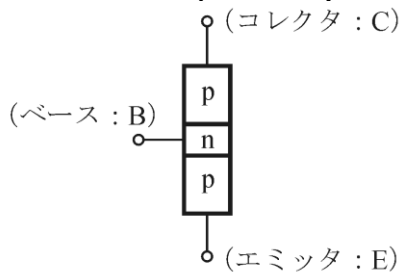


2. バイポーラトランジスタの動作と増幅回路

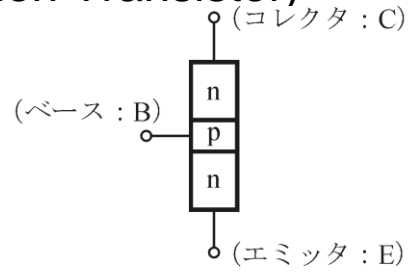
- バイポーラトランジスタの動作原理
- バイポーラトランジスタの小信号増幅回路
- バイポーラトランジスタの大信号増幅回路
 - バイポーラトランジスタは最も早く発明された
 - 以前はアナログ、デジタルの両方で使われた
 - 最近は利用が減っている
 - しかし、動作原理は案外難しく理解しにくい
 - とはいえ、古典なので説明せざるを得ない。。。。

前回はダイオードをやりましたが、今回はトランジスタ素子について学びます。まず、古典的なバイポーラトランジスタを紹介します。バイポーラトランジスタ、またはBJTは、以前はアナログ、デジタルの両方に用いられましたが、最近はほとんどアナログ回路専門で、実際はアナログ回路でも使われなくなっています。しかも、電流増幅素子なんて理解が難しいし、回路構成法も難しいです。しかし、最も早く発明されたのでその動作原理を知らないとバカにされてしまいますし、どのような教科書でも、バイポーラトランジスタの知識を前提に書かれているので避けて通れないです。このお蔭でみんな電子回路が嫌いになっちゃうんじゃないかと思って怖いのですが、ま、そういうわけで、教養だと思ってやりましょう。

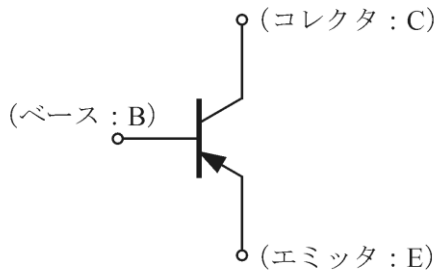
バイポーラトランジスタ BJT(Binary Junction Transistor)



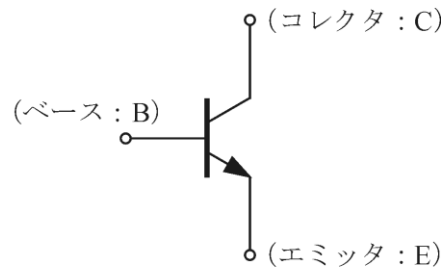
(a) pnpトランジスタの構造



(b) npnトランジスタの構造



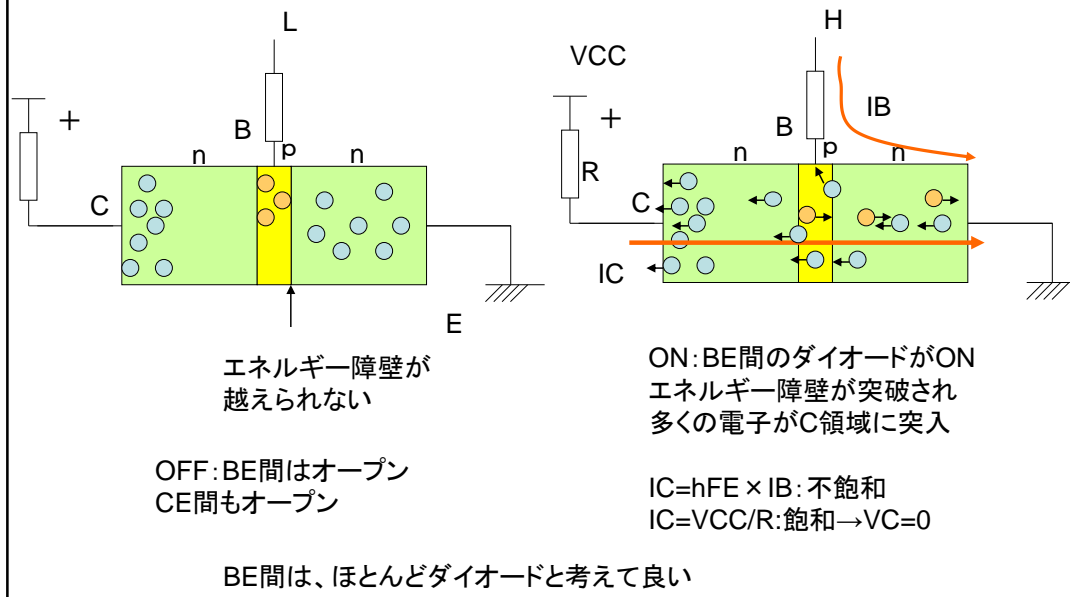
(c) pnpトランジスタの記号



(d) npnトランジスタの記号

バイポーラトランジスタは、pn接合を二つ持ちます。pnp型は細いn型の領域がベースで、両側をp型の領域にエミッタ、コレクタを接続します。逆にnnp型はベース領域がp型で、これがn型のコレクタ、エミッタにサンドイッチされる構造です。下に記号を示します。p→nの方向に矢印が付く点に注目ください。アナログ回路ではnnp,pnp型両方共良く使われますが、ここでは理解のしやすいnnp型で説明しましょう。

バイポーラトランジスタの動作



ではnpn型トランジスタのエミッタ接地動作を解説しましょう。p型半導体には正孔が、n型半導体は電子が居ることを思い出してください。エミッタ接地ではエミッタをグランドに落とし、コレクタには抵抗を介して電源を接続します。ここで、ベースとエミッタはダイオードと考えてもいいです。

- ①ベースがグランドに近いレベルの場合、ダイオードはOFFの状態です。このため、ベース、エミッタ間は切れたのと同じ状態です。コレクタ内の電子は電源方向に引き寄せられますが、ベースとのpn接合が切れているため、電流が流れることができません。したがって、コレクターベース、コレクターエミッタ間も切れたのと同じになります。
- ②ではベースにダイオードのON電圧を越える電圧を掛けてみます。この場合、ベース、エミッタ間はONになってベース電流が流れます。このことによりベースエミッタ間のエネルギー障壁が突破されます。ベース領域は非常に狭くなっているため、コレクタ領域から電子が流れ込み、エミッタに到達します。このことにより、コレクタ電流が流れます。コレクタ電流が小さいうちは、コレクタ領域から流れ込む電子の量は、ベース領域から流れ込む電子の量によって制御されます。すなわち、ベース電流の(変化の)定数倍(hFE と書いてありますがこの意味は来週説明します)がコレクタ電流(の変化)となります。これが不飽和領域、あるいは小信号領域です。一定以上のコレクタ電流が流れると、抵抗Rによって起きる電圧降下が V_{CC} に達してしまいます。こうするとコレクタ電圧は0Vになって、もうこれ以上はコレクタ電流が流れることができません。これを飽和領域と言います。

バイポーラトランジスタ動作のポイント

- B-E間は、ダイオードと考えて良い
- B-E間で流れる電流で、C-E間を流れる電流を制御できる→不飽和領域、小信号増幅
 - 電流制御素子
 - 動作点を定めて、その周辺で小さく変化させる
 - アナログ的な使い方
- B-E間で流れる電流が一定以上ならば、抵抗で電流が制限される→飽和領域、大信号増幅回路
 - デジタル的な使い方

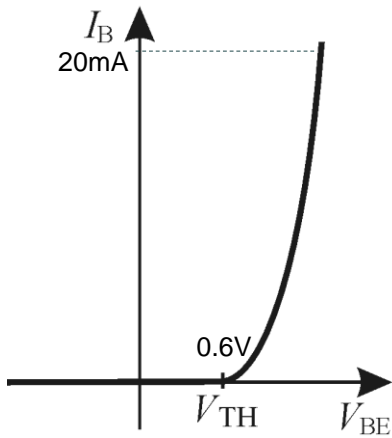
バイポーラトランジスタは、最も早く実用化され、広く使われました。現在はあまり使われなくなったのですが、その原理を理解しておく必要があります。ここでも紹介しているわけです。しかし、実は結構理解しにくい代物です。これは電流で電流を制御する素子というのが直感的にうまく理解できにくいからだだと思います。ここで、理解のためのポイントをまとめましょう。

まず、B-E間は前回紹介したダイオードと同じと考えて良いです。ON電圧を越えると急激に電流が流れます。

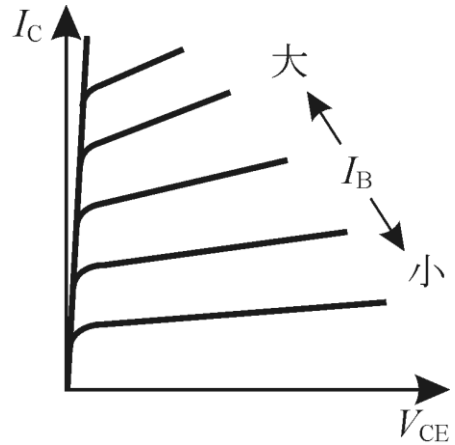
ここで、B-E間の電圧を調整してこの電流を微妙なところにうまく設定します。これを動作点と呼びます。この動作点の周辺の小さい範囲で電流を変化させると、この変化が大きなコレクタ電流となり、抵抗で電圧降下させると、大きな電圧変化として取り出すことができます。これが増幅です。電流の変化は忠実に増幅されるので、これはアナログ的な増幅です。とはいえ、ダイオードの電流結果は結構、急峻です。このうまい所に動作点を設定するなんて、できるのか？と思うかもしれません。実際、これは難しく、このために色々なバイアス回路が工夫されています。これがアナログ増幅回路の設計のポイントとなります。

では、B-E間の電流を一定以上流すとどうなるでしょう？コレクタ電流はそれにつれて大きくなってついには抵抗での電圧降下によって0Vになってしまいます。これが飽和状態です。デジタル的な利用を行う場合、この使い方をします。

バイポーラトランジスタの特性



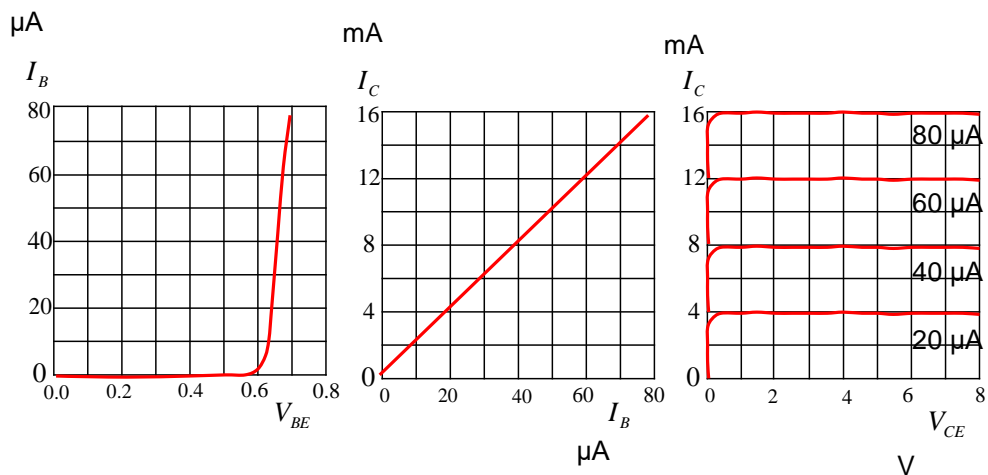
(a) $I_B - V_{BE}$ 特性



(b) $I_C - V_{CE}$ 特性

(a)はベース、エミッタ間の電圧と電流の関係を示しています。全くダイオードと同じというのがお分かりいただけると思います。次に(b)の図をご覧ください。コレクタ-エミッタ電圧に対するコレクタ電流を示しています。複数の線は I_B の値を変えて測っています。コレクタ電圧をいくら上げてもコレクタ電流はちっとも増えないことがわかります。コレクタ電流はベース電流によって決まることがわかります。

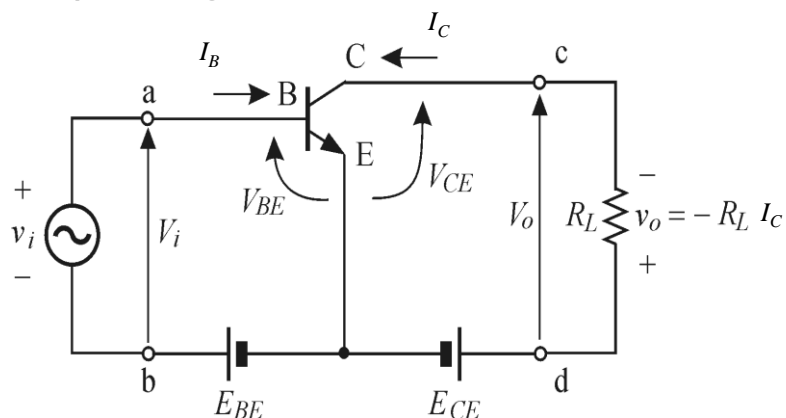
理想化したバイポーラトランジスタの特性



これを理想化するとこんな感じになります。ベース電圧とベース電流との関係はほぼダイオードです。ベース電流とコレクタ電流はほぼ比例すると考えられます。コレクタ電圧はコレクタ電流にほとんど影響を与えません。

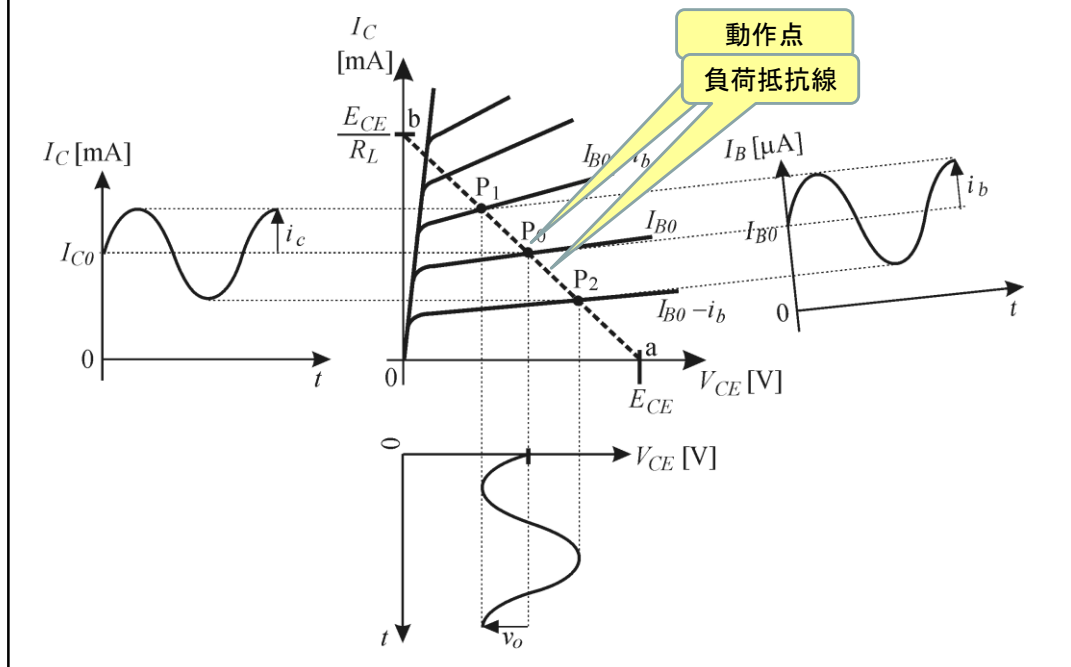
小信号増幅回路

- BE間にバイアス電圧 E_{BE} を与えてベース電流をいい感じに流してやる
- 入力電圧 V_i のちょっとした変化が大きくなって V_o に出てくる



では、この特性を念頭において、小信号増幅回路を設計してみましょう。ベースエミッタ間にON電圧付近の電圧を掛けないと、ベース電流は流れくれません。そこで若干の電圧を掛けてベース電流をある程度流してやります。これをバイアス電圧(バイアス電流)と言います。これに載せて小信号の変化 V_i を与えるとベース電流が変化します。この変化によりコレクタ電流が変化し、負荷抵抗 R_L の両端に増幅された出力電圧 V_o が表れます。

小信号増幅回路の増幅原理



先ほど示したコレクタ電圧対コレクタ電流の図で、増幅の様子を説明しましょう。コレクタ電流の変化に応じて負荷抵抗 R_L の両端に電圧降下が生じ、これがコレクタ電圧になります。電源電圧が決まっていれば、コレクタ電圧とコレクタ電流の関係は、一本の線で表されます。トランジスタはこの線の上のどこかで動作しているはずで、これを負荷抵抗線と呼びます。

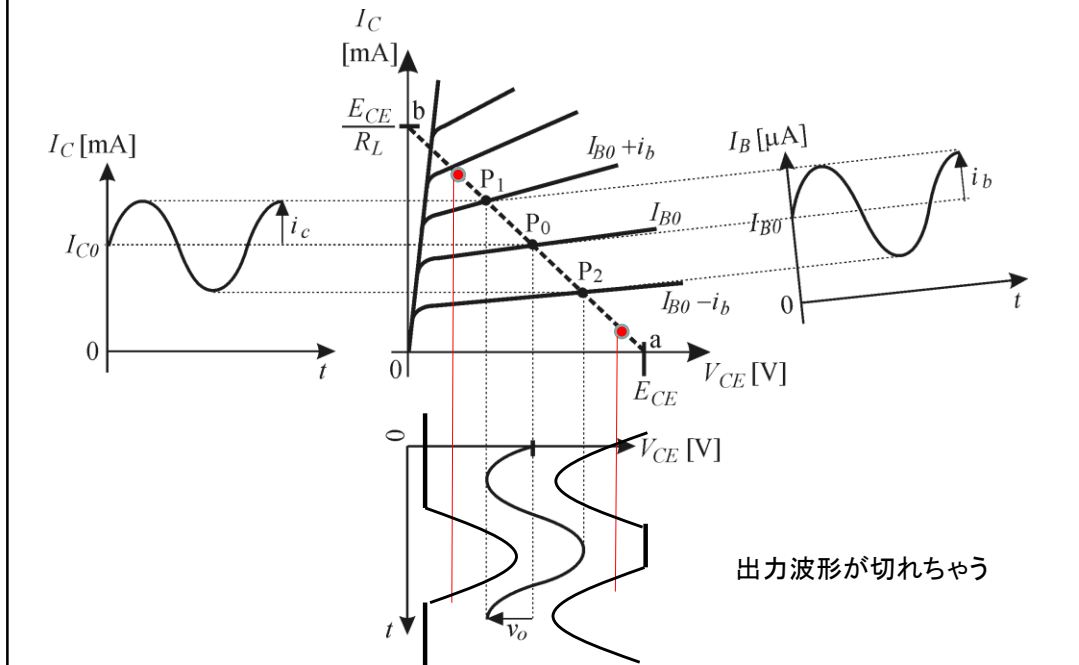
コレクタ電圧の最高値は電源電圧ですので、a点は E_{CE} になります。 E_{CE}/R_L の電流が流れると、電源電圧分が抵抗で降下してしまい、コレクタ電圧は0になります。すなわち飽和してしまいます。これがb点です。負荷抵抗線はa点とb点をむすんで描きます。

さて、ここでバイアス電流を I_{B0} に決めたとしましょう。入力信号がない場合に、負荷抵抗線の P_0 に相当するコレクタ電流が流れ、コレクタ電圧が生じます。これを動作点と呼びます。動作点を中心に I_B が i_b 分変化した場合これに対応して I_C は i_c 分変化し(左の図)、これによって V_{CE} は v_o 分変化します。

i_b の微小な変化で i_c が大きく変化することから増幅が行われていることがわかります。

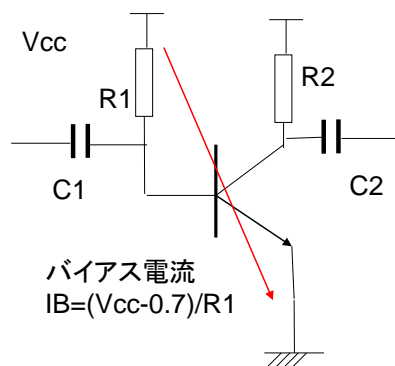
i_b が増えると、 i_c が増えるため、電圧降下が増えて、 V_{CE} は減る方向に動きます。すなわちエミッタ接地の増幅回路は入力と出力の変化の方向が逆になります。これを逆相と呼びます。

動作点が適切でないと、、、



小信号増幅回路は、動作点を負荷抵抗線の中央付近に来るようにバイアス電流 I_{B0} を流してやる必要があります。動作点が右に寄り過ぎると、出力が電源電圧を超えることができないために、波形の上の方が切れてしまいます。一方、動作点が左に寄り過ぎると、コレクタ電圧は0より低くはならないため、今度は波形の下の方が切れてしまいます。以降、今日のテーマはどうやって、ちゃんと増幅ができるように動作点を設定できるか？という点に絞ります。出来上がった増幅回路の特性については次回に譲ります。

CR結合小信号増幅回路



バイアス電流
 $I_B = (V_{CC} - 0.7) / R_1$

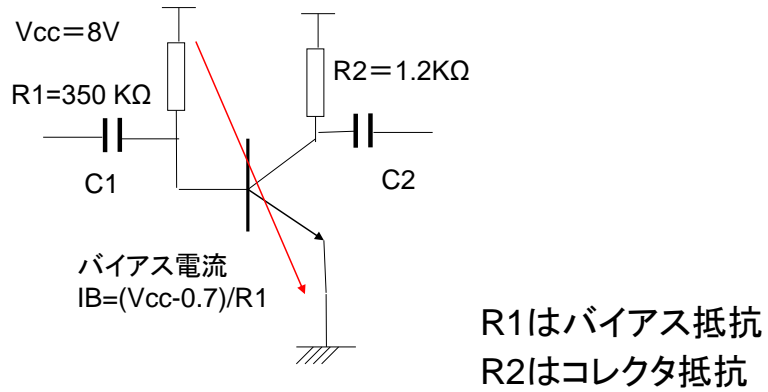
R1はバイアス抵抗
R2はコレクタ抵抗

C1, C2は結合コンデンサ(カップリングコンデンサ)

では、実際の回路はどうなるか、見てみましょう。図は最も簡単な小信号増幅回路です。R1でバイアス電流を掛けてやります。トランジスタのBE間はダイオードと同じと考えることができるので、電源電圧をVCCとすると、バイアス電流は $(V_{CC} - 0.7) / R_1$ になります。コレクタ抵抗R2は、電源電圧と、飽和時に流れる電流を考えて決めてやります。

ここで、入力を接続した際に、入力側に直流電流が流れると、このバイアス電流が狂ってしまいます。同じよう出力も、直流電流が流れ出すと動作点が狂います。そこで、コンデンサC1とC2を直列につないでやります。コンデンサは交流成分は流しますが、直流成分はカットするため、動作点に影響を与えることなく、小信号のみ受け渡すことができます。このC1, C2を結合コンデンサ、またはカップリングコンデンサと呼び、結合コンデンサでつなぐ増幅回路をCR結合増幅回路と呼びます。ちなみに、逆に伝わらなくする目的のコンデンサをデカップリングコンデンサと呼びます。

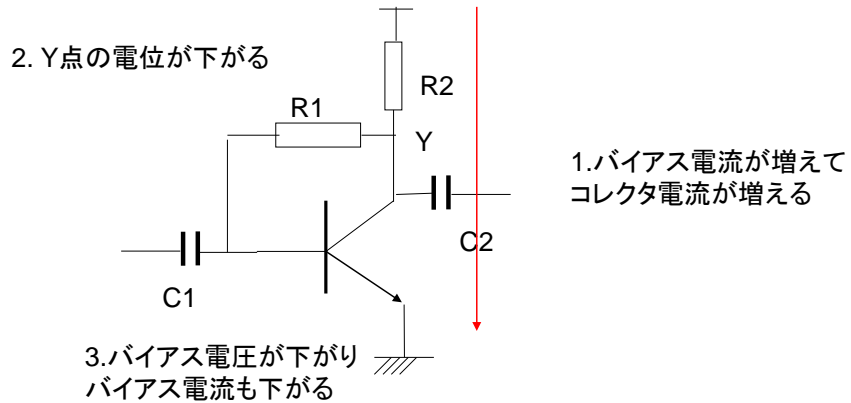
演習2-1



6ページの理想化されたトランジスタを対象として、
バイアス電流と動作点を求めよ。

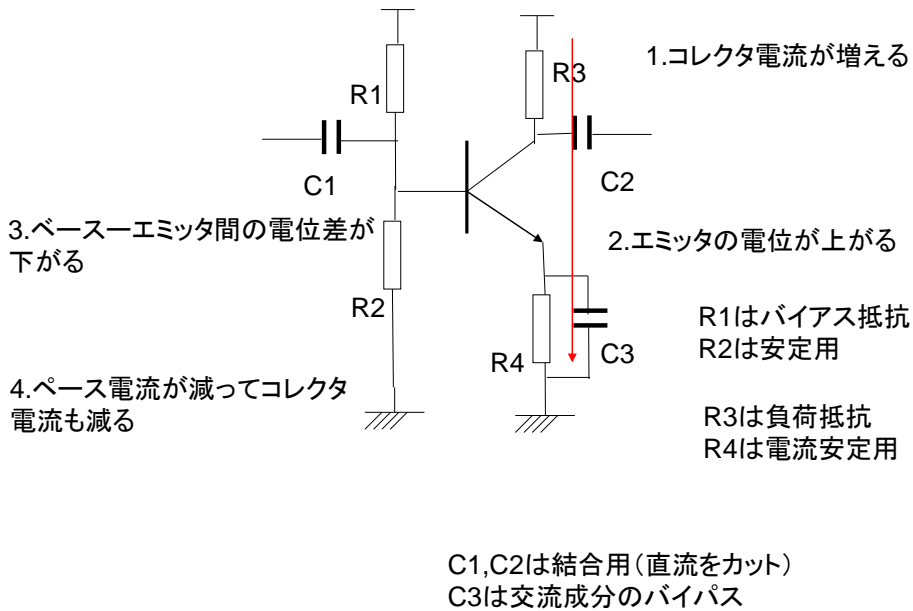
では問題をやってみましょう。上の回路でバイアス電流はどうなるでしょうか？また、動作点はどの辺になるでしょうか？トランジスタは6ページの理想化された特性を持つとします。

自己バイアス回路



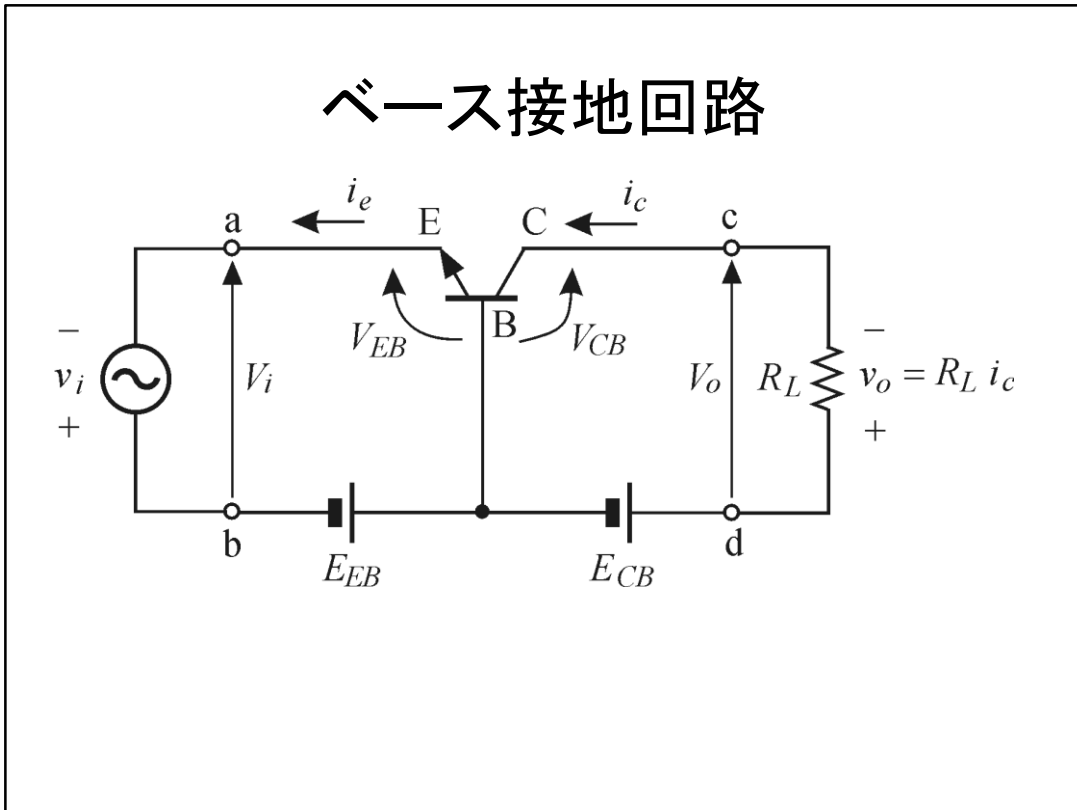
さて、紹介したCR結合増幅回路は不安定です。BE間はダイオードと同じなので、ベース電圧がちょっと変わっただけでもベース電流は大きく変動します。温度が上がったり、トランジスタの特性がちょっと違っただけでも思ったような動作点に持っていくことができません。そこで、負帰還の考え方を使います。図に示した回路は自己バイアス回路と呼ばれる方法です。この方法では例えば温度が上がってバイアス電流が増えたとすると、その分コレクタ電流が増えます。するとY点の電位が下がり、バイアス電圧が下がります。そうするとバイアス電流も下がるため、コレクタ電流が減ります。つまり自動的に調節することができます。この回路の欠点は、増幅しようとする小信号に対しても負帰還が掛かってしまい、増幅率が低下することです。

電流帰還バイアス回路



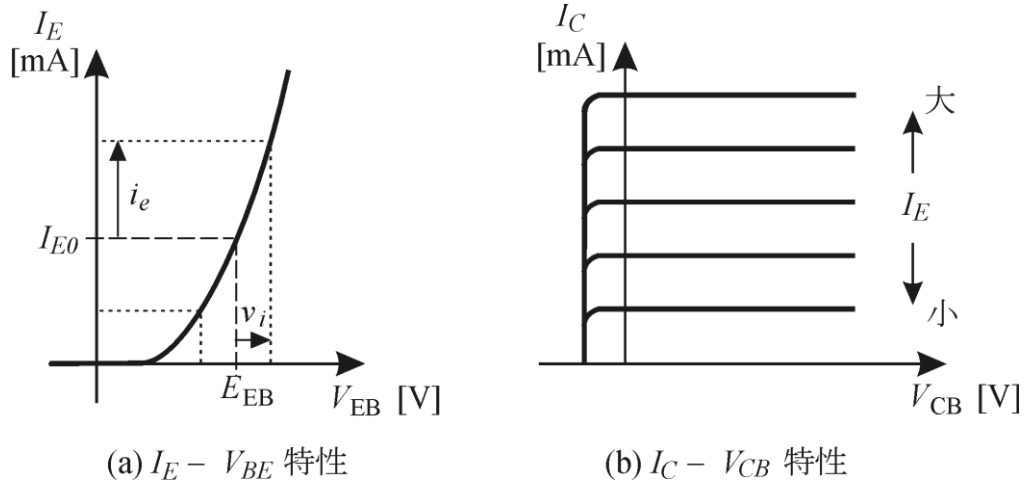
コレクタから負帰還をかけるのではなく、エミッタに抵抗を入れる方法もあります。この方法では、1.コレクタ電流が増えると、2.エミッタの電位が上がります。そうするとベース、エミッタ間の電位差は小さくなる方向に働きます。すなわち、ベース電圧が小さくなり、ベース電流も小さくなります。これによりコレクタ電流が減り、元の状態に戻ります。この方法の良い点は、R4に並列にC3を入れることで、交流的にはR4によるフィードバックが掛からないようにできる点です。C3のことをバイパスコンデンサと呼びます。R2は電流を安定させるための抵抗です。この方式を電流帰還バイアス回路と呼び、CR結合増幅回路の標準的な方法として使います。とはいえ、これにも問題はありますが、これは来週、等価回路を勉強してから説明します。

ベース接地回路



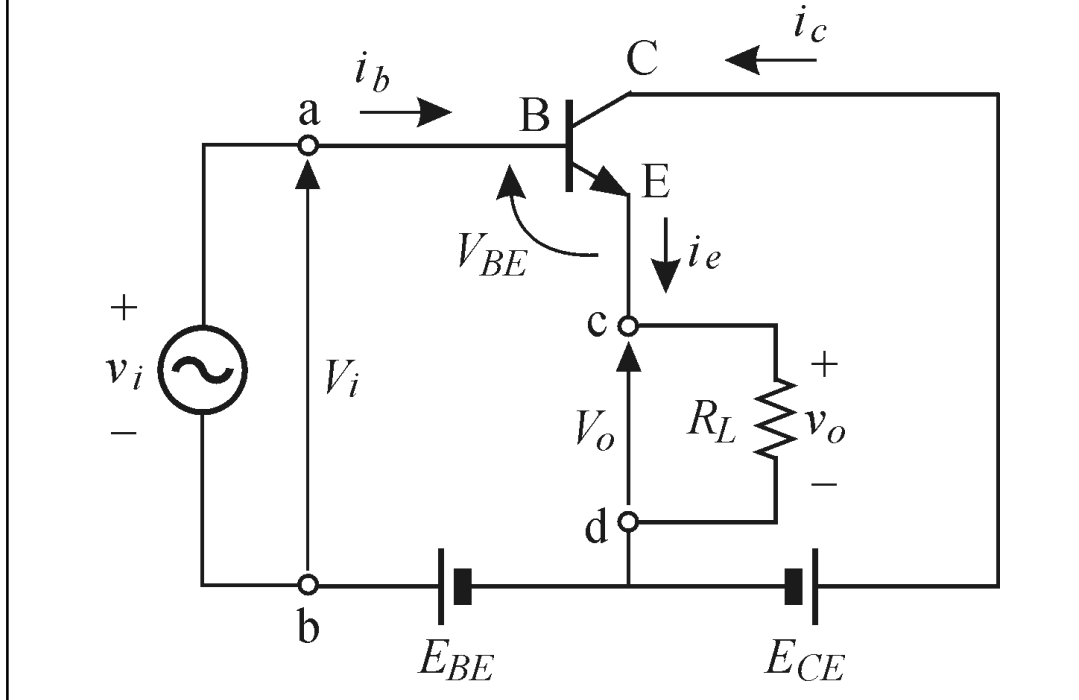
ここから先は、実際はあまり使わない回路方式、あるいはやや高度な回路方式なんですけど、一応説明しておきます。ベース接地回路は、ベースを共有にし、エミッタ側から入力を入れてやります。エミッタ接地との違いは、 $i_e = i_b + i_c$ なので、 $i_e > i_c$ となって電流はちっとも増幅してくれない点にあります。しかし、 i_e の変化に応じて i_c は変化するので、抵抗を繋ぐことで v_i より大きな v_o を取り出すことができます。このため、電圧は増幅してくれます。エミッタ接地と違って同相になります。エミッタ接地よりも周波数特性が良くなる特徴があります。

ベース接地回路の動作



ベース接地の電圧、電流特性を示します。エミッタ電流はコレクタから流れる分も含んでいます。この大きさによって I_C は変化します。

コレクタ接地回路(エミッタフォロア)



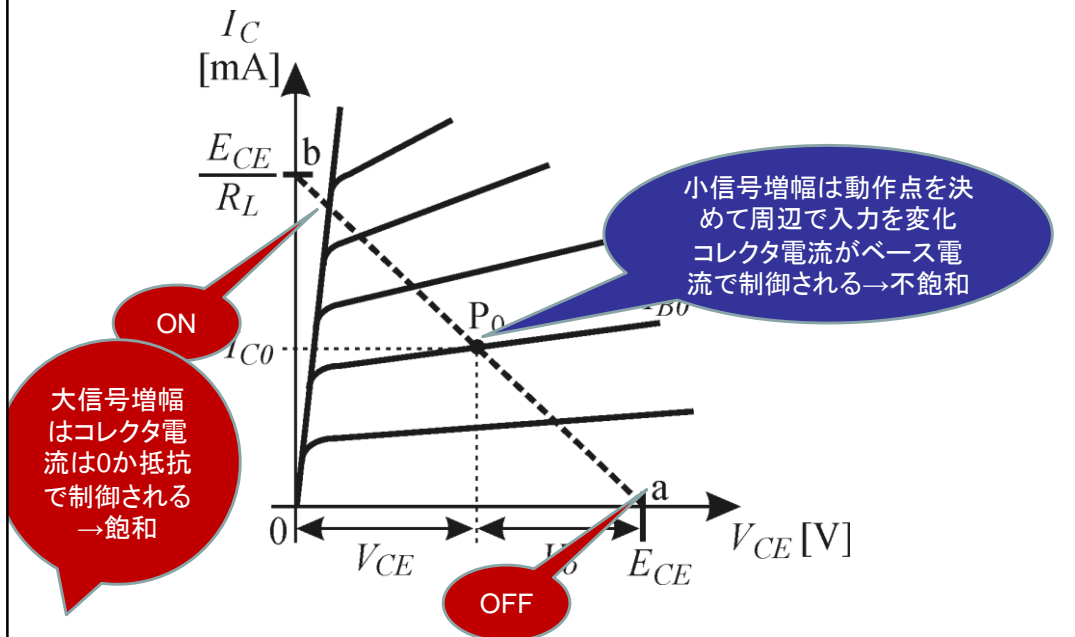
コレクタ接地回路は別名エミッタフォロアとも言います。考え方としてはエミッタ抵抗から出力を取り出します。ベース電流とコレクタ電流は共に R_L に流れるので、この回路では電圧は増幅してくれません。一方で、 i_b の変化で i_e は大きく変化するので、電流は増幅してくれます。この回路は出力インピーダンスが低いため、実はインピーダンス変換に使います。この話は来週等価回路の話をしてからならば理解できるかもしれません。(ダメかも、、、)

増幅回路の接地形式による違い

接地形式	電圧増幅度	電流増幅度	信号の位相
エミッタ接地	1より十分大きい	1より十分大きい	逆相
ベース接地	1より十分大きい	殆ど1	同相
コレクタ接地	1より小さい	1より十分大きい	同相

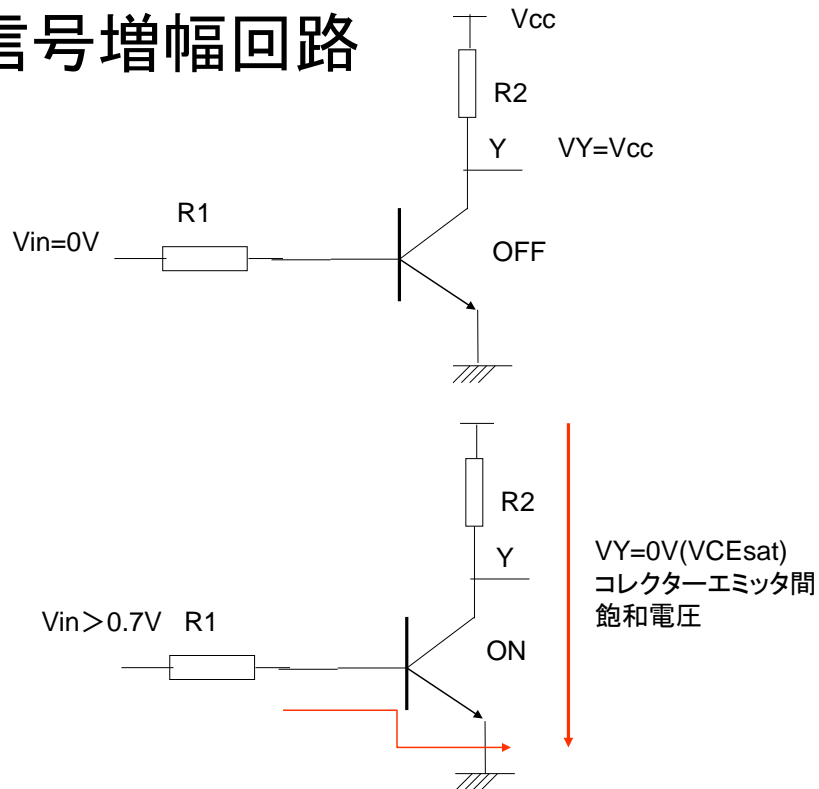
三つの接地方式をまとめた表を示します。電圧増幅度、電流増幅度共に大きなエミッタ接地が基本ですが、他の接地方式も特徴を生かして使われることがあります。

大信号増幅回路と小信号増幅回路



次に大信号増幅回路を見てみましょう。この使い方では、ベース電流は全く流さない状態か、ベース電流を大量に流して、コレクタ電流が完全に抵抗で制限された状態、すなわち飽和状態で使います。ベース電流が流れない状態がOFF、ベース電流を大量に流した状態がONです。

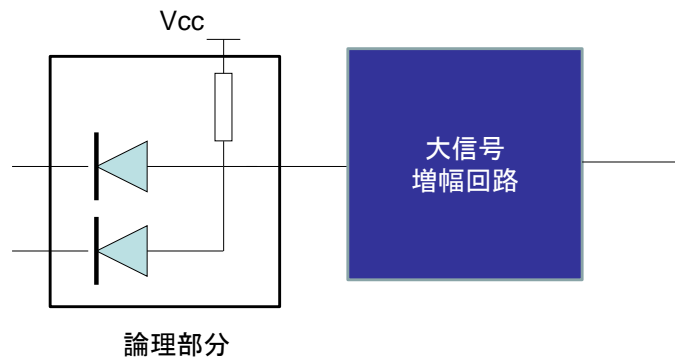
大信号増幅回路



大信号増幅回路は、図のようにベースとコレクタに抵抗を繋いで作ります。 V_{in} が $0V$ の時はベースには電流が流れずコレクタにも電流が流れません。前のページの図のa点です。この状態をトランジスタがOFFになっていると考えます。この時出力 Y からは電源電圧 V_{cc} が表れます。一方、 V_{in} を $0.7V$ よりも大きめにして、十分なベース電流を流すことで、コレクタ電流を流します。 $R2$ の電圧降下により Y 点の電位は $0V$ になります。正確に言うと、飽和時にもコレクタとエミッタ間は完全に同じ電位とはならず、若干($0.1 - 0.2V$)くらいの電位が残ります。これをコレクタ-エミッタ間飽和電圧と呼びます。この状態をONと考えます。

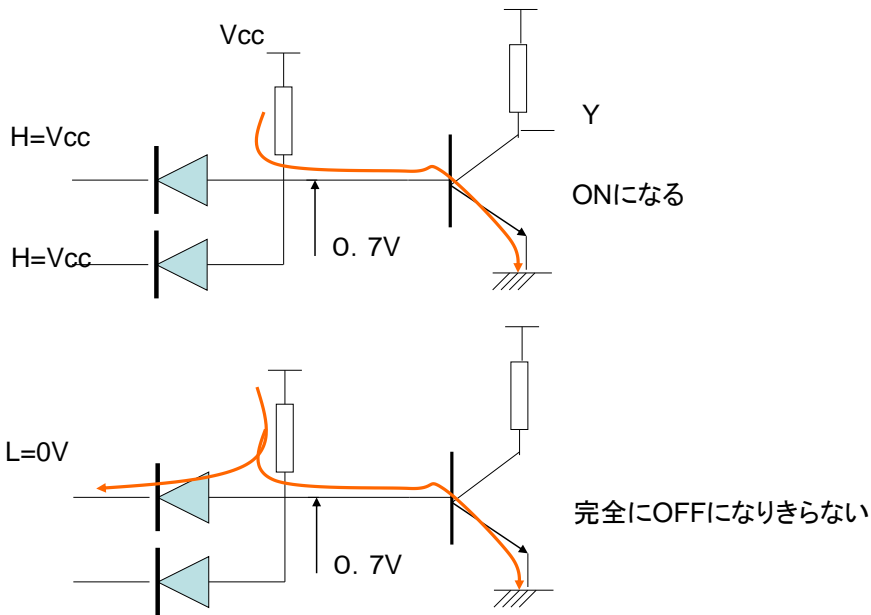
大信号増幅回路はデジタル回路に使います。ベース-エミッタ間のON電圧(ここでは $0.7V$)がトランジスタのON電圧と等しくなります。ONとOFFの境目の電圧をしきい値(スレッシュホールドレベル)と呼びます。大信号増幅回路はON/OFFで考えることができ、小信号増幅回路よりも簡単です。

大信号増幅回路の使い方



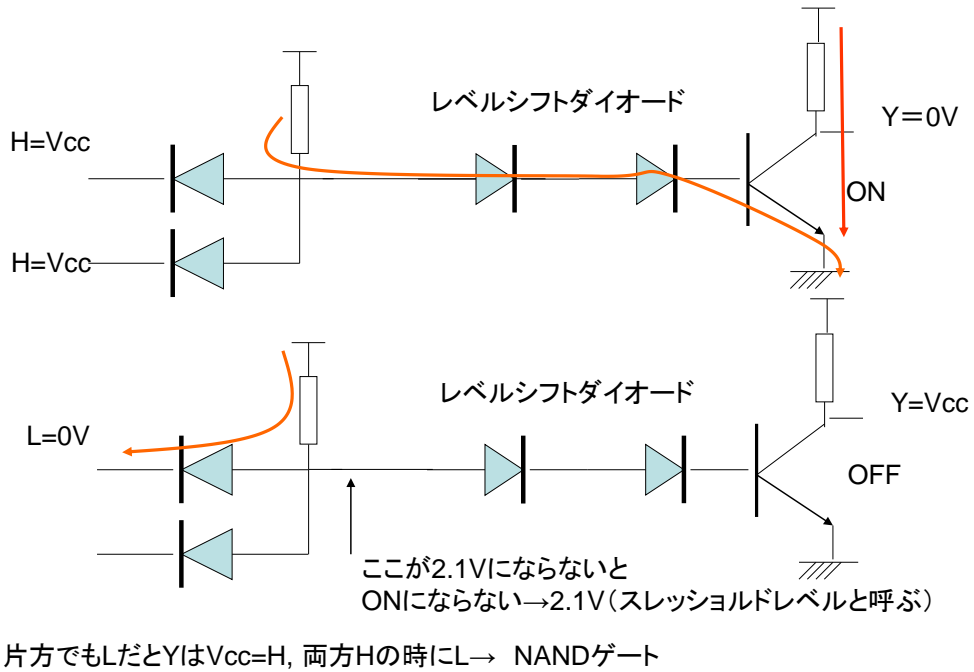
大信号増幅回路は、論理ゲートと組み合わせてデジタル回路を作るのに使います。前回紹介したダイオードによるANDゲートは単独では電圧レベルが落ちてしまい、論理回路として機能しません。この後ろに大信号増幅回路を付けてやり、電圧レベルが落ちないように増幅してやれば、論理ゲートを作ることができます。

大信号増幅回路の使い方



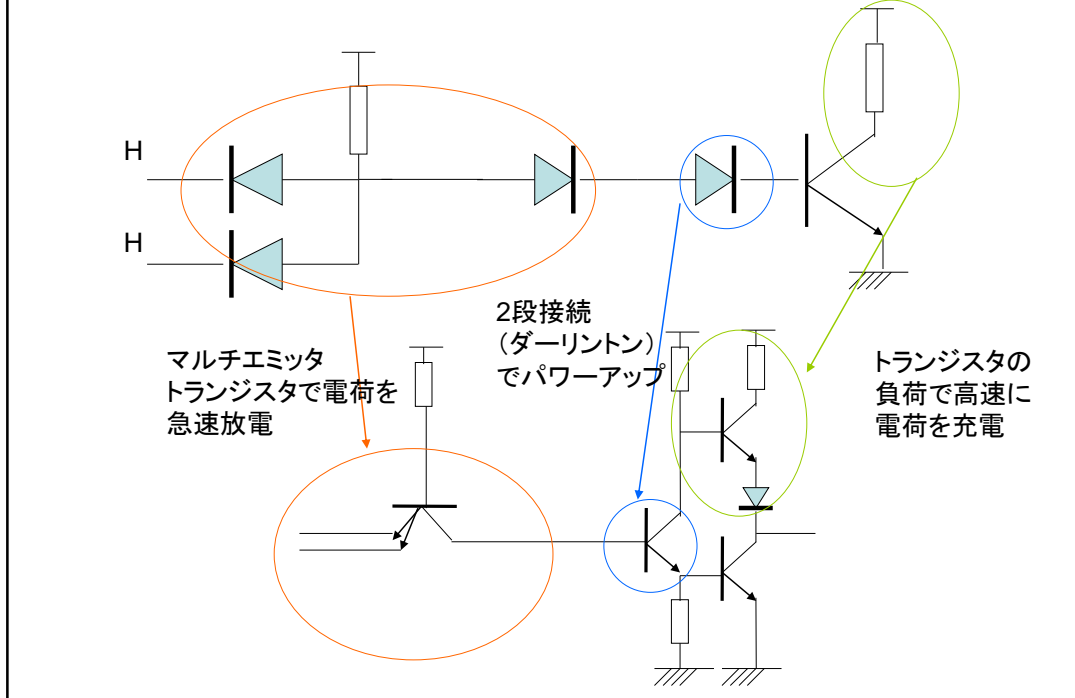
例えば、前回のダイオードAND回路の後ろにトランジスタの大信号増幅回路を直接付けてみましょう。ベース抵抗 R_1 は、ダイオードの抵抗があるので、この場合はなくても大丈夫です。ところがこの回路は問題があって動きません。ダイオードもトランジスタもシリコンで作るため、ON電圧は同じで約0.7Vです。ダイオードの入力が両方共Vccに近いHレベルである場合、ダイオードは両方共OFFでトランジスタのベースには抵抗を通じて高いレベルが掛かるので、トランジスタはONとなってYは0Vになります。ところが、ダイオードの入力が片方または両方0Vになっても、ダイオードのアノードは0.7Vになるため、トランジスタはOFFになりきれず、ONのままになってしまいます。このため、この回路は使い物になりません。

DTL(Diode-Transistor Logic)



そこで、トランジスタのベースにダイオードを二つ入れてやります。このことで、ダイオードANDの出力が、トランジスタのベース、エミッタ間+ダイオード二つ分、すなわち、2.1Vにならないと右の方には電流が流れないこととなります。したがって、ダイオードの片方、あるいは両方の入力がLになると、トランジスタはOFFになり、出力はVccレベルが出ます。もちろん、ダイオードの入力の両方がVccのときは、電流は右に流れてトランジスタはONになってYは0Vになります。すなわち、片方でもLだと出力はHとなり、両方共Hの時だけYがLになる論理ゲートとして働きます。ANDの後にNOTが付くのでNANDと呼ばれます。この回路は、入力側はダイオード、出力側はトランジスタで出来ていることから Diode Transistor Logic、DTLと呼ばれます。もっとも原始的な論理ゲートです。

TTL (Transistor-Transistor Logic)



DTLは、もっとも簡単な論理ゲートですが、LからHへの変化が遅い、トランジスタの特性のばらつきによわいなど、欠点が多く、マルチエミッタトランジスタと呼ぶ特殊なトランジスタを使った回路に置き換わりました。これがTransistor-Transistor Logic、TTLです。TTLは1970年代の後半に登場し、さらに改良が加えられて、1990年代までデジタル回路の主役として使われました。しかし、この授業で後に紹介するCMOS回路の発達により、今では全く使われなくなりました。上の図がTTLの回路です。かなり複雑で、実は大信号増幅回路のテクニックを色々使っています。

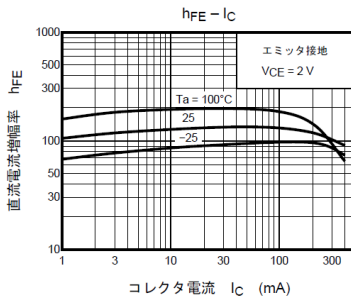
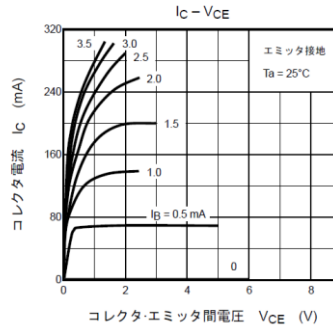
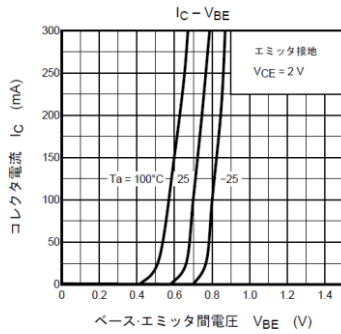
トランジスタ素子

- 2SAXXX → PNP型小信号用
- 2SBXXX → PNP型パワー用
- 2SCXXX → NPN型小信号用
- 2SDXXX → NPN型パワー用
- 2SFXXX → サイリスタ
- 2SJXXX → Pch 電解効果型トランジスタ
- 2SKXXX → Nch 電解効果型トランジスタ

では最後に実際のトランジスタ素子を紹介しておきましょう。大信号増幅回路を使って論理ゲートを作る方式は絶滅しましたが、バイポーラトランジスタは、今でも主にパワー制御用に生き残っています。素子の番号にはルールがあって、2Sまでは共通で、3番目の記号で素子を区別します。2SFXXXのサイリスタは、トランジスタを2つ組み合わせて作る電力制御用の素子です。JとKはこの授業の後の方に紹介する電界効果型トランジスタ、FETです。

トランジスタの特性: 実例(東芝2SC1627A)

http://www.semicon.toshiba.co.jp/docs/datasheet/ja/Transistor/2SC1627A_ja_datasheet_061107.pdf



- $V_{BE} - I_B$ 特性は省略されている。
→ その代わりに $V_{BE} - I_C$ 特性がある。

$I_C = h_{FE} I_B$ つまり、 I_C と I_B は比例しているので
 $V_{BE} - I_C$ 特性と $V_{BE} - I_B$ 特性は同じ形になる

- 温度によって特性が違う。

実例として、東芝の2SC1627の特性を紹介します。理想化された特性からは若干ずれていますが、まずまずいい線行っているのがわかると思います。

トランジスタ素子の実際

- 現在、個別素子で生き残っているのはパワー制御用が多い
- アナログICの中で使われる
 - ラジオ用IC
 - オーディオ用IC
- 一般増幅用途にはオペアンプが使われる
- デジタル用途ではCMOSが使われる

バイポーラトランジスタは、アナログICの中に使われて生き残っています。ラジオ用IC,オーディオ用ICの中で使われています。それ以外のアナログ回路では後に紹介するオペアンプが用いられ、デジタル回路にはCMOSが主に使われます。

今日のポイント

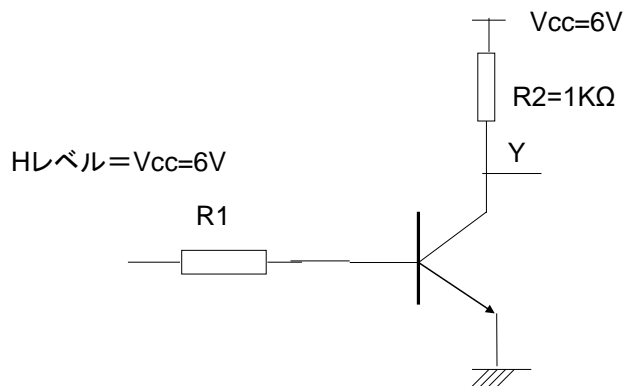
1. トランジスタの増幅の基本はエミッタ接地
 - 不飽和領域では、コレクタ電流はベース電流によって変化
 - 飽和領域ではON(コレクタ-エミッタが繋がっている)かOFF(コレクタ-エミッタが切れている)

2. 小信号増幅回路ではバイアス電流を流して動作点を適切に設定する



インフォ丸がまとめた今日のポイントはこの2つです。小信号増幅回路は、増幅する信号は微小変化の交流を考えますが、バイアスの設定は直流的に行う必要があります。この辺が最初混乱するところなので注意しましょう。

演習2-2 大信号増幅回路



飽和ぎりぎりで用いる場合にベース電流をどのようにすれば良いか？

上の図のトランジスタが6ページの特性を持つとする。飽和ぎりぎりで用いる場合、ベース電流をどのようにすれば良いか？また、このためにR1の値をいくつにすれば良いか？

ちなみに飽和状態になる値を越えてベース電流を流すことを過飽和と呼び、これをやるとON→OFFの遅延が大きくなってしまいます。これはDTLが遅くなる一つの原因です。ただし、飽和ぎりぎりで使うと別に困ったことが起きます。これもまた後ほど勉強します。