

第1章 ラジオの電波

ラジオは電波をアンテナでとらえ、その電気信号を増幅し、イヤホンやスピーカを鳴らすものです。図1-1にその構成を示します。なおラジオといえば中波AMラジオを指すことにします。第一部では、この構成の中の重要な部品や事項について説明していきます。まずはラジオの電波です。

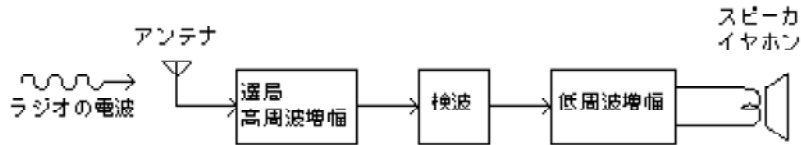


図1-1 ラジオの構成

●電波とは

電波は電界と磁界から構成されています。ですから正確には電磁波といいます。この本では日常的に使用されている「電波」を用いています。電界と磁界の振るまいはマクスウェルの方程式によります。ですから厳密に記述するにはマクスウェルの方程式を解く必要があります。その厳密なものは電磁気学の教科書を見ていただくことにして、ここでは定性的なイメージで考えることにします。

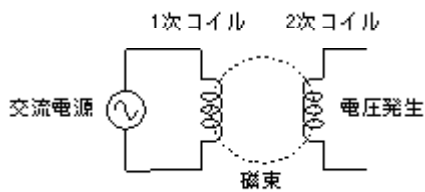


図1-2 トランスの原理

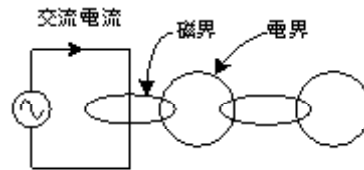


図1-3 電波の発生

図1-2によく知られたトランスの原理を示します。1次コイルに交流電流が流れることによって時間的に変化する磁束が発生します。この磁束によって2次コイルに電圧が発生します。ここで磁束は磁界によって、電圧は電界によって発生します。以上をまとめると以下になります。

- ①電流が流れると磁界が発生する。電流と磁界は直交している。
- ②磁界が時間的に変化するすると電界が発生する。磁界と電界は直交している。

実は②の逆も成立します。

- ③電界が時間的に変化するすると磁界が発生する。電界と磁界は直交している。

③が成立するので、時間的に変化する磁界が発生すれば電界が発生し、それが時間的に変化するるので、さらに磁界が発生します。こうして電界と磁界の鎖ができます。この様子を図1-3に示します。これが電波のイメージであり、いろいろな本でよく紹介されています。

電波のできるイメージは確かにこの通りなのですが、注意していただきたいことが二つあります。まずひとつめですが、電波発生源の近くでは、このような簡単な電磁界にならないということです。①で発生する磁界は電流源から離れると急速に減衰します。一方、②と③によって発生する電波は吸収がなく、かつ広がらない限り減衰しません。ですから電波発生源の近くでは非常

に複雑な電磁界となり、電波発生源から十分離れてやっと電波のみになります。さらにこの図の通りだとすると、**図1-2**のトランスの1次コイルからも電波が放射されることになります。確かに1次コイルからも電波は放射されますが、ごくごくわずかなものです。その理由は、トランスで使用されている周波数では、③で発生する磁界は①で発生する磁界に比べ非常に小さいからです。ですからトランスを考えると③の効果を見捨てることができます。

ふたつめは、**図1-3**では電界と磁界の位相が 90° 違っているイメージを与えることです。これは②と③を交互に考えたために起こります。実は②と③を連立方程式として解かねばなりません。その結果、電界と磁界は同じ位相になります。そもそも電波は電界と磁界によってエネルギーを運ぶものです。ですから電界と磁界は同じ位相でなければなりません。

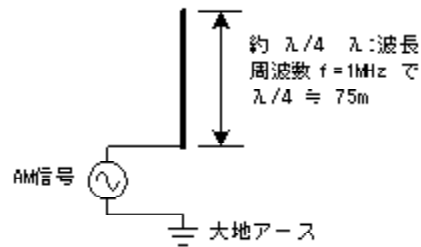


図1-4 送信アンテナ(λ/4接地アンテナ)

実際のラジオでは**図1-4**に示すアンテナで送信されています。周波数 f と波長 λ の間には $f\lambda=c$ [c :空気中の光速 $\approx 3 \times 10^8 \text{m}$] という関係があります。これにより $f=1\text{MHz}$ では、 $\lambda/4=c/4f=75\text{m}$ となります。かなり長いアンテナです。効率よく電波を放射するには、このように長いアンテナが必要です。アンテナの近くでは前述したように非常に複雑な電磁界になっていますが、十分遠く離れた場所では②と③で発生する電波のみとなり、その電波は単純な平面波に近くなります。このアンテナから十分遠く離れた場所での電界と磁界を**図1-5**に示します。Z軸の1点で電界と磁界の方向と大きさ(ベクトル)を書き、そのベクトルの先端をZ軸に沿って示したものです。ほとんど平面波なので、このZ軸を平行移動した軸でも、ほぼ同じ波形になります。なおこの図は、ある一瞬の時間での電界、磁界を表しており、時間が経つに従って波は進行します。ここで重要なのは、ラジオの電波は電界が大地に垂直であり、磁界は大地に平行であることです。これを垂直偏波といいます。

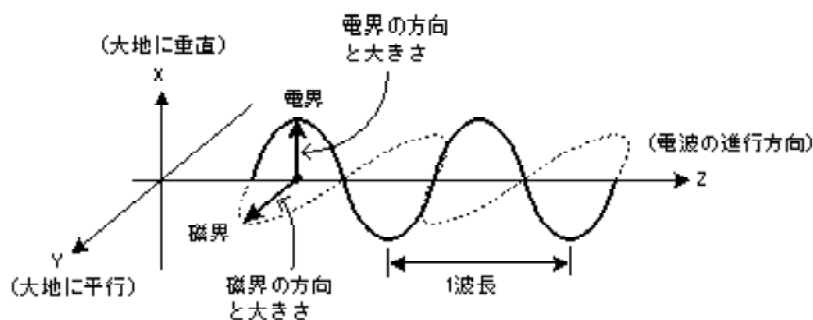


図1-5 ラジオ電波の電界と磁界

●線状アンテナ

アンテナの理論はとても複雑です。詳しくはアンテナの教科書を見ていただかなくてはなりません。ここではラジオの設計に必要な最小限の事項について述べます。図1-6を見てください。ここに示した上下に金属線を持つアンテナをダイポールアンテナといいます。このダイポールアンテナを図のように電界に平行に置くと最大の電圧が発生します。電界に直角に置くと電圧は発生しません。この図のように置いたとき、重要なことが二つあります。ひとつめは、どれだけの電圧が発生するかであり、もうひとつは、出力インピーダンスがいくらになるかです。これらの二つを知れば、アンテナは図1-7に示す等価回路で書き表すことができます。この等価回路の各値がわかればラジオの設計ができます。ラジオとは、この等価回路で示される信号を増幅してスピーカやイヤホンをつなぐものです。

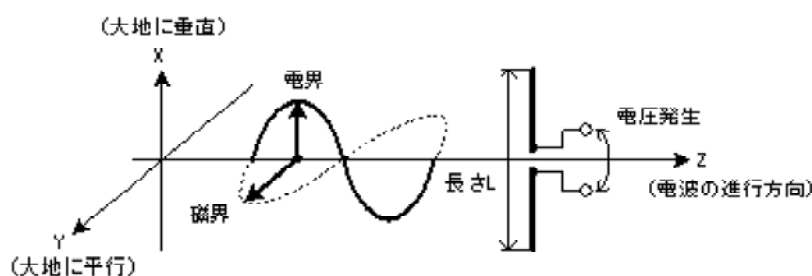


図1-6 電界中のダイポールアンテナ

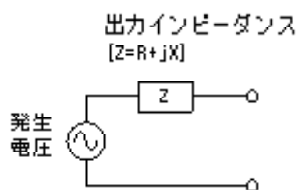


図1-7 ダイポールアンテナの等価回路

まず出力インピーダンスですが、それを図1-8に示します。長さが $\lambda/2$ のとき、リアクタンス X が0になります。厳密には少し誘導性ですが、ほぼ0です。このときに抵抗 R は約 75Ω です。アンテナの信号を増幅するときリアクタンスが0になると何かと好都合ですので、この長さのアンテナは非常によく使用されます。ところでアンテナは電波を放射するときにも使用されますが、このときも主に $\lambda/2$ の長さのアンテナが使用されます。電波を放射するときも同じ等価回路を使用できますが、抵抗で消費される電力の電波が放射されます。ですから電波を放射するときの等価回路の抵抗は放射抵抗とよばれます。

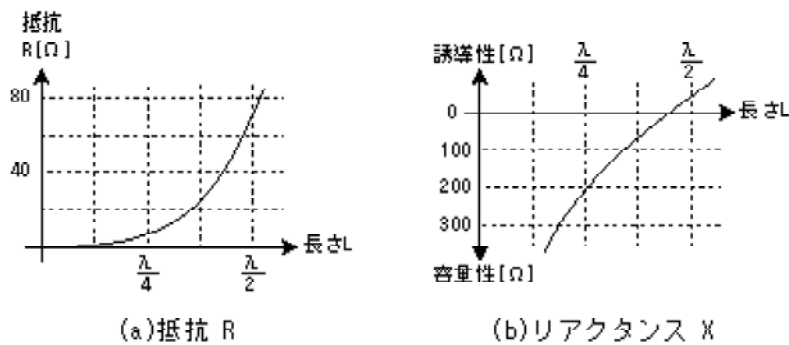


図1-8 ダイポールアンテナの出力インピーダンス

長さが $\lambda/2$ より短くなると、抵抗は急速に小さくなります。リアクタンスは容量性になって急速に大きくなります。図1-8はこの様子を示したもので、値は正確ではありません。あくまで傾向を示したものです。このようにアンテナは短くなると、出力インピーダンスは小さなコンデンサとみなすことができるのがわかります。なお、以降でこのコンデンサを出力容量とよぶことにします。

次に発生電圧ですが、単純に考えると電圧=電界強度×距離ですので、電界強度×アンテナの長さと考えられますが、残念ながらこのように簡単にはなりません。実際に発生する電圧はこの値より小さくなります。そこで実効長という考えを使います。実効長を使うと発生電圧は、アンテナの実効長×電界強度になります。実効長は実際の長さより短くなります。長さが $\lambda/2$ のときの実効長は λ/π になります。 π は円周率です。長さが短くなると、実効長は実際の長さの約半分になります。

以上は上下に金属棒があるダイポールアンテナでした。電流は例えば上の金属棒から下の金属棒へ流れます。ですから、上下に金属棒がないと電流が流れることができません。例えば下の金属棒がなければ電流が流れることができません。しかし、下の金属棒のかわりに大地にアースをすれば大地に電流が流れることができ、アンテナとして動作することができます。このアンテナは接地アンテナとよばれます。図1-4の送信アンテナが接地アンテナでした。 $\lambda/4$ 接地アンテナの発生電圧は、 $\lambda/2$ ダイポールアンテナの約半分になります。また、出力インピーダンスも約半分になります。

実際のラジオには、 $\lambda/2$ ダイポールアンテナや $\lambda/4$ 接地アンテナを使用することは有りえません。あまりにも長さが長くなるからです。ラジオのアンテナに使用するのはいくばくか数mぐらいの長さです。周波数 $f=1\text{MHz}$ のときの波長 $\lambda=300\text{m}$ ですから、このようなアンテナは波長に比べて十分短いので、集中定数回路つまり普通のコンデンサやコイルと同じように考えることができます。以下では、この短いアンテナについて考えることにします。

短いアンテナを考える上で重要なことがあります。それは、金属中の電界は完全に0になるということです。外部電界のために金属中の電子が力を受けて移動し、電荷が発生します。この電荷による電界は外部電界とは逆方向で、外部電界を打ち消します。そして、完全に金属中の電界が0になったところで平衡します。結果として、外部電界に比例して金属表面に電荷が発生します。

短いアンテナを外部電界中に置いた場合を図1-9に示します。以上で説明したように外部電界に応じて図のように電荷が発生します。そして、外部電界の方向が反転するたびに抵抗で示した負荷に電流が流れます。こうして外部電界から電力を取り出すことができます。ところで、この動

作はまさにコンデンサに交流電源を接続したときと同じです。つまりアンテナが短くなると、ただのコンデンサになることがわかります。

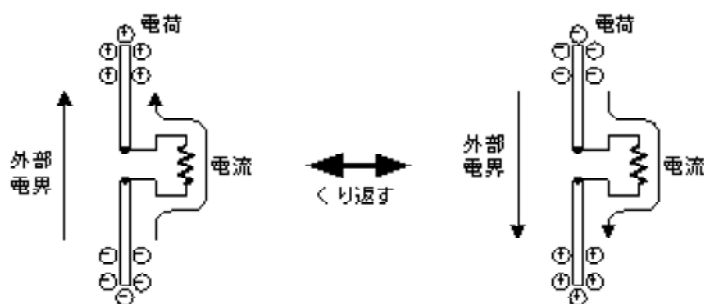


図1-9 短いダイポールアンテナの動作

短いアンテナでは、実効長は前述したように実際の長さの約半分になります。では、長さが同じで太さが違うとどうなるでしょうか。アンテナが太い程より多くの電荷が発生しますが、長さが同じですので発生電圧は同じです。このとき多く発生した電荷は、出力容量が大きくなる効果となります。



図1-10 ロッドアンテナ

以上は短いダイポールアンテナの場合です。実際に私達がラジオを作る場合、よく使用するのは図1-10に示すロッドアンテナです。もちろん、このロッドアンテナも波長 λ に比べて十分短いものです。ロッドアンテナのかわりにビニール電線で代用することもよくします。ロッドアンテナは接地アンテナです。大地にアースしていませんが、ラジオ本体やそれを持っている人体が大地アースのかわりになっています。ロッドアンテナの実効長は約 $L/2$ です。ただしアースの機能が十分働いていた場合のときであり、実際はもっと短くなります。また、出力容量も理想的なものと比べかなり小さくなります。

ここで、このロッドアンテナと長さ $2L$ のダイポールとの比較をしてみます。ただしロッドアンテナの接地条件が理想的とします。ロッドアンテナではダイポールアンテナに比べ、有効な電界が半分になりますから発生電圧も約半分になります。ただし、接地した大地がダイポールと同じ働きをしますので、発生する電荷は同じです。アンテナ出力をショートしたときに発生する電荷は、だいたい発生電圧 $\times$ 出力容量ですので、出力容量は約2倍になります。これは前述したように出力インピーダンスが約半分になることを意味しています。

●バーアンテナ

電波の中にコイルを図1-11のように置いても電圧を発生させることができます。これはトラン

スの2次コイルと同じ原理です。最大の電圧を発生させるには磁界に平行に置く必要があります。図のように磁界に垂直に置くと電圧は発生しません。この図ではZ軸に平行に置いた場合を示しましたが、X軸に平行に置いて電圧は発生しません。透磁率が大きいフェライトコアを芯に用いると、より大きい電圧を発生させることができます。このフェライトコアを用いたコイルをバーアンテナとよびます。**写真1-1**に実際のバーアンテナ(あさひ通信SL-55GT)を示します。

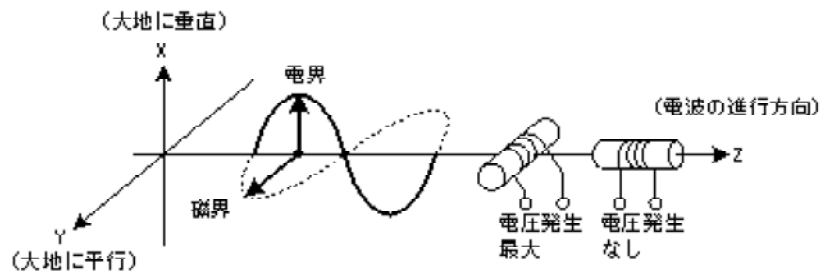


図1-11 磁界中のコイル

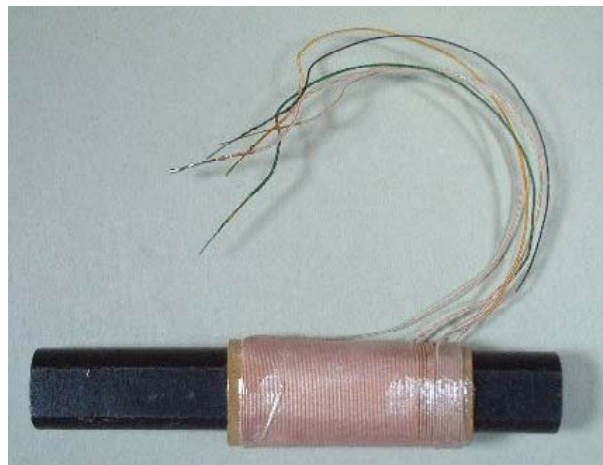


写真1-1 実際のバーアンテナ(あさひ通信SL-55GT)

バーアンテナの等価回路を図1-12に示します。Lはコイル自身のインダクタンス、Rはコイル自身の抵抗です。抵抗にはフェライトコアの損失や放射抵抗なども含まれますが、ほぼコイル自身の抵抗と考えても大差はありません。ただし直流抵抗ではなく、対象の周波数での交流抵抗です。トランスとの類推より発生電圧とコイルが並列になるのではと考えるかもしれませんが、発生電圧とコイルは図のように直列になります。トランスでは電源と2次コイルが密結合しており、2次コイルをショートすると大きな電流が流れます。これは電圧と2次コイルが並列になっていることを意味します。ところが電波では電波発生源とコイルは全く結合していませんので、コイルをショートすると電圧は0になります。これはコイルと発生電圧が直列であることを意味します。

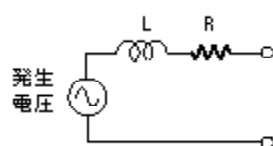


図1-12 バーアンテナの等価回路

発生電圧はトランスと同じで磁束の時間変化で発生します。ですから磁界の大きさに比例します。電波は電界と磁界の相互の作用で発生しますので、当然ながら電界と磁界には関係があります。ですから最終的には、バーアンテナの発生電圧も電界に比例します。この比例定数を線状アンテナに対応させて実効長と定義されます。バーアンテナの発生電圧も実効長×電界強度となるわけです。以下にバーアンテナの実効長を示します。

$$\text{実効長} = \frac{2\pi NS\mu_s}{\lambda}$$

ここで

N : コイルの巻き数

S : フェライトコアの断面積 [m²]

μ_s : フェライトコアの比透磁率(フェライトコアと空気の透磁率の比です)

λ : 波長 [m]

写真1-1のSL-55GTの場合で計算します。

N=87ターン、S≒37 mm²、λ=300m

μ_s はデータがありませんので、ここでは35とします。

$$\begin{aligned}\text{実効長} &= \frac{2\pi \times 87 \times 37 \times 10^{-6} \times 35}{300} \\ &= 2.4 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.4 \text{ mm}\end{aligned}$$

バーアンテナSL-55GTの実効長は2.4mmで、1cmありません。驚くほど小さい値です。1mのロッドアンテナでは、接地条件が悪くなく実効長が実際の長さの1/10としても、実効長は10cmあります。しかしバーアンテナの出力インピーダンスはロッドアンテナに比べかなり小さいので、それほど感度が悪いわけではありません。この辺のところは共振回路で改めて述べたいと思います。

●共振回路

アンテナの信号はいろいろな周波数を含んでいます。その中から希望する信号のみを取り出す必要があります。そのために使用されるのが共振回路です。以下共振回路について述べていきます。

・共振回路とは

コイルのインピーダンスは $j\omega L$ (L:コイルのインダクタンス) であり、角周波数 ω ($=2\pi f$) すなわち周波数 f に比例します。一方コンデンサのインピーダンスは $1/j\omega C$ (C:コンデンサの容量) であり、周波数 f に反比例します。ですから1組のコイルとコンデンサがあれば、インピーダンスの絶対値が一致する周波数が必ず存在します。すなわち $\omega L = 1/\omega C$ を満たす周波数が存在します。この周波数を共振周波数といいます。

コイルとコンデンサを直列または並列に接続した回路を共振回路といいます。図1-13に共振回路を示します。並列共振回路では同じ電圧がかかりますので、共振周波数ではコイルとコンデンサに流れる電流が同じ大きさで逆方向になります。このとき、並列共振回路全体には電流が流れることができません。ですから共振周波数では並列共振回路のインピーダンスは無限大になります。一方、直列共振回路では同じ電流が流れますので、共振周波数ではコイルとコンデンサにか

かる電圧が同じ大きさに逆方向になります。このとき、直列共振回路全体では電圧は0になります。ですから共振周波数では直列共振回路のインピーダンスは0になります。

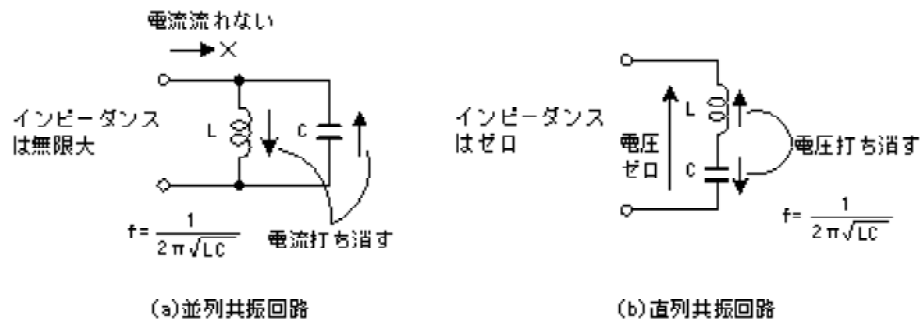


図1-13 共振回路

・コイルのQ

コイルには必ず抵抗分があります。等価回路を図1-14に示します。抵抗分は小さい方がよいコイルです。そこで、リアクタンスと抵抗の比($\omega L/r$)で、そのコイルの良さが定義されます。この値をQ(Quality factor)といい、大きいほど良いコイルといえます。 $Q=\omega L/r$ はラジオの回路では非常に重要なものです。この式を見るかぎり、周波数に比例してQが大きくなるように見えます。しかし、ラジオのような高周波では、表皮効果といって導体の表面しか電流が流れられなくなります。このために、周波数が高くなるほど抵抗が大きくなる現象があります。また、フェライトコアを用いていると、周波数が高くなるほどフェライトコアの透磁率が下がり、コイルのインダクタンスが小さくなります。このような現象のために、Qは周波数でそんなに変化しません。

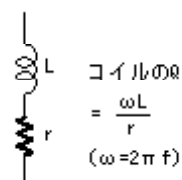


図1-14 コイルのQ

ところで、コイルのインダクタンスは巻き数の2乗に比例します。もし表皮効果を考えないならば、抵抗は巻き数に比例、線の断面積に反比例します。ですからQは(巻き数の2乗)/(巻き数×(1/断面積))=(巻き数×断面積)に比例することになり、全巻き線の断面積に比例することになります。これは表皮効果等を考えない単純な場合ですが、コイルのQの目安として重要です。

図1-14ではコイルのインダクタンスと抵抗を直列として考えました。実は、同じ回路をインダクタンスと抵抗の並列で考えることができます。この本ではコイルの直列並列変換とよぶことにします。図1-15にコイルの直列並列変換を示します。あくまでQが大きいときにのみ成立することに注意してください。後で示しますが、並列で考えた方が考え易い場合がありますので、この変換の考え方は非常に重要です。抵抗Rの逆数 $1/R$ 、すなわちコンダクタンスGで扱うこともよくありますが、ここでは抵抗Rのままで扱っています。並列回路で考えたときのQは $R/\omega L$ となります。並列回路のときは ωL が分母になるので注意してください。

$$\frac{1}{Z'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L'}$$

$$Z' = \frac{j\omega L' R}{R + j\omega L'} = \frac{j\omega L' R^2 + (\omega L')^2 R}{R^2 + (\omega L')^2}$$

$R \gg \omega L'$ なら (Q 大なら実際に成立する)

$$Z' \approx \frac{(\omega L')^2}{R} + j\omega L'$$

$Z' = Z$ となるには

$$r = \frac{(\omega L')^2}{R}, \quad L = L' \quad \text{であればよい}$$

つまり、左右の回路が等価であれば

$$L' = L, \quad R = \frac{(\omega L)^2}{r} = Q \times (\omega L) \quad \text{が成立する。}$$

図1-15 コイルの直列並列変換

・共振回路のQ

共振回路のQも定義されています。**図1-16**に共振回路のQを示します。(a)は直列共振回路のQですが、ここで r はコイルの抵抗分とコンデンサの抵抗分の和を示します。当然、コンデンサも損失分としての抵抗分を持ちます。コンデンサのQもリアクタンス/抵抗で定義されますが、コンデンサはこのQの逆数 $1/Q$ を $\tan \delta$ (誘電正接)として扱うのが一般的です。普通、コンデンサの抵抗分はコイルの抵抗分に比べ非常に小さく無視できますので、この r はコイルの抵抗と考えても大差ありません。ですから共振回路のQは、ほぼコイルのQと等しくなります。

図1-16(b)は並列共振回路のQです。抵抗 R はコイルの直列並列変換したものと、コンデンサの抵抗分の和ですが、上と同様にコンデンサの抵抗は無視できます。ですからコイルのQとほぼ同じ値になります。

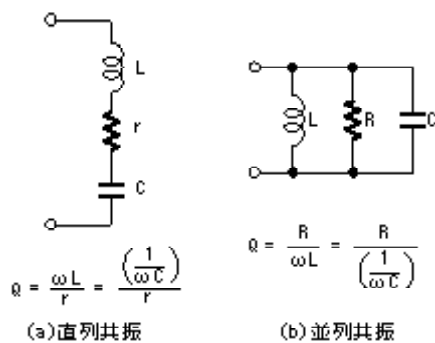


図1-16 共振回路のQ

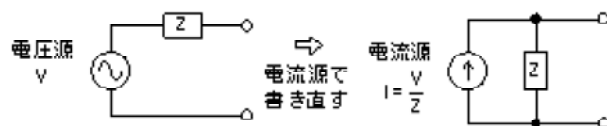


図1-17 電圧源を電流源で表す

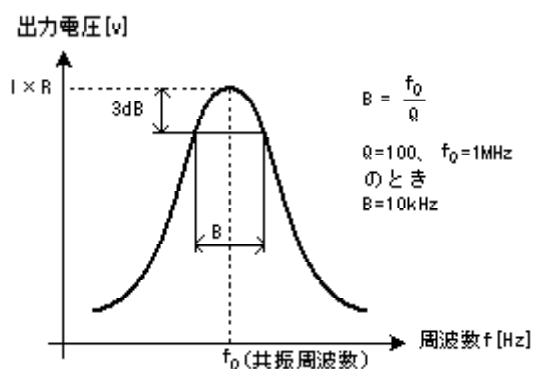
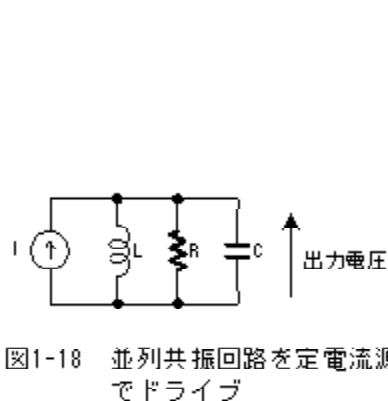
・並列共振回路を定電流ドライブする

トランジスタの出力はコレクタ電流であり、定電流です。また、高周波回路のトランジスタには並列共振回路がつながっていることが一般的です。ですから、並列共振回路を定電流でドライブする回路が重要になります。アンテナは共振回路に接続されますが、この回路も並列共振回路を定電流でドライブする回路に変換して考えると、非常に考え易くなります。以下では定電流でドライブした並列共振回路について述べます。

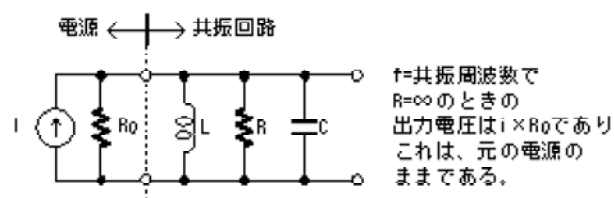
アンテナの等価回路では定電圧源を用いました。これを定電流源を用いたものに変換する必要があります。**図1-17**にその変換を示します。実際に電圧源を例えば1V、 Z を純抵抗1k Ω などとして、出力に適当な抵抗をつないで出力電圧を計算してみてください。全く同じ結果が得られるのがわ

かります。

並列共振回路を定電流でドライブしたときの回路を図1-18に示します。ラジオの回路では、いろいろと等価な変換をしていくとこの回路にたどりつくことが、ほとんどです。後で述べますが、アンテナに共振回路をつないだときも結局この回路になります。この回路の出力電圧を図1-19に示します。共振周波数で出力電圧が最大になります。この最大電圧の $1/\sqrt{2}$ になる(3dB下がる)周波数幅BはQに反比例します。つまり並列共振回路のQはピークの鋭さを表します。ですから鋭い選局をするには、大きいQの並列共振回路が必要です。ただしこの回路1段では満足な選局特性が得られませんので、多段に接続するのが普通です。1石ラジオのような簡易ラジオでは1段しか使いませんので、電界強度の強力な局があると混信します。



ここで極めて重要な注意点が二つあります。ひとつめは、共振回路は入力を全く増幅(厳密には電力増幅)していないことです。図1-19でRを大きくしていくと、出力電圧はいくらでも大きくなりますが、これはそもそも図1-18で出力インピーダンス無限大の電流源を用いているからです。通常、電流源は出力インピーダンスを持ちます。図1-20にその回路を示します。この回路では、共振周波数でRが無限大のとき、出力電圧は元の電源のまま、つまり共振回路はなんの影響も与えないことは明白です。このように並列共振回路は決して増幅作用をするものではありません。並列共振回路は、共振周波数で影響を最小限にして電源を素通りさせ、共振周波数以外では影響を大きくして電圧を低下させるものなのです。



ふたつめは、徐々にエネルギーをためて、徐々に電圧を上げていくことです。図1-18でRが無限大のとき出力電圧が無限大になりますが、出力電圧が無限大になるには無限大の時間がかかります。決して瞬時に電圧が無限大になるのではありません。Qが大きいほど最終電圧に達するには時間がかかります。Q=100で90%の最終電圧に達するには、70サイクル程度必要です。以上のことが明確になる例を図1-21に示します。並列共振回路の出力にダイオードを接続したものです。ここ

でダイオードは理想的なもので、正の電圧で抵抗=0、負の電圧で抵抗=∞とします。電圧Bが(b)になるのは簡単にわかります。しかし電圧Aが(c)になると、つい考えてしまうのではないのでしょうか。これは完全に間違いです。並列共振回路は電磁エネルギーがコイルとコンデンサを行き来しているものです。負の電圧は正の電圧(エネルギー)より発生します。ですから(d)のように正と負の電圧は必ず同じになります。ちなみにダイオードを通してつながったR2は半分のエネルギーしか消費しませんので、共振回路から見て等価的に $2 \times R_2$ となります。

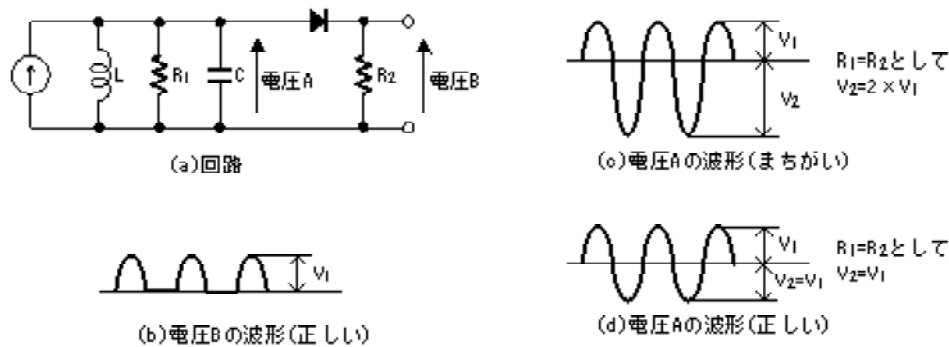


図1-21 共振回路にダイオードを接続

・並列共振回路の ωL を変化させる

図1-18で選局特性つまりQを一定にして、ピーク電圧を調整したいときがあります。例えば、できるだけピーク電圧を上げたい場合は ωL を大きくする必要があります。反対に、トランジスタ回路では ωL を小さくしてゲインを下げ、安定した増幅をしたいときがあります。このように並列共振回路において、同じQでも ωL を変化させる必要があります。図1-22に同じQで3種類の ωL の並列共振回路を示します。

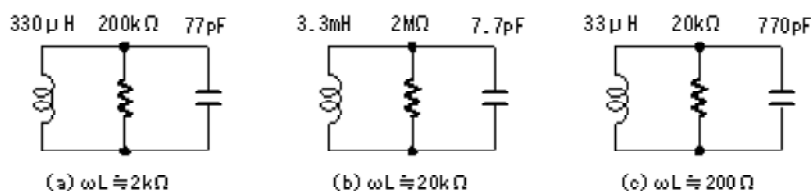


図1-22 同じQの並列共振回路(共振周波数 $\approx 1\text{MHz}$ 、 $Q \approx 100$)

では、これらは実際に実現可能でしょうか。(a)はラジオの並列共振回路として標準的なもので、もちろん実現可能です。(b)はどうでしょうか。(b)を図1-18の回路に用いると非常に大きな電圧が得られます。しかし、これはまず実現できません。3.3mHのコイルは大変大きなインダクタンスです。これを実現するには多くの巻き数が必要で、巻き線間の分布容量が増えてきます。この容量は並列についている7.7pFのコンデンサの容量に比べ無視できなくなってきます。このために並列共振回路として機能しなくなります。

(c)はどうでしょうか。これも実現は困難です。以下理由を考えます。前述したように表皮効果を考えない場合は、Qはコイルの全断面積に比例します。ですからQを一定にして ωL を小さくするためには、極めて太い線を巻く必要があります。しかし太い線では占積率が悪く、どうしても全断面積が小さくなってしまいます。さらに表皮効果を考えると、細い線を多数束ねて巻く必要が

あり、この場合も占積率が悪くなってしまいますし、何より非現実的です。さらに次の問題もあります。20k Ω の抵抗は、直列に付いているときは、わずか2 Ω です。このように ωL が小さい場合は抵抗分が非常に小さくなってきます。こうなると、放射抵抗、コンデンサの損失、フェライトコアの損失など通常無視できるほど小さい損失が無視できなくなってきます。このために ωL が小さくなるとQを大きくできなくなるのです。

しかし、前述したようにトランジスタ回路では、Qを下げずに ωL を小さくしたいときがよくあります。このときは図1-23のように並列共振回路を構成します。 ωL が小さい共振回路では共振電流が大きく、よって損失抵抗が大きく影響するのですが、図1-23の入力には共振回路の損失のみを補う電流しか流れないので、Qを変えることなく ωL を小さくできるのです。なお、トランスについては第3章増幅回路で詳しく述べます。

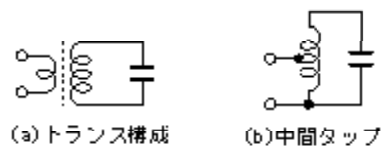


図1-23 ωL が小さいときの並列共振回路

・並列共振回路からエネルギー(電力)をとる

図1-18に並列共振回路を示しましたが、実際はこの回路に負荷をつなぐ必要があります。この負荷とは通常、トランジスタ回路です。超簡単ラジオのゲルマニウムラジオでは直接検波回路がつながります。このときの回路を図1-24に示します。このように負荷がつながると全体のQが下がり、選局特性が悪くなってしまいます。一般に共振回路からよりエネルギーをとると、より選局特性が悪くなる、すなわちピークの山が鈍くなります。

インピーダンスマッチングといって最もエネルギーがとれるのは図1-24において $R_1=R_2$ のときです。しかし、このときQが半分になってしまいます。実際のラジオの設計ではこの辺の妥協点を見つけることになります。共振回路にトランジスタ回路をつなぐ方法については第5章ダイオード検波ラジオで詳しく述べます。

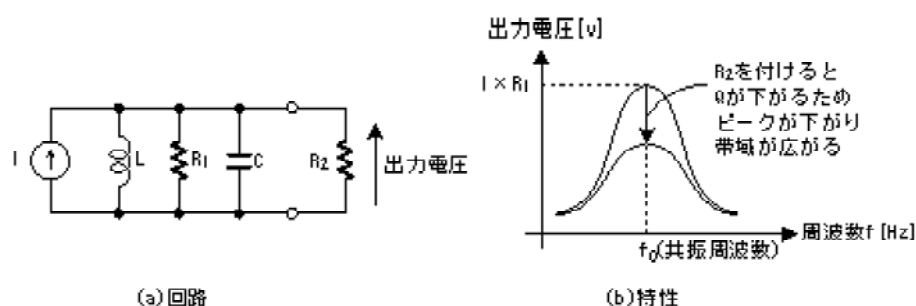


図1-24 共振回路からエネルギーをとる

・ $\lambda/2$ アンテナをつなぐ

並列共振回路に実際にアンテナをつなぎます。まず $\lambda/2$ アンテナからです。通常私達を作るラジオでは $\lambda/2$ アンテナは使用されませんが、重要なアンテナですので簡単に触れておきます。並列共振回路に $\lambda/2$ アンテナをつないだときを図1-25に示します。ここでアンテナの出力インピー

ダンスが 75Ω になっていますが、これは共振周波数のときのみです。周波数が変化するとアンテナの出力インピーダンスも変化することに注意してください。

アンテナの出力インピーダンスが小さいので、並列共振回路の ωL も極めて小さくする必要があります。 ωL が大きいと、並列共振回路があってもなくても同じ、つまり何の影響も与えなくなってしまいます。ですから図1-23に示した並列共振回路を用いる必要があります。さらに負荷になるトランジスタ回路のインピーダンスも考慮する必要があります。これらの結果、実際には図1-25に示した回路が使用されます。

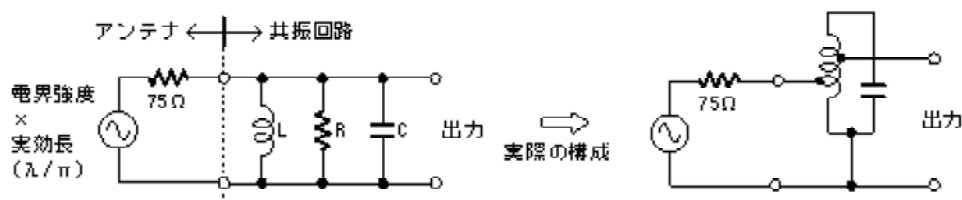


図1-25 $\lambda/2$ アンテナをつなぐ

・短い線状アンテナをつなぐ

私達がラジオを作る場合、数mのビニール線をアンテナとしてつなぐ場合がよくありますが、そのときの回路を図1-26に示します。C1はアンテナの出力容量ですが、アンテナの状態によって変化します。ですから、その変化を吸収するために大きなコンデンサC2を用いる必要があります。さらに選局のためにC2を変化させる必要があります。このために可変コンデンサ、通称バリコン（バリアブル・コンデンサの略）を用います。写真1-2にラジオ用バリコンを示します。もちろんLを変化させてもよいのですが、あまり使用されません。定電流源は図に示すように周波数に比例することに注意してください。

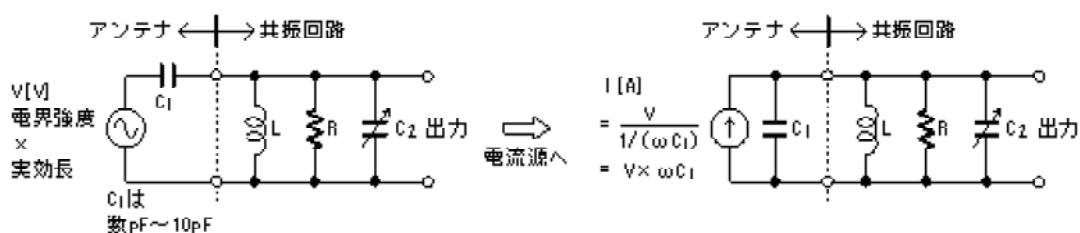


図1-26 短い線状アンテナをつなぐ



写真1-2 AMラジオ用バリコン

図1-26の定電流源は $V \times C1$ に比例しています。これより、長さ $2L$ のダイポールアンテナと長さ L の接地アンテナでは同じ出力になるのがわかります。ダイポールは接地アンテナに比べ V は2倍ですが、 $C1$ は $1/2$ ですので、 $V \times C1$ は同じになるからです。

・バーアンテナをつなぐ

私達がラジオを作る場合、バーアンテナを使うのが最も一般的です。実際、以降でいろいろなラジオを作っていきますが、すべてバーアンテナを用いています。このバーアンテナを並列共振回路につないだときを図1-27に示します。 C は前述したバリコンです。バーアンテナの発生電圧を定電流源に変換し、さらにコイルの直列並列変換したものです。発生電圧 V は磁束の微分ですから周波数に比例します。ですから定電流源 I は周波数に関係なく一定になります。共振周波数のときの出力は $(V/\omega L) \times R$ です。 $R=Q \times \omega L$ ですから、結局出力は $V \times Q$ になります。出力に負荷をつながないとき、共振周波数のときの出力電圧は、アンテナの発生電圧の Q 倍になります。ここで注意が必要です。前述したように、この Q 倍の電圧(厳密には電力)は共振回路で増幅したものではありません。あくまでもアンテナが受信した電力であり、共振周波数のときに、その電力を減衰せずに取り出したものです。

バーアンテナの実効長の項で、バーアンテナの実効長が短い線状アンテナの実効長に比べ非常に短いことに言及しました。しかしながらバーアンテナはそんなに感度は悪くないとも述べました。これはこの回路と図1-26を比べると明確になります。どちらも定電流源に変換するときに、出力インピーダンスで割り算しますが、バーアンテナの方が小さい値で割るので、定電流源の値が大きくなります。それでもバーアンテナの定電流源は線状アンテナに比べ小さいものです。

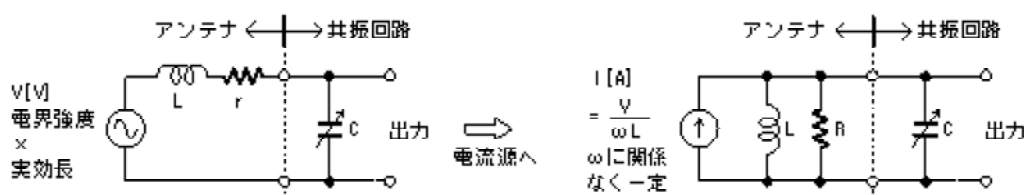


図1-27 バーアンテナをつなぐ

ここで、図1-26の線状アンテナと図1-27のバーアンテナの出力電圧を比較してみます。線状アンテナは50cmの接地アンテナ、バーアンテナはSL-55GTとします。まず、50cmの接地アンテナですが、高さ50cm、太さ5mmくらいの完全な接地アンテナの容量は約5pFが目安といわれています。周波数 $f=1\text{MHz}$ とすれば、 $32\text{k}\Omega$ です。実効長は完全な接地アンテナでは長さの半分の25cmです。以上の条件でバーアンテナSL55-GTと比べてみます。実効長が約100倍ですので、誘起電圧は約100倍です。一方、定電流は出力インピーダンスで割り算しますので、 $2.1\text{k}\Omega / 32\text{k}\Omega = 0.07$ 倍です。ここで、 $2.1\text{k}\Omega$ はバーアンテナSL-55GTの ωL です。よって、完全な50cm接地アンテナの共振回路の出力は、バーアンテナSL-55GTと比べて $100 \times 0.07 = 7$ 倍となります。以上は50cmの接地アンテナで考えましたが、100cmのダイポールでも同じ出力になります。

高々50cmの接地アンテナでバーアンテナより7倍大きい出力が得られるという結果になりました。しかし、実際の50cmのロッドアンテナでは、接地条件が完全ではなく誘起電圧はもっと低くなり

ますし、出力容量はもっと小さくなります。細いビニール線を代用すると、出力容量はさらに小さくなります。また、人体が誘起電圧や出力容量に大きく影響します。ですから、実際は1/10～1倍くらいにしかならず、受信状態も安定したものにはなりません。では、100cmのダイポールではどうでしょうか。このときも、人体やイヤホンの線などが大きく影響してきますので、やはり7倍も大きい出力は望めません。

以上各種アンテナに並列共振回路をつないだときの回路を示しました。これらに示した出力にはトランジスタ回路が接続されます。トランジスタ回路との接続にはインピーダンスマッチングやトランスの原理等の知識が必要になってきます。これらは第3章増幅回路で詳しく述べます。

・直列共振回路ではどうなるか

ここまでアンテナには並列共振回路を用いてきました。なぜ直列共振回路では、いけないのでしょうか。図1-28に各アンテナに直列共振回路をつないだ場合を示します。(a)は短い線状アンテナに可変コイルのみを接続したものです。この回路ではいろいろと問題があります。まず、Cはアンテナの状態で変化しますので受信が安定しません。さらにこの共振回路は図1-22の(b)に相当しますので、そもそも実現が非常に困難なものです。(b)は(a)にバリコンC2を追加して、共振回路として実現可能なものにしました。また、こうすることによってC1の変化を吸収できるようになります。しかし出力にトランジスタ回路をつなぐときに、インピーダンス変換のために別にトランスが必要になります。しかも、このトランスの実現は結構困難なものですので、この回路が使用されることはありません。後で述べますが、図1-27ではコイルLに2次巻き線を巻くことによって、このトランスを兼ねることができるのです。(c)はバーアンテナの場合です。これも(b)と全く同じで、別途インピーダンス変換用のトランスが必要になり、絶対に使用されません。

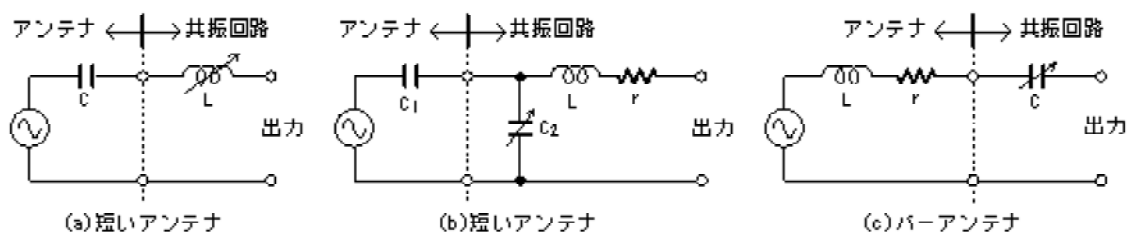


図1-28 直列共振にしたアンテナ(実際には使用しない)

●電界強度の実測

以降で製作するラジオではすべてバーアンテナを使用しますが、このバーアンテナを用いて、実際に私の家の中の電界強度を測ります。家の中では建物の鉄骨などによって電磁界が乱されていますので、正確なものではありません。さらに厳密な測定でもありません。ですから、あくまで目安です。目的は正確な電界強度を求めることではなく、電界強度を実際に求めることにより、電波の電界強度、バーアンテナ、共振回路などを具体的に理解することです。その結果、以降のラジオの設計が非常に分かり易くなるはずです。

・測定回路

図1-27の出力を実際に測定して、最終的に電界強度を計算して求めます。その過程で、電界強

度、パーアンテナ、共振回路などを具体的に理解するのが、主たる目的です。図1-27の出力を直接オシロスコープで測定できると事は簡単なのですが、それはできません。出力電圧が小さすぎますし、オシロスコープの入力インピーダンスやプローブそのものが影響します。そこでOPアンプを用いて増幅します。OPアンプを用いるとゲインを正確に決定できますし、十分大きい入力インピーダンスが得られます。私はNational Semiconductor社のLM6171を用いました。LM6171はUnity GB積が100MHzの非常に高速なOPアンプです。高速なOPアンプとして電流帰還型が有名ですが、電流帰還型は帰還抵抗の値にいろいろな制限が付きます。LM6171は電流帰還型のOPアンプにバッファアンプを追加して、汎用のOPアンプと同じ使い方ができるものです。AM中波を直接増幅する必要がありますので、このような高速OPアンプが必要です。

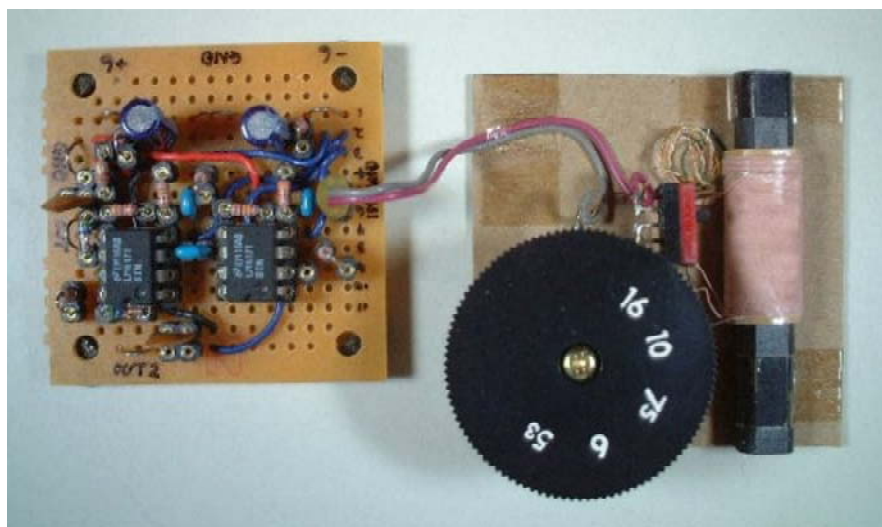
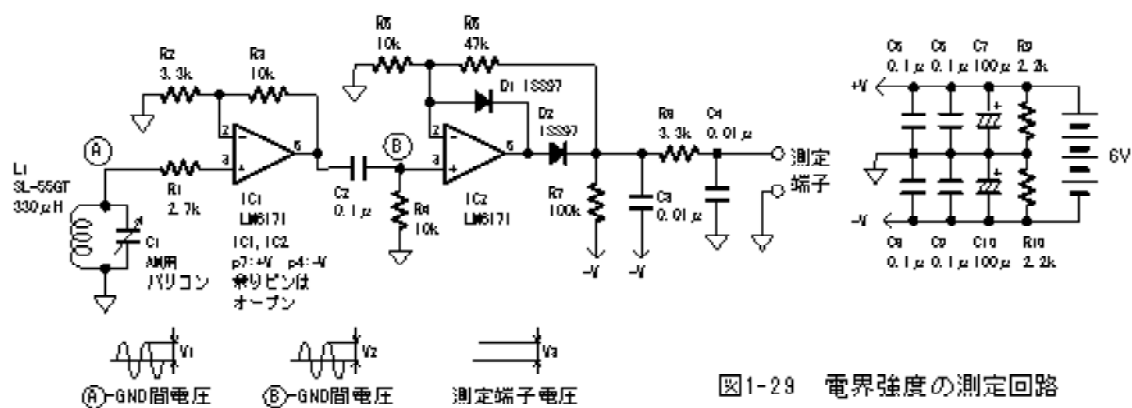


写真1-3 製作した電界測定回路

図1-29に測定回路を示します。実際に製作したものを写真1-3に示します。パーアンテナL1は付属の資料の1, 3番を使います。中間タップ5番は使用しません。IC1は非反転増幅回路、IC2はピークホールド回路です。どちらも典型的な回路で、OPアンプの解説書には必ず取り上げられているものです。IC1で増幅して、IC2でAM検波をしています。AM検波については第2章AM検波で詳しく説明します。ここではピークホールドして包絡線検波をしています。検波をすることにより、デジタルマルチメータのDC電圧レンジで測定できるようになります。測定端子をデジタルマルチメータのDC電圧レンジで測定すると平均電圧が得られますが、これは無変調時のピーク電圧になります。実は、この回路はラジオそのものです。測定端子に後述するクリスタルイヤホンを接続

すると、ラジオになります。クリスタルイヤホンですが、申し分のない音質です。普通の電界強度の局ならば音量も十分です。ただ、私の家では強力な局が混信してくるのが少々残念です。

C3でピークホールドしますが、ピークホールドしたままではAM波の最大電圧が得られてしまいます。包絡線検波にするためには、C3の電荷を適当な時定数で放電する必要があります。R7はそのためのものです。R7は-Vに接続していますが、これはグラウンドに接続すると、小さい電圧で十分な放電ができないからです。-Vに接続すると放電が一定になります。R8, C4は1次フィルタです。1次フィルタは第3章増幅回路で詳しく説明します。測定端子から高周波が漏れないように、このフィルタは絶対に必要です。高周波が漏れると、発振の可能性があります。D1, D2は小信号用のショットキーダイオードなら、なんでも可能です。D1はIC2の出力電圧がマイナスになるときに動作して、IC2の出力電圧がマイナスに振りきれのを防止します。D1がないと雑音が大きくなり、測定ができません。少しでも雑音を防ぐためにショットキーダイオードが適しています。R1はオフセット電流のキャンセル用です。なくても、まず問題はありません。C5, C6, C8, C9はバイパスコンデンサです。IC1, IC2の電源ピンの近くに配置する必要があります。なお、電源には電池を用いています。AC電源では、線状アンテナの要素が追加されますので好ましくありません。

LM6171の入力インピーダンスは $\pm 5V$ の電源で $40M\Omega$ typとなっています。本回路では $\pm 3V$ で使用していますので、多少は小さいかもしれません。この値ですと共振回路への影響は無視できます。つまり図1-24のR2を無限大としてよいということです。後で詳しく述べますが、トラジスタ回路では、こうはいきません。

v2は共振回路の出力v1を増幅したものです。ゲインは $(R2+R3)/R2=4.0$ ですから、 $v2=4.0 \times v1$ です。写真のように、きちっとした物でないので出力が入力に帰還され、多少ゲインが違っているかもしれません。v3はv2を増幅して(ゲイン $= (R5+R6)/R5=5.7$)、ピークホールドしたのですが、 $v3=5.7 \times v2$ にはなりません。上記の放電抵抗が付いているからです。そこで実際にオシロスコープで測定することにしました。結果は約4倍でした。つまり $v3=4.0 \times v2$ です。以上より、最終的には $v3=16 \times v1$ となります。この測定回路はラジオで、普通の局なら十分な音量であると述べました。ということは、バーアンテナの出力をわずか16倍増幅すれば、十分ラジオになることがわかります。ただしこれは共振回路の最大電圧の16倍であることに注意が必要です。LM6171の入力インピーダンスが十分高く、共振回路に影響を与えないからこそ、できることです。

ここで、お断りがあります。この項で電圧の値を示していますが、これらは0Vからピークまでの値です。以後、0Vからピークまでの値をピーク値ということにします。オシロスコープで値を求めていますので、ピーク値の方が都合がよいからです。最終的に実効値にするときに、ピーク値を $\sqrt{2}$ で割ることにします。

私の家の中で受信することのできる各局のv3の測定結果とv1の計算結果を表1-1に示します。

局名(周波数)	v3(測定値) [mV]	v1(計算値) [mV]
A局(1314kHz)	88	5.5
B局(1179kHz)	35	2.2
C局(1008kHz)	75	4.7
D局(828kHz)	832	52.0
E局(666kHz)	292	18.3
F局(558kHz)	42	2.6

表1-1 v3の測定結果とv1の計算結果

v_0 :バーアンテナに発生する電圧[V] (ピーク値)、 e :電界強度[V/m] (ピーク値)、 l_e :バーアンテナの有効長[m]、とすると、 $v_1=Q \times v_0$ 、 $v_0=e \times l_e$ となります。使用したバーアンテナSL-55GTの l_e は前に計算しています($l_e=2.4\text{mm}$)から、共振回路のQがわかれば電界強度 e が計算できるようになります。以降で実際に電界強度を求めますが、平均的な強度のC局の電界強度を求めることにします。C局はほぼ1MHzなので何かと好都合でもあります。なお以降でいろいろなラジオを作りますが、そのラジオの評価にこれらの局を、例えば「C局では十分な音量です。」などと使用します。

・共振回路のQの測定

Qの測定には、いろいろな方法がありますが、ここでは**図1-27**においてバリコンを取り去ったときの電圧と、バリコンを付けて共振したときの電圧の比からQを求めることにします。**図1-30**に測定回路を示します。**図1-29**の回路の初段にフィルタを追加したものです。このフィルタがないと雑音が多く正確な測定ができません。(b)に示すようにディップメータで1MHzの信号を注入しました。ここでディップメータについて少し説明します。使用したディップメータを**写真1.4**に示します。先端のコイルは周波数帯により交換可能になっています。このコイルにより発振しており、発振周波数はデジタル表示で直読できます。このコイルを(b)のように対象のコイル(ここではバーアンテナ)に近づけると、そのコイルに電圧が誘起します。このように線で接続しなくても、信号を注入できるので大変便利です。対象のコイルが共振回路になっていれば、共振周波数で発振強度を示すメータがピクッと下がり(ディップ)ます。これにより対象の共振回路の共振周波数を知ることができます。この原理よりディップメータとよばれています。

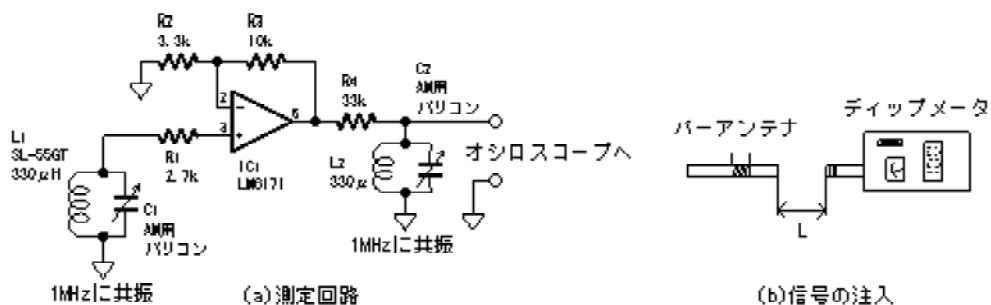


図1-30 Qの測定方法



写真1-4 使用したディップメータ

ディップメータでバーアンテナSL-55GTに1MHzの信号を注入して、IC1の出力をオシロスコープで測定します。このとき、C1を取り外して非共振にしたときの出力と、C1を取り付けて1MHzに共振させたときの出力の比をQとします。バーアンテナとディップメータの距離Lを、いろいろ変えて測定しました。Lが小さいとディップしますので、なるべくLは大きくする必要があります。結果を**表1-2**に示します。すべてほぼ100近くなので、以降で計算に用いるときはQ=100とします。

距離L[cm]	非共振(C取る)[mV]	共振(C付ける)[mV]	Q(計算値)
7	10	1320	132
8	19	2000	105
10	18	2000	111

表1-2 Qの測定結果

・バーアンテナの比透磁率 μ_s の測定

バーアンテナの実効長を求めるとき、SL-55GTの比透磁率 μ_s を35と仮定しました。ここではその根拠を示したいと思います。いろいろな方法が考えられますが、ここではフェライトコアを用いない空芯コイルとの比較で求めたいと思います。

写真1.5に製作した空芯コイルを示します。半径20mmの紙の筒に $\phi 0.4$ のエナメル線を120T巻いたものです。ハンディのインダクタンスメータで測定して、インダクタンスは $290\mu\text{H}$ でした。もう少し大きいほうがよいかもしれません。このコイルのQは同様に測定して95、C局の出力v3は87mVでした。



写真1-5 製作した空芯コイル

空芯コイルの比透磁率は1なので、実効長は

$$\frac{2\pi N_k S_k}{\lambda}$$

です。ここで N_k は空芯コイルの巻き数、 S_k は断面積です。
一方、バーアンテナの実効長は

$$\frac{2\pi N_f S_f \mu_s}{\lambda}$$

です。ここで N_f はバーアンテナの巻き数、 S_f は断面積です。
発生電圧は $87/75=1.2$ 倍だったので

$$\frac{2\pi N_k S_k}{\lambda} \times Q_k = 1.2 \times \frac{2\pi N_f S_f \mu_s}{\lambda} \times Q_f$$

ここで、 Q_k 、 Q_f は空芯コイル、バーアンテナのQです。
結局 $N_k S_k Q_k = 1.2 N_f S_f \mu_s Q_f$ となります。

$$N_k=120\text{T}, S_k=1257\text{mm}^2, Q_k=95$$

$$N_f=87\text{T}, S_f=97\text{mm}^2, Q_f=105$$

を代入して μ_s を計算すると、351になります。
なお、 Q_f は Q_k と同じ条件での値105を用いています。

ここで1つ注意したいことがあります。空芯コイルは**写真1-5**のように、きれいに整列して巻いています。もしランダムに巻いたらどうなるでしょうか。エナメル線はぐるぐると巻かれてビニール袋に入れられて売られています。このような状態に巻いてもコイルになります。このランダムに巻かれたコイルが使用できるかという問題です。答えは、このランダムに巻かれたコイルは線間容量が大きくて、ラジオの共振回路には使用できません。もし使用したらQは10にもなりません。ですから、**写真1-5**のように整列して巻く必要があるのです。

・電界強度の計算結果

ここで、実際にC局の電界強度を求めます。C局を受信したときの、バーアンテナの発生電圧 v_0 は以下になります。

$$v_0 = \frac{v_1}{Q} = \frac{4.7\text{mV}}{100} = 4.7 \times 10^{-2}\text{mV}$$

具体的な数字を入れた等価回路は**図1-31**になります。

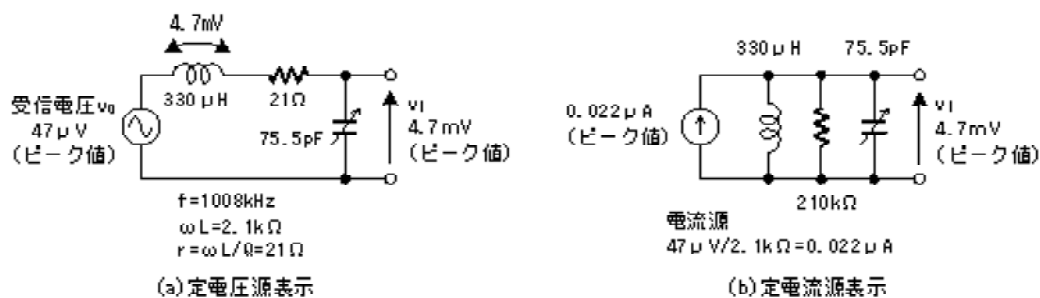


図1-31 C局受信時の回路

求める電界強度 e は以下になります。

$$e = \frac{v_0}{l_e} = \frac{4.7 \times 10^{-2}\text{mV}}{2.4 \times 10^{-3}\text{m}} = 20\text{mV/m}$$

実効値は $\sqrt{2}$ で割って 14mV/m となります。電界強度は大都市で $10\sim 50\text{mV/m}$ 、中都市で $2\sim 10\text{mV/m}$ 、

郊外で0.25～2mV/mといわれていますから、ほぼ妥当な値と思われます。ただし、電磁界は建物の鉄筋等で相当乱されていますので、この測定をした部屋では電界のみが極端に小さくなっているということも考えられます。この場合、ここで求めた電界強度はこの部屋での実際の電界強度ではなく、正常な電波(空中を進行中の電波)と仮定したときの電界強度ということになります。



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1章 ラジオの電波

(C)Yuji Fujihira 2009

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