

第7章 レフレックスラジオ

一つのトランジスタで、高周波と低周波の両方を増幅するラジオを作ることができます。これをレフレックスラジオといいます。トランジスタの数が少なくなるので、トランジスタが高価な時代には、よく使用されました。また、簡単なのでラジオ工作の本によく紹介されています。このような簡単な工作向けのラジオですが、電子回路として学ぶべきものを沢山持っているラジオでもあります。

●一石構成

図5-18のダイオード検波ラジオにおいて、検波信号をTr1のベースに戻すとどうなるでしょうか。その回路を図7-1に示します。もし、これが可能ならば、Tr1でTr2の役目もさせることができます。つまり、一石で二石の働きをさせることができます。

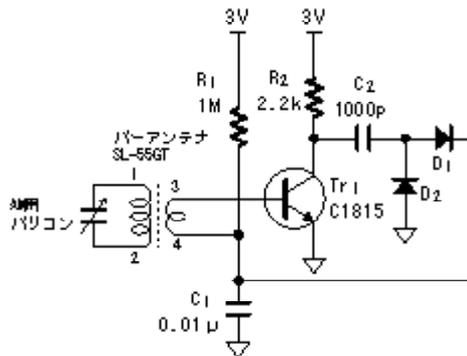


図7-1 ダイオード検波ラジオの検波出力をベースに戻す

残念ながら、図7-1のままでは動作しません。その理由は二つあります。まずひとつめですが、このままではクリスタルイヤホンの接続するところがありません。R2両端、またはTr1のコレクタ、グラウンド間にクリスタルイヤホンをつなぐと、搬送波信号がなくなってしまいます。これを解決する方法を図7-2に示します。図のようにコイルをつなぐと、L1はAM信号に対しては大きい抵抗ですので、コレクタからAM信号を取り出すことができます。一方、音声信号にはL1は小さい抵抗ですので、音声信号はL1を素通りして、R2に到達することができます。ここで、C3はR2両端の搬送波をなくすためのものです。クリスタルイヤホンをつなぐ場合は省略できますが、後述するように低周波増幅回路をドライブする場合は必ず必要です。なお、図7-2の回路は必ず発振します。これについては第5章でも言及しました。R3はこの発振を防ぐものです。この発振については次の項で詳しく取り上げます

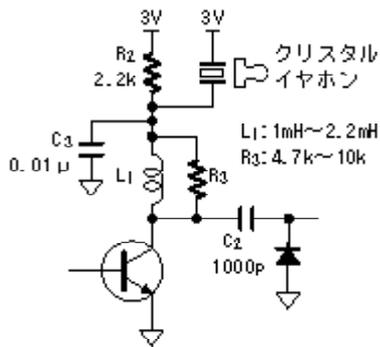


図7-2 コイルを直列に入れる

図7-1が動作しない理由のふたつめは、D1, D2に逆バイアスがかかっていることです。D1のカソードはTr1のベースにつながっています。Tr1のベース電圧は約0.6Vです。ですから、D1, D2にはこの約0.6Vがかかっています。ダイオード検波では0.1V以下の信号を検波しますが、0.6Vもの逆バイアスがかかっていると、とても検波はできません。前述しましたが、D1, D2のアノード、カソードを逆にしても使用できます。このときは、ダイオードに順方向電流が流れてしまい、やはり検波はできなくなります。さらに、D1, D2のアノード、カソードを逆にすると、トランジスタの直流バイアスに影響してしまいます。

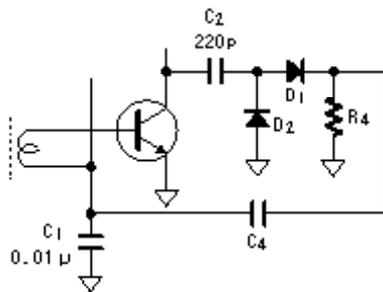


図7-3 コンデンサでベースに戻す

以上を解決する方法を図7-3に示します。C4で直流をカットすることにより、D1, D2にかかる逆バイアスをなくすことができます。この回路では、C1が検波のコンデンサに、トランジスタの入力抵抗がコンデンサの放電抵抗になります。ですから、C4はC1に比べ十分大きくする必要があります。R4はなくても動作はしますが、それはダイオードの逆電流があるからです。もし、ダイオードが理想的であれば、C4には信号のピーク値が充電され、それが放電されませんので回路が動作できません。また、この回路は発振しやすいのですが、この抵抗R4を小さくすることにより、防止することができます。なお、C2の容量は1000pFから220pFに小さくします。C2が大きいと、検波回路が音声信号の負荷になってしまいます。事実、1000pFでは音声信号の高い音が若干小さくなります。このように、C2はAM波を通過させる範囲で、なるべく小さくする必要があります。

最終の一石レフレックスラジオの回路を図7-4に示します。図7-3のR4をトリマにして音量調節ができるようにしました。このトリマは図5-18のVR1に相当するものです。図5-18のVR1は100kΩで十分でした。図7-4のVR1も100kΩでもよいのですが、レフレックス回路は発振しやすいので、その発振を抑えるために10kΩと小さい値を使用しました。

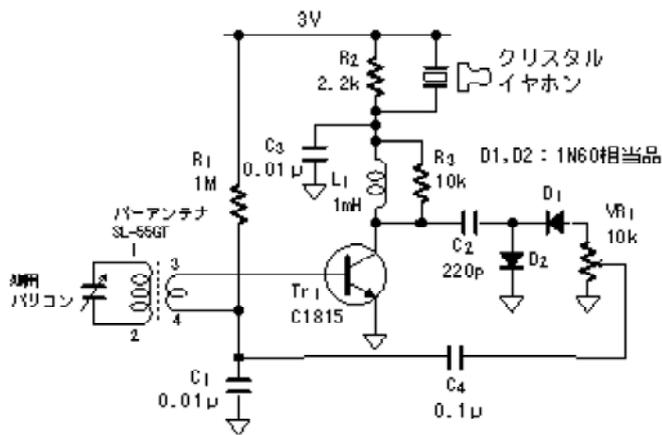
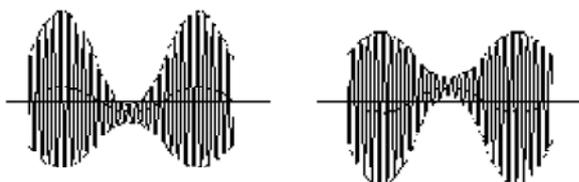


図7-4 一石レフレックスラジオ

レフレックスラジオのベース波形は図7-5のようになっています。太い破線は音声信号を表します。図7-3では、AM信号の振幅が大きいときに検波出力が大きくなりますので、(a)のようになります。図7-4では、D1, D2のアノード、カソードを逆に使用しています。このときには、AM信号の振幅が大きいときに検波出力が小さくなりますので、(b)のようになります。トランジスタ増幅回路には、非直線性(歪み)があり、ベース電圧が大きい方がゲインが大きくなりました。ですから、(a)ではAM信号の振幅が大きいときは、よりゲインが大きくなります。ゲインが大きくなれば、検波効率が上がり図5-17に示した歪みがより大きくなります。ですから、図7-3のようにダイオードを使うと歪みが大きく、音質がかなり悪くなります。ダイオードを図7-4のように使うと(b)になり、以上の歪みはかなり軽減されるので、音質はかなりよくなります。レフレックスラジオは一石で二石の役目をしますが、さらにこのように歪み軽減の効果もある方式です。



(a)ダイオード図7-3のとき (b)ダイオード図7-4のとき

図7-5 ベース波形

図7-4の回路で、一つ注意があります。それはL1の配置です。L1からは磁束が漏れています。その磁束がバーアンテナに戻ると、正帰還や負帰還になります。正帰還のときは、第9章で取り上げる再生ラジオになって、音が大きくなります。また、負帰還になるときは、音が小さくなります。L1とバーアンテナを近くに配置するときは、L1を逆に差換えてみて、どうなるかを確認するとよいでしょう。レフレックスラジオは発振しやすいのですが、以上のことも発振のしやすさの要因になっています。発振したときは、R3またはVR1の値を小さくすれば、発振を防止することができます。

図7-4のラジオの音量ですが、C局で音声信号(ピーク値)が80mVくらいで、十分な音量です。この音量は、図5-18の回路で抵抗R2を1mHのコイルに変えたときと全く同じです。ただ、前述したように歪みが軽減されているので、音質はレフレックスの方がよくなります。ところで、図7-4では

L1に1mHを使用したので、高い周波数のA～C局の音量が大きくなります。これはダイオード検波ラジオで説明したのと同じで、L1に0.47mH～1mHを用いるとA～C局の音量が大きくなり、2.2mH～3.9mHを用いるとE、F局の音量が大きくなります。これについては次の項で詳しく説明します。

以上、ダイオード検波ラジオでは、レフレックスラジオにできることがわかりました。では、トランジスタ検波ラジオはレフレックスラジオにできるのでしょうか。図7-6に回路を示します。C2、R4でAM信号を取り出し、R5、C5のローパスフィルタでその中の音声信号を取り出し、その信号を元のトランジスタのベースに戻します。一見、レフレックスラジオになりそうですが、残念ながらレフレックスラジオにはなりません。

理由を考えます。C2は前述したように、AM信号を通す範囲でなるべく小さい値にする必要がありました。今、トランジスタのコレクタ信号を、図7-5のような信号とします。つまり、音声信号とAM信号が加算された信号とします。このときに、C2が小さいと音声信号がなくなってAM信号のみとなります。これは第6章の図6-5とよく似た現象です。ですからC5には音声信号は全く発生しなくなり、レフレックスラジオにはなりません。そもそも、図7-6が動作するならば、おかしいこととなります。図7-6が動作するならば、ベース信号の音声信号の割合が大きくなります。そうすると、それがR5、C5で検波されて、さらにベース信号の音声信号の割合が大きくなってしまい、音声信号で正帰還がかかった状態になってしまいますが、このようになることは絶対にありません。

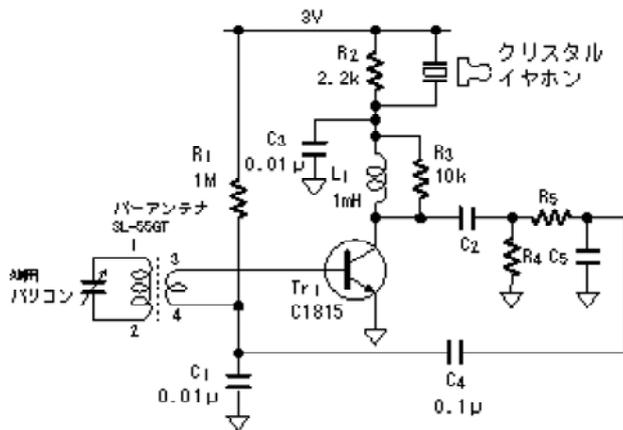


図7-6 トランジスタ検波のレフレックスラジオ
(これは動作しない)

●発振現象

・ハートレー発振回路

第4章のコルピッツ発振回路は図4-22で表されました。この図のLとCを入れかえると、ハートレー発振回路になると述べました。このハートレー発振回路を図7-7に示します。ハートレー発振回路の発振周波数はコルピッツ発振回路と同じように考えると求まり、C、L1、L2の直列共振回路の共振周波数となります。なお、ハートレー発振回路はこの図でL1とL2が磁束で結合している、つまりL1とL2に相互インダクタンスがある場合の方が一般的ですが、ここではL1とL2に相互インダクタンスがないとします。

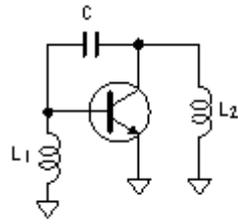


図7-7 ハートレー発振回路

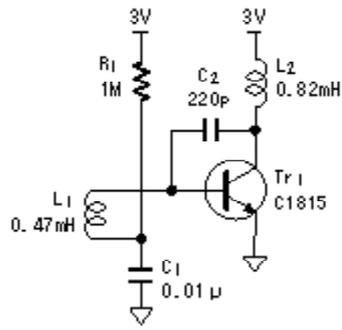


図7-8 実際のハートレー発振回路

図7-8に実際に動作するハートレー発振回路を示します。C2を220pFにして、コレクタ出力容量Cobの影響を考えなくてすむようにしました。この回路のコレクタの波形を図7-9に示します。この図でぐちゃぐちゃとしたところが、発振しているところです。実際は真っ黒になるのですが、データの取り込みの関係でこのようになっています。図7-8の回路は以上のように間欠発振となります。発振するだけでも厄介ですが、その発振が間欠になるという、さらに厄介なことになります。

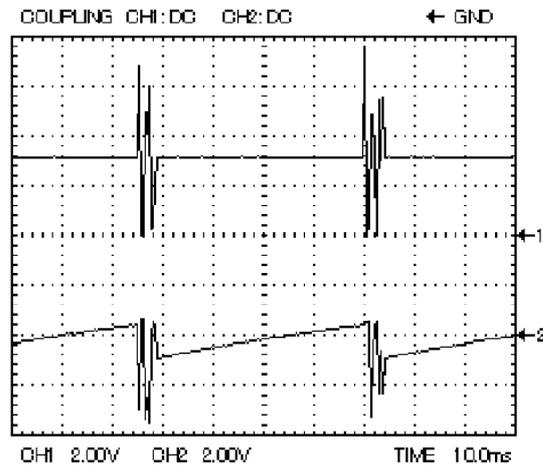


図7-9 図7-8の各部の波形

(上：コレクタ、下：ベース)

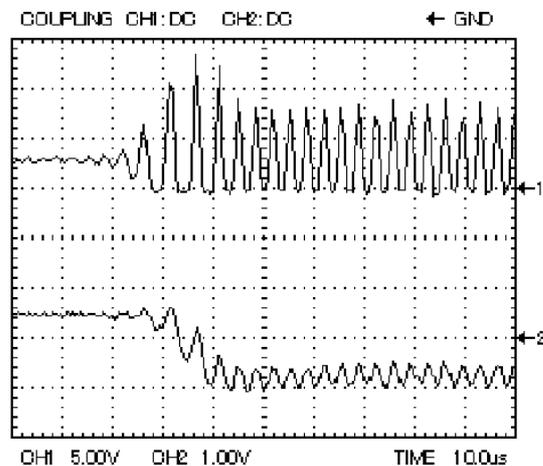


図7-10 図7-9の発振開始部の拡大

(上：コレクタ、下：C1両端)

なぜこのような間欠発振になるのかを考えます。図7-10に図7-9の発振開始時の拡大波形を示します。この図の下の波形はベースではなく、C1両端の波形であることに注意してください。図7-8の回路が発振を開始すると、(C1両端の直流電圧 + L1両端の発振電圧)がトランジスタのベースにかかります。トランジスタのベースは約0.6Vですので、(C1両端の直流電圧 + L1両端の発振電圧)が0.6VになるようにC1両端の直流電圧が急激に下がります。この様子が図7-10で明確にわかります。もし発振強度が一定であれば、この状態で発振を維持します。ですが、発振開始時はC1両端の直流電圧が大きいので、ベース電流が大きく流れ、発振強度が非常に大きくなります。ですから、発振開始時にC1両端の電圧が大きく下がります。C1両端の電圧が大きく下がっても、発振はしばらく維持します。そして、その強度(振幅)が徐々に下がってきたときには、その発振を維持するにはC1両端の電圧が大きく下がりがすぎでおり、発振は停止してしまいます。発振が停止すると、R1を通してC1に充電され、C1両端の電圧が0.6Vぐらいになるまで発振は停止したままになります。この辺のところは図7-9でよくわかります。なお、このような間欠発振は第9章再生・超再生ラジオで詳しく述べますので、参照してください。

では、発振周波数はどうなるのでしょうか。L1, C2, L2の直列共振周波数は計算で299kHzです。一方、実際の周波数は発振開始時で約280kHzです。ですから、ほぼL1, C2, L2の直列共振周波数で発振しています。この間欠発振を防止するにはどうすればよいのでしょうか。それは発振開始時の発振強度を小さくすればよいのです。その一例を図7-11に示します。この例ではR2を挿入してトランジスタのゲインを小さくしています。この回路の各部波形を図7-12に示します。発振周波数は約320kHzであり、L1, C2, L2の直列共振周波数の計算値より少し高いですが、この回路の発振周波数も、ほぼL1, C2, L2の直列共振周波数となるといってよいでしょう。

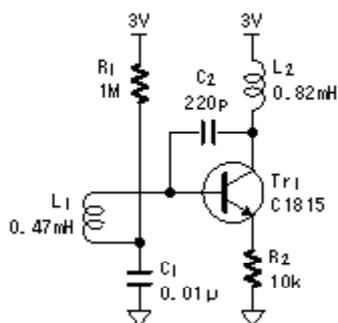


図7-11 間欠発振を防止

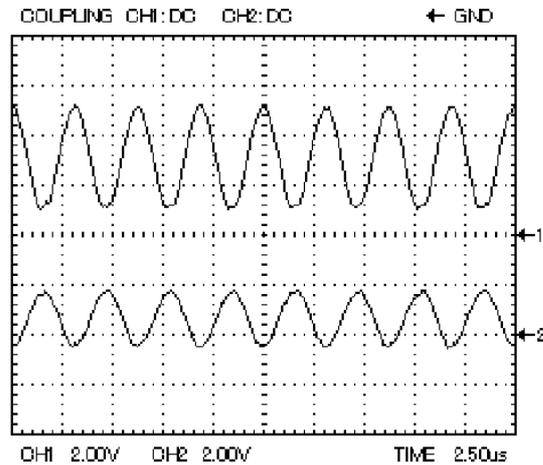


図7-12 図7-11の各部波形
(上：コレクタ 下：ベース)

・コイル負荷の回路

図7-2の回路やダイオード検波回路で、トランジスタのコレクタにコイルをつないだ回路を図7-13に示します。ここでL1はバーアンテナの2次コイルであり、C1はバリコンをバーアンテナの2次に換算したものです。C1は1MHzで7240pFとなり、非常に大きな値です。C2はコレクタ出力容量Cobで、3~4pFぐらいと思われます。

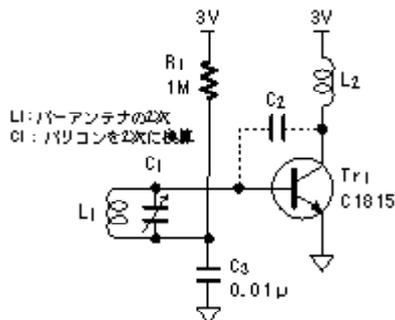


図7-13 コイル負荷の回路

ここで、コイルとコンデンサの共振回路のインピーダンスを考えます。図7-14にこれらのインピーダンスを示します。並列共振回路では共振周波数より低い周波数では誘導性、すなわちコイルと同じになります。一方、直列共振回路では共振周波数より低い周波数では容量性、すなわちコンデンサと同じになります。ですから、もし図7-13の発振周波数がL1, C1の並列共振周波数より低く、かつL2, C2の直列共振周波数より低いなら、図7-13の回路はハートレー発振回路になるのがわかります。いままでに図7-13の回路は発振し易いと述べてきましたが、このようにハートレー発振回路となるためだったのです。

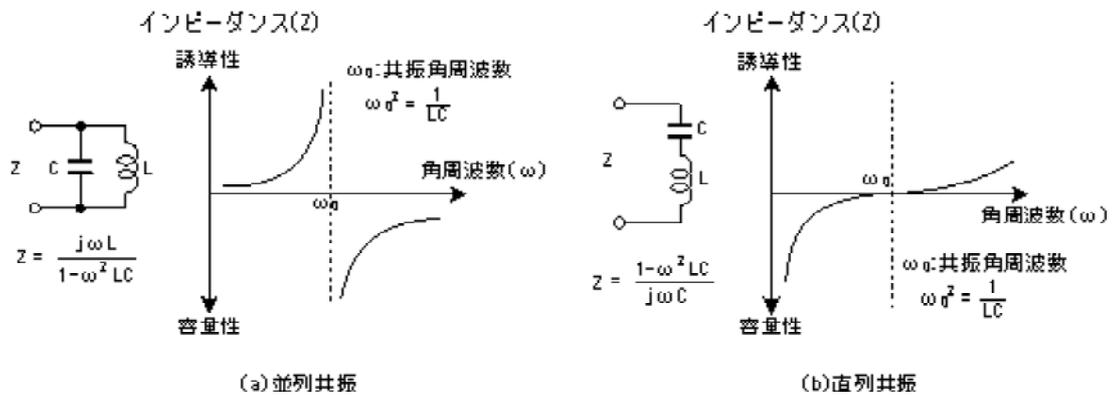


図7-14 共振回路のインピーダンス

ところで、**図5-6**の等価回路で**図7-13**はどのようになるでしょうか。まず、**図5-6**の等価回路のベース・エミッタ間にコイルを付けます。このコイルのインピーダンスを Z_i とします。もちろん Z_o は誘導性(コイル)です。この Z_i と**図5-6**の Z_x の並列インピーダンス Z を求めます。

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_i} + \frac{h_{ie} + h_{fe} Z_o}{h_{ie}(Z_o + Z_c)} = \frac{h_{ie}(Z_i + Z_o + Z_c) + h_{fe} Z_i Z_o}{Z_i h_{ie}(Z_o + Z_c)}$$

$$Z = \frac{Z_i h_{ie}(Z_o + Z_c)}{h_{ie}(Z_i + Z_o + Z_c) + h_{fe} Z_i Z_o}$$

ここで $Z_i + Z_o + Z_c = 0$ ならば

$$Z = -\frac{h_{ie} Z_i}{h_{fe} Z_o} \text{ となります。}$$

Z_i と Z_o は同じ誘導性なので、 Z は負性抵抗となります。

$Z_i + Z_o + Z_c = 0$ は、これらの直列回路の共振周波数で成立します。このとき、 Z は負性抵抗となるのがわかります。もし、この負性抵抗が他の損失抵抗を打ち消すならば、発振が起こります。以上、**図5-6**によっても**図7-13**が発振するのがわかります。

・発振の実測

実際にどのように発振するかを実測します。その回路を**図7-15**に示します。オシロスコープのプローブの容量の影響をなくすために R_2 (100kΩ)を用いています。

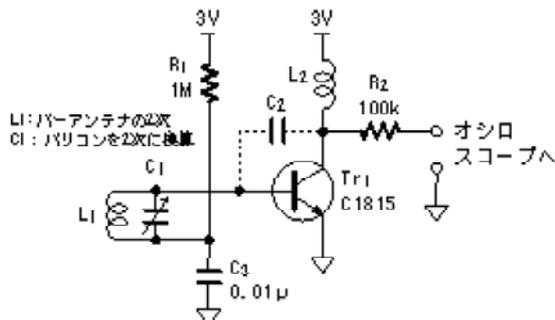


図7-15 発振を実測する回路

実測した結果を**表7-1**に示します。L2を変えて発振周波数がどうなるかを測定しました。バリコンC1を高い周波数から低くなるように動かします。このとき、まず発振が開始するところがあります。表で発振開始としているところがこの点です。このときの発振はぎりぎり発振条件を満たしますので、発振は強くなく、まだ間欠ではなく連続の発振です。このときにL1, C1をはずして、ディップメータで共振周波数を測定しました。表でL1, C1並列の共振周波数となっているのは、この周波数です。

バリコンをさらに低い周波数に動かしていくと、発振が間欠になります。表で間欠開始となっているのはこの点です。バリコンをさらに低い周波数に動かしていくと、いよいよ発振が停止します。表で発振停止となっているのはこの点です。

		発振開始	間欠開始	発振停止
L2=0.82mH	発振周波数 [MHz]	1.50	1.33	0.80
	L1, C1並列の 共振周波数 [MHz]	2.00	1.39	0.82
L2=2.2mH	発振周波数 [MHz]	1.00	0.83	0.57
	L1, C1並列の 共振周波数 [MHz]	1.17	0.84	0.58
L2=3.9mH	発振周波数 [MHz]	0.80	0.60	発振停止せず
	L1, C1並列の 共振周波数 [MHz]	0.89	0.63	

表7-1 実測の結果

ここで、なぜ**表7-1**のようになるかを考えます。**図5-5**の等価回路を用いて計算は可能ですが、おそろしく複雑になって、発振の本質が全くわからなくなります。そこでここでは、大雑把に考えることにします。

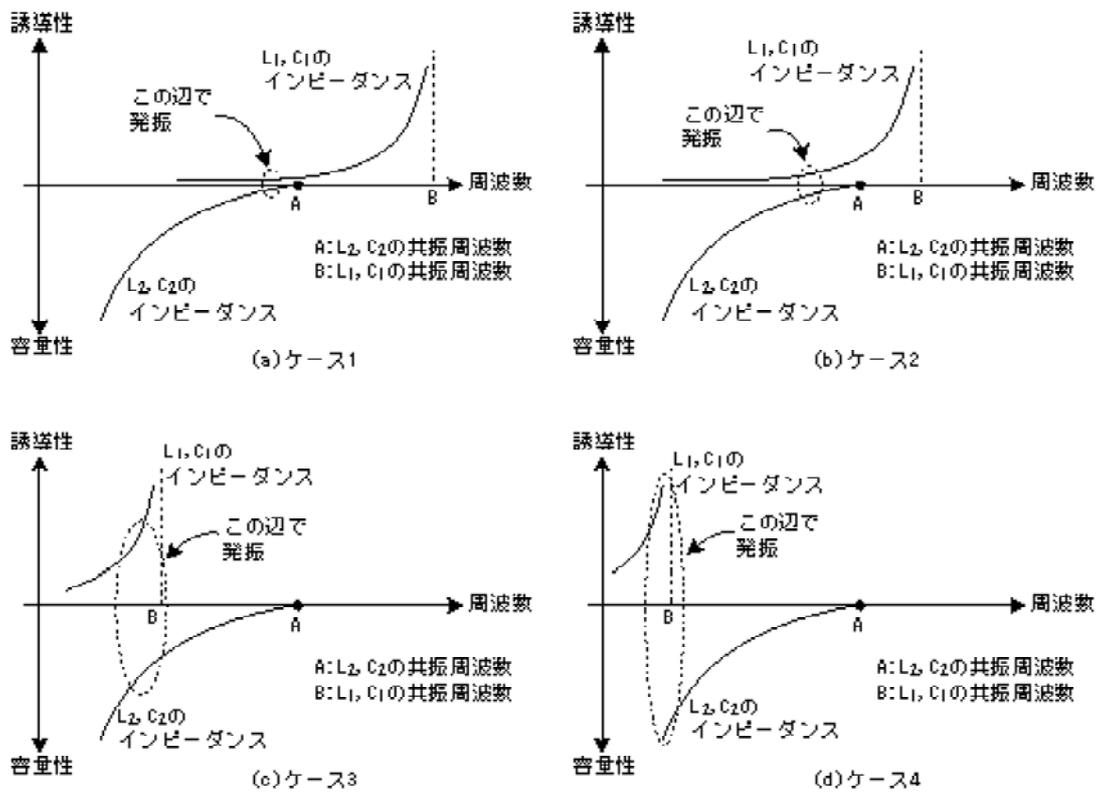


図7-16 発振理由を大雑把に考える

図7-16で考えます。この図では L_1, C_1 の並列インピーダンスと、 L_2, C_2 の直列インピーダンスを表しています。以降、前者を Z_1 、後者を Z_2 とよぶことにします。A点は $Z_2=0$ となる直列共振周波数です。例えば、 $L_1=0.82\text{mH}$ のときの直列共振周波数を計算してみます。この $L_1=0.82\text{mH}$ の自己共振周波数は 2.28MHz でしたから、分布容量は 6pF と計算できます。また、トランジスタの出力容量 C_{ob} を 3.5pF と仮定すると、直列共振周波数は 1.8MHz となります。B点は Z_1 の並列共振周波数で Z_1 は無限大になります。これらは図7-14で説明しました。

まず、(a)ケース1は、 Z_1 と Z_2 の共振周波数が離れているときです。ハートレー発振回路では Z_1, Z_2 が共振するところで発振しますから、図で Z_1 と Z_2 の絶対値が等しいところがハートレー発振回路の発振周波数です。図では破線の楕円で示しています。このようにケース1では、 Z_1 の絶対値が非常に小さくなります。 Z_1 の絶対値が非常に小さいと帰還量も非常に小さくなりますので、ゲインが足らずに発振には至らないと考えられます。

バリコンを共振周波数が低くなる方向に回して、 Z_1 と Z_2 の共振周波数が近づいてくると(b)ケース2になります。こうなると、発振周波数での Z_1 の絶対値が少し大きくなり、よって帰還量も少し大きくなりますので、発振が開始されると考えられます。ただし、帰還量が発振ぎりぎりなので発振強度も弱く、まだ間欠発振にはなりません。

さらにバリコンを共振周波数が低くなる方向に回して(c)ケース3になると、帰還量が大きくなるため発振強度が強くなり、間欠発振になると考えられます。この発振では、ハートレー発振回路としての発振周波数と Z_1 の共振周波数がほぼ一致するようになります。

(d)ケース4になると、 Z_1 の大きさの限界を超えるために、発振が停止すると考えられます。理想的には Z_1 はいくらでも大きくなりますが、実際は損失抵抗のために大きくなる限界があるからです。

大雑把には以上のように考えられます。図7-16の説明ではトランジスタの入力抵抗や共振回路の損失抵抗を無視しました。これらを考慮すると、もっと複雑なものとなります。とにかくこの回路の動作は極めて複雑ですので、正確な動作を完全に理解するのは困難です。

・局によって音の大きさが違って来る理由

図7-13の回路では、発振を防止するために、L2と並列に4.7kΩ～10kΩの抵抗が必要だと、いろいろところで述べてきました。そして、この発振防止をした後は、L2に0.47mH～1mHを用いるとA～C局の音量が大きくなり、2.2mH～3.9mHを用いるとE,F局の音量が大きくなると述べました。この理由を考えます。

発振防止の抵抗により発振は停止していますが、多少は正帰還がかかっていると考えられます。つまり、発振を起こすほどではないが、正帰還がかかっているという状態です。第9章再生・超再生ラジオで詳しく述べますが、再生ラジオになっているというわけです。その正帰還の強さは表7-1と同じ傾向を示すと考えられます。ですから、L2に小さいインダクタンスを用いると、高い周波数の局の音が大きくなり、L2に大きいインダクタンスを用いると、低い周波数の局の音が大きくなると考えることができます。

例えばL2に0.47mHを用いると、C局の音が大きくなりますが、D局の音はあまり大きくなりません。いろいろところで、私の家ではC局受信時にD局が混信すると述べましたが、L2に0.47mHを用いると、この混信が相当軽減されます。この混信が軽減される現象は、正帰還がかかり再生状態であることの証拠でもあります。

以上のことを積極的に利用すれば、音質、音量、混信特性、消費電流、すべてで優れている一石レフレックスラジオが出来あがります。いわば最強の一石ラジオです。その回路を図7-17に示します。コイルをL1,L2と二つ使い、受信する局に合わせてSW1で切り替えます。もちろん、高い周波数の局(1MHz以上)のときはL1(0.47mH)を用います。低い周波数の局(1MHz以下)のときはL2(2.2mH)です。この回路では発振防止用の抵抗をトリマ(VR1)にします。このトリマで発振ぎりぎりになると、非常に大きい音量が得られます。音量が大きすぎる局のときは、このトリマを小さくすれば音量調整もできます。VR1で発振防止を調整するのでR3は固定抵抗にします。少しでも音が大きくなるように47kΩにしました。もっと大きくてもかまいません。このラジオの欠点は、受信する局を変えるたびにVR1の調整が必要なことです。さらにその局の周波数に合わせてSW1を操作する必要もあります。確かに一般の人には問題でしょう。しかし、この本を読んでもらっている人ならば、むしろ楽しい操作だと思いますが、いかがでしょうか。

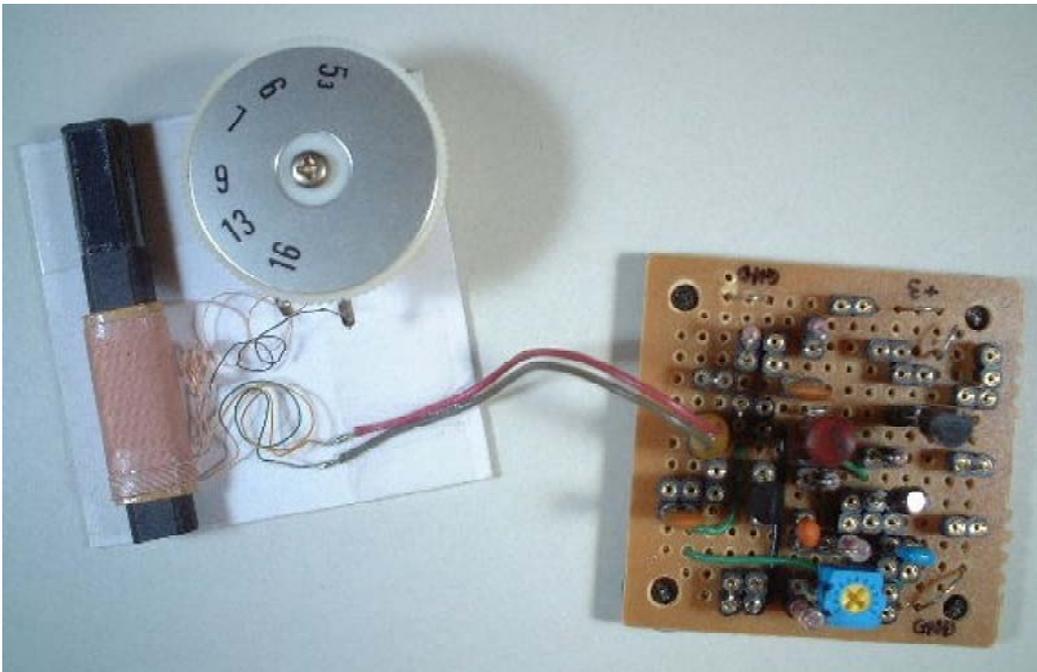


写真7-1 製作した二石レフレックス

マグネチックイヤホンのドライブは**図3-31(c)**に示した回路を採用しました。Tr2のコレクタ電流は約10mAです。マグネチックイヤホンはあまり音質がよくないので、コレクタ電流を5mAにしても(R4を100kΩにする)、そんなに音質は変わりません。C3はクリスタルイヤホンがないので、大きくしています。この値でも、多少搬送波がマグネチックイヤホンに漏れてきますが、この回路では全く問題はありません。もし、搬送波が漏れて問題があるときは、C3の値をもっと大きくする必要があります。

この回路でC局を受信したとき、マグネチックイヤホン両端の音声信号(ピーク値)を求めてみます。Tr2をつなぐ前のTr1コレクタの音声信号は、80mVでした。Tr2には10mA流しているので、Tr2の入力抵抗は $26/10 \times 170 = 0.44k\Omega$ です。Tr2のベースには $80mV / (2.2k\Omega + 0.44k\Omega) = 0.03mA$ の電流が流れます。この値に $h_{fe}=170$ と、マグネチックイヤホンのインピーダンス=8Ωをかけた値が、マグネチックイヤホンの両端の音声信号です。この値は $0.03 \times 170 \times 8 = 41mV$ となります。実測でも、だいたいこのぐらいの値になります。この値ですと、マグネチックイヤホンが十分な音量で聞こえます。

以上、**図7-4**と**図7-18**の回路は、音量がほとんど同じことがわかりました。音質は**図7-4**のクリスタルイヤホンの方がむしろ良いです。動作電流は、**図7-4**が0.5mAに対し、**図7-18**は約10mAです。電池を使用するとすれば、**図7-4**は**図7-18**に比べ、約20倍長持ちします。ですから、**図7-18**は、**図7-4**に比べよいところは全くありません。あくまで、マグネチックイヤホンの検討用です。



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/>