

シグナルトレーサーを作る

内容

1.はじめに	2
2.何故!「電流帰還バイアス回路を選んだのか?	3
2.1.固定バイアス回路.....	3
2.2 自己バイアス回路.....	3
2.3 電流帰還バイアス回路とは.....	4
2.4 電流帰還バイアス回路の特長.....	4
2.5 電圧増幅度の計算.....	6
3. 電流帰還バイアス回路を使ったシグナルトレーサーの具体的設計	8
4. 各部の役割.....	10
4.1 カップリングコンデンサ C1、C2.....	10
4.2 エミッタ・バイパスコンデンサ C3.....	12
4.3 デカップリング・コンデンサ C4、C5	12
4.4 エミッタ抵抗 R_e の働き	12
4.5 コンデンサの周波数特性	13
5.完成した回路を評価する	14
5.1 Ltspice による評価.....	14
6.実用化に向けて	15
6.1 入出力インピーダンスが与える影響.....	16
6.2 コレクタ接地回路(エミッタフォロワ)の用途.....	16
7.製作.....	18
8. 完成後の使用感.....	20

1.はじめに

今回、シクナルトレーサの製作を学習するに当たり、汎用 IC での製作とトランジスタを使つての製作を考えたが、電子回路の勉強も併せて行うと言う趣旨から、トランジスタでの製作をすることにした。そこで、電子回路を初めて学ぶ方に理解し易い様に、文中で使用する言葉の決まりをいくつか説明します。

説明の中で述べている部分が「どこの抵抗値か」「どこの電流か？」などが分かるように記号を用います。この書き方が電子回路へのアレルギーに成る方も居ると想いますが、馴染んで下されば解り易い事だと思ふようになります。大文字と小文字も意味を持たせて使い分けます。それなので「E」と「e」は別のものです。面倒ですが慣れてください。

また最初の文字は対象となるデバイスや単位を表し、2文字目以降（添え字と言いますが）は何処の、つまり場所を指します。

一般的にはまず「抵抗=R」「コンデンサ=C」「電圧=V」「電流=I」で、「エミッタ=e」「コレクタ=c」「ベース=b」です。

それらを組み合わせると「コレクタ電圧=Vc」「エミッタ電圧=Ve」「コレクタ-エミッタ間電圧=Vce」といったように各部の値を全て記号で表せます。

ちなみに回路図などを見慣れている人は、電源の記号をなんとなく「Vcc」って使っていませんか。それもこれらの説明に使う記号と同じに考えると「コレクタ-コレクタ間電圧」になりますよね。

「Vcc」は電源ラインからコレクタに供給される電圧です。だけどそれじゃ「コレクタ電圧」じゃないかと思ひますよね。「トランジスタのコレクタ端子と一番コレクタ側である電源ラインの間には何も無い状態」つまり「Vcc」ということは「何も邪魔（抵抗）が無い、電源電圧そのもの」ということで解釈していいと思ひます。

ついでに、トランジスタの h_{FE} とは、**エミッタ接地のときの直流電流増幅率**のことです。トランジスタには、hパラメータ（エイチパラメータ）というトランジスタの特性を表す4つのパラメータがあります。

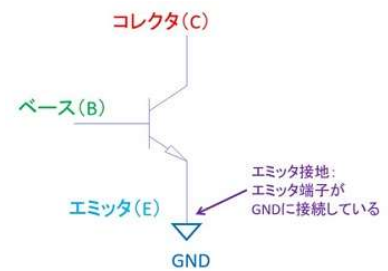
hi：入力インピーダンス(電子回路における交流電流の流れ難さを示す値)

hr：電圧帰還率

hf：電流増幅率

ho：出力アドミッタンス(電子回路における交流電流の流れ易さを示す値)

「hFE」の「e」がありませんが、この「e」はエミッタ接地 (emitter 接地) の頭文字の「e」を表しています。つまり、トランジスタの「hFE」とは、エミッタ接地(e)のときの**直流電流増幅率(hf)**ということになります。エミッタ接地とは、トランジスタのエミッタ端子を GND に落としている (接続している) 回路のことです。一般的にトランジスタの回路は、エミッタ接地で使うことが多いので、トランジスタの電流増幅率というと「hFE」を指す場合がほとんどです。



2.何故!「電流帰還バイアス回路を選んだのか?

制作する回路として「電流帰還バイアス回路」を選択しました。いきなり「電流帰還バイアス回路」を選択する理由は、他の固定バイアス回路、自己バイアス回路との比較をするとお分かりいただけると想いますので、最初に以下の説明をします。

2.1.固定バイアス回路

最も基本的な回路として教科書等では紹介されていますが、使用するトランジスタそれぞれの固有の特性に左右される要素が多く、実験室などでトランジスタの動作を確認する場合以外は使用されません。それでもトランジスタの動作を確認するには一番簡単なので回路動作の説明には向いています。

この回路は

- hFE への依存度が高い事
- hFE そのものがバラつきが大きい事
- hFE の温度特性が悪いこと

が最大の欠点です。つまり再現性が悪く実用性に欠けます。

2.2 自己バイアス回路

ベースバイアスの取り方が電源ではなくコレクタ抵抗を通過した後から取っていることが固定バイアス回路と違うところです。

コレクタ電流 (I_c) が増加するとコレクタ抵抗 (R_c) による電圧降下が大きくなり、

コレクタ電圧が低下することからベース電圧も低下し、ベース電流が減少する。

ベース電流が低下するとコレクタ電流も減少し回路の増幅率が低下する。

コレクタ電流が減少するとコレクタ抵抗による電圧降下が減少し

コレクタ電圧が上昇することからベース電圧も上昇しベース電流が増加する。

ベース電流が増加するとコレクタ電流が増加し回路の増幅率が増加します。

この考え方が帰還 (フィードバック) と言うもので自動調整のもととなります。結局、回路の増幅率が一定に保たれます。

但し、増幅率を決めるためにはバラつきが大きく温度特性が悪いのと hFE の値が必要です。

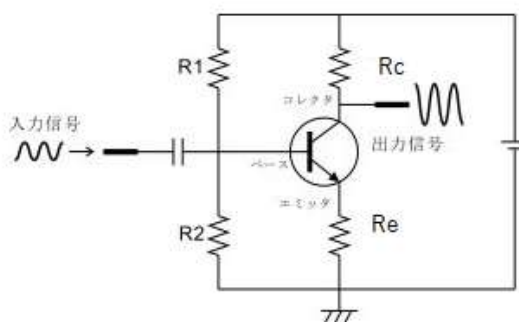
2.3 電流帰還バイアス回路とは

それでは、電流帰還バイアス回路の基礎的な動作を紹介します。電流帰還バイアス回路は抵抗の数が多いため、最初に習うときにはとても難しいと感じる方が多いと思うのですが、この回路はいくつかの要素を近似的に簡略化して扱う事ができるので、その点さえ知ってもらえれば計算がとても簡単になりますし、回路動作の理解もとても楽になると思います。

2.4 電流帰還バイアス回路の特長

”トランジスタの持つ h_{FE} の値とは、ほぼ関係なく回路設計ができる”

という特長を持ったとても便利な回路です。 h_{FE} の値は製造時のバラツキも大きく、周辺温度などの使用環境によっても変動してしまうため、 h_{FE} の値に依存せずに回路設計ができるという電流帰還バイアス回路の特長は回路設計者にとってとても優しいです。



一見すると抵抗の数が多くて難しく見えるのですが、この回路にはいくつか近似して考えることができる部分があるので、まずはそれを先にお伝えできればと思います。

まずベースの手前についている抵抗 $R1$ 、 $R2$ についてですが、この2つの抵抗には

① ベースへ流れていく電流よりも十分大きな電流を流す

という使い方をすることで、 $R1$ 、 $R2$ の接続点からベース方向へ流れていく電流を考えると設計ができるようになります。大体 I_b の 100 倍程度を基準に考えればよいと言われています。

これが電流帰還バイアス回路を使うときの1つ目の”お約束”のようなもので、この条件を守っている限り、ベースへの分流を考えなくてもよくなるので $R1$ 、 $R2$ の部分は単純な抵抗分圧回路として扱う事ができるようになります。

R1、R2 の 2 つの抵抗が単純な抵抗分圧回路になってしまうと、この 2 つの分圧抵抗の比率を変えることによってベースの電位を自由に決定することが出来る様になります。ベースの電位（以後 V_b と表記します）を設定出来るととても良いことがあるので、それをこれから説明します。

この回路ではエミッタの直下に抵抗 R_e というのが接続されているのですが、この抵抗 R_e が電流帰還バイアス回路では非常に重要な役割を果たします。先ほど R1 抵抗と R2 抵抗の分圧の比によってベース電位を自由に設定できるという話をしましたが、この抵抗分圧によって設定されたベース電位を V_b としますと、ベース・エミッタ間電圧 V_{be} と抵抗 R_e での電圧降下 V_{Re} は以下のような関係となります。

$$\textcircled{2} \quad \text{ベース電位 } V_b = \text{ベース・エミッタ間電圧 } V_{be} + \text{抵抗 } R_e \text{ の電圧降下 } V_{Re}$$

ここで V_{be} はトランジスタが ON である限り必ず立ち上がり電圧 0.7V 付近に落ち着くという決まりがあります（電流帰還バイアス回路を使うときの 2 つ目の”お約束”です）この考え方を適用するとベース電位 V_b を設定するという事は、そのまま抵抗 R_e での電圧降下 V_{Re} を設定するという事になります。

$$\textcircled{3} \quad \text{ベース電位 } V_B = \text{立ち上り電圧 } 0.7V + \text{抵抗 } R_e \text{ の電圧降下 } V_{Re}$$

これは回路設計をするにあたってとても都合の良い状態です。なぜなら R1、R2 の抵抗値によってベース電位 V_b および抵抗 R_e での電圧降下 V_{Re} を設定でき、さらに抵抗値 R_e を決めることによって直接コレクタ電流の値を決定することができるからです。コレクタ電流を決定するときは一々バラツキの大きい h_{FE} の値からベース電流を逆算したりする必要はなく、どのような h_{FE} を持つトランジスタでも同じように R1、R2、 R_e の 3 つの抵抗の値だけでコレクタ電流 I_c の値を決めることができるようになります。

$$\begin{aligned} \text{コレクタ電流 } I_c &= \text{抵抗 } R_e \text{ の電圧降下 } V_{Re} / \text{抵抗 } R_e \\ &= (\text{ベース電位 } V_b - 0.7) / \text{抵抗 } R_e \end{aligned}$$

抵抗 R_e にはコレクタ電流だけではなくベース電流も合流してくるのだから、上の式をコレクタ電流の式とは言えないのではない？と考えた方、実はその通りなのですが、ここでも”ベース電流は無視できるほど小さい”という理由で近似して考えます。ベース電流 I_b は数十 μA 程度ですのでコレクタ電流 I_c が 10mA とすれば $I_e = I_b + I_c$ ですから I_e は 10.01mA となります。10mA \doteq 10.01mA と考えられますのでコレクタ電流に着目して考える場合は “ベース電流は無視できるほど小さい” として問題ありません。電流帰還バイアス回路を使うときの 3 つ目の”お約束”です。

アナログ回路では有効数字を 3 桁以内で考えます。4 桁目は誤差の内です。

此処までの説明を読んでみて如何ですか？ 矢張り解らなくなってきましたか？ ご安心ください、実際の設計をしていくと解ってきますから。

増幅器としての周波数特性、雑音特性、温度変化に対する安定度などを考慮した実用的な電流帰還バイアス回路を設計するにはこの他にもいろいろな要素が絡んでくるのですが、上記のような**近似的に扱える部分があることを知っておくだけで**、電流帰還バイアス回路の基本的な動作を理解する助けになると思います。

この仕組みの要点は”フィードバック”という概念にあり、電流帰還バイアス回路の”帰還”というのもこの”フィードバック”の意味になります。フィードバックとは出力結果によって入力値に修正を加え、出力結果が常に一定の状態を保つように自動調整するような機能のことを言います。

なお、上に書いた”Vbe はトランジスタが ON である限り必ず立ち上り電圧 0.7V 付近に落ち着く”という決まり事については、電流帰還バイアス回路に限らず、トランジスタ回路を考えると常に登場する考え方ですので、電子工学を学び始めた最初のころは「とりあえずそういうもの」として覚えてしまっって構わないと思います。

ただ、よくよく”なぜ Vbe は 0.7V 付近に落ち着くのか?”ということを考えていくと物性工学の少し複雑な話になってきます。これは電子が異種の物質の内部を移動する場合に半導体と半導体、金属と金属或いは半導体と金属と言う異種の物質の接合面において乗り越えなければならない障壁の高さを意味していて人為的に変更できるものでは有りません。順方向における障壁の高さは半導体がシリコンの場合 0.6~0.7V であって、ゲルマニウムの場合は 0.2~0.3V 位になります。逆方向においても存在します。

2.5 電圧増幅度の計算

増幅について

増幅とは、光、音響、電気信号などの振幅を増大させること。特に電気信号の微小な変化を、その変化に応じて大きな**電流**や**電圧**などの変化に変えること。

電流帰還バイアス回路は**電圧増幅度**も h_{FE} に関係なく設定することができます。以下に電流帰還バイアス回路の負荷抵抗と電圧増幅度の関係について説明します。

トランジスタのベース・エミッタ間電圧は常に 0.7V 付近に維持されるようになっています。この状態でベースに微小な信号波形を入力するとベース電位がわずかに上下するその動きに連動して抵抗 R_e の電圧 V_{Re} も上下します。(なぜならベース・エミッタ間電圧は常に 0.7V に維持され、ベース電位 = ベース・エミッタ間電圧 0.7V + 抵抗 R_e の電圧降下 V_{Re} であるから。)

抵抗 R_e の電圧が入力信号 V_{in} 分だけ上下するとコレクタ電流 I_c の変化量は以下ようになります。

$$\text{コレクタ電流の変化量} = \text{入力信号 } V_{in} / \text{抵抗 } R_e$$

コレクタ電流が変動するとその動きに連動して負荷抵抗 R_c での電圧降下も大きくなったり小さくなったりします。負荷抵抗 R_c の直下に設定された出力端子の電位変化量 V_{out} は以下のように表すことができます。

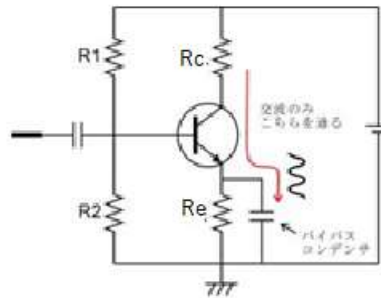
$$\begin{aligned} \text{出力端子の電位変化量 } V_{out} &= \text{負荷抵抗 } R_c \times \text{コレクタ電流の変化量} \\ &= \text{負荷抵抗 } R_c \times \text{入力信号 } V_{in} / \text{抵抗 } R_e \end{aligned}$$

上記の式より電圧増幅度(V_{out} / V_{in})を以下のように表せることが分かります。

$$\text{電圧増幅度 } V_{out} / V_{in} = \text{負荷抵抗 } R_c / \text{抵抗 } R_e$$

上記の式にも h_{FE} は出てきません。電流帰還バイアス回路はバイアス電圧の設計だけでなく電圧増幅度の設計にも h_{FE} を使わずに済むので大変便利な回路です。

ですが抵抗 R_e で電圧降下が発生するとその分出力電位を上下させられる範囲が狭まってしまうので、抵抗 R_e に並列になるようにコンデンサを入れて、交流的に見た時に抵抗 R_e が無かったように見せるというテクニックが良く使われます。このコンデンサのことをバイパスコンデンサと言います。コンデンサは交流信号を素通りさせて直流信号は遮断する特性があるので、バイパスコンデンサを入れても直流で動作しているバイアス回路の設計に影響を与えることはありません。



バイパスコンデンサを抵抗 R_e に入れると交流的には抵抗 R_e が無かったことになるので上記の電圧増幅度の式は使えなくなってしまいます。この場合の電圧増幅度の式は以下ようになります。

$$\text{電圧増幅度 } A_v = h_{FE} \times R_c / h_{ie}$$

R_c : 負荷抵抗

h_{ie} : トランジスタの入力インピーダンス(入力抵抗)

ただ、この電圧増幅度の式には h_{ie} という求めにくいパラメータが使われています。実際に電圧増幅度を求めたい場合は以下の近似式を使った方が便利です。

$$\text{電圧増幅度 } A_v = \text{負荷抵抗 } R_c / \text{抵抗 } R_e$$

3. 電流帰還バイアス回路を使ったシグナルトレーサーの具体的設計

さて、ここからはシグナルトレーサーの製作に役立つように電流帰還バイアス回路を使った具体的な回路を見て行きます。

ここでは使用するトランジスタの hFE は? 回路の電源電圧を 9V とし、電圧増幅度が 4~5 倍になるような増幅器を設計するものとします。

では、最初に何をするかというと、**まず、適当な値としてコレクタ電流 I_c は 2mA 流すことにします。**いや、実は「どこの値から決めていくか」っていうのは本によって異なるというか、本の著者によって異なるというか、設計の手順自体が本によってばらつきがあるのです。恐らくそういう事（本によって手順が違うということ）があるから、初心者は混乱し解り難いのだと思います。

コレクタ電流 I_c の値が決まったら、負荷抵抗 R_C が大体電源電圧の半分ぐらいになるように決めます。（ R_C 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 $I_c \times R_C$ は電源電圧の真ん中ぐらいに設定します。このことを「動作点」を決める。と言います。）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。（オームの法則を思い出してください。 $R=V/I$ ）

$I_c \times R_C$ が 5V になるように決めます。コレクタ電流 I_C は 2mA なので、負荷抵抗 R_C は $5V / I_C 2mA = 2.5k\Omega$ になります。

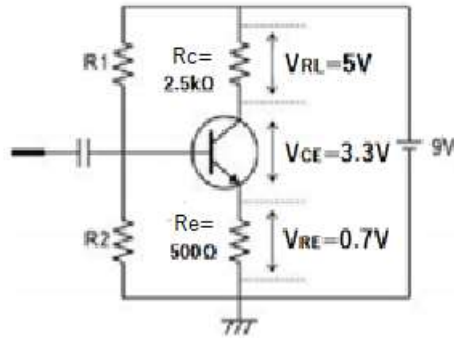
次にエミッタ抵抗 R_e を決めます。今回設計する増幅回路は 5 倍の電圧増幅度を持たせるため、抵抗 R_C が決まると同時に負荷抵抗 R_E の値も決まります。電流帰還バイアス回路の電圧増幅度は以下の式で表されるため

$$\text{電圧増幅度 } A_v = \text{負荷抵抗 } R_C / \text{抵抗 } R_e$$

5 倍の増幅度にする場合は R_e の値を、 $A_v = \text{負荷抵抗 } R_C / \text{抵抗 } R_e = 5$ となるように設定します。

$R_e = \text{負荷抵抗 } R_C / 5$ となり、負荷抵抗 R_C は $2.5k\Omega$ なので、
 $R_e = 500\Omega$ となります。

R_C が $2.5k\Omega$ 、 R_e が 500Ω であるとする、入力に何も信号が入っていない状態でのトランジスタの出力側は以下のようになっています。



上の図でまず確認することはコレクタ損失 P_c が最大定格以下に収まっているかどうかです。コレクタ損失とはコレクタ・エミッタ間で熱となって失われていく電力損失のことで、コレクタ端子とエミッタ端子の間の電位差 V_{ce} にコレクタ電流をかけた値で計算することができます。

コレクタ・エミッタ間の電位差 $V_{CE} =$ 電源電圧 $- R_c$ の電圧降下 $- R_e$ の電圧降下

$$= 9V - (2.5k\Omega \times 2mA) - (400 \times 2mA) = 4.2[V]$$

コレクタ損失 $P_c =$ コレクタ・エミッタ間の電位差 $V_{CE} \times$ コレクタ電流 I_c

$$= 4.2V \times 2mA = 8.4[mW]$$

コレクタ損失の最大定格はトランジスタのデータシートなどで確認します。

次に出力端子の最大振幅についても確認します。この回路の場合、出力端子は電源電圧から $-5V$ の電位を中心に振動することになりますので上側には $5V$ まで、下側にはコレクタ・エミッタ間の電位差 $V_{CE}(4V)$ 分だけ振れる余裕があります。(厳密にはコレクタ・エミッタ間飽和電圧が確保できている必要があります。)

次にベース電位を決定するために抵抗 R_1 と R_2 について見て行きます。抵抗 R_e での電圧降下は $400\Omega \times 2mA = 0.8V$ でしたので、ベース電位は $0.8V +$ 立ち上り電圧 $0.7V$ で $1.5V$ にすれば良いことがわかります。抵抗 R_1 と R_2 の抵抗分圧でこの $1.5V$ を作れば良いことがわかりましたが、ベースへ流れ込む電流を十分小さな値として無視できるように、抵抗 R_1 と R_2 に流れる電流はベース電流から見て十分大きな電流にする必要があります。

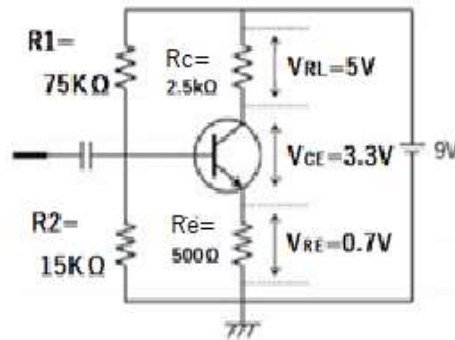
コレクタ電流は $2mA$ であると先に決定しましたから、使用するトランジスタの h_{FE} が 200 だとすれば(実際に作る時には現物を測定して決めてください)、ベースに流れる電流 I_B は $I_B = 2mA / 200$ の、 $0.01mA$ ということになります。 I_B に対して大体 10 倍以上あれば十分大きな電流であると考えられますので、抵抗 R_1 と R_2 に流れる電流を $0.01mA \times 10$ で、 $0.1mA$ 流すことにします。

電源電圧の $9V$ を R_1 と R_2 の抵抗分圧でそれぞれ $7.5V$ と $1.5V$ にすれば良いので R_1 と R_2 はそれぞれ以下の抵抗値とすれば良いことがわかります。

$$R1 = 7.5V / 0.1mA = 75[k\Omega]$$

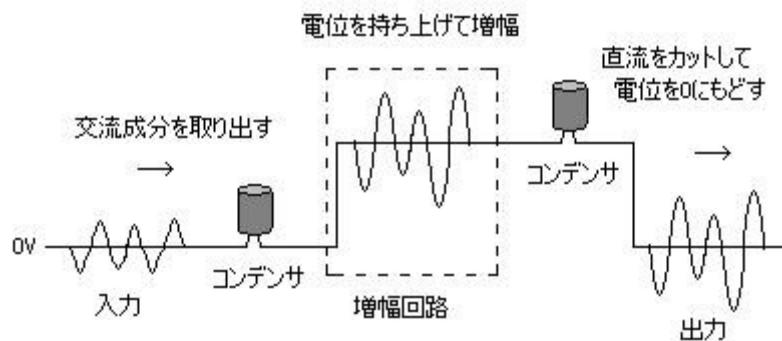
$$R2 = 1.5V / 0.1mA = 15[k\Omega]$$

以上で電流帰還バイアス回路を使った5倍の電圧増幅度を持つ増幅器を設計することができました。



4. 各部の役割

4.1 カップリングコンデンサ C1、C2



次に、カップリング（結合、直流阻止）コンデンサ C1 と C2 の役割は、入力信号から DC 成分(直流成分)を除去することです。

コンデンサは電気を蓄えたり放出したりする「電子部品」のことで、カップリングは「結合」という意味です。電子回路に送られる交流電流は微弱なため、一般的な電子機器では直流電圧に交流信号を合わせて処理します。ですが、IC やトランジスタなどでは動作条件が異なるため、一度合わせた交流信号を外して別の交流信号に合わせる必要があります。この処理を行うのがカップリングコンデンサになります。

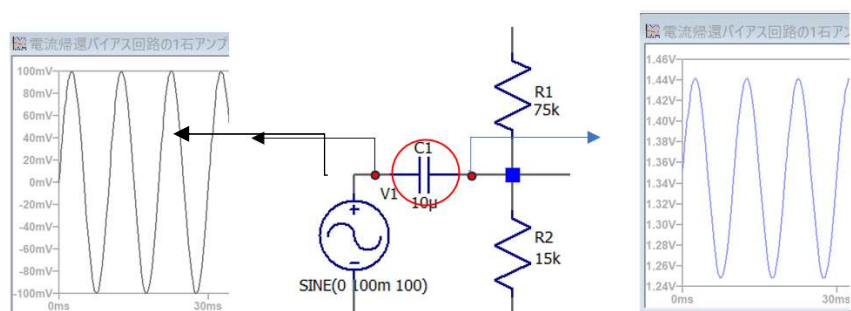
たとえば、増幅回路でそれぞれの回路の入力側にカップリングコンデンサを取り付けます。すると、直流は遮断されて交流電流だけを通過させることが可能となります。つまり、カップリングコンデンサによって回路間を「結合」しているのです。

また、カップリングコンデンサはノイズ対策にも貢献します。異なる電源間を通過する信号線のグラウンドを共通化すると、複数のノイズが発生し倍増します。この時にカップリングコンデンサを使うことで、ノイズの合流を防ぐことが可能となります。

たとえば、複数の電源をまたぐ信号で、グラウンドの電圧降下をなくすことは不可能に近いですが、**DC成分をキャンセルすることで電源間の段差を防ぐことができます。**

簡単な回路でシミュレーションしてみましょう。例えば、下の例は、入力信号は 00V を中心に $\pm 100\text{mV}$ の振幅を持ったサイン波を入力した場合です。カップリングコンデンサを通すと、

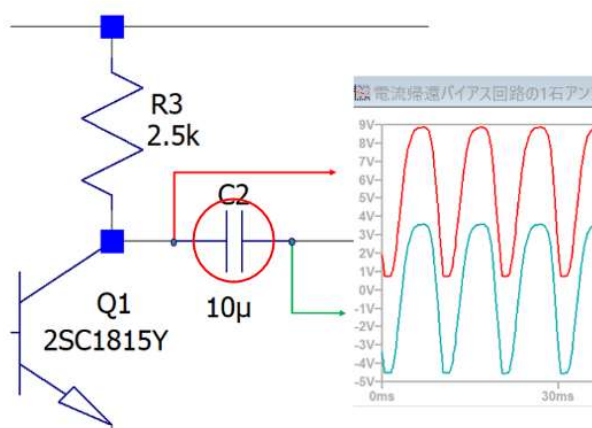
§ 入力側



C1 で入力中心電圧の $\pm 100\text{mV}$ は無視され、入力の振幅だけが出力側へ伝わります。

C1 の出力側の基準は分圧された $V_b=1.4\text{V}$ ですので、出力電圧波形は 1.34V を中心に $\pm 100\text{mV}$ の振幅が現れます。

§ 出力側



同じ様に C2 の手前では電圧増幅された波形が出ています。C2 の後では直流成分が除かれた信号波形に成って居るのが解ります。

カップリングコンデンサを使うことで振幅はそのままに中心電圧のレベルシフトを行うことができるのです。したがって、動作電圧範囲が異なるブロックに交流信号を入力する際に使われます。

入力カップリングコンデンサと出力カップリングコンデンサの値を決めましょう。この二つのコンデンサについては入力出力ともに、10 マイクロにしました。

コンデンサ容量が $10\mu\text{F}$ とした場合、カットオフ周波数が約 31.8Hz ? となっています。

4.2 エミッタ・バイパスコンデンサ C3

ところで参考書やインターネット検索で出てくる回路図の中には R_e と並列にコンデンサが接続されることがよくあります。これって一体何の為に付いているのでしょうか。世間一般ではエミッタ・バイパスコンデンサと呼んでいます。

R_e は R_c の比で増幅度を決める役割を持っていました。ですから R_e はとても重要な抵抗なのですが、 V_b の後に発生した増幅した信号に含まれる交流成分にとっては邪魔な存在となってしまい、交流成分の増幅効率を下げってしまうものになります。そこで増幅された信号の交流成分だけをスムーズにグランドに流してあげて交流成分の増幅効率を確保するのがこのバイパスコンデンサの役割です。

回路的には C_e を付けることによって V_b の直流成分から見れば、 R_e が存在し、交流成分から見れば、あるいは存在しないかのように見えるわけです。もしエミッタバイパスコンデンサをつけるのであれば交流インピーダンスが十分に低くなる値、例えば $100\mu\text{F}$ くらいのコンデンサを付けて置けばよいと思います。

4.3 デカップリング・コンデンサ C4、C5

電源にノイズが載っていると出力にそのノイズが現れます。コンデンサを入れることで電源からのノイズを少なくすることができます。実際には乾電池を使いますのでこの心配はないのですが、外部から交流→直流の電源で稼働させる場合などには、電源のインピーダンスが高かったり、電源と回路を接続する電線が長かったりすると回路が発振する事が有ります。コンデンサを入れることで発振を防止する事が出来ます。この目的で入れるコンデンサは回路の近くに入れる必要が有ります。複数のコンデンサを入れるのは広い範囲の周波数に対応するためです。

デカップリング・コンデンサと言います。コンデンサの前と後ろ（前、後ろは結合の対象となる信号の元と受け取る側によって考えます）

次の図では C4 と C5 は回路全体に対する電源からのノイズを遮断する役目ですので電池側が前或いは上流、回路側が後或いは下流と言う事になります。

4.4 エミッタ抵抗 R_e の働き

電子回路の初心者ということで、この回路の R_e エミッタ抵抗の働きについていろんな観点から学習して行きましょう。

働きの一つ利得の調整でしたね。この 500Ω と $2.5\text{K}\Omega$ の比で決まる増幅率の部分。そしてこれが入ることによって高い入力インピーダンス、すなわち、このトランジスタの入力インピーダンスが 500Ω の電流増幅率倍に成ると言う事です。電流増幅率(hFE)を 100 としましたので、この場合は $50\text{K}\Omega$ になります。高い入力インピーダンスが得られることです。そしてトランジスタの電流が安定します。そして最後に、無歪み化問題です。この増幅回路は如何に歪みを少なくして、忠実な信号増幅回路に繋げるかという観点です。

其の前に疑問が出てきました。増幅率の事ですが、 R_e をとことん低くして零 Ω に近づけて行くと、増幅度はどんどんどんどん上がってゆくはずですよ。話か少し巧過ぎませせんか。矢張りそんなことは無

く、色々と問題が出て来るようです。教科書に拠ると、最終的にこれゼロにした時に、このトランジスタの内部にある微小な抵抗が最終的に増幅度 max を決める事に成ると書いてあります。ただ、この増幅度を高くして行くと、歪率に影響が出てきます。

そして入力インピーダンスに影響が起きます。先程計算したようにこの回路では 50KΩ と非常に高くなっていますが、これが低いと、前段の回路からくる信号に対して、ここの入力インピーダンスが低くなってしまうと、出力インピーダンスとの関係で、ここの電圧信号が下がってしまって、増幅度が失われてしまうという問題があります。そのためにも、入力インピーダンスを高めるという非常に好ましい効果をもたらします。そして無信号時のコレクタ電流を安定化させます。

4.5 コンデンサの周波数特性

コンデンサは基本的に直流を通しません。通すのは交流だけです。

コンデンサは数式的には $Z = \frac{1}{j2\pi f c}$ で考えます。Z はインピーダンスです。純粋な抵抗ではなく複素数

(j) です。

カップリングコンデンサの場合もバイパスコンデンサの場合もこれで考えます。

従って、容量が一定の場合は周波数が高くなればインピーダンスが低くなるので信号は通り易くなり、周波数が低くなればインピーダンスが高くなって信号は通り難くなります。

例えばカップリングコンデンサ（結合コンデンサ）として 10μF を使う場合は $Z = 1 / j\omega C$ を計算して 1KHz で 16 オーム、440Hz で 39.5 オームとなります。

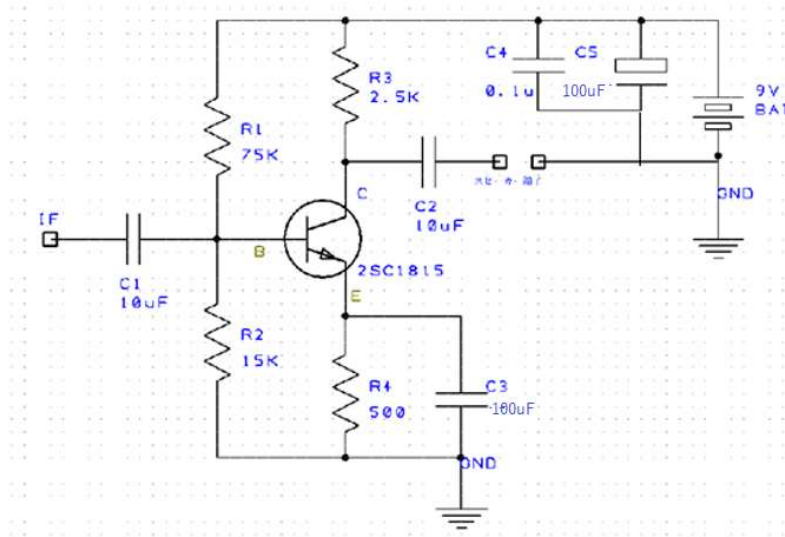
他に交流（信号は全て交流です）増幅回路のバイアスについての考え方が必要となります。

直流の場合と交流の場合では動作点が変わってしまい特に大振幅動作で考慮する必要が有ります。

スピーカーを表した「RC 直列回路」のインピーダンスについては下記をご覧ください。

<https://engineerclimb.com/impedance/>

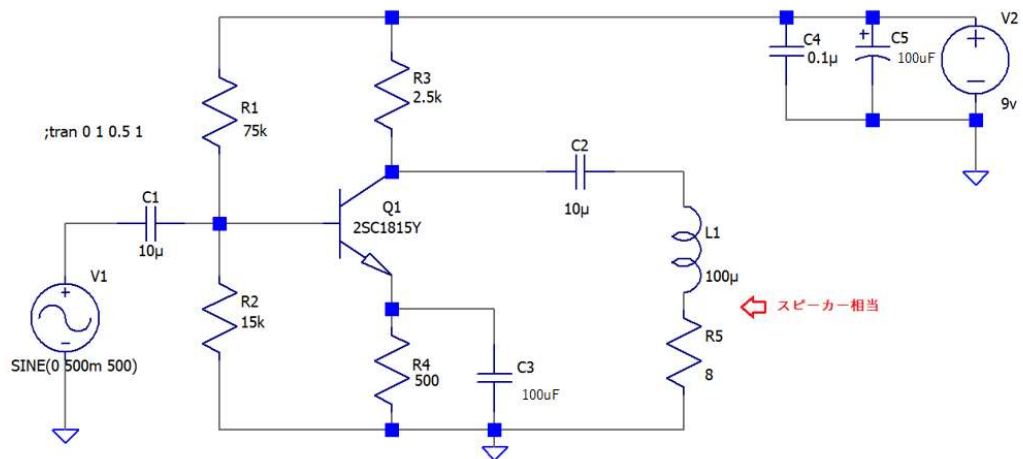
5.完成した回路を評価する



この後やることといえば設計した回路がちゃんと設計通りに動いてくれるかどうかの確認です。実際には作って動作確認をします。その動作確認の代わりに回路シュミレーターLTspiceで行ってみました。

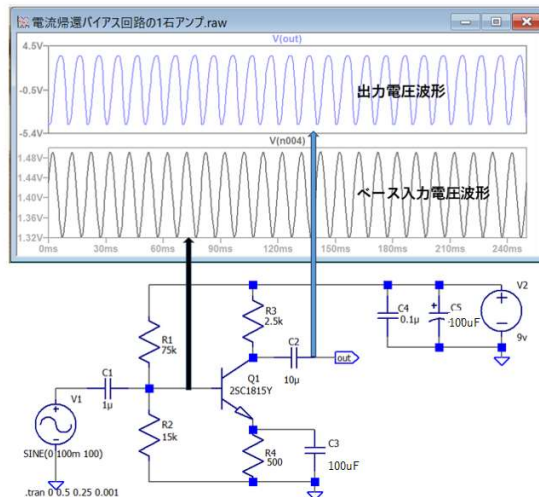
5.1 Ltspice による評価

LTspice 用の回路



スピーカーは8Ωとして、Ltspice の回路には R5=8Ω、コイルは 100uH としました。
この時のインピーダンスは、1kHz の時に 8.02Ωなので、R5=8Ωだけでも問題はないと思います。

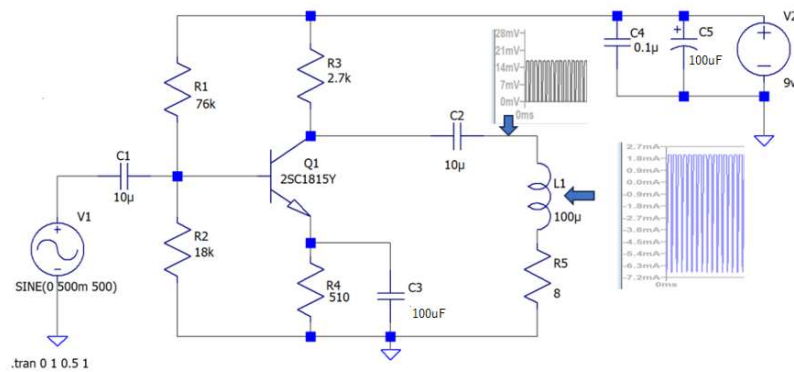
シミュレーションの結果です。



下段がベースの入力信号波形で、上段が出力信号波形です。振幅の上下に偏りが見られますが、シグナルトレーサなら許容できる範囲では？ しかし、増幅率は今一かな!!

6.実用化に向けて

さて、Ltspice で試してみると、出力は 16mV、19mA。これではスピーカーを鳴らす事は出来ません。イヤホンなら何とかできるがやはりスピーカーを鳴らしたいと思います。



ここまで、実際の回路設計をしてきましたが、このような構成で数倍から数十倍程度の増幅率を持つ増幅器を設計することが出来るのは判りました。しかし、この回路の設計の仕方を知ったところで、じゃ何か実用に使おうと思うと、実際、いろいろな問題が出てきて使えないことが解りました。

教科書には良い事しか書いてないですよ。書いてあるのもありました。必ず「コレクタ接地・エミッタフォロワ回路」と抱き合わせて使う必要があると。そこで、この回路の働きについて、理解して行きたいと思います。

この回路は、ベースに信号がやってくると、これに対して、このエミッタの電圧は 0.6v だけ下がった値になっていて、プラスになれば プラス、マイナスになればマイナスということで、電圧に対して エミ

ッタの電圧は追従するような働きをします。 フォロー というのは追従するという意味ですのでベースのやつを追従する回路なのでそう言う呼び方もしています。

このように設計して非常に手軽に5倍のアンプが出来るって言う事で、まあ面白いわけですがけれども、問題が二つあります。つまり、インピーダンスの問題です。

6.1 入出力インピーダンスが与える影響

入力のインピーダンスは、トランジスタのベースと二つのバイアス抵抗の並列で決まるのです。トランジスタのベースと R_e の間のインピーダンスは、簡易的に、この 510Ω に電流増幅率(最初に 100 倍とした)を掛けた形になりますね。なので、この場合は、 $51K\Omega$ 位になります。

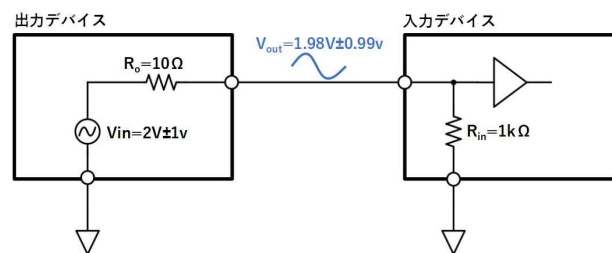
入力のインピーダンスについては説明した通りに決まるのですが、問題は出力インピーダンスですね。これも簡易的にほぼ R_c (ここまでの設計では $2.7K\Omega$)と等しいあたりです。この出力はスピーカーだけではなくて次の回路の入力インピーダンスでもあるのです。

次段の回路の入力インピーダンスが小さいと信号源に負担をかけることになります。特に内部インピーダンスの大きい信号源(例えば、各種センサー)を低入力インピーダンスの増幅器で受けると信号源からの出力電圧は低下し、信号を取り出せません。一般的に入力インピーダンスは大きければ大きいほど良く、理想的には無限大が望ましいとされています。 $10K\Omega$ 位は欲しいと言われていました。

入出力インピーダンスをそれぞれ考えてきましたが、入力デバイスと出力デバイスを接続した時に入出力インピーダンスがどのような影響を与えるか考えます。

入出力インピーダンスはロー出しハイ受けとよく言われます。

この意味は、低いインピーダンスで出力し、入力側を高いインピーダンス回路で受けるということです。ロー出しハイ受けにすることで、出力インピーダンスと入力インピーダンスの抵抗分圧による信号の減衰を小さくすることができるのです。



出力インピーダンスは低いほど良く、入力インピーダンスは高いほど良いことが分かります。

6.2 コレクタ接地回路(エミッタフォロワ)の用途

入力インピーダンスが高く、出力インピーダンスが小さいため、出力インピーダンスの大きい信号源が低インピーダンスの負荷を駆動できるようになります。

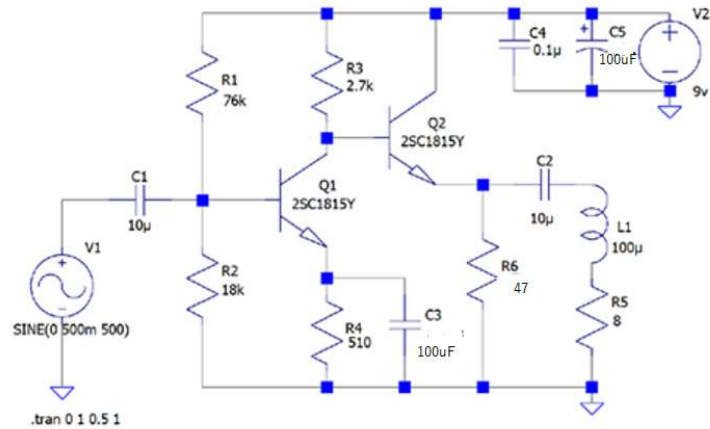
したがって、低インピーダンスのスピーカーを駆動するオーディオアンプなどの増幅回路の出力段にコ

レクタ接地回路は良く使われます。

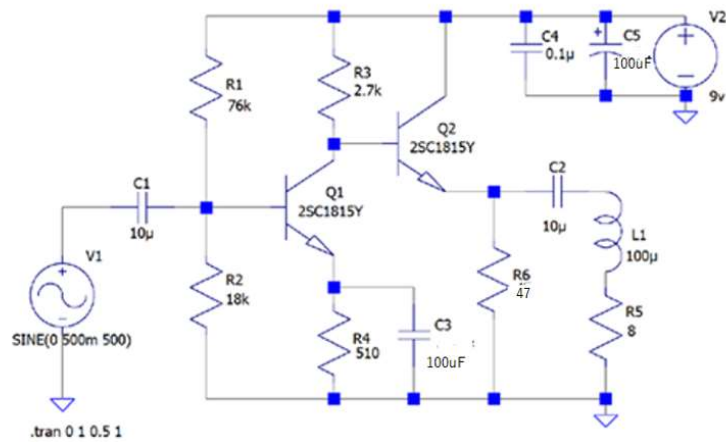
エミッタ接地回路は、出力インピーダンスが高いが電圧利得があります。そのため、エミッタ接地回路で電圧利得を稼ぎ、コレクタ接地回路で出力インピーダンスを低くする2段構成として良く使われます。

それでは、と言う事でQ2とR6を下の回路のように繋ぎました。多少の音の歪みが出るかもしれませんが、シグナルトレーサなのでよしとしましょう。

結果として出力は380mV、46mAと成ったので製作に進むことにしました。



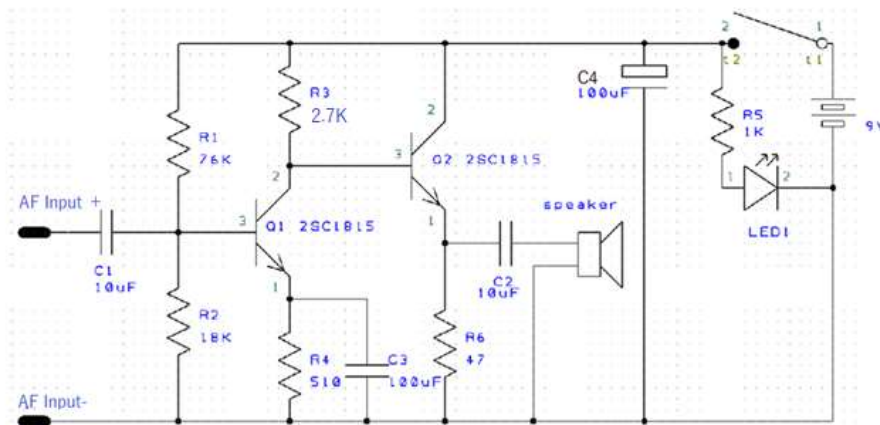
製作するにあたって、現実的に揃う部品の規格に調整したのが次の回路です。



7.製作

此処までは Ltspice 用の回路図なので、製作用の回路図に書き換えました。C4 0.1uF を省略しました。(その結果 C5 が C4 になる)

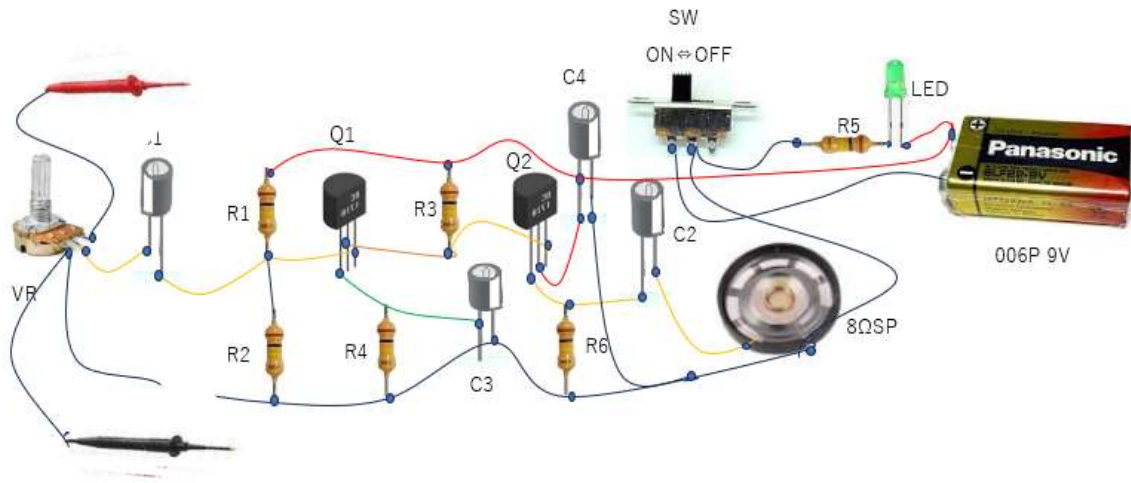
回路図



部品表

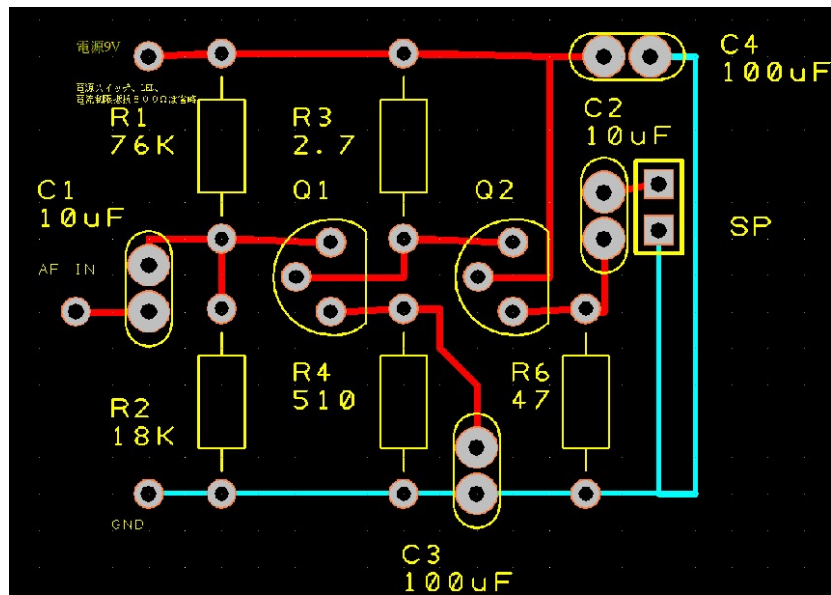
部品記号	規格	個数	部品名	個数
C1	10uF	1	SW	1
C2	10uF	1	電池ケース A3 4本	
C3	100 uF	1	0 0 6 P電池	1
C4	100 uF	1	U基板	1
LED1	3mm	1	配線ケーブル	?
Q1	2SC1815Y	1	スピーカー2.7mm	1
Q2	2SC1815Y	1	テスト棒1式	1
R1	76K	1		
R2	18K	1		
R3	2.7K	1		
R4	510	1		
R6	47	1		

実体配線図



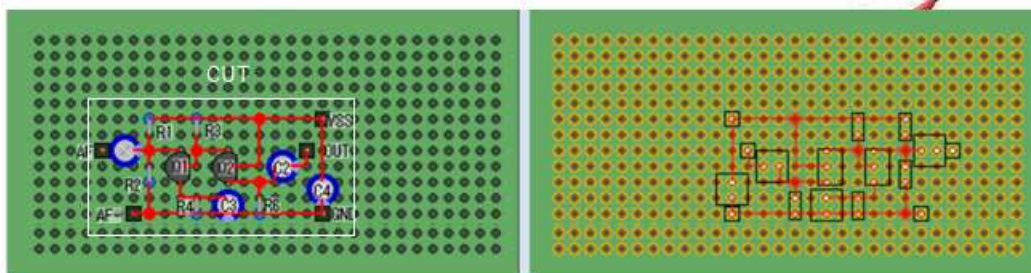
上の回路図を基に部品をユニバーサル基板上に配置し、結線しました。
電源スイッチ、LED(含む抵抗)、AF入力、スピーカー、電源関係は筐体に付属しているの
で基板では不表示です。

基板配置回路図



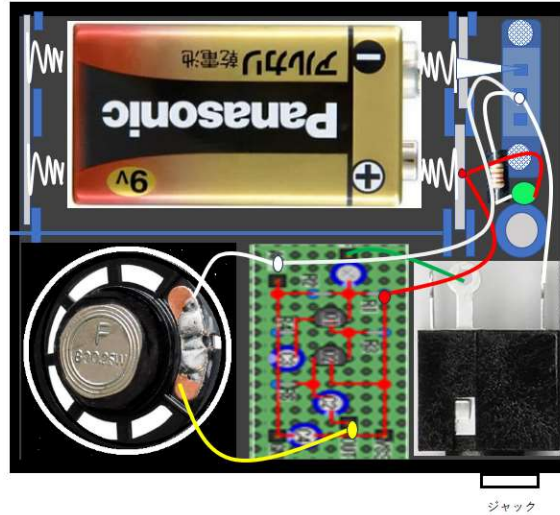
表面

裏面



予定している筐体に部品の仮配置をして実装できるかを評価します。電源を 9V(006P) 乾電池としたので筐体に収容できません。電池ケースの底辺を 0.2~0.3mm 削る必要があります。

実装配線図 (検針部省略)



実際に配置と結線を行い、収容性と実用性を評価した。

完成品



8. 完成後の使用感

スピーカーが 2.7cm 径と小さいので音が小さいですが、大きいスピーカーにすると可成りの音量があります。小さい筐体に収める都合でここは我慢することになりました。

今回は音声信号の検査用に設計したので、高周波信号の検査に使う為には、入力信号はダイオードを通してください。その場合には RF/AF 切り替えスイッチを使うようにして下さい。今回の回路では入

力信号は其の儘の強度ですが、強度調整用には 10K Ω の可変抵抗を C1 の前に挿入してください。SW 付の VR でしたら電源スイッチとしても使えます。