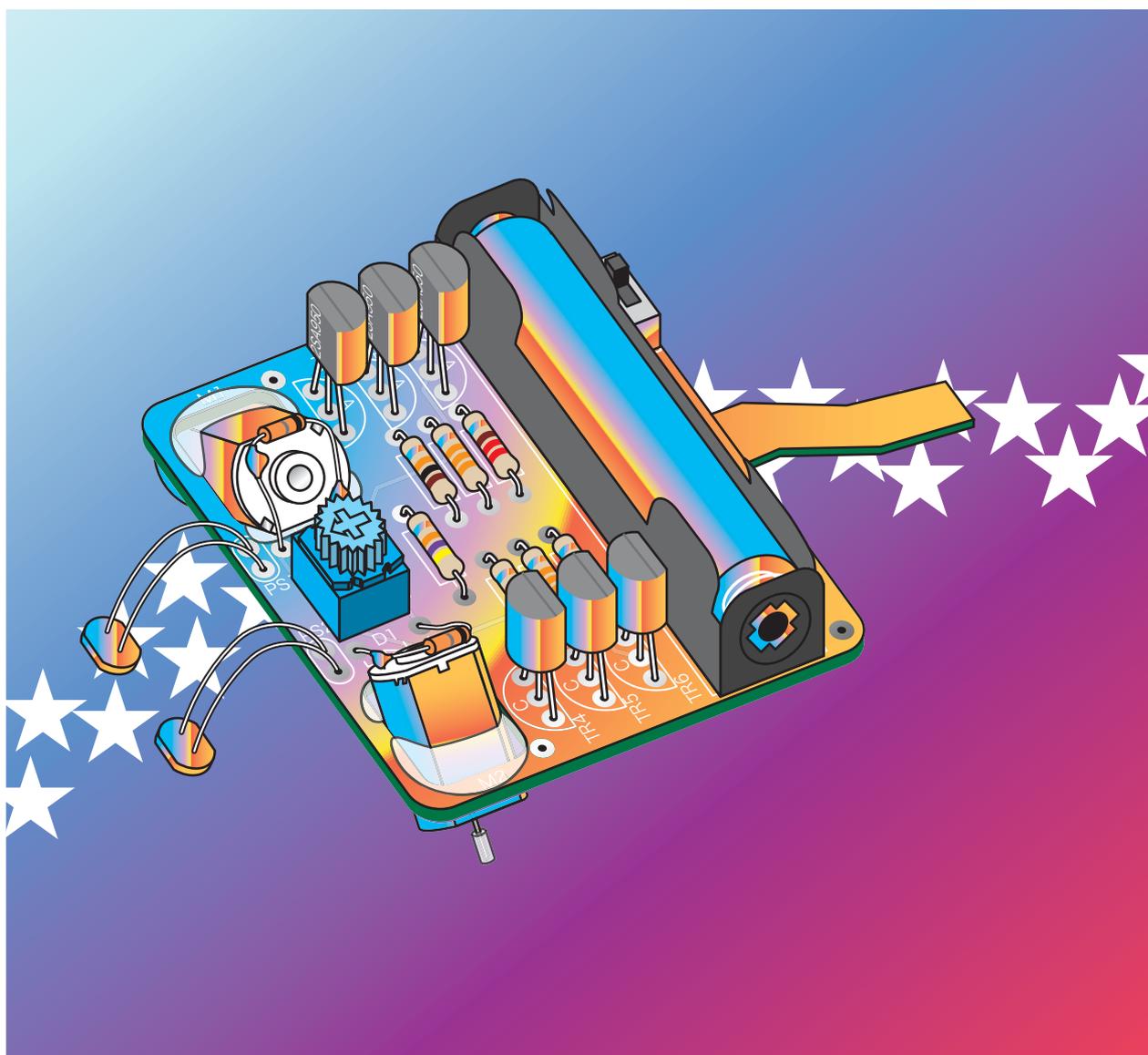


# 世界一？シンプルなライトレーサー “ちょこまカー”の製作

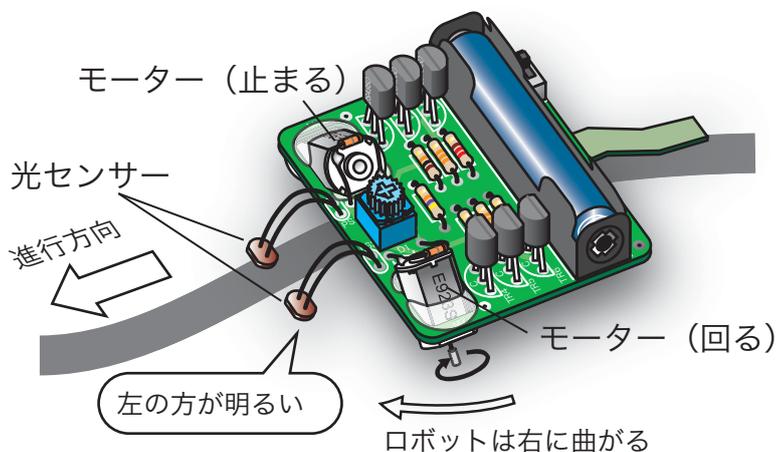
製作・実験・トランジスタ回路入門



東京大学生産技術研究所  
未来の科学者養成講座テキスト  
2011年7月23日

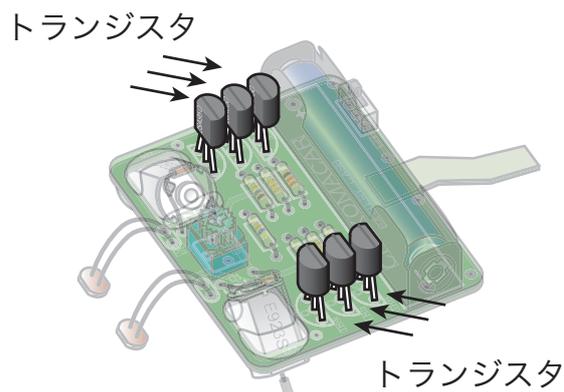
## ちょこまカー、世界一？シンプルなライトレーサー

ライトレーサーというのは、床の上に引かれた線を自分で見分け、モーターを動かしたり止めたりすることによって、線の上を沿って走るロボットです。



左図の場合、線がちょこまカーの進行方向に対して真ん中より右側にあるので、光センサーが感じる明るさは左の方が明るい。この場合は左のモーターが回転し、右のモーターは停止します。ロボットは右に曲がり、ロボットの進路が線の方へ修正されます。

光センサーの情報をもとにモーターを動かしたり止めたりするのが制御回路です。ほとんどのライトレーサーは制御回路にマイクロコンピュータを使っているので、作るのも難しいし、プログラムを入力しないと動きません。ちょこまカーの制御回路はたった 6 個のトランジスタでできているので、簡単に作れすぐに動かせます。



ちょこまカーの制御回路は  
トランジスタ 6 個

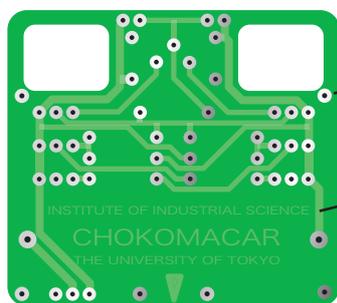
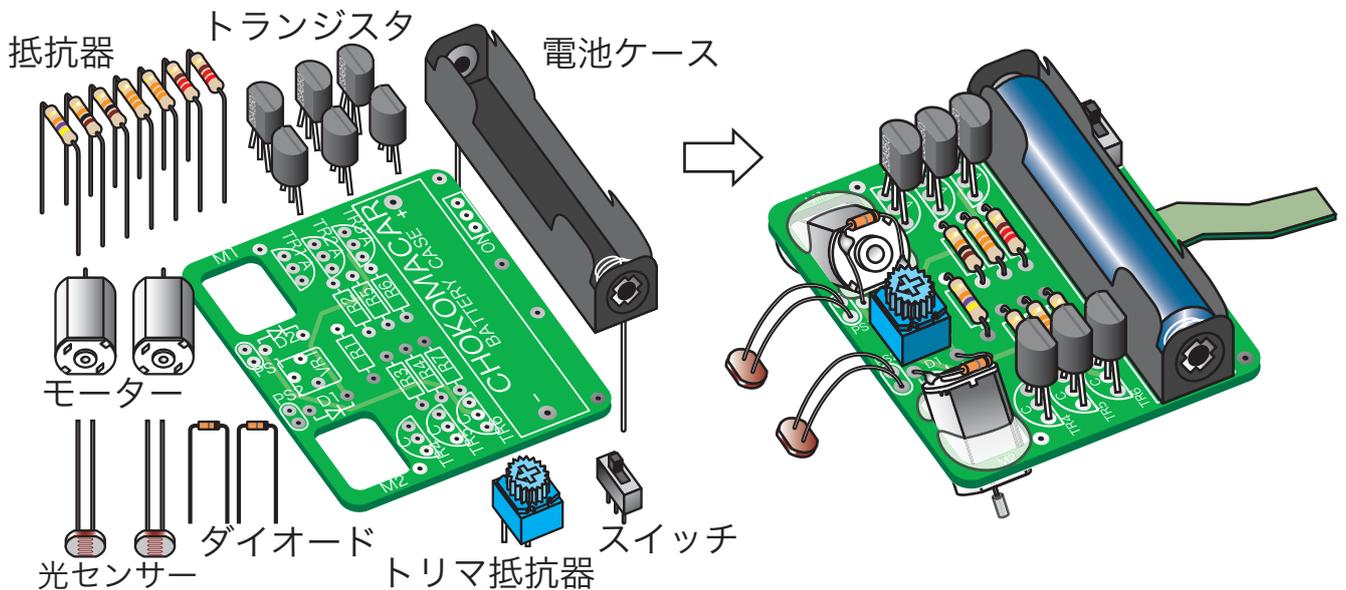
## 工作教室の進め方とこのテキストについて

今日の工作教室ではトランジスタ回路がどのように動作するか説明する時間がありません。製作して走らせてみるまでです。その範囲でも、光センサーの位置をどのように調節するとか、タイヤの太さを変えると走り方がどう変わるか、などなど実験してみるとおもしろいテーマがいろいろあります。

このテキストには、次のページから作り方や注意事項などが書いてあります。その後にトランジスタとはどんなものか、トランジスタや抵抗器やモーターがどのように動作するのか説明してあります。後半は家に帰ってから読んでみてください。

## ちょこまカーの構造

電子部品、センサー、電池、モーターなどすべての部品がプリント基板に取り付けられます。プリント基板には電子部品を接続するための配線パターンが作り込んであります。電子部品をこのパターンのパッドという部分にはんだ付けすると、正しい回路が完成するようになっています。



プリント基板

パッド：ここに部品をはんだ付けする

配線：塗料がぬってあるのではんだが付かない

## モーターがななめになっているのはなぜ？

ちょこまカーに使っているような小さいモーターは1秒に数百回転します。たとえば直径2センチメートルのタイヤを100回転させると約6.3メートル走りますが、ちょこまカーは毎秒何メートルも走ると速すぎます。そういう場合、普通は減速ギヤを使いますが、減速ギヤはけっこう値段が高いので、ちょこまカーではタイヤの直径を小さくすることで走る速さを遅くしようと考えました。モーターのシャフトにシリコーンゴムのチューブをはめ、そのチューブをタイヤのかわりに使います。そのかわり、チューブのほうがモーターより細いため、モーターをななめにしないとチューブが床に接触しないのです。

# ちょこまカーの製作

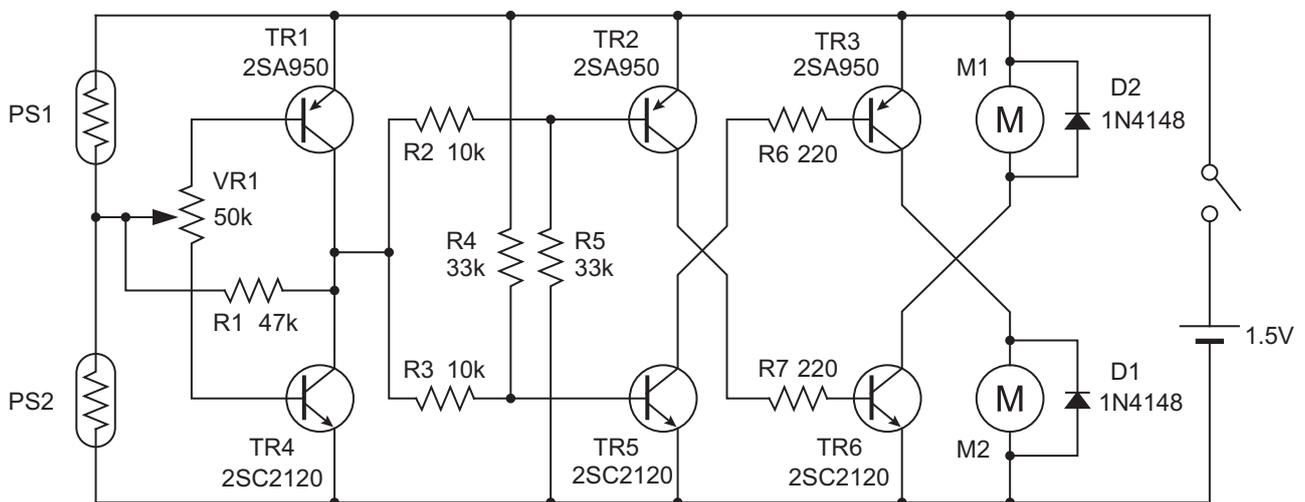
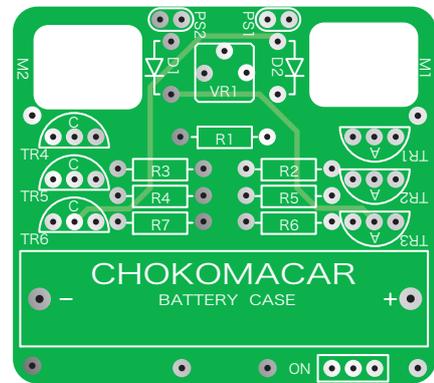
## 準備

めがねをかけていない生徒は保護ゴーグルをかけてください。  
はんだごてを専用スタンドに入れ、プラグをコンセントに差し込んでください。こて先を拭くためのスポンジを水で濡らしてください。  
グルーガンのプラグもコンセントに差し込んでください。



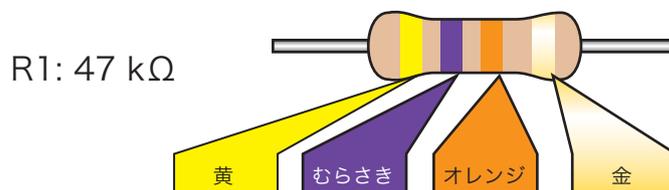
## 回路図とプリント基板の記号

下の回路図の中の部品番号 (R1 とか TR4 など) と右図のプリント基板の記号は対応しています。プリント基板は、記号が印刷してあるほう (右図) が表です。こちら側から部品をさし込み、裏側ではんだ付けします。



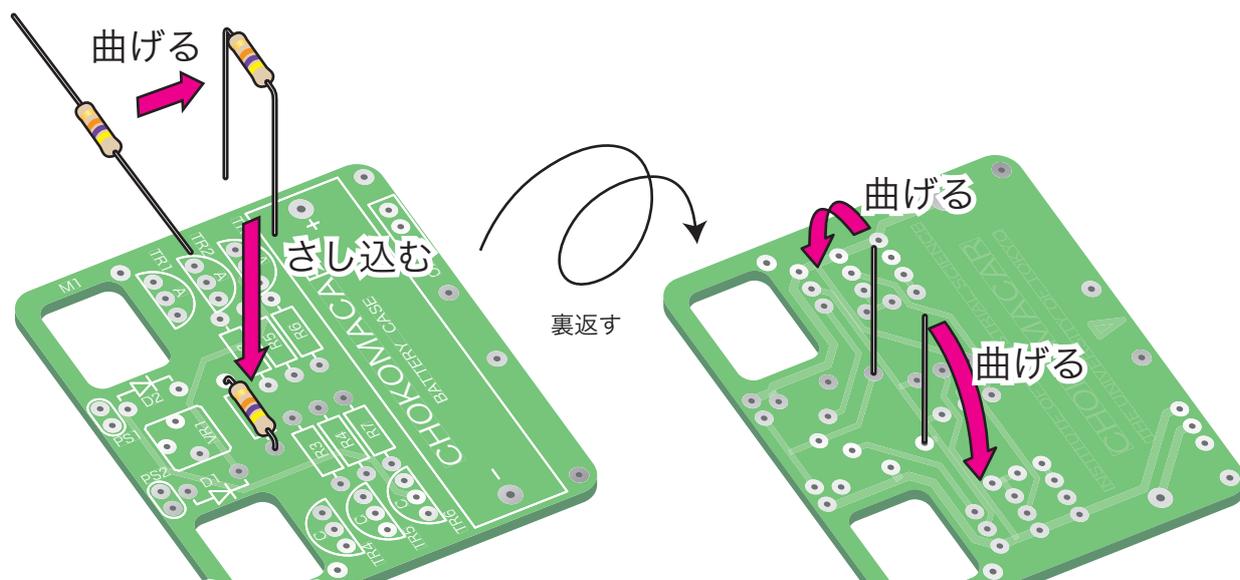
## 部品の取付けとはんだ付けの練習

抵抗器 R1 を使って部品の取付けとはんだ付けの練習をしましょう。R1 の抵抗値は 47 k $\Omega$  (47 キロオーム) です。この値はカラーコードという色によって抵抗器に表示されています。カラーコードの読み方はテキストの後の方に出ていますが、答えを書いてしまうと、金色の帯を右側に置いたとき左から黄色、むらさき、オレンジ、そして金という色の帯が付いているのが 47 k $\Omega$  です。



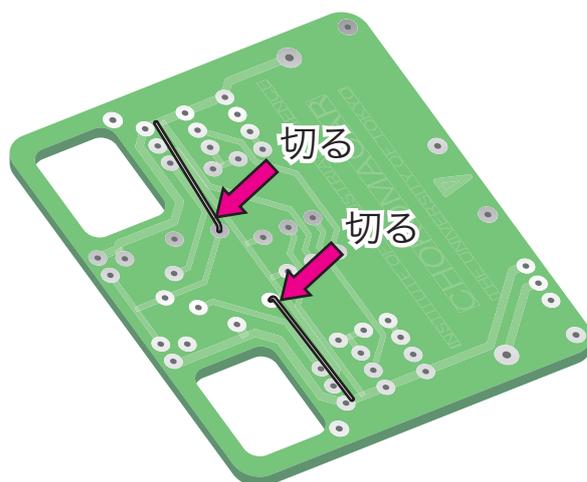
R1 のリード線 (電子部品から出ている針金) をあなの間隔に合うように曲げ、プリント基板 [R1] と印刷されている面からさし込みます。抵抗器には決まった方向がありません。全ての抵抗で金色を同じ方向にそろえる方がかっこういいだけです。

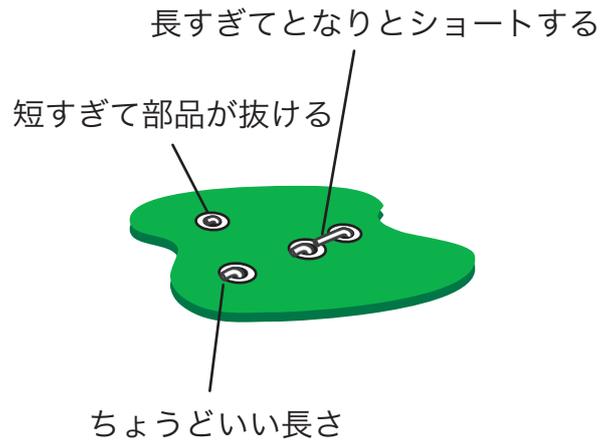
プリント基板を裏返し、突き出ているリード線を両側に広げるように曲げ、はんだ付けのときに部品がずれないようにします。



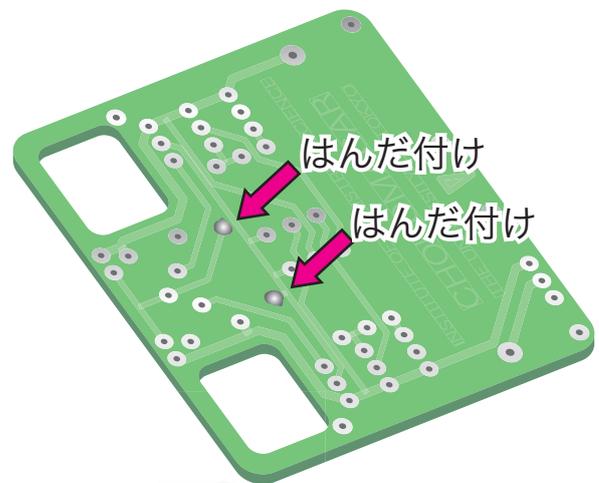
裏側でリード線を曲げる目的は部品がはずれないようにするためなので、電池ケースのように曲げるには太すぎたり硬すぎる線は曲げる必要はありません。曲げる向きもとくに決まりはありません。

次にリード線を切りますが、部品が外れない程度の長さ且つ隣の部品に接触しない程度の短さに残して切ります。リード線を切るときは、切り取る部分を指で押さえ、切れたリード線がどこかへ飛んでいかないようにしましょう。

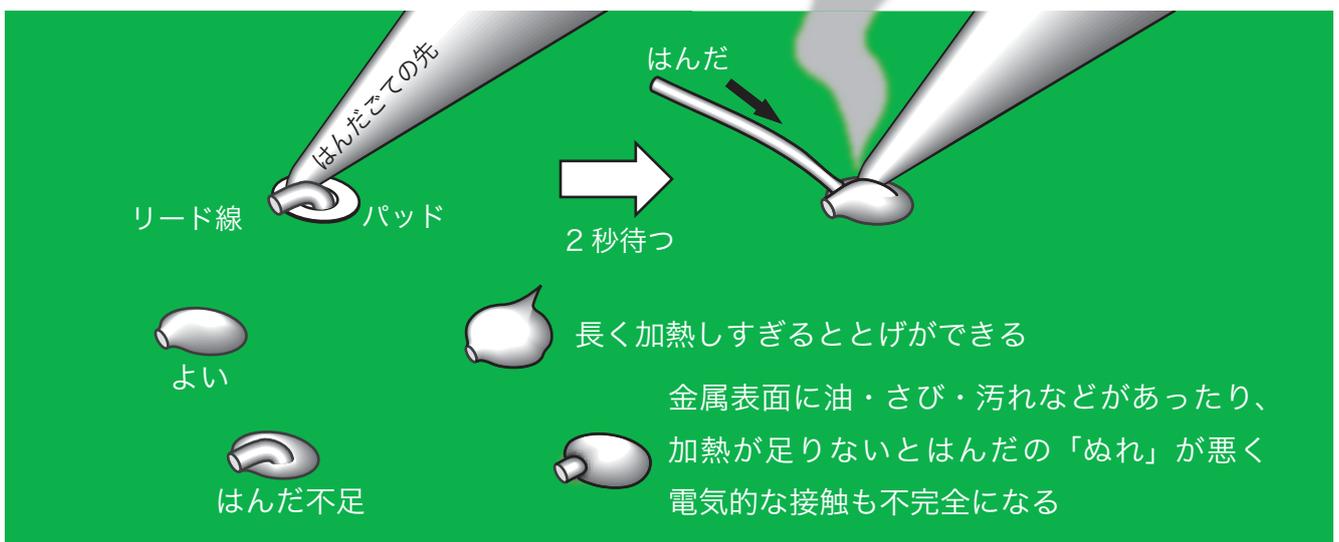




残ったリード線をそのまわりのパッドにはんだ付けします。はんだごてでリード線とパッドの両方を同時に加熱します。はんだごての先の位置と角度を調節してパッドとリード線の両方に接触するようにしましょう。約2秒間待てばじゅうぶん温度が上がり、はんだの線をリード線に当てると溶けるようになります。

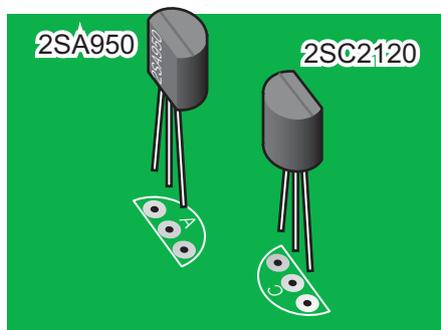
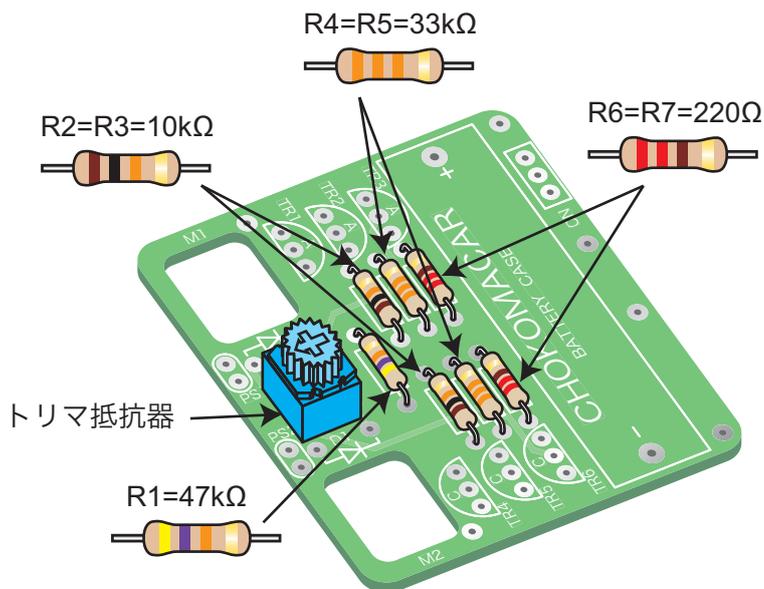


フラックスの煙



注意：こういう方法はだめです。はんだごての先ではんだだけを溶かし、はんだ付けしたい部分に持って行ってくっつけようとしてはいけません。そういう方法だと途中ではんだの表面が酸化してしまい、うまくくっつきません。先にリード線とパッドの温度を上げておき、はんだが溶けている時間は短くなるようにするのがコツです。

はんだ付けの練習がすんだので他の部品を基板に取り付けていきましょう。決まった順序はありませんが、抵抗器のような背の低い部品から取り付けるほうがやりやすいと思います。

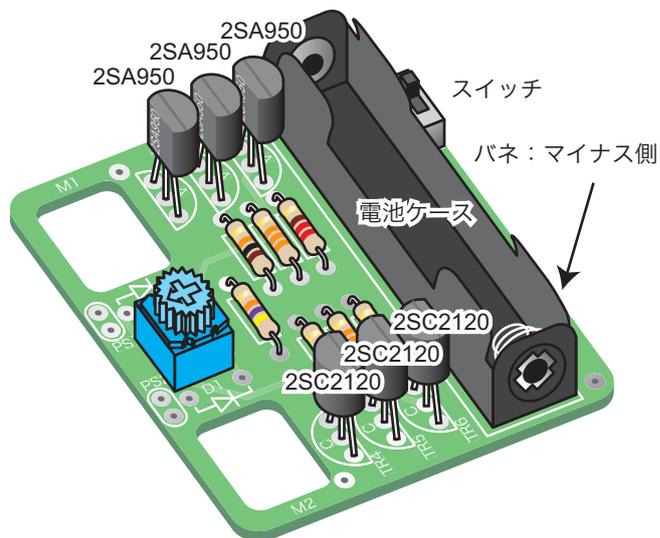


トランジスタについては2つの点に注意してください。まず、ちょこまカーには2種類のトランジスタ 2SA950 (TR1, TR2, TR3) と 2SC2120 (TR4, TR5, TR6) が使われています。それらをごちゃ混ぜにしないこと。

2番目に、トランジスタには方向があります。2SA950の平らな面は前側（モーター側）を向きます。いっぽう、2SC2120の平らな面は後ろ側（電池ケース側）を向きます。

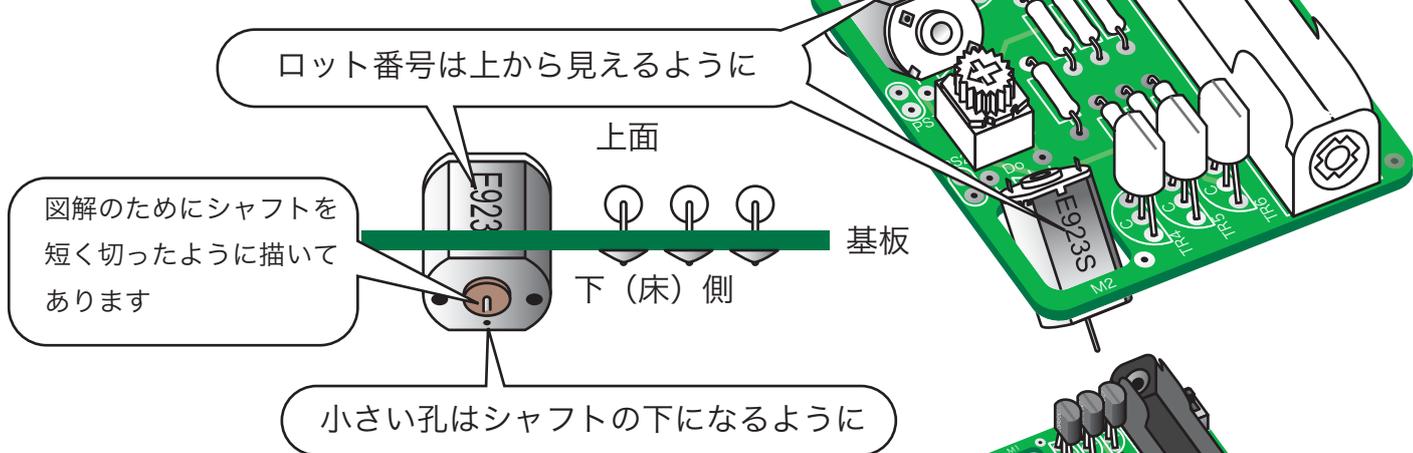
電池ケースにも向きがあります。バネが付いているのがマイナス側です。電池ケースのリード線は太いので曲げる必要はありません。

スイッチには方向はありません。

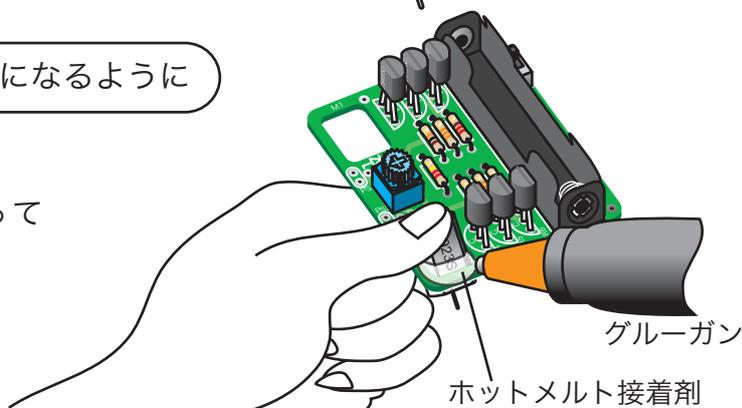


次にモーターを取り付けます。モーターの傾斜角度を定めるため、次のようにしてください。モーターのはんだ付け端子側を基板にあいている取付あなの内側・上面の角に当たるように、またシャフト側を外側・下面の角に当たるように位置を調節します。

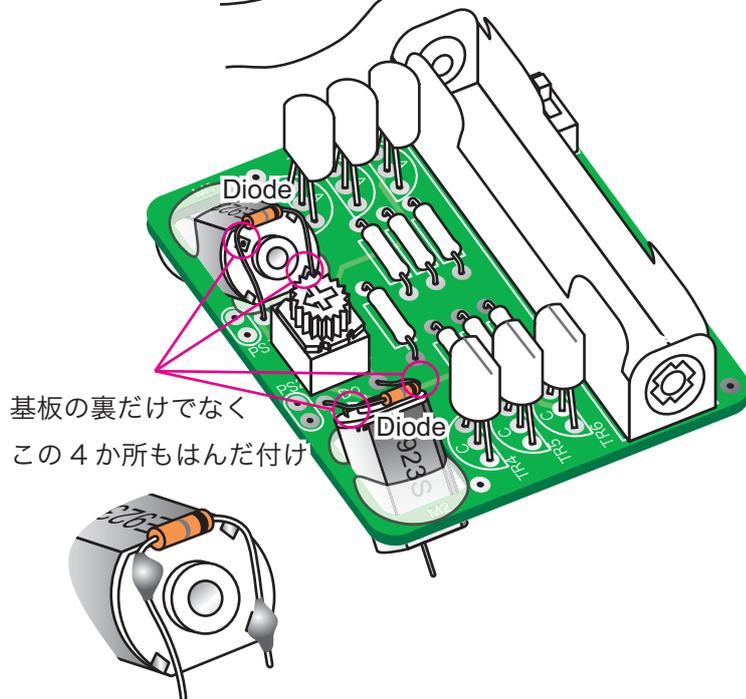
モーターにも方向があります。ロット番号が印刷されている平らな面が上面から見えるように、言い換えると小さい孔がシャフトより下に来るように取り付けます。そうしないとちょこまカーは後ろ向きに走ります。



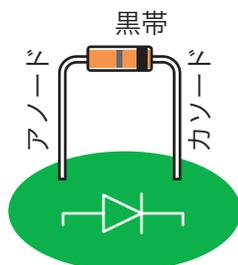
ホットメルト接着剤（ホットボンド）を使ってモーターを基板に固定します。



ちょこまカーに使われているダイオードはトランジスタを保護するのが第一の目的ですが、モーターへの配線の役目も果たしています。右図に示すように、ダイオードは抵抗器などと違い、基板の表側にぴったりくっつけるのではなく、リード線をモーターの電極に沿わせるようにします。そのうえでリード線と基板だけでなくリード線とモーターの電極もはんだ付けします。

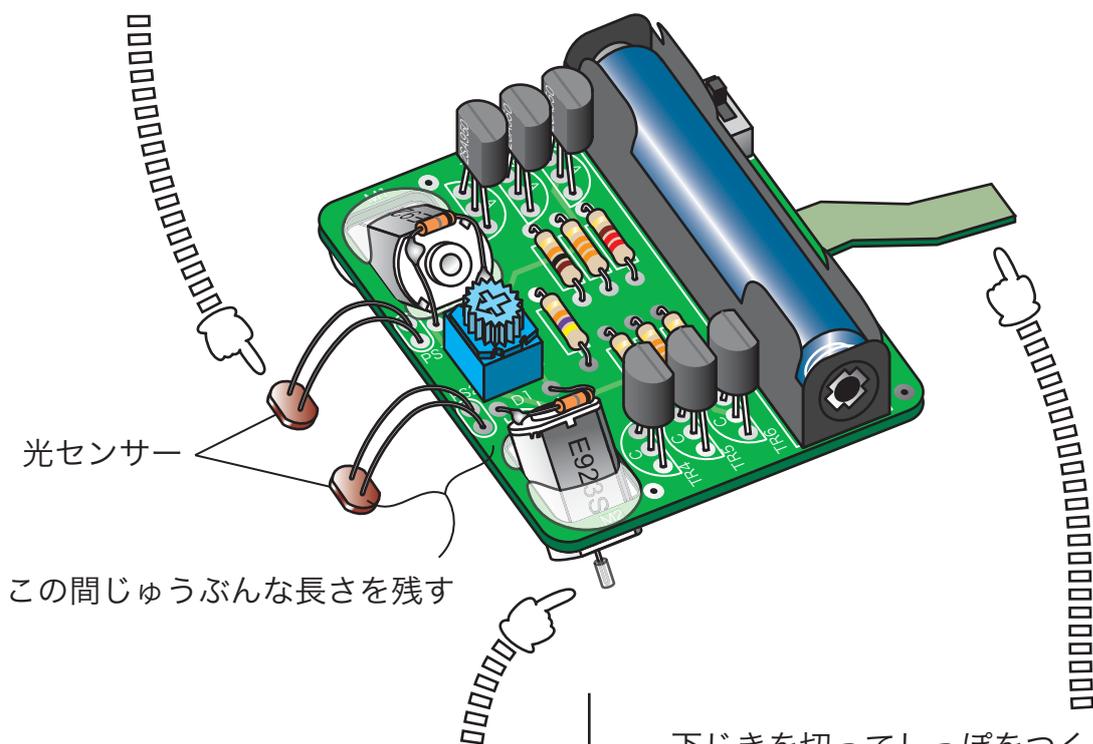


ダイオードの向きにも注意しましょう。回路記号の三角と線はそれぞれアノードとカソードと言います。部品のカソードは色のついた帯で表示されています。

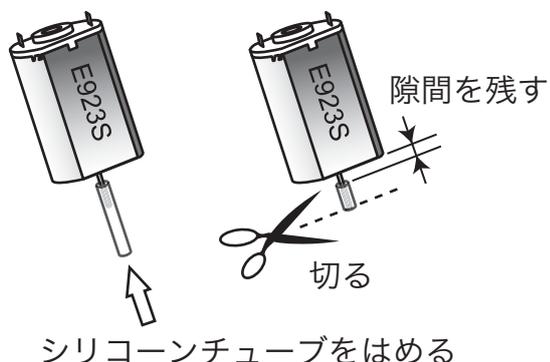


使用しているダイオードは1N4148。カソードの方向が、回路記号では線で、部品自体には黒色の帯で表示されている。カソードが電池側を向くように取り付ける。

光センサーを取り付けます。光センサーのリード線は、センサーが床の付近に向けられるように十分な長さを残してはんだ付けします。



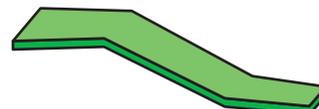
シリコンチューブをモーターのシャフトにはめてください。このチューブは非常に小さいタイヤの役目を果たします。チューブとモーターのケースの間は少し隙間を残します。そうしないとチューブとケースの間の摩擦（まさつ）でモーターが回りません。



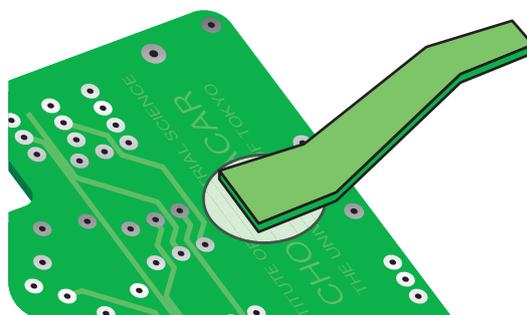
下じきを切ってしっぽをつくります。



先端だけが床に触れるような形に曲げます。



これをプリント基板下側の後端にホットメルト接着剤で取り付けます。



しっぽがなぜ必要かという、ちょこまカーの基板の下面にはリード線がちくちく出張っているためしっぽがないと床に引っかかって走りにくいのと、プリント基板がだいたい水平になるほうが見た目が良いからです。

## 調節の方法とヒント

### ①左右どちらかに曲がるくせがあるときは

- ・左右の光センサーを同じ明るさの所に向けたときに両方のモーターが回るようにトリマ抵抗を調節してください。右に曲がるくせがあるときはトリマ抵抗を左に、左に曲がるくせがあるときはトリマ抵抗を右に回してみてください。
- ・左右の光センサーの高さが違いますか？

### ②カーブで曲がらずに突進する、またはちょこちょこ左右にゆれるとき

- ・2個の光センサーの幅を変えたらどうでしょう？
- ・光センサーを前方にのばすか本体のすぐ前までちぢめるかで変化しませんか？

※下の2つは電子回路がわかるひと向けです。

- ・R1 を大きくすると電圧アンプの増幅率が上がり位置ずれに対する感度が上がります。
- ・R4 と R5 を小さくすると電流アンプのバイアス電流が増え両方のモーターが同時に回る範囲が広がります。

### ③速度について

- ・シリコンチューブの太さを変えてみましょう。
- ・走らせているうちにシリコンチューブがすりへって直径が小さくなり遅くなってきます。

## 注意事項

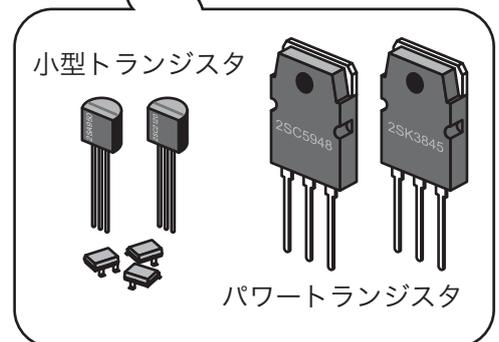
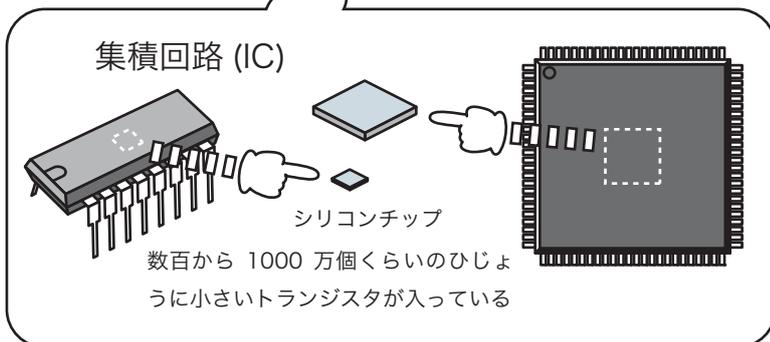
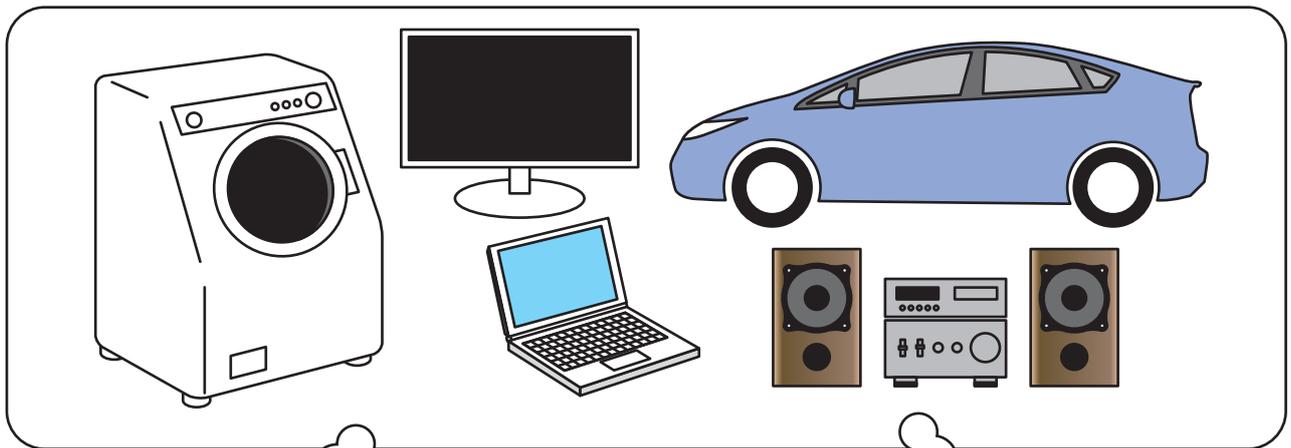
- ・ **はんだには鉛が含まれています。遊んだ後は手を洗いましょう。**
- ・ ちょこまカーはコースをはずれると暗い方に走っていく性質があります。ソファやベッドの下に入ってしまうないように気をつけましょう。
- ・ ちょこまカーをテーブルなどから落とすとモーターの軸が曲がったりするので気をつけましょう。

## コースの描き方

- ・ 線を描く色は黒かできるだけ黒に近い色を使います。線幅は 10 mm から 15 mm 程度が良いでしょう。
- ・ ふつう直角や小さい半径のカーブは曲がりきれませんが、直角でも線を太くしたりセンサーの位置や速度を調節すると曲がれる場合もあります。

# トランジスタとはなんだろう

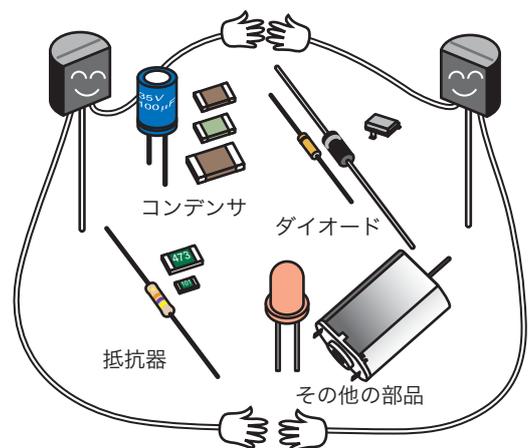
トランジスタはほとんどの電気製品、携帯電話、自動車、電車などに使われています。オーディオアンプや電気製品の電源回路と呼ばれる部分には3本脚のパワートランジスタ（大型のトランジスタ）が使われていることがよくありますが、パソコンやテレビの中では集積回路（IC）のほうが目立ちます。しかし、集積回路のシリコンチップの中には数百から 1000 万個くらいのトランジスタが「集積されて」います。



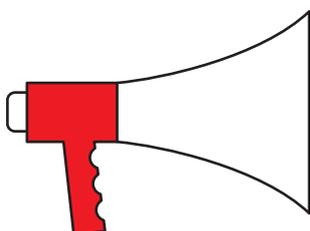
トランジスタや集積回路は抵抗器、コンデンサ、ダイオードなどの部品と組み合わせて電子回路を構成することで、その能力を発揮します。

## トランジスタの役割

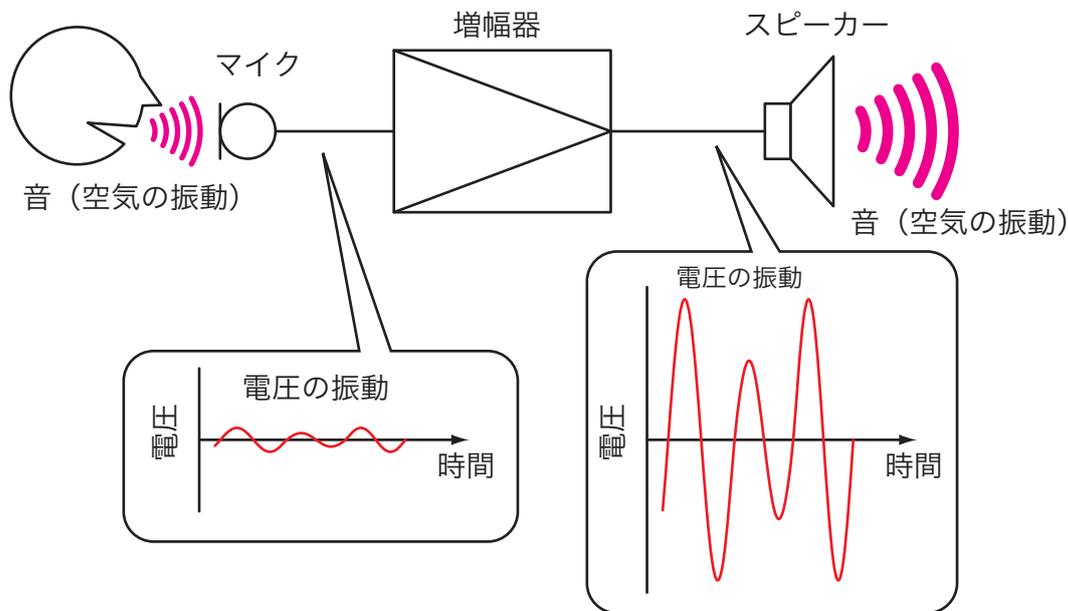
トランジスタには「増幅（ぞうふく）」という役割と「スイッチ」としての役割があります。まず増幅作用について学びましょう。



## 増幅作用



増幅作用を利用する例として、拡声器（電気メガホン）を考えます。拡声器を構成するのは大きく分けてマイクロホン、増幅器、スピーカ-の3つです。

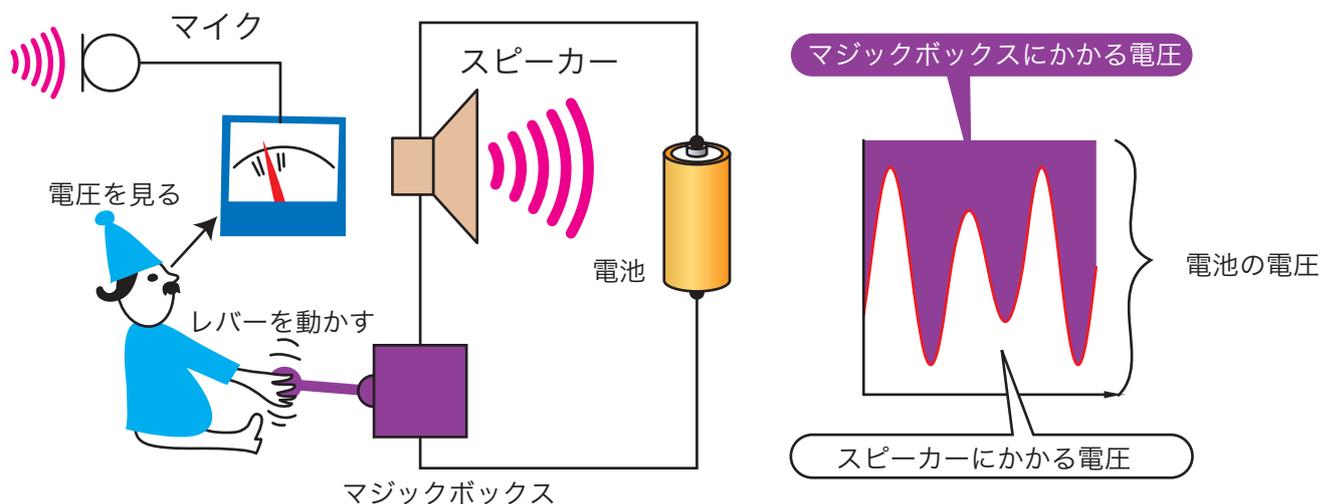


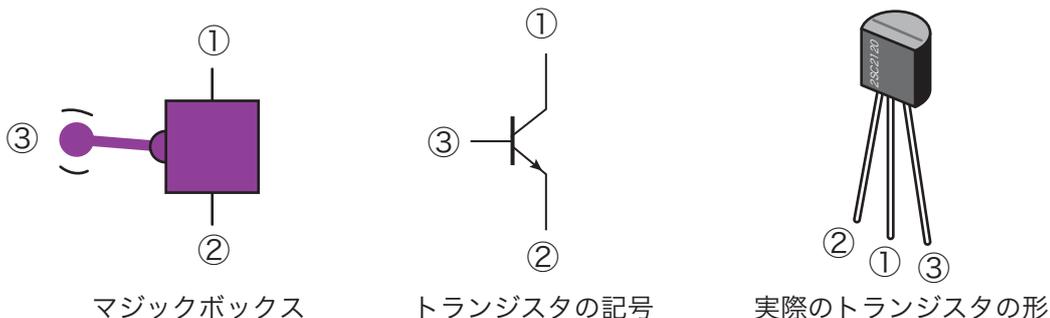
音は空気の振動です。マイクロホンは空気の振動を電気（電圧）の振動に変えます。マイクロホンから出てくる電圧の振動（音声信号と呼びます）の振幅（読んで字のとおり振動の幅）が小さいので、増幅器で振幅を大きくしてからスピーカーにその電圧をかけます。スピーカーからは大きい音（振幅が大きい空気の振動）が発生します。

この増幅器の「増幅」という作用を行っているのがトランジスタです。

最初は簡単なたとえ話で説明しましょう。下の図のようにこびとさんがマジックボックスという機械で増幅の仕事をしているとします。マジックボックスにかかる電圧はレバーの位置で変えられるようになっていています。電池の電圧からマジックボックスにかかる電圧を引いた残りがスピーカーにかかるのです。うまくレバーを動かすとスピーカーにかかる電圧がマイクの電圧と同じ形で振幅だけ大きくなるようにすることができますはずですね。結果的にマイクの出す電圧を増幅した電圧がスピーカーにかかります。このマジックボックスを使ってこびとさんがするのと同じような動作をしてくれるのがトランジスタです。

このときマジックボックス（またはトランジスタ）がスピーカーを動かすエネルギーを出しているわけではありません。電池が出しているのです。





マジックボックス

トランジスタの記号

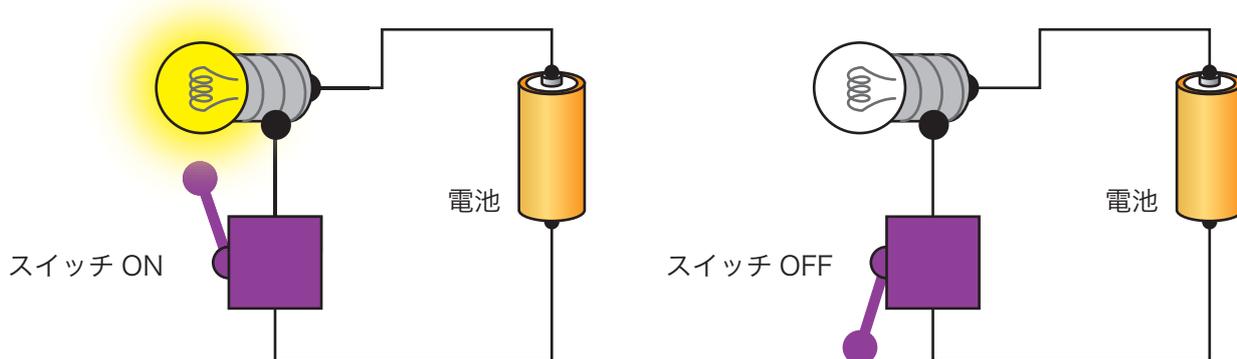
実際のトランジスタの形

マジックボックスには端子（たんし：電線をつなぐ場所）が2カ所とコントロールするためのレバーが1個付いています。トランジスタには足（端子）が3本ついていますが、それぞれマジックボックスの2個の端子とレバーに相当すると思ってください。もっとも、トランジスタはレバーに相当する足を動かしてコントロールするのではなく、その足にかける電圧でコントロールするのです。

さて、こびとさんとマジックボックスのたとえ話では不満なひとがおおいでしょう。たとえ話の精度を上げようと思います。そのためには、電流、電圧、電気抵抗、電気回路などの知識が必要になってきますから、後の方で解説します。すでに電気回路をある程度知っているひとは適当にとばして読んでください。逆に「電気回路」の話はむずかしそうだと思うひともなるべくイメージしやすいように、水を使った「水回路」のたとえ話をセットにして解説しますから、がんばって読んでほしいと思います。でもちょこまカーの制御回路を理解するにはだいぶたくさんの準備が必要になりますから、さいごまでついて行かれないひともいるでしょう。そこで、電流、電圧、電気抵抗などの話の前に、トランジスタのスイッチ作用についてもう少しだけ話しておきます。

## トランジスタのスイッチ作用

電球とマジックボックスを直列にして、マジックボックスのレバーを完全に上にたおすと、マジックボックスには電圧が全然かからなくなるとしましょう。そのとき電球には電池の電圧が全部かかります。つまりマジックボックスはスイッチが ON の状態です。逆にレバーを完全に下にたおすと、マジックボックスに全部電圧がかかり、電球にはかかりません。つまりスイッチ OFF の状態です。スイッチと違って ON と OFF の中間状態にもなることができるマジックボックス（トランジスタもそうです）をスイッチのように使うというだけです。



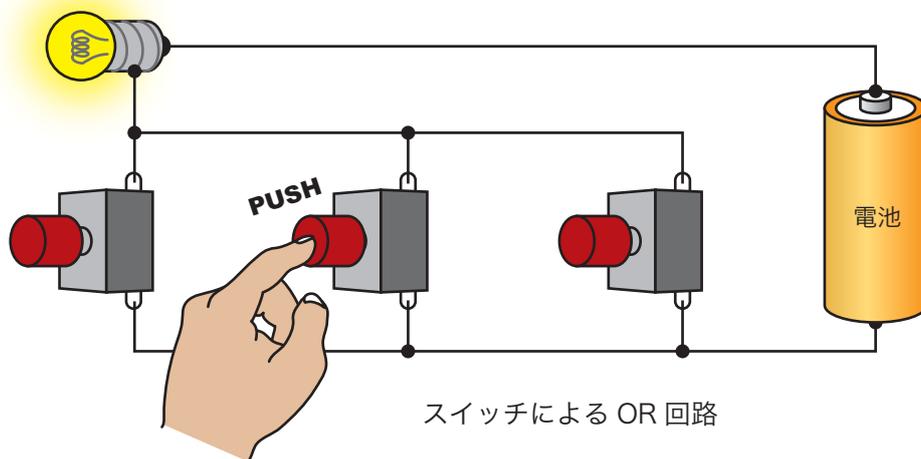
## スイッチは省エネだ

「なんだそれだけのことか」と思うでしょうが、トランジスタをスイッチとして使うことが省エネとデジタル社会に役だっているのです。

増幅作用をマジックボックスで説明した部分を思い出してください。スピーカーにかかっていない電圧はマジックボックスにかかっています。しかも電流が流れます。電圧がかかっていて電流が流れると電力が消費されます（電気回路の知識がない人にはごめんなさい）。その電力は電圧と電流の積です。ところが、完全に ON の場合は電圧がゼロです。逆に完全に OFF の場合は電流がゼロです。結局スイッチは電力を消費しません。

## アナログ、スイッチング、デジタル

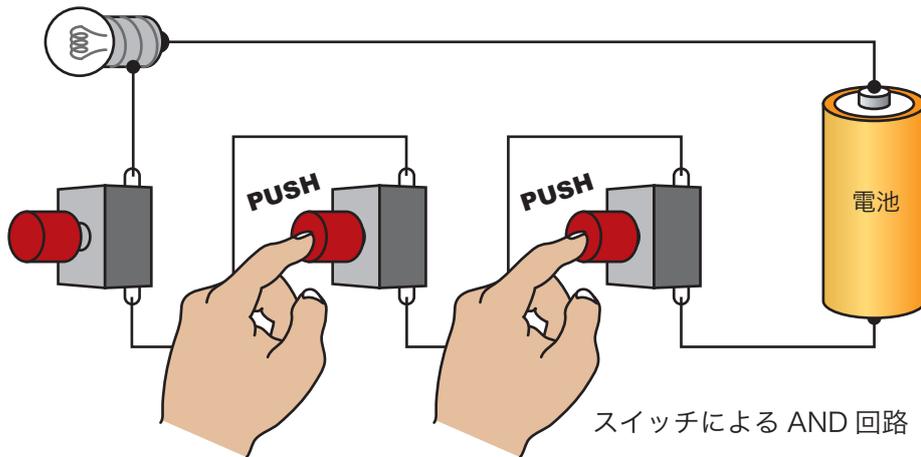
ON と OFF の中間状態も使う電子回路をアナログ回路とよびます。オーディオアンプや拡声器などに使われる増幅器は、ふつうアナログ回路です。ON と OFF だけ使う電子回路をスイッチング回路とよびます。電力消費がすくないため、最近の電気製品の電源回路（交流 100 V の電気を使いやすい直流 5 V などに変換する回路）はほとんどスイッチング回路です。まだ少数派ですがオーディオアンプさえもスイッチング回路で作られるようになってきました。スイッチング回路のなかでもとくにコンピュータなどの計算に使われる回路技術を論理回路とかデジタル回路と呼びます。スイッチング回路は電力をあまり消費しないで計算ができるので、すごい速さで発展しているのです。



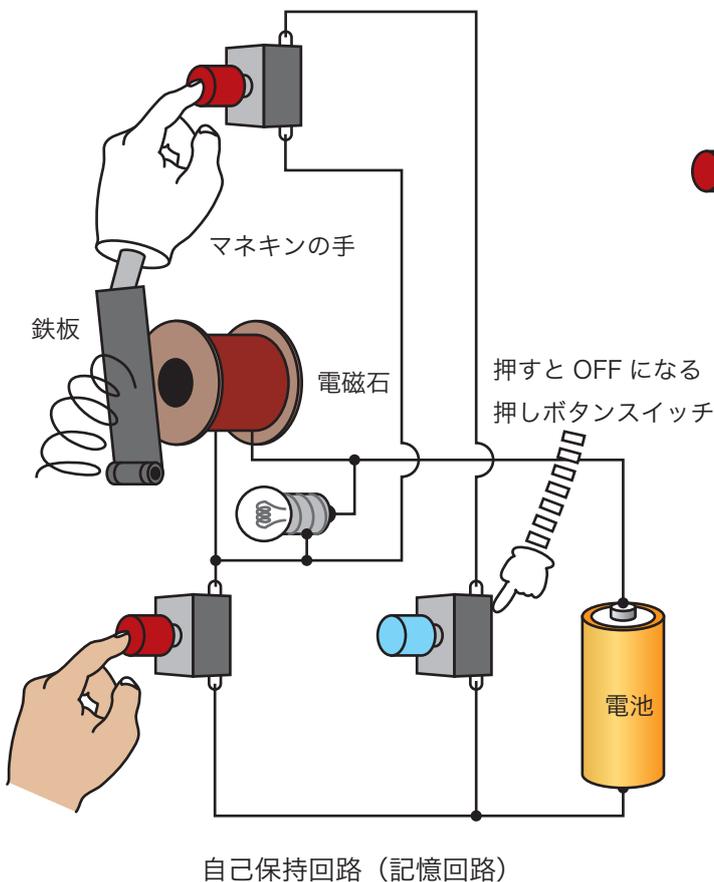
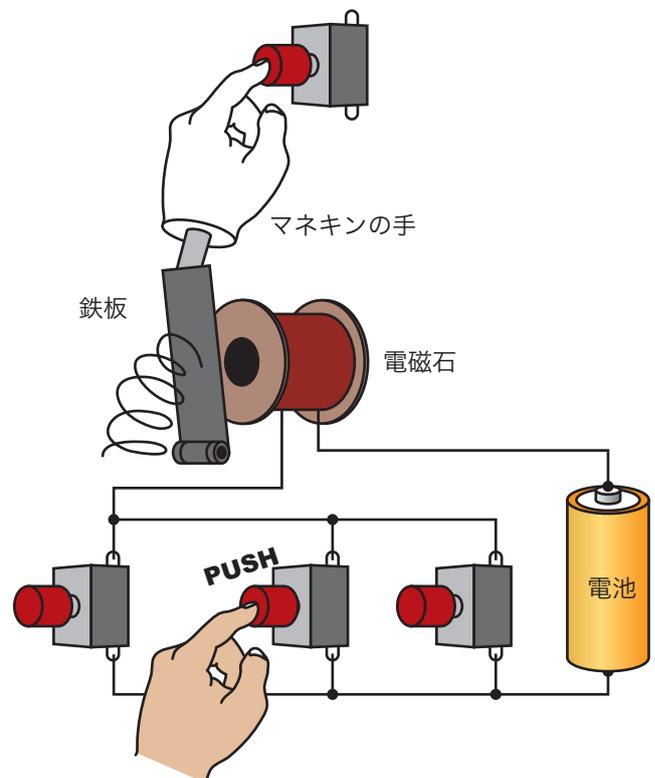
## デジタル回路入門

ここでトランジスタの話から少し脱線しますが、デジタル回路について少し学んでみましょう。上の図は、押したときだけ ON になるスイッチを 3 個並列に接続したものに電球と電池が直列に接続されています。左か真ん中か右か、どれか 1 個以上のスイッチを押せば電球が点きます。「左か真ん中か右」を英語で言うと” Left or middle or right” なので、こういう回路を OR（オア）回路と呼ぶことができます。

では下の回路ではどうでしょう。左と中央と右の全部のスイッチを押したときだけ電球が  
つきます。こういう回路は AND 回路と呼ぶことができますね。



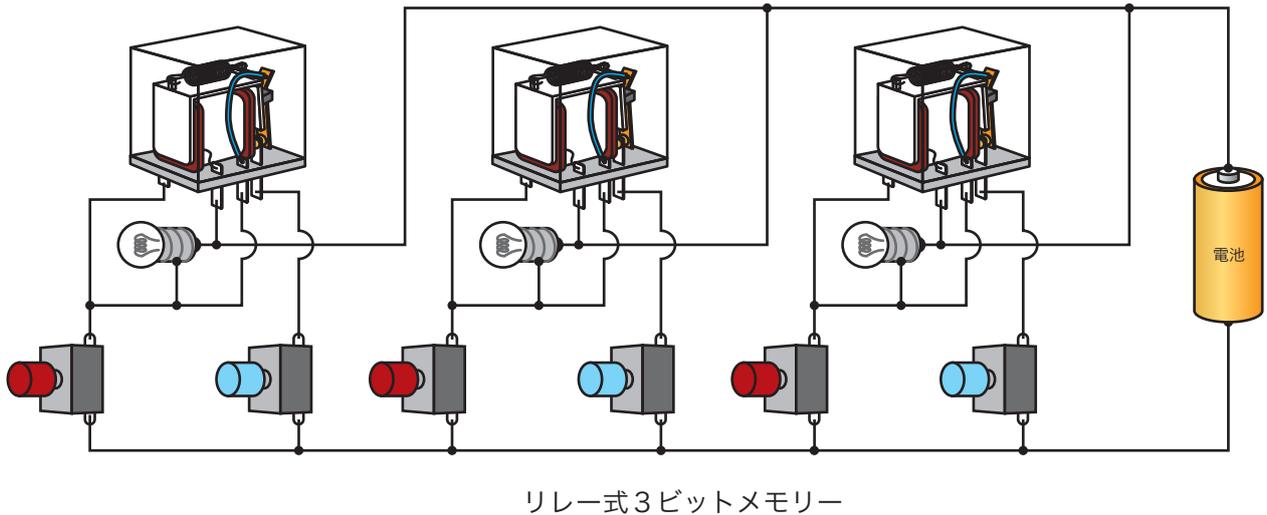
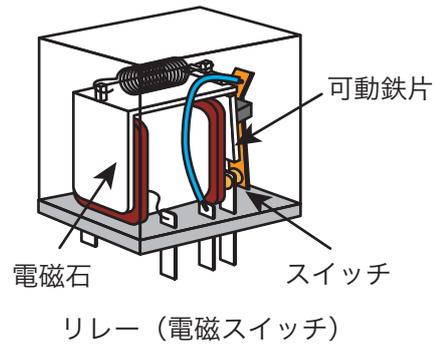
しかし、これだけではあまり複雑なことは  
できません。なぜ？ それは「入力」がスイッチ  
を押すことで、「出力」が電球が光ることだか  
らです。「出力」を次のスイッチを押すような  
構造に変更してみましょう。たとえば右図のよ  
うに。OR 回路や AND 回路を次々に組み合わ  
せて複雑なことができそうです。



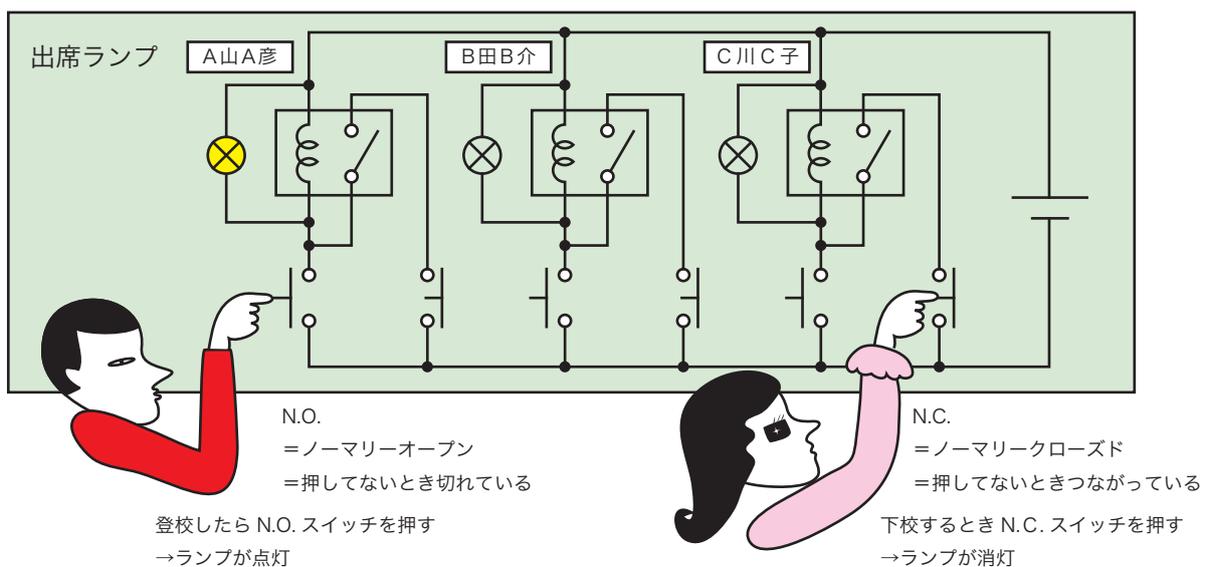
出力を電磁石とスイッチに変更した OR 回路

また左図のように接続すると「記憶  
回路」ができます。指で押す左下のス  
イッチとマネキンの手が押す上のス  
イッチは並列（スイッチによる OR 回  
路）になっているので、左下のスワ  
ッチを 1 回押せば、あとは手をはなして  
も電磁石と電球に電流が流れます。右  
のボタンを押すと電流が止まります。

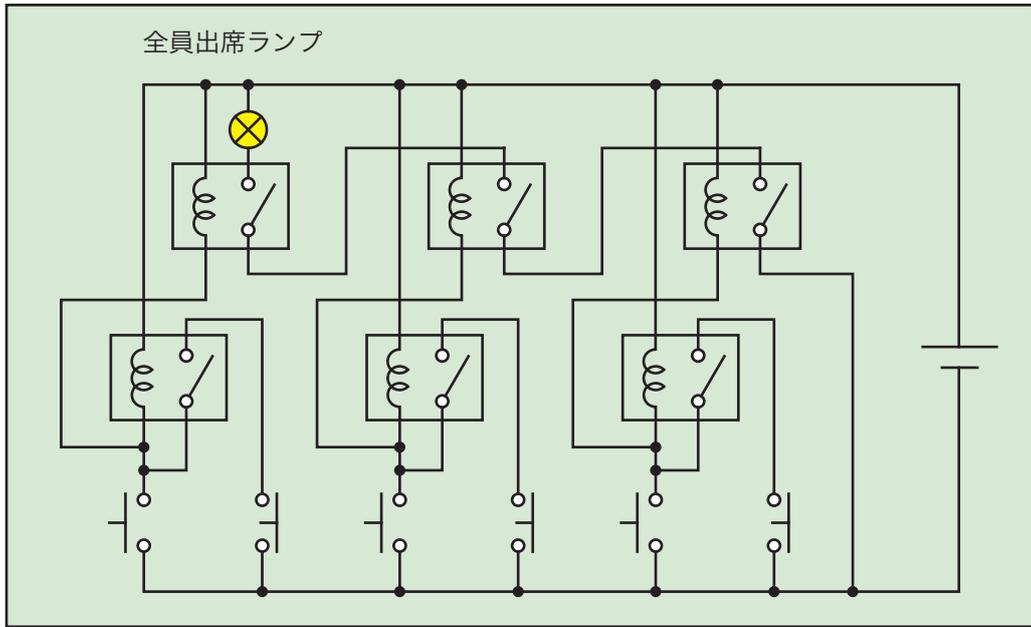
マネキンの手は説明としてはいいでしょうが、どう考えても無駄ですね。電磁石とスイッチを内蔵したリレーと呼ばれる部品が実際にあります。下の図はリレーを使った記憶回路を3個並べたものです。これはリレー式3ビットメモリーと呼んでもさしつかえありません。



リレーやスイッチなどを回路図にしてみると下図のようになります。たとえばこれを学校の教室に設置しておき、登校したら電球を点灯させ下校するときに消灯させることにすれば、だれが出席しているかわかりますね。



では、全員が出席しているかどうか自動的に調べてくれる回路は出来ないでしょうか。それは上のリレー式3ビットメモリーに、リレー式AND回路を組み合わせることで実現できます。



自動全員出席確認器

ところで、3 ビットメモリのそれぞれの記憶回路（ビットと呼ぶことがあります）に「A山A彦」「B田B介」「C川C子」というように別々の個人を割り当てて使うこともできますが、電球が点灯してる状態を“1”、消灯している状態を“0”という数字で表すことにすると、右の図に示すように3 ビットまとめて「3桁の2進数」が表現できます。3桁の2進数は全部で8種類の状態があり、10進数で表すと0から7を意味します。

メモリーがいくつもあったとしましょう。それぞれのメモリーの内容（たとえば001と110）を足したりかけたりする回路というものがあれば、ほら、コンピュータに近づいてきますね。

実際のコンピュータではもっと大きい数値が扱えるように8ビット（0～255）とか32ビット（0～4294967295）などの幅で記憶したり計算したりします。

それでは話をトランジスタに戻して、デジタル回路の話を終わりにしましょう。現在のデジタル回路はすべて集積回路でできていると言えます。リレーを使ったメモリーや簡単な計算回路は、実際に使われた時代もありました。しかしリレーは小型で速く動くものでも1秒に100回くらいしか動きません。あまり小さくもできません。それにかかなり電力をくいます。機械的に動く部分があるので、トランジスタより壊れやすいという欠点もあります。

			2進数	10進数
			000	0
			001	1
			010	2
			011	3
			100	4
			101	5
			110	6
			111	7

それにくらべて、トランジスタのスイッチ作用を利用すると、速度は速く（毎秒 10 億回くらい動作します）、電力消費は少なく、小型で（1 個の集積回路に 1000 万個くらいトランジスタを入れることができます）、壊れにくくなります。現在使われているデジタル集積回路は主に MOS（モス）トランジスタというものでできています。ちょこまかで使ったのはバイポーラトランジスタという種類で少し違いますが、20 年くらい昔にはバイポーラトランジスタのデジタル集積回路もよく使われていました。



3入力 AND の真理値表

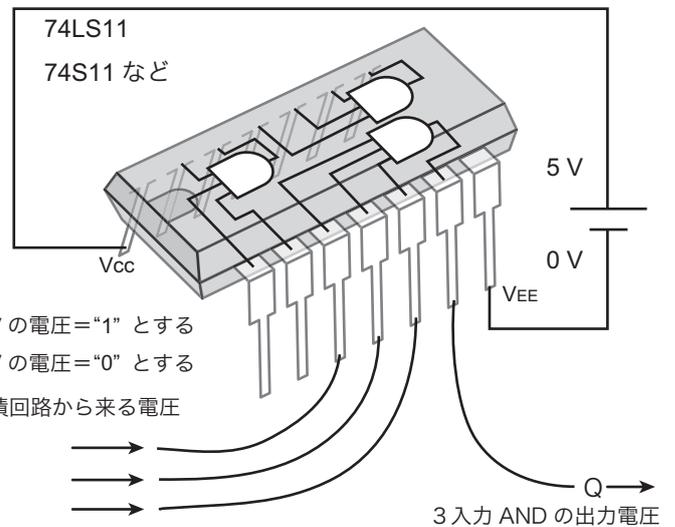
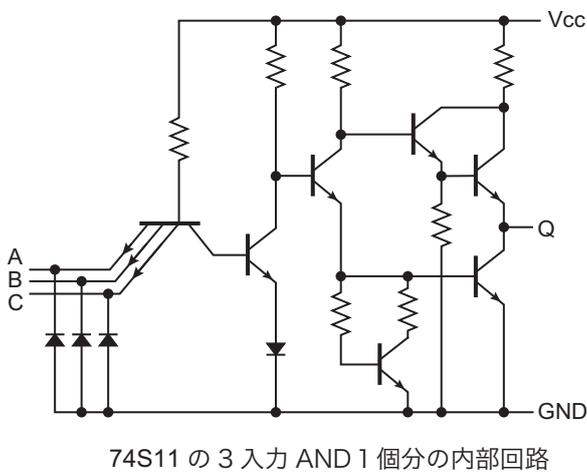
入力A	入力B	入力C	出力Q
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1



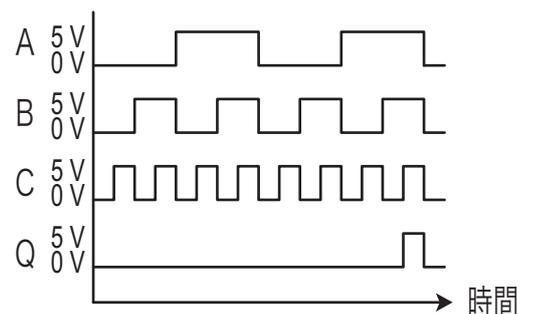
3入力 OR の真理値表

入力A	入力B	入力C	出力Q
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

左の図と表は入力が 3 個の AND と OR の記号と、それぞれの入力と出力の関係を表しています。このような表を「真理値表」と言います。一昔前によく使われていたバイポーラデジタル集積回路シリーズの 74S11 の場合、下図のように 3 入力 AND が 3 個入っていて、その他に電源をつなぐ  $V_{CC}$  と  $V_{EE}$  という端子があります。



それぞれの AND 回路は上の回路図のようにいくつかのトランジスタの組み合わせでできています。デジタル集積回路で "1" や "0" は電圧が高いか低いかで表します。この集積回路は 5 V の電源を接続する必要があり、"1" を表すのは 2 V から 5 V、"0" を表すのは 0 V から 0.8 V です。上の真理値表と同じことを入力 A, B, C と出力 Q の電圧波形で表すと右のようになります。



## 電気回路・電圧・電流・抵抗について

ここでしばらく電気回路について学びます。電気回路を理解するには電圧・電流・抵抗（電気抵抗）というものを知らなければなりません。このテキストでは「電気回路」といっしょに「水回路」というものを想像することで、イメージをつかみやすくしようと思います。

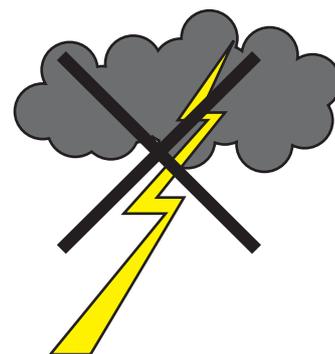
そもそも「回路」とは一周するともとの場所に戻る道のことで英語ではサーキットと言います。一周するともとの場所に戻る自動車レース場もサーキットと呼びますね。

### 電圧と水圧

電気回路での「電圧」は、水回路では「水圧」に対応します。電圧を発生させるものは電池だけではありません。発電機も電圧を発生させます。電圧を発生させるものをまとめて「電圧源」と言います。

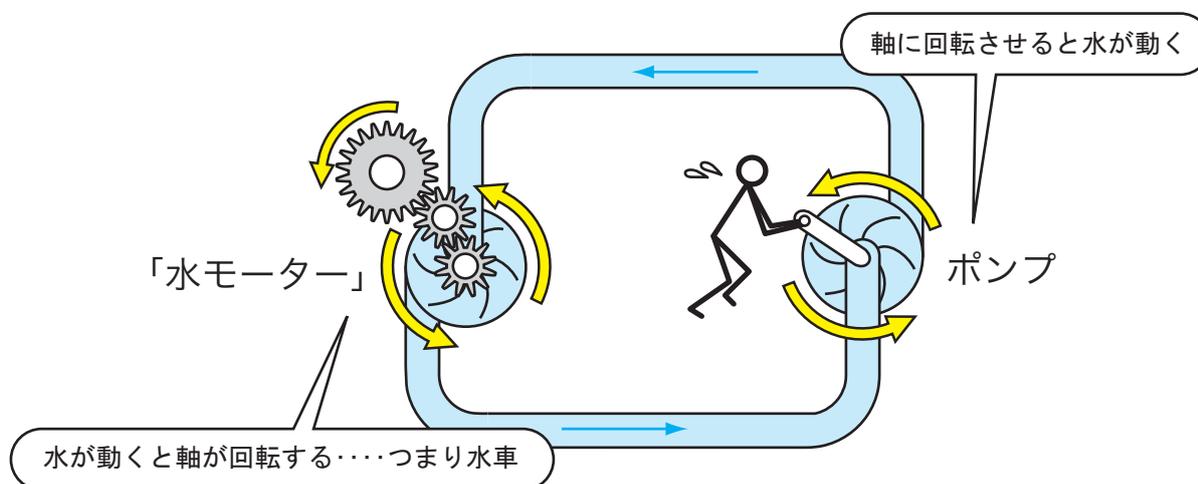
電圧源に対応する水圧源として何がいいでしょう。高いところにある水のタンクをイメージするかも知れませんが、じつはちょっと具合が悪いのです。なぜかという、水回路は一周するともとに戻らなければいけないのに、タンクの水は使い終わったらタンクに戻りません。つまり放水したらなくなる。電気に対応させると、放電したらなくなる。何かに似てますね。静電気や雷に似ているのです。

水回路の水圧源はポンプをイメージしましょう。ポンプから出て行った水が回路を一周すると戻って来て、またポンプで送り出されていくと考えてください。

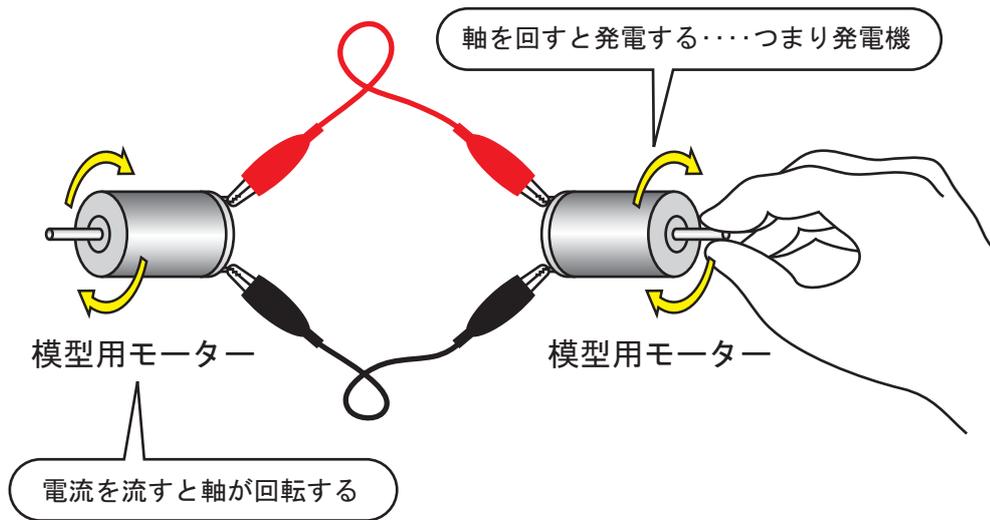


### ポンプと水車、発電機とモーター

水回路の水車は電気回路のモーターに対応します。ポンプは軸を回転させると水が動き、水車は水が動くとき軸が回転します。使い方は逆ですが構造はよく似ています。

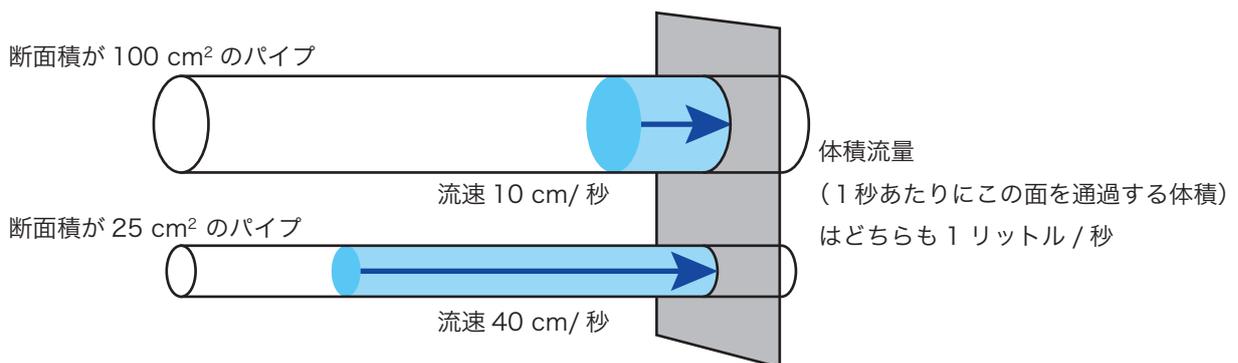


それと同じように、電気回路のモーターも発電機になります。



## 電流 - 流量

電気の「電流」は水の「流量」に対応します。流量は単位時間あたりに通過する水の量です。「単位時間あたり」というのは、「1秒あたり」とか「1分あたり」など、基準とする時間の単位です。たとえば1秒の間に10リットルの水が通過するならば流量は10 L / 秒 (10リットル毎秒) です。また1分の中に3 kgの水が通過するならば流量は3 kg / 分 (3キログラム毎分) です。正確に言えば前の例は体積流量、後の例は質量流量です。流量は流速 (流れの速さ) とは違います。流量が同じでも細いパイプでは流速が速くなり、太いパイプでは遅くなります。



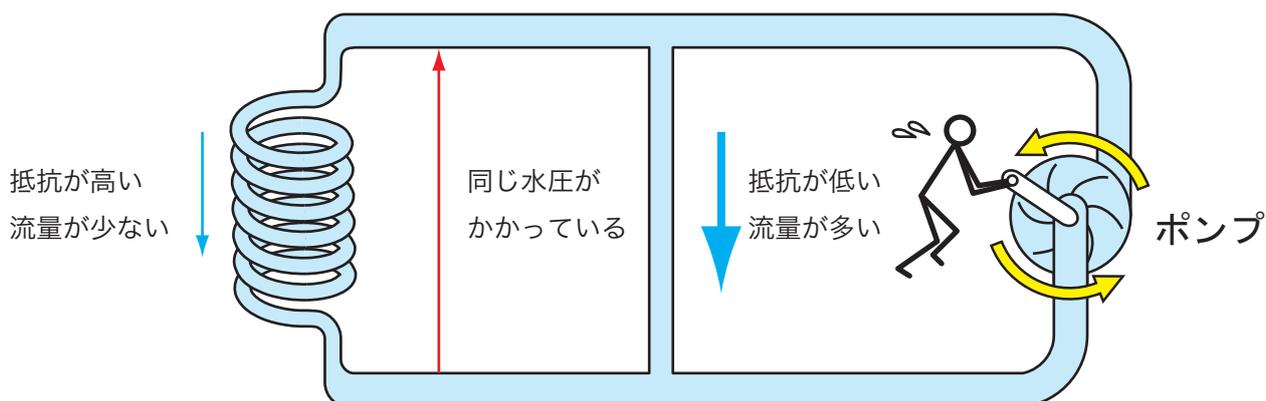
電流の場合も考え方は同じで、単位時間あたりに通過する電子の数という意味ですが、単位は「100個毎秒」のような単位ではなく、電子16021764600000000000個が1秒あたりに通過するとき1A (1アンペア) ということになっています。電車1台分のモーターには200 A くらいの電流が流れます。ちょこま車のモーターに流れる電流は25 mA から100 mA くらい、CdS セル (ちょこま車の光センサー) に流れる電流は0.1 mA から1 mA くらいです。光センサーで直接モーターを動かしたり止めたりすることはできないのがわかります。

## 電気抵抗と細長いホース

「電気抵抗」(電気の話をしていることがわかっているときは略して抵抗とも言います)は電気の流れにくさのことです。水回路での抵抗は、細長いホースやパイプをイメージすればいいでしょう。ホースが長いほど、また細いほど、抵抗が高くなります。電気抵抗でも同じです。細くて長い電線は抵抗が高いのです。

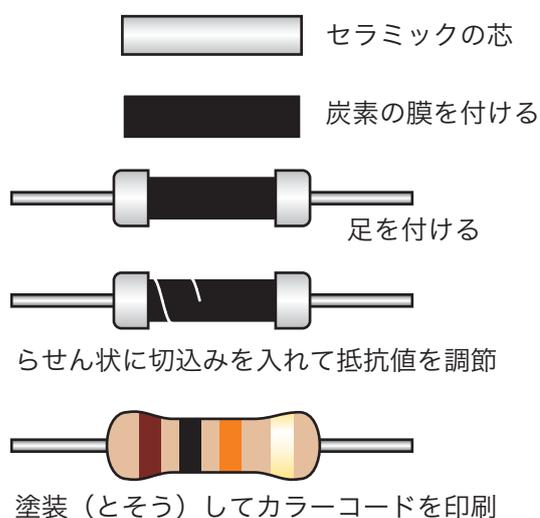
太いパイプでも中にスポンジを詰めたようなものはとても抵抗が高くなります。これはもともと抵抗が高い性質があるパイプと考えることができます。電気抵抗も材料によって違います。銅は電気抵抗が低い性質があるので電線に使われますが、鉄は銅の約 6 倍、ステンレスは銅の約 40 倍も抵抗が高い性質があるので、電線には使われません。

電気抵抗の単位は $\Omega$ (オーム)です。1 V の電圧がかかったときに 1 A の電流が流れる電気抵抗が  $1\Omega$  です。抵抗にかかる電圧と流れる電流は比例します。ですから  $1\Omega$  の抵抗に 10 V の電圧をかけると 10 A の電流が流れます。水の抵抗については、電気抵抗の単位オームのようによく使われる単位は、とくにありません。



## 抵抗器

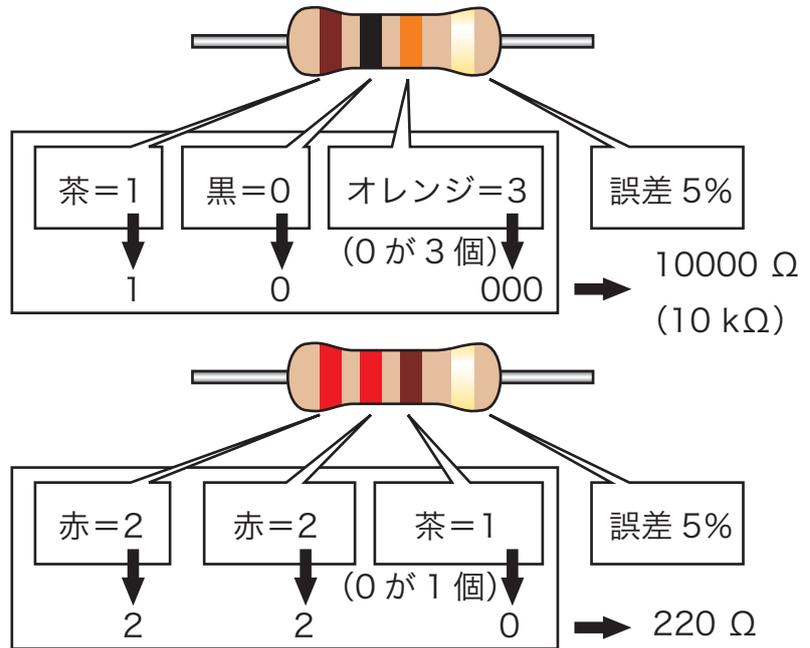
ちょこまカーに使った抵抗器は、炭素皮膜抵抗器とかカーボン抵抗器と呼ばれるものです。炭素は銅よりも抵抗が高い性質があります。セラミックの芯のまわりに炭素の膜(まく)が付いた構造になっています。炭素の膜の厚さや長さを  $10\text{ k}\Omega$  とか  $220\ \Omega$  などになるように調節してあります。



抵抗器の抵抗値（何オームか）は、抵抗器のまわりにぬってある色で見分けます。10種類の色が0から9の数字を表しています。これをカラーコードと言います。

色	数値
黒	0
茶	1
赤	2
オレンジ	3
黄	4
緑	5
青	6
むらさき	7
灰	8
白	9

カラーコード表



ちょこまカーの抵抗器には 4 本の色の帯が印刷されています。金色の帯は「この抵抗器は表示してある値に対して 5 パーセント以内の誤差があるかもしれません」という意味です。銀色なら 10 パーセントです。抵抗値の読み方は、金色を右側にして、左から 2 本はそのままカラーコードを数字になおします。その次の 1 本は 0 の数です。たとえば、ちょこまカーに使った 10 kΩ の抵抗器には茶・黒・オレンジ・金の帯が付いています。茶黒 = 10 にオレンジ = 3 個の 0 を付けて 10000 Ω、つまり 10 kΩ ということになります。

## オームの法則

抵抗にかかる電圧が 2 倍になれば流れる電流も 2 倍になります。電圧を変えないで抵抗を 2 倍にすれば流れる電流は 2 分の 1 になります。この関係をオームの法則といい、抵抗を  $R$  [Ω]、電圧を  $E$  [V]、電流を  $I$  [A] とすると次の式が成り立ちます。

$$E = IR \qquad I = \frac{E}{R} \qquad R = \frac{E}{I}$$

$IR$  というのは、かけ算の記号が書いてありませんが、 $I$  と  $R$  をかけるということです。

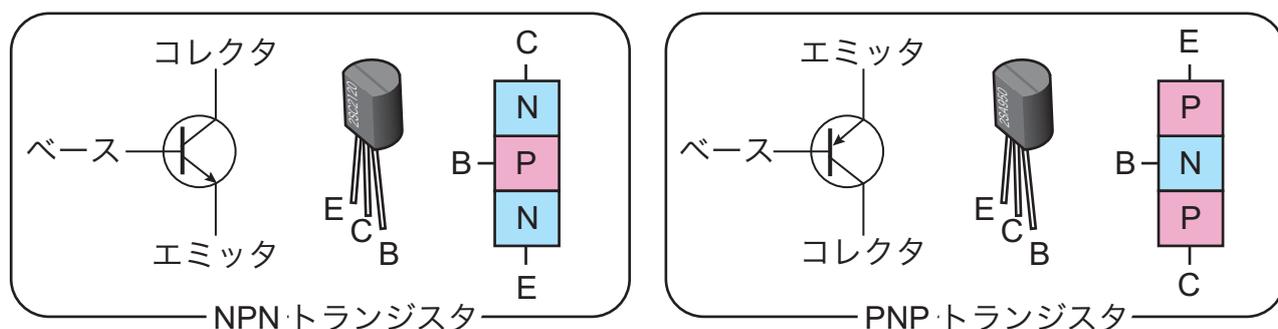
何を求めるかによって式を選びます。たとえば 10 kΩ (=10000 Ω) の抵抗に 1.5 V の電圧をかけたときに流れる電流  $I$  を求めるには  $I =$  で始まる真ん中の式を使います。1.5 を 10000 で割って約 0.00015 A 流れることがわかります。0.00015 A という数字は小さすぎて使いにくいので 0.15 mA とか 150 μA (マイクロアンペア) と表します。

## もう少しくわしいトランジスタの話

ここでまたトランジスタの話をしたいと思います。

実際のトランジスタは半導体でできています。半導体というのは導体（金属など電流がよく流れる物質）と絶縁体（プラスチックのように電流が流れない物質）の中間くらいの性質の物質のことで、代表的なものがシリコンです。シリコンは砂の主成分なので資源はいくらでもあるし安い材料です。それが現在の社会の発展にとっても役立っています。

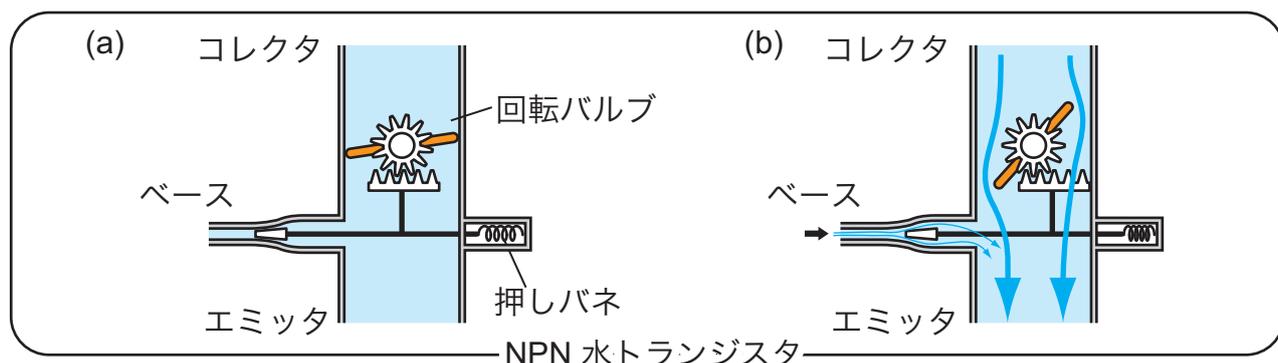
半導体に少し不純物を入れると n 型と p 型という違う性質にすることができます。n 型と p 型の違いは、電流を運ぶのが電子か、それとも電子の抜け殻（ホールと呼びます）かという違いです。トランジスタ（正しく言うとちょこまかーに使っているのはバイポーラトランジスタです）は npn または pnp の順にこれらをつなげて作ります。2SC2120 は NPN トランジスタ、2SA950 は PNP トランジスタです。トランジスタの 3 つの端子にはエミッタ、ベース、コレクタという名前が付いています。



## 水トランジスタ

このテキストでは実際のトランジスタの内部でどんな現象が起きているかを説明する余裕はありません。ここでも水回路でイメージをつかみましょう。「水トランジスタ」というものをこのテキストのために発明しました（実際に作ったわけではありません）。

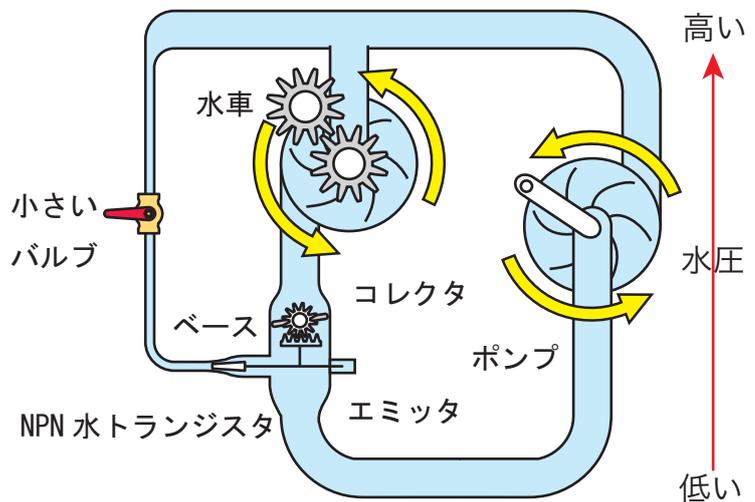
下の図が NPN 型の水トランジスタです。コレクタとエミッタの間に回転式のバルブが入っています。ふだんはバネが歯車とかみ合っている「たいらな歯車」(ラックと呼びます)を押しているのです、バルブは閉まっています。



ベースにはゴム栓が内側からバネの力で押しつけられています。ベースに外側からかかる水圧がバネの力を超えると、ゴム栓が開いてベースに水が流れ込み、それとともにラックが右に動くので、回転バルブが開いてコレクタからエミッタに水が流れます。このとき、ベースに流れる流量よりコレクタからエミッタに流れる流量の方が 100 倍以上大きいと考えてください。

右の図は NPN 水トランジスタで水車の回転速度をコントロールする水回路です。

水トランジスタのコレクタの方が水圧が高くなるように配管してあります。ベースの配管には小さいバルブを付けてあり、このバルブが閉まっていると水トランジスタの回転バルブも閉まっているのでエミッタからコレクタへ水は流れません。

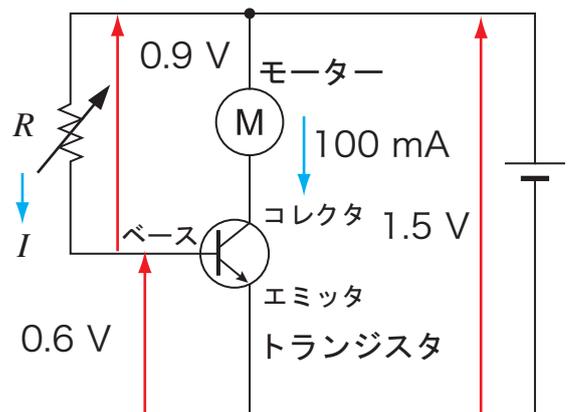


ベース配管の小さいバルブを開くとベースに水が流れ込み、回転バルブが開いてコレクタからエミッタへ水が流れ、水車が回転します。ベース配管のバルブを完全に開いたり閉じたりすれば、水車は全力で回転したり止まったりします。これがトランジスタのスイッチ作用に相当します。ベース配管のバルブの開き具合で水車の回転速度を調節することもできます。これは小さいベースの流量で 100 倍以上大きい水車の流量をコントロールしていることとなります。つまり増幅作用です。

前に拡声器の例を使って増幅の話をしました。あのときは電圧の振幅が増幅されました。上の例では流量（ということは電気なら電流）が増幅されています。トランジスタが増幅するのは電圧なのか電流なのかという疑問が出てくるかもしれません。電圧に着目するか電流に着目するかによってどちらとも言える場合もありますし、電圧を増幅したいときと電流を増幅したいときではトランジスタの使い方を変えることもあります。

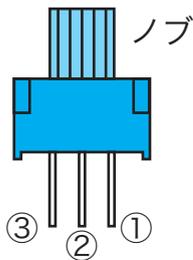
## 本物のトランジスタの回路

右の図は上の水回路に相当する本物の NPN トランジスタの回路です。ベース配線に入っている  $R$  は矢印が付いていますが、これは可変抵抗器です。ちょこまかのトリマ抵抗も可変抵抗器の一種です。

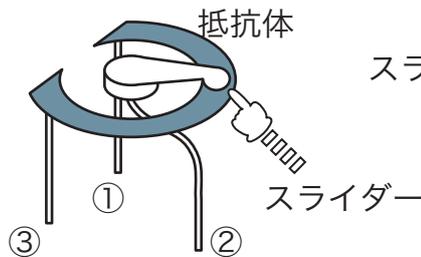


可変抵抗器の内部には抵抗体とスライダーが入っています。スライダーはノブ(つまみ)で回すことができ、スライダーの位置によって端子間の抵抗値が変わります。ちょこまカーに使った 50 kΩ のトリマ抵抗器の場合、下図の端子①と③の間に 50 kΩ の抵抗体が入っていて、ノブを回すことで①と②または③と②の間の抵抗値が変わります。(d) のような記号は①と②または③と②の間だけ利用する場合の記号です。

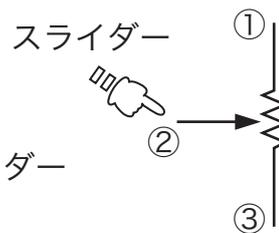
(a) トリマ抵抗器外観



(b) 内部構造



(c) 記号 1



(d) 記号 2



## オームの法則を使ってみる

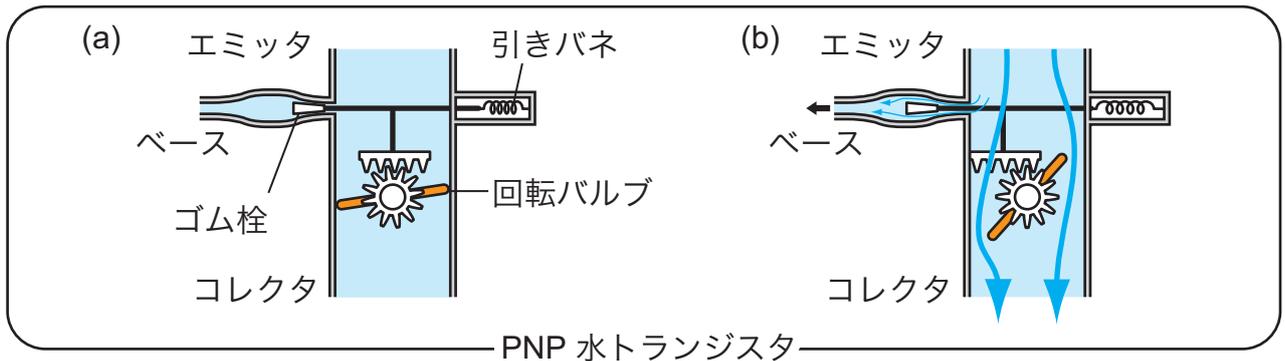
前の回路図で電源電圧は 1.5 V でした。いま回路図のいちばん下を電圧の基準 0 V としましょう。ベースの電圧が 0.6 V になっていますね。水トランジスタを思い出してください。ゴム栓を開けるのに必要な圧力がありました。本物のトランジスタでもベース電流が流れるようになるにはある程度の電圧が必要です。この電圧をスレッシュホールド電圧と言います。半導体の種類によって違いますが、シリコンでは約 0.6 V なのです。

モーターに 100 mA の電流を流したい場合、可変抵抗  $R$  は何Ω にすればいいか計算してみましょう。トランジスタの電流増幅率（ベース電流に対するコレクタ電流の倍率）を 100 倍だとすれば、ベースには 1 mA の電流を流せばいいことがわかります。抵抗  $R$  にかかる電圧は、電源電圧 1.5 V からベース - エミッタ間の 0.6 V を引いた 0.9 V です。可変抵抗  $R$  の値はオームの法則を利用して、つぎのように計算できます。

$$R = \frac{E}{I} = \frac{0.9}{0.001} = 900 [\Omega]$$

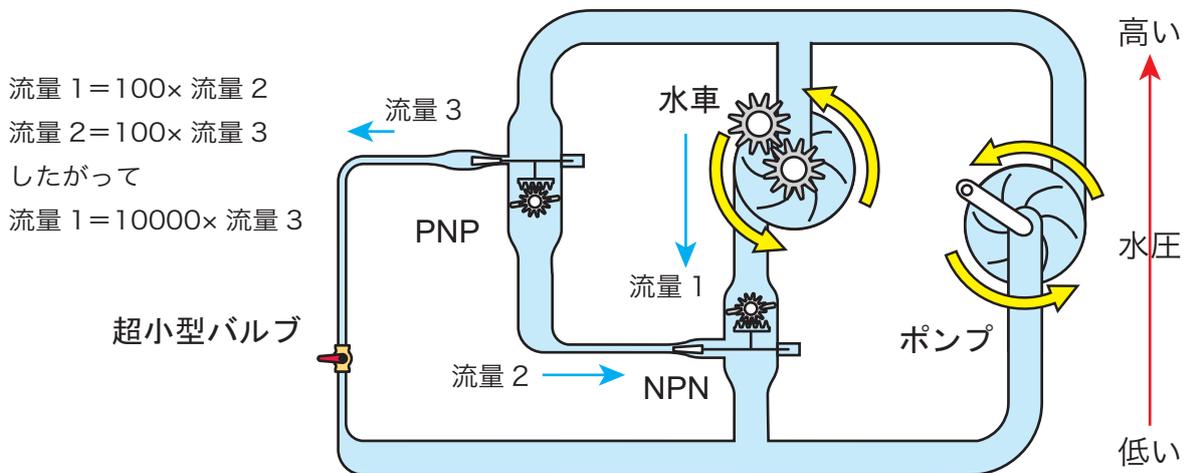
## NPN 型と PNP 型は水圧・電圧の方向が逆

次の図は PNP 型水トランジスタです。NPN 型とは違い、ベースの水圧がエミッタより低くなったときに回転バルブが開きます。圧力が逆になっている以外は同じです。

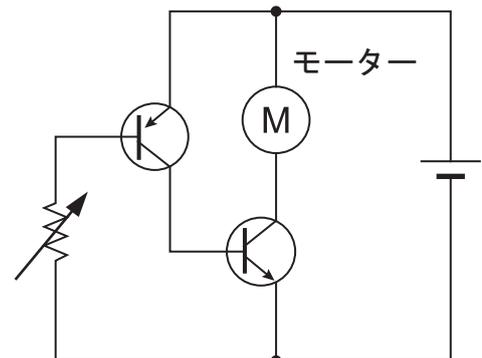


さっきの NPN 型水トランジスタで水車をコントロールする水回路に、こんどは PNP 型水トランジスタを追加し 2 段階で増幅すれば、さらに 100 分の 1 の水量でモーターがコントロールできるようになります。下図を見て下さい。PNP 型水トランジスタのベース配管は超小型バルブを通して水圧の低い側に接続されています。超小型バルブを開くと PNP 型水トランジスタのベースに水が流れ回転バルブが開きます。そこを通った水が NPN 型水トランジスタのベースに流れ回転バルブが開き、水車が回ります。

超小型バルブに流す必要がある流量は水車の流量の 100 分の 1 の 100 分の 1、つまり 1 万分の 1 になります。

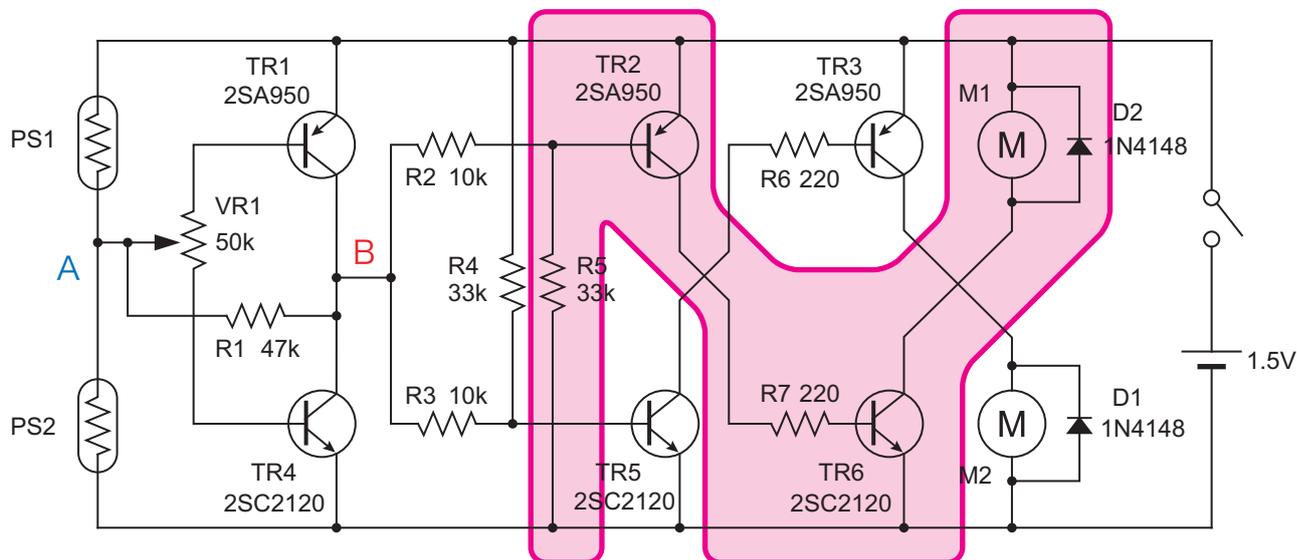


右の図は上の水回路に相当する電気回路です。このように、トランジスタを 2 段にして電流増幅率を大きくする接続方法をダーリントン接続といいます。NPN 型と PNP 型を組み合わせるのがインバーテッドダーリントン接続、NPN 型どうしまたは PNP 型どうしを使う場合をノン・インバーテッドダーリントン接続といいます。



## ちょこまカーの制御回路の解説

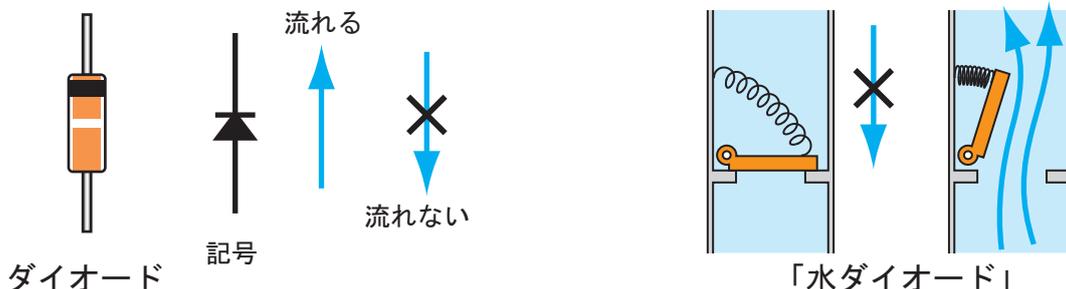
ここからちょこまカーの制御回路の説明に入ります。下の図はちょこまカーの制御回路です。ピンクで囲んだ部分はモーターM1のための電流増幅回路です。前ページのインバーテッドダーリントン接続の回路図とよく似ていますが、いくつか違いもあります。



R7 (220Ω) が NPN トランジスタ TR6 のベースに入っているのはベースに電流が流れすぎて壊れるのを防ぐためです。モーターと並列にダイオード D2 が接続されています。

## ダイオード

ダイオードは p 型と n 型の半導体を使って作られる部品で、ある方向には電流が流れますが、反対方向には流れないという性質があります。水回路では片側には開くけれど反対側には開かない弁に相当します。



モーターに並列にダイオードが接続されている理由はトランジスタを保護するためです。モーターには電磁石が使われています。電磁石のように電線を鉄心に巻いたものをコイルといいます。コイルに流れている電流は急に変化できない性質があります。トランジスタが急に OFF になると、コイルは高い電圧を発生してでも電流を流し続けようとする作用があります。その電圧でトランジスタが壊れることがあります。トランジスタが OFF のときにコイルに流れる電流のバイパス通路としてダイオードを使っています。

## 電流増幅回路の特性

ここでは電流増幅回路の特性を計算してみますが、むずかしいと感じる人は結果のグラフだけ見てください。

抵抗 R2 を通して B 点の電圧が PNP トランジスタのベースに入力されています。まず仮に R2 が無い場合を考えます。PNP トランジスタ TR2 のベースには抵抗 R5 を通して電流が流れます。TR2 のスレッシュホールド電圧も 0.6 V とすると、R5 には 0.9 V の電圧がかかります。R5 に流れる電流 (TR2 のベース電流) はオームの法則によって、 $I = E/R = 0.9/33000 = 0.000027[A] = 27[\mu A]$  です。トランジスタの電流増幅率を 100 とすると TR6 のベース電流はその 100 倍の  $2700[\mu A] = 2.7[mA]$  になります。

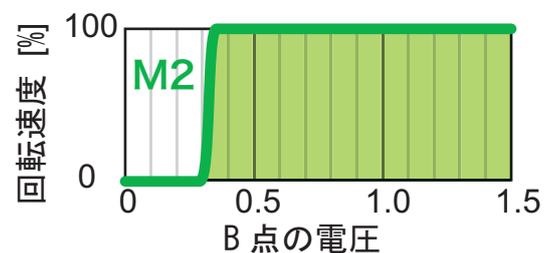
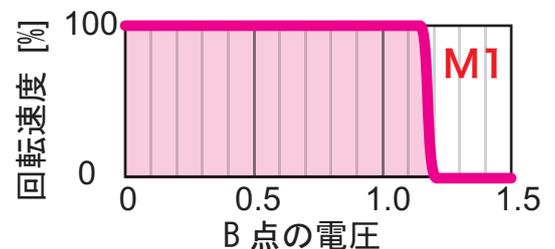
R7 は小さい値なので無視しましたが、無視して良かったかどうか確認します。2.7 mA が 220Ω の抵抗に流れるときに抵抗の両端に生じる電圧はオームの法則により、 $E = IR = 0.0027 \times 220 = 0.594[V]$  です。これは電源電圧 1.5 V からスレッシュホールド電圧 0.6 V を引いた残り 0.9 V より小さいので、220 オームを無視してもよかったです。

さて TR6 のベース電流の 100 倍がコレクタに流れるとすると、計算上は  $2700[mA] = 2.7[A]$  になります。それに対してモーター M1 の抵抗は 5Ω くらいなので、1.5 V をかけても 0.3 A しか流れません。つまり、TR6 は完全に ON になっていて、スイッチ動作になっているということです。

B 点の電圧が低いときは抵抗 R2 を通して TR2 のベース電流が増え、B 点の電圧が高いときは減ります。計算の方法は省略しますが、A 点の電圧が約 1.2 V 以上になるとベース電流が止まり、その結果モーターも止まります。

もう一つのモーター M2 の電流増幅回路は、NPN 型と PNP 型のトランジスタを入れ替えた形になっています。こちらは B 点が  $1.5 - 1.2 = 0.3 [V]$  以下になるとモーターが止まります。つまり、B 点の電圧が 0.3 から 1.2 V の間は両方のモーターが回ります。そのほうが直線コースではスピードが出るからです。

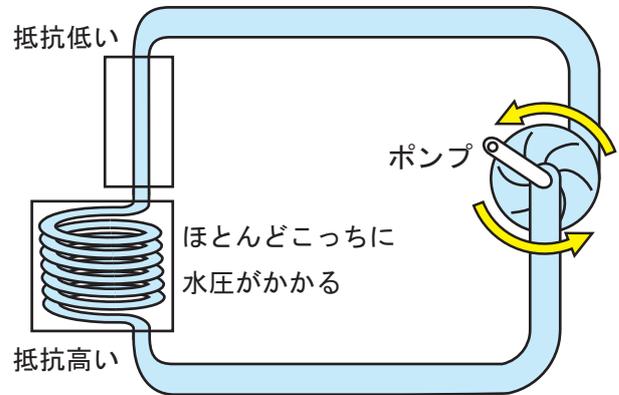
抵抗 R4 と R5 を大きくするとベース電流が減ります。そうすると両方のモーターが同時に回る B 点電圧の範囲が狭くなります。ちょこまかの動きは小刻みにちょこまかするようになり、直線ではスピードが出なくなりますが、直線の後急にカーブが来ても曲がりきれないということが少なくなります。



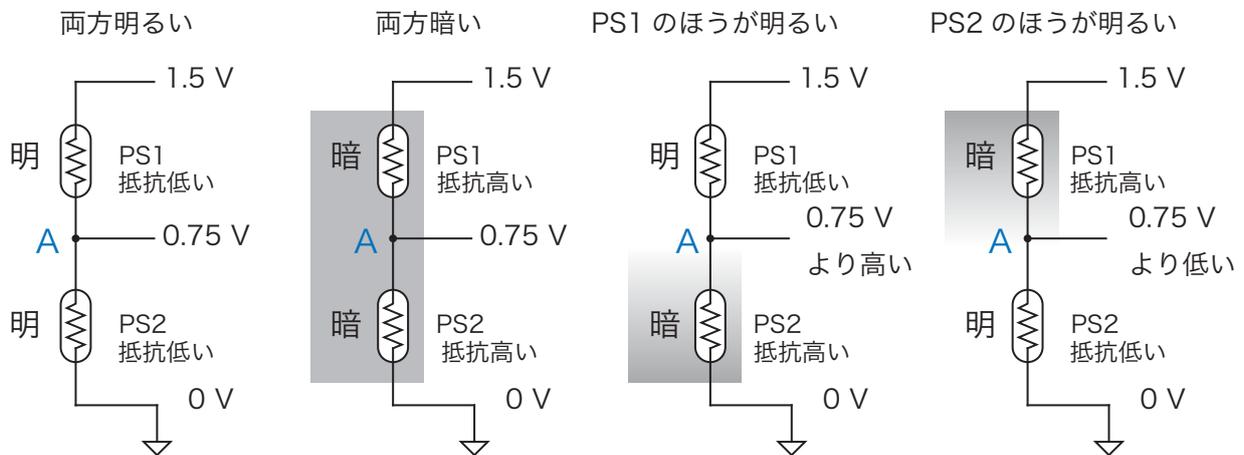
## 光センサー

ちょこまカーの光センサーは CdS（硫化カドミウム）という半導体でできているので CdS セルと呼ばれます。CdS は光が当たると電気抵抗が下がります。

ふたつの光センサー PS1 と PS2 は直列になっています。抵抗を直列接続した場合、抵抗値が高い方に電圧がより多くかかります。右図の水回路でイメージできるでしょうか。これはオームの法則からもわかります。PS1 と PS2 は直列接続されているので電流は同じ値になります。抵抗にかかる電圧の式は  $E = IR$  で、電流  $I$  が共通なので電圧は抵抗値  $R$  に比例します。



PS1 と PS2 に入る光の量が同じならば、全体が明るくても暗くても、PS1 と PS2 の中間点（A 点とします）の電圧は電源電圧 1.5 V の半分の 0.75 V になります。PS2 に入る光の方が多ければ PS2 の抵抗のほうが PS1 の抵抗より高いので、電圧は PS2 のほうに多くかかります。そうすると A 点の電圧は 0.75 V より高くなります。逆に PS2 に入る光の方が多ければ A 点の電圧は 0.75 V より低くなります。

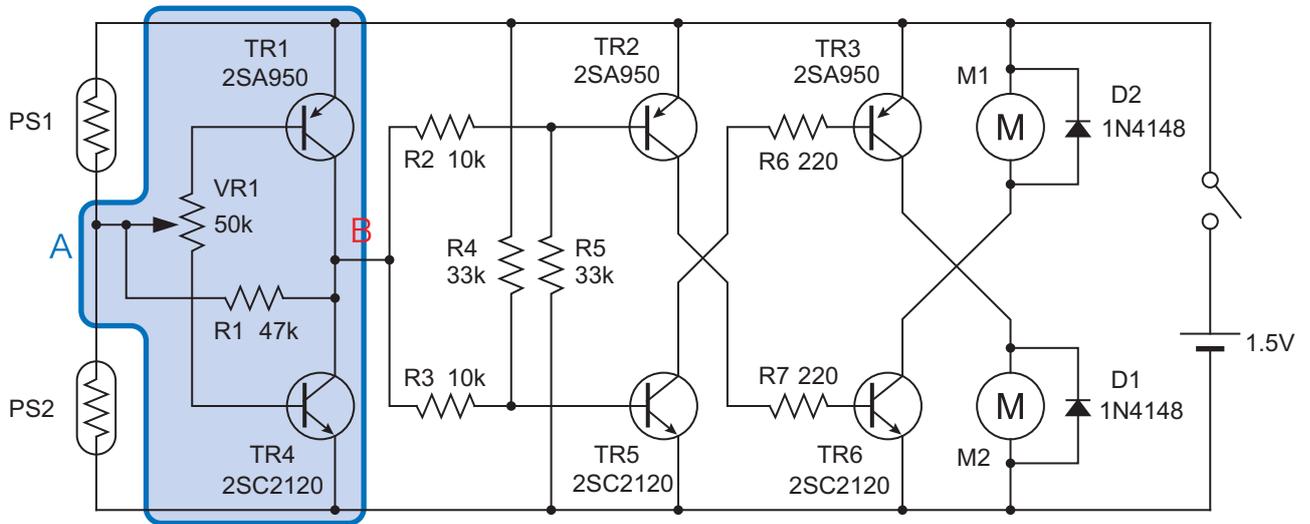


ちょこまカーの光センサーの抵抗値はどの程度でしょうか？ 照明の明るさで変わりますが、一例をあげると、黒線の真上で 4 k $\Omega$ 、白紙の真上で 2 k $\Omega$ 程度です。そうすると A 点電圧は 0.5 V から 1.0 V の間で変化することになります。

ところで PS1 と PS2 の特性は等しいとして説明しましたが、実際には PS1 と PS2 の特性を完全そろえることは不可能です。同じ明るさのところでもだいたい同じ抵抗値になる光センサーを選んで使用する必要があります。そのような努力をしても残ってしまう特性の差は、次に説明する電圧増幅回路のトリマ抵抗を調節することで補正します。

## 電圧増幅回路

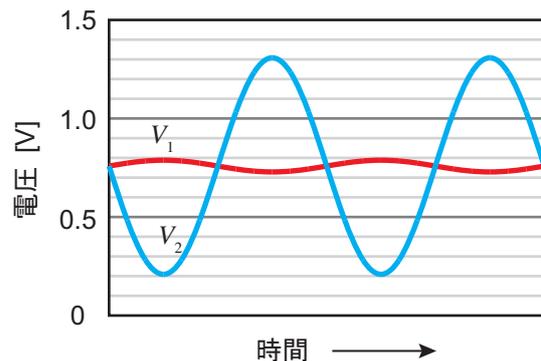
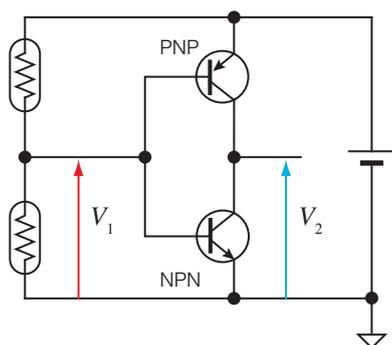
2 個の光センサーで作られた左右の床からの反射光の強さの差を表す電圧（A 点電圧）は、下図に青で囲って示した電圧増幅回路で電圧増幅されます。



2 ページほど前に、B 点電圧とモーターが回転するか停止するか関係を表したグラフがありました。B 点電圧が 0.3 V から 1.7 V の間では両方のモーターが回転します。片方のモーターを止めないとちょこまかの進行方向は変わりません。そのためには B 点電圧の変化の幅（電圧振幅）が 0.75 V を中心に 0.9 V 以上なければいけません。

A 点電圧の変化は、一例としてですが、0.5 V から 1.0 V と書きました。電圧振幅にして 0.5 V しかありませんし、しかも黒か白にしっかりセンサーを向けた場合ですから、実際の電圧振幅はもっと小さいです。そのため電圧増幅が必要になります。

トリマ抵抗 VR1 はとりあえず中点（上下 25 kΩ ずつの位置）にあるとします。A 点の電圧が下がると PNP トランジスタ TR1 のベース電流が増え、NPN トランジスタ TR4 のベース電流が減ります。水トランジスタで考えるとわかりますが、ベース水流が増えると回転バルブがより大きく開く、ということはコレクタとエミッタの間の抵抗が下がります。つまり、ベース電流が大きいトランジスタのほうがコレクタ - エミッタ間の「内部抵抗」が下がるため、B 点の電圧は A 点とは逆に上がります。言いかえると変化の「極性」は反転します。このとき電圧変化の振幅は大きくなります。つまり電圧増幅されます。



## 中心補正

もし2つの光センサーが同じ明るさの時に同じ抵抗にならないと A 点の電圧変化の中心値が 0.75 V からずれますが、トリマ抵抗 VR1 を調節することで 0.75 V ではない電圧に対してトランジスタ TR1 と TR2 に同じベース電流が流れるよう調節することができます。

## ネガティブ・フィードバック

抵抗 R1 は前圧増幅回路の増幅率を調節する役目をはたします。B 点電圧が中心から変化し始めると R1 を通して A 点に電流が流れますが、A 点と B 点の電圧変化は極性が逆なので、R1 を通して A 点に流れる電流は変化を減らす方向に作用します。このように出力を逆極性にして入力に戻すことによって増幅率を調節することをネガティブ・フィードバック（負帰還）といいます。

もし、電圧増幅回路の増幅率が高すぎると、センサーの位置が少し変わっただけで B 点電圧が非常に大きく変化してしまいます。非常に大きくと言っても電源電圧を超える変化はできないので、センサーの位置が少し変わっただけですぐに 0 V か 1.5 V に切り替わるというような感じになります。そうすると、モーター M1 と M2 が両方回転する B 点電圧の範囲は一瞬で通過してしまうので、いつもどちらかのモーターが停止してしまいます。結果としてちょこまカーは常に左右にぶるぶるふるえながら進むようになります。

つまり、抵抗 R1 を調節することでもちょこまカーの動きを調節することができます。R1 を小さくすると電圧増幅回路の増幅率が下がり、ちょこまカーはまっすぐ突進するタイプになり、逆に大きくすると上に書いたようにぶるぶるするようになります。

ネガティブ・フィードバックは増幅率を下げるかわりに、増幅器の入力電圧と出力電圧の間が正確に比例するようになるという利点があり、オーディオアンプなどに広く応用されています。

またネガティブ・フィードバックは自動制御の基本になる考え方でもあります。電気こたつを例にとると、ヒーターの電流が入力で温度が出力と考えられます。温度が目標値を超えたら（あるいは超えないように）電流を減らし、温度が目標値を下回ったら（あるいは下回らないように）電流を増やす、という動作なので、出力を逆極性にして入力に戻しているわけです。

じつはちょこまカーの動作全体もネガティブ・フィードバックになっていると言えます。左右の位置のずれをセンサーで調べて、ずれが減るように左右のモーターを動かしたり止めたりするという動作ですから。

以上でちょこまカーの解説を終わります。おつきあいありがとうございました。

## さいごにひとこと

この世に生まれ出た子供は、転ぶと痛い（地球の引力は意外と強いぞ）、ということからはじまって次第に外界の一部を頭の中でシミュレーションできるようになっていきます。スポーツでも演奏でも料理でも、上達とは脳内シミュレーションできる範囲を広げ精度を上げていくことだと思います。

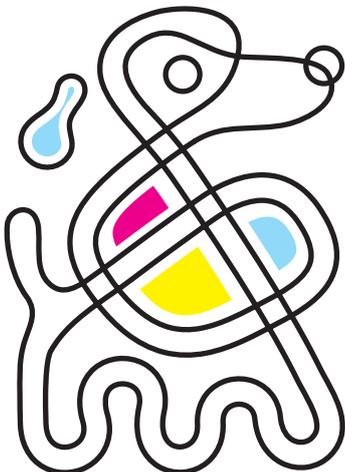
同様に優れたエンジニアは材料や部品の性質とかそれが力や熱に対してどう反応するかなどをありありとイメージすることができるはずです。子供時代にもものを作る楽しさを体験することが、そういう能力を芽生えさせるだろうと思います。

そして成長してから学ぶことになるサイエンスによって、ひとの五感でとらえられないほど巨大であったり微小であったり抽象的であったりするものまで取り扱うことができるようになります。

でもサイエンスを手に入れたからといって脳内シミュレーション能力は不要にはなりません。たとえば 3 階から落ちたら負傷する可能性があるかどうか判断するために力学の計算を必要とするでしょうか。また、計算や想定を間違うと、3 階からの転落は絶対に安全であるという結論が出るかもしれません。脳内でイメージできる範囲と精度を向上することは、すばらしく性能の高い機械を生み出すために有用なだけでなく、サイエンスが致命的な間違いを犯さないようチェックするためにも有用なのです。むしろサイエンスのたすけを借りて脳内シミュレーションの精度を向上させるべきだと思います。

学校教育で音楽やスポーツに親しむことは推奨されているのに、エンジニアリングに触れる機会はほとんど皆無です。日本が今後も高度な技術力でやっついこうというならばなんという手ばかりでしょう。ちょこまカーがそんな数少ない機会を提供することになればわたしは嬉しいし愉快です。

小林 大



## 電子回路に詳しい方へ

電源電圧が低すぎて普通の差動増幅が使えませんでした。そこでちょこまカーの幾何学的な左右対称性を回路図上では上下の対称性に対応させることにしたら、バイポーラトランジスタによる CMOS 的構造になりました。電圧アンプは対称性が高く使い勝手が良いですが、電流アンプはスレッシュホールド電圧の制約から段ごとに NPN と PNP を繰り返す必要があります。じつに乾電池 1 本だところなるしかなかったという感があります。