素子, memory)の一種でプログラマブルROM(PROM)またはUV-EPROMと呼ばれる

〈写真1-4〉

シリコンチップがパッケージの中に
入っている。チップは5×5mm
(PROMの例)



ものですが、外からガラスの窓を通して光を当てて、記憶した情報を消すことができる特別な半導体です。もっとも、今は便利な消しかたのできるほかのメモリができたのであまり使われなくなっています。

このメモリでは、写真1-4に示すようにセラミックパッケージの中にシリコン (Silicon, 記号はSi) の小さい四角い板がまるで^{みのむし}糞虫のように入っているのが見えます。この小さいシリコン片をチップ (chip) と呼びます。たまにダイ (die) と呼ぶこともあります。外国のレストランで給仕の人にあげるチップはスペルがtipで、まったく違う意味です。

シリコンチップには細い金線が何本もつながっていて、パッケージから外へ出ている太いリードに接続されています。こうして電気信号が外部の世界に出ていき、外部から半導体が動作するための電源が供給されるのです。

● 半導体でよく使う言葉

これまで単に「半導体」と言ってきましたが、半導体の世界ではいろいろな用語が使われていて、初めて聞くとどれが正しいのかわからず混乱します。半導体 (セミコンダクタ, semiconductor) は本来金属とか木材と同じ物質の名前で、「半分だけ導体」という意味なのですが、現在はもっと広い意味で使われています。

半導体チップをパッケージに入れてリード線を取り出した製品は、半導体デバイス (semiconductor device)、または半導体素子、半導体部品、そして略して半導体とも呼ばれています。どれも同じ意味ですが、技術者の間では半導体デバイスがいちばん多く使われるようです。デバイスを装置と訳すこともありますが、**見本**この場合日本語として適当ではありません。

半導体の基本となるデバイスにはトランジスタ (transistor) があります。信号波

形を増幅し、電圧や電流をスイッチしたりする重要な素子ですが、このトランジスタに対する日本語はありませんし、わかりやすく訳すこともできません(トランジスタについては第3章で詳しく説明する)。

トランジスタをシリコンチップの中に数多く組み込んだものが**IC** (Integrated Circuits, **集積回路**)です。ICの作りかたは第5章と第6章で説明しますが、単に多くのトランジスタを取り付けただけではありません。むしろ埋め込んだと言ったほうがよいでしょう。さらにトランジスタを1,000個以上入れたものを**LSI** (Large Scale Integration, **大規模集積回路**)と呼んでいます。現在のエレクトロニクス製品には主としてLSIが使われています。技術者はまた、もっと数多くのトランジスタをチップの中に入れた(これを集積度が大きいと言う)LSIとして**VLSI** (**超LSI**)という用語を使うこともあります。

半導体の分野ではこのほかにもさまざまな用語が使われ、特に英字の頭文字を並べた略語は数百もあります。重要なものは本書で順に説明していきます。3文字の英字(3文字略語)も頻繁に使われますが、あまりに多いために全部意味のわかる人はいないとも言われているほどです。

● チップを調べてみよう

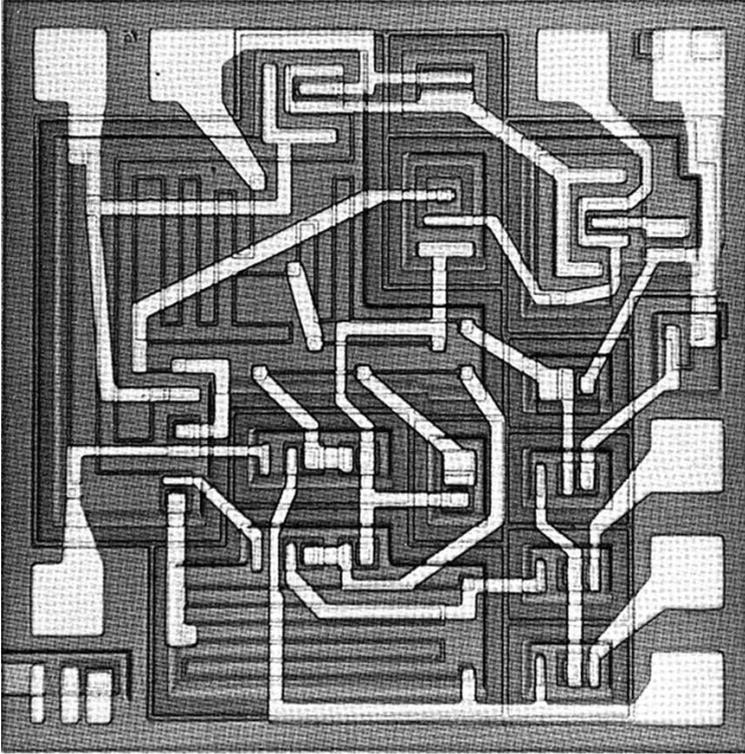
では半導体デバイスから心臓部ともいえるべき、半導体チップを取り出して調べてみましょう。

半導体チップの種類は数千～数万種類もあって形も一様ではありませんが、ここではもっとも多く使われているICのチップを見ていきましょう。

写真1-5はOPアンプと呼ばれる増幅回路のチップです。実は、このチップはICの開発初期に設計されたものですが、その改良型は現在でも使われていますし、チップの表面がとてもきれいで見やすくできているので、取り上げてみました。

このチップは代表的半導体物質であるシリコンからできています。大きさは3mm角で厚さは0.7mmという小さなもので、指先でやっとならつまめるくらいです。チップの表面は少し色が付いているように見えますが、チップをちょっと傾けて見ると赤から青や紫に色が変わります。この色は干渉色といって、薄い透明の膜に光が当たったときに見られる虹の色です。同じ現象は雨の日に道路に落ちた油の膜でも見られます。

見本



〈写真1-5〉 ICチップ (OPアンプ) 3mm角の大きさ (Fairchild Semiconductor 社提供)

チップの表面の様子はよほど目の良い人でないと見えません。そこで拡大鏡で見ると、写真のように白い線の模様が走っているのがわかります。これはアルミニウム (記号はAl) の厚さ数 μm (ミクロン: $1\mu\text{m}$ は千分の1mmの長さ) の薄い膜で、回路の配線に相当します。配線の下には数 μm の厚さのシリコンの酸化膜があります。この酸化膜で絶縁しているため、その上にアルミニウムの配線が行えるのです。

シリコン酸化膜は水晶や石英と同じ物質なので、固くて透明なため光が当たるときれいな干渉色が見えます。場所によって厚さが違うので、いろいろな色の模様が見えます。数 μm という厚さはピンとこないかもしれませんが、この本で使っている紙の厚さが約 $100\mu\text{m}$ あることを考えると、いかに薄いかがわかりますね。

見本

● トランジスタが埋め込んである

写真1-5で示したチップで配線が途中で終わっているように見えるのは、そこでチップの中のトランジスタや抵抗、つまり回路部品につながっているからです。部品はチップの中に埋め込まれているわけで、これが半導体ICの最大の特徴と言ってもよいでしょう。部品をシリコンの中に埋め込む方法は、長い年月と多くの費用をかけてメーカーや大学の大量の研究者が完成し、今でも休みなく進歩が続いています。

半導体チップをさらに顕微鏡で拡大してみると、写真1-6のように見えます。薄いアルミニウム配線の膜も2,000倍に拡大すると厚く見えます。配線の下にはシリコン酸化膜があります。配線はところどころが^ぼ凹んでいます。そこでは酸化膜に穴があいていて、チップの中にある部品をつないで回路を作っているのです。

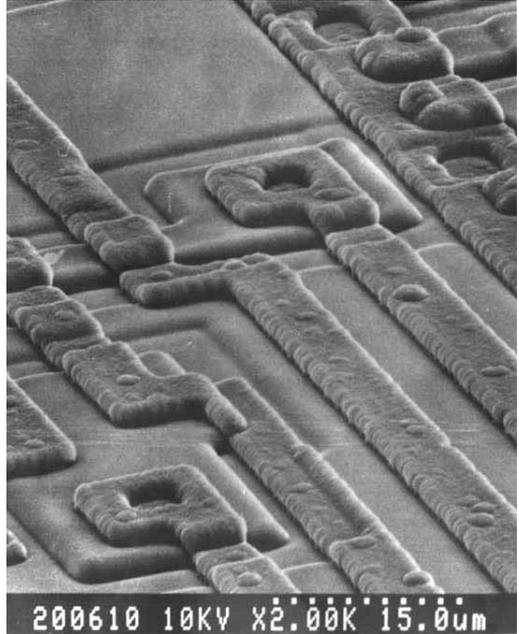
この部品の埋め込みと配線の製作技術は、ウェハプロセス (wafer process, シリコンウェハ加工工程, または半導体前工程) と呼ばれ、半導体の最重要技術になっています。

ウェハプロセスについては第6章で説明します。もう一度写真1-5のチップの表面を見ると、アルミニウムの白い配線はチップの周囲で止まり、四角く広がって



見本

トランジスタがチップの中に埋められている



〈写真1-6〉
アルミニウム配線を2,000倍に拡大
してみると

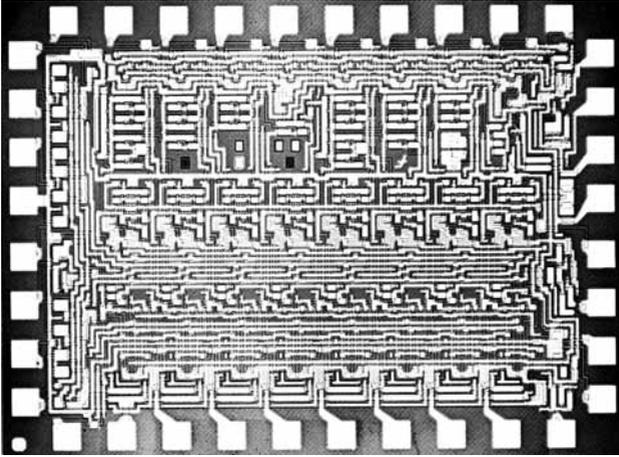
います。ここはあとで金線やアルミ線をつなぐための中継所になっていて、ボンディングパッド (bonding pad, ボンディング用の座布団) と呼ばれます。このチップには8個のパッドがあるのがわかります。つまり、このチップの場合は外部につながる金線も8本で、パッケージのリード線も8本になります。

このOPアンプ用のICは、トランジスタとそのほかの部品数は全部で20個程度ですが、その後新しいチップが次々に設計され、一つのICに載せられるトランジスタの数は急激に増えてきました。

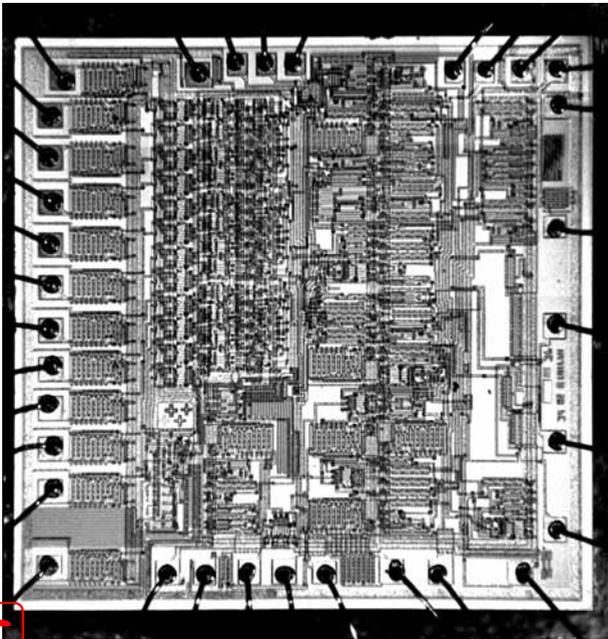
写真1-7を見てください。これは8ビットの計算用チップで3mm×4mmの大きさです。トランジスタの数も約250個、ボンディングパッドも36あります。配線も相当複雑になっています。このようなチップは家庭用AV製品、カメラ、パソコン周辺機器、玩具などに多く使われています。

写真1-8は電卓用のチップです。トランジスタの数は1,500以上になって、チップの大きさは6mm角まで大きくなり、もう立派なLSIと呼べるものです。電卓はそれまで10個以上のICを使って組み立てていたのですが、このチップが設計され

見本



〈写真1-7〉 数値計算用 IC チップ. トランジスタ 250 個
(Fairchild Semiconductor 社提供)



見本

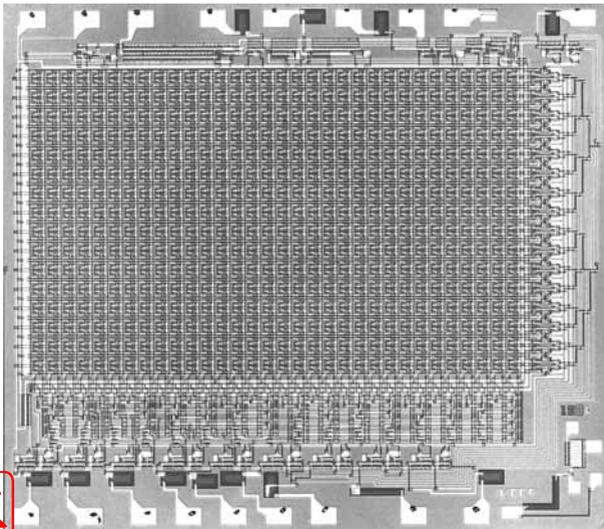
〈写真1-8〉 電卓用 LSI チップ, トランジスタ 1,500 個, 6mm 角

たため、たった1個で電卓ができるようになったので、電卓の価格も急激に下がり、現在のように安く買えるようになったのです。

このように、外からは簡単に見え、値段も安い電卓でも、けっこう複雑なチップが使われているのです。このチップでは金線がチップ周辺のパッドにボンディングされているのが見えます。

さらに**写真1-9**を見てみましょう。これは今までのチップの表面と少し違いますね。織物のようにきれいな模様になっています。これは初期のDRAMで8Kビットメモリです(ビットは1単位の情報の意味で、このチップは8,192個の情報を記憶できる)。

この模様の中にトランジスタがあって、情報を記憶するのです。どうやってトランジスタが情報を記憶するかは第4章で説明します。現在ではこのチップ(8Kビット)では容量が足りなくなったため、使われなくなりました。DRAMは半導体の中でもっとも大量に作られ、現在では64Mビット(Mはメガ、百万のこと)以上のもも作られています。つまり、**写真1-9**のDRAMのなんと8千倍もの容量になっていて、チップ表面はもうあまりに細かくて何も見えません。しかし、メモリ回路の原理は変わりません。トランジスタの大きさと配線の幅が極端に細かく



見本

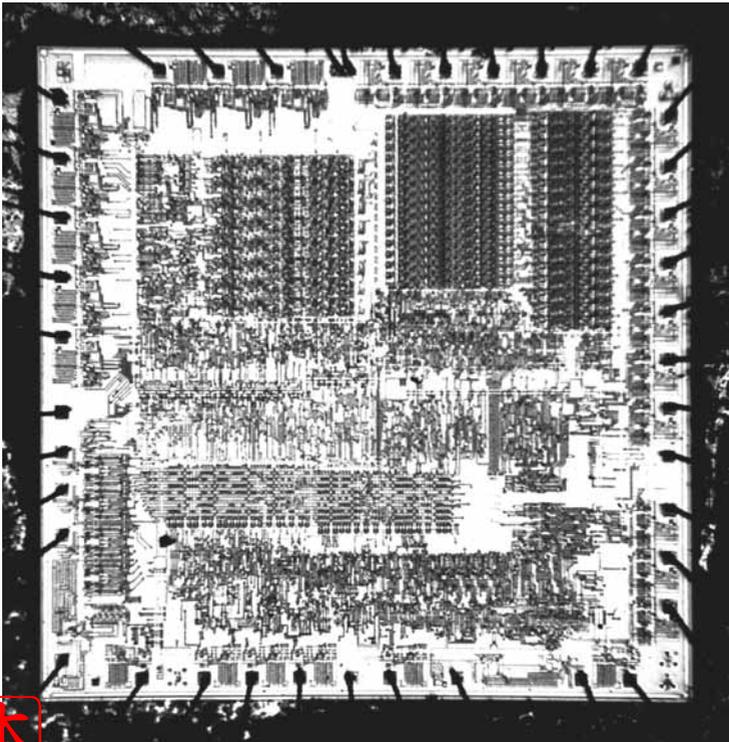
〈写真1-9〉8KビットDRAMメモリ

なっているのです。

写真1-10は、写真1-1のパソコン基板でも見られたマイクロプロセッサチップで、現在ひろく使われているパソコンの爆発的な普及のスタートとなった米国Intel社の8080Aのチップです。7mm×7mmの大きさで、トランジスタ数は4,000個を超え、顕微鏡を使ってもよく見えないほど細かいパターンになっています。

マイクロプロセッサの働きについては第4章で説明しますが、このマイクロプロセッサチップが開発され、1976年に初めての国産マイコン組み立てキット(TK-80)がNECから発表されて、さらに現在のパソコン時代の幕が開きました。マイクロプロセッサチップはその美しさから、人類の作った極微の芸術品として評価されています。

この後に開発されたLSIやマイクロプロセッサもまた美しいものが多いのです



見本

〈写真1-10〉 マイクロプロセッサチップ 8080A (7×7mm)

が、最近ではあまりにも細くなり、もう表面を見てもそのすばらしさがわかりにくくなってしまいました。

● デザインルールとは

さてICとLSIチップの表面をいくつか見てきましたが、チップ上の白く見えるアルミニウム配線の幅は、トランジスタの数が増えるとともにだんだん細くなっています。写真1-5では線の幅は約 $20\mu\text{m}$ もありますが、写真1-8では $2\mu\text{m}$ 、写真1-10に至っては約 $0.8\mu\text{m}$ まで細くなっています。

この細い線をきちんと作るのはなかなか難しく、配線の幅は半導体の加工技術でもっとも重要な数字です。配線が細くできるということは、トランジスタを小さく作って、一つのチップ内に多くのトランジスタを収容できるため、より複雑な回路をチップの中に作れるわけです。

この線の幅(最小加工線幅)のことをデザインルール(design rule, 設計のための基本規則の意味)と呼びますが、この数字で半導体メーカーの加工技術のレベルがわかります。

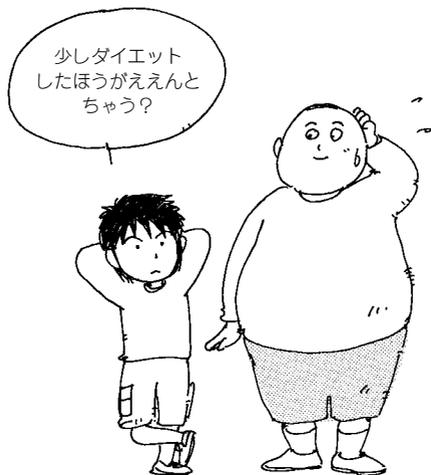
ウェアプロセスの進歩は、言い換えるとデザインルールの微小化への挑戦とも言えます。その後、細い線を作る技術が進み、現在ではこの線幅は $0.2\mu\text{m}$ 以下まで細くできるようになっています。デザインルールが小さくなり集積度が上昇すると、LSIの価格(製造コストと呼ぶ)が逆に下がっていくというのが、半導体技術のとても重要なところなので、第6章で取り上げます。

● チップはどうしてそんなに小さいのか

さて、半導体チップを見た人が一様に驚くことは、半導体チップはどうしてこんなに小さいのかということです。指先でつまむのもなかなかたいへんで、ピンセットが必要です。もう少し大きいほうが持ちやすいし、使いやすいのではないのでしょうか。

第一そんなに小さくては、うまく電流が流れないのでと心配にもなります。もし、チップが名刺くらい大きさなら配線がよく見えて、わかりやすいでしょう。見本

しかし、半導体に限っては小さいことが良いことなのです。半導体が小さけれ



半導体は小さいのが良いこと

ば、どこにでも入れられます。携帯電話の基板の例でもわかります。数多くのトランジスタに仕事をさせるには、やはり小さいほうが有利です。

あまりに細い電線には電流が流せなくて困るのでは、と思う人もいるかもしれませんが。確かにチップのアルミ線には大きくても数mA(ミリアンペア、1アンペアの千分の1)くらいしか流せません。しかし、チップの中では数 μ A(マイクロアンペア、1アンペアの100万分の1)の電流でも立派に回路が動作することが知られています。

電圧のほうも同じで、数mV(ミリボルト、1ボルトの千分の1)の信号の電圧でもうまく動作します。

チップの世界を考えると、自分がガリバーになって超小人の国に行ったと想像してみてください。小人ひとりのごくわずかしか食物を食べないし、仕事をするための電気も水もほんの少ししか要らないでしょう。

写真1-10に示したマイクロプロセッサのチップは、まさに人口数千人くらいの町の姿が7mm角の面積の中に凝縮されている、とイメージしてもよいのです。

チップは小さくても動くことはわかるのですが、実はチップは小さくなる必要があるのです。半導体が小さい最大の理由は、「小さいほうが安くなる」という事実です。もしチップが名刺のような5cm角ぐらいたとすると、その価格(正確には

見本

コストと言う。つまり原価のこと)が1個5万円ぐらいになってしまいます。これを5mm角にしたと仮定すると、面積は100分の1になり、面積に比例して価格が安くなるため、100分の1の500円にすることができるのです。

小さいと安くなるのはあたりまえのようにも思えますが、半導体の場合は小さくても同じ性能が出せるということが重要なのです。実際には直径20cmくらいの円形のシリコンウェハから数百個のチップを同時に作ることで、価格を下げていきます。この話は半導体にとって、とてもたいせつなことなので、第6章でもっと詳しく説明します。

チップが安くなれば、それを使った製品も安くなり、爆発的に売れます。半導体はこうして、小形化する⇒低価格になる⇒多くの人を使う⇒大量に生産する⇒研究開発が進む⇒小形化する、という良い循環を繰り返し、社会に急速に浸透していきました。その間、各半導体メーカーは競争に勝つためにチップの小型化に取り組み、その技術が進むほどチップは小さくなり、価格も下がってきたのです。

● 半導体は神様からの贈り物

さて半導体は何から作るのでしょうか。原料は何でしょうか。

驚くべきことにいちばん多く使われる半導体であるシリコンの原料は石なのです。土からでもシリコンが取れます。地球を作っている物質はほとんどが岩石で



シリコンは神様からの贈り物