

トランジスタについて

Wikipediaから、トランジスタの歴史を引用しました。

最初のトランジスタは、ベル研究所の理論物理学者のジョン・バーディーンと実験物理学者のウォルター・ブラッテンは、半導体の表面における電子的研究の過程で、高純度のゲルマニウム単結晶に、極めて近づけて立てた2本の針の片方に電流を流すと、もう片方に大きな電流が流れるという現象を発見した。最初のトランジスタである、点接触型トランジスタの発見である。固体物理学部門のリーダーだったウィリアム・ショックレーは、この現象を増幅利用できる可能性に気づき、その後数ヶ月間に大いに研究した。この研究は、個体による増幅素子の発明として、1948年6月30日に3人の連名で発表された。この3人は、この功績により、1956年のノーベル物理学賞を受賞している。との事です。

実用化につながった、ベル研究所の発見、発明以前に、1925年、1934年に、現在の電界効果トランジスタ(FET)に近い発明の特許を取得している。とありますが、理論だけで、実験が行われてなかったのか、この発明に関しては、詳細は分かりません。

トランジスタは、大きく分けてバイポーラ型とFET(電界効果型トランジスタ)、それとIGBTの3種類があります。調べてみるとさらに細かくいろんな種類がありましたので紹介します。

①、バイポーラトランジスタ:

P型とN型を接合したもので、エミッタ、ベース、コレクタと呼ばれる端子を持ちます。一般にただトランジスタといえば、このタイプを指します。P型の両端をN型で挟んだNPN型、N型の両端をP型で挟んだPNP型があり、ベース、エミッタ間を流れる電流によって、コレクタ、エミッタ間の電流を制御します。

特性が等しい NPN型と PNP型の 一組(例: 2SC1815 と 2SA1015)を コンプリメンタリと呼びます。



材料に ゲルマニウムが使われていた 1960年代の初期は、PNP型が 殆どでしたが (このため、真空管回路とは逆に プラス電位が 接地されていました。) シリコンが 使われるようになった 1970年代以降は 真空管回路と同様にマイナス電位を接地する NPN型が、主流になります。

②、電界効果トランジスタ(FET) または ユニポーラトランジスタ

ゲートの電圧(チャンネルの電界)によって制御する方式のトランジスタです。ゲート電極が 半導体酸化膜の絶縁体を 介している物を特に MOS FET と 呼びます。

絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)

ゲート部に電界効果トランジスタが組み込まれた バイポーラトランジスタです。 電圧制御で大きな電力を取り扱えるので、大電力のスイッチング(たとえば電車や 電気機関車のモーター制御装置など) 使用されてます。

③、トレンチMOS構造アシストバイポーラ動作 FET (GTBT)

ビルトイン電位によるチャネルの空乏化と、キャリア注入による空乏層解消及び伝導度変調により、遮断状態は FETのように動作するにも関わらず 同通状態では FETと バイポーラトランジスタの混成したような動作となるトランジスタです。

④、ユニジャンクショントランジスタ(UJT)

2つのベース端子を持つ N型半導体と エミッタ端子を持つ P型半導体とを接合した物で サイリスタのトリガ素子として開発されました。

安定な高出力パルスを得る事が出来ます。3つの電極を持つため、トランジスタという名前があるが、本質的にはトランジスタと無縁の1つの接合しか持たない構造（単接合）のユニークな半導体素子です。後述のPUTの台頭により姿を消しました。

⑤ プログラマブルUJT（PUT）

動作特性を可変としたUJT。UJT同様、サイリスタのトリガ素子として開発されました。本質はトランジスタではなく、これ自体4つの接合を持つNゲートサイリスタである。既に日本メーカー製の物は、全て製造中止になっている。

⑥ フォトトランジスタ:

光信号によって電流を制御するトランジスタである。パッケージには、光を透過する樹脂または、ガラスが用いられ、一般的には（光線入力が、ベース電流を代用するため）

ベース端子の無い2端子素子の形状になっています。主に光センサとして用いられます。同一パッケージ内に発光素子と組み合わせて封止したフォトカップは、電源系統の異なる回路間で、絶縁を保ったまま信号伝達するのに用いられます。

⑦ 静電誘導型トランジスタ（SIT）

静電誘導効果を利用したもので、チャネル抵抗を極限まで減少させるためチャネルを短くし、チャネル電流が飽和しないようにしたものです。高速動作・低損失で、信号波形の忠実な増幅が可能です。

⑧、ダーリントトランジスタ:

バイポーラトランジスタの一種です。電流増幅率を大きくするためにトランジスタの出力を、別のトランジスタの入力にする接続方をダーリントン接続といいます。一つのパッケージ内でこの接続を行い、外観としては一般のトランジスタ

と同様な物を、ダーリントトランジスタと呼ぶ事が あります。

⑨ パワーバイポーラトランジスタ:

電動機の制御など、特におおきな電力 (kWオーダー) を 取り扱うために開発されたバイポーラトランジスタの事。 単にパワートランジスタとも呼ばれ、PT_r と 略されます。電気鉄道のインバータ装置やチョッパ装置のスイッチング素子として利用された実績もあるが、鉄道インバータ装置として使うには、耐電圧性能が足りないため降圧処理が必要であり、コスト面で不利であったため普及しなかった。 バイポーラトランジスタは、電流制御型 (ベース端子に流す小さな電流でコレクタ、エミッタ間の大きな電流を制御する。)なので、取り扱う電流が大きくなれば駆動回路も大規模になります。 特にスイッチング用途においては、2000年代に入り、さらに特性がよく電圧駆動型

の パワーMOS FETや 絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) に 置き換えられつつ あります。

日本における半導体素子の型番は、JEITA (社団法人 電子情報技術産業協会) の規格 ED-4001A「個別半導体デバイスの形名」 (1993年制定、2005年改訂) に基づいて、形名と、規格が JEITAに登録されています。それ以前は、JIS C7012:1982 (1993年廃止) で、以下のようにルール付けられていました。

- ・ 2SAxxx PNP型 バイポーラトランジスタ 高周波用
 - ・ 2SBxxx PNP型 バイポーラトランジスタ 低周波用
 - ・ 2SCxxx NPN型 バイポーラトランジスタ 高周波用
 - ・ 2SDxxx NPN型 バイポーラトランジスタ 低周波用
 - ・ 2SFxxx サイリスタ
 - ・ 2SHxxx ユニジャンクショントランジスタ UJT
 - ・ 2SJxxx Pチャネル電界効果型トランジスタ FET
 - ・ 2SKxxx Nチャネル電界効果型トランジスタ FET
- (xxx は、11から始まる番号)

バイポーラ型トランジスタと 電界効果型トランジスタの大半は、このルールに基づいて命名されています。当該JIS規格はすでに廃止されていますが、今日でも通称としてJIS形名または、EJIA（JEITAの前身組織の日本電子機械工業会の略称）型名と呼ばれます。

ここで、高周波用と低周波用を区別する基準は、特に定められておらず、メーカーの任意との事です。

余談：

日本の半導体における名前の付け方ですがダイオードでは、頭に 1 が付いた型名があります。（1N4007、1N4148、1S10 等）トランジスタでは 2S で 始まります。最初の 1 とか 2 は、PN接合面の数を意味しているようで、1 では、接合面が、1つで、2 では、接合面が 2つという話を、過去に聞いた事があるのですがそうすると、例外が出てきます。

2SF の サイリスタは、PNPN接合で、接合面が 3つあります。逆に 2SH の ユニジャンクショントランジスタは、接合面が1つしかありません。まあ、ダイオードと バイポーラトランジスタに限れば、接合面の数と一致してますけどね。

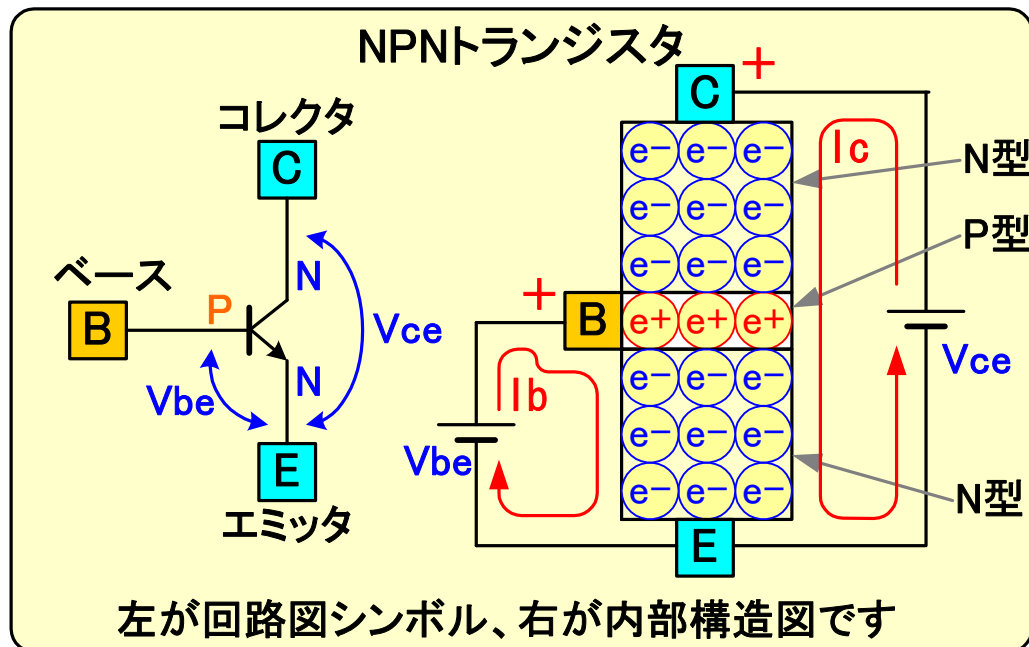
それと、海外メーカーの半導体も 多数日本に、入ってきてるので、日本の半導体の形名は、だんだん忘れ去られる方向に向かっているような気がします。

それとは別に、学生の頃、私は トランジスタの足の並び E C B を エ ク ボ と 習いましたが、海外製のトランジスタは、足の並びが、違います。海外製のFGの 周波数表示のセブンセグメントの 1個セグメントが、付かなくなったので調べたら、壊れたトランジスタは特定できましたが、海外製で同じ物を持ち合わせていません。で、型名でデータシートを調べて、日本製トランジスタで代用しました。確か足を 2本ツイストさせて基板に、マウントしました。

NPN型バイポーラトランジスタの原理

今回は、トランジスタの基本となるバイポーラ型トランジスタの原理を説明します。

前回のダイオードの動画にて、P型半導体と、N型半導体及び、PN接合の説明は、行いましたので、NPN接合のトランジスタの説明から始めます。



まず、構造的にはエミッタとコレクタは、N型半導体であるため電子が過剰にあり、ベースはP型半導体であるため、電子が不足(正孔を持つ)している。よって、コレクタ ベース間、及びベース エミッタ間の2つの接合面境界付近では、自由電子と正孔が引き付け合い消滅します。よって境界付近は、キャリアが存在しないので、空乏層と呼ばれ絶縁物と同じ状態になっています。ここで、ベース、エミッタ間にベースをプラスにして電圧をかけると、ベース エミッタ間電流 I_b が流れます。

- ① ベース端子にかけたプラス電位に引かれ、電子が流れだし、ベースに正孔が発生します。
- ② エミッタに存在する電子がベースに向かい移動します。ベースに供給された正孔を利用し電子が、ベースを通過します。よって I_b が流れる事になります。

③ ベース電流 I_b が流れるという事は、電子が エミッタから、ベースに向かって移動する事になります。しかし、P型半導体の部分は構造的に薄く作られているので、P型半導体に流入してきた電子の多くが、コレクタに 抜け出してしまいます。その後コレクタ エミッタ間電圧 V_{ce} によって、電子が誘導されて コレクタ方向に移動します。

電子が、コレクタに移動するという事は、コレクタから エミッタに向かって コレクタ電流 I_c が流れる という事になります。

通常 V_{be} が、0.7Vを 越えたあたりから、 I_c が流れ始めます。コレクタ端子に接続されている N層を無視すれば PN接合ダイオードと同じで、 V_{be} を あまり上げる事は出来ません。

でも、 V_{be} を僅かに上げると、 I_c は、かなり増えます。

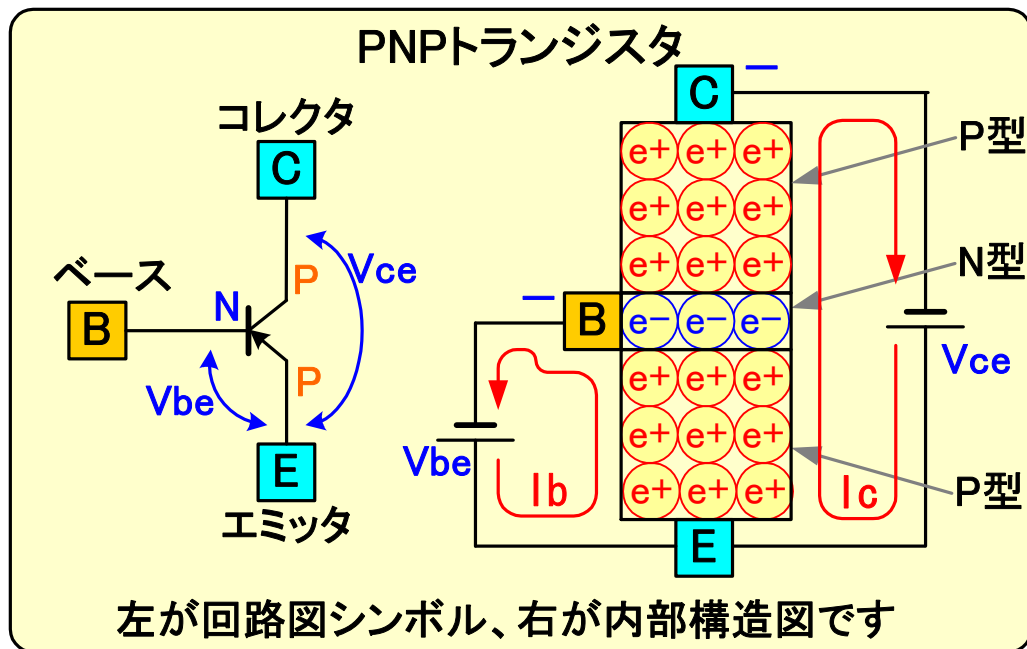
よって、トランジスタは、入力電圧 V_{be} で、出力電流 I_c を 制御しているのでは無く、入力電流 I_b で、出力電流 I_c を制御していると考えた方が正解です。これが、トランジスタが 電流制御素子と呼ばれる所以です。トランジスタでは 直流電流増幅率: h_{fe} というのがあって、凡そ何倍に増幅されるかのパラメータです。

小信号増幅用のトランジスタで 100 ~ 200 ぐらいあります。

PNP型バイポーラトランジスタの原理

PNP型トランジスタは、NPN型の P型半導体と N型半導体が、入れ替わっただけで、基本的な考え方は同じです。と書いてしまうと 身も蓋もない 感じですね。

一応 誤解が無いように 前ページの図を PNP型に置き換えた物を、次ページに付けておきます。



PNP型トランジスタの図です。この図を見て気付いた方もいると思いますが、**エミッタが、プラス側で、ベース、コレクタが マイナス側**になります。私 含め **マイナス接地に慣れている者からすると、ちょっと違和感がある**かもしれません。

昔のゲルマニウムトランジスタは、PNP型が多かったので プラス接地のアンプとか あったようです。

増幅作用:

エミッタ ベース間の僅かな電流変化が、エミッタ コレクタ間の 大きな電流変化となって現れます。エミッタ ベース間の電流を入力信号とし、エミッタ コレクタ間の電流を出力信号とする事で、増幅作用が得られます。コレクタ電流 I_c が、ベース電流 I_b の何倍になるかを示す値を直流電流増幅率 h_{fe} と呼びます。

この値は、数十 ~ 数百倍になります。
 $h_{fe} = I_c / I_b$ です。

スイッチング作用:

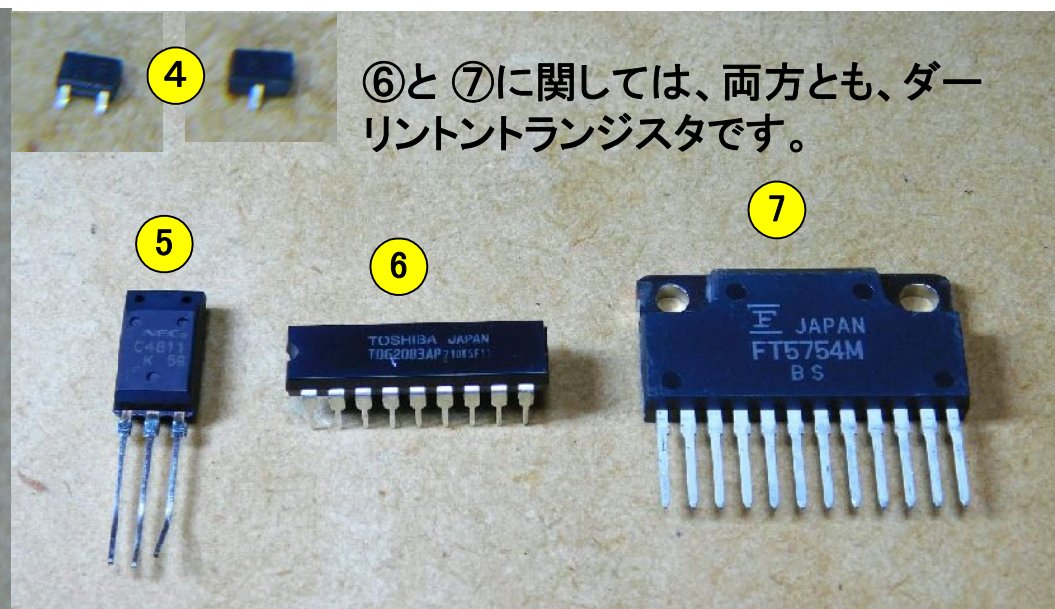
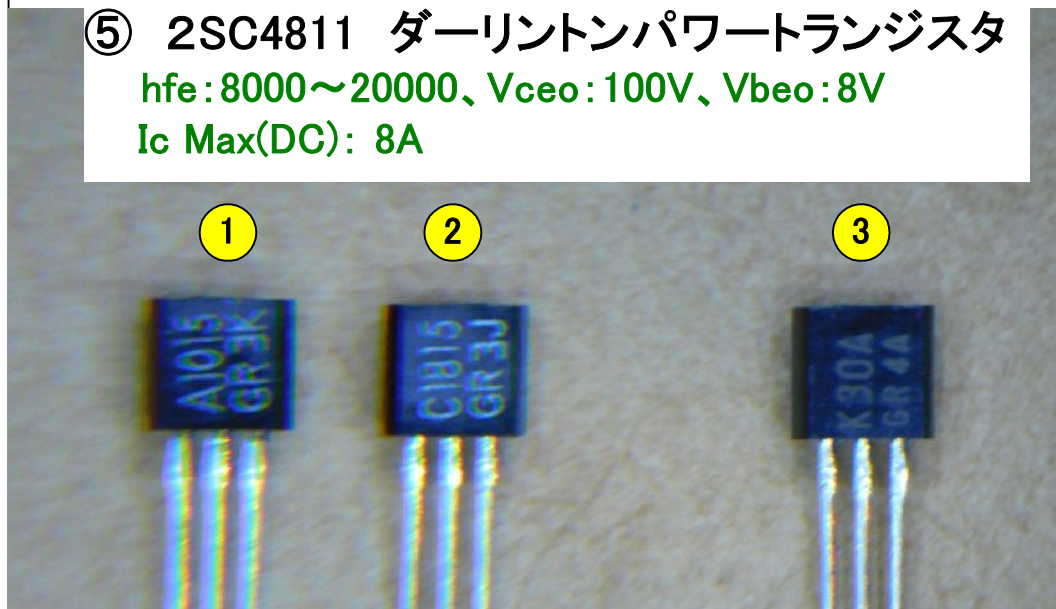
増幅時と同様に 少ないベース電流で、大きいコレクタ電流を 制御できる仕組みを利用します。

電流の大小ではなく ON/OFFだけが制御の対象であるため、飽和領域も使用されます。

手持ちのバイポーラトランジスタの画像

- ① 2SA1015 小信号トランジスタ
- ② 2SC1815 小信号トランジスタ
- ③ 2SK30A 小信号 FET ローノイズ用
(かなり古い FET です)
- ④ 2SC4116 チップトランジスタ 低周波用
hfe: 200~400 本体寸法: 2.0x1.25xH0.9
左の2本足の裏に あと1本足がある。
- ⑤ 2SC4811 ダーリントンパワートランジスタ
hfe: 8000~20000、Vceo: 100V、Vbeo: 8V
Ic Max(DC): 8A

- ⑥ TD62083AP 8素子トランジスタアレイ
出力耐圧: 50V、出力電流: 500mA/ch
フォトカプラ、小型リレー駆動用
マイコンのI/Oポートで直接駆動可能
誘導性負荷用クランプダイオード付き
- ⑦ FT5754M ダーリントントランジスタアレイ
出力耐圧: 100V、出力電流: 3A
4相ユニポーラSTEPモーター駆動用
マイコンのI/Oポートで直接駆動可能
誘導性負荷用クランプダイオード付き



⑥と⑦に関しては、両方とも、ダーリントントランジスタです。

バイポーラトランジスタの使い方

トランジスタの動作原理を説明する図で、電池を 直接トランジスタに 接続している原理図を、結構あちこちで見ます。

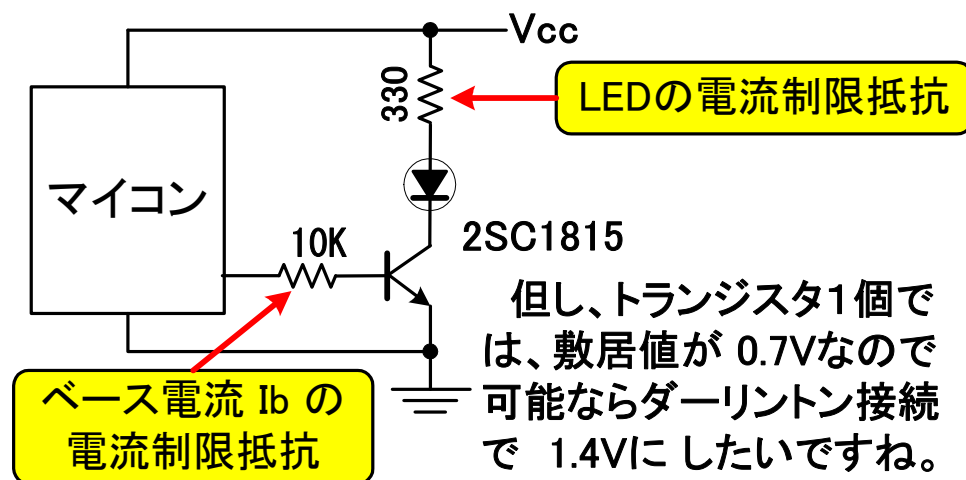
私も 6ページと 8ページに描きました。 **あれは、実際の回路としては、動きません。**

トランジスタを動かすには、適切なバイアス電流を 流す **バイアス回路が 必要**です。 具体的には、**ベース、コレクタに 適切な電流を流すための抵抗を接続**します。

他の事に例えると、赤のLEDを 点灯させる時は、LEDと直列に 電流制限抵抗を入れます。 抵抗を入れずに、5V電源に接続すると一瞬光って、後は 二度と点灯しなくなります。壊したということです。

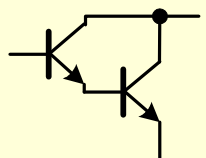
トランジスタも同様の事が、起こります。 よって、抵抗で電流を制限する必要がある あります。 特に、ベースはデリケートです。

増幅回路ではなくて、デジタル回路的な使い方ですが、トランジスタの一番簡単な使い方を、教えます。 トランジスタ1個で オープンコレクタゲートを構成する事です。 オープンコレクタゲートとは、マイコンで、やや電流を流すLEDを駆動する時、数ビット 数がまとまれば、前ページのオープンコレクタアレイを使うのが簡単です。 しかし、1ビットしか使わない場合は、トランジスタ1個で オープンコレクタゲートを構成します。

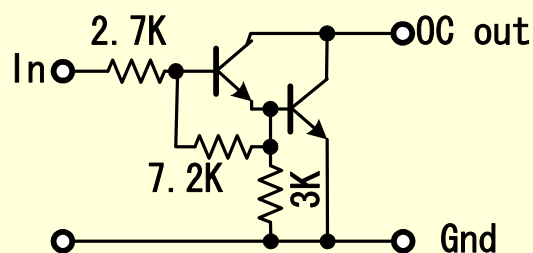


一つ、説明していませんでしたので、ダーリントン接続の回路図、及びダーリントン接続の応用としてオープンコレクタ回路を示しておきます。尚、オープンコレクタにリレーのコイルなど誘導性負荷を接続する時は、コイル両端に**逆起電力を逃がすダイオード**を接続して下さい。

ダーリントン接続

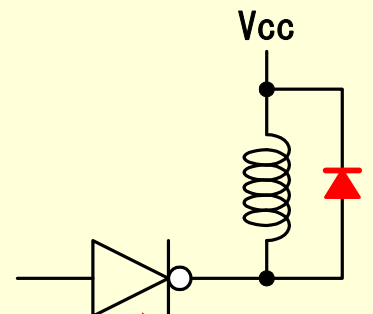


ダーリントン接続の OC回路



ダーリントン接続の OC回路 の 抵抗値は参考値です。ON,OFF動作しか無いデジタル回路の応用例ばかりになってすみません。増幅器の説明を しないといけませんね。

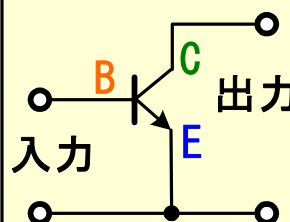
コイル負荷の OC回路



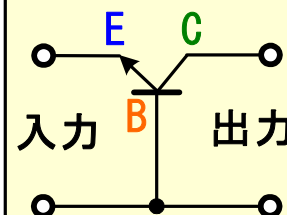
オープンコレクタゲートの
ロジックシンボル

ちょっと隙間が開いていたので、この下に 接地方式の図を 入れようと思います。トランジスタは、エミッタ、ベース、コレクタの 3本足があるので、それを入力と 出力それと、共通極(接地、グランド)として扱います。そうすると3種類の接地方式が、考えられます。

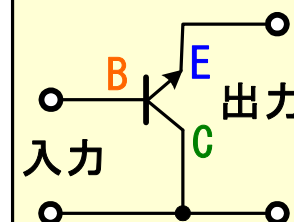
エミッタ接地

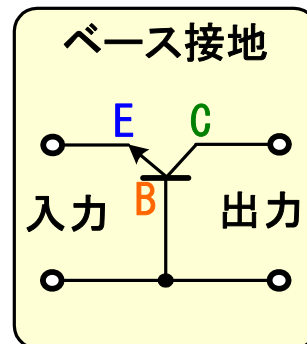
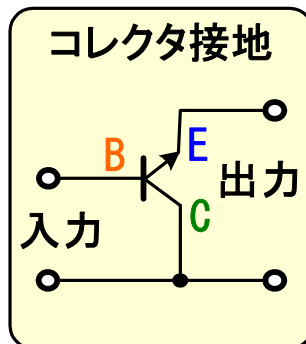
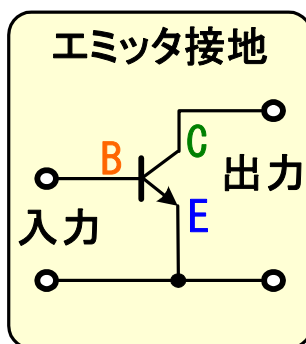


ベース接地



コレクタ接地





| 項目 | エミッタ接地回路 | コレクタ接地回路 | ベース接地回路 |
|-----------|---------------|---------------|---------------|
| 入力インピーダンス | 低い | 高い | 低い |
| 出力インピーダンス | 高い(負荷抵抗と同じ) | 低い | 高い(負荷抵抗と同じ) |
| 電圧利得 | 大きい | ほぼ1 | 大きい |
| 電流利得 | 大きい | 大きい | ほぼ1 |
| 電力利得 | 大きい | エミッタ接地回路より小さい | エミッタ接地回路より小さい |
| 入出力の位相 | 逆相 | 同相 | 同相 |
| 周波数特性 | 良くない | エミッタ接地回路より良い | エミッタ接地回路より良い |

各接地回路の特徴は、左の表のようになります。

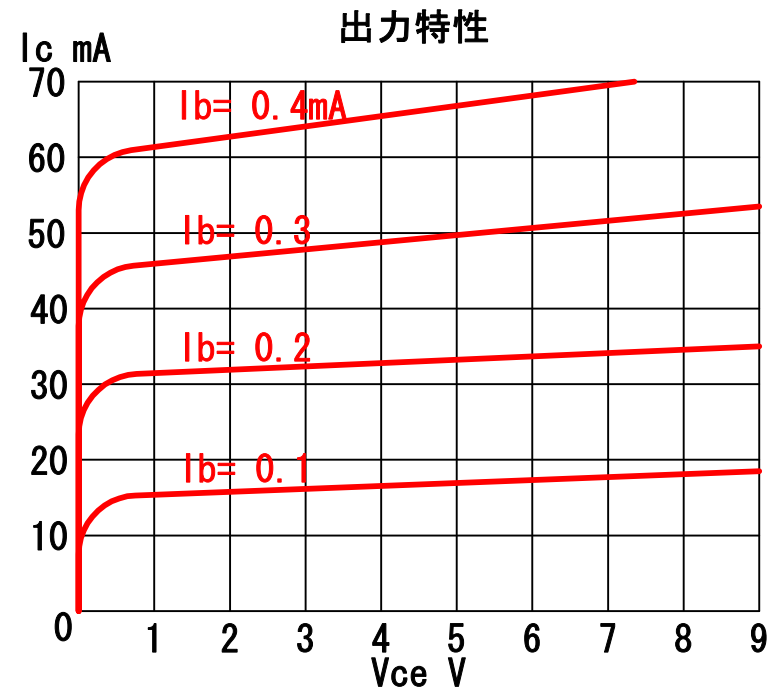
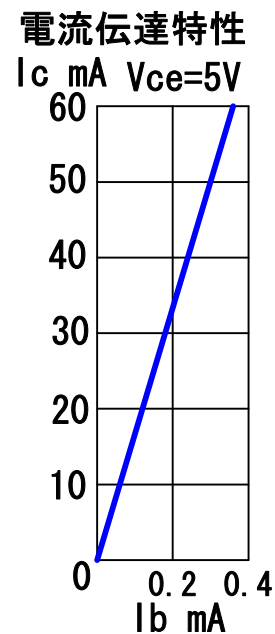
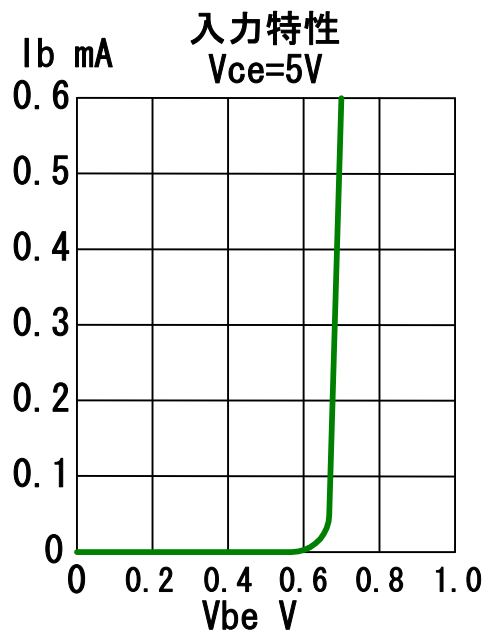
この3つの回路では、**エミッタ接地**が一般的でよく使用されます。

コレクタ接地は、**エミッタフォロア**と呼ばれる事の方が多いと思います。エミッタフォロアは、利得1で、電圧増幅は、しませんが、**Hiインピーダンス入力**で前段に負担をかけません。出力は、**Lowインピーダンス出力**で、信号の駆動力が強いです。よって**バッファ回路**としてよく使用されます。

ベース接地は、私は使用した事が、ありません。遥か昔、ベース接地は、高周波用途で使用する。という話を聞いた事があります。

トランジスタの静特性

トランジスタの電圧と電流を測定し、トランジスタの静特性を調べます。静特性は **入力特性** ($V_{be} \rightarrow I_b$)、**電流伝達特性** ($I_b \rightarrow I_c$)、**出力特性** ($V_{ce} \rightarrow I_c$) を、計ります。ここでは、資料のグラフを真似て表示します。



入力特性: V_{be} が 0.6V以上になると I_b は 大きく指数関数的に 変化します。

電流伝達特性: I_b に対する I_c の 変化特性。ほぼ、リニアに 変化します。

比例関係: $I_c = h_{fe} I_b$ が 成立する。

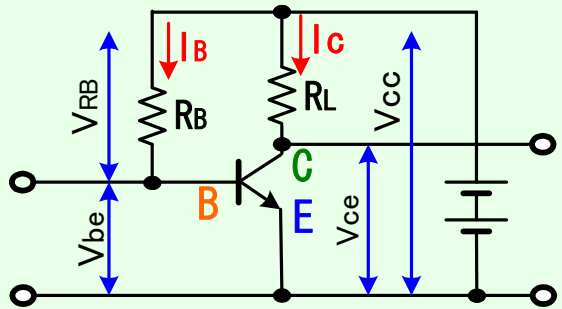
出力特性: I_b を固定して V_{ce} に対する I_c の 変化特性。 V_{be} を変化させても I_c は あまり

影響を 受けませんが、 I_b を 変化させると、大きく変化します。そして電流伝達特性にて、 I_b に対する I_c の 変化が リニアに変化している事がトランジスタは、電流制御素子なんだと、改めて思いました。

固定バイアス回路

最も基本的なバイアス回路である。

固定バイアス回路



$V_{cc} = V_{RB} + V_{be}$ 、 $V_{RB} = I_B \cdot R_B$
なので $V_{cc} = I_B \cdot R_B + V_{be}$
バイアス電流を I_B とすると、抵抗 R_B は

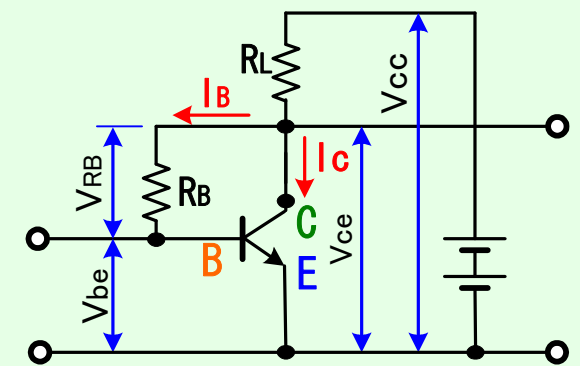
$$R_B = \frac{V_{cc} - V_{be}}{I_B}$$

と、なります。

自己バイアス回路

電圧帰還がかかっているので、温度に対して安定して動作する。

自己バイアス回路



$$V_{ce} = V_{RB} + V_{BE}$$

R_B の電圧降下を
 V_{RB} 、バイアス電
流を I_B とすると

$$V_{RB} = I_B \cdot R_B$$

となり 抵抗 R_B は

$$R_B = \frac{V_{ce} - V_{be}}{I_B}$$

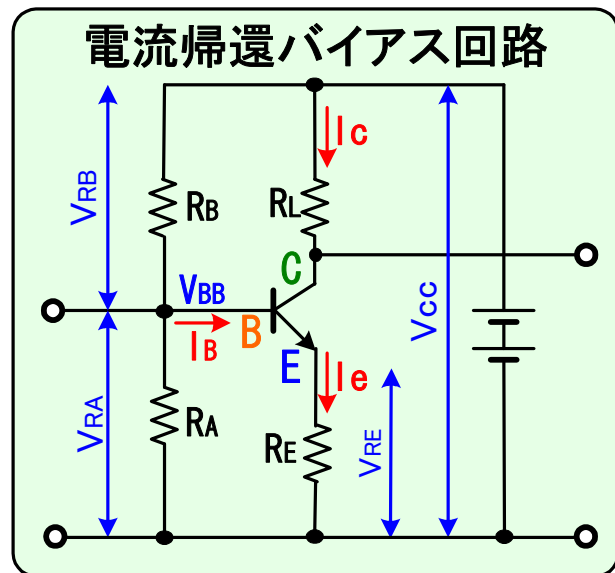
となる。変形すると

$$I_B = \frac{V_{ce} - V_{be}}{R_B}$$

となる。

電流帰還バイアス回路

この回路はエミッタにも抵抗が接続される。動作点を決めるのは V_{BB} である。



$$V_{BB} = \frac{R_A}{R_A + R_B}$$

R_E の電圧降下を V_{RE} とすると、

$$V_{BE} = V_{BB} - V_{RE}$$

となる。バイアス電圧は、3つの抵抗値 R_A 、 R_B 、 R_E で決まる。

(左下の続きです。)

$$V_{RE} = I_E \cdot R_E = R_E (I_C + I_B)$$

との事です。

という事で、今回トランジスタのバイアス回路は

① 固定バイアス回路

一番、シンプルな回路ですが、温度等の影響を受けやすく動作が安定しません。

② 自己バイアス回路

コレクタ抵抗からベースに抵抗で電流を供給すると共に電圧帰還回路になっています。

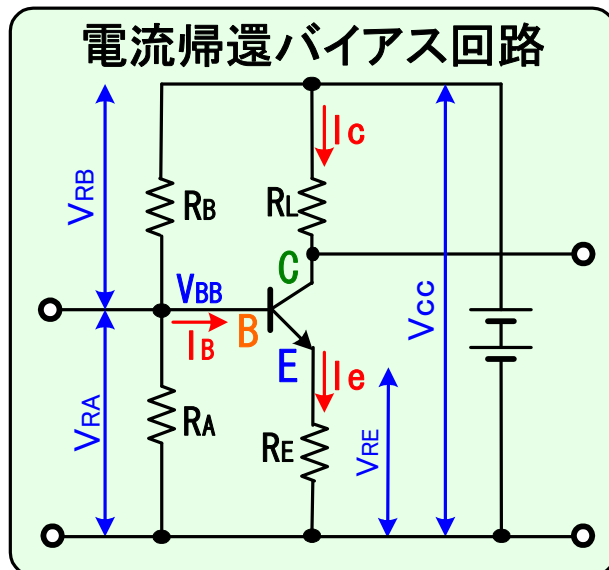
①よりは温度安定性がいいです。

③ 電流帰還バイアス回路

エミッタ抵抗が電流帰還の役割を行います。動作が安定していて、リニアに動作するので回路設計も楽です。小信号増幅回路等に広く利用されています。

今回の実験／電流帰還バイアス回路

今回の実験は、前ページの電流帰還バイアス回路の、抵抗の定数を算出し、ブレッドボード上に回路を組み立てます。そしてFGで信号を入力し、出力をオシロで確認してみます。



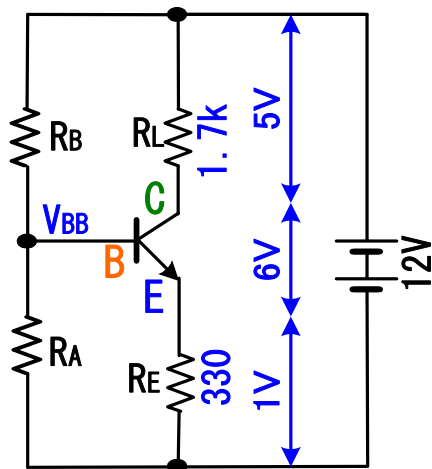
まず、電源電圧は 12V にします。
電圧増幅度を、5倍にします。
コレクタ電流 I_C は 3mA とします。

① コレクタ電流 I_C の値が決まったら、負荷抵抗 R_L を、 $I_C \times R_L$ が だいたい電源電圧の半分ぐらいになるように、決めます。

(R_L に現れる増幅後の出力波形が、上下に振幅する余裕を確保するために、無入力時の $I_C \times R_L$ は 電源電圧の真ん中ぐらいに設定します。この事を 動作点を決める。といいます。) 今回は、 R_E での電圧降下も必要なので、真ん中よりやや上の方に設定します。

$I_C \times R_L$ が、5V になるように決めます。
コレクタ電流 3mA で 負荷抵抗 R_L は、 $5V / 3mA$ で、 $1.67k\Omega$ ぐらいです。

② 次にエミッタ抵抗 R_E を決めます。今回設計する増幅回路は、5倍の電圧増幅度を持たせるため、抵抗 R_L が 決まると同時に エミッタ抵抗 R_E の値も決まります。電流帰還バイアス回路の電圧増幅度は、以下の式で表されるため
電圧増幅度 $A_v = \text{負荷抵抗 } R_L / \text{エミッタ抵抗 } R_E$
の式を変形し、 $R_E = R_L / A_v = 1670 / 5$ は R_E は、約 330Ω となります。



かりに、何も交流信号が入力されて無い状態で、負荷抵抗 R_L 、トランジスタのC-E間、エミッタ抵抗 R_E の電圧は、左図のようになります。

$R_L=5V$ 、 $V_{ce}=6V$ 、 $R_E=1V$

それと、各トランジスタには、コレクタ損失の絶対最大定格をデータシートに記載してありますので、絶対定格の半分以下ぐらいになっているか確認します。例：2SC1815の場合：
 最大コレクタ・エミッタ間電圧 V_{ceo} ： 50V
 最大コレクタ電流 I_c ： 150mA
 最大コレクタ損失 P_c ： 400mW
 h_{fe} ： GRランクで 200 ~ 400

今回は、 $V_{cc}=12V$ で $I_c=3mA$ で、十分余裕があります。

では、ベース電位を決定するための R_A 、 R_B について見て行きます。抵抗 R_E の電圧降下は約 1Vです。ベース電位 V_{BB} は、 $1+V_{be}$ になります。 V_{be} は I_c を数mAしか流さない場合 0.7V 程度です。よって V_{BB} は 1.7V にすれば良い事が、分かります。抵抗 R_B と R_A の分圧で 1.7V を作ればよい事になります。 $12V - 1.7V = 10.3V$
 $R_A : R_B$ の比率は 1.7 : 10.3 という事になります。 h_{fe} を 200 として $I_c=3mA$ であれば、 I_c/h_{fe} で $I_B=15\mu A$ になります。 R_A 、 R_B に流す電流を I_B の 10 倍以上として、 $150\mu A$ になります。切りのいい数字にして 0.2mA にします。すると $12V/0.2mA = 60k\Omega$ という事で、 $R_A = 60 \times 1.7/12$ で、 $R_A = 8.5k\Omega$ 、 $R_B = 60 \times 10.3/12 = 51.5k\Omega$ になります。

という事で、 R_L 、 R_E 、 R_A 、 R_B の 4 つの抵抗値が、計算出来ました。次のページで、回路図に 4 つの抵抗値を入れた物を表示します。

計算で求めた抵抗値ですが、使用する抵抗は、E24ステップの抵抗値なので、きっちり合う値があるとは、限りません。 無ければ近い値または、近い比率で 抵抗値を調整します。

| 抵抗 | 計算値 | E24系抵抗値 | 誤差 |
|----|----------------|---------------|------|
| RL | 1.66k Ω | 1.6k Ω | 4% |
| RE | 330 Ω | 330 Ω | 0% |
| RA | 8.5k Ω | 8.2k Ω | 3.7% |
| RB | 51.5k Ω | 51k Ω | 1% |

RLと RAにて 多少誤差がありますが、上記 E24系の抵抗値で 実験する事にします。

