

# アンテナと整合回路

講師 JA5FP/間 幸久

## 1. はじめに... 本講座の目的

136kHz 帯ではアンテナ寸法が波長に対して理想的ではないので、独特の難問があります。ここでは如何にして送信アンテナ系の能率を下げないかという論議をします。(良い送信アンテナはまた能率の良い受信アンテナでもあります。)

空間に放射される実効輻射電力とアンテナの能率、利得、送信電力には、次の関係があります。

$$\text{実効輻射電力} = \frac{\text{アンテナの放射抵抗}}{\text{接地抵抗} + \text{損失抵抗} + \text{放射抵抗}} \times \text{アンテナの利得} \times \text{空中線電力} \quad (1)$$

ここで、アンテナの放射抵抗はおおむね  $10m \sim 100m\Omega$  です。接地抵抗や損失抵抗は  $10 \sim 100\Omega$  となるのが一般ですから、仮にアンテナの利得を 3 としても送信電力の数百分の 1 程度が電波として放射されるにすぎません。136kHz 帯を試みる場合、アンテナの放射抵抗を如何に大きくし、逆に接地抵抗と損失抵抗をどれだけ小さくするかが鍵になります。

図 1 から 136kHz 帯アンテナの設置状況と電気的な等価回路を想定してください。以下、このような環境でのアンテナの動作と整合回路を検討します。

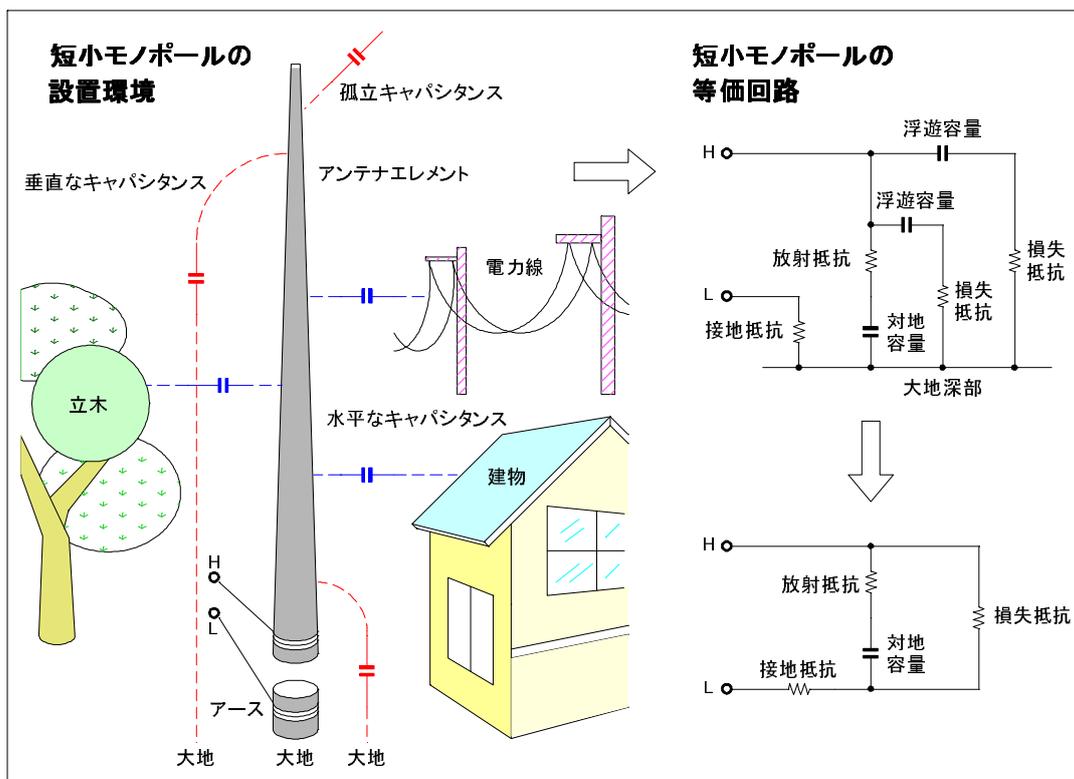


図 1: 垂直短小モノポールアンテナと周辺障害物が与える影響

## 2. ダイポールとモノポールそして垂直短小モノポールアンテナ

ダイポールアンテナはエレメントが  $\lambda/2$  の長さでその中央で給電しますが、その半分のエレメントを給電点で直角に折り曲げてカウンターポイズとし、給電点に多くのカウンターポイズを接続した形状にしたのがモノポールアンテナです。電気的にはダイポールが約  $73\Omega$  の放射抵抗を示しますが、モノポールアンテナでは半分の  $36\Omega$  になります。ダイポールアンテナの利得を基準にするとモノポールアンテナの利得は 2 ですから、両者の実効輻射電力は同じということになります。

垂直偏波が適している LF 伝播ではアンテナエレメントを垂直に配置するので、アンテナ高が  $\lambda/4$  で済むモノポールアンテナの方が容易に建設できます。そこで、大地接地またはカウンターポイズの問題を除いて考えると、垂直モノポールアンテナが 136kHz 帯アンテナの基本型となる訳です。

実際には、 $\lambda/4$  の長さとしても 136kHz では  $2,200/4 = 550m$  にもなり、その高さ(エレメント長)のアンテナは一般に建設不可能です。何とかその数分の一程度に短縮できればいいのですが、やむなく自宅や移動で実現可能な 10~30m 高の垂直短小モノポールを選択対象とします。 $\lambda = 2,200m$  に対してエレメント長  $1/200 \sim 1/100$  というのは、もう 短縮アンテナ というよりも 点アンテナ として考えた方が適切です。実際にシミュレーションすると、正規の  $\lambda/4$  モノポールアンテナに対して、この程度の垂直短小モノポールアンテナは 20~30dB の放射能率低下があります。

## 3. 垂直短小モノポールアンテナの定数

$\lambda/4$  モノポールアンテナはそれ自体で共振状態にあり給電点でのリアクタンスはゼロとなりますが、エレメント長をそれより短くするにしたがって容量性リアクタンスが増加し放射抵抗は低下することは、私たちは常識的に知っています。では、その値(アンテナ定数)は具体的にどうなるでしょう。

### (a) 計算による方法

#### ● 静電容量

岡本次雄著「アマチュアのアンテナ設計」によると、一端を接地した直線導体の静電容量  $C_0$  は、導体の長さ  $l$  [cm] および半径  $r$  [cm] との関係で式 2 で計算されます。

$$C_0 = \frac{l}{2 \log_{\epsilon} \frac{l}{r} + 0.4} \times \frac{10^{-11}}{9} \text{ [F]} \quad (2)$$

ON7YD は、次の簡略計算法を考えました。 $C_0$  は導体の垂直部分の長さ  $l_v$  [m] と水平部分の長さ  $l_h$  [m] とは次の関係があります。実用上この式 3 で十分な精度があります。

$$C_0 = 6l_v + 5l_h \text{ [pF]} \quad (3)$$

例えば、10m 高で 10m 長の逆 L アンテナの場合、 $C_0 = 110pF$  を呈します。これは容量性リアクタンスが 136kHz で  $11k\Omega$  という大きな値です。

#### ● 放射抵抗

「アマチュアのアンテナ設計」によると、アンテナの放射抵抗  $R_r$  は導体の実効高  $h_e$  [m] が波長  $\lambda$  [m] より小さい場合は、式 4 となります。

$$R_r = 160\pi^2 \left( \frac{h_e}{\lambda} \right)^2 \text{ [\Omega]} \quad (4)$$

ON7YDによると、136kHzにおける $R_r$ はアンテナ高 $H$  [m]から式5で計算できます。

$$R_r = 0.082 \times H^2 \text{ [m}\Omega\text{]} \quad (5)$$

例えば、20m高のモノポールアンテナの放射抵抗は約33m $\Omega$ という小さな値であることに注意してください。

#### (b) 測定器による方法

アンテナ定数の測定器としてアンテナインピーダンス計またはアンテナアナライザがありますが、その測定原理は高周波ブリッジを用いて被測定インピーダンスの反射係数を求めるものです。一般に測定範囲が純抵抗分を50 $\Omega$ 近辺に、リアクタンス分が数百 $\Omega$ 以下に限られていますので、上記のように136kHzでの垂直短モノポールアンテナのm $\Omega$ オーダーの抵抗分と10k $\Omega$ オーダーのリアクタンス分である複素回路を直接計測はできません。抵抗分の測定は、少なくともリアクタンス分を取り除いて(つまり、後述するコイルによるアンテナ共振を行う)からにすべきです。

参考に、図2にRigExpert AA-30による垂直短モノポール(共振コイル付き)の測定結果を示します。

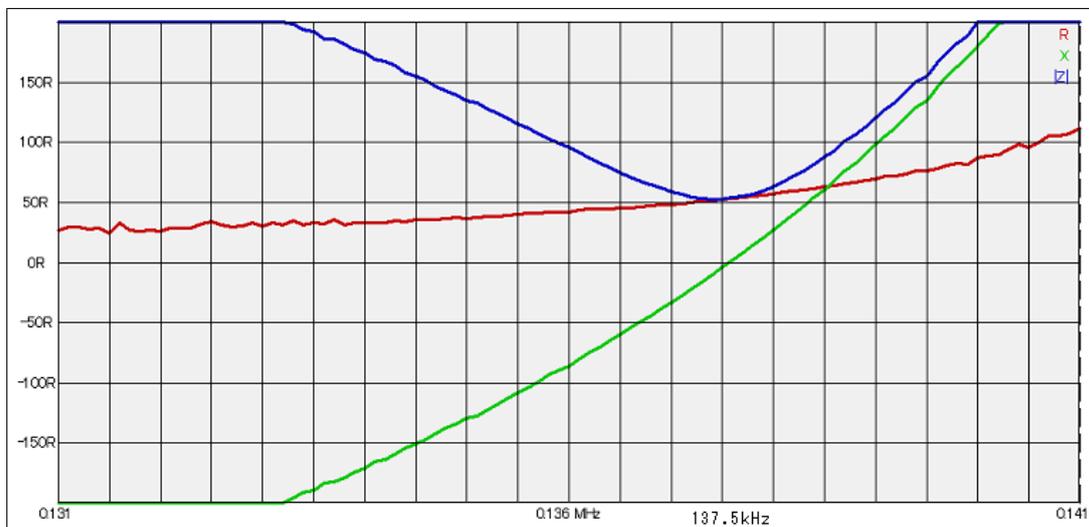


図2: アンテナアナライザによる整合済みアンテナの定数

対象周波数が低いので、市販のキャパシタンスメータによってアンテナ単体の静電容量を測定しても良いでしょう。

#### (c) シミュレーションによる方法

実用的に優れて有効なアンテナ定数を知る方法は、MMANA(JE3HHT提供のフリーソフト <http://www33.ocn.ne.jp/~je3hht/mmna/index.html>)を使います。

アンテナ解析ソフトは一般に、NEC2という米海軍開発のモーメント法により微小エレメントの電流分布を計算しますので、柔軟なアンテナ形状の変更に対してもアンテナ定数はもちろんアンテナ利得(指向性)やリアクタンス性負荷の挿入など各種の解析ができます。現用アンテナの整合を探るだけでなく、改善方向のシミュレーションに役立つツールです。

参考に、図3にMMANAを使った20m高のモノポールのインピダンスと指向性を示します。

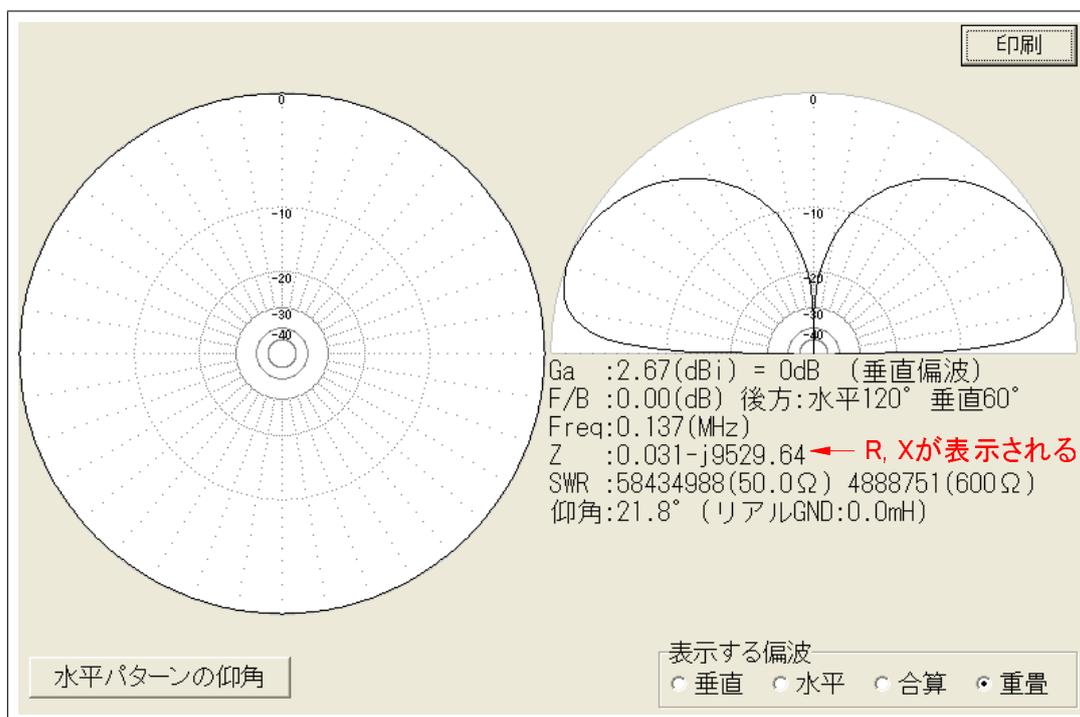


図3: シミュレーションソフトによるアンテナ解析の例

#### 4. 垂直短小モノポールアンテナの改善トポロジ

20m高の垂直短小モノポールアンテナを基準として、エレメントをどの方向に延長すればアンテナ定数が如何に変化するかをMMANAでシミュレーションしました。つまり、限られたアンテナ敷地の中での改善努力とその効果を推定したものです。シミュレーションは接地抵抗をゼロと仮定しています。

改善の方向としては、図4に示すように、エレメントを垂直方向に伸ばすこと、または天頂に水平エレメントを追加すること、その両者を併せて行うことが考えられます。

シミュレーション結果の一例を表1に示します。

- 標準型では、20m高では $\eta = 0.08\%$ であるものが40m高では $\eta = 0.33\%$ と非常に向上します。能率が高さの2乗に比例するのは式4および5と同じです。
- 逆L型では、水平エレメントを付けた効果があります。
- L型は、カウンターポイズ接地です。水平長10mでもかなり良い接地効果があり、簡単に設置できる割には有用な方法です。
- C型とZ型はカウンターポイズの展張方向が異なるのですが、どちらも同じ効果があり、標準型のおおよそ1.5倍の改善ができます。

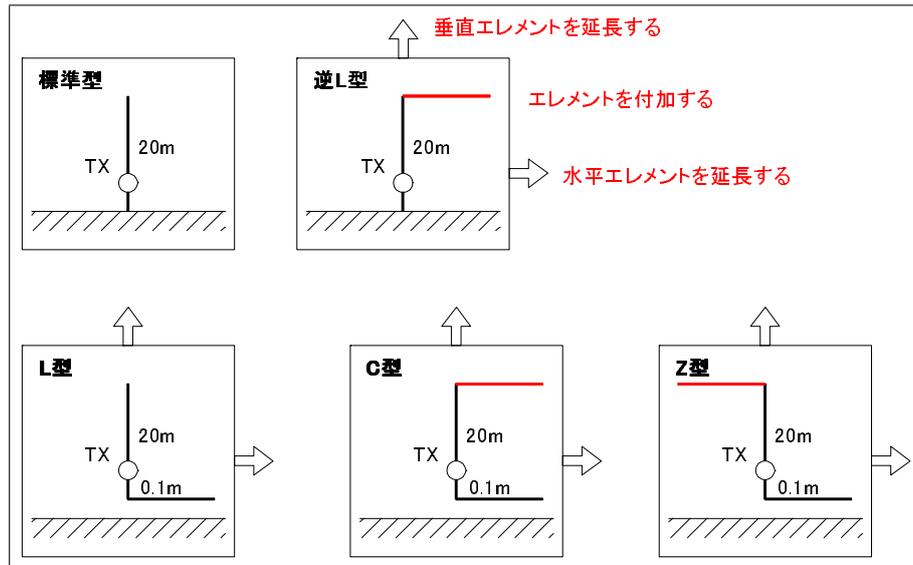


図 4: 垂直短小アンテナを改良する方策

表 1: 垂直短小アンテナのインピーダンスと  $\lambda/4$  型との性能比較

形状	垂直長	インピーダンス	効率 %
$\lambda/4$	547m	38.314 +j20.080	100.0
標準	10m	0.008 -j16,165	0.02
	20m	0.031 -j8,813	0.08
	40m	0.125 -j4,756	0.33

形状	垂直長	水平長					
		10m		20m		40m	
		インピーダンス	効率	インピーダンス	効率	インピーダンス	効率
逆 L	10m	0.012 -j845,809	0.03	0.015 -j843,844	0.04	0.018 -j842,197	0.05
	20m	0.054 -j6,248	0.14	0.070 -j4,824	0.18	0.087 -j3,311	0.23
	40m	0.147 -j276,486	0.38	0.181 -j275,975	0.47	0.230 -j275,325	0.60
L 型	10m	0.008 -j26,567	0.02	0.008 -j21,645	0.02	0.008 -j19,155	0.02
	20m	0.032 -j18,937	0.08	0.032 -j14,025	0.08	0.032 -j11,523	0.08
	40m	0.127 -j14,680	0.33	0.128 -j9,848	0.33	0.128 -j7,358	0.33
C 型	10m	0.017 -j19,099	0.04	0.021 -j11,313	0.05	0.025 -j6,416	0.07
	20m	0.055 -j16,315	0.14	0.070 -j9,929	0.18	0.087 -j5,871	0.23
	40m	0.179 -j13,850	0.47	0.222 -j8,403	0.58	0.284 -j5,710	0.74
Z 型	10m	0.017 -j19,108	0.04	0.021 -j11,325	0.05	0.025 -j6,427	0.06
	20m	0.055 -j16,315	0.14	0.070 -j9,931	0.18	0.087 -j5,874	0.23
	40m	0.179 -j13,843	0.47	0.222 -j8,402	0.58	0.284 -j5,711	0.74

## 5. 整合はリアクタンスと抵抗の両方で

### (a) 共振コイルの役割

式 1 の有効輻射電力は、実はアンテナ定数のリアクタンス分が適当に打ち消されアンテナ回路は純抵抗であることを前提としています。しかし、アンテナ自体は容量性リアクタンスを含むインピーダンス  $Z_a$  であり、式 6 で表されます。

$$Z_a = \sqrt{R_r^2 + X_c^2} \quad (6)$$

実際の値は、第 3 項で計算または測定したとおり  $X_c = 10k\Omega$  オーダーであるので  $Z_a > 10k\Omega$  となるのが当たり前です。これを内部抵抗  $Z_o = 50\Omega$  の送信機に直接つないでもほとんど電力がアンテナに供給されません。そこで、アンテナ結合回路の容量性リアクタンス  $X_c$  にその共役リアクタンス  $X_l$  を持つ共振コイルを挿入し、リアクタンス分を打ち消さなければなりません。共振周波数  $f$  [Hz]、その角周波数  $\omega$ 、インダクタンス  $L$  [H] および静電容量  $C$  [F] には式 7 の関係があります。

$$|X_l| = |X_c| \quad |j\omega L| = \frac{1}{|j\omega C|} \quad 2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C} \quad L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad (7)$$

共振コイルをアンテナ回路に直列に挿入した結果は、インピーダンスが最も低くなり図 5 の等価回路に示すようにアンテナの静電容量を通じて放射抵抗に最大のアンテナ電流が流れます。共振コイルは、別名で延長コイルとか負荷コイルと呼ばれる場合があります。

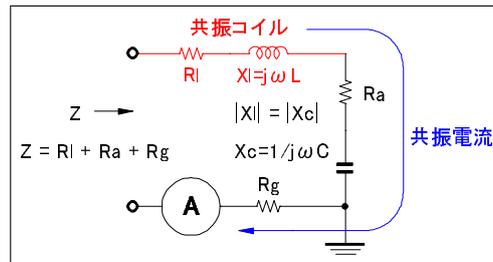


図 5: 共振コイルの挿入でアンテナ電流が最大

$f = 137kHz$  とすると、具体的な  $L$  の値は式 8 で求められます。

$$L = \frac{1,350}{C [pF]} [mH] \quad (8)$$

例えば、 $250pF$  のアンテナ静電容量に共振するコイルは  $L = 5.4mH$  です。

共振コイルを挿入したので、アンテナ回路はハイ  $Q$  直列共振回路となります。 $R_l + R_g = 20\Omega$  と仮定して、その周波数特性を描いたのが図 6 です。総合  $Q$  は  $Q = 116$  の場合です。

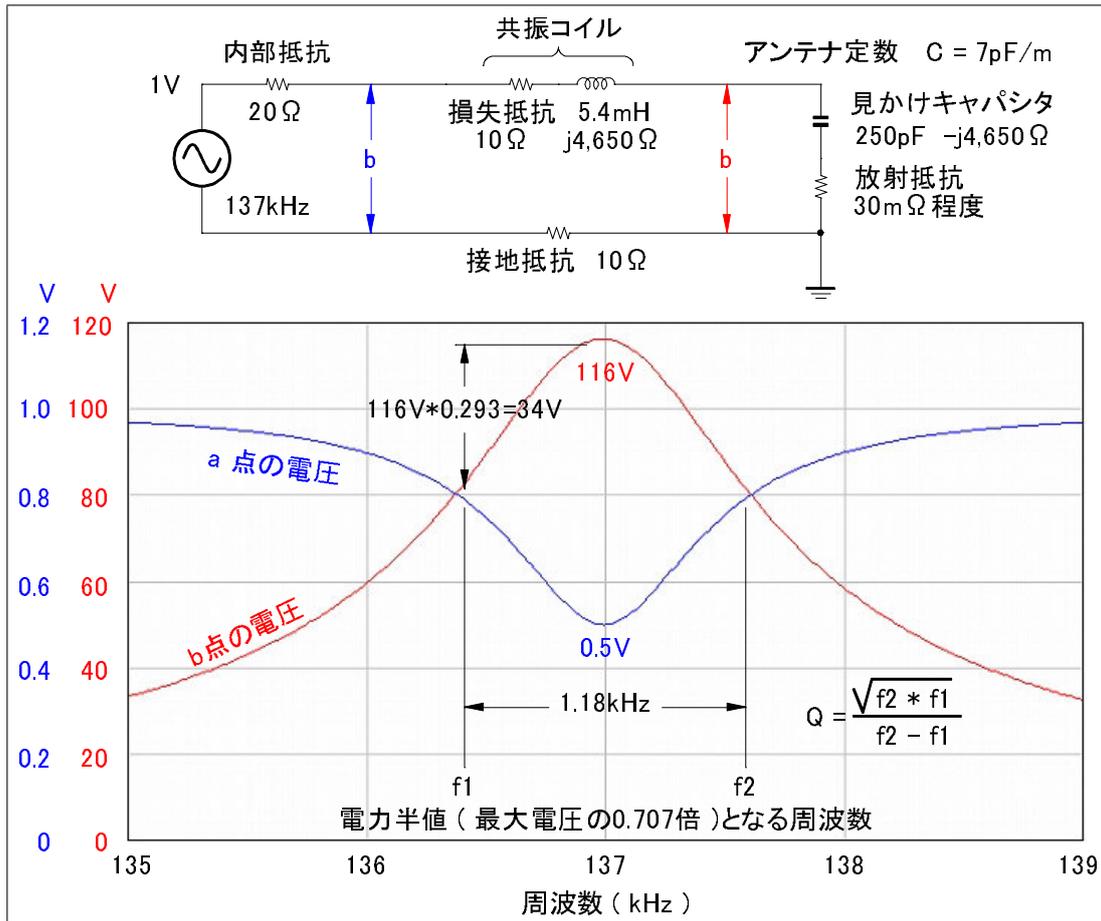


図 6: アンテナの周波数選択性

さて、実際に製作するコイルの定数の見当をつけるには、次の二つの方法があります。

- 長岡係数によるコイルの設計

単層ソレノイドコイルのインダクタンスを図7の定義により、式9で計算します。

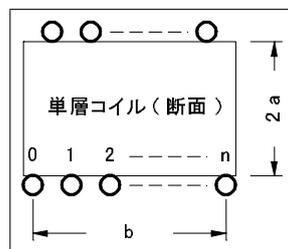


図 7: 単層コイルの形状

$$L = \frac{k \pi^2 (2a)^2 n^2}{b} \times 10^{-7} [H] \tag{9}$$

ここで  $k$  の値は表 2 によります。

2a/b	k								
0.10	0.958807	0.30	0.883803	0.50	0.818136	0.70	0.760885	0.90	0.710969
0.20	0.920093	0.40	0.849853	0.60	0.788525	0.80	0.735079	1.00	0.688423
b/2a	k								
0.10	0.203324	0.30	0.405269	0.50	0.525510	0.70	0.606690	0.90	0.665052
0.20	0.319825	0.40	0.471865	0.60	0.569691	0.80	0.638094	1.00	0.688423

表 2: 長岡係数表

- 簡易計算式によるコイルの設計

次に紹介するのは ON7YD が用意している計算式です。巻線の直径と巻線間隔が同じ (コイルの Q が高くなるとされるいわゆるスペース巻き) として、コイルの直径  $d$  [mm] とコイルの長さ  $l$  [mm] をパラメータに式 10 で計算します。

$$L = \frac{n^2 d^2}{459 d + 1009 l} [\mu H] \quad (10)$$

実際の数値を使ってみますと、例えばコイルの直径 50 [cm]、巻線幅 50 [cm] で巻数 100 回の場合、どちらの式でも 3.4 [mH] の答えが出ます。線材の直径や巻棒などの具合で若干の違いがあるでしょうが、実物製作は少し大きめの設計をして実物で確認します。

共振周波数の微調整が必要ですから、細かな調整用タップを付けるかバリオメータ式可変インダクタンスコイルを付加するなどの工夫をします。

- (b) 損失抵抗が生じる現実の共振コイル

共振コイルの本来の目的であるアンテナ回路の容量性リアクタンスを打ち消すことは達成できましたが、共振コイルには伏兵がいます。それは共振コイルには理想的なリアクタンスだけでなく損失抵抗  $R_l$  が伴うことです。

アンテナを完全に共振させたとしても、図 5 においてアンテナインピーダンス  $Z = R_l + R_a + R_g$  ですので放射電力  $P_a$  [W] と供給電力  $P_o$  [W] のの比  $\eta_a$  は、式 12 となります。  $R_l + R_g$  を損失抵抗と呼び、垂直短モノポールの性能を左右する重要なファクタです。

$$\eta_a = \frac{P_a}{P_o} = \frac{R_a}{(R_l + R_g) + R_a} \quad (11)$$

例えば  $R_a = 30$  [mΩ] で  $R_g = 20$  [Ω] オーダーのアンテナに対して  $R_l = 20$  [Ω] で  $l = 5.4$  [mH] の共振コイルを使うとすると、アンテナ系の能率  $\eta_a = 7.5$  [%] になります。接地抵抗の影響と同じくらいの効き目で共振コイルが総合効率を下げてしまいます。

$Q = X_l/R_l$  で定義される  $Q$  値を上げるためには、直流的あるいは高周波のな抵抗軽減策が必要で、多くの工夫がなされていくつかの効果的な方法が見出されています。(これは次回講座の中心テーマになりますので、ここでは具体的な記述を割愛します。)



図 8: 損失を減らす工夫 (左:接地効果の良いアースマット 右:スパイダ巻した共振コイル)

(c) 信号源の出力抵抗と負荷抵抗の整合

図 9 は、ある値の内部抵抗  $R_s$  を有する信号源と負荷抵抗  $R_l$  との電力伝送能率の関係を示します。最高性能は  $R_l = R_s$  の条件で発揮されます。

具体的には、送信機の出カインピーダンスは一般に  $50\Omega$  ですのでアンテナ側のインピーダンスを同じく  $50\Omega$  とすることを目指します。整合状態は別の表現をすると SWR です。整合状態は別の表現をすると SWR です。  $SWR = 2$  では電力伝送能率は 89% 以下に下がります。

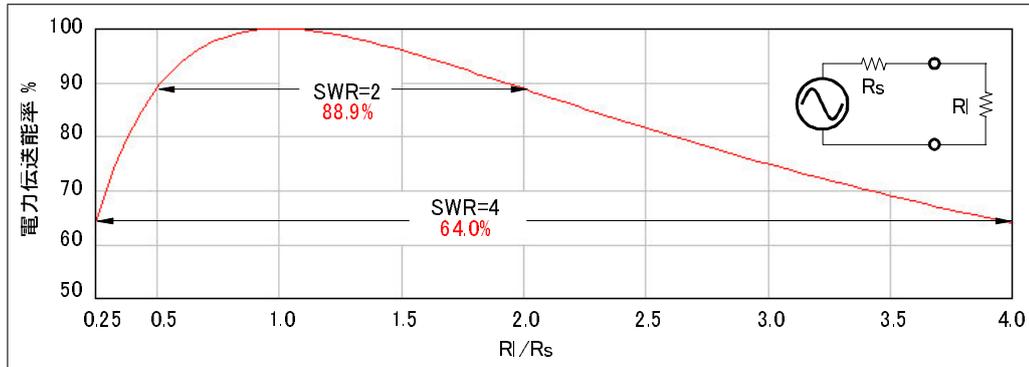


図 9:  $R_l/R_s$  をパラメータとした給電能率

インピーダンス変換は次の 3 つの方法があります。

- 高周波トランスによる変換

FT240 などのフェライトコアに巻線する高周波特性の良いトランスを図 10 の構成とします。

巻線  $n_1$  および  $n_2$  と  $R_1$  および  $R_2$  には、式 12 の関係があります。

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (12)$$

高周波トランスは周波数選択性が弱いので、広範囲の周波数に対応できます。しかし、インピーダンス変換比が固定されるか微調整ができないという欠点があります。

巻回数は巻線のリアクタンスが  $R_1$  または  $R_2$  の数倍程度以上になるようにします。

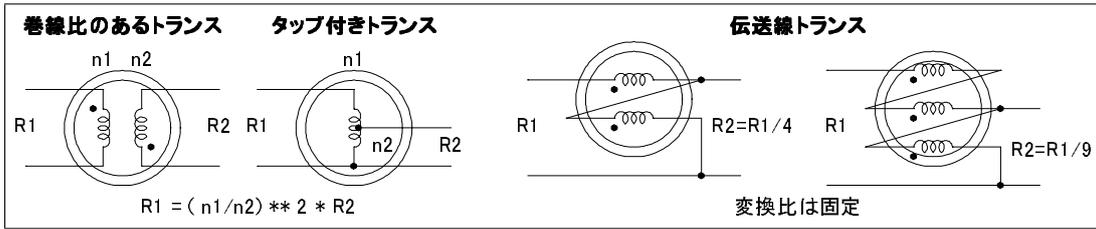


図 10: トランスによるインピーダンス変換—広帯域

• LC インピーダンス変換回路

図 11 の LC によるインピーダンス変換回路は、LC 定数を適宜に選ぶことによって任意のインピーダンス変換比を得ることができます。しかし、回路の Q により周波数選択性が伴いますので、適当な設計が必要です。  $R_1 < R_2$  の場合

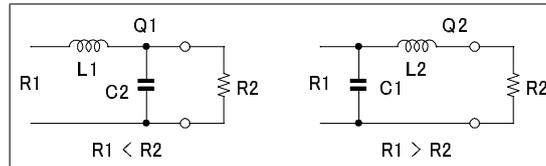


図 11: LC インピーダンス変換回路—狭帯域

次の設計公式を使って、LC のリアクタンスを計算します。

$$Q_1 = \sqrt{\frac{R_2}{R_1} - 1} \quad (13)$$

$$X_{l1} = Q_1 R_1 = \sqrt{(R_2 - R_1) R_1} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (14)$$

$$X_{c2} = \frac{R_2}{Q_1} = R_2 \sqrt{\frac{R_1}{R_2 - R_1}} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (15)$$

137kHz での具体的な LC の値は、式 16 を使います。

$$L_1 = 1.16 X_{l1} \text{ [}\mu\text{H]} \quad C_2 = \frac{1.16}{X_{c2}} \text{ [}\mu\text{F]} \quad (16)$$

$R_1 > R_2$  の場合

次の設計公式を使って、LC のリアクタンスを計算します。

$$Q_2 = \sqrt{\frac{R_1}{R_2} - 1} \quad (17)$$

$$X_{l2} = Q_2 R_2 = \sqrt{(R_1 - R_2) R_2} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (18)$$

$$X_{c1} = \frac{R_1}{Q_2} = R_1 \sqrt{\frac{R_2}{R_1 - R_2}} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (19)$$

137kHz での具体的な LC の値は、式 20 を使います。

$$L_2 = 1.16 X_{l2} \text{ [}\mu\text{H]} \quad C_1 = \frac{1.16}{X_{c1}} \text{ [}\mu\text{F]} \quad (20)$$

6. 常識は正しいか—新たな疑問

136kHz に取り組むと、起こってくる現象が何故なのかという科学的な疑問が次々と生じます。例えば.....

- MiniWhip アンテナ..... ワイアーでなくてもアンテナになる

PA0RDT MiniWhip は図 12 で分かるとおり、数  $cm^2$  の小さなプローブに誘起する電圧をアクティブ素子でインピーダンス変換するだけの回路です。

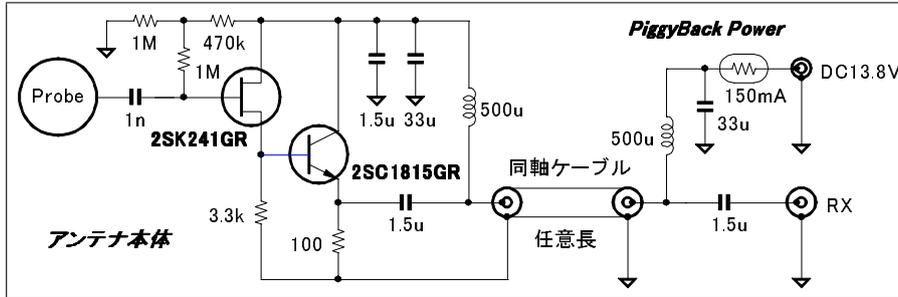


図 12: PA0RDT MiniWhip というアンテナ

- 地面アンテナ..... 水平に配置しても垂直偏波が受かる

地面アンテナは、地面に2本のアース棒を打つだけの図 13 の構造です。VLF から HF 帯の垂直偏波で使えます。

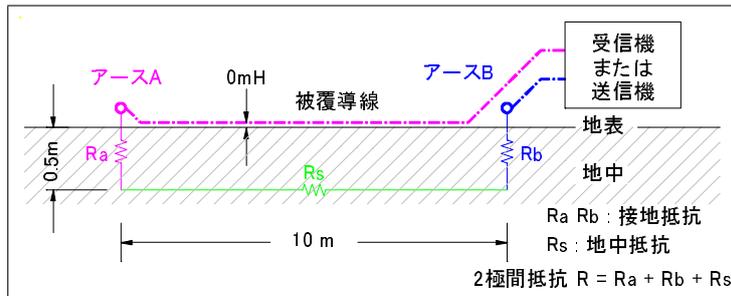


図 13: 地面アンテナの形

- 地表波..... 地表とはなんだろう

地表波って本当に地表を伝播するのでしょうか。伝播ロスを考えてみると、空間を伝播する方が有利です。図 14 は LF 伝播の新説です。

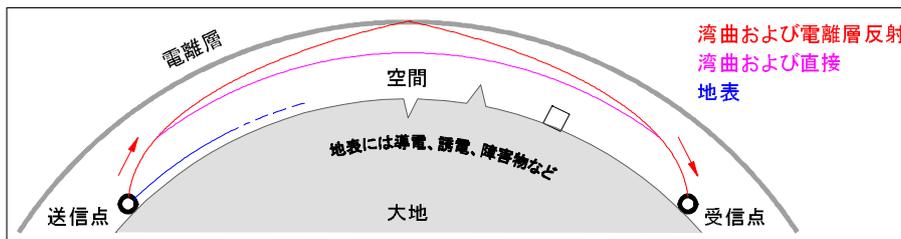


図 14: LF 電波の電離層反射と地表近くでの湾曲

## 7. 参考資料

### (a) EIRP(Equivalent Isotropic Radiated Power)

136kHz 帯の免許には空中線電力の指定とともに  $EIRP$  が  $1W$  以下という条件が付いています。電波法施行規則にある定義とその解釈をします。

- 「空中線の利得」とは、与えられた空中線の入力部に供給される電力に対する、与えられた方向において、同一の距離で同一の電界を生ずるために、基準空中線の入力部で必要とする電力の比をいう。
- $G_i$   
「空中線の絶対利得」とは、基準空中線が空間に隔離された等方性空中線であるときの与えられた方向における空中線の利得をいう。  
< 解釈 > 真球状の指向特性である仮想ダイポールを基準とした指向性利得です。完全導体上に置かれたモノポールアンテナは約  $5.15dB_i$  3.27 倍の利得があります。
- EIRP  
「等価等方輻ふく射電力」とは、空中線に供給される電力に、与えられた方向における空中線の絶対利得を乗じたものをいう。  
< 解釈 > アンテナの放射抵抗  $R_{ant}$ 、アンテナ系の損失抵抗  $R_{loss}$  とすると、空中線電力  $P [W]$  およびアンテナ利得  $G_i$  に対して EIRP は式 21 となります。

$$EIRP = \frac{R_{ant}}{R_{ant} + R_{loss}} G_i P [W] \quad (21)$$

### (b) 関連情報

インターネット上のサイトで多くの 136kHz に関する情報が得られます。その一部を紹介します。

<http://www.rs.gb.org/spectrumforum/lf/>  
<http://www.h4.dion.ne.jp/~ja5fp/writings.html>  
<http://www.h4.dion.ne.jp/~ja5fp/archives.html>  
<http://www1.u-netsurf.ne.jp/~711r11/2200mClub.xml>  
<http://www1.u-netsurf.ne.jp/~711r11/radio.html>  
<http://9328.teacup.com/136khz/bbs>  
<http://www003.upp.so-net.ne.jp/JH1GVY/lf-top.html>  
<http://www003.upp.so-net.ne.jp/JH1GVY/hitorigoto.html>  
<http://www.strobbe.eu/on7yd/>  
<http://icas.to/>

以上