

3. 5 MHz ARDF 用 TX アンテナについて

2025 年 7 月 25 日 安島

目次

1. はじめに	1
2. 結論	2
3. アンテナ長と電波の飛びの関係目安	3
4. アンテナ長とアンテナインピーダンスの関係	4
5. 評価モデル	5
6. 調整のしやすさ（ロバスト性検討）	6
7. まとめ	10
付録. 接地抵抗の計算	11
付-1 アース棒	11
付-2 ラジアルカウンターポイズ	12
付-3 単一円形カウンターポイズ	12

1. はじめに

垂直偏波無指向性のため、接地型垂直ホイップアンテナが用いられ、この基本は $1/4\lambda$ だが、20m と長いので、短縮アンテナを用いるが、次のような疑問がある。

Q1 一般に短縮アンテナの場合、飛びが悪くなるが、その理由と程度は？

Q2 短縮アンテナで飛びが悪くなる以外に問題はあるのか？

Q3 アースの取り方として、アース棒とカウンターポイズどちらが良い？

Q4 カウンターポイズの長さや高さ（草地などではワイヤが地面から離れてしまう）はどう考えればよい？

Q5 円形カウンターポイズはどうよ？

Q6 土壌によりアース効果はどれだけ異なる？

これらについて明らかにすることを本ドキュメントの目的とする。

検討に際してはいろいろな要素が絡むため、一概に言えないので、ARDF 用途に限定し、実際に使われている機材を参考にした仮定を設け、なるべく目安となるような具体数値を扱うようにした。

なお、本ドキュメントでは、電波の飛び具合を表現するのに、電界強度や放射パワーではなく、わかりやすく到達距離[m]で表現している。ある送信機と受信機を用い、**信号音が聞こえる限界の距離すなわち到達距離**とし、理想状況下で 1000m と仮定した場合に、実際状況下でそれが何mとなるかで相対表現することにする。

2. 結論

各 Q に対する A を最初に記載する。

Q1 一般に短縮アンテナの場合、飛びが悪くなるが、その理由と程度は？

A1 短縮すればするほどアンテナインピーダンス（放射抵抗）が下がり、相対的に R_{loss} 分（銅損＋接地抵抗）の割合が多くなり放射効率が落ちるためである。実際の ARDFTX においては、アンテナ長さと到達距離はほぼ比例する。

図 1、表 2 参照。

Q2 短縮アンテナで飛びが悪くなる以外に問題はあるのか？

A2 アンテナの Q 値が上がるため、ロバスト性がかなり小さくなる。すなわち各パラメータの微小変化で大きくアンテナ性能が劣化するため、調整困難（場合によっては不可能）であるし、気温変化で状態が大きく変化してしまい、不安定で大変扱いにくいアンテナとなる。

図 5、図 6、表 1 参照

Q3 アースの取り方として、アース棒とカウンターポイズどちらが良い？

A3 ARDF 用途ではアース棒は向かない。カウンターポイズ有利。

Q4 カウンターポイズの長さや高さ（草地などではワイヤが地面から離れてしまう）はどう考えればよい？

A4 長さは 3 m～15 m で、長いほど良い。高さは低いほどよく、高くても数十 cm とする。

Q5 円形カウンターポイズはどうよ？

A5 無指向性を維持しやすいメリットがある。ただし、数本束ねて使用する場合は、かえって接地抵抗が高くなるケースがあるので注意。

Q6 土壌によりアース効果はどれだけ異なる？

A6 TX を設置するような場所を考えた場合、接地抵抗は 1/2 倍から 2 倍と土壌により大きく変化する。

図 7 参照。

3. アンテナ長と電波の飛びの関係目安

まず結論を図1に示す。

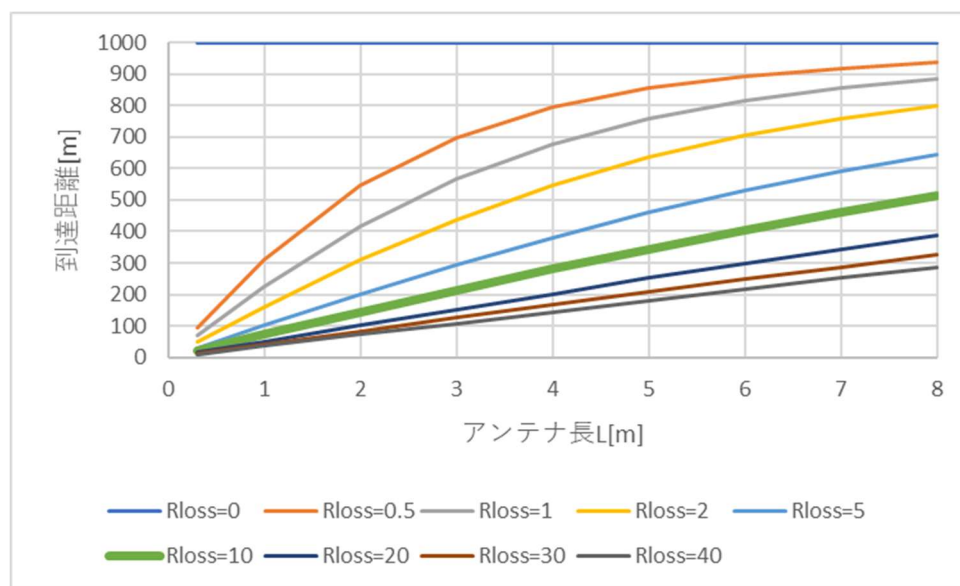


図1 アンテナ長と到達距離

ARDFTXにおいては、 $R_{loss}=10[\Omega]$ 程度以上と想定される（理由は後述）ので、緑の線を見る。おおむね直線であるので、アンテナ長と到達距離はほぼ比例することが分かる。つまり

アンテナ長が半分になると到達距離も半分

アンテナ長が2倍になると到達距離も2倍

になることがわかる。

算出条件

アンテナエレメント：無損失ワイヤ、直径2mm

リアルグラウンド、周波数：3.55MHz、地上高：0m

ここで R_{loss} (=銅損+接地抵抗) について説明しておく。

・銅損：ワイヤやコイルなどの直流抵抗分。径を太くしたり、導電率の高い材料を使ったりすることで小さくなる。現実には $1[\Omega]$ 程度となると思われる。

・接地抵抗：大地アースの抵抗。良質なアース程接地抵抗が低い。代表的なのは銅製の金属棒を地中に差し込むタイプで計算式も確立している。接地抵抗は余り低くないので、ARDFではあまり使用されない。カウンターポイズはアース棒よりも簡便に接地抵抗を下げられるが、接地抵抗を左右するパラメータが多く、計算で接地抵抗を算出するのは難しい。ARDFで用いられているカウンターポイズでは $10[\Omega]$ 程度以上ではないかと推定する。

図1に戻ると、 $R_{loss}=0$ の場合は、アンテナ長によらず到達距離は1000mである。ここが面白いところであるが、 $R_{loss}=0$ かつインピーダンスマッチングが取れている場合は、放射効率が100%であり、アンテナに入力された電力が全て電波放射されるので、到達距離がアンテナ長に関係ないということである。しかし、実際には $R_{loss}=0$ ということはあり得ないので、放射効率は落ち、その落ち具合はアンテナ長に依存するということである。

放射効率 = 放射抵抗 R_{rad} / (放射抵抗 R_{rad} + 抵抗損失 R_{loss})

という関係があるため、 R_{loss} が一定でも、 R_{rad} が小さくなればなるほど放射効率が落ちる。実はアンテナ長を

短くすると R_{rad} が小さくなるため、 R_{loss} の影響が大となり、放射効率が落ちるのである。

4. アンテナ長とアンテナインピーダンスの関係

アンテナ長とアンテナインピーダンスの関係を図2に示す。

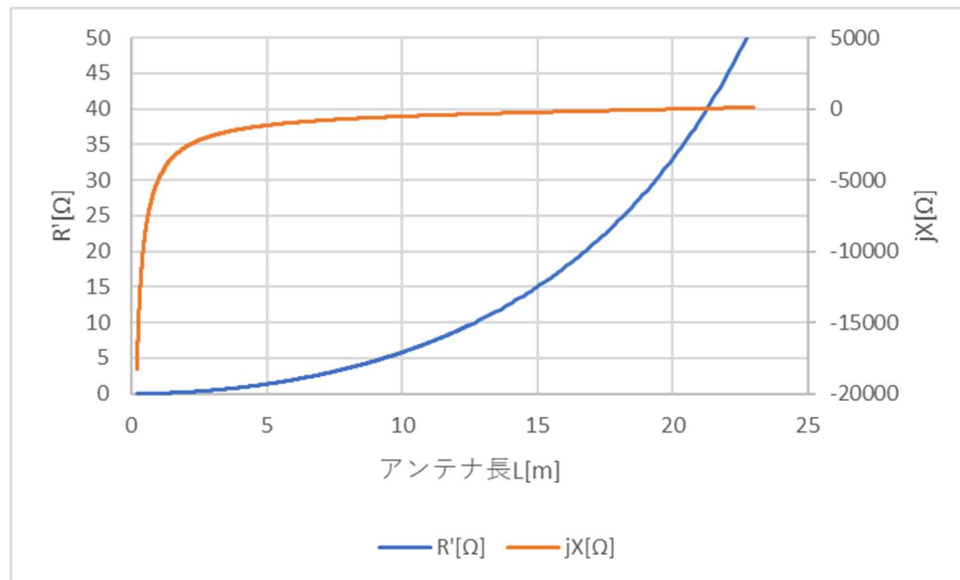


図2 アンテナ長とアンテナインピーダンス

アンテナのインピーダンスは $R(R_{rad}) + jX[\Omega]$ で表現できる。

アンテナ長が 20.6[m] ($=1/4\lambda$) のところで $jX=0$ となりアンテナ単体で共振している。その時の R_{rad} (放射抵抗) は約 40 [Ω] である。

アンテナ長が短くなるにつれ R_{rad} は小さくなり、 jX 成分は負となり、容量性を示す。短縮アンテナではローディングコイルを入れるが、これは誘導性であるコイルを入れることにより、アンテナの容量性を打ち消して $jX=0$ にすることで共振を実現するためである。

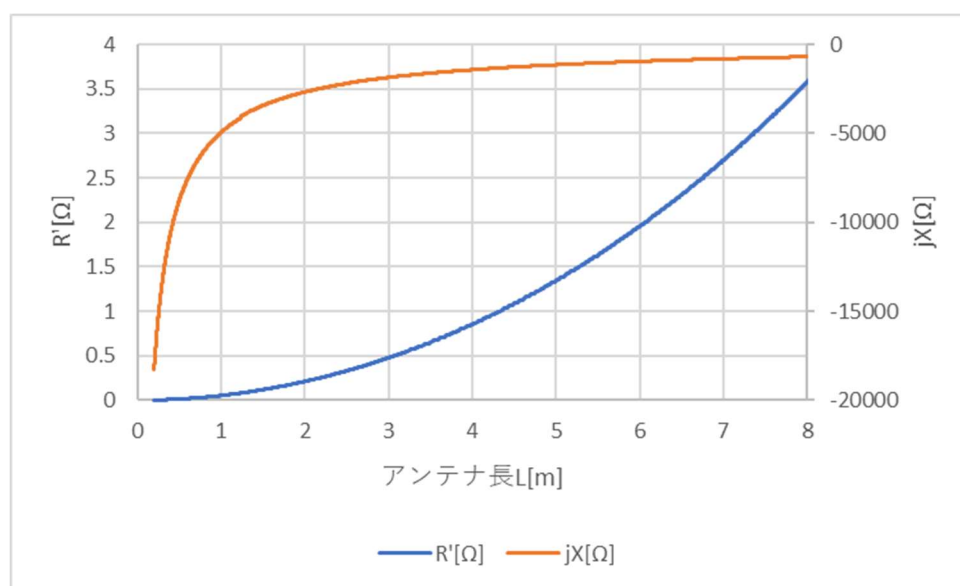


図3 アンテナ長とアンテナインピーダンス (拡大図)

図3はアンテナ長8 m以下の部分を拡大したものである。L=3[m]では $R_{rad}=0.5[\Omega]$ とかなり小さくなって

いる。 $L=0.3$ [m]に至っては $R_{rad}=0.005$ [Ω]である。

一方、 $|jX|$ (jX の絶対値)は小さくなるほど大きくなり、特に $L=1$ [m]以下で急激に増大している。

アンテナの Q 値 $= |jX| / (R_{rad}+R_{loss})$ を考えると、 L が短くなるにつれて大きくなる。 Q 値が大きくなると、対象周波数付近では各種パラメータ変動の影響が大きく、許容誤差が小さくなり、調整がしづらくなることがわかる。

これらのことからわかることをまとめると以下のようなになる。

アンテナを短縮すると、

◇ R_{rad} (放射抵抗) が小さくなる。

→アンテナにパワーを注入しづらくなる。

放射電力は電流を I [A]とすると、 $I * I * R_{rad}$ なので、 R_{rad} が小さくなればなるほど I は増大する。例えば、 $L=8$ の時 $R_{rad}=3.5$ で、 $L=0.3$ の時 $R_{rad}=0.005$ なので、 $L=8$ の時と同じ電力を放射するためには、 $\text{SQRT}(3.5/0.005)=26$ 倍もの電流を流さねばならない。

→放射効率が落ちる。

$R_{loss}>0$ なので、放射効率 $= R_{rad} / (R_{rad}+R_{loss})$ は、 R_{rad} が小さくなればなるほど低下する。例えば、 $R_{rad}=0.005, R_{loss}=10$ とすると放射効率は 0.05% であり、アンテナに注入した電力の 99.95% は熱となって消費される。

◇ Q 値が大きくなる

→各種パラメータに非常に敏感になるため、調整が非常にシビアで、環境変化にも弱くなる。

5. 評価モデル

本書で検討する際に用いた評価モデルを図4に示す。

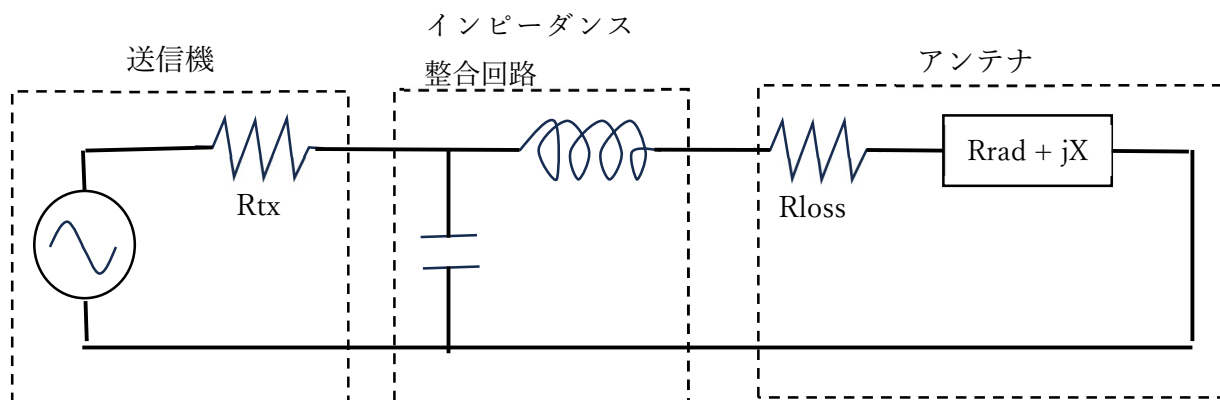


図4 評価等価モデル

R_{rad} :放射抵抗

R_{loss} :銅損+接地抵抗

R_{tx} :送信機出力インピーダンス (50Ω)

インピーダンス整合回路は、送信機から右側を見たインピーダンスが $R_{tx}+j0[\Omega]$ となるように調整する。調整ができると、 R_{tx} で消費する電力 $= (R_{loss}+R_{rad})$ で消費する電力となる。

$R_{rad}+jX$ 部分は MMANA で計算した。MMANA モデルは、直径 2mm 無損失の長さ L [m]の垂直接地アンテナ

ナで、接地抵抗は $0[\Omega]$ とした。銅損＋接地抵抗は別に R_{loss} で設定するからである。またローディングコイルは独立しておかず、インピーダンス整合回路のコイルに含めることにした。MMANA の R_{rad} 分解能は $0.01[\Omega]$ のため、低抵抗時の分解能が足りない。そこで低抵抗時は MMANA 計算結果をカーブフィットして滑らかな近似式を作成してその後の計算を行った。

ここまでの検討では、都度インピーダンス整合をおこない、完全に整合が取れている状態での計算結果をもちいている。送信機の中にはアンテナチューナが組み込まれているものがあるが、少なくともコイルについては切替であり連続調整ができないため、概略調整の域を出ないが、本ドキュメントでは理想アンテナチューナによって整合を取っている。

6. 調整のしやすさ（ロバスト性検討）

一般に環境変化や各種部品の誤差があっても、システムの性能に影響を及ぼさない性質をロバスト性と呼ぶ。ロバスト性が低いアンテナは各種パラメータの変化でアンテナ性能が大きく変わってしまうので、調整がしづらく、設置の仕方や温度変化などで性能が大きく変化してしまい、非常に使いづらい。結果的にある程度、基本性能は犠牲にしてもロバスト性を確保した方が現実的ということもある。

本来、ロバスト性の確認は、標準状態に対して各種パラメータの変動可能性幅の誤差を与えて、性能がどれだけ劣化するかで確認するが、ここではアンテナ性能を到達距離で表し、標準状態は完全にインピーダンス整合が取れている状態とする。これまでの検討では全てインピーダンスが整合されている状態で検討してきたが、ロバスト性検討では、パラメータ変動による不整合状況をも考慮する。

また、変化させるパラメータは簡略化のため、アンテナ長 L のみを微小変化させることにする。

図5は $R_{loss} = 0$ 、つまり理想的なアンテナを使用した場合のロバスト性を図示したものである。

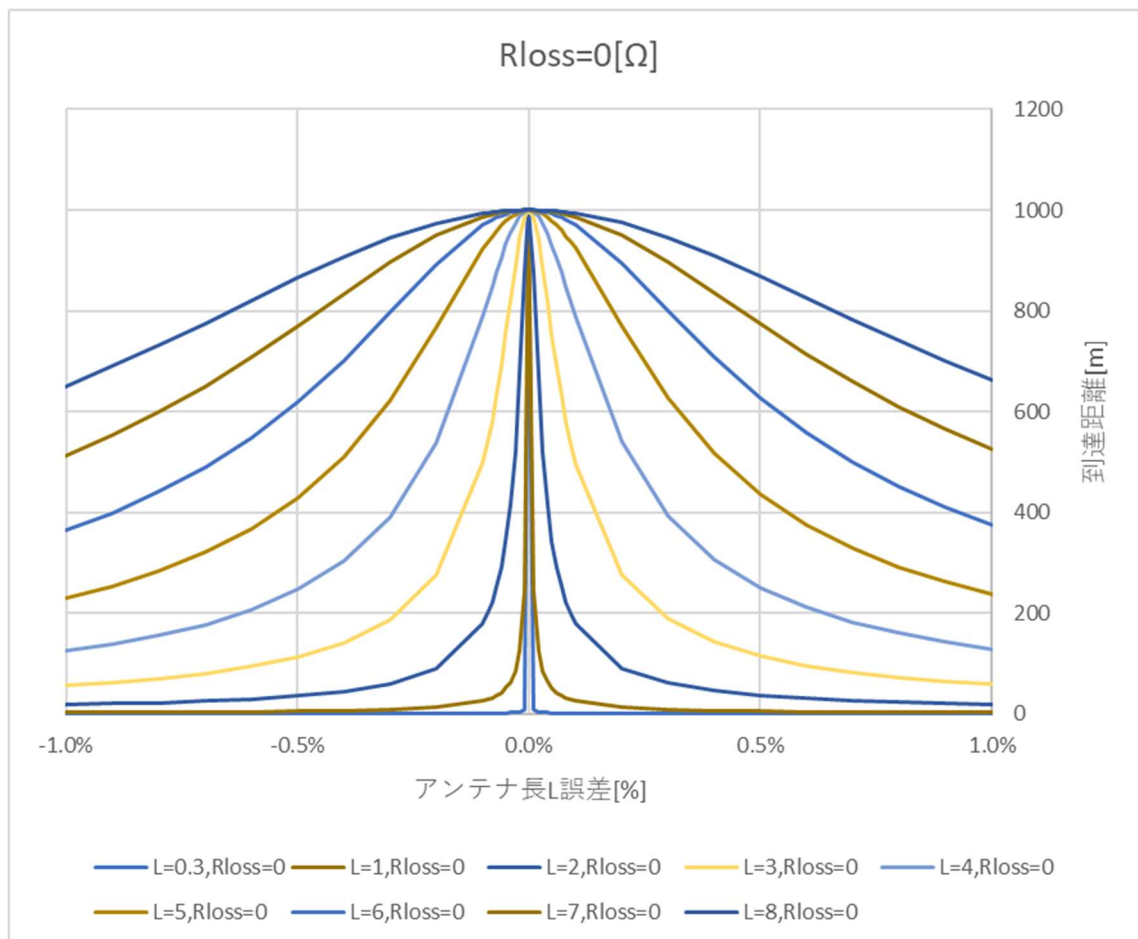


図5 ロバスト性 ($R_{loss}=0\Omega$)

$R_{loss}=0$ なので、アンテナ長によらず整合状態（誤差 0 %）では到達距離は 1 0 0 0 m である。

しかし、アンテナの Q の違いから、アンテナ長誤差の影響がアンテナ長により異なる。

誤差 1 % でみても、 $L=8\text{m}$ では 8 cm の誤差で 650m 程度は確保できるが、 $L=3\text{m}$ では 3cm の誤差で到達距離は 60m まで落ちてしまう。 $L=1\text{m}$ では 0.1%(1mm) の誤差があっても 25m まで落ちてしまう。

このように、アンテナ長が短くなればなるほどロバスト性が悪くなることがわかる。

図 6 は $R_{loss}=10\Omega$ の時のロバスト性を示している。

$R_{loss}>0$ であるので、放射効率が低下し、誤差 0 % であっても到達距離 $<1000\text{m}$ である。アンテナ長が短いほど R_{rad} が小さいため放射効率が落ちている。

横軸は $\pm 1\%$ ではなく、 $\pm 2.0\%$ と大きくしている。

$L=8\text{m}$ でみても、1 % の誤差があっても到達距離はほとんど変わらないことがわかる。すなわち、 $R_{loss}=0$ の時と比べてロバスト性が高くなっていることが分かる。

$R_{loss}=0\Omega$ 、 $L=1\text{m}$ のように、1mm の誤差でも到達距離が 25/1000 に落ちてしまうようであると、もはや調整不能と考えた方がよい。実際の運用においては、同じアンテナで 3.52MHz と 3.57MHz 両方で使用することは通例であり、ここで $\pm 1\%$ の誤差は発生する。また、誤差要因としてアンテナ長もあるが、インピーダンス整合回路の誤差も無視できない。セラミックコンデンサの温度特性を考えると $\pm 5\%$ は発生してもおかしくない。これらを考えると、ロバスト性として $\pm 1.0\%$ は許容したいし、実際そのような誤差環境で動作させているものと推定される。

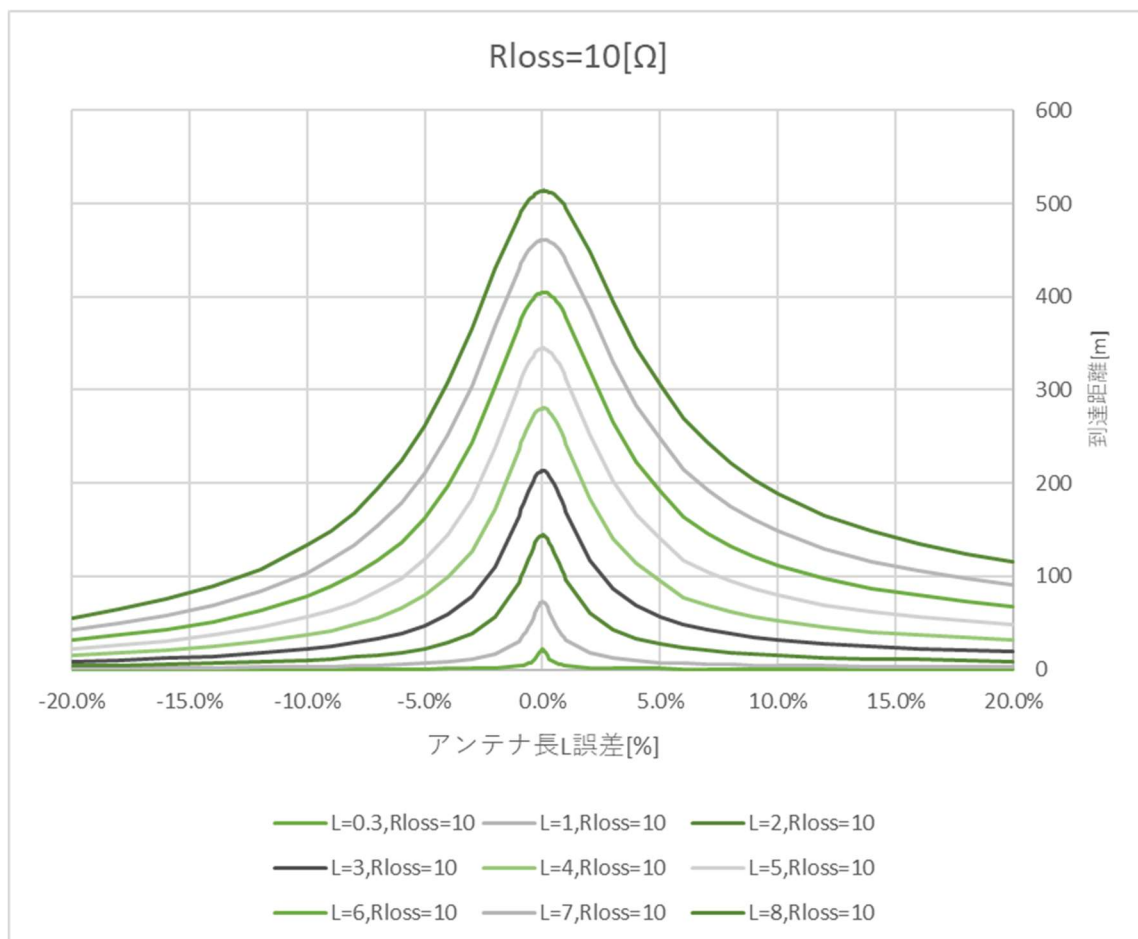


図6 ロバスト性($R_{\text{loss}}=10\Omega$)

そこで、ロバスト性を端的に表す指標として、誤差により到達距離低下率がある値になる誤差%を用いることにする。その閾値となる値は、半値幅の考え方に基づき、パワー1/2、すなわち到達距離にして $1/\text{SQRT}(2) \approx 0.7$ 倍とする。

$R_{\text{loss}}=10\Omega$ 、 $L=8\text{m}$ で言えば、図6より、誤差なしで到達距離が513mであり、 $513 \times 0.7 = 360\text{m}$ となる許容誤差は、 $\pm 3.3\%$ である。

表1はロバスト性を表す許容誤差をまとめたものである。

表1 アンテナ長許容誤差

± 許容誤差 [%]		Rloss[Ω]								
		0	0.5	1	2	5	10	20	30	40
L[m]	0.3	0.003%	0.01%	0.02%	0.04%	0.09%	0.19%	0.38%	0.57%	0.76%
	1	0.004%	0.03%	0.05%	0.10%	0.25%	0.48%	0.96%	1.49%	1.94%
	2	0.02%	0.06%	0.11%	0.19%	0.45%	0.88%	1.76%	2.63%	3.51%
	3	0.06%	0.12%	0.18%	0.30%	0.66%	1.30%	2.49%	3.72%	4.98%
	4	0.13%	0.20%	0.28%	0.43%	0.88%	1.67%	3.19%	4.70%	6.14%
	5	0.24%	0.33%	0.42%	0.60%	1.16%	2.03%	3.86%	5.58%	7.55%
	6	0.40%	0.50%	0.60%	0.80%	1.46%	2.46%	4.53%	6.65%	9.03%
	7	0.61%	0.72%	0.83%	1.07%	1.75%	2.88%	5.17%	7.66%	10.42%
	8	0.87%	1.00%	1.15%	1.40%	2.11%	3.34%	5.86%	8.64%	11.72%

表1で赤の部分は許容誤差が1%以下であり、調整不能領域と考える。濃い緑は3%以上である。本来であれば10%以上の許容誤差が欲しいが、その領域はほとんどない。

表2は無誤差時の到達距離[m]を表1と同形式でまとめたものである。Rlossが大きくなるほど放射効率が落ちていること、アンテナ長Lが短くなればなるほどその落ち方が激しいことがわかる。

表2 無誤差時の到達距離

無誤差時の 到達距離[%]		Rloss[Ω]								
		0	0.5	1	2	5	10	20	30	40
L[m]	0.3	1000	96	68	48	31	22	15	12	11
	1	1000	309	224	160	102	72	51	42	36
	2	1000	545	418	309	201	144	102	84	73
	3	1000	698	568	438	295	213	152	125	108
	4	1000	793	678	546	381	280	202	166	144
	5	1000	854	758	635	461	345	251	208	181
	6	1000	893	814	704	531	405	299	248	216
	7	1000	919	854	758	592	461	345	287	251
	8	1000	937	884	801	646	513	390	327	287

表1と表2を見る限り、現実的な使用状況を考えると赤枠内で使用されているものとする。すなわち $R_{loss} > 10 \Omega$ 、 $L > 6m$ ではないだろうか。

本来であれば、現実に使われているアースにおける接地抵抗を計算するのであるが、付録で説明しているが、適切な実験式が見つからず断念している。そこで現実のロバスト性から R_{loss} を推定している。

しかし、現実のロバスト性は5%以上あると思えることと、 R_{loss} についても 40Ω というのはかなり高い数値であることを考えると、単純には当てはまらない可能性がある。

この計算では、インピーダンスマッチングをきちんと行った状態を誤差0としてロバスト性を考えているが、もともとインピーダンスマッチングが取れていない状態であれば、放射効率は高くないものの、ロバスト性は高く

なる。すなわち R_{loss} が大きいときと同じような現象となる。

従って、もともと不整合状態で使用している可能性もかなりあることも推定される。

7. まとめ

3. 5 MHz TX アンテナ(接地型垂直ホイップ)のイメージは以下のとおりである。

◇ $1/4\lambda$ アンテナをかなり短縮したアンテナである。

◇理論的には理想的なアンテナで理想的なインピーダンスマッチングをすることにより、短縮率によらず強力な電波を放射することは可能であるが、短縮率が高い（アンテナが短い）ほど、ロバスト性が低下し、気温変化に対応できなかったり、調整不可能になったりする。

◇現実の状況を踏まえると、放射効率を結果的に以下の方法で下げ（アンテナ性能としては劣化）、強引にパワーを注入することにより送信していると言える。

- ・インピーダンスマッチング不整合状態で使用する。
- ・接地抵抗を増大させる。

◇インピーダンス整合下では、到達距離は、アンテナ長にほぼ比例する領域で使っている。

以上

付録 接地抵抗の計算

「アース棒」「ラジアルカウンターポイズ」「円形カウンターポイズ」について接地抵抗の算出を試みるが、結論としてカウンターポイズについては妥当性のある実験式が得られなかった。

どのアース方式においても、情報から見た幾何学形状の対称性が崩れている場合に指向性が**無指向性**とならなくなるが、ここではそれは無視して、接地抵抗のみに着目する。

また、共通パラメータとして**土壌の抵抗率** ρ [Ωm]がある。これは接地ポイントの土壌の性質であり、**接地抵抗**を大きく左右するパラメータである。

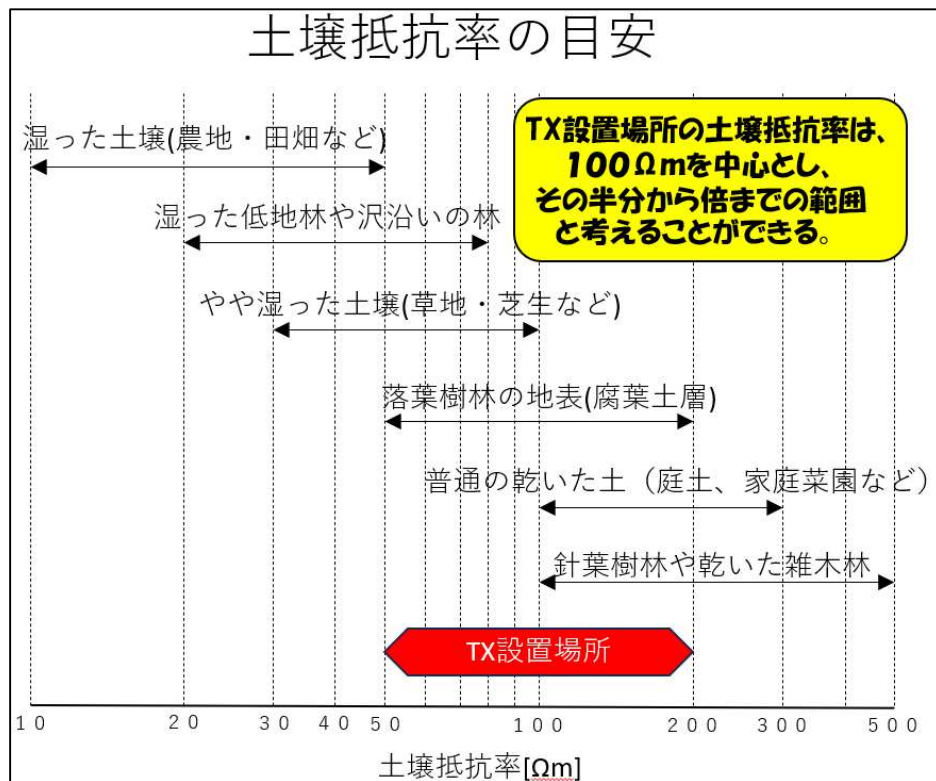


図7 土壌抵抗率の目安

図7は、各種土壌における抵抗率の目安値である。TXが設置される場所は100[Ωm]近辺で、50~200程度の範囲が多いと推定される。つまり**土壌の変化のみでも接地抵抗は1/2から2倍変化**するということである。

また、一般的性質として**独立したアース**であるならば、アースをN本とれば**接地抵抗は1/Nになる**という性質がある。独立という条件があるので、近接してはならず、ラジアルカウンターポイズであれば放射状に配置する必要があるということである。

付-1 アース棒

これについては、妥当な実験式はあったものの、接地抵抗の高さからARDF用途には不向きと判断した。

ρ = 土壌の抵抗率 [Ωm]

L = 接地棒の長さ [m]

d = 接地棒の直径 [m]

Rg = 接地抵抗 [Ω]

とすると、

$$R_g = (\ln(4 \cdot L/d) - 1) \cdot \rho / (2 \pi L)$$

仮に、 $L=0.3\text{m}$ 、 $d=0.01\text{m}$ 、 $\rho=50\sim 200[\Omega\text{m}]$ とすると

$R_g=100\sim 400[\Omega]$ →大きすぎ

→アース棒1本では十分なアースが取れない。

アース棒方式で十分に接地抵抗を下げるためには、何本も打ち込まねばならず、TX 設置に難があり、**ARDF 用 TX 用アースとしては不向き**である。

付－2 ラジアルカウンターポイズ

いわゆる一般的なカウンターポイズで、中心から直線状にワイヤを地面に添わせる方法である。アース棒打ち込みと比較して、良好な接地効果はかなり容易に得られるという利点がある。

調べてみると、多数の実験式が見つかったが、どれも信頼性に欠け、妥当な実験式が見つからなかった。なので、数値計算は断念し、定性的な性質や可能性についてまとめる。

- ・アース棒に比べてかなり低い接地抵抗となる可能性がある。
- ・ L ：ラジアル長[m]は長い方が接地抵抗は小さくなるが、 $3\text{m}\sim 15\text{m}$ 位が妥当。

短いと、接地抵抗が非常に高くなりアースとして機能しない。

長くして、 $1/4\lambda=20\text{m}$ に近くなると、ラジアルからの放射が無視できなくなる。

- ・ h ：ラジアルの高さは低いほどよく、高くても $20\sim 30\text{cm}$

地面から離れるにつれて接地抵抗は高くなるとともに、ラジアルからの放射が顕著になる。

ラジアルを浮かせた方が電波が強くなるという結果が観測されたのであれば、それは、インピーダンスが大きく不整合状態で、接地抵抗が上がることで Q 値が下がり結果的に放射効率が上がったためか、ラジアルから放射される水平偏波成分も合わせて受信したためと思われる。

付－3 単一円形カウンターポイズ

カウンターポイズを直線ではなく円形としたものである。円の中心とアンテナ位置をあわせると、無指向性を維持できるという利点がある。数値の目安としては、

- ・円の半径； $2\text{m}\sim 10\text{m}$ （ 5m 以上が望ましい）
- ・高さ： $\sim 10\text{cm}$ が現実的
- ・導体径； $\phi 1\text{mm} \sim \phi 5\text{mm}$

であり、接地抵抗を低くするためには、半径は大きいほど、高さは低いほど、導体径は太いほど良い。

見かけ上の導体径を太くするために、複数の被覆線を束ねて使用方法があるが、ここには盲点がある。複数のループ間の相互インダクタンスがあるからである。もし裸電線を N 本密着（線間距離＝0）させた場合は、導体径は見かけ上 $\text{SQRT}(N)$ 倍となるが、線間距離が導体半径の3倍程度となると、見かけ上の導体径はその半分まで小さくなる。すなわち被覆線を2・3本束ねた場合は、1本の時よりかえって接地抵抗が高くなる可能性があるということである。