

# フェライトバーアンテナについて

堀場 啓二

ポータブルラジオに必ずと言ってよいほどフェライトバーアンテナが入っています。しかしフェライトについては、文献が多いものの、フェライトバーアンテナについて、なかなか詳細な設計資料を見つかることができませんでした。そこで今後の設計データとなるように、これまで集めた文献やメーカーに問い合わせた内容に実験データを加えてまとめてみました。

**材質:** フェライトとは、化学式で $MF_e2O_4$  (Mは2価の金属)の酸化鉄化合物で、金属酸化物と酸化鉄との粉末を混合し、圧縮成形をしてから燃焼して作られます。古い真空管の受信機にこのアンテナが使われていないことから分かるように、フェライトの歴史は比較的新しく、昭和10年頃に東工大 加藤与五郎先生・武井武先生によって発明され、昭和12年にTDKが世界初のフェライト磁心である“オキサイドコア”を製造したのがそのルーツです。フェライトバーの材質はNi-Cu-Zn系(Q材)かCu-Zn系(L材)、又はM材フェライトのようです。文献1によるとQ材は、「アンテナコアとして透磁率が高く、損失係数が少ない。特にQ1B、Q2B、Q3C、Q5B材等は、低温度係数材として優れた特性。その他IFT、OSCコイル用に至るまで広い用途をもっている。」、L材は「200kHz～2MHzにおいて損失が少なく、透磁率が高いのが、特徴。インダクタIFT、OSCコイル、 $\mu$ 同調コイルに至るまで広い用途をもっている。」、M材は、「5MHzを超える高い周波数においてそれぞれの周波数で損失が少ない。各材料の特徴を發揮するため、いろいろな成分からなり、FM、TV用IFT、OSCコイルの他、アンテナ用コア等広い用途をもっている。」とあります。TDKに大型の中波用フェライトバーについて問い合わせたところ、L5 AR16X200を紹介頂きました。L5材の初透磁率750です。この他にQ1C材(初透磁率250)やQ5F材(初透磁率150)があります。L5材とQ5F材は、文献1にありませんので、比較的新しい材料のようです。アミダンのカタログによれば、#61(初透磁率125)、#33(初透磁率800)のフェライトバーが発売されています。中波用には#61材、長波用に#33材が推奨されています。フェライトバー端面の色表示ですが、コイル・スネーク(株)によれば、一定の巻き数のコイルを使用し、インダクタンスのランクを5%毎に6ランク位にわけてあると回答をいただきましたが、TDKでは、色表示はないようで、メーカーにより区々のようです。

透磁率 $\mu$ は、比透磁率 $\mu_s$ に真空中の透磁率 $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ を掛けたもので、 $\mu=\mu_s\times\mu_0$ で表されます。カタログや文献で透磁率と言って比透磁率 $\mu_s$ のことを表している場合もありますので、ちょっと紛らわしいですね。磁界と磁束密度の関係が直線でないため、 $\mu_s$ が一定の値にならないので、磁界が小さい時の比透磁率を初透磁率と言い、一般的に比透磁率 $\mu_s$ という初透磁率のことをさします。市販されているフェライトバーアンテナ(図-9)のインダクタンスを測定してみると、コイルをフェライトバーの中央に配置したインダクタンスは、 $440\mu$ で、フェライトバーを抜くと $19.72\mu$  Hになり、実効透磁率は $440/19.72=22.3$ になりました。文献の比透磁率と比較すると随分小さな値ですね。そこでTDKに比透磁率の測定方法を問い合わせたら、同材質でトロイダルコイルを作り、インダクタンスを測定して求めるそうです。トロイダルコイルの場合、その磁束は、ほとんど全てがコア内を通過しますが、フェライトバーにコイルを巻いた場合、その磁束はフェライトの端から空中に出てしまい、全部通過しないため実効透磁率が小さくなります。よってメーカーから発表されている比透磁率(初透磁率)から磁束計算でインダクタンスを求めることは難しいので、カットアンドトライが必要です。

表-1.Q材(Ni-Cu-Zn系) 文献1より

特性 材質	最適周波数 MHz	色表示
Q1B	0.1～2	うす青緑
Q1C	0.4～2	紫紺
Q	0.1～6	空
Q2B	0.1～3	うす黄
Q2D	0.4～2	白磁色
Q2	0.5～15	緑
Q3B	0.5～15	桜
Q3C	0.4～20	杏色
Q5	0.3～10	
Q5B	0.5～10	白緑色

表-2.L材(Cu-Zn系)文献1より

特性 材質	最適周波数 MHz	色表示
L1	0.2～2	赤
L3	0.2～2	橙
L3B	0.1～1	
L4	0.1～2	

表-3.M材 文献1より

特性 材質	最適周波数 MHz	色表示
M1	0.05～30	黄
M2	2～40	橙
M3	0.1～8	灰
M4	0.5～30	肌色
M5	3～150	うす紫
M5B	6～100	象牙色
M5C	20～160	納戸色
M6	10～50	苔色
M7	2～30	若草色
M8B	0.5～15	
M8C	0.5～12	
M9	0.5～30	チョコレート
M9B	0.5～30	
M9C	2～50	
M11	40～8	

表-4 .アミドンのフェライトバー アミドンカタログより

品番	材質	初透磁率	直径 (mm)	長さ (mm)	AL (mH/1000turns)
R61-025-400	#61	125	6.35	101.6	26
R61-033-400	#61	125	12.7	101.6	32
R61-050-400	#61	125	12.7	101.6	43
R61-050-750	#61	125	12.7	190.5	49
R33-037-400	#33	800	9.4	101.6	62
R33-050-200	#33	800	12.7	50.8	51
R33-050-400	#33	800	12.7	101.6	59
R33-050-750	#33	800	12.7	190.5	70

**形状:** 標準形状として板状のAPと丸棒状のARがあり、コイル・スネーク糊で01年末時点で生産しているものは、表-6の形状だそうです。TDKでは、L5材で、AR16X200まで、Q1c材は、AR12×180まで、Q5F材は、AR10×200までであるそうです。最近パーツ屋には、2cm程度のかなり小型な物もありますね。

表-6 .コイル・スネーク糊で生産されている形状

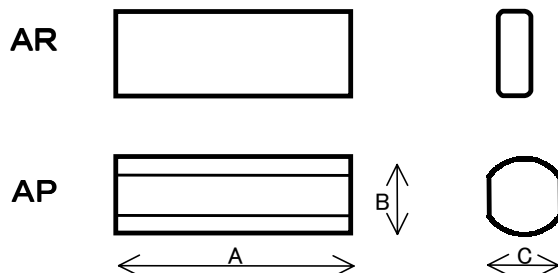


表-5 .フェライトコアの特性 文献2より

品名	初透磁率	比抵抗 (Ω-cm)	使用周波数
L1	最小400	10 × 10 <sup>5</sup>	0.3~2
Q2	最小250	5 × 10 <sup>4</sup>	0.1~2
Q3	最小60		0.5~10
M1	最小50	5 × 10 <sup>5</sup>	0.5~30
M2	最小100		0.3~2

C × B × A	初透磁率	B × A	初透磁率
AP 2 × 8 × 37	300	AR 8 × 60	300
AP 2 × 8 × 50	300	AR 10 × 60	300
AP 3 × 8 × 50	300	AR 10 × 80	300
AP 4 × 8 × 50	300	AR 10 × 90	300
AP 5 × 8 × 55	300	AR 10 × 100	300
AP 5 × 8 × 60	300	AR 10 × 120	300
AP 5 × 8 × 100	300	AR 10 × 160	300
		AR 10 × 180	300
		AR 12 × 180	300

**線材:** コイルは銅線で巻くので僅かに抵抗r(銅損といいます)があります。そこでコイルとバリコンからなる並列共振回路を考えると図-1のようになります。共振時のLとCのインピーダンスが打ち消され、インピーダンスは、rだけになりますので、コイルを流れる電流Iは、 $i = E_m / r$ になります。コイルに加わる電圧ELは

$$EL = i \times 2\pi fL = \frac{E_m}{r} \times 2\pi fL$$

コイルに加わる電圧を大きくするためには、 $2\pi fL/r$ を大きくすればいいわけです。Lもrもコイルの性能ですので、この値をQとして

$$Q = \frac{2\pi fL}{r}$$

ELの式にQを戻すと、 $EL = E_m \times Q$ になり、ループアンテナでの誘起電圧を共振回路でQ倍増幅されることが分かります。

コイルに巻く銅線は、周波数が高くなると、電流はその銅線表面だけを流れるようになり、高周波での銅線抵抗rが上がるためQが低下します。この作用を表皮効果と呼んでいます。フェライトバーアンテナには、リッツ線というエナメル又はポリウレタンで絶縁した細い銅線を何本かまとめた線でコイルが巻かれています。これは、銅線の表面面積を稼ぐための手段です。実際にいくつかの線径のエナメル線やリッツ線をAR10×120のフェライトバーに20回巻いて、Qを測定してみました。(表-7)使用したLCZメータは、YHP4277Aで、測定周波数は1MHzです。Q表示で100のoは無効桁ですので、100~199の間にあります。今回の実験で、20回巻き程度では、あまり表皮効果が見られませんでした。

表-7 線径による表皮効果の実験

線種	線径 (mm) × 本数	線周 (mm)	インダクタンス (μH)	Q
エナメル線	φ0.32 × 1本	1	43.86	100
エナメル線	φ0.5 × 1本	1.57	40.33	100
エナメル線	φ0.8 × 1本	2.51	36.63	100
エナメル線	φ2 × 1本	6.28	31.16	100
リッツ線	φ0.08 × 30本	7.54	36.15	100

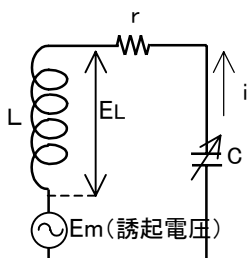
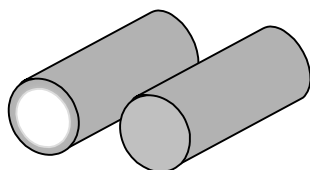


図-1 並列共振回路



高周波 低周波  
図-2 表皮効果

ところでリッツ線でコイルを巻くことは、コイルを並列に接続することになり、合成インダクタンスは、 $L(\mu H) / n$ (nは線数)にならないのは、何故? 試しにリッツ線の代わりにエナメル線を2本を同時にフェライトバーに巻いて、そのインダクタンスを測定しても、同じ巻き数ならば1本で巻いた場合とインダクタンスが変わりません。しかし2つのコイルをずらして巻くと、インダクタンスは下がっていきます。つまり2つのコイルで発生する磁束が、同様に2つのコイルを通過するのであれば、そのインダクタンスは変わりませんが、コイルをずらすことで、2つのコイル一部の磁束が互いに打ち消されてしまうため、結果的に実効透磁率が下がるためと考えられます。

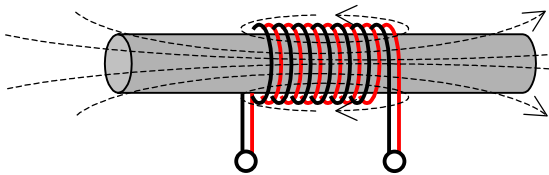
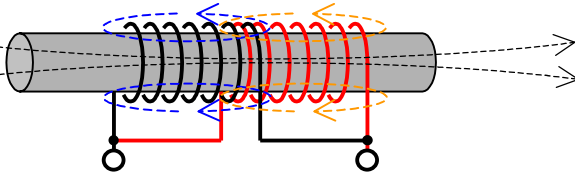


図-3 エナメル線を2本巻いた場合



磁束の方向が反対で打ち消し合う  
図-4 コイルをずらした場合



図-5 コイルに使用される線材

**フェライトバーアンテナ**: ご存知のように

フェライトバーアンテナはフェライト・コア上にコイルを巻いたものです。中波放送のアンテナは頂冠式空中線(トップローディング・アンテナ)から送出される電波は、進行方向に対し、水平に磁力線ができますので、この磁力線がコイルに交わり誘起電圧を発生するわけです。これは、トランスにおける電磁誘導作用とまったく同じです。

フェライトバーアンテナに発生する誘起電圧を考えてみましょう。まずフェライトのないエアコアループに発生する誘起電圧の最大値 $E_m$ は、その点の電界強度の最大値 $E_o$ ( $\mu V/m$ )にアンテナの実効高 $h_e$ を掛けたものです。

$$E_m = E_o \times h_e$$

エアコアループアンテナの実効高 $h_e$ は

$$h_e = \frac{2\pi NA}{\lambda}$$

ここで、 $N$ はループの巻き数、 $A$ は実効面積、 $\lambda$ は受信する電波の波長です。

$$E_m = E_o \times \frac{2\pi NA}{\lambda}$$

実際のループアンテナは、バリコンと並列共振回路を構成しますので、受信周波数 $\lambda$ に同調した場合は、 $Q$ 倍になります。 $Q$ は、同調回路(と言っても主にループアンテナ)の良さです。

$$E_m = E_o \times Q \times \frac{2\pi NA}{\lambda}$$

ここに実効透磁率 $\mu_e$ 倍のフェライトバーを挿入すると、磁力線が $\mu_e$ 倍されますので、誘起電圧も $\mu_e$ 倍になります。

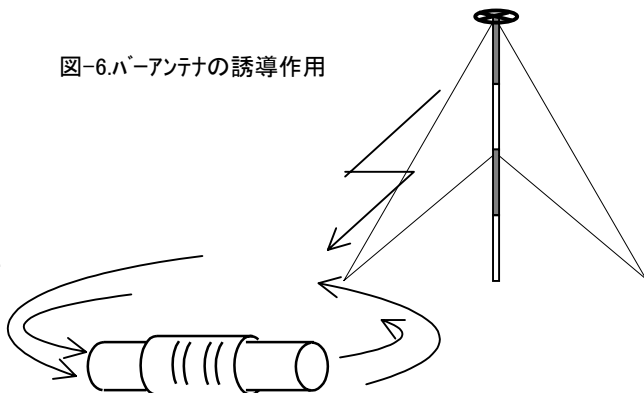
$$E_m = E_o \times Q \times \mu_e \times \frac{2\pi NA}{\lambda} \text{ -----(式1)}$$

このようにフェライトバーを入れることで、誘起電圧は $\mu_e$ 倍になりますが、同調回路では、コイルのインダクタンスは使うバリコンによって決まってしまうので、巻き数はずっと少なくなってしまう、単純に $\mu_e$ 倍されるわけではありません。

実効透磁率 $\mu_e$ は、フェライトバー最大実効透磁率 $\mu_m$ と巻き線係数 $\gamma$ で変わります。

$$\mu_e = \gamma \mu_m$$

図-6.バーアンテナの誘導作用



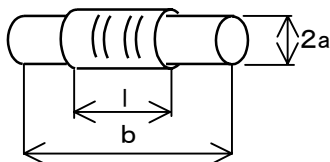


図-7

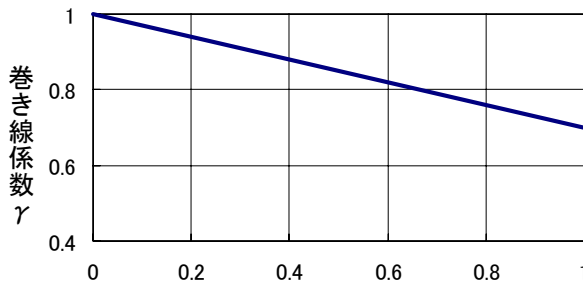


図-8 b/l

つまりフェライトバーは、コイル長に対し長い程、最大実効透磁率に近づき、誘起電圧も高くなることがわかります。

図-7、8のコイルは、フェライトバーに対し、中央に巻いた場合ですが、市販のフェライトバーアンテナの多くは、バーに対し中央ではなく、左右にオフセットしてコイルが巻いてあります。コイルをフェライトバーの中央に巻いた場合と端に巻いた場合では、実効透磁率が変わってきます。AR10×120(図-9)を使って実験してみるとフェライトバーの中央で440μHの物が、端に持っていくと205μH、約47%までインダクタンスが下がります。(μ同調はこれを使っています)そこで市販のフェライトバーアンテナは、フェライトバーの透磁率のばらつきをコイルの巻く位置で微調するために左右に巻いているのではないかと推定しています。



図-9 市販のフェライトバーアンテナ

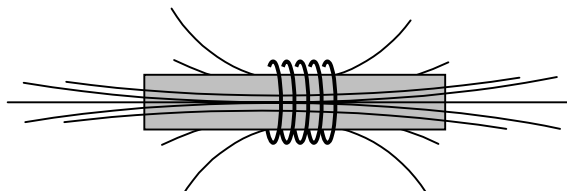


図-10 磁力線が多い(Lが大きい)

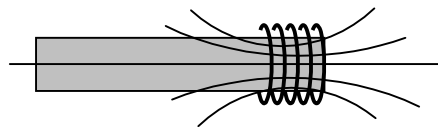


図-11 磁力線が少ない(Lが小さい)

**インダクタンス**: 一体何回巻けば、所望のインダクタンスが得られるか？エア・コアコイルのインダクタンスは、以下の式で近似されます。

$$L = k \times \mu \times \frac{A}{l} \times N^2 \quad \text{----- (式2)}$$

ここでNはコイルの巻き数、μは透磁率(μ = μs × μo 空気中の比透磁率 μsも真空中と同じ1で計算、Aはコイルの実効面積、lはコイル長、kは長岡係数で図-12から求めることができます。

フェライトバーにコイルを巻く場合は、これに比透磁率を掛ければよいのですが、メーカーから初透磁率は、公表されていますが、これは、トロイダルコイルでの値であって、フェライトバーに巻く場合の比透磁率は、随分小さな値になってしまい使えません。又、フェライトバーを複数束ねてコイルを巻いた場合は、なおさら何回巻いたらよいか分かりません。そこで手持ちのフェライトバーで測定してみました。

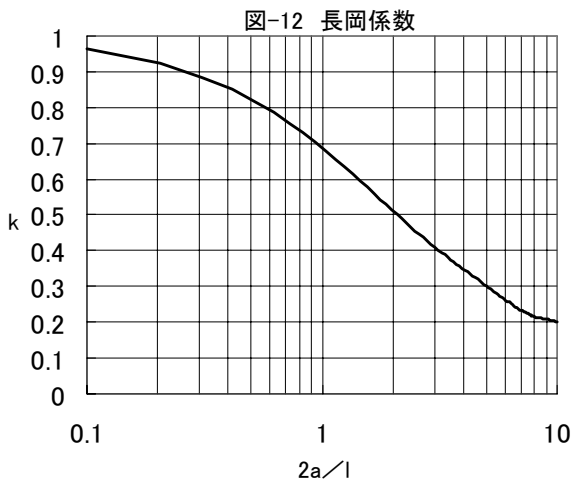


図-12 長岡係数

測定したフェライトバーは、AR10×180(端面黄色)とAR10×120(端面黄色と薄緑の2種)の計3種です。AR10×180は、秋葉原シオヤ無線電機で購入しました。シオヤ無線では、大小様々なフェライトバーが揃っています。AR10×120は、名古屋第2アメ横 タケイ無線で購入したバーアンテナ(図-9)で、バーアンテナからコイルを取り除いたものです。残念ながらいずれのフェライトバーもメーカーは不明です。使用した線材は、外皮0.15、芯線φ0.51のジュンフロンETFE線を使いました。ブレッドボードやラッピングに使う配線材です。コイルは、インダクタンスがもっとも高くなるフェライトバーの中央に巻きました。実験の結果を図-13~26に示します。

図-13 AR10×120(薄緑) 3本束ね

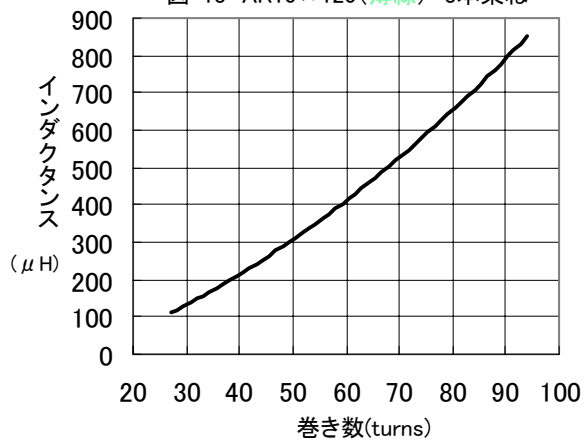


図-14 AR10×120(黄) 3本束ね

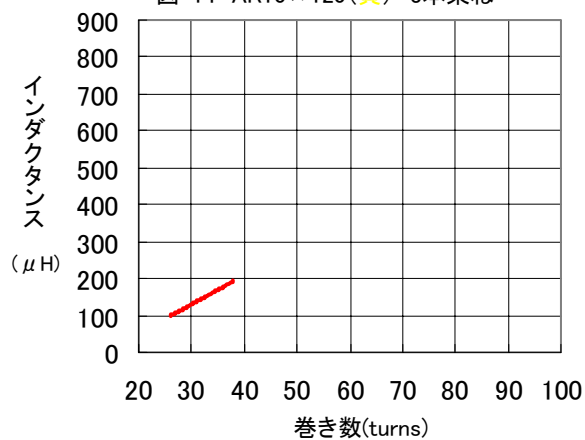


図-15 AR10×120(薄緑) 5本束ね

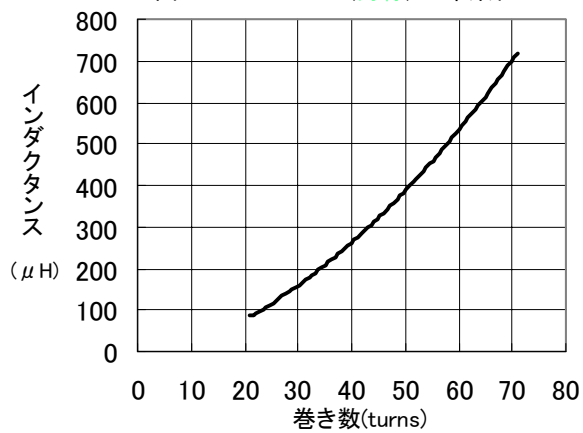


図-16 AR10×120(薄緑) 10本束ね

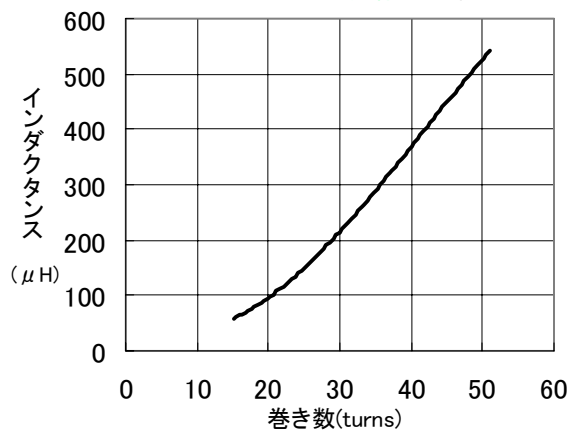


図-17 AR10×120(薄緑) 20本束ね

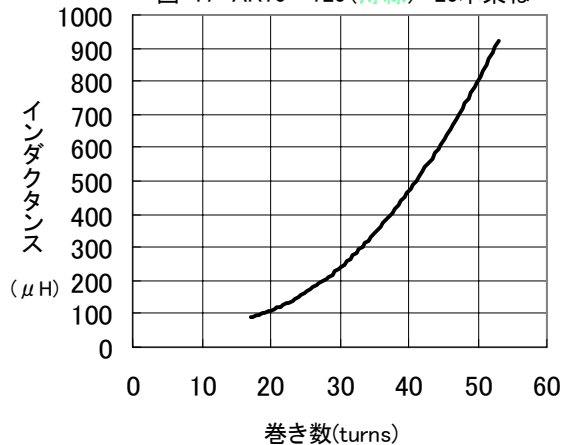


図-18 AR10×120(薄緑) 30本束ね

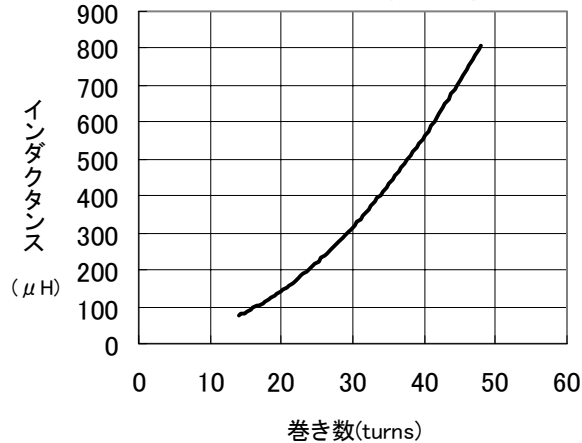


図-19 AR10×120(薄緑) 3本束ね×3本

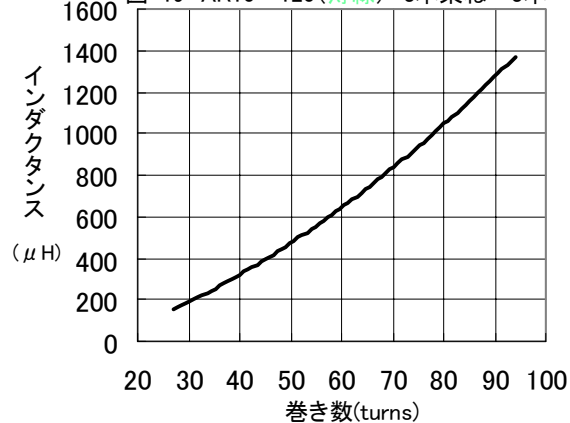
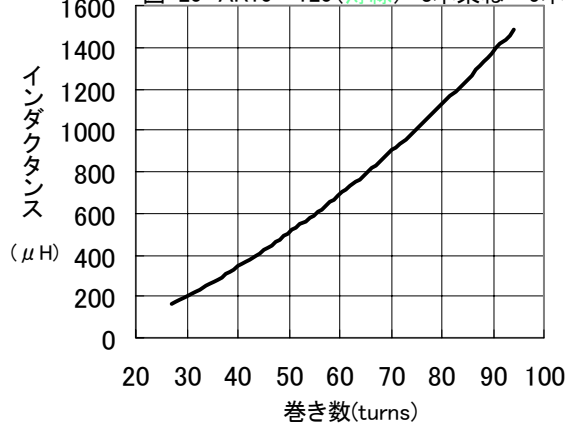
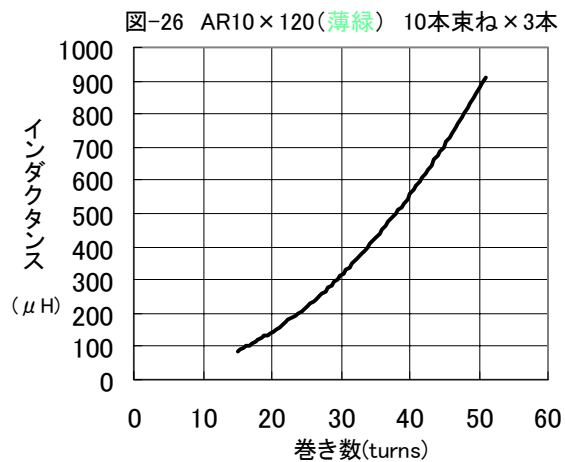
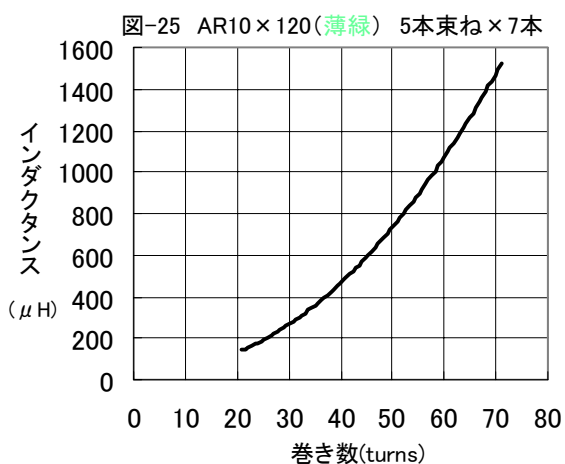
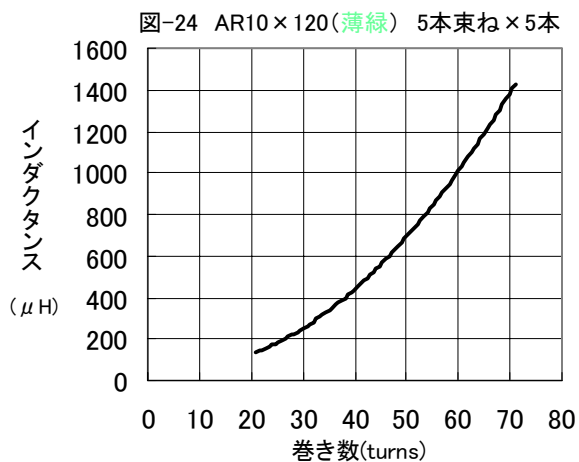
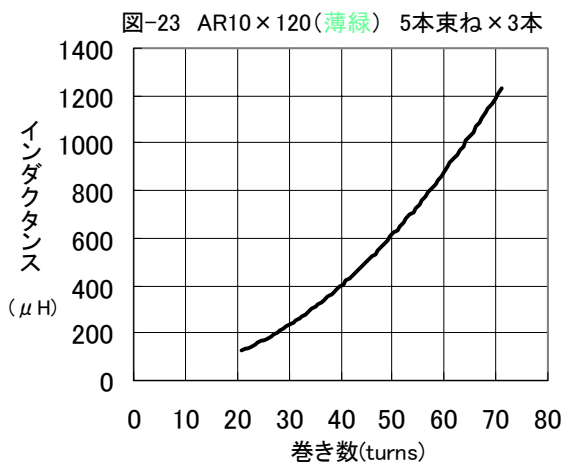
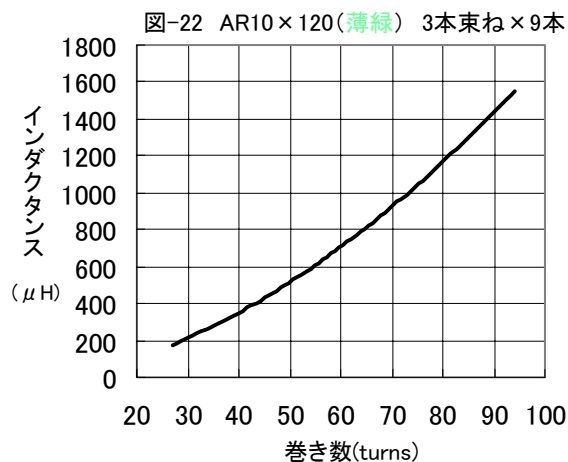
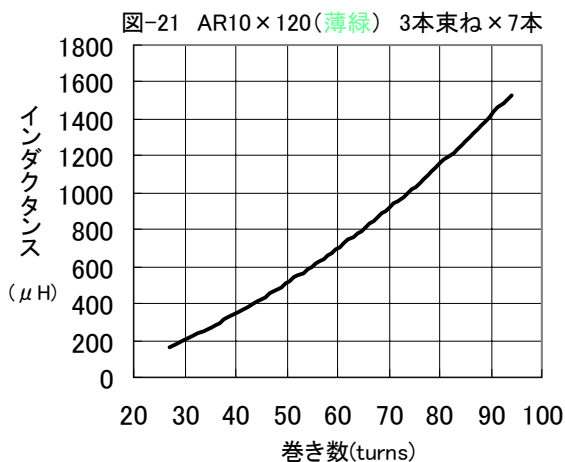


図-20 AR10×120(薄緑) 3本束ね×5本





高利得なフェライトバーアンテナの製作を目的に、フェライトバーを束ねてコイルを巻いたり、更にフェライトバーを繋いだりしてそのインダクタンスを測定しました。グラフは、各コアで3点測定し、近似曲線で結んだ曲線です。3本束ねは、3本のフェライトバーをまとめ、コイルを巻いたもので、×3本は、コイルを巻いたフェライトバーと同じ束のフェライトバーの左右に配置して測定したものです。端面色の薄緑と黄色の差は、(図-13、14)黄色の方が2~3%低めの値を示します。誤差の範疇と考えると差し支えないでしょう。

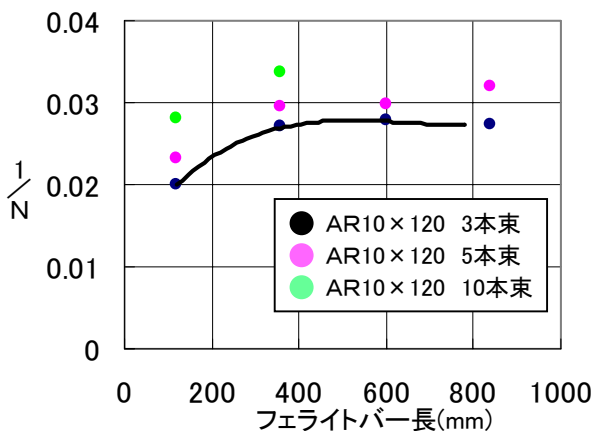
350pFのバリコン(バリキャップ)で中波全域を同調させるには、

$$530\text{kHz} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times 350\text{pF}}}$$

L=258 μHとなりますので、300 μH程度を狙えば良いこととなります。

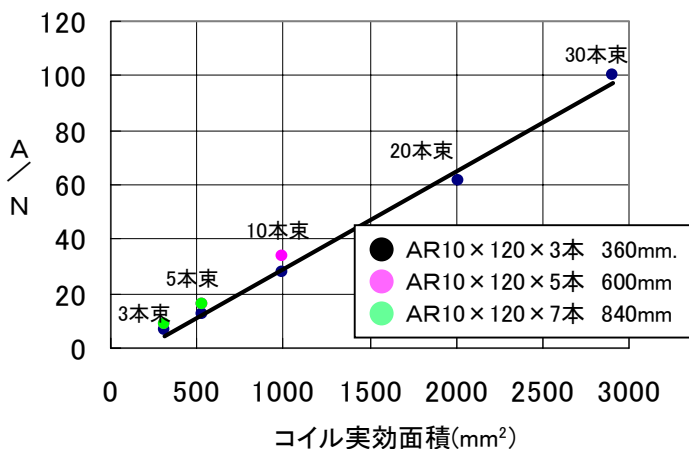
**利得:**ここまできてやっと本題に入ります。「フェライトバーアンテナは、太く、長い程、高利得になるのか」を検証することが、本稿の目的です。フェライトバーの項で書いたようにフェライトバーアンテナの誘起電圧 $E_m$ は、実効透磁率 $\mu_e$ 、コイル巻き数 $N$ 、実効面積 $A$ 、同調回路の $Q$ に比例します。しかし実効透磁率 $\mu_e$ を大きくしても、同調回路では、バリコンによって容量は決まってしまうので、巻き数 $N$ が少なくなってしまう、利得は、単純に $\mu_e$ 倍されるわけではありません。そこでインダクタンスの項で実験した値を基に検証してみました。

図-27 フェライトバー長に対する300 $\mu$ Hのコイル巻き数



まずフェライトバー長に対する誘起電圧の変化です。コイルの実効面積とインダクタンスを固定した場合、コイルの巻き数 $N$ は、式2から $L = \alpha \times \mu_e \times N^2$ になりますので、実効透磁率が増加すると、コイルの巻き数は2乗に反比例して減ります。これを式1に代入すると $E_m = E_o \times Q \times \beta / N$ となり、 $Q$ が変わらなければ、巻き数 $N$ が多い程、誘起電圧が低いこととなります。つまり $Q$ が変わらなければ、フェライトバー長が長い程、誘起電圧は増えますが、その増え方は、コイルの巻き数に反比例して増えますので、ある程度以上長くなると、その効果は薄れてしまうこととなります。実験の結果、AR10×120を3本繋いだ(360mm)ところまでは、コイルの巻き数が急激に減りますが、それ以上フェライトバー長を伸ばしてもコイルの巻き数は大して減りません。(図-27)コイル長は、巻き数を37巻きとするとコイルの線材から $(\phi 0.51 + 0.15 \times 2) \times 37 = 30$ mmですので、コイル長に対しフェライトバー長が10倍程度までが効果的です。

図-28 コイル面積に対する300 $\mu$ Hの面積/コイル巻き数



次にコイルの実効面積に対する誘起電圧の変化です。フェライトバー長の場合と違うのは、誘起電圧 $E_m$ は、 $E_m = E_o \times Q \times A \times \delta / N$ となり、コイルの実効面積 $A$ /コイル巻き数 $N$ 倍されることです。実験では、フェライトバーの長さに関係なく、実効面積に比例して $A/N$ が上がっていきました。利得を稼ぐにはフェライトバーの長さより、実効面積を稼ぐ方が有効的なようです。

**シールドバーアンテナ:**近接した雑音を抑えるのに、フェライトバーを端面の除いてシールドすると効果があるようです。市販品での例として、ちょっと古いのですが、山水電気チューナTU-X1とポータブル方探 ロイヤル工業 AQUA GUIDE 712 Digital Automatic Direction Finderを紹介します。TU-X1は、背面に巨大なAM用バーアンテナを持っています。アンテナをバラしてみると $\phi 55$ mmのアルミパイプの中に $\phi 10 \times 190$ mmのバーアンテナが入っています。(アルミパイプは、GNDに落ちています。)バー自体は、 $\phi 10$ mm程度なので、シールドパイプとの間隔は、全周20mmは空けてありました。端面は、樹脂製のキャップが被せてあります。TU-X1のフェライトバーアンテナの使い方もちょっと変わっています。普通ならバリコンと並列共振回路を形成するのですが、TU-X1のフェライトバーアンテナは、共振回路にはなっておらず、バーアンテナの誘起電圧を複同調回路で分離して、アンプに導いています。ロイヤル工業AQUA GUIDE 712は、マリンレジャーボート用の方探ラジオで、ラジオ局に向けて自動的にフェライトバーアンテナが回転します。フェライトバーは、 $\phi 10 \times 160$ mmが2本束ねて巻かれており、周辺に半円上に銅板が巻かれています。こちらでもフェライトバーとシールド版まで10mm程度空いていたと思います。いずれのコイルとシールド板を10~20mm程、空けてありますが、実験でシールド板をコイルに密着して巻くと、インダクタンスが急激に下がり、所定のインダクタンスが得られなくなってしまうので、この対策と考えられます。

図-29 山水電気TU-X1



図-30 TU-X1フェライトバー分解

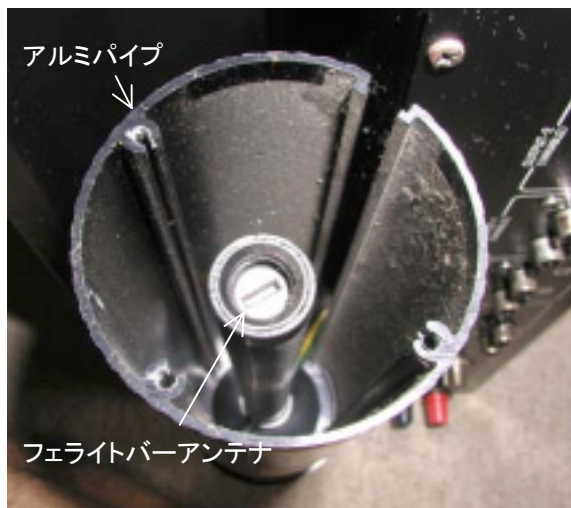


図-33 ロイヤル工業AQUA GUIDE 712 フェライトバー

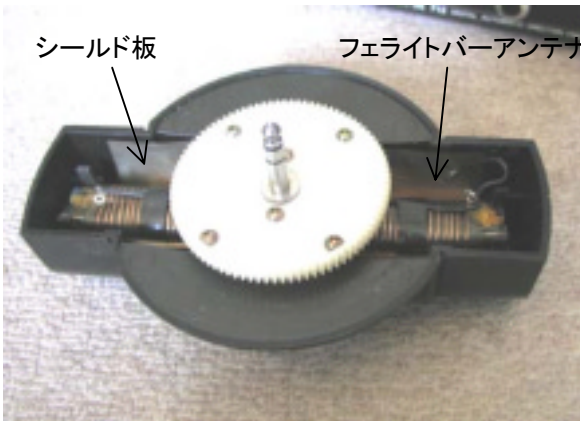


図-31 TU-X1 フロント回路

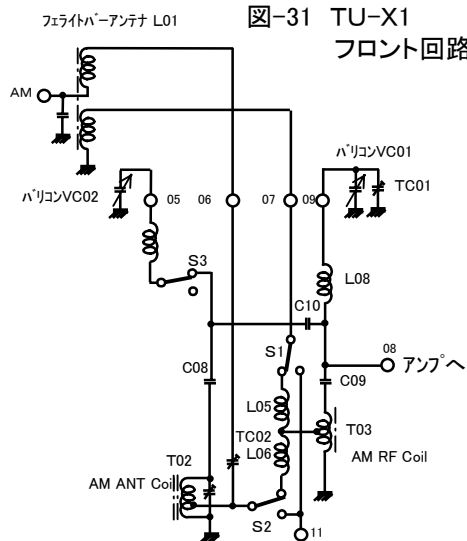
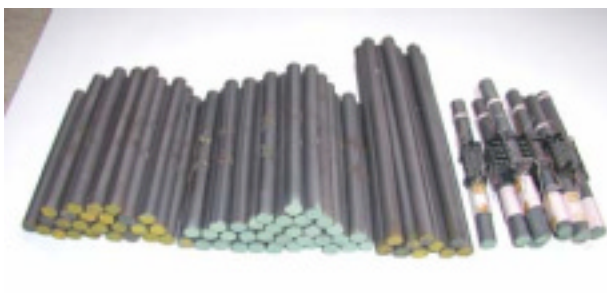


図-32 ロイヤル工業AQUA GUIDE 712



図-34 実験に使用したフェライトバー



参考文献:

文献1: 誠文堂新光社 初歩のラジオ編集部 アマチュア無線Q&A  
ハムの質問なんでもOK 昭和47年6月10日初版  
文献2: 誠文堂新光社 ラジオ設計自由自在 ②トランジスタ編  
奥沢誠吉著 昭和38年10月20日初版  
文献3: AMIDON AMATEUR PRODUCTS 2001年カタログ  
文献4: 兼六館 ラジオ・FM放送用受信機  
阿部久朗著 昭和54年1月25日初版  
文献5: CQ出版社 タジオ&ワイヤレス回路の設計・製作  
鈴木憲次著 1999年10月15日初版  
文献6: CQ出版 トロイダル・コア活用百科  
山村英穂著 昭和58年1月31日初版