

6. 世の中を変えたコンピューター

地殻の中に多量に含まれる半導体の素材

1個の電子の関与する原子が n 個集合して相互作用するときには n 個の軌道ができますが、そのうちの半分がエネルギー的に安定な結合性軌道で、そこに充足するように n 個の電子が2個ずつ入ります。残りの半分の軌道はエネルギー的に不安定な反結合性軌道で、電子が充足されずに空になっています。原子が集合した物質では n が極めて大きな値ですから、各軌道はエネルギー的に多少安定性が異なっても各軌道間のエネルギー差は極めて小さくなり、電子は各軌道間を容易に移動できる帯のようになり、バンドと呼んでいます。電子が充足している結合性軌道のバンドを価電子帯、電子が充足されず空になった反結合性軌道のバンドを伝導帯、2つのバンドの間をバンドギャップあるいは禁制帯と呼んでいます。この価電子帯のバンドを充足している電子は各原子に帰属していませんから極めて流動的で自由電子と呼ばれています。

銀や銅のような金属の塊の場合では2つのバンド間の禁制帯が非常に小さいために、原子を結び付けている電子は価電子帯と伝導帯の間で相互に往き来します。このような金属では伝導帯に電子が容易に移動するために高い電導性を示します。しかし、けい素やゲルマニウムなどのように金属結合性よりも共有結合性の優れた結合で原子が結び付けられている場合には、2つのバンド間の禁制帯が大きくなります。炭素の化合物でも黒鉛やポリアセチレンでは結合が共役していますから、2つのバンド間の禁制帯が小さく金属のように電導性を示しますが、全ての結合が結合で結ばれたダイヤモンドでは2つのバンド間の禁制帯が大きくなります。そのために、結合に関与している電子は価電子帯から伝導帯への移動にかなり高いエネルギーを要します。逆に、伝導帯から価電子帯への電子の移動にはエネルギーの放出を伴います。高い電位を持つ電子であれば伝導帯に移動することができますから電流が流れますが、低い電位しか持たない電子では伝導帯に移動することができず電流は流れません。このように特別な条件の時にのみ電導性を示す物質を半導体と呼んでいます。

けい素やゲルマニウムは表2-1に示す周期律表の14族に属して最外殻に4個の電子を持っていますが、共有結合性が大きいために同じく14族に属する炭素がダイヤモンドを形作るように、けい素やゲルマニウムも結晶を作ります。これらの物質は大きな禁制帯を持っていますから電導性をほとんど示さず半導体として振舞います。13族に属して最外殻に3個しか電子を持たないホウ素やアルミニウムやガリウムと15族に属して最外殻に5個の電子を持つ窒素やりんや砒素の間には配位結合により共有結合と類似の性質を持つ安定な結合が形成されます。原子半径の類似した原子同士が結びついたガリウム砒素などはけい素やゲルマニウムの結晶と同じような禁制帯を持つ結晶を形作ります。表6-1には比較的禁制帯が大きく電導性を示さない半導体物質の禁制帯をエネルギーの大きさを表すeVを単位として掲げて起きます。14族に属する炭素とけい素とゲルマニウムを比較して分か

るように、周期律表の上段にある元素ほど共有結合性が大きくなり、禁制帯も大きくなる傾向が見られます。

禁制帯は価電子帯と伝導帯の間のエネルギー差ですから、価電子帯へ電子を移動させるためにはかなり高いエネルギーを

要しますが、紫外線から赤外線までの波長領域の電磁波の持つエネルギーがこの禁制帯のエネルギーに相当しますので、表 6 - 1 には半導体物質の禁制帯に相当する電磁波の波長も掲げておきます。ちなみに、人間の眼には 380 ~ 770nm の波長領域の電磁波は可視光線として認識することができますが、これよりも短波長の電磁波は紫外線、長波長の電磁波は赤外線と呼ばれています。多くのこれらの物質はダイヤモンドのように電磁波に対して透明で電磁波をほとんど吸収をしません、表 6 - 1 に掲げたこれらの物質が対応する波長の電磁波を吸収しますと、価電子帯の電子は禁制帯を飛び越えて伝導帯に移動することができます。逆に、伝導帯から価電子帯への電子の移動には対応する波長の電磁波が発光する光エネルギーの放出を伴います。

けい素やゲルマニウムは 14 族に属して最外殻に 4 個の電子を持っていますが、15 族に属する窒素やりんや砒素は最外殻に 5 個の電子を持っています。14 族の原子が規則正しく整列している金属結晶の中に少量の 15 族の原子が不純物として混ざりますと、その部分だけに電子が過剰のまま n 個の原子が相互作用しながら集合した構造を保ちます。しかし、価電子帯は既に 2 個ずつの電子で充足されており、集合した構造の中で過剰になった電子は伝導帯に移動して極めて流動的に他の原子へ移動して過剰部分を解消しますから、15 族の原子は 4 個の電子を持つことになり陽イオンとなります。同時に過剰の電子は伝導帯の中を自由に動き回ります。全体として、図 6 - 1 (A) に示すように、不純物として含まれる 15 族の原子は陽イオンになり集合した構造の中で固定されていますが、n 個の原子が集合して相互作用している構造の中に陽イオンの数と同数の電子が点在して自由に動き回ります。このように 15 族原子が不純物として含まれ、電子が過剰になっている 14 族原子の集合した物質を n 型半導体と呼んでいます。

他方、13 族に属するホウ素やアルミニウムやガリウムは最外殻に 3 個しか電子を持っていません。最外殻に 4 個の電子を持つ 14 族の原子が規則正しく整列している結晶の中に少量の 13 族の原子が不純物として混ざりますと、その部分だけに電子が不足したままで n

表 6 - 1 半導体物質の禁制帯と電磁波の波長

| 物質 | 元素組成 | 禁制帯 | 波長 (nm) |
|----------|------|--------|---------|
| ダイヤモンド | C | 5.3 eV | 235 |
| けい素 | Si | 1.2 eV | 1033 |
| ゲルマニウム | Ge | 0.7 eV | 1850 |
| 窒化アルミニウム | AlN | 5.9 eV | 210 |
| 窒化ガリウム | GaN | 3.4 eV | 365 |
| リン化ガリウム | GaP | 2.3 eV | 539 |
| ガリウム砒素 | GaAs | 1.4 eV | 886 |

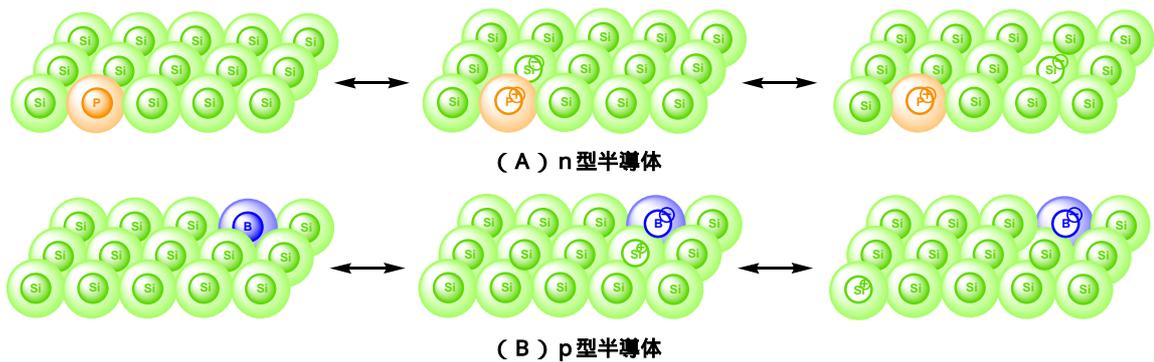


図6 - 1 半導体物質の模式図

個の原子が相互作用しながら集合した構造を保ちます。しかし、この価電子帯の電子は各原子に帰属しておらず極めて流動的で、不足した部分に他の原子から電子が移動して不足部分を補充しますから、13 族の原子は 4 個の電子を持つことになり陰イオンとなります。同時に電子を供給した 14 族の原子は電子が不足しますから、陽イオンとなります。このように電子の不足した原子を正孔と呼んでいます。次々に電子が自由に移動してゆきますから正孔も次々に移動してゆきます。全体として図 6 - 1 (B) に示すように、不純物として含まれる 13 族の原子は陰イオンになり集合した構造の中で固定されていますが、n 個の原子が集合して相互作用している構造の中に陰イオンの数と同数の正孔が点在します。このように 13 族原子が不純物として含まれ、電子が不足して正孔が点在している 14 族原子の集合した物質を p 型半導体と呼んでいます。13 族原子の陰イオンと等しい数の正孔により電氣的に常に釣り合っていますから、p 型半導体の末端で正孔が電子を受け取って消滅しますと、別の所で電子を放出して正孔が作られます。結果として、正孔が電子を運ぶように p 型半導体の中を電流が流れます。

このように炭素やけい素やゲルマニウムなどの 14 族の原子が規則正しく整列した結晶では価電子帯と伝導帯の間の禁制帯が大きいために、ほとんど電導性を示さず半導体として働きます。このほかに 13 族の原子と 15 族の原子が種々組み合わせられた結晶も同じような性質を示しますが、組み合わせによりその禁制帯の大きさなど半導体の性質が異なり、その利用法も大いに異なります。これらの物質は不純物が含まれていると規則正しく整列した結晶構造をとることができませんから、半導体の性質を利用するためには不純物が 10ppt ($1 \times 10^{-9} \%$) 以下の極めて高い純度が要求されます。けい素は地殻中の岩石などの中に満遍なく多量 (27.7%) に含まれる元素ですから極めて安価に原料の供給ができますが、高い純度まで精錬するためには高い技術と大量のエネルギーを要します。そのために原油価格の高騰と足並みを揃えるように半導体の素材となる金属けい素の価格も高騰します。例えば、2005 年 6 月からの 3 年間に原油の価格が約 2 倍に跳ね上がりましたが、金属けい素もこの間に 2 倍以上高騰して、2008 年 6 月には 1 t 当たり 170 \$ の価格で取引されている極めて高価な物質となっています。

整流や発光や太陽光発電をするダイオード

前節で述べたように、n型半導体は15族原子を不純物として含む14族原子の集合した物質ですが、15族原子が最外殻に5個の電子を持っていますからその付近は電子が過剰になります。集合した構造の中でこれらの過剰になった電子は伝導帯に移動して極めて流動的に他の原子へ移動して過剰部分を解消しますから、15族原子は4個の電子を持つことになり陽イオンとなり、同時に過剰の電子は集合した14族原子の塊の中を自由に動き回ります。全体として、15族原子の陽イオンと負電荷を持つ電子の数が等しく電気的には電荷を打ち消しています。他方、p型半導体は13族原子を不純物として含む14族原子の集合した物質ですが、13族原子が最外殻に3個しか電子を持っていませんからその付近は電子が不足しており、他の14族原子から電子が移動して不足部分を補充します。結果として、13族原子は4個の電子を持つことになり陰イオンとなり、同時に電子を供給した14族の原子は電子が不足しますから陽イオンになり正孔として動き回ります。全体として、13族原子の陰イオンと動き回る正孔の数が等しく電気的には電荷を打ち消しています。このとき、n型半導体の15族原子もp型半導体の13族原子も14族原子が相互作用しながら集合した構造の中に取り込まれていますから、自由に動くことができず固定されています。

このように伝導帯に過剰な電子を持つn型半導体と正孔を持つp型半導体を電子が移動できるように滑らかに接合しますと、図6-2に示すように当然、接合界面を越えてn型半導体部分の伝導帯からp型半導体部分の伝導帯へ電子が移動し、p型半導体部分で伝導帯から正孔の部分へ電子が移動して電荷を中和しますから、接合部の14族原子は価電子

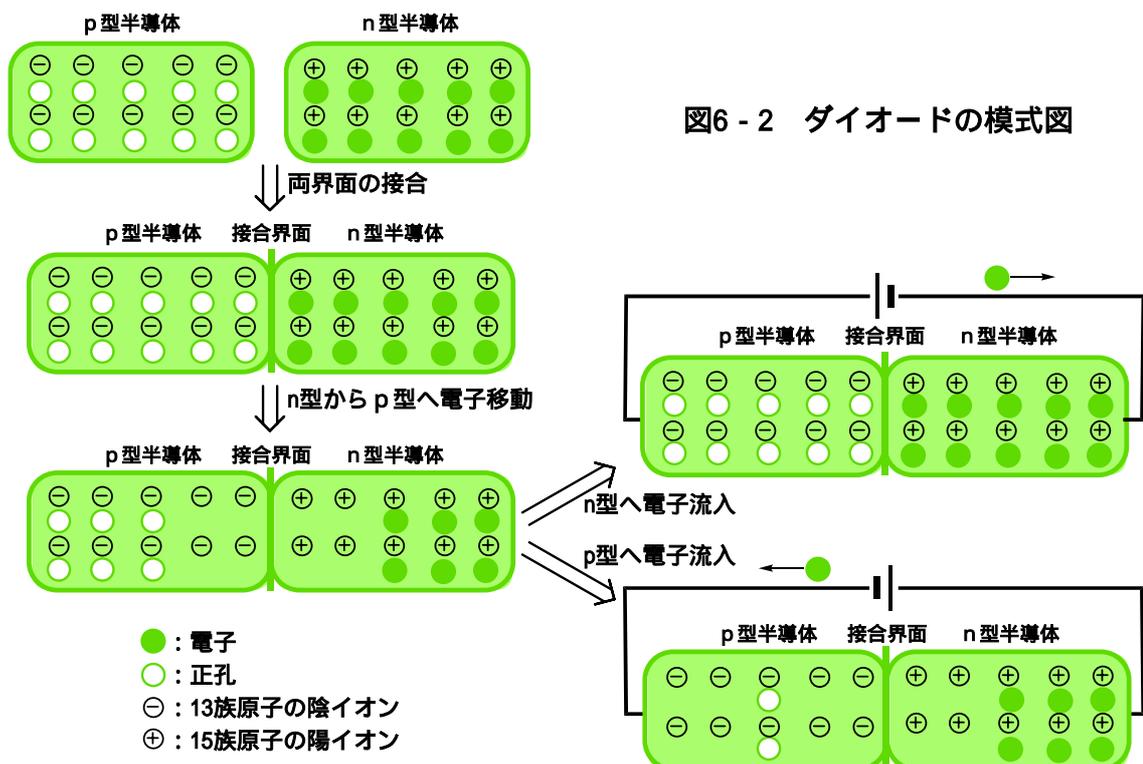


図6-2 ダイオードの模式図

帯には電子が充足し、伝導帯では電子が空になって過不足のない状態になります。接合前には、n型半導体は過剰な電子と15族原子の陽イオンで、またp型半導体は13族原子の陰イオンと正孔で電氣的に電荷を打ち消していましたが、接合により界面を越えて電子が移動してしまいましたから、n型半導体の部分では移動のできない15族原子の陽イオンが残り、p型半導体の部分では移動のできない13族原子の陰イオンが残ります。結果として、界面を挟んでn型半導体側の接合部分は正に帯電し、p型半導体側の接合部分は負に帯電します。

n型半導体とp型半導体を接合した物質では、接合界面を挟んでn型半導体側は正に、p型半導体側は負に帯電しますから、n型半導体部分に負の電極をp型半導体部分に正の電極を付けて電子をn型半導体部分からp型半導体部分へ流しますと、接合界面を挟んで生じている電位差を中和するようにn型半導体の中を電子が移動して接合界面に至ります。同時に、p型半導体に付けた電極から電子が流れ出ますから、同じ数の正孔がp型半導体部分に生まれてきます。伝導帯を移動してきた電子は接合界面を越えてn型半導体部分の伝導帯からp型半導体部分の伝導帯へ電子が移動し、さらにp型半導体部分で伝導帯から正孔の部分へ電子が移動して電荷を中和しますから、両電極間に電流が流れます。逆に、n型半導体部分に正の電極をp型半導体部分に負の電極を付けて電子をp型半導体部分からn型半導体部分へ流そうとしても、接合界面を挟んでn型半導体側が正になるような電位差がありますから、電流は極めて流れ難くなっています。このようにn型半導体とp型半導体を接合した物質では、n型半導体部分からp型半導体部分へは電流が流れますが、反対方向には流れませんから、電流を一方向にしか流さない整流作用を示します。常にn型半導体に付けた電極は陰極に、p型半導体に付けた電極は陽極になりますから、2つ(Di)の電極(Electrode)を持つものという意味でダイオード(Diode)と呼ばれて、広く電化製品を制御する心臓部に用いられています。

ダイオードに電流を流しますと、n型半導体部分の伝導帯から接合界面を越えてp型半導体部分の伝導帯へ電子が移動し、p型半導体部分で伝導帯から価電子帯の正孔の部分へ電子が移動して電荷を中和します。このとき伝導帯から価電子帯への移動において放出される禁制帯のエネルギーは、通常、熱エネルギーとして発散されます。しかし、表6-1に掲げたように禁制帯のエネルギー差は紫外線から赤外線までの波長領域の電磁波のエネルギーに相当しますから、この伝導帯から価電子帯への移動によるエネルギーを電磁波として放出すれば、ダイオードは光り輝きます。このようなダイオードを発光ダイオードと呼び、種々の半導体の組み合わせにより多くの色の光を生み出します。この発光ダイオードは電流の流れる時の電気エネルギーを直接光エネルギーに変換する物ですから非常にエネルギー効率が良く、しかも、原理的に禁制帯の大きさに相当する非常に狭い波長領域の単色光を発光します。そのために、自動車の制御灯や交通信号などに広く使われるようになっています。

発光ダイオードのp型半導体部分に禁制帯に相当する光を照射しますと、p型半導体部

分では価電子帯から伝導帯へ電子が移動して新たに正孔を生じ、p型半導体部分の伝導帯から接合界面を越えてn型半導体部分の伝導帯へ電子が移動して行きます。この現象は発光ダイオードが発光する現象の逆の変化で、光エネルギーを吸収してp型半導体部分からn型半導体部分へ電子が流れて電気エネルギーに変換されます。このような逆の変化を利用すれば光を検知する光センサーの働きをしますから、種々の電化製品に組み込まれています。さらに、ダイオードが光を吸収する段階で光の反射や透過など種々の技術的な問題が含まれていますが、太陽光から電気エネルギーを生み出す太陽光発電の可能なことが分かります。

トランジスターは不純物を巧みに混ぜ込んだ半導体

n型半導体は14族の原子が規則正しく整列している結晶の中に少量の15族の原子が不純物として混ざっていますから、その部分だけに電子が過剰のままにn個の原子が相互作用しながら集合した構造を持っています。しかし、価電子帯は既に2個ずつの電子で充足されており、集合した構造の中で過剰になった電子は伝導帯に移動して極めて流動的に他の原子へ移動して過剰部分を解消しますから、15族の原子は4個の電子を持つことになり陽イオンとなります。同時に過剰の電子は伝導帯の中を自由に動き回ります。不純物として含まれる15族の原子は陽イオンになり集合した構造の中で固定されていますが、n個の原子が集合して相互作用している構造の中に陽イオンの数と同数の電子が点在して自由に動き回りますから電導性を示します。このn型半導体の間に13族原子の陰イオンと動き回る正孔を持つp型半導体を挟み込みますと、2つの接合部分にはそれぞれダイオードが形作られ逆向きに接続します。

ここで2つの部分に分かれたn型半導体部分に陰極と陽極の2つの電極をそれぞれ付けて電流を流しても、一方の陰極からp型半導体部分へのダイオード部分は電流を流しますが、他方のp型半導体部分から陽極へのダイオードは電流を流すことができませんから、2個の電極の間には電流を流すことができません。さらに、間に挟まっているp型半導体部分にも電極を取り付けますと、前節で述べたように陰極の付いたn型半導体部分からp型半導体部分へ電子が流れます。接合界面を越えた電子はp型半導体部分の電極から流れ出てゆきますから、n型半導体部分の陰イオンもp型半導体部分の陽イオンも中和されて接合界面を挟んで発生していた電位差が低下します。このときp型半導体部分の陽イオンが中和されますから、陽極の付いているn型半導体部分との電位差も小さくなり、2つの部分に分かれたn型半導体部分の2つの電極間にも電流が流れます。図6-3のように3つの半導体を接合した物をNPNトランジスターと呼んでおり、n型半導体部分に付いた陰極はエミッタ、p型半導体部分に付いた陽極はベース、n型半導体部分に付いた陽極はコレクタとそれぞれ名前がつけられています。

エミッタからn型半導体部分へわずかな電子を流すときには、接合部分を挟んでn型半導体部分の負の電位もp型半導体部分の正の電位も若干小さくなりながらベースへ電子が

流れます。p型半導体部分の正の電位が若干下がればp型半導体部分からn型半導体部分を通してコレクタへの電子の移動がわずかながら可能になります。ここで、エミッタからベースへの電子の流れが多くなるほどエミッタからコレクタへの電子も流れ易くなります。云いかえれば、コレクタからエミッタへ流れる電流量はベースからエミッタへの電流量に比例します。この関係から、トランジスタはベースとエミッタとの間の電流量に比例した多くの電流量をコレクタからエミッタに流す増幅の作用を持っています。

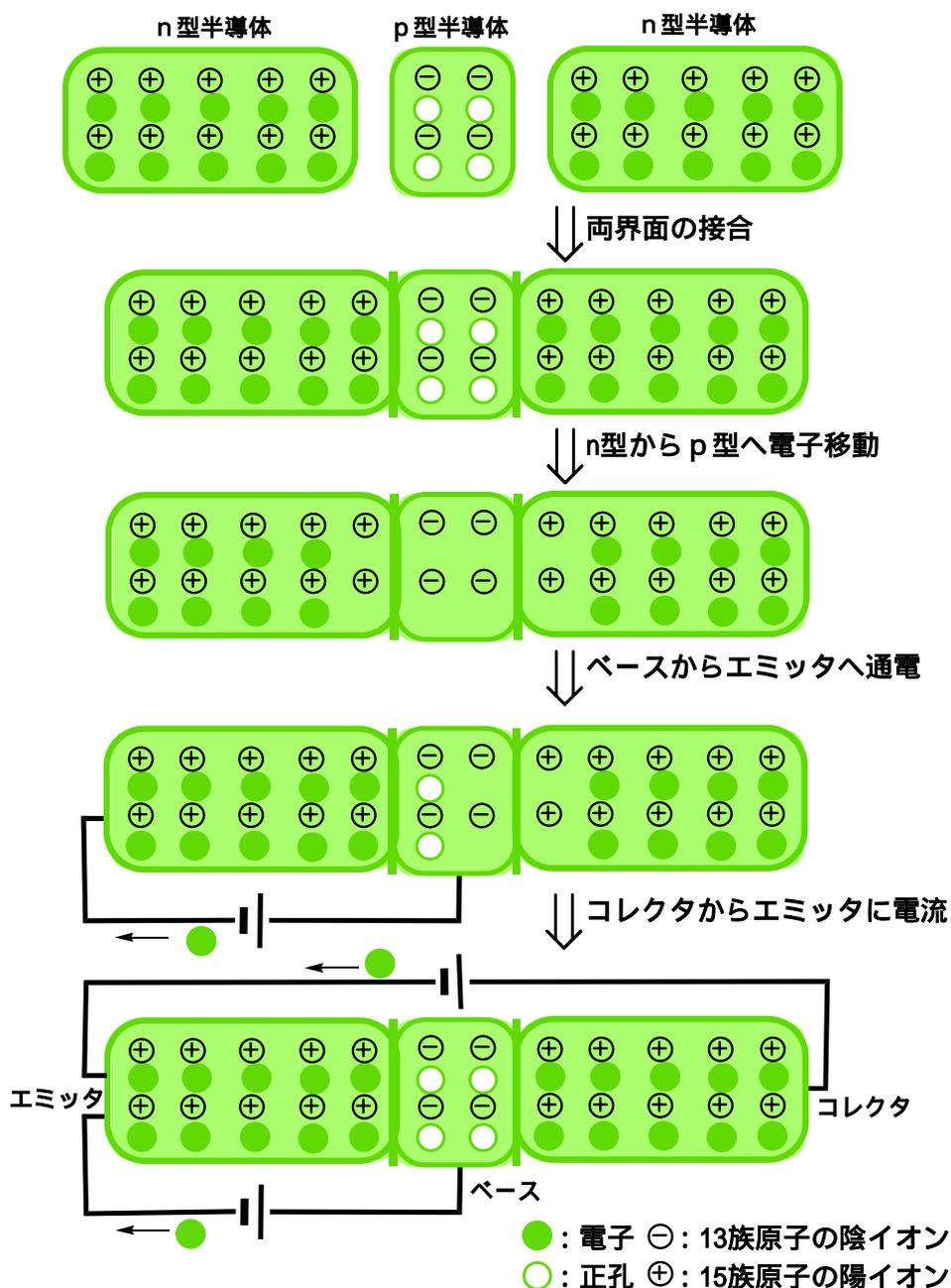


図6-3 トランジスタの模式図

わずかな数の 13 族原子の陰イオンと正孔しか持たない p 型半導体部分が挟み込まれている NPN トランジスタの場合には、ベースからエミッタに流す電流量が少なくても p 型半導体部分の 13 族原子の陰イオンは完全に中和されてしまい、もはや電位の低下が起こらない飽和状態になりますから、コレクタからエミッタへの電流量を一定に保つことが出来ます。その上、ベースからエミッタへのわずかな電流量の変化でコレクタからエミッタへの電流量を非常に鋭敏に断続することができます。そのため現在広く用いられている NPN トランジスタは間に挟まっている p 型半導体部分が非常に薄く作られています。

NPN トランジスタとは逆の関係を持つ PNP トランジスタは、p 型半導体の間に n 型半導体を挟みこんだ構造を持っており、電子の移動にかわる p 型半導体の正孔の移動により電流の増幅や断続の働きをします。この PNP トランジスタは 1960 年代までの開発の初期には多く用いられていましたが、現在ではあまり用いられていません。トランジスタが実用化される以前には、電球のような真空管による電流の整流作用や断続作用を利用してラジオや TV などの電化製品が作られていましたが、これらの作用を生み出すためには真空管内の電線を高熱に加熱して電子を放出しなければなりませんでしたから、多量の電気エネルギーを浪費していました。1954 年に東京通信工業（後のソニー）がトランジスタの増幅作用を用いたラジオを市販して以来、ラジオや TV ばかりでなく多くの電化製品の心臓部にトランジスタはダイオードとともに組み込まれるようになりましたが、トランジスタが非常に小型でエネルギー効率も格段に高いために、現在では真空管はほとんど完全にトランジスタに駆逐されてしまいました。

電流の断続で考えるコンピューター

我が家の愛犬は約 10 種類の泣き声と目や身体の動きで伝えたいことを表現していますが、人間は目や身体の動きのほかに言葉を使って伝えたいことを表現します。直接互いに面と向かっている時には、身振り手振りなどの表現法が極めて有効で種々多様な内容まで伝達することができます。しかし、遠く離れた人間同士や時を異にする人間同士では、この方法では伝えたいことを全く表現できません。そのように間接的に物事を伝達する場合には文明の未発達な時代の人間は絵を描いて表現していました。文明が発達して伝達したい内容が整理されてゆくと、その内容に応じた絵を象形化するようになり、漢字のように意味を持つ多くの文字を用いるようになりました。しかし、表意文字と呼ばれるこの意味を持つ文字を用いる方法はその文字を互いに共通認識しなければなりませんから、利用するためには極めて多くの基礎知識と多くの文字を必要とします。

日本人は本来文字を持っていませんでしたから、同じような音の漢字を選んで話し言葉に当てて表現しました。その後長い年月の間にそれらの当て字が簡略化されて、48 文字ずつの平仮名と片仮名が完成しました。英語も仮名文字のような話し言葉の音に対応する 26 文字のアルファベットを並べて用いて表現していますし、ドイツ語ではアルファベットのほかに ä と ë と ö と ü と ß の 5 文字を加えて物事を伝達しています。生物の 38 億年にわた

る発生以来の進化の歴史が記録されている DNA はデオキシリボースのりん酸エステル
の長い分子の側鎖にアデニンとグアニンとシトシンとチミンの 4 種類の環状化合物が結合
した構造をしています。日本語が仮名文字の並べ方で、また英語がアルファベットの並べ方
で内容を表示するように、図 6 - 4 に示す核酸塩基と呼ばれるこれらのアデニンとグアニ
ンとシトシンとチミンの 4 種類の環状化合物の X の部分が長い分子の鎖の上に結合して、
その並ぶ順序により内容が表示されています。

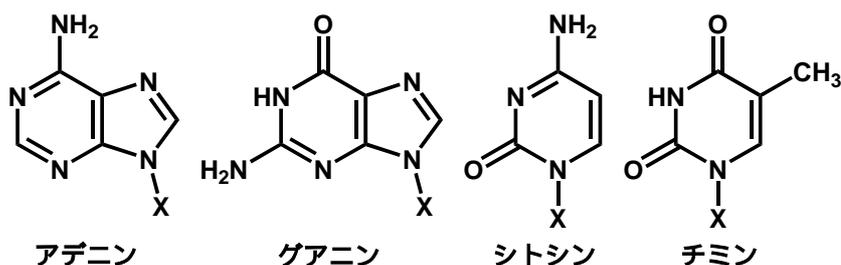


図6 - 4 4種類の核酸塩基の構造

長い鎖の最先端の側鎖に結合する核酸塩基の種類は 4 種のうちの 1 種であり、第 2 番目
の側鎖に結合する核酸塩基の種類も 4 種類の可能性がありますから、この 2 個の側鎖に並
ぶ核酸塩基の組み合わせは 16 種類になります。n 個の側鎖にこれらの 4 種類の核酸塩基が
並ぶ並び方の数は 4^n ですが、DNA の n が極めて大きな値を持っていますから、生物の発
生以来の長い進化の歴史を十分に表すことができます。

長い電線に電流を流しますと、電線の端まで電流が流れてそこでベルを鳴らしたり、白
熱灯を光らせたりすることができます。しかも、電線を断続すれば電線の中を流れる電流
が断続しますから、ベルが発する音も白熱灯が発する光も対応して断続します。このよう
に電流を断続させることにより、光や音が容易に点滅する電流の特性を利用して、アメリ
カ人の Morse は長短 2 種類の電流の点滅を行って伝えたい内容を遠距離で伝達する方法を
考案しました。長短 2 種類の情報を組み合わせて表 6 - 2 に掲げた Morse 信号を作り、こ
の信号の約束に従った長短 2 種類の電流の点滅を行い、受信した相手もこの約束に従って
信号を解読するものです。例えば、 $\cdot \cdot \cdot$ $\cdot \cdot \cdot$ のように短信号 3 個と長信号 3 個と
短信号 3 個をそれぞれ区切って SOS と送信すれば、緊急の救助要請することができます。
送信には電流の流れのほかに、光や音など種々の媒体を用いることができますから、直接
電線の結ばれていない 2 艘の艦船の間などでも伝えたい内容の通信が可能になります。さ
らに、19 世紀末には電流量の変化を電磁波の強さの変化に変換する技術と電磁波の強さを
電流量に変換する技術が開発されましたので、電線の繋がっていない所でも電磁波により
電流の信号を送ることが出来るようになりました。Morse 信号に従って変化する電流量を
電磁波に変換して送り、地球の裏側でこの電磁波の強弱を電流量の変化に再変化して情報

表 6 - 2 英数字に対応する Morse 信号

| 符 号 | 信 号 | 符 号 | 信 号 | 符 号 | 信 号 |
|-----|---------|-----|-----------|-----|-----------------|
| A | ・ - | R | ・ - ・ | 9 | - - - - ・ |
| B | - ・ ・ ・ | S | ・ ・ ・ | 0 | - - - - - |
| C | - ・ - ・ | T | - | + | ・ - ・ - ・ |
| D | - ・ ・ | U | ・ ・ - | - | - ・ ・ ・ ・ - |
| E | ・ | V | ・ ・ ・ - | * | - ・ ・ ・ - |
| F | ・ ・ - ・ | W | ・ - - | / | - ・ ・ - ・ |
| G | - - ・ | X | - ・ ・ - | = | - ・ ・ ・ - |
| H | ・ ・ ・ ・ | Y | - ・ - - | (| - ・ - - ・ |
| I | ・ ・ | Z | - - ・ ・ |) | - ・ - - - - |
| J | ・ - - - | 1 | ・ - - - - | ' | ・ - - - - ・ |
| K | - ・ - | 2 | ・ ・ - - - | " | ・ ・ ・ ・ - ・ |
| L | ・ - ・ ・ | 3 | ・ ・ ・ - - | ; | ・ - - - - ・ |
| M | - - | 4 | ・ ・ ・ ・ - | : | - - - ・ ・ ・ |
| N | - ・ | 5 | ・ ・ ・ ・ ・ | , | - - ・ ・ - - |
| O | - - - | 6 | - ・ ・ ・ ・ | . | ・ - - - - - |
| P | ・ - - ・ | 7 | - - ・ ・ ・ | ? | ・ ・ - - ・ ・ |
| Q | - - ・ - | 8 | - - - ・ ・ | 訂正 | ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ |

を受信する無線電信や電報は世界の情報交換の有力な手段になりました。

表 6 - 2 に掲げた Morse 信号は長短 2 種類の電流の点滅を 8 個組み合わせると英数字に対応させていますが、その対応し得る数は 2^8 ですから 256 となります。仮名文字では 48 種類、アルファベットでは 26 種類、DNA では 4 種類の信号を用いていますが、Morse 信号ではわずか長短 2 種類の信号で 256 種類の内容を通信しています。このことは信号の種類が少なくても組み合わせる数を多くすれば、通信しうる内容の数を無限にすることができることを意味しています。このような組み合わせる数をコンピューター用語ではビットという単位で表していますから、Morse 信号は 8 ビットで 1 個の英数字を表していることとなります。

前節で考えたトランジスターを用いますと、電流を容易に瞬時に断続あるいは点滅することができます。また、電流の流れには正負 2 方向がありますから、Morse 信号と同じように電流の点滅や電流の正負 2 方向の変化を利用して情報を送ることが出来ます。また、電流の流す方向を変えることにより発生する磁気も N と S の 2 方向に変化しますから、磁気の変化を利用して情報を表すことが出来ます。Morse 信号は 8 ビットの信号で

すが、現在では簡易型のコンピューターでも用いられている信号系は 32 ビットで 1 個の情報 (1 バイト) を表すように設計されていますから、その情報は 2^{32} 種類でとなり約 43 億種類の文字や色や音などを表すことができます。言い換えれば電流の点滅を 32 回することにより、1 バイトと呼ばれる 1 個の情報が完成できるようになっています。さらに、このような個々の情報をまとめて大量に通信して多くのことを世界中に伝達しています。また、このような個々の情報をまとめて大量に保存しておけば大量の情報が記録されます。最近の半導体技術の進歩により、 10^{13} バイト以上の情報を保存できる非常に小さな記憶媒体まで開発されています。トランジスターやダイオードや液晶ディスプレイの発達により電流の点滅や方向の切り替えが電流や電磁波の極めて微弱な変化で瞬時にできますから、複雑な情報の処理が可能になりコンピューターが発達しました。現在では、パーソナルコンピューターが多くの家庭に入ってきて、インターネットの通信やデジタルカメラの映像処理まで広く用いられるようになっています。