

4.3 アンテナ巻線と同調巻線の動作

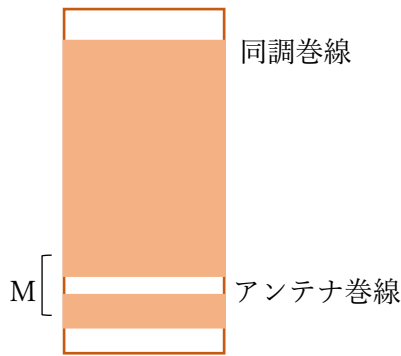


Fig.4-2 アンテナコイル

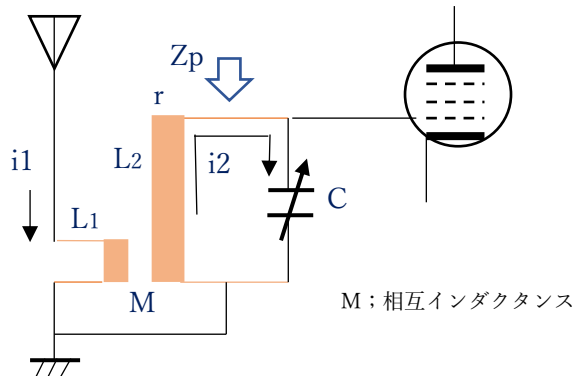


Fig.4-3 アンテナコイルと同調回路

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

$$Z_s = r + j\omega L_2 + 1/j\omega C = (1 - \omega^2 L_2 C + j\omega C \cdot r) / j\omega C \quad \dots \dots \dots 4-7$$

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。

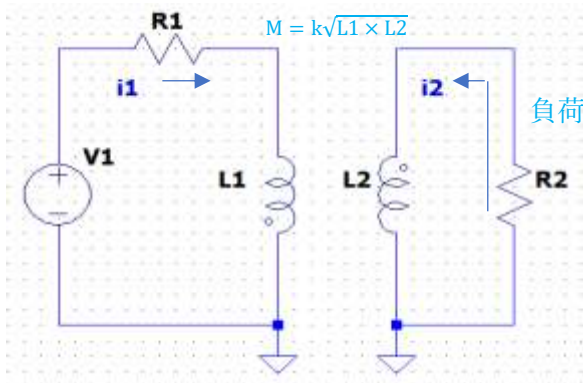


Fig.4-4 アンテナ巻線・同調巻線
(R_1 ; 信号源抵抗, R_2 ; 負荷抵抗)

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、

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

但し、簡易的に $V_1 = 1 \text{ V}$ (直流) とする。

よって、

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

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、

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

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) に流れる電流値に関与している。

$L_1=30 \mu\text{H}$, $L_2=205 \mu\text{H}$, $R_2=1 \text{M}\Omega$, $k=1$, $V_1=100 \mu\text{Vp-p}$ 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 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 項の関与は無視して良いと思われる。

【具体例】

Fig.4-5, Fig.4-6 に $L_1=30 \mu\text{H}$, $L_2=200 \mu\text{H}$, $k=0.3$ ($M=23 \mu\text{H}$)¹⁾, $C_1=193 \text{pF}$ の結果を示す。

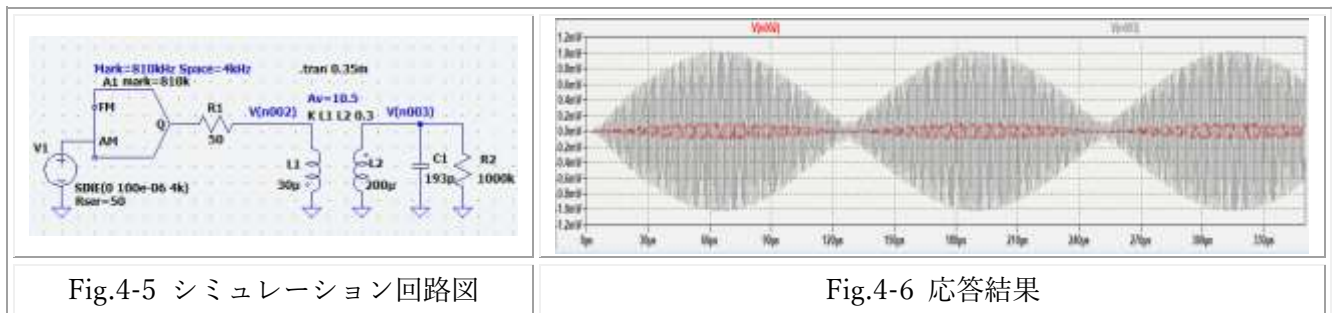


Fig.4-5 シミュレーション回路図

Fig.4-6 応答結果

810 kHz を 4 kHz で AM 変調した信号を信号源インピーダンス 50Ω 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 1mV となり, 10 倍に増幅されてゲインは約 20 dB である。

1) 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)