

第1章

トランジスタによる 増幅のメカニズム

素材としてのトランジスタの理解から…

私は旅先でおいしそうな料理の写真を撮ることが趣味の一つです。写真1-1はそのなかの1枚で、お皿にいっぱいのクリーム付きアップルパイです。アップルパイは一般に、薄い層が幾重にも折り重なり、その層間に煮たリンゴが入っているという複雑な構造をもっています。層が薄く、かつ分離していないとおいしくありません。ただ面白いことに、その複雑な構造とは逆に、小麦粉、バター、水と塩だけでパイ生地はできています。

しかし、それらの材料を巧みに組み合わせることで、もともとの材料からは想像もできないおいしさの料理を作ることができます。使っている材料は同じでも、その材料のもつおいしさを上手に引き出したり、苦味をうまく打ち消したり、調味料もさりげなく使って、おいしく仕上げるのが料理人の腕の見せどころになるのでしょう。

電子回路も一見、複雑な構造をもっています。特に集積回路は薄い層が幾重にも折り重なり、その層間に煮たリンゴは入っていませんが、その構造はアップルパイに負けず劣らず複雑です。ただ面白いことに、その複雑な構造とは逆に、トランジスタや抵抗、コンデンサ、コイルなどのたった数種類の素子からできています。しかし、それらの素子を巧みに組み合わせることで、もともとの素子からは想像もできない機能をもった携帯電話やテレビを作ることができます。

使っているトランジスタは同じでも、トランジスタのもつ性質を上手に引き出したり、ポールをゼロ



写真1-1 クリーム付きアップルパイとコーヒー

でうまく打ち消したり、スパイスもさりげなく使って、おいしく仕上げるのがアナログ回路設計者の腕の見せどころです。

1-1 素材を生かす

ICはたくさんのトランジスタでできている

ICの世界では、トランジスタの形状がとても小さく、たくさんのトランジスタを現実的なコストで使うことができます。現在のトランジスタの上から見たサイズは、小さなもので $0.05\ \mu\text{m}^2$ 程度です。

トランジスタはシリコン基板の表面に作り込まれます。1 mm²のサイズのICなら、2千万個(=1 mm²/0.05 μm^2)ものトランジスタを敷き詰めることができるわけです。アナログ回路では大きなサイズのトランジスタを使うことが多いため、アナログ回路部のトランジスタ数はデジタル回路部に比べてずっと少なくなります。それでも、数百から数千個のトランジスタを使っています。

通常、ICの中には数個から数十個程度のA-Dコンバータ、D-Aコンバータ、アンプなどの機能ブロックが入っています。それぞれの機能ブロックは、数十～数百個のトランジスタの組み合わせでできています。

1～4個の素子を組み合わせたセル回路をマスタすれば怖いものなし

数十～数百個のトランジスタを組み合わせた回路の動作を理解できるのでしょうか？ 実のところ、まじめに計算しようとするとうとトランジスタが1個とか2個でもなかなか大変で、10個にもなるともうお手上げです。そこで、実際のICやアナログ回路では、1～4個程度のトランジスタを使った小さな回路(これらをセル回路、または単にセルと呼ぶことにする)を基本として組み合わせて、より上位のOPアンプや掛け算器などの機能ブロックを作っていきます。セルをベースとして考えれば、トランジスタを100個使った機能ブロックでも数個のよく知ったセルの組み合わせになるという具合です。

この本ではトランジスタの性質をひとつとおり調べたあとで、よく使うセルや面白いセルをいろいろと取り上げて紹介します。そして、ときにはセルを組み合わせてより大規模な機能ブロックやさらにその上のシステムに挑戦します。

1-2 トランジスタのあらまし

トランジスタ一族は、半導体の物性を巧妙に応用した素子で、扱いかたによっていろいろな表情を見せます。しかし、最初の段階から物性に深入りする必要はありません。特に単純な増幅動作を考える場合はそうです。このことは、まったく動作原理の異なる素子、例えば真空管をトランジスタと同じように扱っても、ラジオやオーディオ用のパワー・アンプが作れることから想像できるとおりです。

もちろん、トランジスタ特有の性質を利用する回路もあります。本書ではそのような回路も後ほど紹介します。まず最初は、増幅的を絞って、電子回路の素材である「トランジスタ(transistor)」の表情を見てみることにします。

トランジスタの種類

トランジスタと一口に言っても、

- バイポーラ・トランジスタ (BJT ; Bipolar Junction Transistor)
- 接合型電界効果トランジスタ (JFET ; Junction Filed Effect Transistor)
- MOS型電界効果トランジスタ (MOSFET ; Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
- IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)
- TFT (Thin Film Transistor)

など、いろいろな種類のトランジスタがあります。バイポーラ・トランジスタやMOSFETといった区別は、トランジスタの構造と動作原理の違いを示していますが、そのほかにN型かP型という半導体の極性による分類もあります。

この本では、トランジスタのなかでもバイポーラ・トランジスタのみを扱います。それは、単体の素子が簡単に入手できて実験ができること、半導体材料や加工精度によらず素子の基本的な性質がまったく同じであること、さらにその基本的な性質が極めて美しいことからです。基本的な性質がすべてのバイポーラ・トランジスタで変化しないため、この本に書かれているレベルの回路ではどのバイポーラ・トランジスタを使っても同じように実験することができます。この本ではシミュレーションが多くなっていますが、ぜひ、安いバイポーラ・トランジスタを一袋買ってきて実験もしてみてください。

バイポーラ・トランジスタはICの世界では主流ではなくなりつつあります。とはいえ増幅動作にかぎって言えば、どの種類のトランジスタでも基本的な動作は一緒です。したがって、バイポーラ・トランジスタをマスタすればほかのトランジスタにも応用ができます。

バイポーラ・トランジスタの物理的な構造

図1-1と図1-2に示すのはバイポーラ・トランジスタの物理的な構造です。バイポーラ・トランジスタは、図1-1に示すようにN型半導体でP型半導体をはさんだものと、図1-2に示すようにP型半導体でN型半導体をはさんだものがあります。それぞれをNPN型とPNP型と呼びます。N型またはP型の半導体からそれぞれ端子を取り出すため、バイポーラ・トランジスタには全部で三つの端子があります。これらの端子をそれぞれ、ベース (base)、エミッタ (emitter)、コレクタ (collector) と呼びます。

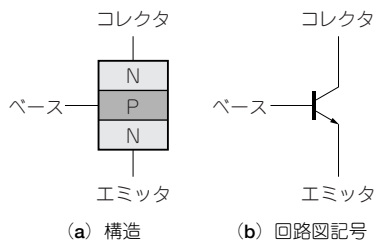


図1-1 NPN型バイポーラ・トランジスタの構造と回路図記号

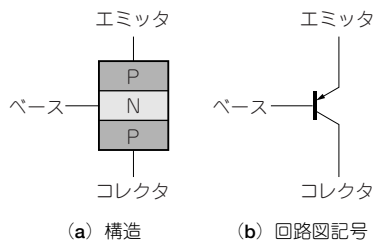


図1-2 PNP型バイポーラ・トランジスタの構造と回路図記号

トランジスタの得意技は「増幅」

トランジスタと増幅(amplification)は切っても切り離すことのできない関係です。なぜなら、増幅は(特殊なダイオードは除くと)トランジスタにしかできない特別な技だからです。では、増幅で何ができるのでしょうか。

微弱な信号の増幅を何回も繰り返すことで、地球の裏側から来る微弱な信号のラジオ放送を聞こえるようにするというのは、増幅動作の典型的な応用例です。そのほかにも、オーディオ・パワー・アンプなどでは、入力された音楽信号をトランジスタが増幅して振幅を大きくし、スピーカを勢いよく駆動します。発振回路では、出力を増幅して入力に戻すことで、発振状態を維持します。さらに、一見すると増幅とは関係ないようにみえるデジタル回路でも、入力信号を信号振幅が飽和するまで増幅して2値化しています。このように、増幅はありとあらゆる回路の基本動作として巧みに利用されています。

1-3 ダイオードのふるまいを理解する

ちょっと寄り道になりますが、トランジスタを理解するまえにダイオード(diode)の動作を見ておきましょう。ダイオードはバイポーラ・トランジスタとよく似た性質があるからです。

V_F が正のときにだけ I_F が流れる

図1-3に示すように、ダイオードはP型半導体とN型半導体を接合させたシンプルな構造をしています。P型半導体から取り出した端子をアノード(anode;陽極)、N型半導体から取り出した端子をカソード(cathode;陰極)といいます。ダイオードは、アノードとカソードの2端子素子なので、アノードを流れる電流はカソードを流れる電流と同じです。したがって、アノード-カソード間の電圧 V_F とダイオードを流れる電流 I_F の関係を調べることで、ダイオードの性質が把握できます。

手始めに、ダイオードの順方向電圧 V_F と順方向電流 I_F の関係を調べてみましょう。順方向とはP型(アノード)からN型(カソード)への方向、逆方向とはN型(カソード)からP型(アノード)への方向のことです。回路の動作を調べるために本書では回路シミュレータ(PSpiceおよびSIMetrix)を使います。詳しい使いかたは文献(1)、(2)を参照してください。本書の付属CD-ROMにはシミュレーション用の回路ファイルが含まれているので、マウスを数回クリックするだけで簡単にシミュレーションができます。ぜひシミュレーションも行って回路動作を体験してみてください(Appendix D参照)。

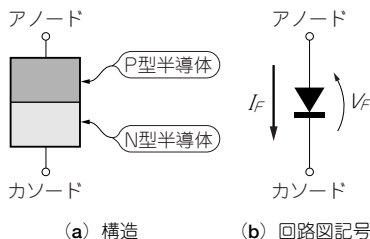


図1-3 ダイオードの構造と回路図記号

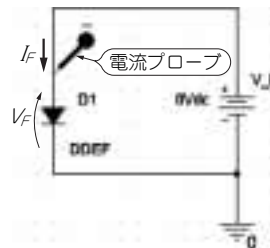


図1-4 ダイオードの特性を測定するシミュレーション回路

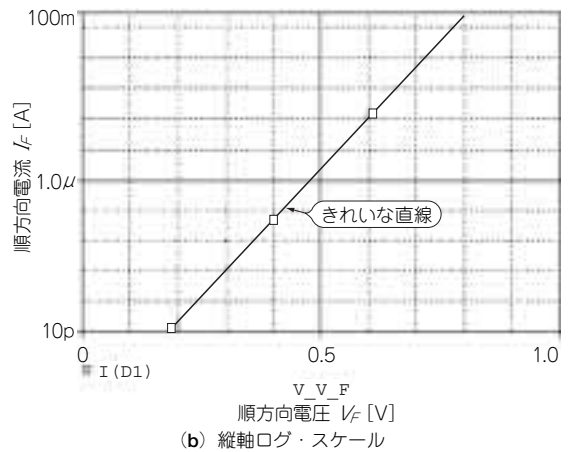
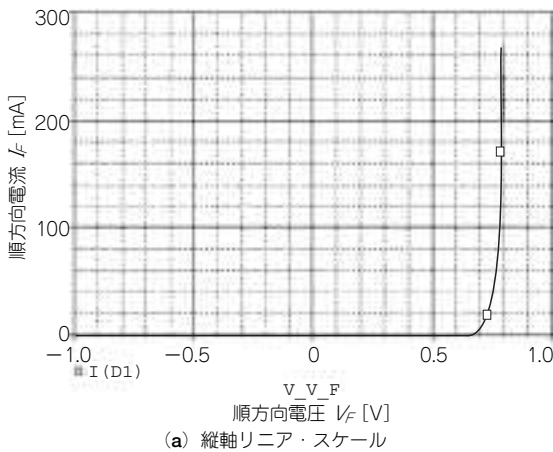


図1-5 ダイオードの I_F - V_F 特性

図1-4のように、回路を描いてDC解析を行います。ダイオードのモデルには、理想的なダイオードのモデル(TORAGI.LIBのDDEFモデル)を使います。DC解析では V_F を -1 Vから 800 mVまでスイープし、 I_F をプロットします。図1-5(a)にシミュレーション結果を示します。 V_F が負のときにほとんど電流は流れず、 V_F が正のときにだけ I_F が流れることがわかります。そして、 V_F が約 0.6 V以上では、 I_F は急激に増えます。

V_F と I_F の関係は指数

縦軸を対数軸に変更して、変化の様子をもう少し詳しく見てみましょう。PSpiceでは、縦軸をダブルクリックすると設定用のダイアログが表示されます。ここで、スケールを「Log」に変更します。図1-5(b)に解析結果を示します。特性線は直線になりました。つまり、 V_F と I_F の間には指数の関係があることがわかります。この関係を数式で表すと、

$$I_F = a \exp \frac{V_F}{b} \dots\dots\dots(1-1)$$

ただし、 a 、 b は定数、 $\exp(x)$ は e^x を表すとなります。このように、ダイオードの I_F - V_F 特性は指数特性になりますが、半導体の物性からも次の指数関係を表す式が導出されます。

$$I_F = I_S \left\{ \exp(qV_F/kT) - 1 \right\} \doteq I_S \exp(V_F/V_T) \dots\dots\dots(1-3)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \dots\dots\dots(1-3)$$

ただし、 I_S ：飽和電流 [A]、 q ：電子の電荷 (1.602×10^{-19}) [C]、
 k ：ボルツマン係数 (1.38×10^{-23}) [J/K]、 T ：絶対温度 [K]
 次式から、 V_T は常温 (27°C)で約 26 mVです。

$$V_T = \frac{kT}{q} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times (273.15 + 27)}{1.602 \times 10^{-19}} \doteq 26 \text{ mV} \dots\dots\dots(1-4)$$

ここで出てきた $V_T \approx 26 \text{ mV}$ という値は熱電圧 (thermal voltage) と呼ばれ、トランジスタ回路のキーになる値ですから覚えておきましょう。

1-4 トランジスタの基本動作

トランジスタはどのように動作するのでしょうか？ 私がもっているバイポーラ・トランジスタに対する一番簡単な動作のイメージは、次のようなものです。

「バイポーラ・トランジスタが生きているときは、入力電圧のベース-エミッタ間電圧 V_{BE} が増える(減ると)、出力電流のコレクタ電流 I_C が増える(減る)」

この様子を図1-6に示します。

ベース-エミッタ間電圧 V_{BE} は、ベース電圧 V_B からエミッタ電圧 V_E を差し引いた電圧値です。「生きている」というのはあいまいな表現ですが、各部に適切な電圧が加わり電流が流れている状態を指しています。これは一番簡単な動作イメージですから、あまり正確とはいえません。測定結果やシミュレーション結果がこの動作イメージと合わなくなる場合もありますが、そのときには少しずつ詳細なイメージに変更して当てはめていけば大丈夫です。

トランジスタはダイオードと同じ指数特性をもつが電圧と電流が分かれている

上記の簡単な動作イメージどおりにバイポーラ・トランジスタが動くかどうか確認してみましょう。本当に、トランジスタはベース-エミッタ間の電圧でコレクタ電流がコントロールされるのでしょうか？ これを確かめるためにシミュレーションを行ってみましょう。

用意する回路を図1-7に示します。この回路ではコレクタの電位として10Vを与えています。これはトランジスタがONして、コレクタ-エミッタ間が導通し始めたときに、コレクタ(電位が高い)からエミッタ(電位が低い)に向かって電流が流れることができるようにするためです。

このように、バイポーラ・トランジスタが動作できるように、 V_{CE} などに適切な電圧や電流を与えることを「バイアス(bias)する」といいます。先ほどは「生きている」という言いかたをしましたが、バイアスするとは生きている状態にする操作ともいえます。

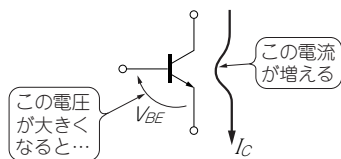


図1-6 一番簡単なバイポーラ・トランジスタの動作イメージ

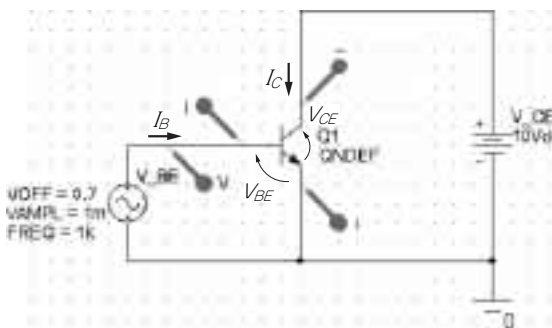


図1-7 図1-6のイメージどおりに動作するかどうかを調べるシミュレーション回路

それでは、ベース-エミッタ間電圧 V_{BE} を0Vから1VまでDCスイープして、コレクタ電流 I_C の変化を見てみましょう。図1-8(a)に解析結果を示します。期待どおりに、ベース-エミッタ間電圧 V_{BE} を変化させるとコレクタ電流 I_C が変化する特性が得られました。

ところで、この特性はどこかで見たような特性ではないでしょうか？ スケールは違いますが、ダイオードの I_F - V_F 特性と同じ特性のようです。図1-8(b)のように対数軸にしてみると、やはり指数特性になっています。

ただし、着目している端子対は違います。ダイオードの場合は、電圧を加える端子と測定する電流の端子が同じでした。しかしバイポーラ・トランジスタの場合は、ベース-エミッタ間に電圧を加え、コレクタからエミッタに流れる電流を測定しており、電圧と電流の関係を規定する端子が分離されています。この性質が、バイポーラ・トランジスタを使って簡単に増幅ができる本質になります。

ついでに V_{CE} も変えて様子を見てみましょう。 V_{CE} を0Vから5Vまで変化させて、 I_C - V_{CE} 特性を解析した結果を図1-9に示します。これを見ると、 V_{CE} がとても低い ($V_{CE} < 0.2$ V) 場合を除いて、 I_C は

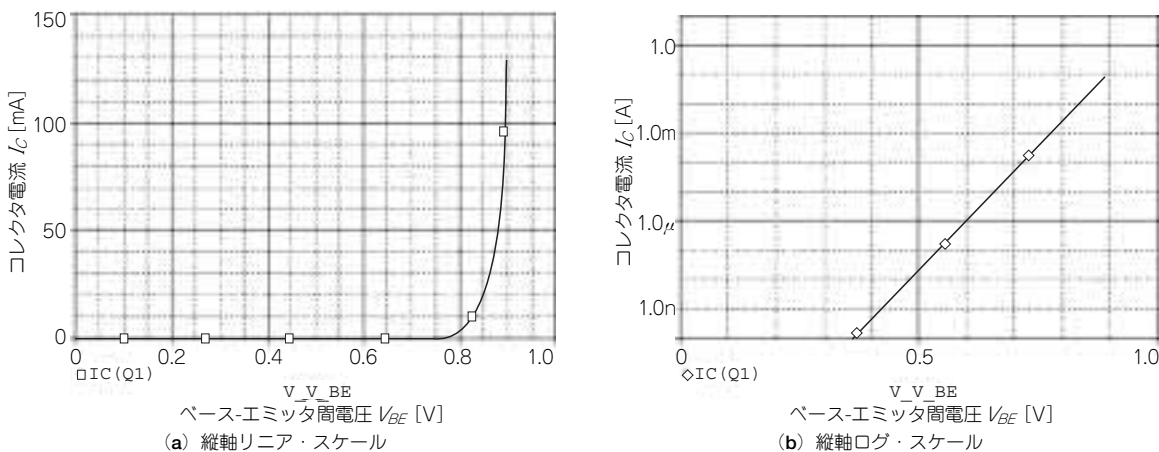


図1-8 バイポーラ・トランジスタの I_C - V_{BE} の関係はダイオードの I_F - V_F 特性と同じ

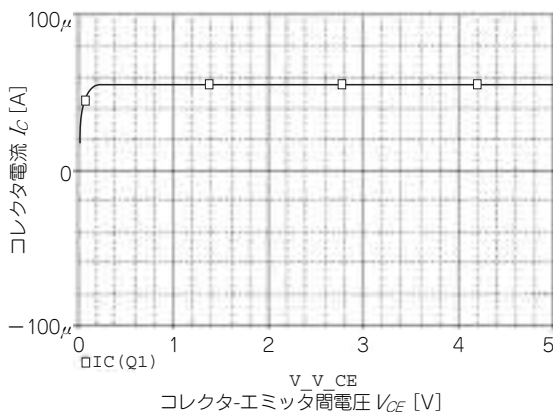


図1-9 V_{CE} を変化させても I_C はほとんど変化しない

変化せず一定値です。つまり、ダイオードと違って V_{CE} ではコレクタ電流 I_C は変化しません。

動作イメージをもう少し詳しくすると…

以上のシミュレーション結果から、先ほどの簡単なイメージをほんの少し詳しくしてみます。すると「バイポーラ・トランジスタが適切にバイアスされているとき、入力電圧のベース-エミッタ間電圧 V_{BE} が増える(減ると)、出力電流のコレクタ電流 I_C は増える(減る)。 I_C - V_{BE} の関係はダイオードと同じ指数特性で $V_{BE} > 0.7\text{ V}$ で電流が流れ出す」

となります。実際に半導体の物性を考えても、ダイオードと同じように、コレクタ電流 I_C は、

$$I_C \doteq I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T} \dots\dots\dots(1-5)$$

と近似できることが知られています。

1-5

トランジスタを使った初めての増幅

V_{BE} を変化させると、 I_C の大きさをコントロールできることがわかりました。それでは、トランジスタのこの性質をうまく使って、入力信号を増幅して出力信号として取り出すにはどうすればよいのでしょうか？

信号を増幅して電圧で取り出すには

条件として、入力も出力も電圧とし、出力振幅と入力振幅の比の増幅率 A はできるだけ大きくすることとします。前述の簡単なバイポーラ・トランジスタの動作イメージでは、出力は電流でした。これを電圧に変換する簡単な方法は、図1-10のように抵抗をコレクタと電源との間に挿入することです。

ここでポイントになるのは、トランジスタはコレクタ電圧の変化を気にしないということです。したがって、コレクタ側に抵抗を入れることでコレクタ電圧が変化しても、バイアスの条件から外れなければ V_{BE} と I_C の関係は保たれます。

図1-10において、コレクタ電流が0のときは、出力電圧 V_{OUT} は、

$$V_{OUT} = V_{CC} \dots\dots\dots(1-6)$$

となり、電源電圧(10 V)と等しくなります。この状態から、コレクタ電流が増加して I_{C0} になると、

$$V_{OUT} = V_{CC} - R_1 I_{C0} \dots\dots\dots(1-7)$$

ただし、 R_1 : コレクタ抵抗(100 k Ω)

と減少していきます。

このように、コレクタ電流の振幅は電圧振幅に変換されます。ただし、 V_{OUT} が0.2 V付近まで下がると、バイアス条件 $V_{CE} > 0.2\text{ V}$ から外れますから、バイポーラ・トランジスタはOFFして動作しなくなります。つまり、出力電圧範囲は電源電圧 V_{CC} から0.2 V程度までに制限されます。

どのくらい増幅されるのか

図1-10の回路で過渡解析を行い、増幅率を調べてみましょう。トランジスタがとても大きな増幅率をもっているとしても出力が制限されないように、振幅が1 mVの微小信号を入力します。バイポーラ・トラ

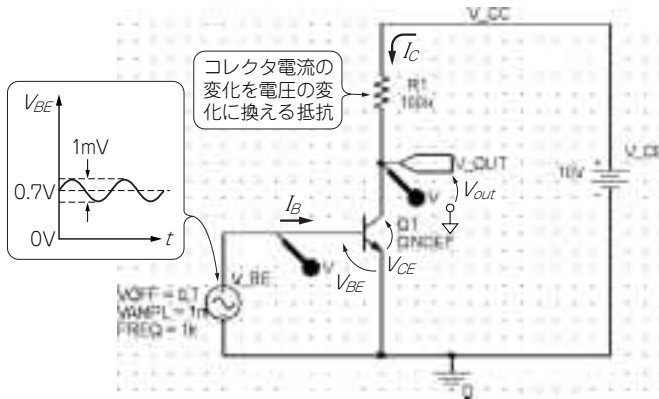


図1-10 コレクタに抵抗を入れるとトランジスタが増幅したコレクタ電流の変化を電圧で取り出せる

表1-1 バイアス電圧と増幅率の関係

バイアス電圧 V_{OFF} [V]	コレクタ電流 I_C [μ A]	増幅率 A
0.664	14.11	-5.5
0.682	28.29	-11
0.700	56.75	-22
0.718	113.8	-44
0.736	228.3	-90

ンジスタを生きている状態にするには $V_{BE} \approx 0.7$ V 前後にバイアスする必要があるので、入力信号電圧 V_{BE} は 0.7 V かさ上げ(バイアス)して、

$$V_{BE} = V_{OFF} + V_{IN} = 0.7 \text{ V} \pm 1 \text{ mV} \dots\dots\dots(1-8)$$

ただし、 V_{OFF} : 入力信号源のオフセット電圧、 V_{IN} : 入力信号源の振幅

とします。図1-11 にシミュレーション結果を示します。見事に入力電圧 (1 mV) が増幅されて出力端子に現れました。出力振幅は、

$$\frac{4.53 \text{ V} - 4.10 \text{ V}}{2} \approx 215 \text{ mV} \dots\dots\dots(1-9)$$

です。出力信号電圧の入力信号電圧に対する比率、つまり増幅率 A [倍] は、

$$A = 215 \text{ mV} \div 1 \text{ mV} = 215 \text{ 倍} \dots\dots\dots(1-10)$$

です。よく見ると、入力電圧が増加するとき出力電圧が減少しているので、-215倍とするのがより正確でしょう。

R_C と増幅率は比例して大きくなる

気を良くして、コレクタ抵抗 R_C などを変化させて様子を見てみましょう。ちょっと調べてみるとわかりますが、 R_C と増幅率は比例します。これは、コレクタ電流の変化ぶん ΔI_{OUT} がコレクタ抵抗 R_C によって電圧に変換される、つまり、

$$\Delta V_{OUT} = -R_C \Delta I_{OUT} \dots\dots\dots(1-11)$$

となっていることからわかります。

入力信号のバイアス電圧 V_{OFF} と増幅率

入力信号源のバイアス電圧 V_{OFF} を変化させるとどうなるでしょうか。図1-10の回路の V_{OFF} を増やしていくと、やがて $V_{CE} < 0.2$ V になって、バイポーラ・トランジスタが動作しなくなるので、 $R_C = 10$ k Ω に変更してから調べてみます。細かく調べてみると、表1-1 のようになります。 V_{OFF} をちょうど 18 mV 増やす(減らす)ごとに、増幅率が2倍(1/2倍)になります。何やら、からくりがありそうですね。

