

■ 1965年度ノーベル物理学賞を受賞
された本財団理事長、朝永振一郎教授。

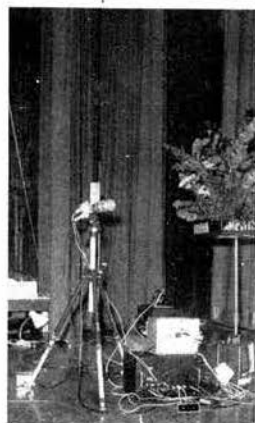




▶上左 受賞ニュースの翌日、
財団運営委員会における朝永
理事長

▶上右 記念講演会で、宇宙線
および放射能のデモンストレ
ーション実験をおこなう朝永
教授。

▶左 財団発足の記念講演会の
おりに。中央左、朝永理事長、
右、故渋谷前理事長。



エレクトロニクス時代と トランジスタ

1963年12月6日朝日講堂にて
定例第9回記念講演

鳩山道夫



ただいま石井さんから大変ごていねいなご紹介をいただきましたが、私は、学校を卒業いたしましたから、約10年間、理研でごやっかいになって、その間、終始、私が尊敬し、また、ご指導いただいた仁科先生、(当時は仁科先生と申しませんが、仁科おやかたといわれていました)の記念講演に、私のようなものが——本人はちんぴらだと思っております。というのは、こう皆様、理研、仁科財団のお歴々がすわっていらっしゃるわけなんです、その方々はみんな、私が当時おりました時の先輩なのでございまして、ああいう方が、あそこにすわっていらっしゃると、私の話は大変やりにくいわけなんです——こういう先生の記念講演会などという大変、晴れがましい席で、お話し申し上げることは非常

に光栄に存じているわけなんです。ちょうどさきほど控室にまいりますと、皆様がいまして、昔の理研にかえったような気がしましたのですが、そんなことを言ってもしょうがないので、講演の方に入ろうと思います。大体、講演がございまして、それから実演をいたし、それから最後に映画を見ていただく。それがみんな、一貫して一つのものに結びつくような話をえらんでございます。

人類の夢とエレクトロニクス

今日はいわゆるエレクトロニクス時代といわれております。いや、今日は宇宙時

代だとか、今日は原子力時代だとか、いろんなことがいわれているのですけれども、その宇宙時代といわれているにしても、実際宇宙時代であるといってロケットをとばす、あ

るいは人工衛星を空に打ち上げるというような技術の中には、それを制御する方法がなくてはいけないわけです。飛行機に人間がのって人間が軌道をコントロールするというようなのではなくて、人ののっていない、いわゆる宇宙船とロケット、そういったものをとばしてちゃんとあらかじめ計算したようなところへもっていくためには、それを自動的に制御する方法がなくてはいけない。それらには、今日でいうエレクトロニクスが十分に使われております。また、原子力関係にしましても、放射能というおそろしいものがあるときに、人間がそばにいかずにそれをコントロールするには、やはりエレクトロニクスというようなものが必要になってきます。それで、昨今、何々時代といわれているようなものすべてが、やはりエレクトロニクスを使っているわけです。どこへ行っても、そういう大切なものの中にはエレクトロニクスというものが、みんな、心臓部として入っているということは、やはり、今日がエレクトロニクスの時代であるということの証拠ではないかと思うのです。で、いったい、エレクトロニクスというものは、どういうものか少し考えてみたいと思います。

まだ科学の発達しません大昔には、人間は自分の体だけを使って生活していたわけです。体だけという意味は、これから次第にあきらかになってくると思いますが、そういう体だけを使って生活していた時代から、だんだん進歩してくるにしたがいまして、人間が道具というものを使うわけです。で、道具というのは、いろいろな意味の道具がございます。人間のすべての能力を、なにかの形で、人間の体だけの能力以上に働かせるための道具です。たとえば、ごく初期の時代、石器とか銅器とかいう時代にいたしましても、これは人間は手の力だけでは、木の幹一本折ることができなかったのを、石のおのを使って木の幹をたおすことができた。これは、人間のもっている能力を、拡大したことです。そういうものはすべて、人間のいわゆる肉体的な力を、能力を、補う道具であったわけです。

そのうちに、人間は機械というものを発明しまして、そういう能力を非常に拡大した。つまり、石のおのにしましても、その石のおのを動かす動力が、人間の手であったものを、蒸気機関とかいうようなものを使うようになったわけですが、その前に、人間が、他の動物、牛とか馬とか、人間よりも力の強い動物

を使って、それらの力を人間がコントロールすることによりまして、人間にできないことをさせるようになった。

その次に、蒸気機関の時代がまいりまして、蒸気機関と、そのほかいろいろな動力機関ができます。動力機関を使うことによりまして、こんどは、動物の力というような限界のあるものじゃなくて、もっと、非常に大きな力を、人間が思いのままに制御できるようになった。つまり、機械の発明によりまして、人間の肉体的な能力というものは、非常に大きくなったのと同じことになります。

しかし、この時代におきましては、まだこれらの機械は、やはり人間が自分の頭と手と足を使って、(あるいはほかのところを使ったかも知れませんが) 人間の力によって、コントロールしたわけです。蒸気機関が発明されても、その蒸気機関に石炭をくべるのは人間の手でありましたし、それらのハンドルをとるのも人間の手です。で、この時代は、いわゆる第一次機械化の時代と呼んでいいのではないかと思います。

ここで話は少しとぶのですけども、人間は昔から、おとぎばなしというものを非常に好んだものです。そのおとぎばなしというもの

は、いろいろなはなしがありますが、そういうおとぎばなしを分析してみますと、人間がもっている夢と申しますか、欲望と申しますか、そういうものが、いろいろな形であらわれている……。一例を申しますと、魔法のじゅうたんというようなものがございまして、それにのっかって空を飛ぶことができます。あるいは、何とかいう長靴がありまして、その長靴をはくと、ひとあしでもって何キロメートルか走れる。人間が持っております歩行能力をはるかにこえた、非常に強い力にあこがれて、そのあこがれの結果が、そういういろいろな形のおとぎばなしにあらわれてきた。たとえば、非常に大きな巨人が、山を一晩で造ったとか、そんなはなしもございます。そういう、非常に大きな、力学的な力にあこがれているものが多いわけです。

そのような夢、あこがれ、というものは、たとえば飛行機ですとか、あるいは、非常に大がかりなブルドーザーですとか、そういう機械の発明によって、ある程度かなえられたというべきではないかと思います。ところが、一方このようなあこがれの中には、人間の手足の力以外に、ほかの能力についての欲望もあるわけです。たとえば、ちょっと名前

すが、——その電波を用いるということにつきましては、信号を出すための発振と、それからその発振しました電波に望ましい信号をのせてやるための変調という働きが必要になってまいります。で、この発振と変調と、それから、先ほど申しました増幅と、この3つの作用があって、はじめてエレクトロニクスというものが大きな発達をして人間の役に立つようになるのだと、こういうふうに私は解釈するわけです。

そこでちょっと余談になる
光通信の今昔
んですけれども、電波というものをはじめて通信に使ったのはマルコニーだといわれております。マルコニーが1895年に、はじめて電波によって通信したということになっているのですけれども、実は、マルコニーよりはるか以前に、人間は電波を使って通信したという事実があるのであります。それは何かと申しますと、人間はその有史以前から、“のろし”という通信方法を用いました。山のでっぺんで火をたいたりなどして信号しました……。ところで、そののろしというものに使われておりますのは何かと申しますと、これは光線であります。光線というのは、立派な電磁波でございまして、今

日電波といわれるものと、本質的にはなにもちがっていない、ただその波長がちがっているだけなんです。ですから、そういう意味では、のろしというものはエレクトロニクスの第一歩といえるかも知れないんです……。

こういう馬鹿々々しいことを申しますのは、実は、今日、通信に用いられている電波の波長というものが、だんだん短くなってまいりまして、もはや、センチメートル波、ミリ波をとおりこしまして、光の領域には入りこんでしまった。光を使った通信というのが今日これからだんだん発達しようとしているのです。そういう意味で光を通信に使うということは、本質的には我々は、もう一度のろしの時代にもどってきたといっていえないこともない——と、そう思うわけなんです。ただ、この二つの光通信の間に、非常なちがひがあります。それは、先ほど申しました増幅という作用なんです。その他の発信と変調という二つの作用は、昔もちゃんとやっていたわけなんでして、煙を出すときに、上にこうちょ、ちょとかぶせたりなんかしまして、それによりましてちゃんと昔から、いわゆる符号化通信ということが行なわれていたわけです。そういう符号化通信がおこなわれ

ていたということは、昔からちっとも変わらないんでして、ただ違うのは、今日は、受信側におきまして、非常に微弱な信号を増幅するということが、いろいろな方法で可能になっております。その点が、今日のエレクトロニクス時代が昔とちがうゆえんではないかと思えます。

電波通信は それでエレクトロニクス
ますます は、はじめ通信とともに発
高周波に 達してきたわけなんですけ

れども、その通信といたしましても、最初のうちは、いわゆる電信電話というような一対一の通信、そのうちに電波を使うことを覚えまして、一対多数の、言いかえれば、ラジオとかテレビとかいうような放送事業にまで発達したわけなんです。ところで、ラジオとテレビとの非常に大きな違いがここにある。ラジオとテレビとで何が違うか、それは、一方は聴くもので、他方は見るものだ……。確かにそのとおりなんです、そのほかに、技術的にもう一つ大きな違いがあることを見逃がしてはいけません。それは、一秒間に送りこまれる情報の数、インフォメーションの数という意味で非常に違うということです。ラジオでは、人間の耳に感ずる程度の周波数の音、

例えば、2万サイクルが人間のききうる最高の音といたしますれば、1秒に2万回までの信号が、ラジオの電波にのせて送り出せばよろしい。これに対しまして、テレビの場合を考えてみますと、テレビの1コマの画面を送るに要する時間を $\frac{1}{30}$ 秒といたしますと、 $\frac{1}{30}$ 秒の間に1コマの画面の中に写っている点の数だけの情報の数を送らなければならない。ある場所が黒であり、ある場所が白である情報を送らなくてはならないわけです。これを点が何個あると考えてよいか、いろんな考え方があると思いますが、1枚の画面の中には、普通約20万個の白黒の点が分布していると考えられるわけです。それで、それだけ数多くの点を、その点に関する情報を、 $\frac{1}{30}$ 秒の間に送らなければならないというわけです。すから、毎秒送りこむ情報の数というのは、約600万ぐらいになる。で、600万ということで、今日、テレビの信号に使われております周波数の幅が、6メガサイクルということになるわけなんです、ラジオの場合ですと、2万サイクルまでの信号を送ればよろしいから、したがってそれをのせてはこぶ波の周波数も、せいぜい1メガサイクル位でよろしい。が、テレビの場合では、今申しましたように、

6 メガサイクルまでの信号を送らなければならないので、したがってそれを送る、つまりそれをのせてはこぶ波の周波数も 100 メガサイクルぐらいは必要になってまいります。今日では、100 メガサイクルではまだ足りませんで、さらに周波数の高い局を使うわけでございます。

図 1 では電磁波の波長と、それから、今日



図 1. 電磁波の波長

縦軸に波長が対数目盛でとってある。波長と周波数は逆比例するので高周波になるほど短波長になる。電波通信も今や近赤外線のところまで開発されている。

使われております領域とをいろいろ書いてみたわけですが、左側に対数目盛で波長が目盛ってございます。遠くの方はごらんになれないかと思いますが、一番上は 100 メートル、一番下が、1 ミクロンとなっております。で、目に見える光と申しますのは、1 ミクロンよりもちょっと下の辺のところとなっております。可視光線となっております。で、周波数がだんだん高くなりまして、放送に使っておりますのが、大体 100 メートル、先ほど申しました 1 メガというのは、この辺でございまして。ラジオの放送に使います電波は、大体この辺の周波数。だんだん波長が短くなって、短波から FM の周波数、最後にテレビジョンの周波数ということになっておりまして、その辺の電波でありますと、波長が 1 メートル、いや、もっと短くなってしましますが、100 メガですと大体 3 メートル、その辺のところがテレビの波長。それからだんだん下がってまいりまして、マイクロ波は今日ではもう電話の中継、その他、テレビの中継にも使われております。それからだんだん下がってまいりまして、ミリメートルから遠赤外、近赤外、あとで実験しておめにかかけようという、光通信の、光によるテレビ信号の伝

送などというのは、この近赤外のこの辺のところを使うわけです。

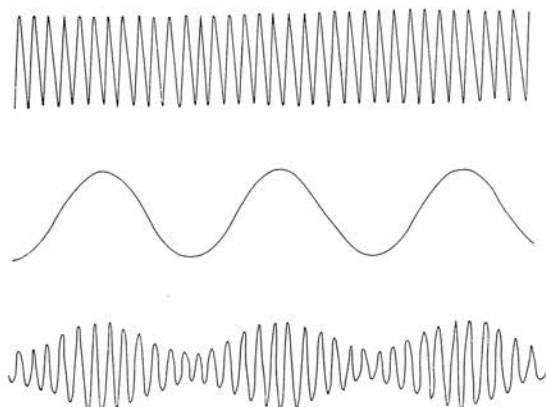


図 2. 電 波 通 信 の 波

変調波は送りたい信号の波。搬送波は信号をのせて運ぶ波。被変調搬送波は搬送波を変調して実際に送り出される波。受信機ははじめこの波を受け、検波してもとの信号つまり変調波をとりだす。信号(変調波)にくらべ搬送波ははるかに波長が短い。

図 2 は、そういう電波を使いまして信号を送る方法なんでありましたが、こちらに搬送波、変調波と書いてございます。ただいま周波数と申しましたのは、この搬送波——持ち運ぶするための波——と、変調波——これが送ってやる信号の波——とございます。

先ほどお話いたしましたラジオの場合には、2 万サイクルのこういう波を送ってやり

たい、ところが、この波をそのまま送ったのでは、電波の伝わります具合が悪いので、それを非常に周波数の高い波の上ののせてやります。その、のせてやるというのが、いわゆる搬送波で、のせるやり方というのは、その搬送波を信号に応じた変調波でこのように変調いたしまして、搬送波の強度をこういうふうに変えてやるわけです。こんどはこれを受信側で検波いたしまして、もう一度もとの信号の波にもどしてこれを受ける。ですから、この変調波の周波数を高くしようとすれば、それに応じて、搬送波の周波数を高くしなければならぬ——これが、今日通信に使われます電波の波長がどんどん短くなっていくということのひとつの原因なのであります。

エレクトロニクス
による自動機械

エレクトロニクスはこう
いうわけで、通信とともに
発達してきたわけなん

ですけれども、その発達につれて、しだいに(今申しましたのは要するに人間の目や耳の作用を拡大していこうということなんです)人間が機械にさせようという働きが変

ってきた——頭の働き、つまり、情報を処理するとか、制御するとか、あるいは計算をするとかいう、今まで人間が機械にさせたことのないことを機械にさせようというようにエレクトロニクスがだんだんすすんできたわけです。もっとも簡単な例といたしまして、電話の交換器の例をとってみますと、きょうの聴衆のうちで若い方はあまりご存じないと思いますが、私どもの宅へはじめて電話が通じた頃は、電話の回線が非常に少なくて、電話をかけるときには、まず受話器をはずすと局の交換手が出てまいります。そこにどこの何番ということを行いますと、交換手が加入者からきております電話線を手で切り替えるわけです。今日でも、会社の中の内線電話なんというのはそういう形で行なわれているところが多いようでありますけれども。

ところが、だんだん加入者がふえてまいりますと、それではとうてい間に合わなくなてまいります。そこで自動交換機などというものができてくるわけです。自動交換機ということになりますと、すべての加入者の電話を、ある一定の法則にしたがって全部番号化してしまうわけです。今日の東京の電話はもちろんそうになっておりますが、すべての電話をみ

んな番号で何桁かの数字であらわしてしまいう。で、加入者は相手方の電話番号にしたがいまして数字のダイヤルをまわす。するとこれが局の交換機へ信号としてはいる。1から10までの信号があるわけですが、この1から10までの信号がきたことに応じて、交換機の内部で1から10までの回線のどれかにそれをつないでいくわけです。これがくり返されて、結局、先方の電話につながれるということになるのですが、それだけの過程の中には、加入者からまいりました信号を識別することと、それから、これをどこへつなぐか判断することと、それから最後に正しいところへこれをつなぐという三つの過程が含まれているわけです。



図 3. 自動機械の要素

自動機械は人間の器官にかわって
その機能を發揮する。

図 3 に、自動機械の要素と書いてございます。第 1 の識別という要素。この識別という要素は、人間の働きにしてみれば目や耳の働

きであります。その次に判断という要素があります。判断という要素はこれは頭の働きです。それから最後に、判断という要素にしたがって動作をする、これが手足の働きなんです。この識別と判断と動作という3つの要素

をもっていることが自動機械の特質なのでありまして、こういうものをわれわれはロボットというわけなんです。

別の例を申しますと、図4は飛行機の自動操縦の例なんです、円形の中央部にビーコン局

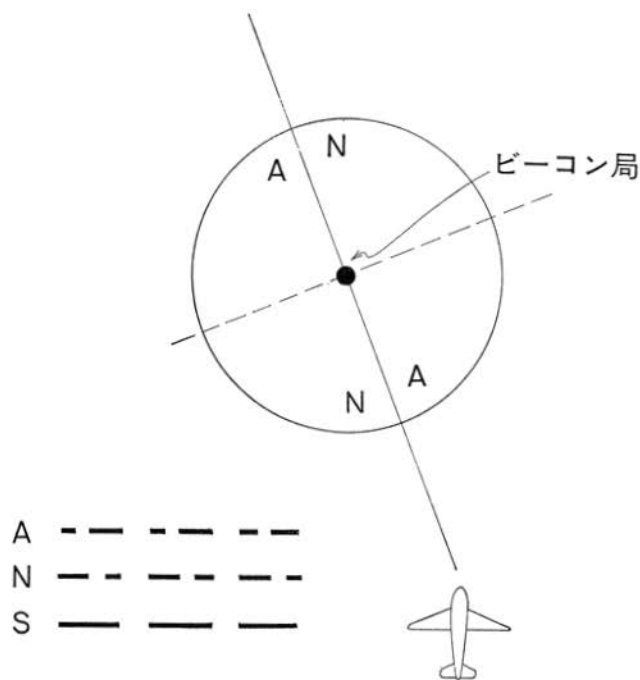


図4. 飛行機と自動操縦

手前の飛行機はビーコン局からの信号NをAより強く受けるとビーコン局に向かって右側に、またAをNより強く受けると左側に自動転向し、AとNの強弱がちょうどひとしいところでは結局Sの信号をうけて転向せずに進む。

ン局がありまして、このビーコン局から信号を出す。その信号をこちらからまいます飛行機が（ちょうどこの箇所を通る予定の飛行機だといたします）、この信号を受けるわけです。こちらからきました飛行機がこの信号を受けます。そうしますと、こここのところに、こちら半分に対しては、Aという信号、Aという信号は符号化いたしますとトン・ツー・トン・ツーという信号であります。で、こちら側の半分に飛行機がある場合には、このトン・ツー・トン・ツーという信号がきこえてくるわけなんです。それから、こちら側の半分に飛行機がありますと、そちら側には、Nという信号が出ております。これはツー・トン・ツー・トンという信号がきているわけです。ですから、この飛行機に受信機を持っ

た人間がのっておりまして、信号が A であるか N であるか判断すれば、それにしたがって、この飛行機のかじを少しこちらにまげる、あるいはあちらにまげるということができるわけではありますが、それを人間の手をかりずに機械にさせます。機械がこういう信号を受けまして、それを判断してかじを少しこちらへまげるような作用をする、また反対の信号がきたときにはあちらへまげるというように機械を調整しておきます。両方がちょうど同じ強度にきこえるようになりますと、結局下のような信号になるわけなんです。こういう信号にいつもなるように、これに自動制御をかけておけば、これはまっすぐいく。その場合にも、いつも信号を識別することと、それから、その信号にしたがって、どういうことをしなければならぬかという判断と、それから最後に、そういうことをなすという3つの段階が必要になってくるわけなんです。

自動計算機と トランジスタ の登場

こういうような自動機械の典型的な例は、いわゆる計算機であります。計算機と申しますのは、中にあらかじめプログラムが

組んでございまして、掛算、たし算というような簡単なものから、非常に高等な微分方程式を解くような計算などに至るまで、すべて機械の中に組み込んであるプログラムにしたがいまして、自動的に計算するようになっております。ですから計算の途中では、ただいま申しましたような、識別、判別、実行という3つの段階がくり返して行なわれているわけです。

計算機とか、あるいは自動制御装置とか、そういうものが複雑になればなるほど、その中で行なわれる過程の数が非常に大きな数になってまいります。したがって、ひとつひとつのそういう過程をできるだけ早くしなければならぬ。それからまた、機械が膨大になることを防ぐために、ひとつひとつの単位を非常に小さく作ることが要求されてくるわけです。そういう要求に応じて出てきたのがトランジスタであります。

トランジスタの発明者のショックレーが1936年にベル・テレフォン研究所に入ったんですけれども、その時に上司から与えられた命題が、どうして電話の交換機からリレーを追いだすかという命題だったそうであります。で、リレーといいますのは、呼び鈴とか

ブザーとかで使われているようなコイルがありまして、そのコイルに電流が流れることによって鉄片をひっぱって、その鉄片がひっぱられることによって、次の回路のスイッチが切れたり入ったりする、そういうようなものがリレーでありますけども、そのリレーが非常に数多く電話交換機に使われていたわけです。ところがリレーというやつは、そういう鉄片をつかっておりますんで、鉄片がついたり切れたりするたびに火花が出て、消耗するとか、あるいはスピードが大へん小さいとか、容積が大きいとか、電力をよけいに食うとか、はなはだ具合の悪いところがたくさんありました。それでもそういうものしかないわけなんですから、仕方がなく使われていたわけです。そこで、ショックレー先生に何とかして、電話交換機からリレーを追出せという命題が与えられたんだと思います。

そこで彼は、固体、特に半導体を用いまして、何とかそういう——いわゆるスイッチ作用と申します——リレーのかわりをするような作用を持つものがないかということを一生涯けんめい研究したんですが、その研究の結果、実際にトランジスタが発明されるに至るまでには、約 12 年かかっております。

トランジスタ の利点

ところで、トランジスタと
いうことが、きょうの話の
主題なんです、トランジ
スタでどういうことができるかという、そ
のほとんど全部が、あたりまえの真空管でも
できることにすぎないのです。すなわち、さ
きほどから申しております増幅とか、発信と
か、変調、あるいは検波、そういう作用はみな
普通の真空管でできるわけです。それだの
に、トランジスタが発明されてからエレクト
ロニクスが急速に発達したのは一体なぜか、
ということになりますと、これは結局、小型
であるとか、電力を食わないとか、寿命が長
いとか、機械的に丈夫だとか、そういうよう
な、あまり質的な問題ではありませんで、量
的なちがいにすぎないわけです。そういう量
的な相違なんですけれども、それがただ、あ
まりはなはだしいために、結果としては、質
的な相違まで出てくる、ということなんです。

さて、トランジスタがどれぐらい小さいか
ということをお目にかけたいと思います。

図5は、トランジスタのケースをはずしま
して内部を見たところなんです。あとでトラ
ンジスタの種類をいろいろ申しあげますが、
そのうちの、拡散型と称するトランジスタで

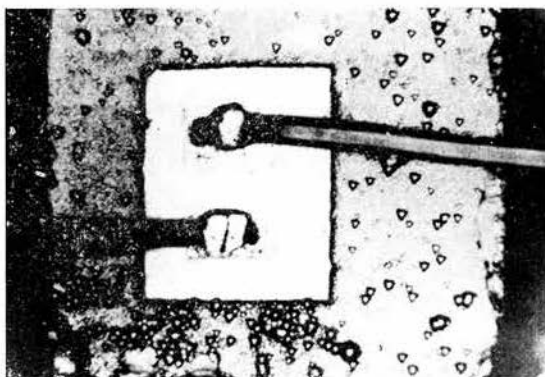


図 5. トランジスタの心臓部

ケースをはずして内部を拡大してみたところ。

ありますけれども、大体この寸法を申しますと、この画面いっぱい、やく 0.5 ミリぐらい、それでこのところにこういう、ちょっと一段高くなったところがございますが、これが大体 100 ミクロン×200 ミクロンぐらい、つまり 0.1 ミリ×0.2 ミリぐらいで、その真中のこのところに、これだけまたよいなものをつけます、(こことここによいものが、くっついております)。これの寸法が、20 ミクロン×50 ミクロンぐらいで、非常に細かい。あとでご説明しますが、ここに、電極をつけます、それから、リードがでているわけです。この全体が、大体 0.5 ミリ。こういうような小さいものを、ケースに入れまして、リードを出したのが次の

図 6 の左または右です。

これはケースごとでございまして、この中



図 6. トランジスタと真空管

中央はミニチュア管(ごく小型の真空管)。左右はケースに入ったトランジスタ。心臓部はこの中味のごく小さい部分で、リードが3本エミッタ、ベース、コレクタの3層からそれぞれ1本ずつ、出ている。

に今のものが入っています。足が三本出ている。ところで、中央のは、ごく小さい、ミニチュア管という真空管ですが、この真空管に比べましても、なおこんなに小さいわけです。この程度に小さいものですが、実はこの内部の、本当の役を果しているものは、もっとずっと小さいわけなんです。なぜ

こういうケースが必要かと申しますと、先ほどのようなものをむき出しにしておきますと、空気中の湿気を吸うとか、いろんなことによりまして、機能が低下するものですから、こういうケースに入れまして気密に保っておくわけなんです、このようなことをしたために、寸法が結局少々大きくなった。寸法がこう大きくなると困るからというので、これを改良しようということになりますと、先ほどごらんに入れましたような、ナマのトランジスタを何とか、いっばいうまいこと組んでしまっ、そのうえを気密なものでかこう。すると、トランジスタでつくりました回路全体が、今までよりもっと小さくなる。しかしまあ大体この程度のものを使ったといたしましても、数多く使うことになると、真空管を使った場合に比べて、はるかに小さくなることは明らかであります。なお、寸法が小さいというほかに、先ほど申しました電気を食わないという問題があるわけです。

計算機などに使います場合に、電気を食わないということが、非常に有利になるということはあとでお目にかけますが、トランジスタが使います電力は、そういう場合には一個あたり、1 ミリワット程度のもので十分なん

です。真空管でも1 ミリワット程度の電力を使うということは、これはできるわけなんですけれども、その場合に、困ったことには、真空管では必ずカソードを暖めるヒーターというものがはいっていることです。ご承知のように、そこに信号がはいってきている時でも、きていない時でも始終ヒーターをつけて真空管をあたためて用意しなければならない。そのために食う電力というのが、タマによっていろいろちがいますけれども、ごく小さいもので0.2 ワット。実際使おうという信号が1 ミリワット程度であるのに比べて、その200 倍の大きな電力をほとんどムダに食っているわけなんです。その結果、非常にムダな電力が多くなってくるということになるわけです。

	真空管式	トランジスタ式
容 積	(2 m) ³	(20 cm) ³
電 力	20 kw	200 w
毎時こわれる素子の数	10	0.1

図 7. 真空管式とトランジスタ式の計算機の性能の比較

トランジスタ式では、小型で、消費電力が小さく、もちがよい。真空管式では6分に1個こわれるが、トランジスタでは10 時間はおつという仕組み。真空管式は実用にならない。

仮に計算機の中に、そういうひとつひとつの単位を 10 万個使ったものといたします。10 万個使ったこういう計算機の寸法を図 7 でごく概算してみるわけです。そういたしますと、真空管式では、大体容積として、2 メートル立方ぐらい、2 立方メートルでございまして、2 メーター立方ぐらい。これがトランジスタ式になりますと、20 センチ立方ぐらいになります。今ごらんにいれましたような、ケースに入ったものを使っても、20 センチ立方ぐらいであります。それから、その消費します電力ですけれども、電力は、真空管式の 20 キロワットにくらべまして、200 ワット程度です。あるいはもっと小さくてすむわけです。

その次に、これは今までお話しなかったんですけれども、真空管よりも、トランジスタの方が、いわゆる丈夫で長もちするというわけでございまして、平均寿命というものを申しますと、真空管は特別のものを使いまして、せいぜい 1 万時間ぐらい、トランジスタの方ですと、100 万時間以上といわれています。そうしますと、そういうものを 10 万個使いました計算機の中で、真空管なり、トランジスタなりがこわれる数をかんじょうして

みますと、真空管式の場合には 1 時間ごとに 10、トランジスタ式の場合ですと 1 時間で、0.1 個ぐらいしかこわれないというわけで、毎時間 10 個もこわれてるような機械を使っていたのでは、とても話にならんけれども、まあ 10 時間位は何とか故障せずに動くというようなものならば使いものになるという、先ほど申しあげました質的な違いがここにあられてくるわけなんです。で、さらにこの寸法の大きさの比較などをしてみますと、今日、飛行機ですとか、宇宙ロケットに複雑な自動操縦の装置を積もうというようなばあい、こういうようなちがいが、結局積めるか積めないかという違いにまで影響してくるわけです。

以上が本日の話のイントロダクションでございまして、これから、そのトランジスタというのは、どんな原理で働いているかということをお話するのが、本日の主な話題なんですけれども、まず、真空管とトランジスタとを比較して、その機構を考えてみたいと思います。

真空管とトランジスタのちがい

図 8 は、真空管とトランジスタを非常に概念的に書いたものです。(左側が真空

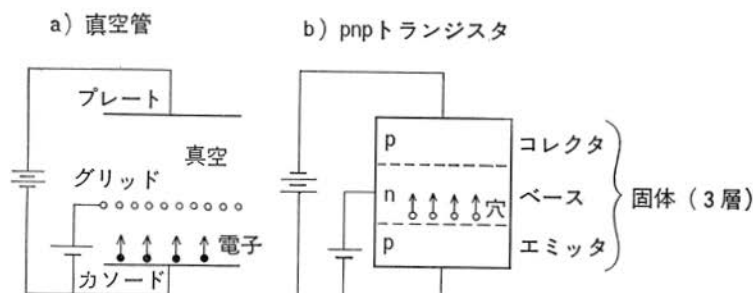


図 8. 真空管とトランジスタの原理の比較

a) カソードから熱電子が放射される。真空中をプレートへ。グリッド電位により電流が制御される。電子の荷電はマイナスなので、電流は電子の流れと反対向き。

b) ジャンクション(p-n)を通して穴が注入される。固体中をコレクタへ。エミッタ・ベース間の電圧により穴の注入が制御される。穴の荷電はプラスなので電流は穴の流れと同じ向き。

管で右側がトランジスタ。)トランジスタにつきましてあとでお話いたしますけれども、これはそのうちの pnp 型というトランジスタです。

で、真空管の中でどんなことが起こっているかと申しますと、ここ(下の方)にカソードがございまして、カソードが熱せられて、そこから熱電子(黒丸)が飛び出してまいります。このところ(中央の○印の集まり)にグリッドというのがあって、そのグリッドに与えた電位の大小によりまして、とび出してきた熱電子をプレート(上の方)へうまく通すか通さないかということを決める。つまりこのグリッドの電圧の変動によりまして、プレー

トの方へ流れてくる電流が変化するというのが真空管です。

トランジスタでは、それにちょうど対応して、こここのところにエミッタと名前をつけた電極がございます。トランジスタの場合、これ全部が、半導体という石ころの中にできておりまして、石ころの中に、p 型、n 型、また p 型というようなものを作るわけです。その点が真空管(内部は真空になっていてその間に電極がある)と非常にちがうわけです。トランジスタにおきましては、このところに、p-n ジャンクションというのがありまして(破線)、それをとおして、○印の“穴”(ホール)という妙なものがこちら側に流れこんで

いる。それでコントロールはどこでやるかと申しますと、 $p-n$ 間の電圧によりまして、この穴というものがこちらに入りこむ割合がちがってくるわけでありまして。真空管では、カソードからどんどん出てくる熱電子を、グリッドのところに門番がいてことわるわけなんですけれども、トランジスタでは、 $p-n$ 間にはじめからこういう門がありまして、その門の大きさを開いたり狭げたりして、ここに流れる電流をコントロールするというようなことになっております。

さてトランジスタの中で、どういうことが行なわれているかということをお話しする場合、少なくとも3つのことを申さないわけにはまいりません。まず、第1にトランジスタを作っております半導体の中では、電子と穴と、この2種類、電流を運ぶものがあるということです。これについて、これからこまかくお話するわけですが、その次には、場所によりまして (n 型とか p 型とか書いてありますが)、ある場所には電子ばかり、ある場所には穴ばかりあるということ。それから3番目には、本来は穴のないような、この n 型というような部分にも、他の方から穴が流れこむことができる。それを注入、あるいはイ

ンジェクションと申しますが、そういうことが行なわれるということ。以上3つのことが大切なのであります。

最初に、いわゆる穴という
“穴”と陽電子
ものはどんなものかという

ことをご説明したいと思います。穴というのは、非常に妙な名前です。これはもう少し学術用語らしい名前をつければいいのですが、トランジスタの発達が非常に早かったために、いわゆる漢字を二字ならべたような術語を作っているひまがないうちに穴というのが世間に通用してしまった。英語で申しますとホールなんですけれども、そのままの直訳でありまして、どういうことかと申しますと、本来、固体の中で電気を運ぶものは電子しかないわけなんです。ないわけなんですけれども、実験をやってみますとどうしても電子と同じぐらいの動き易さで、固体の中を動きまわって、しかも電子と反対の符号、つまりプラスの符号のを持ったものがなければならぬ、という結果がでてまいります。その実験では、半導体材料を磁場の中へ入れてやります。そして電流をながしますと、普通ならば (エレクトロンならば) エレクトロン

がこういう方向へ動いているところへ、磁場がこちらへこうかかっていると、電子は直角にこうまげられる。電子ならば、こっちへこうまげられれば、こちらの端にマイナスのチャージがでてくるはずなのに、実際には、プラスのチャージがでてくるというような現象が見られます。そうしますと、どうしてもその中で、電流を運んでいるものは、プラスのチャージをもったものでなくてはならないというようなことがでてくるわけです。

そこで思い出しますのは、原子核とか宇宙線の方に陽電子というのがあることです。陽電子は、1933年だと思いますが、アンダーソンという人が、宇宙線の実験の中で見つけたものです。これは宇宙線の実験の中でも電子つまり電子と同じ質量を持っていしかも電荷がプラスであるような粒がなければならぬというような結果がでてまいりました。そういう実験により、結局、陽電子というものゝの存在が確認されたわけですが、陽電子というのはディラックの理論によりますと、マイナスのエネルギーを持った電子の状態の中にできた穴だということになっております。

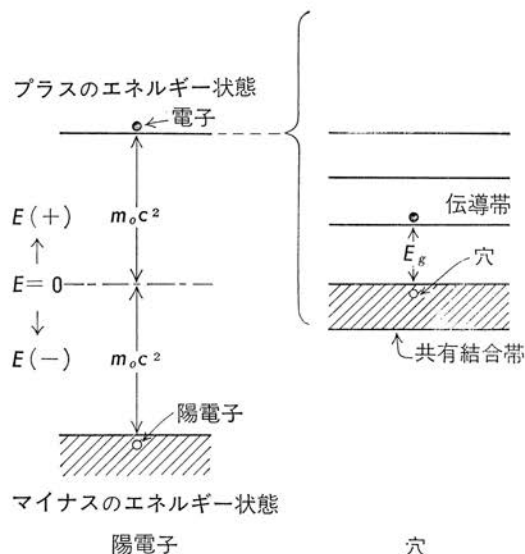


図9. 穴とは何か？ 陽電子との比較

左：マイナスのエネルギー状態の電子に $2m_0c^2$ 以上のエネルギーが与えられると、プラスのエネルギー状態の電子になり、抜けあとのマイナスエネルギー状態の穴は、プラスの電荷をもつ陽電子となる。つまり、真空から、電子と陽電子との対が生じる。この現象がおこるために必要なエネルギーは $2m_0c^2$ (約 1 MeV) であって、右図の E_g にくらべると桁ちがいに大きい。

右：共有結合のバンドをつくっている電子がとび出して自由な伝導電子になると、共有結合帯に“穴”（正電荷をもつ）を生じる。つまり E_g のエネルギーを得て共有結合帯から電子が伝導帯にとび上がると、あとに“穴”が残る。共有結合帯も伝導帯もエネルギーはプラスで、 m_0c^2 の値に近く、したがって“穴”のエネルギーは陽電子のそれとは大いに異なる。{ の印は右図が左図のごく狭い部分を拡大したものであることを示す。

図9が、この陽電子と、いま私がお話ししております穴との関係ですが、左がわが陽電子、中央のところがエネルギーゼロの状態、こちらから上がプラスのエネルギー状態で、ふつうのエレクトロンというのは、静止の質量を m_0 といたしますと、 m_0c^2 のエネルギーをもっています。この質量のエネルギーをもって止まっている状態がここです。これが運動していれば、さらにエネルギーを余計に持っていて、これから上のエネルギー状態にいる。これはプラスのエネルギーなんです。ところが、ちょうど中央からまた m_0c^2 だけ下ったエネルギーの位置のところに、いわゆる負のエネルギーを持ったエレクトロンというのがぎっしりつまっている。これは、宇宙のどこに行ってもあるのだけでも、こういうものはわれわれの観測にかからない。かかるのは、たまたまそういうところのエレクトロンが一つ、 $2m_0c^2$ (約1ミリオンエレクトロンボルト) のエネルギーをもらいまして、とびだす。すると、その抜けたあとに穴ができて、その穴がちょうどプラスのチャージをもっているようにふるまうというのが、この陽電子の理論なんでありましてけれども、それとちょうど似たようなことが、固体の中で行なわれる。た

だちがうことは、真空からは $2m_0c^2$ 、約1ミリオンエレクトロンボルトつまり100万電子ボルトというような非常に大きなエネルギーのやりとりがおこなわれないと、この陽電子というものができないのに対しまして、固体でこうした穴ができる場合はもっとずっと小さいエネルギー変化があれば十分です。このちょうど m_0c^2 の近所 (左側黒丸のあたり) を顕微鏡でながめたようなところ (右側の図) に、ことがおこっているわけです。右側最上段がちょうどエレクトロンが静止している状態です。固体の中のエレクトロンは、本来真空の中で止まっているエレクトロンよりはエネルギーが小さいわけです。というのは、その固体の中にエレクトロンがじっとしておちついていて、そうして真空の中へとび出すためには何がしかのエネルギーがいるということで推察できるのではないかと思いますけども、とにかく、真空の中に止まっているよりは、固体の中にある方がエネルギーが低い。このエネルギーの低い状態の中に、ここに書かれましたような、共有結合帯というある幅のエネルギー状態があります。ここには、ふだんエレクトロンがいっぱいあるわけなんです。ここにふだんエレクトロンがいっぱいあ

るのですけれども、そのエレクトロンのうちの1個がたまたまここに E_g と書いてございますが、これだけのエネルギーをもらいましとぽんとここまで出る(黒丸)ということになると、もとのところは穴(○印)になる。その穴がちょうどプラスのチャージをもった粒子と同じようにふるまうということは、左の場合とちょうど同じです。ですから、原子核の実験をされた方は案外この穴ということに対する理解がよくできるのではないかと思うわけですけども、こういう共有結合帯にエレクトロンが一つなくなったところが穴であります。これが実際、実験事実として観測されるということは、左の図の陽電子の場合と同じようなわけです。この図では、共有結合帯から伝導帯というところにエレクトロンがとんだことを示しております。つまりこの間に、エネルギーの、いわゆるギャップがあるということを示しているわけですし、そのことを少しくわしくご説明したいと思います。

ゲルマニウムの共有結合と2種類のキャリア

図10はゲルマニウムの模型ですけれども、ゲルマニウムの結晶を作っております原子を1個1個、このように球状に書いたわ

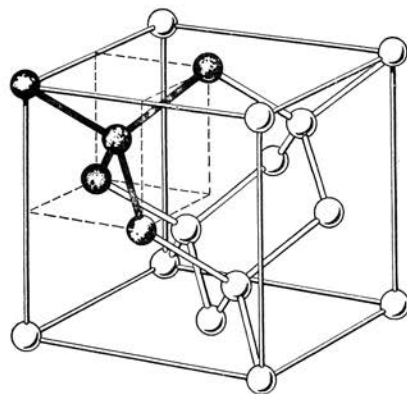


図 10. ゲルマニウムの原子の結合

ゲルマニウムは4価で共有結合する。黒線の結合が単位で、あとはこれのくりかえしになっている。

けです。これはダイヤモンド型の結晶と申しまして、立方体の各すみにひとつずつあるほか、こういうへんなところにも原子がたくさんあるわけなんです。これをひとつひとつよくながめてみますと、各々の原子のまわりに、4個の原子が配合され、どれをとりましてもまわりに4個、隣の原子がある。これはいわゆる共有結合型の結晶というのですが、この各々の原子が自分のまわりにエレクトロンを4個もっているときに、非常に安定だというわけです。この種の原子はおのおの4個ずつのエレクトロンを外側に持っているのです。そしてたまたま隣合わせた原子はそ

それぞれの電子を1個ずつ出しあって2個で対をつくる。ある原子についていえば4つの隣りをもつことができそのため自分のまわりに4組の電子の対つまり8個の電子を寄せつけ、ひじょうに安定なかたちをなしているんだというのがこの共有結合なんです。それを平面的な図であらわしますと、図11になります。

これはこの間、ショックレー先生が日本に

きまして講演されたときに使ったスライドをそのまま失礼したんですが、ここにゲルマニウム(Ge)の原子がこうある。で、こういうところに共有結合のボンドと称するものがありまして、電子(-)が2個ずつこうある。電子は本来、このようなところに互にくっついてしまっておりますから、それ自身遠くへ出歩いてゆくわけにいかない。ところがここへ何かの形でエネルギーが

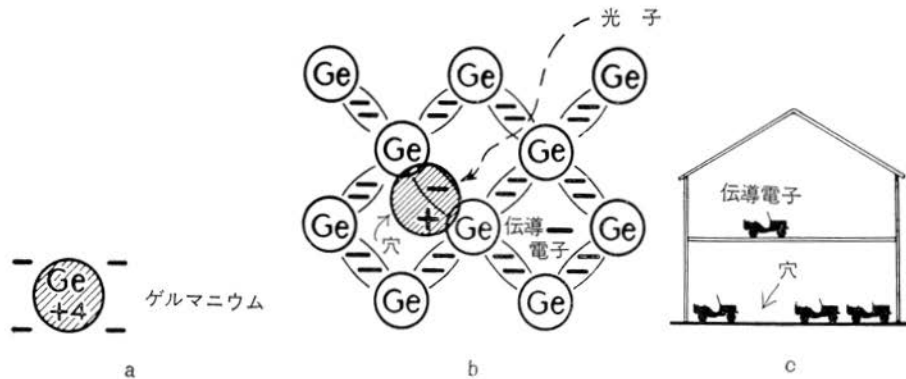


図11. ゲルマニウムの共有結合と“穴”

a) ゲルマニウム原子は4個の“価電子”(-印)をもっている。図の+4は、残りの部分の電荷を示す。

b) 隣りあった原子から1個ずつ電子を出しあって電子のペアをつくり、これで共有結合のボンドをつくる。ゲルマニウム原子は、こうして、4個の隣りの原子と結合している。光のエネルギーなどを受けこのうち電子1個がペアを破って自由になると、その抜けあとは電子不足の状態すなわちプラスの電荷をもつ“穴”となる。自由になった電子は伝導電子として“穴”とともにそれぞれ結晶中を移動できる。

c) 車がいっぱいあった車庫からその1台を2階へ上げたらどうなるだろうか?

与えられましてこれをこわします。たとえば光量子が入ってきましてこのところをたたく。そのため共有結合をつくっていたエレクトロンの1個がひょいと飛び出した。これはもうもとのところにむすびつけられているようなエレクトロンなどと違いまして、自由に動きまわることができるわけです。それと同時に、ここに1個の穴(+)が残るわけです。この穴がさきほど申しました共有結合帯の中にできた穴です。それで、陽電子と同じようにこれがやはり動きまわることができるというのが、半導体のバンド理論というものなのですが、ショックレー先生はこんな絵を書きました。2階だてのガレージがある、そのガレージには2階だての通路がある、その時に下の通路が一ぱいになっていれば自動車は動くことができないけれども、この1台を、何かのエネルギーを加えて2階にあげてやれば、こいつは2階の中を動きまわると同様に、1階に空席がひとつできたことによって、となりのやつが次々に動けるじゃないかというのがエレクトロンと穴(ホール)ということなのです。ここで注意すべきことは、共有結合をこわしてこういうエレクトロンをつくってやるためには、有限なエネルギーが必要であ

るということです。つまり、この共有結合というのはある程度ひもでしばってあるようなものですから、こうひもをきってやるだけのエネルギーがないと自由なエレクトロンができない。そのことはさきほど図9に書きましたように、共有結合帯があって、その中にあるエレクトロンを自由にしてやるためには、ある程度以上の大きさのエネルギーを与えてやらなければならない。つまり、ここにあるエレクトロンに E_g より小さなエネルギーを与えてやるということは不可能だ。そのために、エレクトロンのエネルギー状態には E_g と同じ大きさのギャップができて、この間のエネルギーを持ったエレクトロンというのは存在し得ないということになるわけです。このようにして半導体の中でエレクトロンと穴という2種類の、キャリア(われわれは電気をはこぶものというのでキャリアとよんでおります。)ができる、ということがわかったわけです。

n 型半導体と
p 型半導体

図12をごらん下さい。先ほどのような例ですと、必ずエレクトロンとそれの抜けた穴が一つずつあって数が等しいはずなん

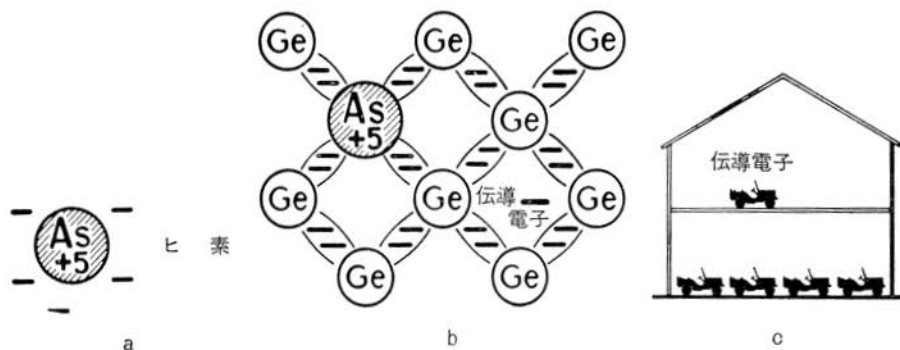


図 12. 不純物ヒ素を含む結晶

- a) ヒ素の原子は“価電子”5個をもっている。
 b) ゲルマニウムの共有結合中にヒ素の原子がわりこむと電子が1個余分となり、これが伝導電子となる。結晶中に“穴”が生じても、ヒ素の余分の電子のため伝導電子数が“穴”より多数になる。(p 型)
 c) 車庫にたとえると……。

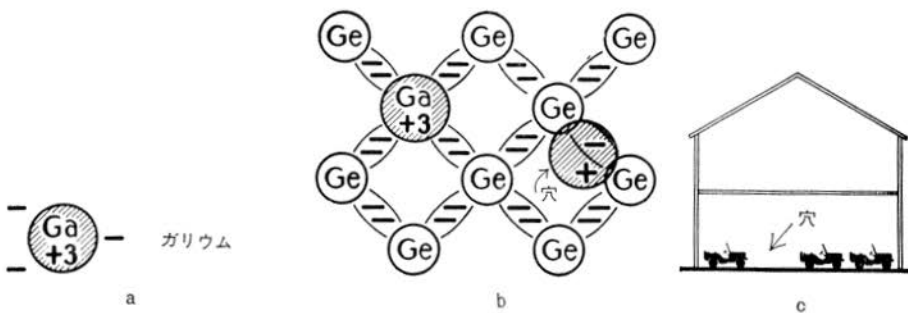


図 13. 不純物ガリウムを含む結晶

- a) ガリウムの原子は“価電子”3個をもっている。
 b) したがってゲルマニウムの結晶中にガリウムの原子がわりこむと、共有結合の電子が1個不足し、ほかのボンドからこれを補う結果、結晶中に“穴”を生じる。必然的に結晶中には“穴”が伝導電子より多数になる。(n 型)
 c) 車庫にたとえると……。

ですが、実際はゲルマニウムとかシリコンなどの半導体の中にはエレクトロンだけしかない、あるいは穴だけしかないというような部分ができるわけです。それをどうやってつくるかということをご説明いたします。ゲルマニウムのなかに、たとえばヒ素 (As) というような元素を入れます。そうしますと、ヒ素はエレクトロンを5つ持っていますので、まわりにこう4つ共有結合をつくったあげくに、ひとつエレクトロンがあまるわけです。そのあまったエレクトロンというのは、結局もとの原子にしばられておりませんから、他の原子間の空間にあるわけです。(どこかにある。)これがさっきの自動車のモデルでいえば、2階の方にあがっているわけでした、これが自由にどこへでも動けます。

そのかわり、1階の方のはもうぎっしりつまっているから1階はうごけない。つまり穴はなく、エレクトロンだけが動きまわる状態というのはこういうばあいです。これをネガティブのキャリアによってはこばれるというので n 型の半導体とよんでるわけです。

図 13 をごらん下さい。ヒ素のかわりにガリウム (Ga) という、エレクトロンを3つ持った元素を入れてやりますと、今度は1個た

りないわけです。この足りない部分がいわゆる穴となりましてこれが電気を運ぶ。こちらの方はポジティブと申しまして、p 型の半導体というものにかわる。こういうところに空席ができて、そのために電気伝導が行われる。そういうわけで、2種類のキャリアのうちのどちらか一方だけが優先しているような半導体をつくることのできる。それを p 型、あるいは n 型とよぶわけです。その場合に、優先している方のものを多数キャリアと申します。そのほかにこのような特別な原子が入っていなくてもなんでもなしにプラスとマイナスのキャリアが存在しているところがある。たとえば光とか、結晶自身の持っております熱エネルギーとかそういったものによって、こういうところがこわれて、プラスとマイナスのペアができていることもございます。そのようなキャリアは、こちらの多数キャリアとくらべて、非常に数が少ないので、少数キャリアと名づけております。

p-n ジャンクションは整流子の役をする
エレクトロンとホール(穴)という2種類のキャリアがあること、それから、それらがどちらかが優先してあるような場所が半

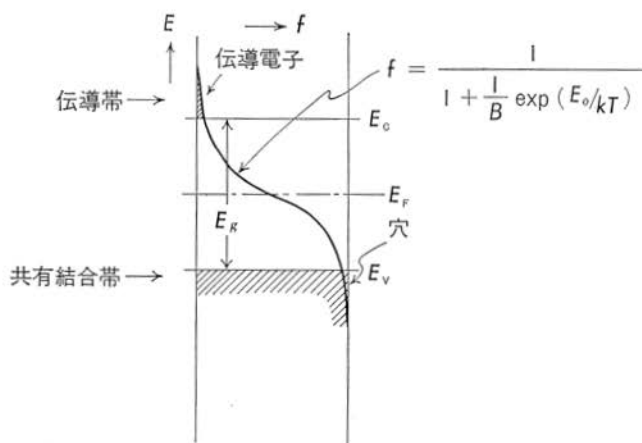


図 14. フェルミ・レベル

E_g はエネルギー・ギャップ。フェルミ・レベル E_F は、この場合はギャップのちょうど中央にある。

導体の中にあるということがわかったわけです。その次に今度は、それらが互いに入り乱れるはなしをするわけなんです。図 14 にちょっとむずかしい絵を書いてあるんですが、縦にエネルギー (E) を、横に存在確率 (f) をとってあります。先ほど書きました共有結合帯というのを下の斜線部に書きます。それから、このところこれからギャップ (E_g) と同じだけのエネルギーを得て自由になったエレクトロンのいられる場所にいるエレクトロン (上の斜線部) が伝導電子であり

ます。それからその空席が穴ということになるわけですが、実際、こういうエレクトロンや穴がどれくらいできているかということの確率をあらわしますが、フェルミの統計でございまして、フェルミの統計にしたがいまして、共有結合帯に空席ができて確率、それから E_g のギャップを越えて伝導電子のある確率は次式であらわれます。

$$f = \frac{1}{1 + \frac{1}{B} \exp(E/kT)}$$

k というのは定数、 T というのは絶対温度、それで、温度が変わりますと、このカーブの形が違ってまいりまして、絶対零度ではそこではすべてのエレクトロンが共有結合につかまってしまうということになります。

熱エネルギーが出て、温度が上がってまいりますと、熱エネルギーによりまして下のほうにあるエレクトロンがだんだん上にあげられる結果、このところに空席ができて穴がふえてくる。そのようなことをこの式があらわしているわけです。ここで、ちょうど f が

2分の1になるような場所を、フェルミレベル(E_F)と申します。この場合には、ちょうど真中にあるわけです。これは、不純物を含んでいない場合でございまして、不純物をふくんでいる場合には、結合帯に穴がほとんどないのに、伝導帯にエレクトロンがたくさんできている。そのような場合には、フェルミレベルがずっと上にあがりまして、このコンダクション・バンド(E_c)のそばにできてまいります。p型、n型につきましてコンダクション・バンドを書いてみますと次の図 15 になります。

図 15 で、まん中の、左右をつないでいる二本の右下がりの線はしばらく見ないでいただきますと、左側を p 型、右側を n 型といたしますと、n 型の部分には、黒丸で書きましたようなエレクトロンがたくさんある。ということは、いま申しあげましたフェルミレベルがコンダクション・バンドのすぐそばにある、それから p 型の方ではコンダクション・バンドのそばにはエレクトロンがほとんどなくて、結合帯のところに穴がいっぱいいている。この穴にいたエレクトロンはどこに行ったかと申しますと、ちょうどフェルミレベルの近所にある不純物につかまっている

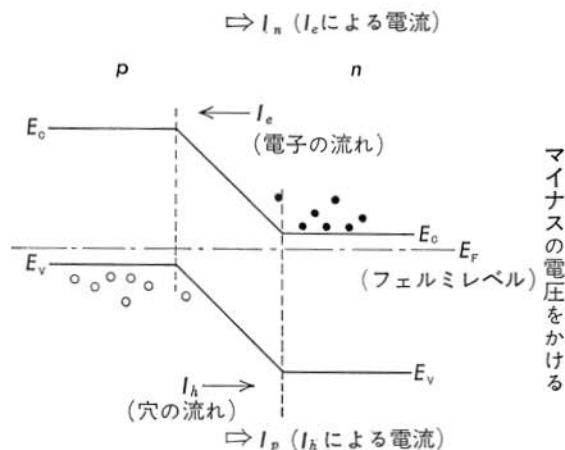


図 15. p-n ジャンクション

p型結晶内では“穴”が優勢でフェルミレベルは共有結合帯に近く、n型では伝導電子が優勢で、フェルミレベルは伝導帯により近い。pとnを結合するとフェルミレベルがひとしくなつてつながらまでキャリアの流れがあり、以後は流れは止むがn側にマイナスの電圧をかけると、“穴”はn側に、電子はp側に流れ、電流としては共にn側に流れこむ。

のでありまして、それはいまは省略いたします。こういうわけでp型の部分ではフェルミレベルは共有結合帯の上のはじに近く、n型の部分ではフェルミレベルはコンダクション・バンド、つまり伝導体の下に近い。これがひとつの結晶の中でつながっておりますと、このフェルミレベルはちょうど等しく

なるようになります。フェルミレベルというのは、平均においてエレクトロンがつまっている高さでございます。こちらの方が高ければ、こちらの方のエレクトロンがそちらの方へ流れていって、最後にはこれが等しくなるところにまでなるわけです。

さて、p-n ジャンクションというのはp-n 間がつながり、したがってpがわの方がコンダクション・バンドの高さが高くなる。この間でいわゆる熱平衡というのが行なわれておりまして、始終エレクトロンのゆきき、およびホール(穴)のゆきききがあるわけでありますけれども、それがちょうどバランスしてそこに電圧が与えられないときは、電流が流れてこないということになるわけです。そこで、このp-n ジャンクションに外から電圧をかけてやります。たとえば、n がわにマイナスの電圧をかけますとn からp へながれるエレクトロンの流れ(I_e)がふえてまいります。それから、p がわからn へくるホールの流れ(I_h)もふえてまいります。このホールの流れを I_h と書きましたけれども、これは電流ではございませんで粒の流れをあらわすものです。ホールがプラスのチャージをもち、エレクトロンがマイナスのチャージを持って

おりますから、電流としてはいずれもp からn の方向(右向き)になるわけです。つまり、n がわにマイナスの電圧をかけるということは、右がわにいるエレクトロンのレベルを上げてやることです。そこでn がわにマイナスの電圧をかけているときには電流は右向きに流れる。逆に今度はn がわにプラスの電圧をかけてみます。そうしますと、n のレベルがもっと下がるわけです。ここがもっと下がるということは、p がわにエレクトロンがあれば、n へながれてくるわけですが、実際、p には、ほとんどエレクトロンがないから流れてこない。またn のがわにホールがあれば、p がわにながれるわけですが、それもn に実際はホールがないから流れないというわけで、n にかかる電圧がプラスになったような場合には電流が流れないのです。これこそ、p-n ジャンクションが整流子として働くということの基本原理になっているわけです。

図16はちょっとややこしい図なんです、いま申しました電流が流れやすい方向に電圧を与えたときに、なにがおこるか。中央がジャンクションで、右がわがn 型、左がわがp 型でございます。まず右のカーブだけに着

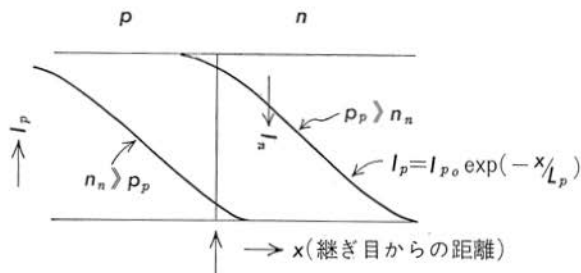


図 16. p-n ジャンクションの電流

p-n ジャンクションの全電流に寄与する“穴”の流れによる電流 I_p と、電子の流れによる電流 I_n との割合。左の曲線は電子の方がはるかに多く、右は“穴”の数がはるかに多い。どちらも I_p は下から上に、 I_n は上から下にはかる。

目していただきます。このジャンクションのところをさかいとして電流が流れるわけです。さきほどおはなししましたように、エレクトロンがpに流れ込む。それから逆にホールがnへながれこむ。そうしますと、両方とも電流としては同じ向きになるわけですが、どちらがわがよけいに電流に役立っているかを考えましょう。ホールの流れにもとづく電流を I_p 、エレクトロンの流れにもとづく電流を I_n とかいてあります。p がわにあります穴の数を p_p 、n がわにありますエレクトロンの数を n_n と書きましただけに、 p_p の方が n_n

よりはるかに大きい場合(右のカーブ)、中央のつぎ目のところで電流の大部分は穴による電流 (I_p) によってしめられる。エレクトロンによるもの (I_n) はわずかこれだけです。つまりホールのnへの移動がめざましい。

つぎに左のカーブをごらん下さい。これはいまと逆の場合です。今度は圧倒的にエレクトロンがpへながれこむわけでありです。中央のつぎ目においては多い。今度は右のカーブについて、中央のつぎ目からだんだんnの内部で深い方へ行くにしたがってどういうふうになるかと申しますと、ホールが流れこむとエレクトロンと合体してこれがいつも、はじめからここにあるような状態にもどろろとする。この現象のおこり方は流れこんできましたホールの濃度に比例するわけでありすから、ホールの流れはホールの濃度に比例して減衰するということになり、このカーブは、つぎ目での値を I_{p0} としますと、そのエクスポネンシャルという形であらわされる。つまり指数関数的にこれが減少するということになります。この指数関数的に減少するというのが、トランジスタをつくるばあい、あるいは、それを応用する場合に問題になってくるのであります。

再結合による

電流の減衰

今度はトランジスタを使う場合ですと、 $p-n-p$ と 3 つの層になっております。さきほどお目にかけました図 8 で、下の部分がエミッタ、中央がベース、上がコレクタで、さきほどおはなしいたしましたように、エミッタとベースの間の電圧によりまして、ここからこっちへ流れこむホールが調節されます。その前に、ここに流れこんだホールはずうっとこちらへまいりまして、コレクタと称するこの電極に集められます。コレクタと称する電極に、電極というよりこの半導体の部分に集められるわけなんです、その時に流れこむ電流が I_p で、実際、このところでうろちょろしているホールが、コレクタまで全部無事にとどいてくれればいいんですけども、中間にエレクトロンがいっぱいがんばっております、こういうのに衝突するとこのところでいわゆる再結合というのが行なわれてホールがなくなってしまうわけです。で、なくなってしまう確率が、さきほど書きましたエクスポネンシャルなにがしかというかたちであらわされるわけなんですけれども、なくなってしまうのではトランジスタ作用が行なわれない。で、 n に入りこんだホー

ルのほとんど全部がコレクタにきてくれなくては困るわけです。

I_p という電流は、 I_{p0} という流れこんだ電流の β 倍になっているわけなんです。で、その I_{p0} というのは、実は最初のエミッタ電流の r 倍になっている。 r というのは先程の p_p と n_n との比率でできる係数ですが、要するに、1 より小さい、 β も 1 より小さいわけです。エミッタ電流を変化させたときに、できるだけコレクタ電流を変化させたいわけですから、この二つのファクタをできるだけ 1 に近くしなくちゃいけない。

こういうわけでありまして、トランジスタとしては、できるだけベース部分のはばのせまい、しかもなるべくその部分で穴が吸収されないようなものをつくってやらなければいけないということになるわけです。

で、実際、どれくらいのはばのものをつくればいいのかと申しますと、結局、用いようとする周波数によって違う。あるいはまた、用いようとするパワーによってちがう。いろいろなファクタによってちがうわけなんですけども、大体高周波用としてはベース部分のはばは 1 ミクロンとか、あるいは数ミクロンのはばにしなければ不適當です。もっとやさしい

ラジオ低周波用なんかですと、10 ミクロンとか、数 10 ミクロンでもいいわけなんですけれども、とにかく非常にうすくしなければならぬということが、トランジスタの持って生まれた本質なんです。ホールとエレクトロンの再結合というようなことによりまして、トランジスタとしましては損するわけなんです。ところが、その再結合をこんどは逆にいろいろ利用することが可能になってくるのです。再結合するときに、言い換えれば、伝導帯にあるエレクトロンが共有結合帯に落ちるといふときに、このエネルギーギャップに相当するだけのエネルギーが自由になることとなります。これだけのエネルギーが自由になるとして、その自由になったエネルギーは何になるかというと、その結晶中に熱として吸収されてしまうか、あるいは光になって外へ出てしまうかです。その光になって外に出てくるものを使おうというのがいわゆる半導体レーザの応用なのです。あとから半導体レーザなるものを実験しておめにかけたと思いますが、今はこのエネルギーギャップだけエレクトロンが落ちるときに、光が出るというようなことを、映画でお目にかけます。ところがそれは、非常に理想的にいった場合

でありまして、トランジスタをつくるような、不純物をいろいろにまぜたような半導体の中では、理想的に、伝導帯から共有結合帯へ落ちるといふようなことだけではなくて、不純物を介して再結合が行なわれるということになり、光が出ても、都合のよい光ではなく、トランジスタ作用としては、非常に都合が悪いわけなんです。それで、トランジスタとしましては、さきほど申したように、ベースをうすくつくるということのほか、できるだけベース部分が完全なものをつくるということが必要になってくるわけです。

トランジスタのつくり方
一薄い3層につくる—
さて、トランジスタをつくるお話をこれからするわけですが、トランジスタは先ほどお話いたしましたように、少なくとも p-n-p という 3 つの層をもつ

Ⅲ族	Ⅳ族	Ⅴ族
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

図 17. 半導体に関する元素

Ⅳ族元素に不純物としてⅢ族元素を混入すると p 型に、Ⅴ族元素を混ぜると n 型になる。

ているわけです。この3つの層をどうやってつくるかということです。図 17 は、Ⅲ族、Ⅳ族、Ⅴ族の代表的な元素を周期律表の中から書きぬきしてきたものです。トランジスタにもっぱら用いられておりますのは、もっぱらといってしまう言いすぎかも知れませんが、非常に多く用いられますのは、このⅣ族のシリコン(Si)とゲルマニウム(Ge)、これを使うわけです。それに加えて、Ⅲ族のものをいれればp型になる。また、Ⅴ族のものを加えればn型になるということになっておりまして、Ⅲ族のアルミニウム、ガリウム、インジウム、Ⅴ族のリン、ヒ素、アンチモンがもっぱら、p型もしくはn型にするための不純物として用いられるわけです。

実際につくられているトランジスタには、いろいろな型があります。図 18 にあらわしてありますのは、合金型トランジスタという型でありまして、これはどういうふうにしてつくられるかと申しますと、ゲルマニウムの板はn型でつくっておきます。中ほどの上側にインジウムの粒をおきまして、この温度をあげてやります。インジウムは、大体セ氏180°ぐらいでとけ、とけたインジウムにゲルマニウムがとけこむわけです。ゲルマニウム

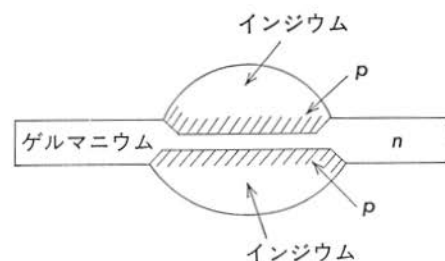


図 18. 合金型トランジスタ

Ⅴ族元素を混入したゲルマニウムでn型の板をつくっておき、その上にインジウム(Ⅲ族)のをせて高温にしてとかし冷却するとゲルマニウムとインジウムの合金(p型)を生ずる。上下とも同様にし、p-n-p トランジスタができる。

は表面だけでなく、内部の方も若干おかされる。こういうふうにおかされてきたものを冷却いたしますと、またそのインジウムの溶液の中からゲルマニウムが析出してそだってくるわけです。しかし、この析出してくるゲルマニウムは、インジウムを含んでおりますから、さきほど申しましたように、p型になっている。p型になったものができるわけです。下側にも同様なものをつけますと、ここにp-n-p というものができるわけです。これが、合金型トランジスタとよばれるものです。

次に、図 19 のような成長型トランジスタ

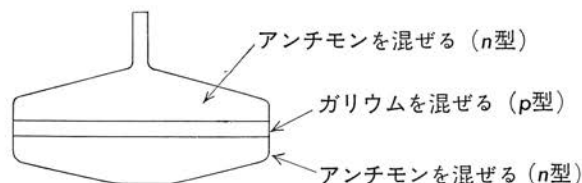


図 19. 成長型トランジスタ

ルツボで、アンチモンを混ぜた結晶 (n型) のタネをつくり、少し成長したところでガリウムを加え p 型を成長させ、更にアンチモンを加えて n 型をつくる。これは n-p-n トランジスタ。

というのがございます。これは n-p-n の例になっております。これはまずゲルマニウムをつくるときにルツボの中で、単結晶につくるわけなんです。この単結晶のタネができましたらそれにアンチモンを加えて n 型にしておくわけです。そしてだんだん結晶がそだったときに、このルツボの中にちょっとガリウムを入れます。そうしますとこのガリウムの量がアンチモンよりも多くなれば、この部分が p 型になるわけです。それで、さらにいかにげんにそだったときに、こんどはまたアンチモンをほおりこんでやりますと、この部分が n 型になる。こういう方法でつくるのが成長型トランジスタです。

さきほどベースの厚さを数ミクロンとかお

はなししましたが、こういう結晶をそだてる数ミクロンの厚さにするわけです。どれくらいの時間でその厚さにまでそだつかというと、大体 $\frac{1}{1000}$ 時間ぐらい。 $\frac{1}{1000}$ 時間というのはどういうことかということと数秒になるわけです。実は、ガリウムをぽんとほおりこんでつくって、数秒たったらまたアンチモンをほおりこんでやるということで、こういうジャンクションをつくるわけです。ですから 1 ミクロンなんていうのをつくるのは非常にむずかしいわけで、ほんとうはもっと厚いものしかできないわけなんです。非常にうすいものをつくるには、次のようにします。

図 20 は拡散法という方法でございまして、

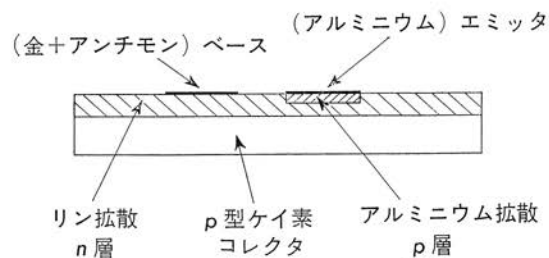


図 20. 拡散型トランジスタ

リンの蒸気の拡散で p-n をつくり、アルミニウムの拡散で p-n-p をつくる。拡散の速度はわりあいにおそく、温度制御できまるので、非常に薄い層をつくることのできる。

これはシリコンでありますけれども、最初は、 p 型のシリコンをここに用意しておきます。 p 型を用意しておいたなかに、リンの蒸気を入れまして温度をあげてやります。そうしますと、リンの蒸気の中にありますリンの原子が表面からこう拡散して入ってまいります。非常に薄い層がここにできるわけです。それでまず、 $p-n$ ができたわけです。そこに今度は表面に、この場合では、アルミニウムとそれから金とを蒸着してあてがうわけです。本当は、この辺のところに穴が一つあいておまして、この穴をとおしてこっちの方向に金のソース(源)があると、こっちの方向にはアルミニウムのソースがある。この辺のところから、アルミニウムがしゃっとうくる。この辺のところから金がしゃっとうくる。(金のなかには少しアンチモンをまぜていれておきます。)そしてこのところにこう蒸着いたします。蒸着したまま、これを少し熱処理いたしますと、アルミニウムおよびアンチモンがここへこうじわじわと拡散して入ってまいります。さきほど申しましたように、アンチモンは n 型の不純物ですから、これは p 層の中に拡散していつて何にもならないが、こちらがわのアルミニウムが拡散してまいりま

すと、この部分にまた薄い p 層ができるわけです。これで $p-n-p$ という三層の構造ができる。これは拡散速度が、わりあいにおそいということ、しかも温度をコントロールすることができるので、拡散の層の厚さをほとんど自由にコントロールすることが可能です。非常に薄い層が、ここにできるわけです。これが拡散法の非常によい点でございまして、この方法でつくられたトランジスタは非常に高周波でも特性のよいものです。今日、高周波型としては、もっぱら拡散型のトランジスタが用いられるというのもこうした理由によるのです。今日高周波用、あるいは大電力用として拡散型が多く用いられております。

ところで、トランジスタというような非常に小さなものをどんなぐあいには扱うのかというようなことをお目にかけようと思ひまして、トランジスタ製造工程を示しましたオートスライドを用意してまいりましたので、ご覧いただきたいと思ひます。これは私どもの会社で見学者の方にお見せするように作ったものでありまして、はじめとおしまいにコマーシャルが入っておりますので、本日はこういう席上でコマーシャルが写ってはいかんと思ひ、コマーシャルを切って写したので、少

少ぎごちないかと思うんですが、ひとつごかんべんねがいます。(ではオートスライドおねがいます。)

このような方法でいろいろな型のトランジスタがつくられるのですが、それが今日、ラジオ、テレビ、電子計算機に使われております。

発展の見とおし

さてそういうトランジスタないしは半導体というものがどういうふうにのびていくだろうか。ひとつはトランジスタそれ自身としてどういうふうにのびていくか。もうひとつは、半導体がトランジスタ以外に新しい分野にどのようにのびていくかということを考えてみましょう。まずトランジスタ自身としましては、つぎのような3つの方向が考えられます。第1により高周波のものに使われるようになっていく。今日ではすでに 1000 メガちかいところまでつかわれるようなトランジスタが完成しております。それから第2には、もっとパワーの大きなものが使われる。今日、真空管の生きのこっておりますのは、もっぱらトランジスタよりまだやすいという点で生きのこっているわけなんです。これから、トランジ

スタもどんどん使われるようになって、製造技術等が進歩いたして、安くなってまいりますと、だんだん真空管の領域をくっていくわけなんです。そうなりますと、どうしても、だんだんパワーの大きなトランジスタというものができてきます。パワーの大きなトランジスタというのは実はいろいろな問題を含んでおりまして、ただ、電極を大きくすればいいというようなことではないんでございます。パワーが大きくなった結果による冷却の問題とか、あるいはリード線の抵抗の問題とか、いろんな問題がありますので、ただ寸法を大きくすれば電力が大きくなるというようなわけにはいかないところに問題があります。それから第3には、もっと小型にすることがございます。さきほど、トランジスタは最初から真空管に比べてのメリットは、とにかく小さい、電力が小さいということだと申したんですが、その中で、依然として、まだ、外気からこれを守るための気密封じという問題が大きな問題になっております。ここでなんとかこの気密封じがなくてもできてるようなトランジスタをつくる。そのためには表面処理によりましてトランジスタをもっと丈夫なものにする。それから、それ

らを組み合わせました、いわゆる、複合回路を1個の半導体の中に組んでしまうことによって、さらにトランジスタを小型化していきたい。

以上、今後のトランジスタ技術としては第1はより高周波に、第2はパワーをより大きく、第3はより小型に、という3つの方向に進歩していくのではないか。それから半導体をトランジスタとは別の用途に用いるための応用といたしまして、これからお目にかけerる発光、光を出すということに使っていかれるよう研究が進んでいくものと思います。で、特に半導体レーザの実験をこれからお目にかけますが、レーザの話をここではじめますと、また2時間ぐらいかかってしまうので、レーザというもののくわしい説明ははぶきます。

先ほども申しましたように
半導体レーザ

p-n ジャンクションの中に電流を流しこんだ時に、キャリアの再結合によりまして、光を発するということが非常に役に立つ。その光を発するという点について、二つ重要なことがあります。ひとつは、発光の効率が非常に高い。発光の効率が低いということは、ふつうのこういう電球と比較

してごらんになるとわかると思います。蛍光灯が非常に効率がよいといわれておりますけれども、これは大体、つぎこんだ電力の20%前後が光になって出て来るにすぎない。これに反しまして、非常に能率のいいレーザを用いますと、つぎこんだ電力の85%が光になって出てくるといわれております。今日、もしそのレーザがどんどん開発されていって、非常に大きな光を発するものができれば、今までの照明というものはここに革命をおこすわけなんです、今日、まだそういう状態になっておりません。その大きな理由は、こういう非常に小さなものにそれほどの大きな電流をくわせることができないということがひとつ、もうひとつは、残念ながら今半導体の中からでてくる光というのは、われわれの目に見えないということなのです。目に見えない光というのは非常に変な話なんですけれども、要するに、赤外光というものです。で、なぜ、赤外光しかでてこないかというのはなしは、あとでまた映画の中でもあると思いますが、実際問題といたしまして、きょうお目にかけerる実験におきましては、赤外、近赤外の、約8400オングストロームぐらいのところの光が出ております。ですから実験をお目にか

けると申しまして、光が出てくるところをお目にかけられないわけです。研究の方向といたしましては、なんとか目に見える光を出すようにもっていくということが、ひとつの方向で、それからもうひとつは、これを、先ほど申しましたように、変調できるということです。

ここで出ます光の強さといものは流す電流に比例するわけであります。ですから、 $p-n$ ジャンクションに流す電流をかげんし、それを変調してやれば、出てくる光は、その信号によって変調されているわけです。ですから、その変調光をうけてやれば、そこで通信がおこなわれる可能性があります。半導体レーザを、これからどういう方向にもっていくかと申しますと、ただいま申しましたような通信に応用する方法と、それから、何とか光源としての応用と、これらの2つの方向に研究が進んでいくのではないかと思います。

半導体レーザ の実験

ひきつづきまして、ちょっとした実験をいたしますが、ただいま申しました半導体レーザであります。あちらに魔法びんがあります、魔法びんの中に、この場合はガ

リウムアーセナイド、ヒ化ガリウムというのをに入れておきます。(ゲルマニウムが使えないことについてはまたわけがあるんですが、そのわけを話しておりますと、非常に長くなりますので) ガリウムアーセナイドという結晶で、 $p-n$ ジャンクションをつくって入れてやります。さきほど図でござんになりましたトランジスタぐらいの小さなものなんです、そこから見えませんが、あの魔法びんの中に入っております。それに電流を流してやると光が出るわけです。出た光を、今あそこにレンズがございまして、あのレンズで平行光線にしてこちらに出してやります。ここでその光をうけておりますのが、赤外線検知器であります。この赤外線検知器でうけますと、うけた振動、つまり赤外線の変調された部分が電氣的信号となって出てまいります。

あそこに小さなテレビがございます。あのテレビは、むこうの半分は放送のテレビを受けているわけです。放送テレビを受けますと、受けたテレビの信号の中からいわゆるビデオの信号をとりだしまして、(ビデオの信号というのは、テレビに入ってくる信号なんですけれども) そのビデオの信号をあそこに入

っておるガリウムアーセナイドのジャンクションの中に、直流と重ねてぶちこんでやります。そういたしますと、そこから出てくる光がこちらへきまして、これ(赤外線検知器)で受けられ、その中から、またビデオの信号をとり出します。つまり検波する。ここのところに出てるわけです。なぜこんなことをお目にかけようとしているかと申しますと、ビデオの信号といいますのは、最初にお話しいたしましたように、6メガサイクルの変調を持っているわけでした、いままで行なわれていた光線通信というのは、せいぜい4000サイクル程度の低周波の通信しかできておりません。で、こういう6メガというような高い周波数の通信が、こういう光線通信を通じて可能であるということを、今お目にかけているわけなんです。

今あそこにあの人が立ちますと、p-nジャンクションから出ている光がきえるわけです。

けっしていんちきしているわけではない。そういうわけでございまして、ひじょうに大がかりなものを持ちこんで実はお目にかけるのはこれだけなんです。あとやってみることは、これを少し動かして、テレビの信号だけ

でなく、音の方もやってみせようというのです。これを切りかえますと、あそこで音楽をテープレコーダーにながしまして、こうやっておきます。こちらがわの受像機ともうしますか、受信がわの方をうごかしますとこの通りです！

これは、光線のビームが非常にシャープであるということを使っているわけですね。

それからこれは、いまテープレコーダーであそこにうつったものをまわしていますのですがこういうものをおすと、ちょっと雑音が多いんですけれども、ひじょうに音がハイファイであるということ。これはやはりここに使っております光線通信のバンドが広いということであらわしているわけです。ごらんになることはこれだけです。

終りに 要するに、あそこに小さな半導体というものが、入っ

ていて、それでこういう光線通信ということが可能だ。ビームが非常にシャープでバンドも広いというようなことにより、これから光線通信の分野で大いにのびるのではないかと思います。

使っております光が 8400 オングストロー

ムで目に感じないということは、周囲に目に見える光がいくら照っていてもあんまり影響しない。夜など、泥棒よけにつくっておきますと、もちろん泥棒には見えないとか、いろ

んな便利なことがあるわけです。そういったような方面に、この半導体といったものが、これからだんだん使われるだろうということを実験してお目にかけたわけでありませう。



インドの宇宙線研究



三宅三郎

ボンベイのタタ研究所

東南アジアの国々は将来日本と親類のような関係になるでしょうが、現在では未だ余り文化的といえない水準にあるためと、独立後日の浅いこと等の理由から、まだ十分交際ができない事情が多いようです。これらの国々に対しての開発援助として各国がその物質的な面を考えてあげるのもよいことですが、同時に教育的な面も重要だと思います。日本では教育の普及率も高く、これらの国の人達が80%も未教育である事実は理解し難いことですが、本当は後進性の問題の殆んどがこ

の点にかかっているのではないのでしょうか？これらの国の留学生はどうも欧米の方へ行きたがる傾向がありますが現地での活動は是非日本が積極的に主動権を握りたいものです。

インドは今までに純粋科学の分野で優れた学者を出していることもあって科学研究は非常に盛です。バンガロールの高等技術研究所やデーリーの高等物理学研究所等一般科学のものを始めボンベイ近郊トロンベイの原子力研究所や原子核研究の中心であるボンベイのタタ研究所等、皆とても立派なもので、優れた設備と美しい環境にめぐまれています。研究者は独立後にインドの各大学を卒業した若い人達が中心ですが待遇がよいので質のよい

* 三宅三郎氏は財団の1961年度研究奨励金によりインドで“二千米以上の深さにおけるミュオン中間子の測定の研究”を行なった。大阪市大教授。

人が全国から集っています。かつての偉い科学者は所長として各研究所の運営に当り数百人の科学者の養成に行政的手腕を振っていますが、何分にも直接研究の指導に当れる老練な科学者の数が少いので毎年少からぬ数の外国人学者の招聘も行ない、とにかく、強引に科学水準を世界でも一流のものに仕上げようと懸命の努力をしています。

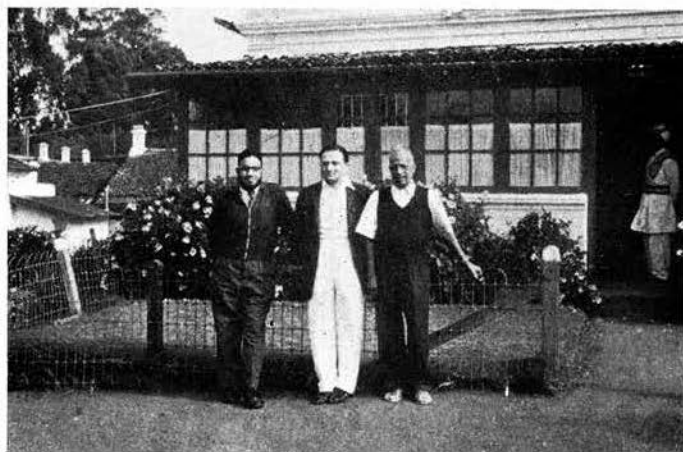


図 1. 左からメノン、サラバイン、ラマナサンの三氏。

このように申しますと何だかインドの経済状態がとてもよいように見えるかも知れませんが、一般人の生活は低く、他の東南アジアの国々とあまり異なることはありません。ただ国策として科学振興が重点の一つになっているからです。

原子核部門における日印学術交流はタタ研究所の物理学部長であるメノン教授が良い親日家である所から始まりました。主に宇宙線関係の協同研究です。インドは地磁気の赤道に近い位置であること、南部の山々は高さは 2500 m 程度であり高くはないが年中無雪で常時観測に適していること、バルーンによる高空の研究ではジェット気流の圏外であるため殆んど横移動をせず回収率がよいこと等、我国に比べていくつかの特長を持っています。しかし一番の魅力は地下 3300 m の深さのコラー金鉱の存在です。それはそのような深さでの宇宙線観測が未だなされていないのと同様な深い所はインドと南アフリカにしかない稀少価値によります。

インドの宇宙線に関する研究ではアーメダバットのサラバイ教授を中心とする一次宇宙線の研究も相当進んだ分野ですが、ここでは主にボンベイのタタ研究所での宇宙線を用いた超高エネルギー現象の研究について述べます。

タタ研究所は宇宙線に関係した部分がその大半です。まずバルーングループは 10 人の



図 2. 湖水での実験のための観測所建設

技術者が常時生産をしており 10 日に 1 個の割合で 2 万立方メートルの大型バルーンを作っています。これを用いるのは乾板による高エネルギージェットの研究グループや計器による高空宇宙線観測のグループで、バルーンの基地はデカン高原の中央ハイドラバードにあります。高山で空気シャワーや高エネルギー核現象の研究をするグループは、マドラス州のウータカモントという高度 2500 m 人口 4000 人の町で昔の王様の宮殿の一部を観測所としています。更に南方の山岳町コダイカナルや北方のカシミールにある高山宇宙線観測所等は皆共同利用の観測所として将来は大々的に研究が進められる予定です。このように宇宙線の研究が盛なのは加速器に比べて経済的

である理由によるものでしょう。

私は今までに 3 回、延べ 2 年インドに行っていましたので、その時行なった 2, 3 の実験を御紹介します。

宇宙線の地下観測はマイソール州のコラー金鉱で行なわれました。数百年に亘ってインドの唯一の金産出地であったコラー金鉱は全長延べ 200 マイル、最深部は 10250 フィートでその地下坑道は 6 つの鉱区がそれぞれまるでくもの巣のようにはりめぐらされています。うっかりどこかに迷込んだら地上に出ることは出来なくなるでしょう。地下観測の目的は、高空で宇宙線が空気の原子核に衝突して作った中間子が崩壊して出来た μ 中間子をいろいろな深さで測定し、そのエネルギー分布を求め、高エネルギーでの相互作用の有様を知ることです。今までは約 20 年前理研の宮崎博士が清水トンネルで水深 3000 m 相当の地下で観測されたものが長い間最深の資料となっていました。これを更に深い方へのばすのには絶好の条件を備えた金鉱であるわけです。地下に入るには鋼索に吊られた箱に乗って約 1500 m を一気に下ります。そして横坑を一軒程歩いて次のシャフトで又 1500 m 下り更に乗換えて約 400 m 下ると最深点に

到着します。最初のシャフトを降りるとき始めはぐんぐん温度が下って 20°C 位になり次に逆に温度は上って 40°C 位になります。一番深い観測をした 2800 m の深さでは 40°C 1.5 気圧です。岩石の温度は 50°C を超えますが地表からは絶えず空気を送り込んで冷やしています。坑道は巾 2 m 高さ 2 m 程度で素堀りのままの所が殆んどですが堅い火成岩なので丈夫そうです。しかし深い所では岩石

の圧力が大きいため時々ロックバーストといって坑道が押潰されるような事故もあります。小さなロックバーストまで含めて1日に2,3回あるそうですが、大きな金鉱なので実際に出合う確率は小さいものでしょう。夜中には時々ドドツと鳴る音を聞く事もあります。我々が観測をしたのは水深相当で $816, 1812, 3410, 4280, 6380, 8400\text{ m}$ の6点です。そして深さと共に μ 中間子の強度がどのように変化して行くかが判りました。その強度は例えば 816 m では1時間に170個位観測されるものが 3410 m では2時間に1つ位となり 6380 m では6日間に1つとなり 8400 m

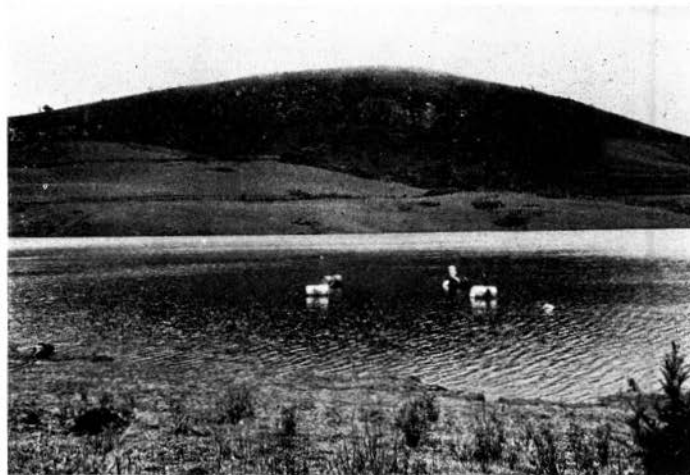


図3. ドラム罐を浮べ

では60日間の観測で遂に1例も観測されませんでした。我々の観測装置は 1.5 m^2 の面積で深い所での観測のためには小さ過ぎたのです。せめて10倍の面積があればもう少し深くまで観測出来たのでしようがここであきらめざるを得ませんでした。深さと共にこのように激しく変化するのは対応するエネルギーが深さによって非常にかわるのと始めから μ 中間子のスペクトルがエネルギーと共に急激に減少していることの両方の理由によります。この頻度の変わり方からもっと深い所では地球を素通りする様な中性微子の観測や核子の寿命の測定等が出来るのではないかとの見

方が有力になって来ました。最深部は殆んど宇宙線の来ない深さですがまわりの岩石からガンマー線が相当の強さで出ていますからそこまで潜っても放射線の影響から逃れられるわけではありません。

次に宇宙線中の非常にエネルギーの高い粒子が大気中に突入して次々と空気の原子核に衝突し幾百万もの粒子を一時に降らせる空気シャワーなる現象があります。その大部分を占める電子成分についてはよく観測されているので、特に μ 中間子シャワーについて観測を行なうことにしました。平均してこれらがどの位の高さで出来ているだろうか？密度スペクトルやエネルギースペクトルは？等の点を測定し、やはり高エネルギー核子間の相互作用を解明しようとする試みです。今度は余りエネルギーが高くないので、同伴する電子や核子を吸収してくれる位の厚さの物質が検出器の上であればよいのですから、湖の水を用いました。即ち 2000 m の山の上の湖と平地の湖にそれぞれ水深 10 m の所へ検出器を沈めてその現象の頻度を観測する実験です。山の湖は発電用のダムで風光明媚な涼しい所でしたので快適に仕事を進めることが出来ました。毎日ボートを漕いで4つの検出器に異

常がないか調べてまわるのも楽しいものでした。平地の湖は農業用ダムでジャングル地帯の中にあり、すごい暑さと沢山の虫に悩まされました。丁度モンスーンの時季でもあり風雨や雷も強敵でしたが電気の電圧がひどく変化し、またよく停電するのには全く閉口しました。実験自身よりも生活の条件の方がもっと大変で、40° 程度の暑さが昼夜続き氷等冷たいものは全然ありませんから汗の流れ通しです。扇風器の下で裸で暮す有様です。またこれが虫類を吹き飛ばしてくれるわけです。三度の食事は辛さが胃の中まで感ずるようなカレー料理でトウガラシを始め5種類の辛さが適当に混って旨いとされているそうですが、馴れることはとても出来ませんでした。ジャングル地帯なので生物は多く、サソリや蛇には参りましたが、美しい鳥やリスや猿等、可愛らしい動物も沢山いて、今から考えると結構楽しみもあったような気がします。

宇宙線の研究は天然の利を用いて行なわれることが多く、お互に特長を持ちよった国際協力を行なう事はとても役に立ちます。幸いインドは日本との協同研究を熱望していますので将来もますます学術交流を盛にすると共に両国の親善に尽すことが出来れば幸いです。