

7MHz用ツェップライクアンテナの設計と製作

「ツェップアンテナ」というアンテナの存在をぼんやりと認識していただけの筆者でしたが、ひょんな事から友人の壊れたサガ電子製ツェップアンテナを修理することになってから深みにハマっていくことに・・・
 後で知ったのですが、このアンテナは「End Fed Half Wavelength Antenna」の一種で、オリジナルはあの飛行船ツェッペリン号に使われた平行フィードで給電するタイプだとか、サガ電子のそれは給電部をコイルとコンデンサで構成し、同軸ケーブルで給電するもので、オリジナルとは異なるためメーカーのホームページでは「ツェップ型ワイヤーアンテナ」と表現されています。このアンテナの給電部の動作原理を考察し設計手法を検討した、また部品入手が容易かつ安価な耐電力500Wのツェップライクアンテナを製作したので紹介する。

検討にあたりアンテナシミュレーション他、多くのアドバイスを頂いた北川氏/JS6RTJ also JF3EBOに感謝する。

大前/JF3IPR

1. まえがき

首記、壊れたツェップライクアンテナ（以下、Zepp）を修理するにあたり、動作原理を調べようとネット検索してみたが、こんな風に作ればいいよ、という記事は沢山ヒットしたが、設計手法や動作原理について詳しく解説してあるサイトは残念ながら発見できなかった。あちこちの情報を収集しながら、シミュレーションを使って私なりに検討する事にした。

主な視点（疑問点）は次のとおり

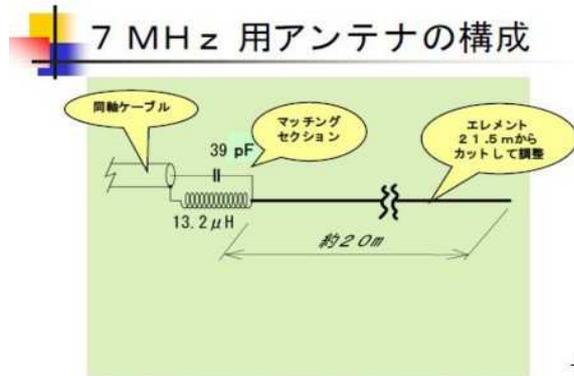
- ・L、Cの定数はどうやって決める？
- ・ワイヤーのインピーダンスは多くの記事で5kΩとして調整しているがその出どころは？
- ・L、Cに必要な耐圧は？
- ・L、Cに必要な電流容量は？

同様の疑問を抱き、考察しているブログを発見したので紹介しておきます。大いに参考にさせて頂きました。(MNI TKS)

<http://jm7nbs.o.oo7.jp> Antenna→7MHz用片側給電アンテナ

2. 構造と回路構成

ネットで調査すると、多くの記事が参考（バイブル）にしているらしい元ネタがある事を見つけた。



これがその一部で「アンテナ大研究！」と題してJAIAが紹介した資料です。全容は下記URLから見ることができます。

2-1. 直観的な理解

ワイヤー長は1/2λで端から給電するので、電流節（小）、電圧腹（大）となり、インピーダンスZが大であることは、無線家なら容易に理解できる。一方同軸ケーブルの特性インピーダンスは50Ωなのでマッチングセクションはこの間を取り持つインピーダンス変換を担っていると考えられる。マッチングセクションは同軸から見るとL、Cの直列共振回路に見える、一方ワイヤーから見るとL、Cの並列共振回路のように見える。L、Cが共振しているとき、直列共振はインピーダンスZ小、並列共振回路はZ大となって、なんとなく辻褄が合うように見える。

実際、このLCの共振周波数を計算してみると、ほぼ7MHzになるので話がややこしい。

この理解は間違いではないと思うが、ではLとCの値は共振していれば何でもいいのか？という疑問が湧いてくる。

答えはNoで、この共振回路のように見えている回路はL型マッチング回路と見るのが妥当なようです。

2-2. 等価回路

等価回路を図1に示す。

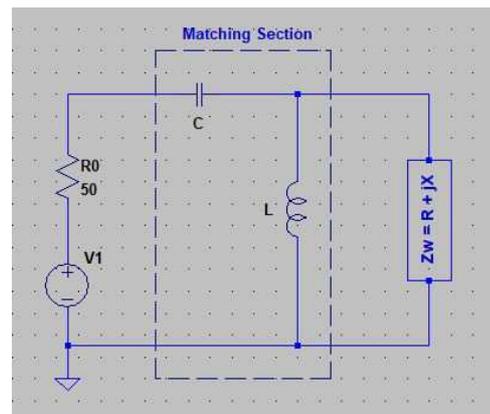


図1 Zeppの等価回路

ここで、

V1：信号源(パワーアンプの出力)

R0：出力インピーダンス（同軸の特性インピーダンス含む）

Zw：ワイヤーのインピーダンス

Zwが分かれば、マッチングセクションのLとCを調整して信号源側の特性インピーダンス50Ωに合わせることができる。すなわちSWR=1.0です。

このZwが一体どんな特性を示すのかがポイントで、1/2λ長のワイヤーでは約5kΩというのは正しいんだと思うが、条件変化に対してどう転ぶのか（大きくなる、小さくなる？）を知ることがこのアンテナの理解を深めることになると思う。

3. ワイヤーのインピーダンス Z_w

ワイヤーのインピーダンスをどうやって調べるか？, MMANAでシミュレーションしてみようと始めたが、いきなり壁にぶつかってしまった。

電線の端っこに給電点を持つてくることができないのである、それもそのはずで、給電部はプラスとマイナスが対をなしてないと計算できません、これはいったいどういう事かと色々調べていると、こんなサイトに会った。

<http://www.aa5tb.com/efha.html>

カウンターポイズを考慮に入れて計算しないとダメみたいですが。Zeppの場合は積極的にカウンターポイズを付けなくても、同軸の外被がその役割を果たすので、計算では外被の長さ分を適当に折り込んだ。(0.1λ以上あればほぼ安定する)

ワイヤーの設置条件によって特性が変化するだろう事は予想できるので、まずは実用的な条件を固定することにした。

【設置条件】

- (1) 給電点の高さは、10m
- (2) 先端の高さは、5m
- (3) ワイヤー径は、φ1.6mm
- (4) ワイヤーの材質は銅
- (5) カウンターポイズは給電部から下に9m
- (6) 中心周波数は、7.05MHz (CW運用が多いので)
- (7) グランド条件は完全導体

※MMANAのインピーダンス計算は完全導体のみ対応

アンテナ高さが低い場合は実際より低めの値になるとのこと
図2はシミュレーションモデルで至ってシンプルです。

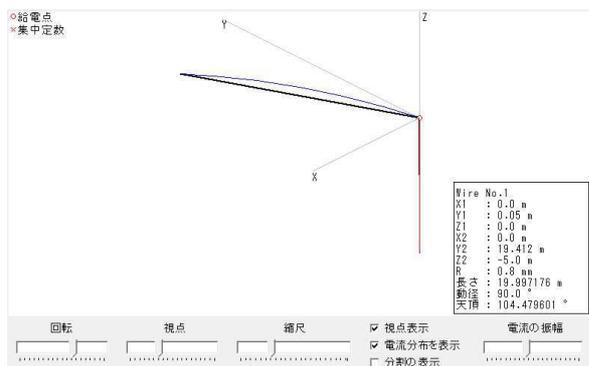


図2 シミュレーションモデル (縦に伸びる線はカウンターポイズ)

以上の条件で、いくつかのパラメータを変化させてインピーダンス Z_w を計算していく。

3-1. ワイヤー長と Z_w

7MHzの1/2λは約20mなのでその前後の、18m~23mまで変化させたときの Z_w を計算した結果を図3に示す。

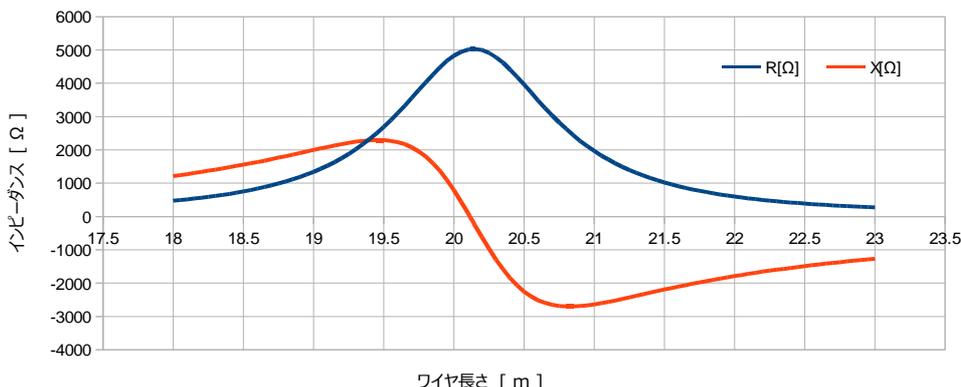


図3 ワイヤー長とインピーダンス Z_w

結果から、ワイヤー長が1/2λより短めの場合は、インダクティブ、長めの場合はキャパシティブとなり、20m強でリアクタンス成分がゼロになって、このときR成分が最大になる。偶然かもしれないがこの設置条件では、R=5kΩとなってネットに頻繁に出てくる値と一致した。

L型マッチング回路で同調をとるなら、リアクタンス成分がゼロである必然性はないと思うが、どうやらこのポイントに合わせているように見えるので、以下リアクタンス成分ゼロのポイントに同調をとる前提で話を進める。マッチング回路を机上で調整する場合、負荷に抵抗のみ準備すればいいので好都合でもある。

ここまで適切なワイヤー長が求まり、そのときのインピーダンス (抵抗成分) も分かったので後はL型マッチング回路の各定数を求めればいい。手計算でもいいが最近では便利なサイトがあるので私はこちらを使わせて頂いた。

<http://www.f-domain.com/matching/>

結果は次のとおり

C=45.38pF
L=11.34uH
@7.05MHz

おや、先に紹介したJAIAの値とは違います。
試しにJAIAの値になる抵抗値を求めると6.8kΩになった。

3-2. 給電点高さ と Z_w

給電点の高さ変化でRがどれくらい変化するか、同様にシミュレーションした結果を図4に示す。

給電点を6m~13mまで変化させたときの、リアクタンス成分ゼロのRをプロットした。

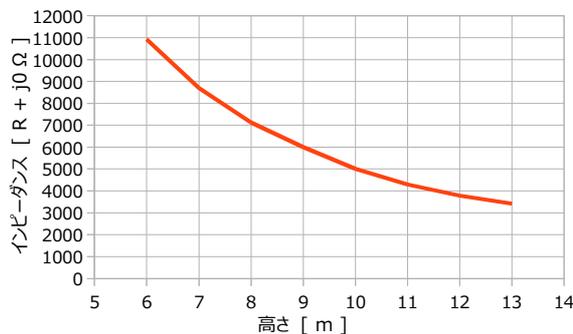


図4 給電点高さ と Z_w (Rのみ)

結果からJAIAの資料は、給電点高さ8m強で設計されていると予想できる。汎用性を持たせるため2階建て住宅の屋根から張れる高さとしてこれぐらいにしたのではないかと勝手な想像をしています。(JAIAの資料では先端が6~8mになっている)

4. Zeppのシミュレーション

ここまでで一応の設計ができたので、マッチングセクション込みでシミュレーションしてみた。
若干、ワイヤ長の微調はしたが、思惑どおりの特性がでた。(図5)

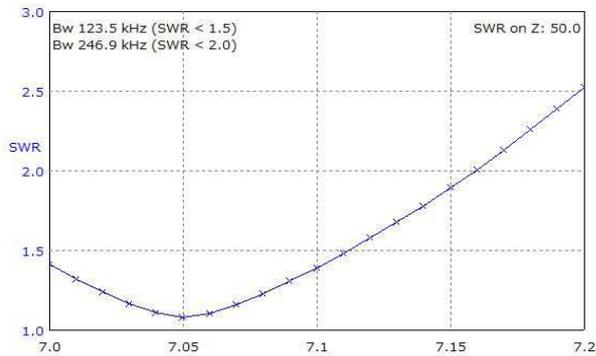


図5 マッチングセクションを盛り込んだSWR特性

ビームパターン等は、 $1/2\lambda$ のワイヤアンテナなのでここではあまり気にしないことにします。

4-1. カウンターポイズ長とSWR

実はこれがすごく気になってました。
同軸の外被導体がカウンターポイズの役割を果たすと認識しているが、ネット検索してみると、同軸の長さを $1/4\lambda$ の整数倍にしないといけないとか書いてるところもあって、一体何が真実なのか？
という事で、上記の条件でカウンターポイズ（同軸の長さ）の長さのみを変化させたときのSWR変化を見てみた。(図6)

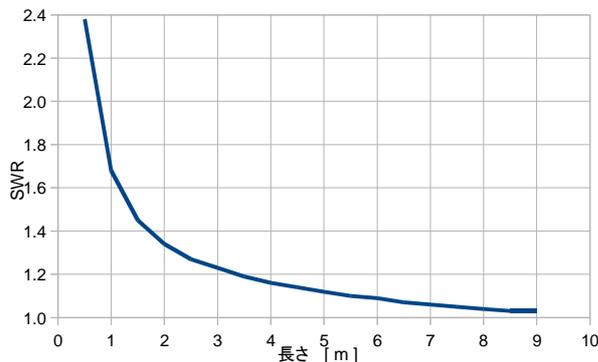


図6 カウンターポイズ（同軸）の長さとのSWR

結果から、

- ・カウンターポイズは $1/4\lambda$ 以上であればSWRは下がる
 - ・極端に短い場合はSWR悪化を招く
- という事でしょうか。

5. コンデンサ、コイルに要求される仕様（耐圧、電流）

次にマッチングセクションに使うコンデンサおよびコイルに要求される仕様について検討する。
多くの記事でこのコンデンサには高い耐圧が必要と記述があって入手に苦労されているようである。

5-1. SpiceでSWR特性を計算

コンデンサ、コイルにかかる電圧や電流を計算するために今度はLTSpiceでシミュレーションしてみる。
SWR特性がMMANAの計算結果と合うかどうか試しにやってみた。
図7が回路モデル。

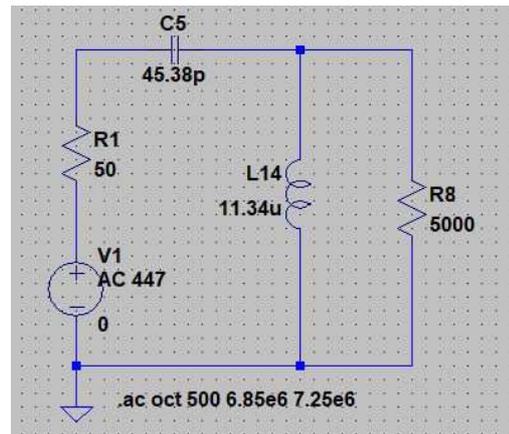


図7 LTSpiceの回路モデル

図8がSWRを計算した結果である。
中心周波数から外れたところのSWRがMMANAの結果とは異なるが、これはLTSpiceはワイヤのインピーダンスが全域に渡って5000Ωで一定であるのに対して、MMANAはワイヤインピーダンスも周波数に応じて計算しているためと考えられる。双方の結果は一致していると考えて次に進む。

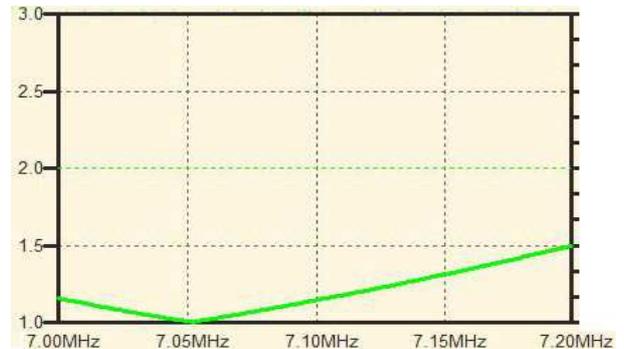


図8 LTSpiceで計算したSWR

5-2. コンデンサ、コイルにかかる電圧

本題のコンデンサ、コイルにかかる電圧を求める。(図9)
ワイヤのインピーダンスが、5kΩ、7kΩ、100MΩ（オープン）の場合の3通りについて計算してみた、**出力電力は500W**。
中心周波数から外れたところでは誤差が大きくなっている前提です。



図9 コンデンサ、コイルにかかる電圧

結果から、

- ・中心周波数あたりでほぼ最大の電圧がかかる。
- ・ワイヤーのインピーダンスが高いほど大きな電圧がかかりワイヤーオープンではC、L共約4.5kVo-p@500Wの電圧がかかる。

5-3. コンデンサ、コイルに流れる電流

同様に、C、Lに流れる電流を求めた。(図10)

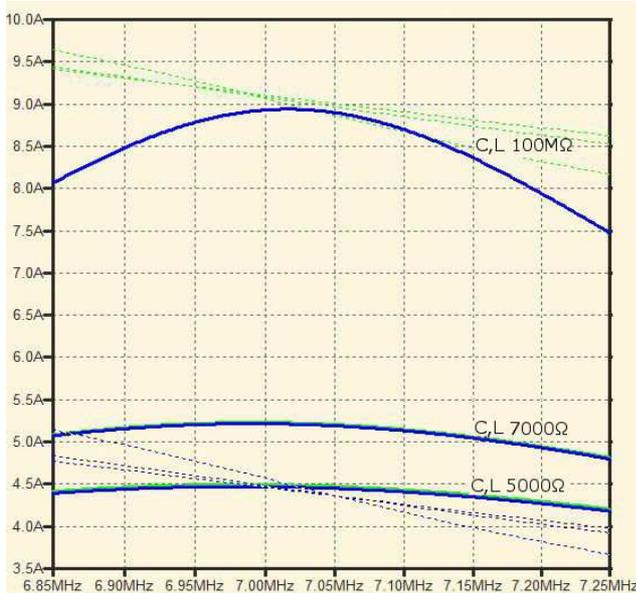


図10 C,Lに流れる電流

コンデンサ、コイルに流れる電流はほとんど同じなのでグラフの線が重なっています、なので3本しか見えません。インピーダンス5kΩでは中心周波数で約4.4Ao-pの電流が流れます。これは侮れない値で、コンデンサのESRによる発熱で最悪は熱破壊する可能性があります。セラミックコンデンサを使う場合、通常メーカーのSPECにESRは記載されていないので要注意です。できるだけ体格の大きい物を使い、実際に通電して温度上昇を確認するのが得策と思います。耐圧だけ気にして電容量を見逃す事がないように。また、万が一ワイヤーがオープンになるともっと大きな電流が流れます。コイルについてはやや太め(φ2.0ぐらい)の線を使えばさほど気にすることは無いと思います。

コンデンサとコイルに同じ電流が流れてたらアンテナには電流は流れてないの？、いえそうではなく電流値が小さくてグラフ上では認識できないだけで、例えば5kΩの場合は、447mAo-pの電流がアンテナワイヤーに供給されています。アンテナに供給される電力を計算すると、

$$P_w = (447\text{mA} \times 1/\sqrt{2})^2 \times 5000\Omega = 500\text{W}$$

となってちゃんと500Wの電力がアンテナに供給されています。



6. 検証実験

さてさて、ここまではあくまでも机上の話であって、もしかしら空論に終わってる可能性もあります。という事で、実際にZeppを製作し検証実験を行った。

製作記事は別項で紹介するとして、ここでは一連の設計手順で試作したZeppのSWR特性を紹介する。(図11)

条件；

- (1) 給電部の高さは10、7、5mの3パターン
- (2) ワイヤー先端は、5m
- (3) 同軸ケーブル 5D-2V 20m
- (4) 給電部は5kΩに机上で調整済み
- (5) ワイヤーの長さはシミュレーションで求めた値
- (6) 地面は比較的乾いた赤土
- (7) 周囲に障害物はなし

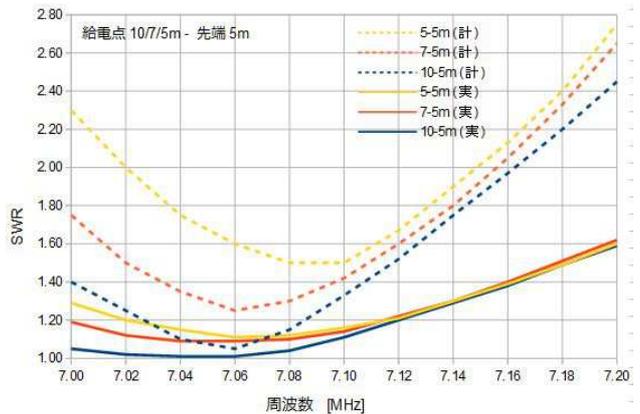


図11 計算と実測SWR比較

ここで実測結果については、ワイヤー長の調整は一回も実施していません。計算で算出した長さどおりです。

さて、この結果をどう見るかですが、

- (1) 設計中心の7.05MHz、給電部10m-先端5mでは計算と実測はほぼ一致している。
- (2) 中心周波数から離れたところの計算と実測の乖離は大きい。
- (3) 給電点が7m、5mと低くなるにつれてSWRが悪化しながら最良fが若干上ヘシフトする傾向は計算、実測とも同じ

計算と実測が合ってるというにはかなり無理があるが、実測の方が良い特性になってるのは、マッチング回路のQが低い(=悪いアンテナ)からではないかと推察する。

しかし実践では使えるレベルと思います。

写真は実験中の様子



7. Zepp設計手順まとめ

これまでの検討と考察を基にZeppの設計手順をまとめると次のようになる。

1. 設計中心周波数を決めて、
1/2λの長さを計算する

CWメインかSSBメインかでお好みに応じて決める。

2. ワイヤーの設置条件を決める
・給電点高さ
・先端高さ
・線径
・線の種類 (銅、アルミ等)

理想的な配置はなかなかできないと思うが、一応基本はこうでな感じで。

3. アンテナシミュレータで計算する
・リアクタンスゼロとなる長さ
・そのときのR (抵抗成分)
(カウンターポイズあり)

MMANA等を使います。カウンターポイズの長さは高さ - 1 mに私はしました。

4. L型マッチング回路の定数計算
・50ΩにマッチするL,Cを求める

便利なWebページでポン

5. マッチングセクション製作
・4で求めた定数でマッチングセクションを製作
・3で求めた抵抗を接続してSWRが1.0となるようにL,Cを微調整する

コイルの巻き方等で、計算結果とはズレが生じると思うので、あくまでも負荷抵抗を繋いで、SWR=1.0に合わせる。根気が必要です。

6. ワイヤーを接続
・3で求めた長さのワイヤーをマッチングセクションに繋ぐ

これで出来上がり
給電部はポールから1/8λ以上離しなさいとサガ電子さんのマニュアルには書いてます。

7. 実際に設置して特性を測る。

ほぼ一発で決まると思うが、ズレがある場合はワイヤー長を調整する。

8. まとめ

冒頭で言及した視点 (疑問点) に対する答えは出たか？改めて振り返ってみる。

・L、Cの定数はどうやって決める？
⇒ワイヤーのインピーダンスが決まればL型マッチング回路として定数を求める。

・ワイヤーのインピーダンスは多くの記事で5kΩとして調整しているがその出どころは？
⇒ワイヤーの設置条件で決まる。
リアクタンスがゼロとなる長さで合わせているようだ。

・L、Cに必要な耐圧は？
・L、Cに必要な電流量は？
⇒給電する電力によって耐圧、電流は勿論変わるが、コンデンサの耐圧と電流量については特に注意が必要。具体的な計算については本文で紹介した通り。

という事で一応の答えが出せたのではないかとと思う。

その他、検討中に感じた事を記載しておく。

(1) ワイヤーのインピーダンス計算にMMANAを使用したがる、地面の条件は完全導体になっている (リアルグランドでは計算できない)、EZNEC等のリアルグランドの計算ができるシミュレータも試してみたが、MMANAでも問題なさそう。地上高が極端に低い場合は要注意かな。

(2) マッチングセクション製作では、コイルの巻き方で、計算値とは異なる値で同調してるように思う、これは理想的なコイルは存在せず、直列抵抗や並列Cが存在するためと思う。L,Cの正確な値はあまり気にせず、SWR=1.0に追い込めば良いと思う。

(3) あと、シミュレーションは傾向を掴むためにはとっても有効と思うが、絶対値について過信は禁物！！

最後に、
長々と理屈をこねてきましたが、冒頭で紹介したブログ (jm7nbs) の最後に筆者がコメントしてる

「アンテナ製作は意外といい加減」

に激しく同意します。



調整中の様子
この写真では取って負荷にXを入れています。
変な帯は製作記事を参照

9. 7MHz 500W ツェップライクアンテナの製作

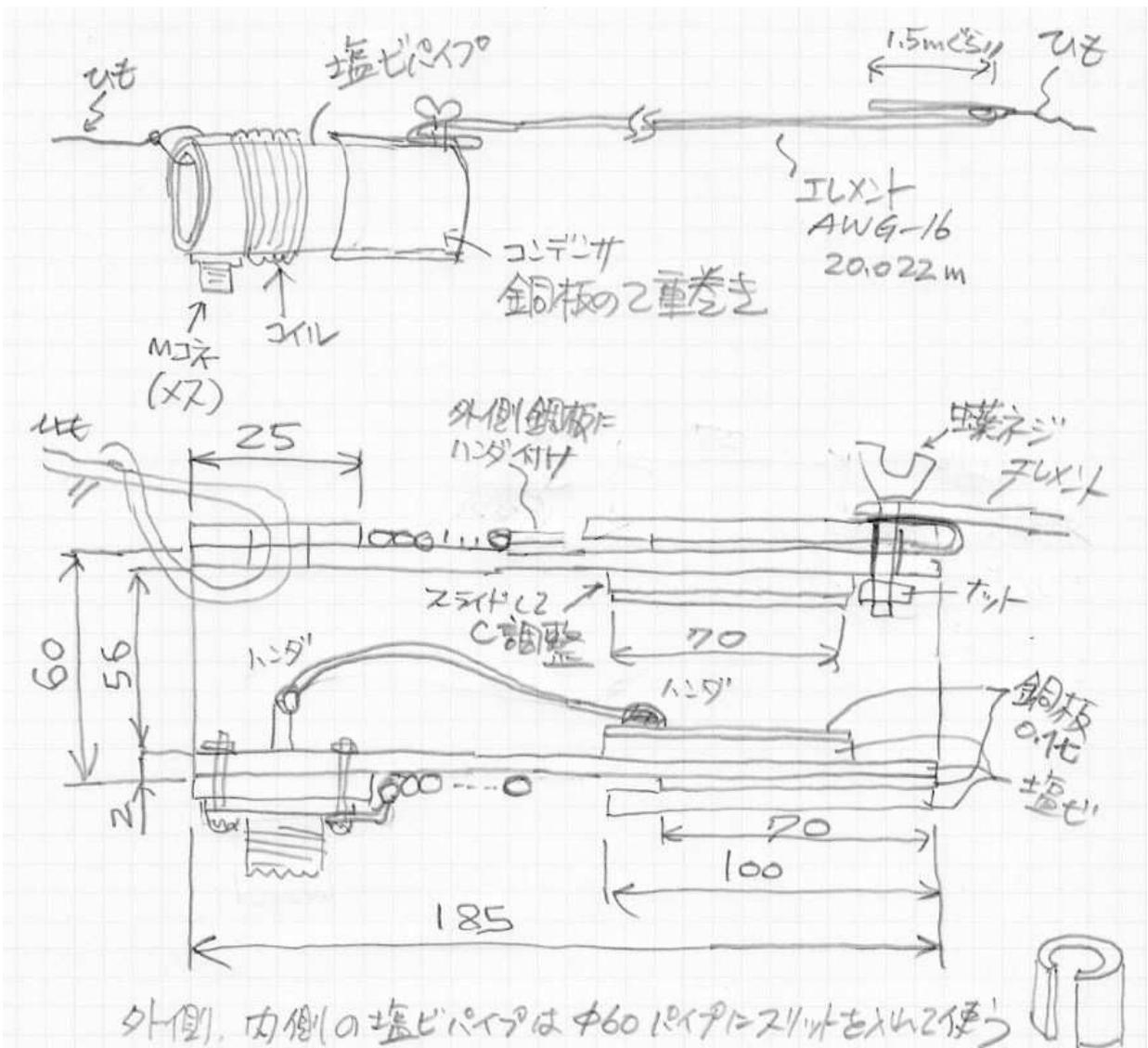
設計コンセプト

- ・耐電力500W
- ・安価
- ・部品入手が容易
- ・軽量
- ・垢抜けてないのは取って気にしない

右の写真が出来上がったZeppです。
 Mコネ (メス) 以外はほぼ全部ホームセンターで入手可能、特徴はコンデンサで、市販の高耐圧セラミックコンデンサは入手しにくく、ネットの記事で時々紹介されている村田製6.3kV品は電流容量的にどうなのかなあ、と思うところがあって、コンデンサそのものも作ってしまう事にした。

パイプの外側、内側に銅板(0.1t)を帯状に巻いて、径の違う銅円筒が塩ビパイプを介して向かい合う形、並行平板コンデンサを円筒にしたもの。内側の円筒をスライドしてコンデンサ容量を調整します。
 銅板の間隔は、4mm (塩ビ2mmx2)になります。これで耐圧がどれぐらい取れるかですが、少なくとも5~6kV以上はあります。
 汚い絵ですが構造図を下記に示しておきます。

これで500W印加してダミーロードで耐量チェックしたところCW連続では数分でコンデンサがアチチになりました。コイルはほろ温い程度でした。
 耐量500Wは誇大広告かもしれませんが。コンテストのCQランニング程度なら使えるかどうかのレベルと思います。塩ビの誘電体損失が大きいためと考えてますが、原因調査中です。なので課題を残しています。



～ サガ電子製 ZA-7H ～

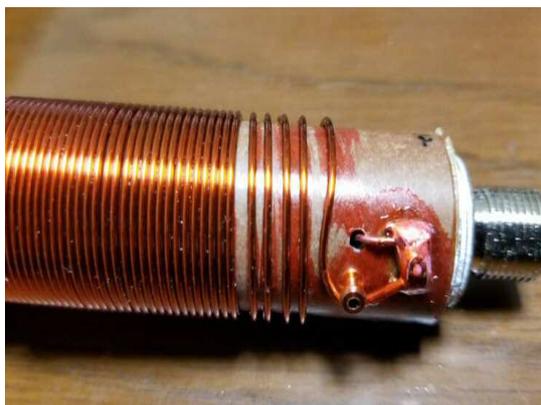
メーカー製アンテナに学ぶ

サンプル提供：大國氏/JR4CZM



仕様；
7MHz帯
公称耐電力 200W

カバーを外したところ
ベークパイプにコイルが巻いてある、先端部分の疎になっているところはLの微調と思う。



コイルの先端は、ベークパイプの穴を通してエレメント固定ネジへかつ内蔵コンデンサへつながっている。



バラバラにしたところ
両サイドの端子（ネジ）はベークパイプに圧入&接着剤で頑丈に固定されており、外すのにナンギした。

コンデンサはパイプの中にあって2個バラ接続されていた。



そのコンデンサの仕様は、
耐圧10kV 10pF(10%)+28pF(10%) = 38pF

印字されているマーク（Sを型どったようなマーク）でメーカーを特定しようとしたが、残念ながら発見できなかった。

故障はこのコンデンサがパンクしてショートしていた。
パンクした理由は不明だが、ワイヤーエレメントの接触不良の可能性を疑ってます。（本文参照）



RG-55/Uを3本バラにしてコンデンサを作り
パイプ内に内蔵して修理は終わり。

さすが日本製？ 作りがしっかりしててプラスのに超難儀した。