

第4章 発振回路

ラジオでは、いろいろなところで発振回路が登場します。また、増幅回路を製作するときも発振回路の知識が必須となります。ですからラジオにおいては、発振回路も増幅回路と同じく非常に重要なものです。

●発振回路とは

図4-1を用いて発振条件を考えます。出力の β 倍が入力に帰還されたとします。今、出力が帰還され、ゲインがAの増幅回路を通過して、戻ってきたとします。このとき、その出力は $A\beta$ 倍になっています。つまり $A\beta$ は1回だけ、ぐるっと帰還回路と増幅回路を通ったときのゲインを表し、ループゲインとよばれます。このループゲイン $A\beta$ で、発振条件を考えます。

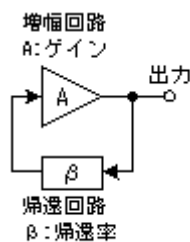


図4-1 発振の原理

$A\beta$ は複素数ですので、 $A\beta = r(\cos\theta + j\sin\theta)$ と表すことができます(j は虚数)。ここで r は $A\beta$ の絶対値、 θ は $A\beta$ の偏角です。1回 $A\beta$ のループを通ると、出力の絶対値が r 倍され、位相が θ 変化します。ですから、 $\theta=0$ で r が1以上ですと、どんどん出力が大きくなります。出力が大きくなり飽和し出すと、 r が下がってきますので、 $r=1$ 、 $\theta=0$ という状態で安定します。この状態が発振状態です。増幅回路において、入力がなくとも出力が発生している状態です。

以上は大体のイメージであり、厳密にはナイキストの安定条件による必要があります。 $A\beta$ は角周波数が増えると複素平面上を動きますが、このときの複素平面上の軌道で判断するものです。しかし、通常の回路では、 $\theta=0$ で $r \geq 1$ 、つまり正帰還でループゲインが1以上のとき発振する、と考えて全く問題がありません。ですから、以下でいろいろな発振回路を取り扱いますが、正帰還でループゲインが1以上のとき発振する、として考えます。

図4-2に単一の周波数を発生させる帰還回路を示します。(a)は共振回路を用いたものです。C2は直流をカットするためのものです。R1とC1, L1の並列共振回路で、ある周波数にピークを持つフィルタを構成します。このピークで発振条件を満たすようにすると、この周波数で発振します。(b)は1次フィルタを3段接続したものです。1次フィルタは前述しましたが、そのときには位相の変化には言及しませんでした。1次フィルタは、シャ断周波数で位相が 45° 変化します。シャ断周波数より高くなると、位相の変化は 90° に漸近します。つまり、1次フィルタでは位相の変化は 90° 以内になります。ですから、 180° 位相変化させるには3段つなぐ必要があります。入力と出力が 180° 位相が違ふ、つまり、ゲインAがマイナスの増幅回路で、 $A\beta$ の絶対値が1以上ならば、3段の1次フィルタで 180° 位相が変化する周波数で発振することになります。

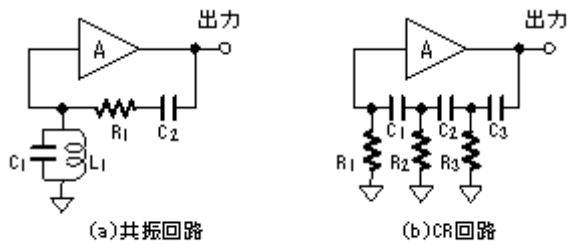


図4-2 単一周波数を発生する帰還回路

では、平坦な周波数特性の帰還回路では、どんな周波数で発振するでしょうか。図4-3(a)は直流も含んだ平坦な周波数特性の帰還回路です。この回路では、直流で発振します。直流で発振とは変な表現ですが、増幅回路の出力がプラスかマイナスのどちらかに振り切れて安定します。ただし、増幅回路が直流も増幅するのが条件です。

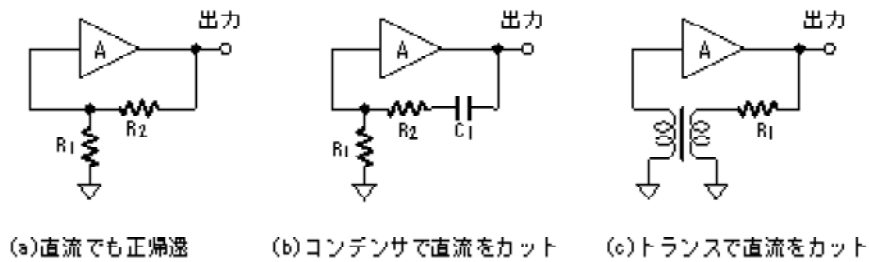


図4-3 平坦な周波数特性の帰還回路

では、直流をカットすると、どうなるでしょうか。(b)はコンデンサで、(c)はトランスで直流をカットしたものです。(b)で、その動作を考えます。増幅回路は理想的なもので、入力インピーダンスが無限大、出力インピーダンスが0とします。また、直流も増幅して、そのゲインは十分あるものとします。図4-4がこの回路の出力になります。コンデンサC1には過渡電流が流れます。その電流で、R1両端に電圧が発生します。この電圧が増幅されますので、出力は図のようにプラスに振り切れます。コンデンサに充電されるにしたがって、時定数 $C1(R1+R2)$ で入力電圧は減少します。そして、出力の飽和を維持できない入力まで下がると、出力電圧が少し下がります。そうすると、入力も下がり、それが正帰還されますので、出力は急速にマイナスに振り切れます。そして、入力もマイナスに瞬時に下がります。この瞬時値V1は、出力V0とコンデンサに充電されている電圧(ほぼV0です)の和が、R1とR2で分圧された電圧です。以上の動作を繰り返すことにより発振します。

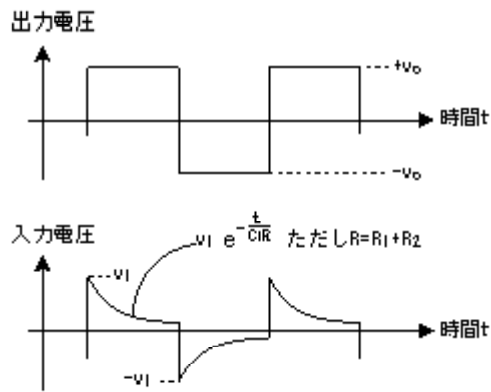


図4-4 図4-3(b)の波形

直流がカットされた平坦な周波数特性の帰還回路では、以上のような動作をして、**図4-4**のような発振波形となります。このような発振回路を、し張発振回路とよんでいます。

●検討方法について

以下でいろいろな発振回路を検討します。このように、たくさんの回路を製作するのは大変です。また、検討回路なので、抵抗等の値もいろいろ変えたくくなります。そこで、私の方法を紹介したいと思います。あくまで私の方法ですので、完全にまねる必要はありません。自分のやりやすい方法を考えていただきたいと思います。ただ、容易に抵抗等の値を変更できるようにしておくことは重要だと思います。電子回路の理解をより深めるためには、抵抗等の値をいろいろと変更してみて、その抵抗等の値の持つ意味を体感することは非常に重要です。

容易に抵抗等の値を変更できるように、IC用の折れるソケットを使用します。**写真4-1**に、使用したIC用の折れるソケットを示します。ピッチが2.54mmの普通のもので、ソケットを用いると静電容量が増えて、ラジオでは影響するのではと思われるかもしれませんが、しかし、この容量はたかだか0.1pFぐらいのもので、ラジオに用いても全く影響はありません。**写真4-1**には、このソケットに挿入できるピンも示しています。このピンを用いると、簡易コネクタが容易にできます。市販のコネクタを用いると、抜き差しが結構大変ですし、場所もとります。この簡易コネクタでは、誤挿入に注意が必要ですが、軽快に検討に使用できます。

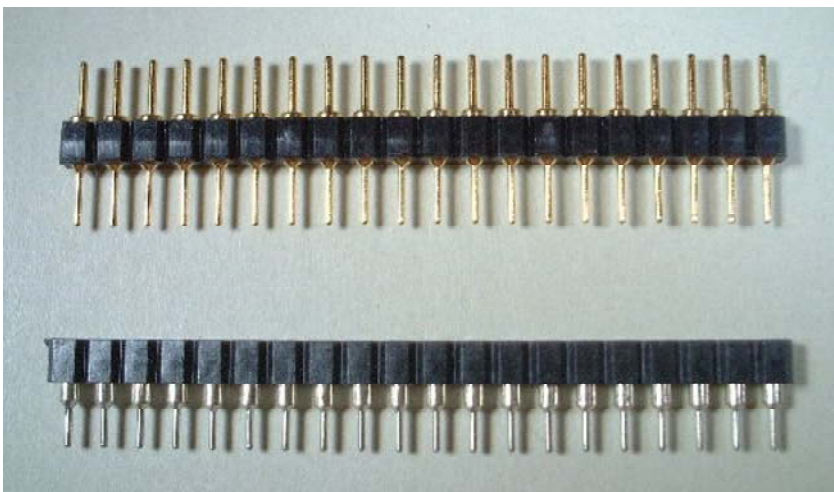


写真4-1 使用したIC用ソケット

このソケットを用いた検討回路を**図4-5**に、実際の製作物を**写真4-2**に示します。この回路を作っておくと、以下で検討する発振回路をすべて検討できます。以下で紹介する回路以外の回路も検討できるようにしていますので、余分なものも付いています。なお、ソケットをセロファンテープで仮固定しておくと、半田付けがし易くなります。

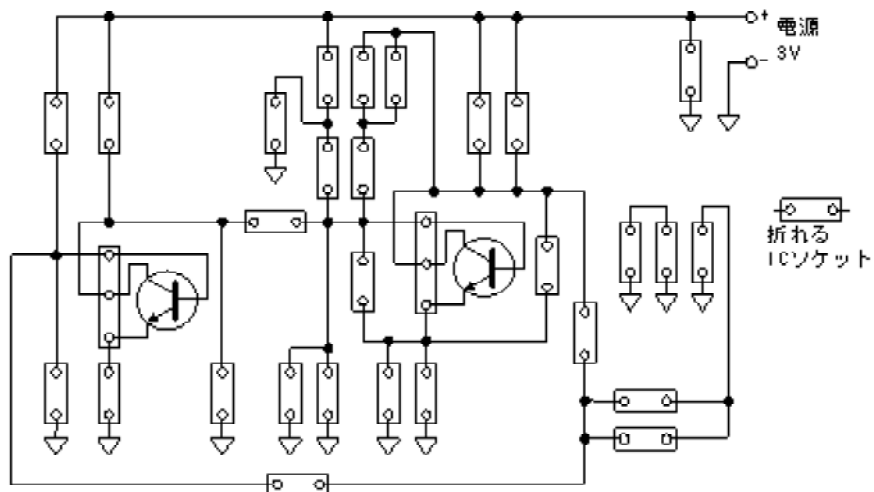


図4-5 検討用回路図

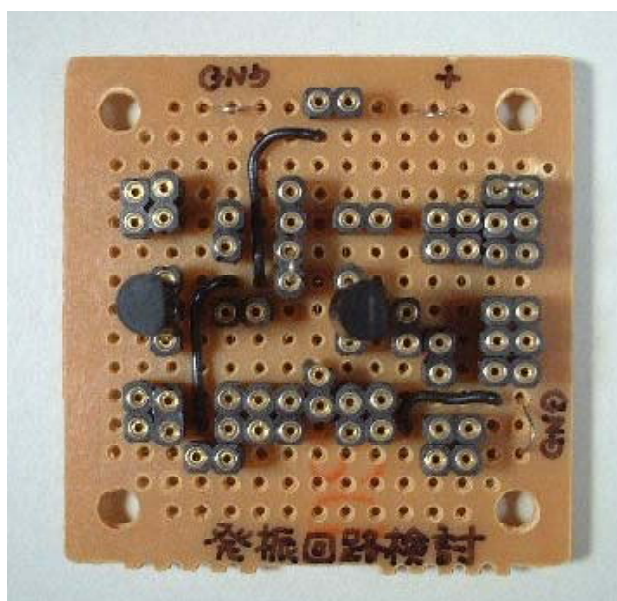


写真4-2 製作した検討用の基板

実際にこの基板を用いて、対称マルチバイブレータを構成した例を**図4-6**に、ブロッキング発振回路を構成した例を**図4-7**に示します。対称マルチバイブレータは後述する**図4-12**のもの、ブロッキング発振回路は後述する**図4-14**のものです。棒線で示したものはショートを意味しています。抵抗のリード線をU字型に曲げて、ソケットに挿入します。

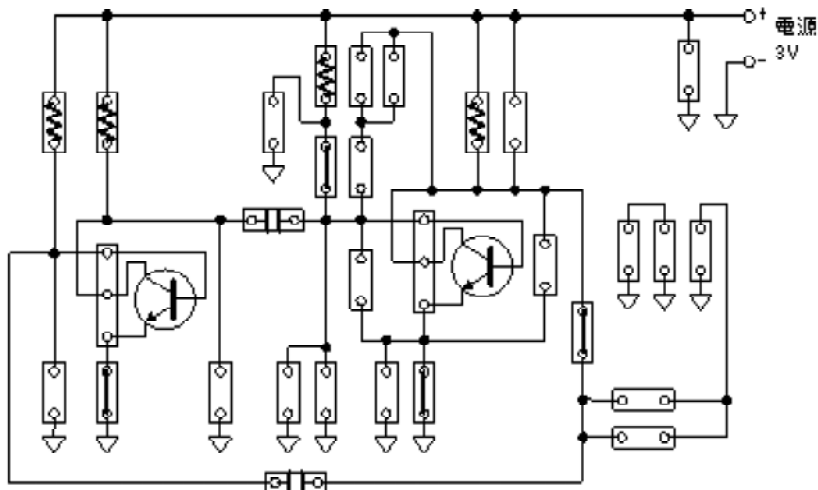


図4-6 対称マルチパイプレータ

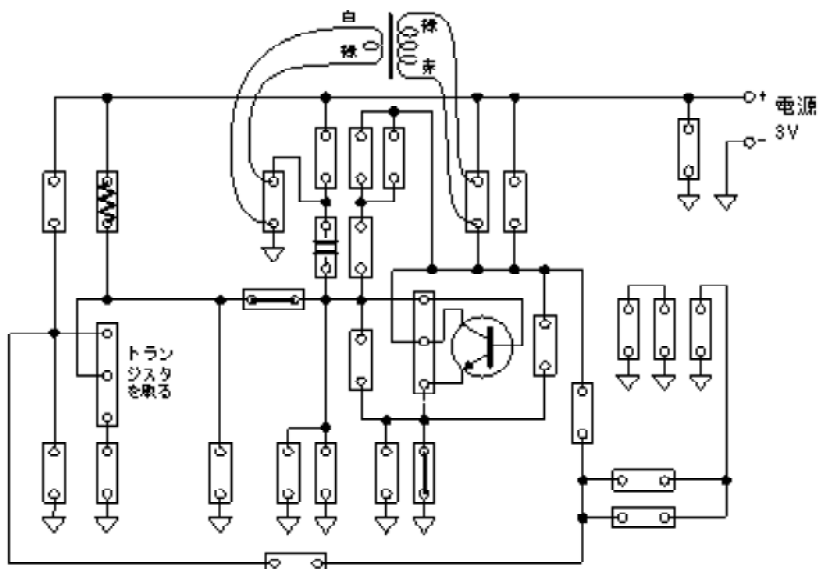


図4-7 ブロッキング発振器

この方法では、ひとつ注意していただきたいことがあります。それは、素子によってリード線の太さが違うことです。太いリード線の素子を差した後、細いリード線の素子を差すと、接触があまくなってしまいます。私は、抵抗には1/6W(1/4Wとするメーカーもある)のリードタイプで、市販されている最も小さいものを使用していますが、この抵抗のリード線を標準としています。ですから、インダクタ(コイル)等でリード線が太いものは図4-8に示すように、この抵抗のリード線を半田付けしています。なお、トリマ(半固定抵抗)に、この抵抗のリード線を半田付けをしたものを作っておくと、検討に便利に使用できます。ただ、これは固定抵抗の値を決定する場合等に使用するもので、トリマを使用する回路のときは抵抗のリード線の半田付けは不要です。

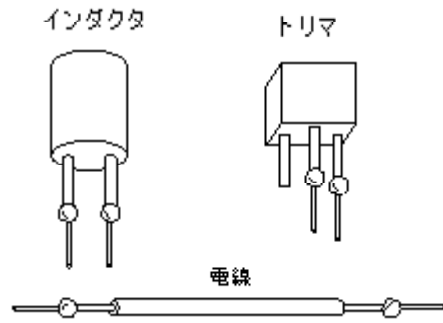


図4-8 抵抗のリード線を半田付けする

以上で紹介した方法は、以降で製作するラジオにも採用しています。この本では、ラジオを製作することによって、電子回路を理解することが第一の目的です。電子回路では、例えば、ある抵抗の値を変えると、どうなるのだろうと疑問に思うことがたびたびです。そのときは、実際に抵抗の値を変更して、その変化を体感することは非常に重要です。この方法では、抵抗等の値を容易に変更できますので、電子回路の習得に大きな効果があります。

●マルチバイブレータ

図4-3(b)で、コンデンサによる、し張発振回路を紹介しました。この回路を実際に製作します。トランジスタ1石では、コンデンサ一つによってゲインのある正帰還はできません。ゲインのある正帰還をするには2石必要です。ですから、まず2石増幅回路を製作します。図4-9に回路を示します。

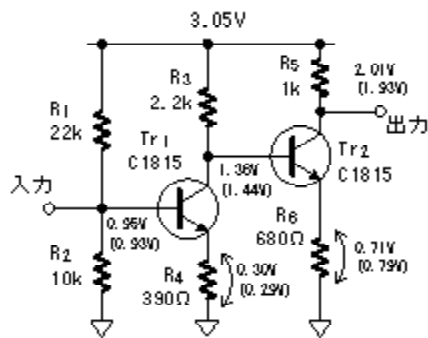


図4-9 トランジスタ2段直結アンプ

この回路は図3-35の回路を2段直結したものです。このように直結するには、2段目のベース電圧が高い必要がありますので、抵抗R6は必ず必要です。この回路の各部の直流電圧を計算できるでしょうか。この計算は図3-4で説明した方法でできます。ただし、R4, R6にかかっている電圧が小さいので、ベース・エミッタ電圧 V_{BE} の影響が非常に大きくなります。図3-4では、 $V_{BE}=0.6V$ として計算しましたが、ここでは、より誤差を少なくするために $V_{BE}=0.65$ として計算します。2SC1815のような小電流のトランジスタでは、大電流のトランジスタに比べて V_{BE} は少し大きくなります。電源電圧は実測値3.05Vを用います。計算結果を図の各部に示しています。カッコ内の値は実測値です。

以上のように、この回路では V_{BE} の影響が非常に大きくなります。原因は、R4, R6にかかる電圧

が小さいためです。このVBEの影響を小さくするには、電源電圧を上げて、R4, R6にかかる電圧を上げる必要があります。ゲインは1段目がR3/R4=5.6倍、2段目がR5/R6=1.5倍です。トータルのゲインは8.3倍です。し張発振回路を構成するには、これで十分です。この回路を交流増幅回路として使用する場合は、R4, R6にパコンを付けると、ゲインを大幅に大きくできます。

この回路の入力と出力にコンデンサを付けると、正帰還となって、し張発振回路になります。**図4-10**に回路を示します。実測した波形を**図4-11**に示します。ゲインがあまり大きくなく、また、入出力インピーダンスも理想的ではないので、**図4-4**とは少々違いますが、同じ原理で発振しています。

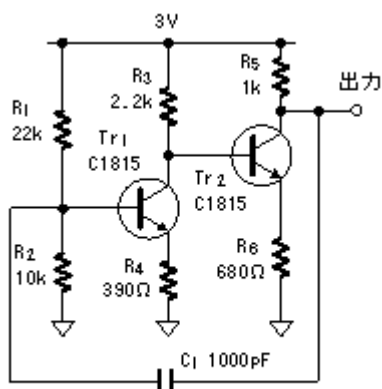


図4-10 コンデンサで帰還する

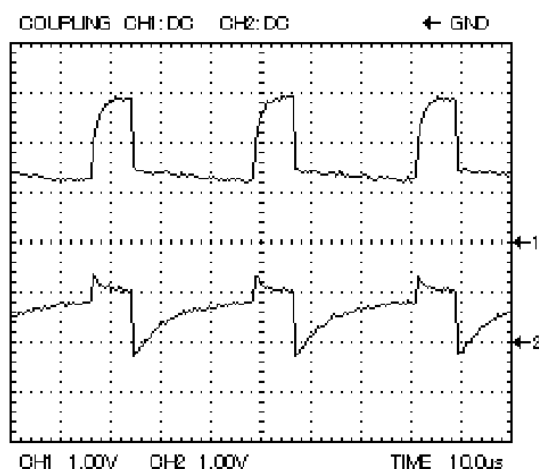


図4-11 図4-10の波形(上: Tr2コレクタ、下: Tr1ベース)

この回路は、非対称マルチバイブレータともよべれます。この例ではTr2のコレクタからTr1のベースに帰還しましたが、Tr2のエミッタからTr1のエミッタに帰還をかけても、正帰還となって発振します。

図4-9では直結しましたが、コンデンサ結合にすることもできます。コンデンサ結合にすると、二つのトランジスタ回路を全く同じにすることができます。全く対称なので、対称マルチバイブレータともよべれます。単にマルチバイブレータといえば、この回路を指します。回路を**図4-12**に示します。通常は(b)のように書きます。この回路では二つのトランジスタは全く同じ条件ですので、全く同じ波形になります。ただし、片方がONしているときは、もう一方はOFFしています。波

形を図4-13に示します。なお、この回路は無安定フリップフロップとよばれることもあります。

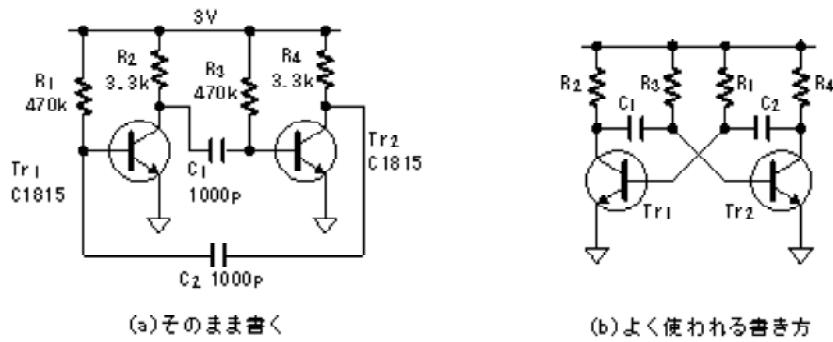


図4-12 対称マルチバイブレータ

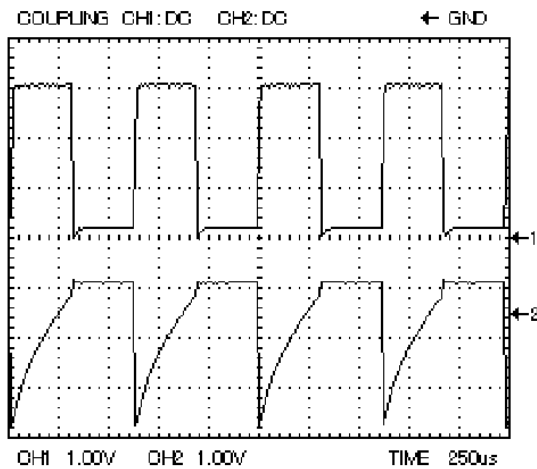


図4-13 図4-12の波形(上 : Tr2コレクタ、下 : Tr2ベース)

●ブロッキング発振回路

図4-3(c)に示す、トランスを用いた、し張発振回路を実際に製作します。回路を図4-14に示します。コレクタにコイルを接続するときは、通常、このように直結します。話がとびますが、図4-2 1(b)も同じです。もちろん、コレクタに抵抗を接続して、コンデンサによりコイルに接続してもよいのですが、こちらの方がはるかに簡単です。ただし、コイルに直流が流れることに注意が必要です。以上のことは、図3-31で説明したマグネチックイヤホンのドライブでも同じでした。なお、この回路では固定バイアスを用いていますが、他のバイアス回路でももちろん可能です。

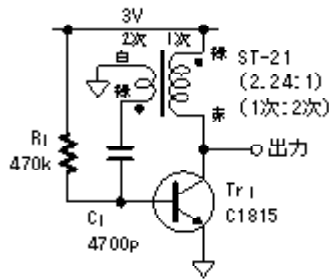


図4-14 ブロッキング発振回路

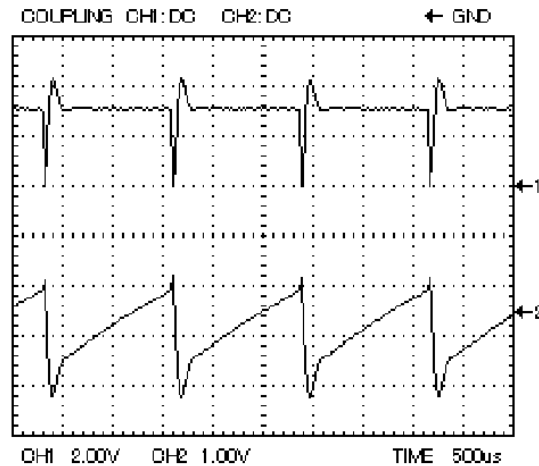


図4-15 図4-14の波形(上:コレクタ、下:ベース)

マルチバイブレータの項で、トランジスタ1石ではコンデンサー一つによるゲインのある正帰還はできないと述べました。しかし、トランスを用いると信号の極性を自由に変えられるので、1石でゲインのある正帰還が可能になります。コレクタに電流が流れ始めると、1次コイルの緑はプラスです。このとき、2次コイルの緑もプラスになり、ベース電流が増えます。そうすると、コレクタ電流がますます増えるという正帰還がかかり、瞬時にトランジスタはON状態になります。トランジスタがON状態になり、コレクタ電流が一定になると、2次コイルには電圧が発生しなくなりますので、ベース電流が減少し始めます。そうすると、コレクタ電流が減り、1次コイルの緑はマイナスになります。このとき、2次コイルの緑もマイナスになり、ベース電流がますます減少するという正帰還がかかり、瞬時にトランジスタはOFFします。トランジスタがOFFしたときは、C1に蓄えられた電荷が、R1を通して放電しますので、長い時間OFF状態を維持します。なお、ST-21の2次側の白はグラウンドに接続していますが、3Vに接続しても全く同じ動作をします。

トランジスタがON状態になった後、その反動でOFF状態になりますが、この動作はブロッキング動作とよばれます。ですから、このし張発振回路は通常、ブロッキング発振回路とよばれます。

●コルピッツ発振回路

図4-2で示した単一周波数発振回路の代表的なものに、コルピッツ発振回路があります。その原理図を図4-16に示します。L1によって直流条件がくずれますので、Cxで直流をカットしています。Cxは十分大きい容量にしますので、交流の動作には無関係です。L1とC1の直列回路において、 ωL

$1 \geq (1/\omega C1)$ ならば、誘導性になります。そして、 $\omega L1 - (1/\omega C1)$ と $(1/\omega C2)$ が等しいとき、 $L1$ と $C1$ の直列回路と $C2$ が共振状態になります。このとき、コレクタからみて、 $L1$ と $C1$ の直列回路と $C2$ は純抵抗となります。そうすると、トランジスタのベース電圧とコレクタ電圧の位相の違いは 180° となります。この条件は

$$\omega L1 - (1/\omega C1) = 1/\omega C2 \quad \text{すなわち} \quad \omega L1 = (1/\omega C1) + (1/\omega C2) \quad \text{です。}$$

これは、 $L1, C1, C2$ の直列共振回路に他なりません。

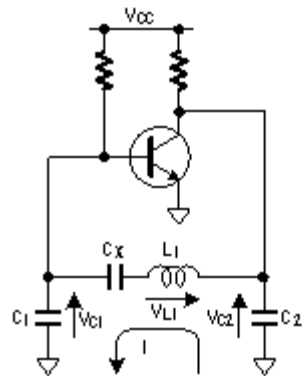


図4-16 コルピッツ発振回路

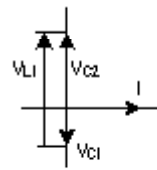


図4-17 ベクトル図

$L1, C1, C2$ で直列共振しているときのベクトル図を図4-17に示します。ベクトルの方向は図4-16のように、とっています。この図より、 $Vc2$ と $Vc1$ が逆相、すなわち位相が 180° 違うのがわかります。以上より全体として、位相が 360° 、すなわち 0° となり、共振周波数では正帰還になるのがわかります。厳密には、コレクタに接続されている抵抗やベースの入力インピーダンスが影響してきます。また、トランジスタの各電極にはコンデンサが等価的に付いています。これらを考慮すると非常に複雑になるので、無視した場合で述べました。

実際に製作した回路を図4-18に、その波形を図4-19に示します。回路は通常よく使われる書き方で書いています。あまりきれいな正弦波ではありません。これは $R2$ が共振回路に入ってくるからです。

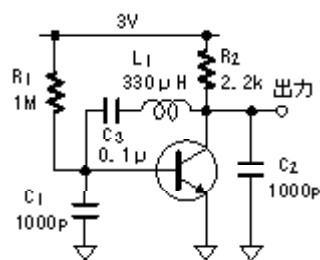


図4-18 実際に動作する回路

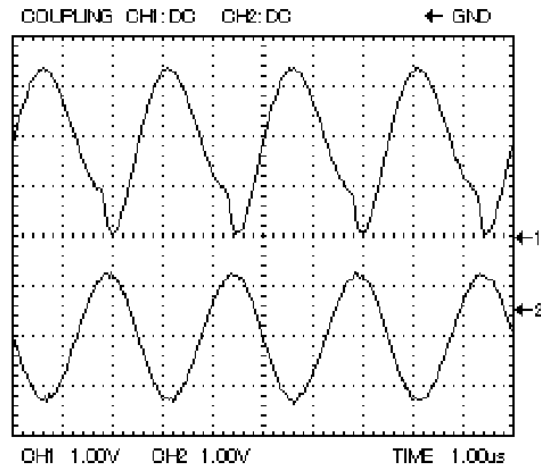


図4-19 図4-18の波形(上：コレクタ、下：ベース)

この波形で非常に重要なことがあります。ベース電圧を見てください。大半はマイナスになっています。つまり、トランジスタは大半の期間はOFF、すなわち動作していないのです。トランジスタは一瞬のみしか動作していません。後は共振回路がフリーで共振動作をしています。換言すれば、一瞬トランジスタが動作して注入されたエネルギーと、共振回路の損失がつり合う振幅で安定しています。この後、他の共通回路でのコルピッツ回路を紹介しますが、すべてこのようになっています。この章の始めで、「出力が大きくなり飽和し出すと、 r が下がってきますので、 $r=1$ 、 $\theta=0$ という状態で安定します。この状態が発振状態です。」と述べました。しかし、この回路のようになって安定する場合もあるのです。というか、LCの共振を利用した発振回路のほとんどは、このような状態で安定します。

図4-18はエミッタ共通回路ですが、もちろん他の共通回路でも実現できます。図4-20はコレクタ共通回路のコルピッツ発振回路です。エミッタ共通回路ですから、入力(ベース)と出力(エミッタ)は同相です。しかし、(b)のように帰還回路を構成すると、 $L1, C1, C2$ の直列共振のとき、 V_{C2} と V_{L1} は同相となり正帰還となります。この回路は、一見ゲインがないのではと誤ってしまいます。しかし、 V_{L1} が V_{C2} に比べ大きくなりますので、ゲインが発生して発振します。トランジスタの入力インピーダンスが大きいことも重要な要因です。なお、 C_x は図4-16の C_x と同じ役目で、直流をカットするためのものです。十分大きな容量にします。

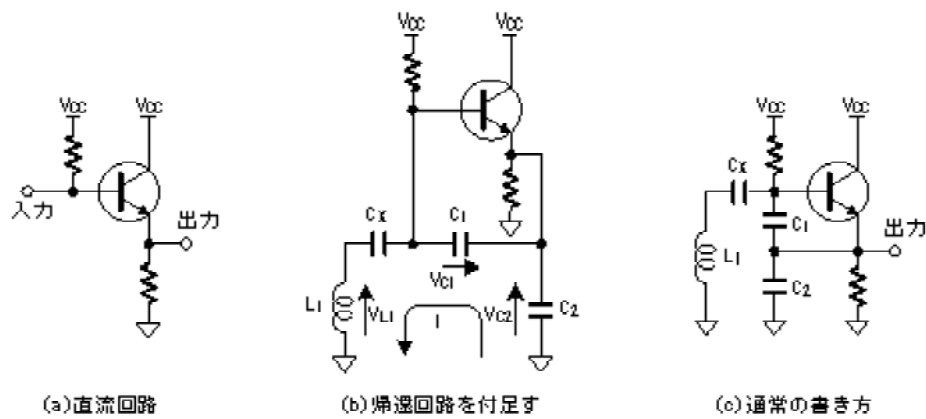


図4-20 コレクタ共通回路のコルピッツ発振回路

図4-21にベース共通回路のコルピッツ発振回路を示します。以上に述べたものと同じく、 $L1, C1, C2$ の直列共振のとき、 V_{L1} と V_{C1} が同相で正帰還となり発振します。この回路では共振回路に入る余計な抵抗が少ないので、振幅の大きな比較的きれいな波形が得られます。 C_x はベース電位を一定にするコンデンサです。交流的にベースをグラウンドに接続します。

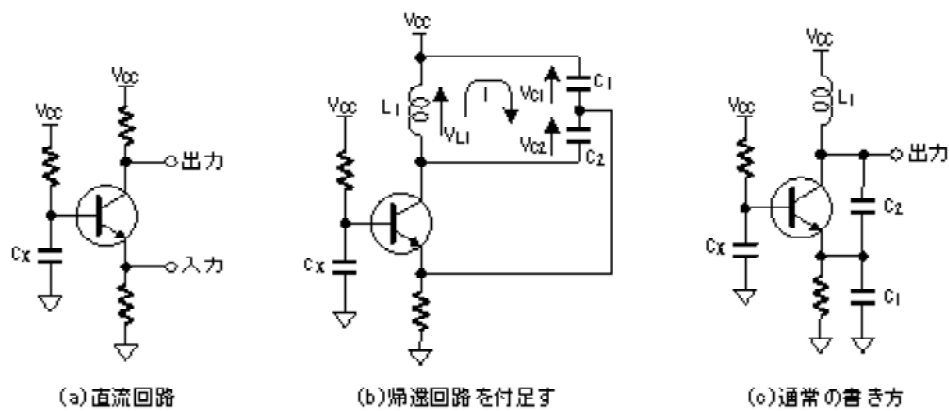


図4-21 ベース共通回路のコルピッツ発振回路

以上三つのコルピッツ発振回路を紹介しました。電源につながっているものは、グラウンドにつながっているのと同じです。 C_x はショートと考えます。そうすると、どの方式でも $L1, C1, C2$ の付き方は、図4-22のようになります。

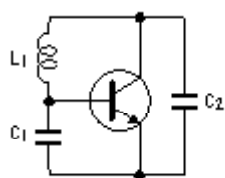


図4-22 $L1, C1, C2$ の付き方

図4-22において、コンデンサをコイルに、コイルをコンデンサに置き換えても、発振回路ができます。この発振回路はハートレー発振回路とよばれます。

●同調帰還型発振回路

製作したコレクタ同調帰還型発振回路を**図4-23**に示します。ここでAM発振コイルについては第1章ミキサーを見てください。この回路は非常にわかり易い回路です。L1とC1で共振回路を構成しています。ここで共振回路の損失分をトランジスタ回路で補えば、共振回路は振動し続けます。そのためにコイルの2次巻き線で正帰還をかけています。L1, C1は共振しているので、トランジスタのコレクタから見て純抵抗です。ですから、トランジスタのベースとコレクタの位相は 180° です。ここで発振コイルのトランスとしての極性で 180° 位相を変化させていますので、全体としての位相は 360° 、つまり正帰還となるわけです。この動作の本質はコルピッツ発振回路と同じものです。ところで、このような2次巻き線での正帰還を反結合とよぶことがありますので、この回路は反結合発振回路とよばれることもあります。

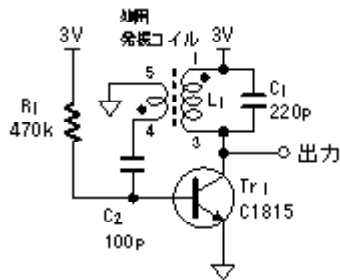


図4-23 コレクタ同調帰還型発振回路

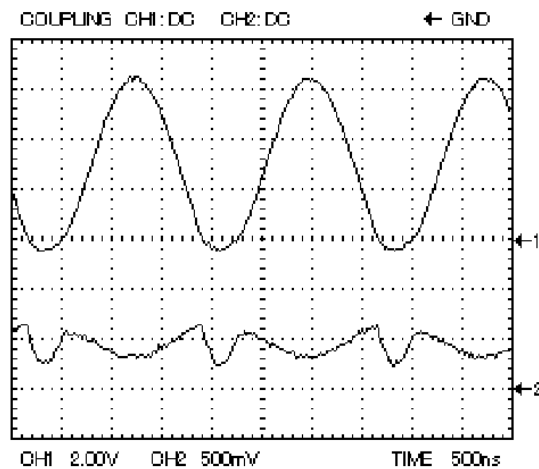


図4-24 図4-23の波形(上：コレクタ、下：ベース)

図4-23の波形を**図4-24**に示します。コルピッツ回路と同じく、トランジスタが動作するのは一瞬です。コレクタ電圧がマイナスのとき、ベース電圧がへこんでいますが、これは、このときベースからコレクタに電流が流れるからです。

この回路ではC2を、例えば $0.01\mu\text{F}$ のように大きくすると、ブロッキング発振となってしまいます。ですから、C2は、十分発振できる範囲で、なるべく小さい値にします。

同調帰還型発振回路は、同調回路をどこに入れるか、どの共通回路を用いるかで、いろいろな回路が考えられます。**図4-25**に、よく用いられる回路のみを示します。

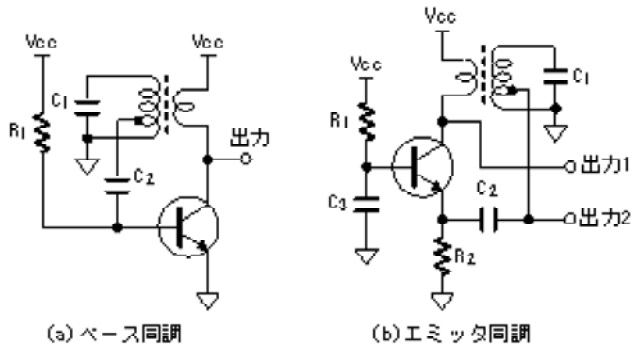


図4-25 その他の同調帰還型発振回路

●負荷をつなぐ

第3章増幅回路の図3-19で、どの回路でも、最終は入力電源と負荷がつながれると述べました。発振回路では、入力はありませんが、負荷はつながれます。図4-26に、そのときの回路を示します。このときの負荷はトランジスタの入力インピーダンスです。高周波発振回路では、アンテナが負荷になるときもあります。

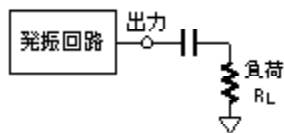


図4-26 発振回路に負荷をつなぐ



図4-27 バッファを入れる

ですから、発振回路では、どの負荷まで、発振が可能なのかを検討しておく必要があります。もし、必要な負荷をドライブすると、発振ができなくなったり、周波数が不安定になったりするならば、図4-27のようにバッファを入れる必要がでてきます。このバッファには、前述したエミッタフォロアがよく使用されます。

負荷に合わせた別の巻き線を巻くときは、図4-28のようにする場合もあります。

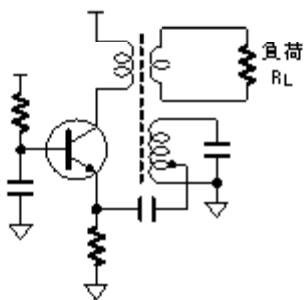


図4-28 負荷ドライブ用の巻き線を巻く

ふじひら・ゆうじ



RFワールド・ウェブ・ブックス「ラジオで学ぶ電子回路」第9章 再生・超再生ラジオ

(C)Yuji Fujihira 2009

<http://www.rf-world.jp/>