

4.3 アンテナ巻線と同調巻線の動作

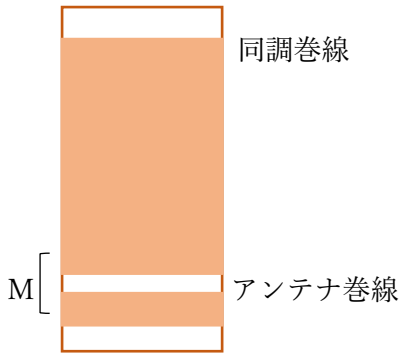


Fig.4-2 アンテナコイル

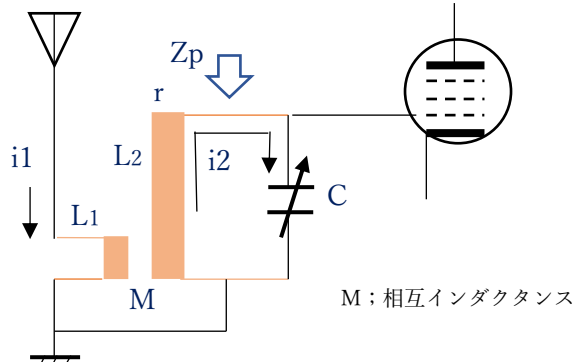


Fig.4-3 アンテナコイルと同調回路

アンテナ巻線に電流  $i_1$  が流れると、電磁誘導によって二次側の同調巻線に電圧が誘起される。考え方を Fig.4-3 で説明すると電流  $i_1$  に対し、同調巻線はインダクタ  $L_2$  及びその直流抵抗成分  $r$  並びにバリコンの容量  $C$  によって、直列回路が形成されることがポイントである。

同調巻線を  $r \sim L_2 \sim C$  の直列回路と考えると、直列回路のインピーダンス  $Z_s$  は

$$Z_s = r + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C} = \frac{(1 - \omega^2 L_2 C + j\omega C r)}{j\omega C} \dots \dots \dots 4-7$$

であり、同調周波数で  $1 - \omega^2 L_2 C = 0$ 、 $Z_s = r$  と極小になる。このとき、 $L_1$  に流れる電流との電磁誘導により最大の誘起電流が流れ、同調回路に電圧が発生する。

この際、アンテナ巻線  $L_1$  及び同調巻線  $L_2$  並びに相互インダクタンス  $M$  はどのように作用するだろうか。簡略化のため  $C$  を除いた回路を Fig.4-4 に示す。

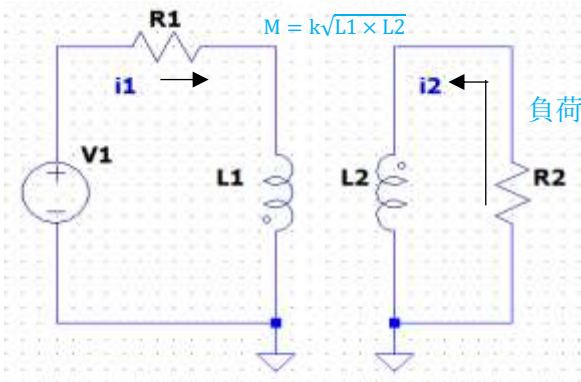


Fig.4-4 アンテナ巻線・同調巻線  
( $R_1$  ; 信号源抵抗,  $R_2$  ; 負荷抵抗)

一次側と二次側には次の関係式が成立する。

$$-R_1 \cdot i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} + V_1 = 0$$

$$-R_2 \cdot i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} = 0$$

初期値 0 として両辺をラプラス変換すると、

$$(R_1 + sL_1)I_1(s) + sM I_2(s) = V_1/s$$

$$sM I_1(s) + (R_2 + sL_2) I_2(s) = 0$$

$I_2(s)$  について解くと、

$$I_2(s) = -V_1 \cdot M / \{R_1 R_2 + s(L_1 R_2 + L_2 R_1) + s^2(L_1 L_2 - M^2)\} \dots \dots \dots 4-8$$

但し、簡易的に  $V_1 = 1 \text{ V}$  (直流) とする。

よって、

$$I_2(s) = -\frac{V_1 \cdot M}{L_1 L_2 - M^2} \left( \frac{1}{s^2 + \frac{L_1 R_2 + L_2 R_1}{L_1 L_2 - M^2} s + \frac{R_1 R_2}{L_1 L_2 - M^2}} \right) \dots \dots \dots 4-9$$

式 4-8 で、理想的な結合 ( $k \doteq 1$ ;  $M^2 \doteq L_1 \times L_2$ ) の場合を考えると  $s^2$  項は消滅するので、

$$I_2(s) = -\frac{V_1 \cdot M}{(L_1 R_2 + L_2 R_1)} \left( \frac{1}{s + \frac{R_1 R_2}{L_1 R_2 + L_2 R_1}} \right) \dots \dots \dots 4-10$$

これをラプラス逆変換すると、


$$i_2(t) = -\frac{V_1 \cdot M}{(L_1 R_2 + L_2 R_1)} e^{-\frac{R_1 R_2}{L_1 R_2 + L_2 R_1} t} \dots \dots \dots 4-11$$

故に、 $i_2$  は Fig.4-4 の図示とは逆方向、 $t=0$  で最大値  $\frac{V_1 \cdot M}{L_1 R_2 + L_2 R_1}$  の減衰電流となるので、 $M$  は同調巻線（同調回路）に流れる電流値に關与している。

$L_1=30 \mu\text{H}$ 、 $L_2=205 \mu\text{H}$ 、 $R_2=1 \text{M}\Omega$ 、 $k=1$ 、 $V_1=100 \mu\text{Vp-p}$  でシミュレーションすると、二次側は  $261 \mu\text{Vp-p}$ （増幅度約 2.6 倍）となり、前述最大値の計算と一致することが確認できる。

ここで  $L_2$  にキャパシタ  $C$  を並列接続して本来の同調回路とすると、約 20~30 倍のゲインが得られ、（動的増幅素子はないが）あたかも増幅するような動作をしていることが分かる（具体例参照）。

【補足 1】

矢印  から見た同調巻線のインピーダンス  $Z_p$  は、直流抵抗分  $r$  を無視して並列回路と考えると

$$Z_p = \frac{j\omega L_2}{1 - \omega^2 L_2 C} \quad , \quad \omega = 2\pi f \quad \dots \dots \dots 4-12$$

である。同調周波数（共振周波数） $f_r$  において  $Z_p = \infty$ 、外部からは何も接続がない状態であり、相互インダクタンス  $M$  がなければ電流の流入もないので、誘起する電圧の説明ができない。

【補足 2】

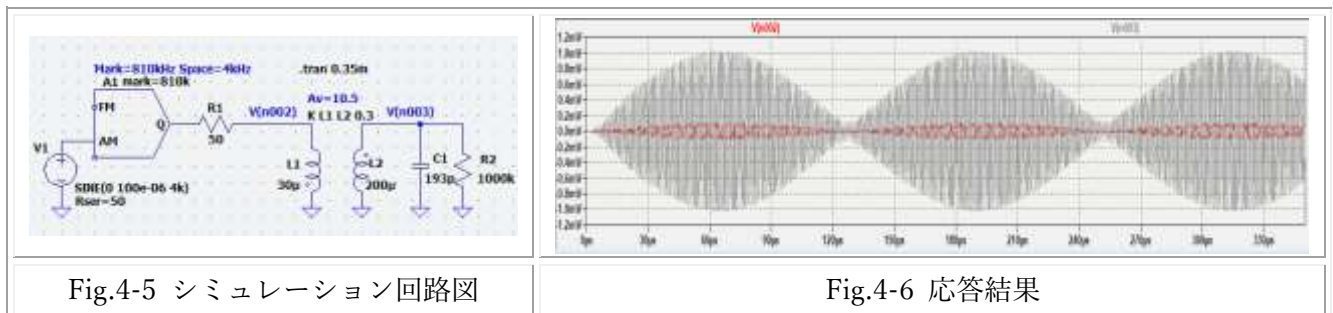
$s^2 (L_1 L_2 - M^2)$  項； $L_1=30 \mu\text{H}$ 、 $L_2=200 \mu\text{H}$ 、 $k=0.3$  ( $M=23 \mu\text{H}$ ) の場合

$$L_1 \times L_2 = 30 \times 10^{-6} \times 200 \times 10^{-6} = 6000 \times 10^{-12} \quad , \quad M^2 = (23 \times 10^{-6})^2 = 529 \times 10^{-12} \quad \text{となる。}$$

$L_1 L_2 - M^2 = 5.47 \times 10^{-9}$  から、 $s (L_1 R_2 + L_2 R_1)$  項とは  $10^9$  オーダの差があり、 $s^2$  項の關与は無視して良いと思われる。

【具体例】

Fig.4-5、Fig.4-6 に  $L_1=30 \mu\text{H}$ 、 $L_2=200 \mu\text{H}$ 、 $k=0.3$  ( $M=23 \mu\text{H}$ )<sup>4-3)</sup>、 $C_1=193 \text{pF}$  の結果を示す。



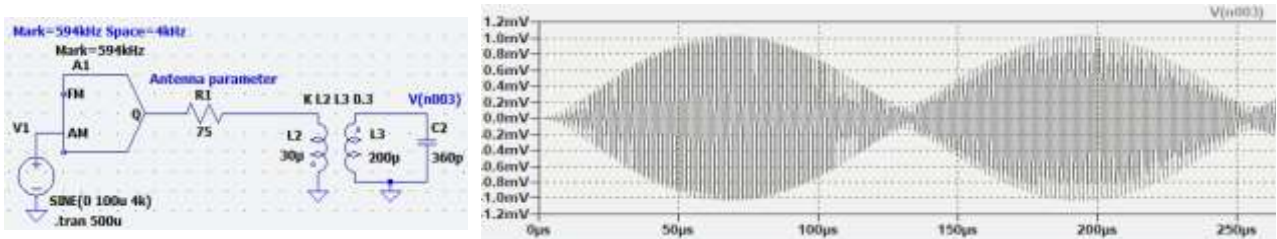
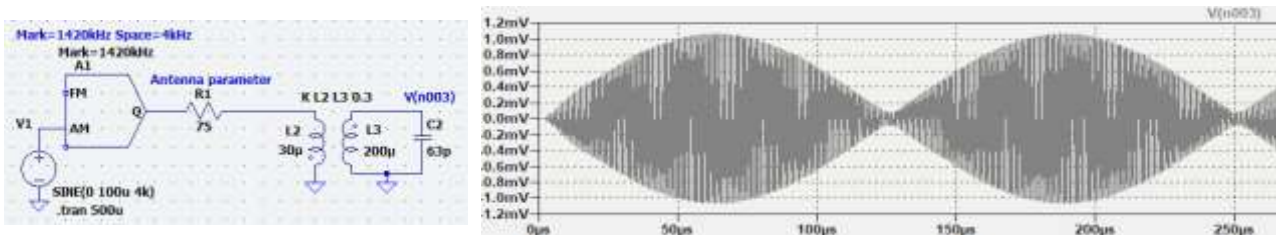
810 kHz を 4 kHz で AM 変調した信号を信号源インピーダンス  $50 \Omega$  でアンテナコイルに印加する。結合係数  $k$  は、LTspice のタブ Edit 内の pull down メニュー SPICE Directive で入力する。キャパシタ  $C_1$  による同調（共振）で、 $L_1$  で  $100 \mu\text{V}$  の信号が  $L_2$  では約  $1 \text{mV}$  となり、10 倍に増幅されてゲインは約 20 dB である。

4-3) 相互インダクタンスは  $M = k \sqrt{L_1 \times L_2}$  で算出（本 HP 検討資料 I アンテナ巻線の計算 参照）

## 4-4. アンテナコイルのゲイン

初段のアンテナコイルのゲインを上げることを考えてみる。自作コイルは並四コイル相当なので、低周波域から高周波域になるに従ってゲインが上がる低インピーダンス型<sup>4-4)</sup>である。

一次側アンテナ巻線に信号源から直接 AM 変調波を入力した場合のシミュレーション結果を Fig.4-7, Fig.4-8 に示す。必要なパラメータは、結合係数  $k$  と同調巻線の直流抵抗値  $5\ \Omega$  だけで寄生容量や高周波損失抵抗値は考慮していない。594 kHz と 1 420 kHz の同調回路（二次側）に発生する電圧  $V(n003)$  を比較すると、信号  $100\ \mu\text{V}$  の約 10 倍（20 dB）ではあるが、先のパラメータだけでは、前述のような高周波域でゲインが上がることの確認ができない。

Fig.4-7 アンテナコイルと同調回路応答（信号 4 kHz；100  $\mu\text{V}$ ，搬送波 594 kHz）Fig.4-8 アンテナコイルと同調回路応答（信号 4kHz；100  $\mu\text{V}$ ，搬送波 1 420 kHz）

この原因はアンテナのインピーダンスを  $75\ \Omega$ （信号発生器出力インピーダンスが  $75\ \Omega$ ）だけとしたためと考えられる。そこで、中波受信の疑似アンテナ定数<sup>4-5)</sup>を  $50\ \Omega - 14\ \mu\text{H} - 150\ \text{pF}$  の直列回路とすると、Fig.4-9 及び Fig.4-10 のようになる。

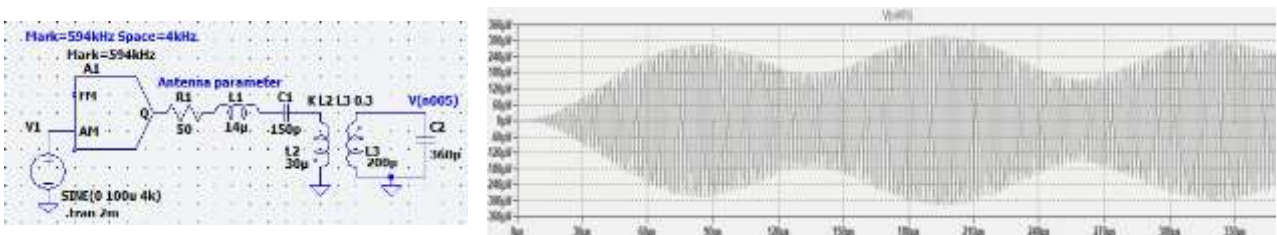
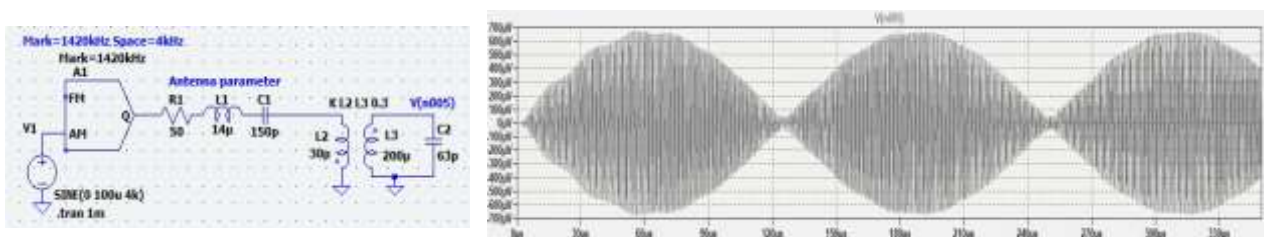
Fig.4-9 アンテナコイルと同調回路応答（信号 4 kHz；100  $\mu\text{V}$ ，搬送波 594 kHz）Fig.4-10 アンテナコイルと同調回路応答（信号 4kHz；100  $\mu\text{V}$ ，搬送波 1 420 kHz）

Fig.4-7 と Fig.4-9 を比較すると、594 kHz では  $150 \mu\text{V}$  (3.5 dB) であるが波形歪<sup>4-6)</sup>が生じている。その一方、1 420 kHz は波形もほぼ忠実に再現され、 $700 \mu\text{V}$  で約 7 倍 (17 dB) のゲインがある。冒頭記載したような低周波域から高周波域にかけてゲインが上がることを確認できる。また、同調巻線に発生する電圧は、アンテナ定数 (性能) に大きく依存しており、“アンテナは良いものを設置して受信環境を整える”ことが重要だと納得できる結果である。

#### 4-5. 結合容量 $C_m$ 追加では

アンテナ巻線 (一次側) と同調巻線 (二次側) 間を小容量キャパシタ  $C_m$  で結合する場合を考える。容量を適切に選択すればアンテナコイルのゲインを低周波域から高周波域に渡って上げることができそうである。 $C_m=5 \text{ pF}$  としてシミュレーションした結果を Fig.4-11, Fig.4-12 に示す。

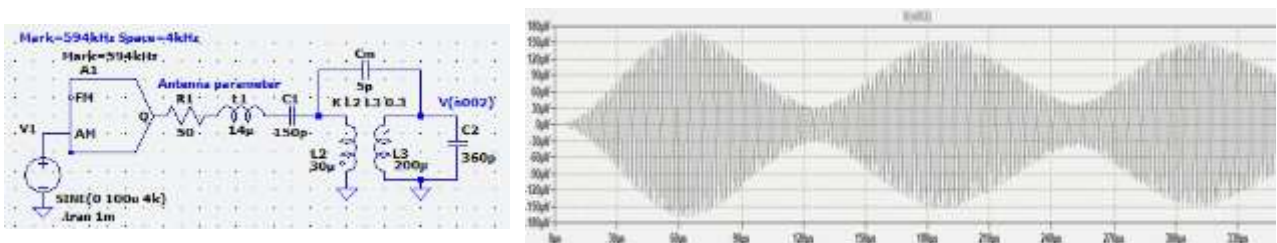


Fig.4-11 アンテナコイルと同調回路 (594 kHz, 4 kHz,  $C_m=5 \text{ pF}$ )

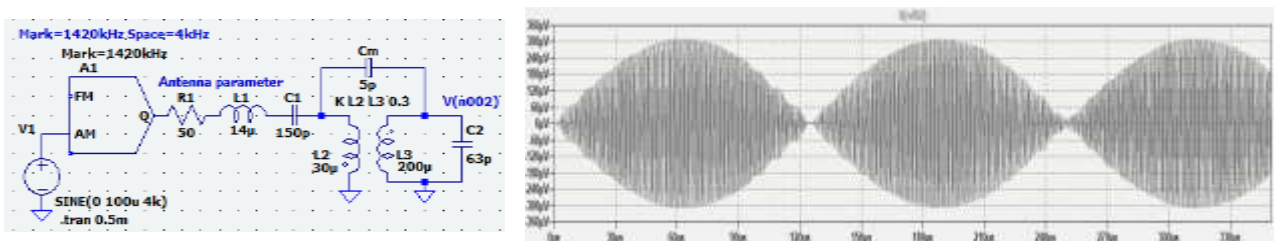


Fig.4-12 アンテナコイルと同調回路 (1 420 kHz, 4 kHz,  $C_m=5 \text{ pF}$ )

同調回路に発生する電圧  $V(n002)$  は、いずれも  $C_m$  接続前の  $1/2$  以下に減衰している。実機では  $C_m$  をトリマキャパシタにして可変しながら確認してみたが、ゲインが上がるような感触は得られなかった。したがって、ローインピーダンス型アンテナコイルでは、 $C_m$  結合による効果は期待できないものと思われる。また特筆する利点もないため、文献<sup>4-4)</sup>では言及されていないと考えられる。

一方、ハイインピーダンス型アンテナコイルでは、 $C_m$  接続で一定の効果がある図 (第 3・9 図) が掲げられている<sup>4-7)</sup>。ハイインピーダンス型のアンテナ巻線はハニカム巻線になっている場合が多く、自作と手巻きは少々困難である (密にかつ体裁よく巻き上げるには工夫が必要)。

本 HP の「ハニカム巻アンテナコイル I」でも記載したが、所定の容量 ( $\sim 1 \text{ mH}$ ) を得ることはできず、また同調巻線との距離を  $6 \text{ mm}$  としたためか、受信良好な放送局がカブって聞こえるようになってしまい、検討を中断した経過がある。よってこの場合の  $C_m$  効果も調べていない。また別の機会に検討したい。

4-4) ラジオ回路ハンドブック 萩原 進著 昭和 29 年 9 月 10 日第 7 版 オーム社 65 頁 (第 68 図)  $\sim$ 66 頁

4-5) 新制 電気実験 (改訂新版) 横田弥三著 昭和 43 年 2 月 10 日 オーム社

4-6) 結合係数  $k$  にも関係する。

4-7) ラジオ受信機の設計と計算 佐藤嘉一著 昭和 43 年 9 月 1 日第 3 版 オーム社 56 頁 $\sim$ 57 頁