

ケリーが出した結論は、アメリカが求めている全土をカバーする高性能の電話ネットワークは真空管では実現できない、ということです。

そこでケリーは、真空管とは違うまったく新しい増幅器を作らなければならないと考えました。具体的には、半導体を使って真空管と同じように、信号の増幅作用を持つデバイスの開発を目標としました。

ケリーのポストは電子管研究部長です。電子管とは真空管のことで、すから、彼は高性能の真空管を研究開発することが本来の仕事のはずです。そのケリーが自らの担当である真空管の将来に見切りをつけ、もう真空管の時代は過ぎた、真空管に代わる新しい半導体素子が必要だ、という信念を持ったところに彼の先見の明と偉大さがあります。

そこでケリーはこの開発に適した研究者探しを始めました。彼が目をつけたのはアメリカのMIT（マサチューセッツ工科大学）で博士号をとったばかりのショックレー（W.B.Shockley）でした。1936年に彼をベル研に採用し、半導体増幅器開発のリーダーに据えました。その時ケリーがショックレーに言ったのは、「真空管のことは忘れろ、半導体を使い工夫して増幅器を作れ、何年かかってもよい」ということで、細かいことは何も言わずあとはすべてショックレーに任せました。

ところがいくら実験を重ねても半導体増幅器はなかなか実現できず、いろいろ工夫をしてもことごとく失敗してしまいました。結局、半導体増幅器（トランジスタ）が実現できたのは第2次世界大戦後の1947年の暮れのことです。固体増幅器の計画がスタートしてから、足掛け12年かかったことになります。

その1947年のある日、ショックレーは研究仲間を集めて、どうし

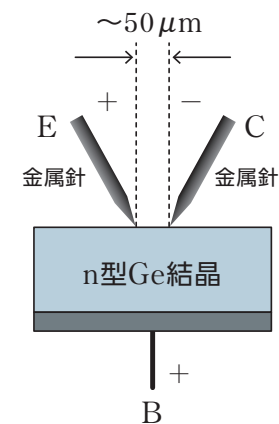
てこんなに失敗ばかりしているのか自由に話し合う会合を開きました。そのメンバーの1人に理論物理学者のバーディーン（J.Bardeen）がいました。彼は礼儀正しくおとなしい、ほとんど口をきかない物静かな男でしたが、この時はショックレーに何かアドバイスはないかと促されて次のようなことを指摘しました。「半導体の研究はかなり進歩しているけれども表面について我々は何もわかっていない。それにもかかわらず我々が実験をする対象はほとんどが半導体の表面ではないか。だから半導体の表面の研究をしばらくやってみてはどうか」。

後になってショックレーは、「あのバーディーンという言葉は自分にとって生涯最高のアドバイスだった」と述懐しています。そこでバーディーンは結晶の表面についてある仮説を提唱し、それを検証するための実験を、実験が得意なブラッテン（W.H.Brattain）が行なうことになりました。

その年の12月17日、バーディーンとブラッテンは図2-2のような仕組みで実験をしていました。まずn型ゲルマニウム結晶の薄片に、図のような極性の電圧をかけました。そして、表面に2本の金属針を接触させて、どのように電気が流れるかを測っていました。

その実験の中で偶然、左側の針Eにプラスの電圧をかけて小さな電流を流し込むと、右側の針Cに大きな電流が流れることを発見しました。つまり電流の増幅作用が認められたのです。

図 2-2 ● 電流増幅作用を確認した時の実験



さらに針Eから小さな信号電流を流しこむと、針Cからは大きな信号電流が取り出せることを確認しました。つまり半導体の結晶で増幅器が実現できたことになります。この時、2人は増幅器を作ろうとしてはいなかったのですが、フタを開けてみたら偶然に増幅現象が起こったのです。これがトランジスタ誕生の最初です。

大発明や大発見は偶然によることが多いといわれています。トランジスタの発明も上に述べたように偶然が伴っています。しかしそれは半導体増幅器を作ろうという執念の結果として生まれた偶然です。

これについてショックレーは、「あのトランジスタの発明、増幅現象の発見は非常によくマネージメントされた研究の中で偶然生まれたものだ」と表現しています。ショックレー、バーディーン、ブラッテンの3人(写真2-1)は、トランジスタの発明で1956年にノーベル物理学賞を受賞しています。

また、トランジスタの開発を推進したケリーは、自らは実験には携わりませんでしたが、彼がいなければトランジスタはできなかったということで、「トランジスタの父」(英語では、Spiritual father)と呼ばれて尊敬されています。

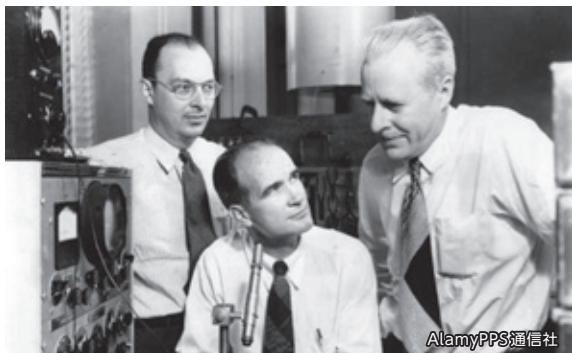


写真2-1 左からバーディーン、ショックレー、ブラッテン

2-2

トランジスタの動作原理

—— ショックレーが発明した接合型トランジスタ

前節で説明したように、トランジスタを発明したのはショックレー、バーディーン、ブラッテンの3人です。しかし、最初に増幅現象を見つけた実験を行っていたのはバーディーンとブラッテンの2人だけで、ショックレーは所用で外出していて実験の現場には居合わせませんでした。

このことがよほど口惜しかったようで、ショックレーは翌日から自室に引きこもったままトランジスタの動作原理の理論をわずか1ヶ月で解明してまとめました。さらにその理論に基づいて実験で成功したのとは異なる「接合型」と呼ばれる構造のトランジスタを提案します。

ショックレーはこの時の研究成果を論文にまとめて発表するとともに、1950年には有名な『Electrons and Holes in Semiconductors』と題した本を出版しました。この本は日本でも半導体研究者・技術者たちのバイブルとなります。

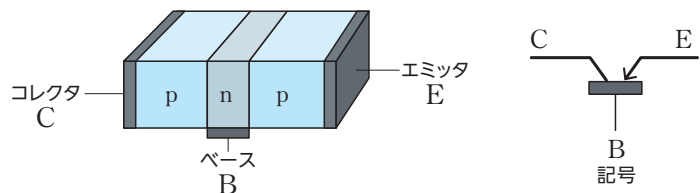
ショックレーが発明した**接合型トランジスタ**は、図2-3(a)に示すように、p型-n型-p型またはn型-p型-n型の半導体をサンドイッチ状に接合した構造をしています。これに対して最初の実験で確認されたトランジスタは、63ページの図2-2に示したような半導体結晶に金属の針を2本接触させた構造で、点接触型トランジスタと呼



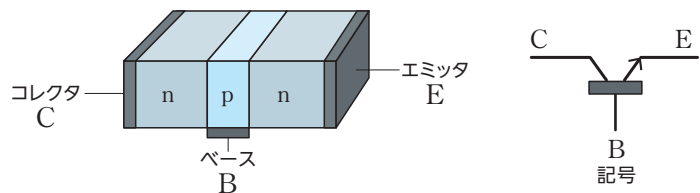
ばれます。

接合型トランジスタが十分な増幅作用を行なうため、図2-3(b)に示すようにエミッタ領域の不純物濃度をコレクタ領域やベース領域よりも十分高くしておくことが重要です。

2-3 ● 接合型トランジスタ

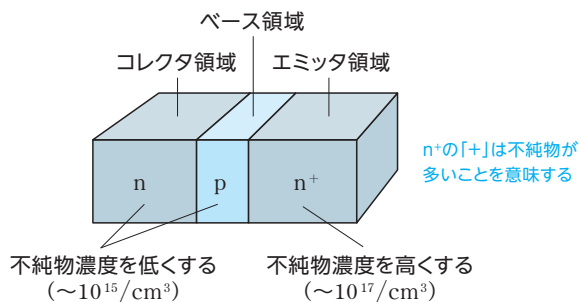


pnpトランジスタ



npnトランジスタ

(a) 接合型トランジスタの構造



(b) 半導体の不純物濃度

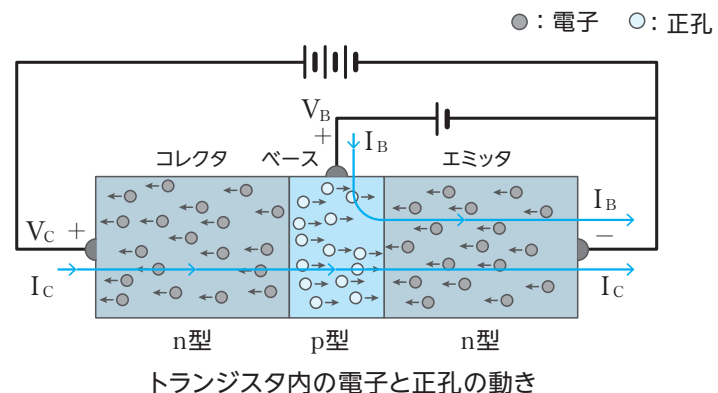
具体的には、不純物原子の数をコレクタ領域とベース領域では 1cm^3 あたり 10^{15} 程度にしておき、エミッタ領域では 10^{17} 程度と2桁くらい多くします。ゲルマニウム (Ge) やシリコン (Si) 結晶の原子数は 1cm^3 あたり約 5×10^{22} ですから、不純物濃度はコレクタおよびベース領域で1000万分の1、エミッタ領域で10万分の1程度にします。

ここでトランジスタの動作原理を接合型トランジスタで説明しましょう。

図2-4はnpn型の接合型トランジスタの動作原理を示した図で、真ん中のp型領域がベース (B)、両端のn型領域がそれぞれコレクタ (C) とエミッタ (E) です。ここでエミッタを接地して ($V_E=0$)、コレクタに正の電圧 ($V_C \geq 0$) を加えます。

ベースに正の電圧 (V_B 、ただし $V_C \geq V_B \geq 0$) を加えると、ベース・エミッタ間は順バイアスになってベース電流 (I_B) が流れます。すなわち、エミッタ領域のn型半導体の多数キャリアである電子が、ベースの正電圧に引かれてベース領域に流れ込み、これがベース電流になります。この時ベース領域の幅をきわめて狭く ($50\mu\text{m}$ 以下) にし

2-4 ● トランジスタの動作原理



ておくと、ベース領域に流れ込んだ電子の大部分（例えば95%以上）がコレクタの正電圧（ V_C ）に引っ張られてコレクタ・ベース間の接合面を突破し、コレクタ領域に流れ込みます。これがコレクタ電流 I_C になります。

この時、エミッタからベース領域に流入した電子の一部はベース電流となりますが、これはごく一部（5%以内）で、残りのほとんど（95%以上）はコレクタに流れ込んでコレクタ電流になります。これがトランジスタの原理の一番大切なところです。

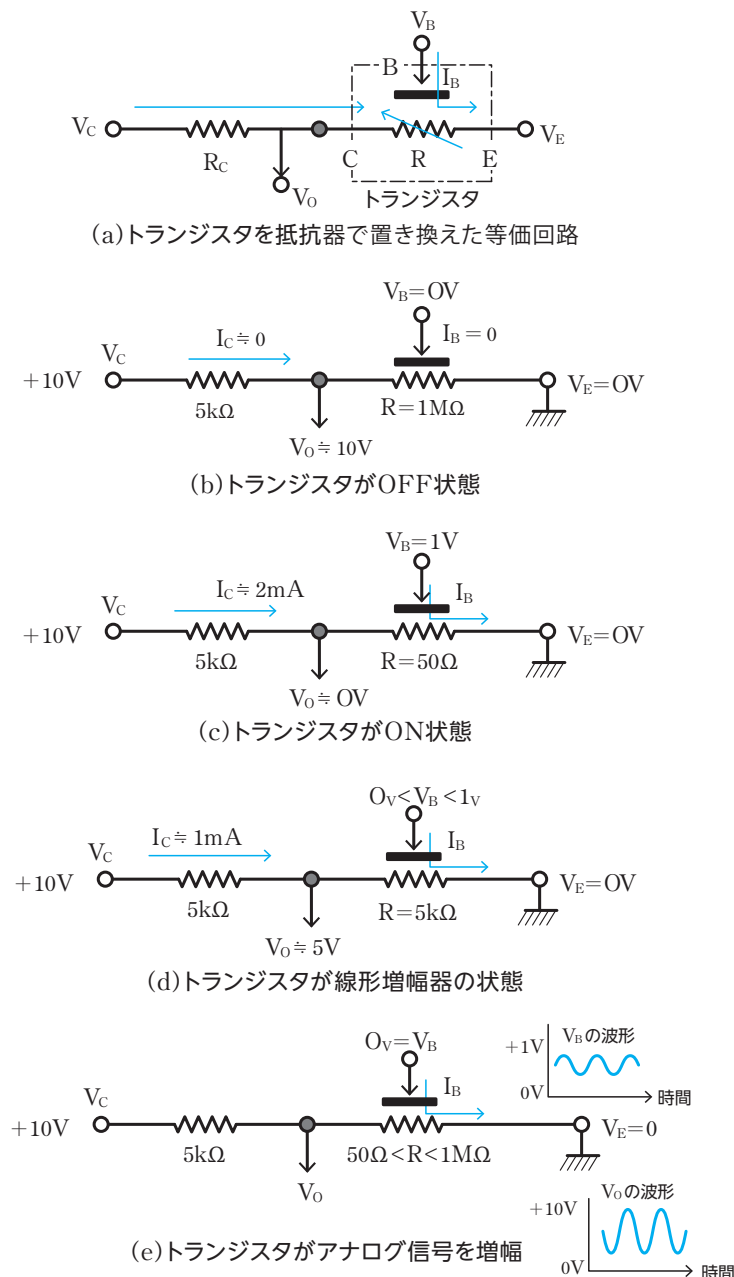
このベース電流とコレクタ電流の比は一定なので、トランジスタに流れる電流の5%以下で残りの95%を制御することになります。つまりベース電流の増減でコレクタ電流を制御できることになります。これがトランジスタの基本的な原理です。

一方、ベースに電圧を加えない（ $V_B=0$ ）場合は、コレクタ・ベース間が逆バイアスになるのでトランジスタには電流がまったく流れません。

このトランジスタの動作原理を抵抗を用いた等価回路で説明したのが図2-5です。

図の(a)のようにトランジスタを可変抵抗 R で置き換え、 R の値がベース電圧 V_B で変化すると考えます。ここで図の(b)のように、ベースに電圧を加えない（ $V_B=0$ ）場合は $R=1M\Omega$ ときわめて大きな値となり、トランジスタには電流がほとんど流れません（ $I_C=0$ ）。つまりトランジスタはOFF状態（遮断状態）になります。その結果トランジスタのコレクタ端子から得られる出力電圧 V_O はコレクタ側の電源電圧 V_C と同じ10Vになります。

図 2-5 ● 抵抗の等価回路で表わしたトランジスタの動作



これに対して図の(c)のようにベースに電圧を加えた ($V_B=1\text{v}$) 場合、 $R=50\Omega$ という小さい値となってコレクタからエミッタに向けて電流が流れ ($I_C=2\text{mA}$)、トランジスタはON状態 (導通状態) になります。その結果、出力電圧は $V_O=0\text{v}$ となります。このように、ベースに加える電圧によって、トランジスタはスイッチとして働きます。

次に図の(d)のように、ベースに(a)と(b)の中間の値の電圧を加えます。するとRも(a)と(b)の中間の値となって (例えば $R=5\text{k}\Omega$)、 I_C も中間の値 (1mA) となり、 V_O も中間の値 (5V) をとります。この領域ではトランジスタが線形増幅器として働きます。

これを波形で示したのが図の(e)で、入力信号としてベースに小さな電圧変化の波形を加えると、コレクタ側に V_O として大きな電圧変化の出力信号の波形が得られます。つまりアナログ信号の増幅器として動作するわけです。

この半導体デバイスは、図2-5に示したような動作原理を表わす“Transfer (伝達・転送) + Resistor (抵抗体)”の合成語として「Transistor (トランジスタ)」と命名されました。名付け親は同じベル研の情報理論で有名なピアス (J.R.Pierce) 博士です。

2-3



トランジスタの高周波化への取り組み

—— 拡散技術を使ったメサ型トランジスタの登場

トランジスタが発明され、企業もトランジスタの将来性に注目し始めました。

その中であってトランジスタの商品化をリードしたのは、終戦直後の1946年に発足した日本の「東京通信工業」(通称「東通工」、現在の「ソニー」) でした。

子供の頃ラジオ少年だった「東通工」社長の井深は、トランジスタの将来性に着目し、これで携帯ラジオを作ろうと考えました。

そして井深は、ベル研が開発したトランジスタの特許を持っていたWE社と、ライセンス契約を結ぶことに成功します。

しかしながら、当時はラジオへのトランジスタの利用は現実的でないと言われていました。なぜなら、その頃のトランジスタはラジオには使えないような低周波用しかなかったからです。

そこで、「東通工」は世界初のトランジスタラジオを作ろうと、トランジスタの高周波特性の改善に取り組みました。トランジスタをラジオに使おうとすると、中波 ($300\text{kHz} \sim 3\text{MHz}$) の周波数で動作することが求められます。一方、当時の技術では 1MHz 程度以下の低周波用しか作られていませんでした。



3-1

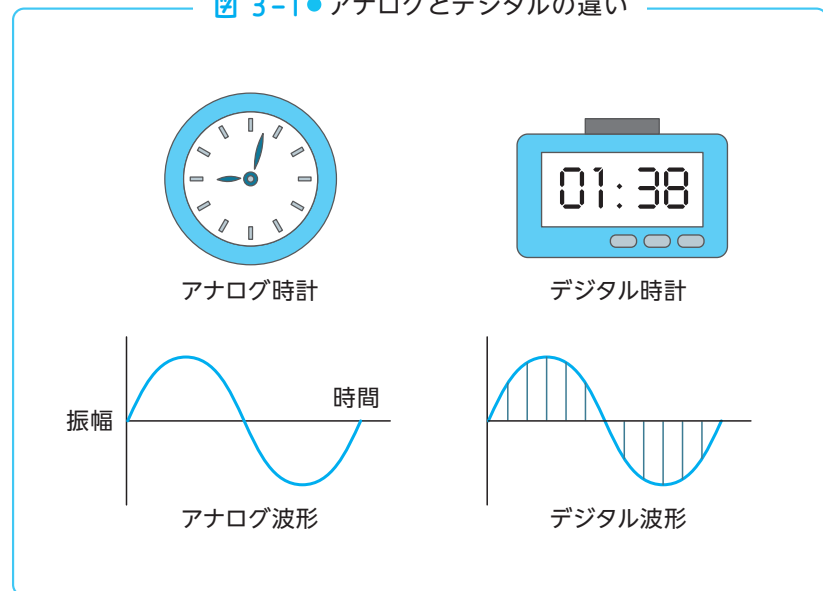
アナログ半導体とデジタル半導体

—— 計算するのはデジタル半導体

この章では「計算する半導体」がどのような仕組みで動いているのか、ということを説明します。そのために、最初に理解して欲しいのはアナログとデジタルの違いです。

アナログとデジタルの話をするると、図3-1に示すような、時計の話とか波形の話が出てきます。この説明は誤りではありませんが、本質的ではありません。

図 3-1 ● アナログとデジタルの違い



ここでいうデジタルの本質は「コンピュータが理解できるもの」ということです。図3-1のデジタル時計は「01:38」という「数字」ですので、コンピュータに入力して処理できます。

一方、アナログ時計の指す時刻は、そのままではコンピュータには理解できません。しかし、アナログ時計のデータをデジカメで撮影してデジタル画像にしてやれば、コンピュータがその画像を解析して、時間を知ることは可能でしょう。このデジタル画像はもちろんデジタルです。

そして、コンピュータの中で計算している部品は半導体素子です。つまり、半導体が理解できる「数字」がデジタルデータということになります。

ただ、半導体が処理する数字は我々が使っている数字と少し異なります。半導体は0と1しか認識することができません。ですから、人間が使っている10進数とは違い、半導体は2進数を使います。

2進数とは図3-2に示すように0と1だけで構成される数字の記載方法です。2進数の1は10進数と同じ1です。しかし2進法では2という数字がないため、10進数の2は2進法では繰り上がって、10と表記されます。

図 3-2 ● 2進数の表記

10進数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2進数	0	1	10	11	100	101	110	111	1000	1001	1010

256 (10進数) → 100000000 (2進数)

1024 (10進数) → 1000000000 (2進数)

65536 (10進数) → 1000000000000000 (2進数)

半導体のメモリの容量などで、256とか1024とか65536とか、我々の感覚からすると奇妙な数字が表れます。これは半導体の扱う2進数だときりの良い数だということも理解できると思います。

ただし、10進数でも2進数でも、数を表わすことには変わりありません。人間が使う10進数と同じように扱うことができます。

図3-3に10進数の2+3と3×3を2進数で計算した例を示します。10進数と同様な計算ができることがわかるでしょう。さらに、小数も定義できますので、10進数で表わせる数は2進数でも扱えます。

ですから、半導体は数字であれば何でも理解できるといえます。その半導体が理解できる「数字」がデジタルデータなのです。

コンピュータで情報を処理する、つまり「計算する」ために、半導体に必要な技術は2つあります。1つは0と1を処理するデジタル回路を扱う半導体素子の技術、そしてもう1つはその半導体素子を大量に作製する技術です。

次の節から、まず0と1を処理する半導体素子の技術について解説していきます。

図 3-3 ● 2進数の計算

10+11(2+3)の計算

$$\begin{array}{r} 10(2) \\ + 11(3) \\ \hline 101(5) \end{array}$$

11+11(3×3)の計算

$$\begin{array}{r} 11(3) \\ \times 11(3) \\ \hline 11(3) \\ 11(6) \\ \hline 1001(9) \end{array}$$

※カッコの中の数値は10進数の値を示す

3-2



nMOS と pMOS を 組み合わせた CMOS

—— デジタル処理には欠かせない回路

デジタル情報を扱う基本的な素子が **CMOS** です。

CMOSは消費電力が少なく、小型化に優れていて高集積化が容易です。 ですから、0と1のデジタル情報を扱う半導体には必須で、デジタル処理を行なう現在のICやLSIには欠かせない存在といえます。

MOSFETにはnMOSとpMOSの2種類があります(86ページ参照)。このnMOSとpMOSの2つを組み合わせると同一基板上に配置した回路がCMOSです。CMOSのCは"Complementary"の頭文字で、日本語でいうと「相補的」という意味になります。

図3-4にCMOSの回路を示しました。図に示すように、CMOSはpMOSとnMOSを直列に接続した構成です。図の左と右はMOSFETの記号が違うだけで同じものです。

pMOSとnMOSのゲートは共通に接続され、同じ入力電圧 V_{IN} が加わります。またpMOSとnMOSはドレイン同士が接続され、そこから出力電圧 V_{OUT} を取り出します。

MOSFETの節で説明したように(2-6節参照)、同じゲート電圧に対してpMOSとnMOSは逆の動作をします。つまり、ゲート電圧をプラスにするとnMOSはONになり、pMOSはOFFになります。