

1. まえがき

2012(平成 16)年 10 月 16 日に学友と伊佐実長波送信所を見学した。電子管を用いずに長距離通信を実現したドイツ TELEFUNKEN 社であり日本の国策会社日本無線電信社の当時携わった電気および機械技術者の執念に痛く感激した。

この巨大投資が第一次大戦の敗戦国だったドイツの賠償金で一部賄われたこともさることながら、第二次大戦後米軍に接収されるという運命に翻弄された運命と、長距離無線が長波から短波に移行する技術動向から見ると建設当初から時代遅れになっていた面は否めない。

長波通信の最大の特徴は、海水を透過して潜水艦との通信できることであり、この特徴故、嘗て軍用に福島県原ノ町無線塔が建設されたし、現在も海上自衛隊が海上保安庁と共用でえびの市に一局所有している。

以下送信機とアンテナを中心に見学記とアンテナが高さ 250m の鉄塔列に懸垂される幅 300m、長さ 1.6km に及ぶ壮大な大きさながら、使用波長が長いので、0.1 波長程度に過ぎず、公表されている対地容量を装架したモノポールアンテナと見ることができ、簡単な計算も添えた。

2. 伊佐実送信所の公表されているアンテナ諸元

256 極の高周波発電機を 1360rpm で回転させ 5.814kHz を発生させ、これを 3 通倍して 17.442KHz とし、アンテナに送り送信した。送信機の記述は控えることとする。

2.1 公表されているアンテナ諸元と使用周波数での共振条件

静電容量 $0.054 \mu F$
固有波長 8700m
全抵抗 1.19Ω

固有波長 8700m を、周波数換算 34.48kHz で自己共振すると解釈し、 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$ であるから、

$C=0.054 \mu F$ が 34.48kHz に共振しているものと考え、アンテナの自己インダクタンスを求める。

共振式を変形して $L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot C}$ それぞれに代入して $394 \mu H$ が求められた。

次に送信周波数は半分なので共振させるため、この 4 倍の総インダクタンス $1576 \mu H$ が必要となる。

	
主 loading coil 推定直径 2.5m、巻数 23 回、巻幅 2m	variometer

小生の取材写真からは直径 2.5m、巻幅 2m 程度と踏んだ。長岡氏係数を加味した単層ソレノイドの近代計算サイトで www.mogami.com/cad/coil-01.html により loading coil の自己インダクタンスを求めると 1041

μH となる。loading coil の諸元に関して推定直径 3m、巻数 23 の website 情報もある。

このほかに二個のコイルを結合させインダクタンスを調整する variometer がある。他に通倍器や伝送リードなども利く。これらを目算で足すとほぼアンテナ自己インダクタンスの約 4 倍越えとなり、使用周波数での共振が期待できることが分かる。

主 loading coil inductance 1041 μH -----推定

Antenna self-inductance 394 μH ----固有周波数より計算

Variometer inductance 200 μH -----目算

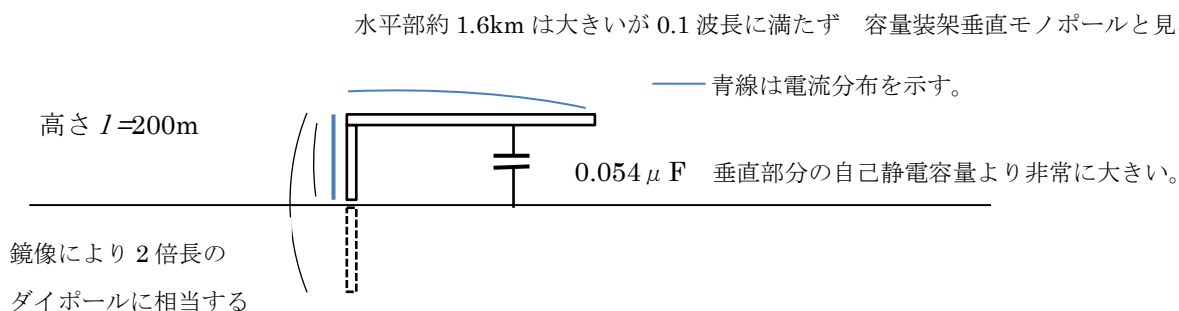
ほか残留インダクタンス 50 μH ----推定

小計 1685 μH ----- 略送信周波数 17.422kHz に共振することが予想できる。

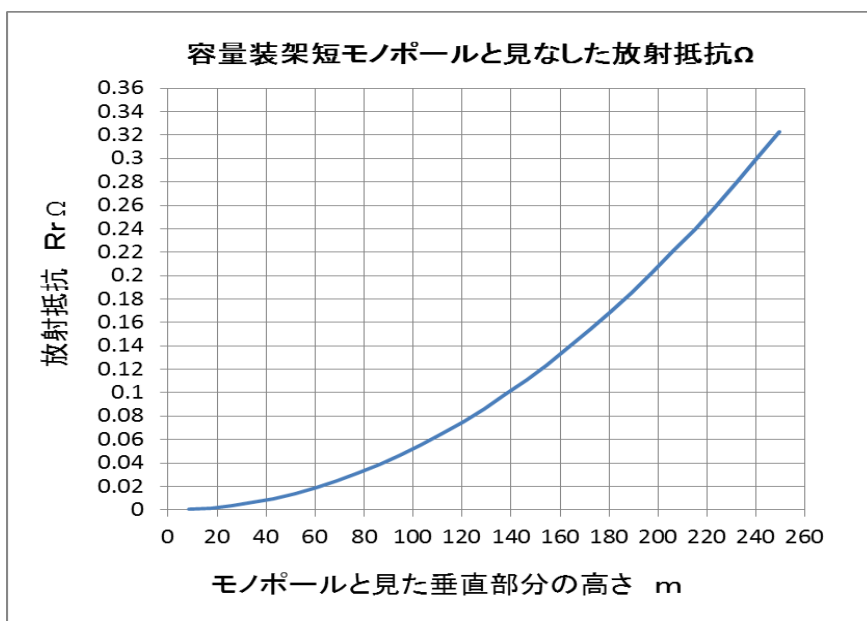
2.2 極簡単モデルによる放射抵抗の予測

使用波長周波数 17.442kHz、波長にすれば 17.200km になり、逆 L 型で水平長が 1.6km 以上あっても 0.1 波長程度でありこの意味で”短い”。したがって 250m 鉄塔列の中心に懸垂された 210~220m の長さの地面上の短いモノポールと見なし、水平部分容量装架と考えた。

地面反射による鏡像の分のモノポールと地上のモノポールがダイポールを形作ると考えられモノポールの 2 倍の長さに相当する。



このような場合近似的に放射抵抗は $R_r = 160\pi^2 \left(\frac{l^2}{\lambda^2} \right)$ で示すことができる。



単に垂直モノポールのみであれば、係数は 40 である。

0.1 波長に及ぶ長ささと幅 300m に及ぶ 16 条の多線を張ることにより実に 0.054 μF の大容量装架を達成し、

約 4 倍にまで放射抵抗が上昇していることとなる。この容量装架によりアンテナの固有共振周波数を使用周波数の 2 倍まで持てることができ、使用波長での loading コイルの負担を大幅に減少させ高周波損を大きく軽減している。

Excel を用いアンテナ高を横軸に、縦軸に放射抵抗を取りグラフに描かせると図に示したようになり、アンテナの垂直高 200～220m で 0.2～0.25Ω 程度となる。非常に低い値である。

全抵抗 1.19Ω の定義などが良く分かりませんが、仮に使用周波数での放射抵抗とその他の抵抗の和と見れば、アンテナ系としての能率は凡そ 0.2／1.19 つまり 0.17 程度と言うことができようか？

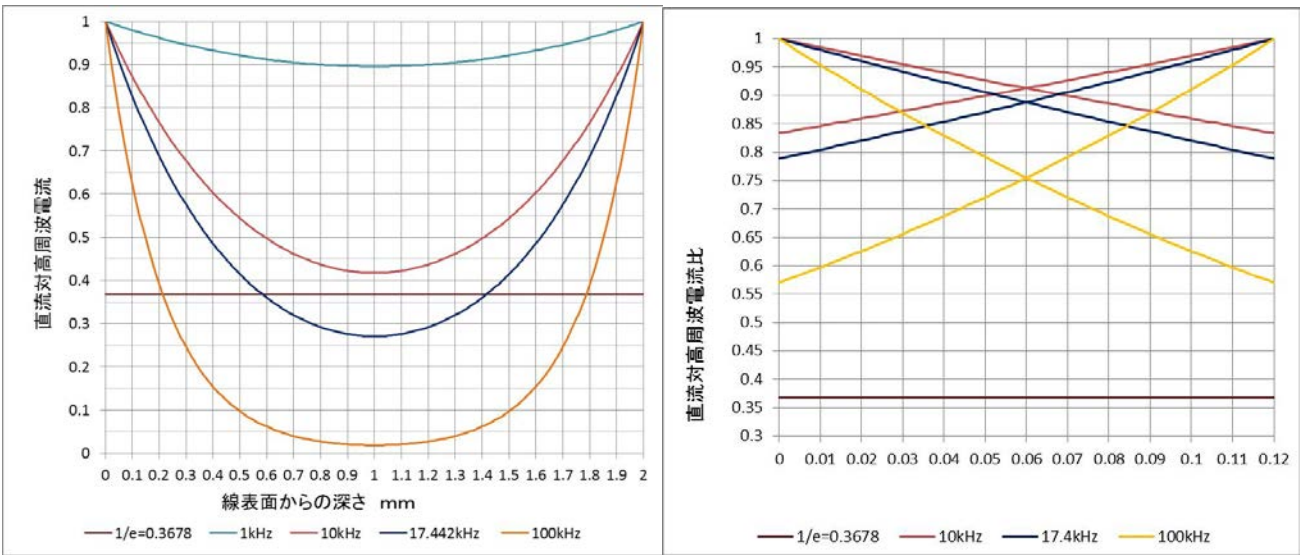
2.3 巨大リッツ線を用い loading コイル等の損失を軽減

見学の際巨大リッツ線の写真を撮ったが紛失してしまった。<http://www.mogami.ne.jp/qq4734213.html> で JA2DJN さんが断面の写真と諸元を掲載しておられ、転載させて頂いた。



いずれにしても、長波の送信システムはい低放射抵抗しか得られない。
そこで Loading コイルでの表皮効果による抵抗損失を極力少なくするため、実に外径 50mm で内部は麻紐であり外側に近くに非常に細い直径 0.12mm の 1800 本ばかりの細いエナメル線が巨大な litz 線を成し低損失化を支えている。次にリッツ線の性能をこれまた最も簡単な近似式で表皮厚は次式で与えられる。

$$d = 2.09 \sqrt{1/f} \text{ mm、kHz}$$



表皮厚(skin depth)は表面に対し $1/e = 1/2.718281828$ に低下する厚さにより定義している。

左の図は直径 2mm の電線にそれぞれ 1kHz、10kHz、17.4kHz、100kHz を通した場合について、両側からの和をとり比較して示している。周波数が高くなるに従い急速に周辺部にしか流れなくなることを示している。17.4kHz についてみると 0.6mm 以下で $1/e$ に達していることが分かる。

右の図は、伊佐実送信所では極力高周波抵抗を少なくするため非常に細い 0.12mm のエナメル線が合計約 1800 本使用されている。単純に片方について 0.06mm の点で 88%にしか落ちないことが分かる。

丸い電線の周囲に高周波が流れるとき中心部の落ちがどうなるか、全体での高周波抵抗はどうなるのかについては余り知られていないようである。前ページの左の図は言わば断面を示していることになるが、一本のエナメル線にあっても言えることで、真ん中部分は余り落ちないのではないかと想像される。

恐らくこの巨大リッツ線により直流の抵抗とほとんど変わらない抵抗値が得られているものと筆者は推定します。

ちなみに、0.12mm エナメル線の直流抵抗値は $1.511 \Omega / \text{m}$ であり、loading coil の全長の概算は $2.5 \pi * 23 = 180\text{m}$ 、1800 本が並列なので $1.511 * 180 / 1800 = 0.15 \Omega$ 程度と見込まれる。高周波抵抗も僅か上昇する程度に抑えられていると考えられる。ほぼ同様の litsz 線が用いられている variometer などを含めても 2 倍以下であろう。むしろ屋外に張られたアンテナ線の方が高周波抵抗は多いと思われる。

当時の技術者が執念とも言うべき徹底した高周波抵抗上昇食い止め策を講じた。このため現実に発熱のため麻や絹糸布が焼けることもなく運用されてきた。

以上アンテナ、および loading coil の損失に関して一考したが、興味を持たれる方がおられましたらご感想をお寄せ頂きたく、またご批判、ご指導を頂きたく存じます。

(2016.07.09 初回、07.18 アンテナ追記、07.26 高周波抵抗追記)