



トランジスタCooking!

〈第2回〉

トランジスタの弱点とその克服

柴田 肇
Hajime Shibata

● はじめに

連載第1回(2003年10月号)では、トランジスタ1個と抵抗1個のシンプルな回路を作ってみました。ちゃんと設計したとおりに動く面白くてやみつきになります。

増幅の動作についても、その本質は、

- ①トランジスタによる電圧電流変換(g_m)
- ②コレクタ抵抗 R_C による電流電圧変換

の二つであることを調べました。したがって、増幅率 A は、

$$A = -g_m R_C$$

となるのでした。さらに、トランスコンダクタンス g_m がコレクタ電流 I_C に比例するという重要な性質も明らかにしました。

でも、実は設計した回路には隠された弱点があったのです。そこで今回は、連載第1回で触れていなかったトランジスタの弱点について調べてみます。

後半では、調べることで明らかになったトランジスタの弱点を克服するために、電流バイアス、そして差動増幅回路を紹介します。

トランジスタを詳しく調べる

■ トランジスタ各部を流れる電流の関係

● V_{BE} に対する I_C 、 I_E 、 I_B の変化を調べる

第1回ではコレクタ電流とベース-エミッタ間電圧やコレクタ-エミッタ間電圧との関係をいろいろと調べました。

今回はもうちょっとがんばって、第1回で考えていなかったベースやエミッタを流れる電流についても調べましょう。導き出す結論は、トランジスタがちゃんと動いているときは、次式に示すようにコレクタから入ってきた電流のほとんどがエミッタから流れ出すという関係です。

$$I_E \doteq I_C \dots \dots \dots (2-1)$$

そして、これらの関係を盛り込んで、トランジスタ

の等価回路も導き出してみます。

トランジスタの性質を調べるための回路としては第1回と同じく、図2-1に示した回路を使います。まずはこの回路のDC解析を行って、ベース-エミッタ間電圧 V_{BE} に対するコレクタ電流 I_C 、エミッタ電流 I_E 、ベース電流 I_B の変化を調べます。シミュレーション結果を図2-2に示します。

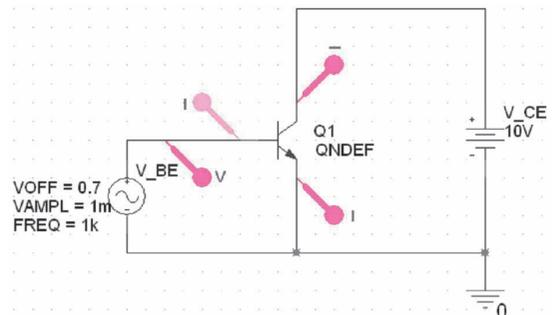
ここで電流の向きと符号の関係に触れておきます。PSpiceでは電流の符号としてトランジスタに入ってくる向きを正としています。エミッタ電流 I_E はマイナスの値になっていますが、これは、トランジスタから流れ出している向きということです。

電流の符号からコレクタ電流、ベース電流はトランジスタに入り、エミッタ電流はトランジスタから出ていく向きに流れることがわかります。ここでは比較しやすくするために、エミッタ電流は-1倍して表示しています。

● コレクタ電流とベース電流は比例する

図2-2からわかるようにベース-エミッタ間電圧(V_{BE})に対する変化は、ベース電流やエミッタ電流も、コレクタ電流と同じ形の指数特性です。大きさは縦軸の目盛りから判断すると、コレクタ電流とエミッタ電流がほぼ同じで、ベース電流はコレクタ電流の1/100程度であるようです。しかし、図2-2ではよくわか

〈図2-1〉ベース電流とコレクタ電流の関係を調べる



らないので、拡大して見てみましょう。

図2-3は図2-2を $V_{BE} = 700$ mV 付近で拡大したものです。マーカーを使って測ると $V_{BE} = 700$ mV のとき、 $I_C = 56.7 \mu\text{A}$ 、 $I_E = 57.3 \mu\text{A}$ 、 $I_B = 567$ nA です。つまり、 I_C と I_B はちょうど100倍、 I_E は I_C に I_B を加えた値になっています。どうやら I_C と I_B は比例関係にあるようですね。

■ ダイオードから考えるトランジスタの動作

● トランジスタをダイオード2個に置き換えて考える

第1回で、バイポーラ・トランジスタの構造はP型半導体をN型半導体で挟み込んだ構造、またはN型半導体をP型半導体で挟み込んだ構造になっていると説明しました。

ダイオードはP型とN型の接合ですから、バイポーラ・トランジスタは二つのダイオードを組み合わせたような素子といえます。

トランジスタを動かすには、ベース-エミッタ間電圧を $V_{BE} \approx 0.7$ V、エミッタ-コレクタ間電圧を $V_{CE} > 0.2$ V とバイアスすることが必要でした。これはベ-

スとエミッタのPN接合のダイオードを順バイアスして、ベースとコレクタのPN接合を逆バイアスすることになります。

ダイオードの電流電圧特性は、

$$I_F = I_S (e^{\frac{V_F}{V_T}} - 1) \dots\dots\dots (2-2)$$

ただし、 I_S ：トランジスタの品種によって決まる飽和電流 [A]、 V_F ：順方向電圧 [V]、 V_T ：熱電圧…半導体の物性で求められ 26 mV@ 27°C

と表すことができるので、ベース電流はベース-エミッタ間のダイオードに流れる電流、

$$I_B = I_{SB} (e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1) \approx I_{SB} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \dots\dots\dots (2-3)$$

ただし、 I_{SB} ：ベース-エミッタ間の飽和電流 [A] です。コレクタ電流はコレクタ-ベースのPN接合が逆バイアスなので、式(2-3)の指数の項が1よりずっと小さくなり無視できます。これを符号に注意しながら書くと、

$$I_C = -I_{SC} (e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1) \approx -I_{SC} \dots\dots\dots (2-4)$$

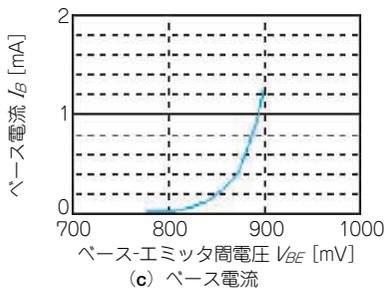
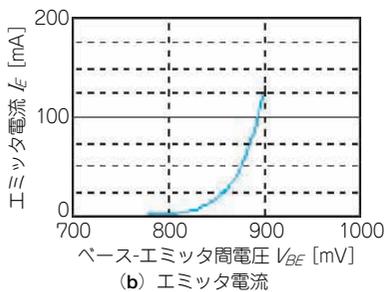
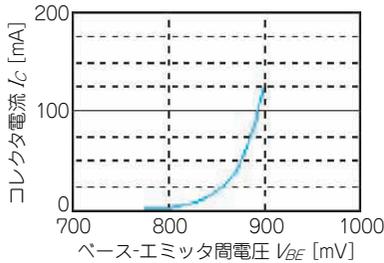
ただし、 I_{SC} ：ベース-コレクタ間の逆方向飽和電流 [A]

となります。つまり、逆方向にバイアスされているときに流れる電流 I_C は、逆方向のバイアス電圧 V_{BC} とは無関係ということになります。

● 電流増幅度 h_{FE} とは

逆方向飽和電流 I_{SC} は、ベース領域の少数キャリア

〈図2-2〉 図2-1の回路のシミュレーション結果



〈図2-3〉 図2-2を $V_{BE} = 700$ mV 付近で拡大した図… I_C が I_B のちょうど100倍になっている

