

テスラコイルは、共振により高周波・高電圧を得る装置である。簡単な部品の組み合わせで製作することができるので、空中電磁現象の実験をするのに適した教材でもある。

ここではテスラコイルの製作のために必要なノウハウを製作手順に沿って、初等的に解説する。

1.1. テスラコイルの基本構成と動作原理

テスラコイルの作動方法はいろいろあるが、ここでは最も簡単な放電ギャップを使用した減衰振動方式について述べる。

図1(a)のように、テスラコイルは大きく分けて、一次共振回路、二次コイル、電源回路の三つの部分からなる。

まず電源回路で直流電圧 V を発生させ、抵抗 R を通してコンデンサ C を徐々に充電する。 C が充電される過程で両端の電圧 V_c は上昇してゆく。このとき放電ギャップ G にも同じ電圧が印加される(図1(b))。

G の両端の電圧が火花放電電圧 V_s に達すると、パルス的なアーク放電が発生し、 C と一次コイル L が G を介して接続され、 C と L に振動電流が発生する(図1(c))。

一次コイルに流れる振動電流が周囲に磁場または渦状電場を作り、二次コイルに誘導を起こす。この誘導は二次コイル全体におよぶものではなく、一次コイルに接近した部分に強く誘導する。

二次コイルに誘導した種電圧は二次コイル内に共振を起こし、コイル両端に超高電圧が発生する(図1(d))。二次コイルが共振するためには、一次共振周波数と二次コイル共振周波数を一致させておく必要がある。

電気回路が共振するためにはキャパシタンスとインダクタンスの組み合わせが必要である。二次コイルにはコンデンサが取り付けられていないが、コイル自体が静電容量を持っているため、共振が起こるのである。コイルの静電容量は巻線の表面に分布して存在している。このように回路定数が立体的に分布している回路を分布定数回路という。

1.2. 製作の手順

1.2.1. 二次コイルの製作

テスラコイルの部品の中で、作ってみなければどんな特性を示すかわからないのが二次コイルである。

二次コイルの特性は、数値計算によるシミュレーションも可能であるが、非常に複雑になるので、コイル内の電流分布を経験値として与えて、やっと近似解が出せるというのが現状である。

難しい計算に何ヵ月も没頭するよりも、作る楽しみを味わってフィジカルセンスを養うことの方がより深い理解を得る場合もある。

また、二次コイルは作るのに根気を要するので、期待した特性が出なかったからといって、作り直す元気がなかなか出ないものである。

だからまず二次コイルを作り、その共振周波数に合うように、一次回路を設計・製作した方が良策である。

二次コイルの製作は、単調で、時間を要するが、絶縁性の筒に被覆線(エナメル線、ビニール被覆線等)を巻くだけでいい。一方の端はアースに接続し、もう一方の端は放電端子となる。アースを接続しないと高い電圧を取り出すことができなくなる。

動作時、放電端子がとがったままだと、放電端子付近の電圧が十分上昇しないうちに、そこへ電界が集中し、容易に火花放電が起こる。一度火花が発生すると電荷が空中に洩れ、それ以上電圧は上昇しないので、あまり大きな火花が得られない。大きな火花放電を実現するには、放電端子に表面のなめらかな閉曲面を持つ金属体を接続すればよい。このようにすると空中絶縁破壊耐電圧が大きくなり、十分電圧が上昇したとき放電が起こるので、空中にドラマチックな火花が観測できる。(図2)

以降、筆者が製作したテスラコイルを例に過程を説明する。

二次コイルは直径 80[mm]、高さ 1000[mm]であり、導線は 0.55[mm]のエナメル線を密に巻き、放電球は直径 150[mm]の中空ステンレス球を使用した。

1.2.1.1.二次コイルをアースすると高い電圧が得られる理由

コイルの両端に発生する電圧を仮にVとしたとき、アースなしの場合、コイルの中央が振動の中心となるため、各々の端子には+1/2V, -1/2Vの電位が生じる。一方の端を地面にアースした場合、コイルのアース側が振動の中心となるため、もう一方の端子の電位はVとなる。このような理由により前者と後者で放電端の電位に2倍の違いがあるのである。

このことは惑星と衛星の運動にたとえることができる。惑星と衛星間の距離がLで、双方が同質量のとき、各々の天体は半径 1/2 Lの軌道を描くが、一方の天体の質量が非常に巨大であるとき、もう一方の天体は半径Lの軌道を描くことになり、前者の2倍の変位を持つ。

1.2.1.2.コイルの形状について

ボビンの形状は円筒形の方がコイルとして巻きやすいが、時間があれば他の形状に巻いてみて比較実験してみると面白いだろう。例えば、コイルの形状が円錐形になっているときは、底面付近の部分の表面積が大きくなるため、近似的に底面部分はアースしたのと同様の役割を果たす。

また、渦巻状の二次コイルは、円筒形や円錐形のコイルよりも少ない導線で、所望のインダクタンスを得ることができるので、巻き線抵抗が小さくなり、高いQ(後述)を得ることができる。また、周辺部分は前述と同様、アースの効果をも有する。

1.2.1.3.コイルの共振を鋭くするために

コイルの共振を鋭くすると発生する電圧も高くなる。この共振の鋭さをQ(Quality factor)と呼ぶ。

二次コイルを集中定数に置き換え、一次コイルからの誘起電圧をeとすると図3の様に、RLC直列共振回路として表現することができる。このとき、Qは次式で与えられる。

$$Q = \frac{1}{R_2} \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \quad (1)$$

この式に実際例の値を代入してみると、 $L_2=17.18\text{mH}$, $C_2=14\text{pF}$, $R_2=31.2$ では、 $Q = 1123$ となる。

また、共振時に C_2 の両端に現れる電圧 V_0 は

$$V_0 = e Q \quad (2)$$

で与えられる。一次コイルからの誘導による電圧 e が低くてもこれが Q 倍されるので超高電圧を得ることが出来るのである。先の例によると、
仮に $e = 1000 [V]$ とすると $V_o = 1123 [kV]$ となる。

しかし、実際は表皮効果による R_2 の増加や接地抵抗があるので、 Q はかなり低い値になり、 V_o も相応の電圧になってしまう。[3]

コイルの Q を高くするためには、まず内部抵抗の小さい導線を使用することが望ましい。ここで考慮しなければならないのは表皮効果である。コイルに流れる高周波の電流は巻線の表面に集中して流れる性質があるため、電線の実効断面積が減ることになる。よって、直流電流を流したときと比較して内部抵抗が増加するのである。

本実験機の Q をさらに改善するには、次のことに留意するとよいと思われる。

- a. 導線を流れる電流は表面に集中するので、表面積の大きな導線を使用する。例えば径の太いものやリボン状のものである。
- b. 径の細い被覆導線でもそれらを複数束ねると表面積の合計は大きくなるので電流は流れやすくなる。このような電線を「リッツ線」という。

また、接地抵抗を減らすためには、地中深くなるべく面積の広い接地板を埋め込むとよい。地面へのアースがとれない場合は表面積の広い金属板をアースの代用としてもよい。

1.2.1.4. コイルの巻き線のゆるみについて

ボビンと導線の熱膨張係数が異なる場合、温度変化によって巻き線がゆるむことがあるので、必要に応じてコイル表面に高圧絶縁材（ワニス、フラックス等）を塗布し、固着させるとよい。

絶縁材は二重に塗布した方がよい。筆者は夏にアクリルパイプのボビンにコイルを巻き、スプレー式の絶縁材を塗布していたのだが、塗膜が薄すぎて冬季には巻線が緩んでしまい、巻き直すという苦労があった。その後は刷毛を使う方式の絶縁材を二重に塗布して巻線の緩みを完全に防止している。

1.2.2. 二次コイルの共振周波数の測定

以下の手順により二次コイルの共振周波数 f_{r2} を測定する

図4のようなループコイルを作り、二次コイルの下端を囲むように配置する。巻き数は数回でよい。

ループコイルをオシロスコープに接続する。

二次コイルの下端とアースの間に発振器を挿入する。発振器出力の内部インピーダンスが $50 [\Omega]$ 以上の場合は、正しい共振特性を観測するために出力端子に $10 [\Omega]$ 程度の抵抗を並列に接続する（図5）。

発振器の周波数を変えながらオシロスコープ上の波高が最大になるところをさがす。

このときの波形の周期 T_2 から、次式により二次コイルの共振周波数 f_{r2} を算出する。

$$f_{r2} = 1 / T_2 \quad (3)$$

あるいは周波数カウンタで f_{r2} を直接測定してもよい。

アースの状態、二次コイルの高さ、壁からの距離などで、共振周波数が異なるので、二次コイルは実際に使用する状態に設置して、計測することが望ましい。

実測したコイルの f_{r2} は $326 [kHz]$ であった。

備考：測定方法のノウハウ

図6(a)のようにコイルが解放端を持ち、自由振動しているとき、電流はコイル表面に電荷を分配しながら振動するため、電流分布は一様でなくなり、実際のインダクタンスは直流的なインダクタンスより小さくなる。

もし、(b)のように通常の電気部品を測定するように閉回路を構成すると、コイル上端に電荷の逃げ道を作ってしまうことになる。このとき、コイル表面に分配される電荷は、自由振動のときと比較して、極端に少なくなるため、全く違う特性になってしまう。

1.2.3. 一次回路の製作

Cの決定

一次共振回路の共振周波数 f_{r1} は二次コイルの共振周波数 f_{r2} と同じにしなければならない。つまり

$$f_{r1} = f_{r2} \quad (4)$$

である。

図7の一次回路のC,Lによって f_{r1} が決まり、次式で与えられる。

$$f_{r1} = \frac{1}{2\sqrt{LC}} \quad (5)$$

C,Lの値のとりかたは、任意であるが、一次回路に最初にエネルギーが蓄積されるのは共振用コンデンサCであるから、コンデンサのエネルギー

$$E_C = C V_C^2 / 2 \quad (6)$$

が大きくなるように工夫すればよい。この式の性質上、Cだけをやたら大きくするよりもVを少しでも大きくする方が良策である。つまり、電源回路の電圧を上げればよいのである。

備考：Cと一次コイルLの間で共振しているとき、CのエネルギーがLの方に全て移行する瞬間がある。このとき、Lに蓄積されるエネルギー

$$E_L = L I^2 / 2 \quad (7)$$

は先に述べた E_C と等号で結ばれる。よって、一次回路のVとIの関係は

$$C V_C^2 = L I^2 \quad (8)$$

となる。実際は、 E_L の一部は二次コイルに移行するので、Iは上式より小さい値になり、二次コイルの存在により、ギャップの放電音も小さくなる。

Lの製作

式(5)の変形により、 f_{r1} とCからLを算出し、目的の値になるように作る。表皮効果を考慮して、表面積の大きい線材が望ましい。

Lは導線の太さ、巻き数、ループの直径、線間ピッチなどで決まる。実際は次のようにして製作した。所望のインダクタンスを得るために、インダクタンスメータを導線の両端に接続した状態で導線をコイル状に巻き、ループ径、巻き数を変えながら、メータが所望の値を示したところで導線を固定する。筆者は20[A]用のケーブルを2本並列に接続して密巻きで2ターン、ループの直径は155[mm]で製作した。

算出したLの値が小さくなりすぎて製作できない場合は、Cの値を変更し、再度Lを算出しなければならない。

備考

- 1：一次コイルと二次コイルの結合が強いと周波数特性に二つの共振点 f_1 、 f_2 が生ずる。これを交流理論では双峰曲線と呼んでいる。(図8)[5,7]
結合が強すぎると双峰曲線の各ピークは離れ、下がる。結合が弱くなると各ピークは接近し、高くなる。結合が弱すぎるとピークはまた低くなる。最良の結合は試行錯誤によって見いだすほかはない。
- 2：式(8)に具体的な値を代入してみるとわかるが、一次コイルには、瞬間的に大電流が流れる。実例をあげると

$$C=0.175 \times 10^{-6} [\text{F}]$$

$$V_c=3000 [\text{V}]$$

$$L=1.4 \times 10^{-6} [\text{H}]$$

$$I=(C/L)^{1/2} V_c \\ =1060 [\text{A}]$$

筆者の知人が実験した結果でも実際に1000[A]を超えることがあったそうだ。この大電流は時間とともに急激に減衰するから、コイルを溶断することはないが、線材は十分大きい表面積のものを用いた方がよい。大電流用ケーブルを2～3本束ねるかあるいは銅のパイプなどを使用するとよりよいだろう。

- 3：また、一次コイルLのインダクタンスは極めて小さい値を持つので、一次回路自体のQを高くするためには、Lの内部抵抗も極めて小さくする必要がある。この問題は、2と同じ対策により、解決する。

放電ギャップの製作

放電ギャップは二つの金属を向かい合わせ、ギャップ間隔を微調整できるようなものであればなんでもよいが、先端が球面状である方がより安定した放電が発生する。(写真1)

ギャップに生ずる放電はアークでなければならない。もし、Cの充電電圧を上げ、電極表面の曲率半径に比してギャップ間隔を極端に大きくしてしまったとき、そこに生ずる放電はコロナに近くなり、大電流を流すことができない。[1,2] この対策として、曲率半径の大きな電極を使用してもよいが、図9のように、半径の小さな球ギャップを多数直列にして小型軽量化を図っている研究者もいる。[4]

1.2.4. 電源回路の製作

電源回路は直流の高電圧を作りだし、Cをチャージする役割を果たす。

まず、変圧器により、AC100[V]を数[kV]に昇圧させる。次に高電圧用ダイオードで整流し、コンデンサで平滑する。電源回路が供給する電圧は整流や平滑化をしなくても、テスラコイルは作動するのであるが動作が不安定になる。

式(6)の E_c を大きくとるためにCの耐電圧の許す限りなるべく高い電圧が取り出せる方がよい。

Cへの充電用抵抗Rは大電力を消費するので、ホールー抵抗等を使用する。

Cの充電時間 T_r はCとRの積つまり時定数と同等とみなしてよい。次に実例を示す。

$$C=0.175 \times 10^{-6} [\text{F}]$$

$$R=20 \times 10^3 [\]$$

$$T_r=CR$$

$$=3.5 \times 10^{-3} [\text{s}]$$

1.3. チューニング

同調

一次回路と二次コイルの共振点がずれていると一次から二次へ移行するエネルギー効率が悪くなるので、いくつかのコンデンサを組み合わせることでCを合成し、組み合わせを変えて、同調できるようにしておく。

テスラコイルを作動させ、Cを少しずつ変えながらいちばん放電が強くなる条件を見つける。本実験では行っていないが、他の同調手段としてLを変化させる方法もある。

写真2は最適なチューニングで、観測される二次コイル上部からの火花である。この火花はパルス的なコロナ放電の繰り返しであり、青みがかった色を呈している。

放電ギャップの調節

ギャップ間隔が狭いときは、Cの充電が初期の段階で放電に至るので、電圧は低く、また、繰り返し周期は短い。また、ギャップが広すぎると、Cの電圧が、定常状態に達しても放電しないので、二次コイルの火花の様子を見ながら、適当に調整する。

電源OFF後もしばらくの間、ギャップには高電圧が現れているので、安全のため調節する前にドライバーなどでギャップをショートし、放電させておく。

1.4. アースについて

二次コイルの上端電極と比較して、十分大きな表面積(静電容量)を持った導体ならば、どんなものでもアースの役割を果たすので、必ずしも大地に接地する必要はない。

1.5. 試作機の諸元

参考のため、試作機の仕様をまとめておこう。写真3はテスラコイルの外観である。

電源回路

変圧器

方式：インバータ式ネオトランス

一次側：AC100[V]

二次側：10[kV], 20[mA], 18[kHz], 巻線抵抗：2[k Ω]

整流器

高電圧用ブリッジダイオード 20[kV], 700[mA]

R

2[k Ω] (変圧器の巻線抵抗分)

一次共振回路

L

巻線：シリコンゴム被覆高圧ケーブル, 20[kV], 20[A]

ボビン：アクリル製, 外径 155[mm]

巻方：2本並列に2回巻

インダクタンス：1.4[μ H]

C

種類：オイルコンデンサ

静電容量：0.17[μ F] (合成値)

放電ギャップ

電極材料：真鍮製 M6 フクロナット

ギャップ間隔：1.3[mm]

二次コイル

ボビン：アクリル製, 外径 80[mm], 内径 74[mm], 高さ 1000[mm]

巻線：0.55[mm]エナメル銅線

巻数：約 1780 回

巻線抵抗：31.2[Ω] at 25[$^{\circ}$ C]

放電球：ステンレス製, 150[mm]

アース時の共振周波数：326.3[kHz] (CWによる測定)

Qの実測値：171 (図5による測定)

火花長：25[cm]

電圧：550[kV_{0-p}] (火花長からの推定)

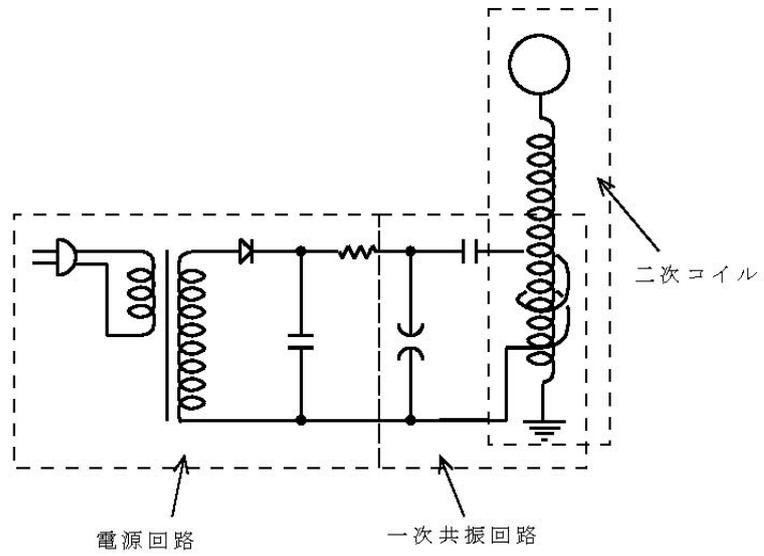
参考文献

- [1] 高電圧工学，朝倉書店，電気工学基礎講座
- [2] 高電圧工学，コロナ社，標準電気工学講座
- [3] 電気学会大学講座「電気磁気学第二次改訂版」，電気学会
- [4] George Trinkaus: "TESLA COIL", HIGH VOLTAGE PRESS
- [5] Kenneth L. Corum and James F. Corum: "Tesla Coils - An Rf Power Processing tutorial For Engineers", Int'l Tesla Society, 1988
- [6] Nikola Tesla: "EXPERIMENTS with Alternate Currents of High Potential and High Frequency", Lindsay Publications Inc
- [7] 交流理論，電気学会

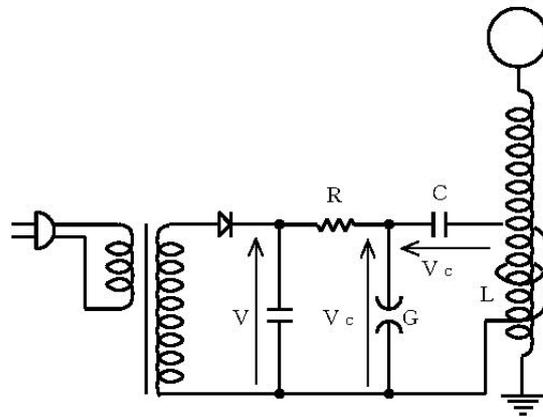
図と写真の説明

- 図 1 (a ~ d) : テスラコイルの動作原理
- 図 2 : 放電電極の形状について
- 図 3 : 二次コイルの等価回路
- 図 4 : ループコイル
- 図 5 : 共振特性の観測
- 図 6 (a、b) : 解放端がある場合とない場合の違い
- 図 7 : 一次共振回路の設計
- 図 8 : 双峰曲線
- 図 9 : シリーズギャップ

- 写真 1 : 放電ギャップ
- 写真 2 : 作動中のテスラコイル
- 写真 3 : テスラコイルの外観



(a)



(b)

図 1 テスラコイルの動作原理 (1 / 2)

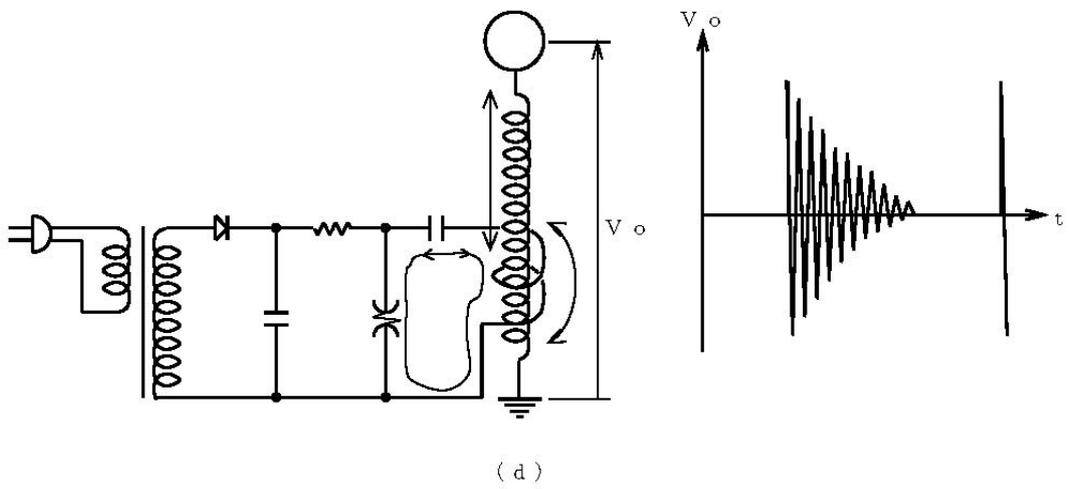
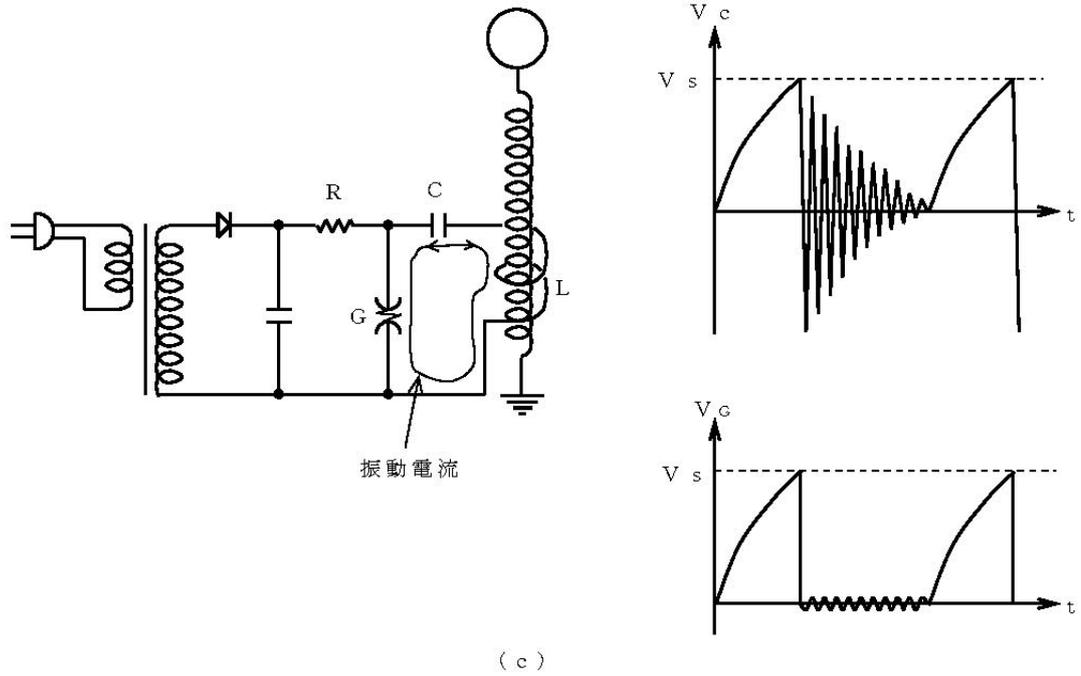


図1 テスラコイルの動作原理 (2 / 2)

先端がとがっているとそこに強い電界が発生し、低い電圧でも放電する



なめらかな閉曲面の金属を取り付けると放電しにくくなる。球の場合、その半径が大きくなるほど絶縁破壊電圧は高くなる。

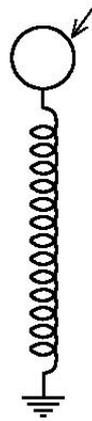


図2 放電電極の形状について

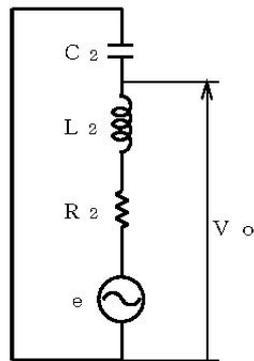


図3 二次コイルの等価回路

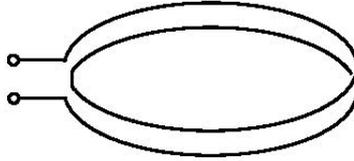


図4 ループコイル

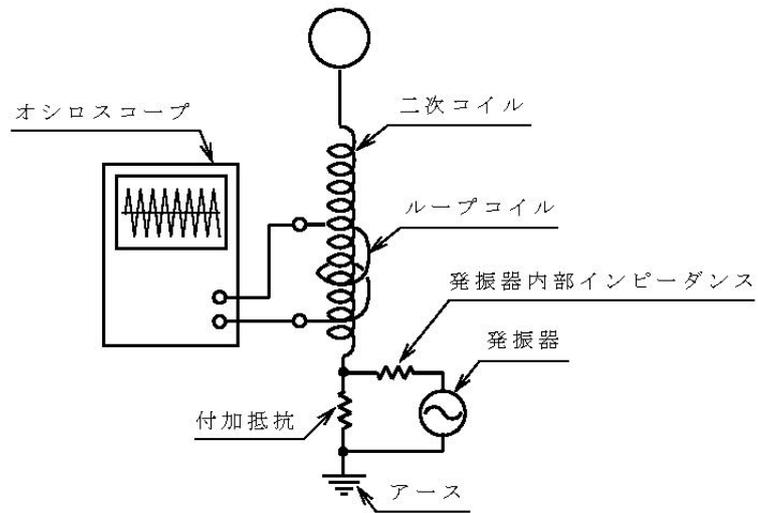
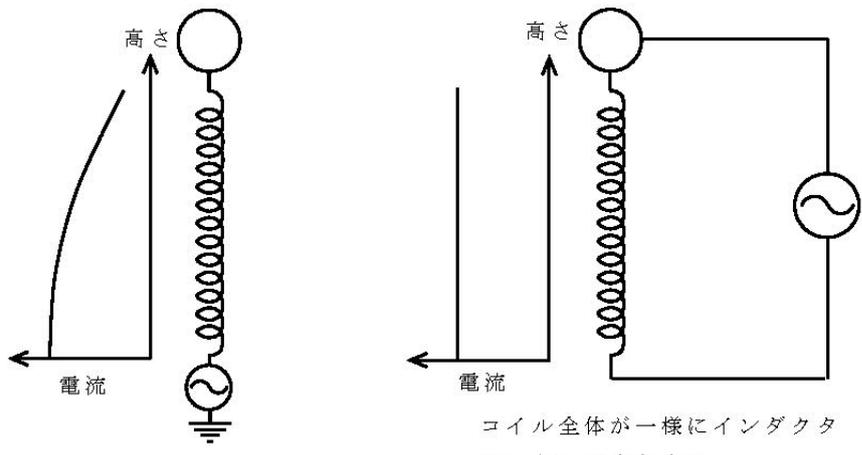


図5 共振特性の観測



主として下端側の部分がインダクタンスとして寄与する

(a) 解放端がある場合

コイル全体が一樣にインダクタンスとして寄与する

(b) 解放端がない場合

図6 解放端がある場合とない場合の違い

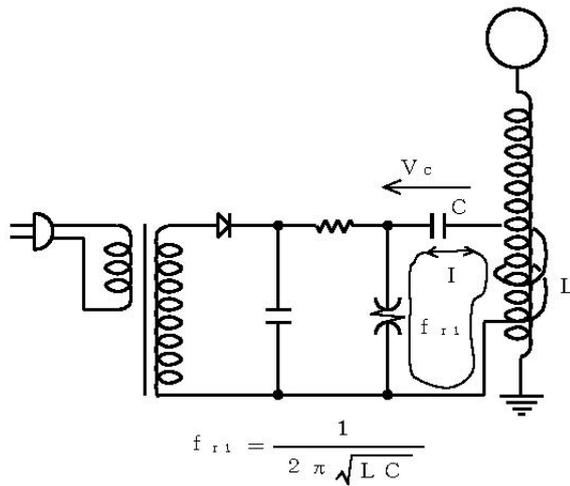


図7 一次共振回路の設計

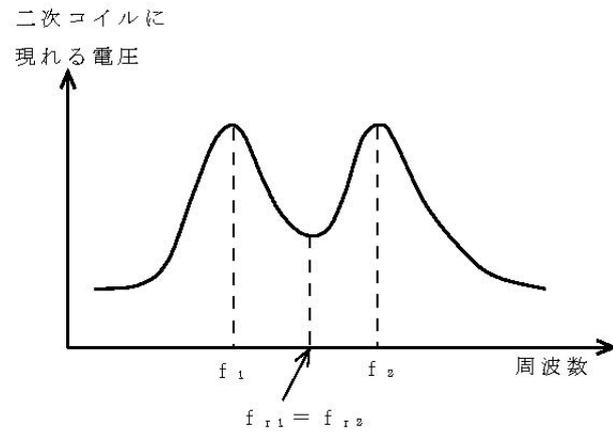


図 8 双峰曲線

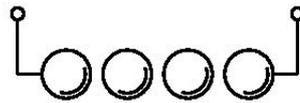


図 9 シリーズギャップ

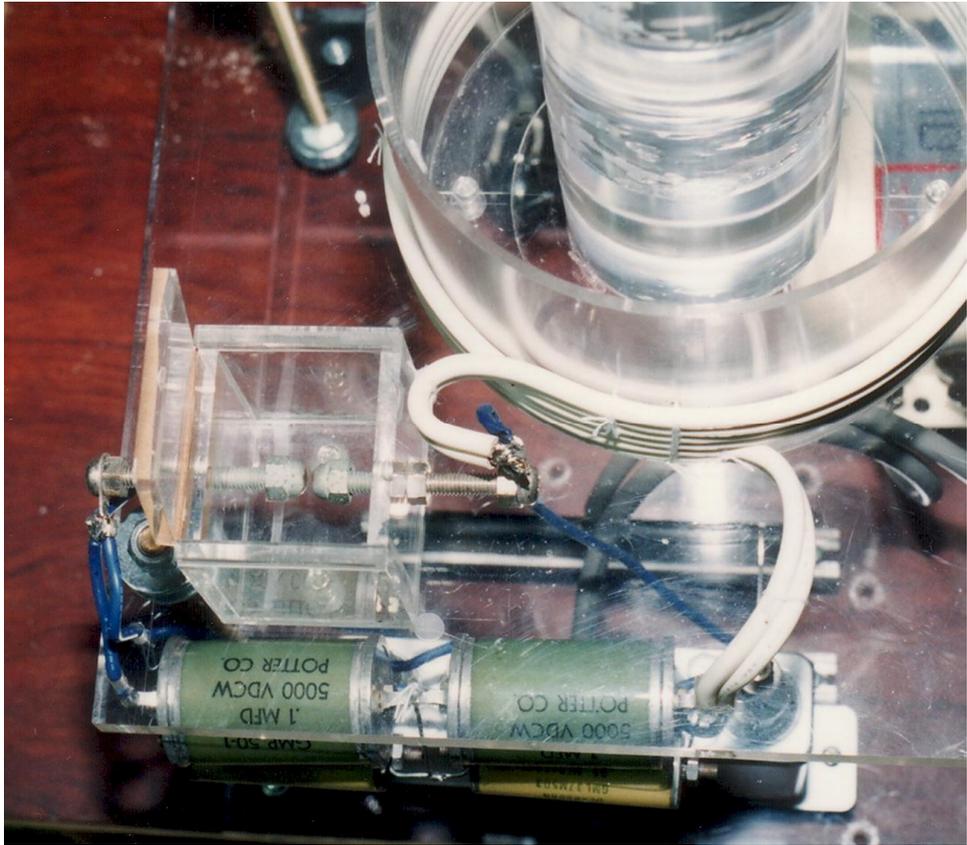


写真 1 : 放電ギャップ

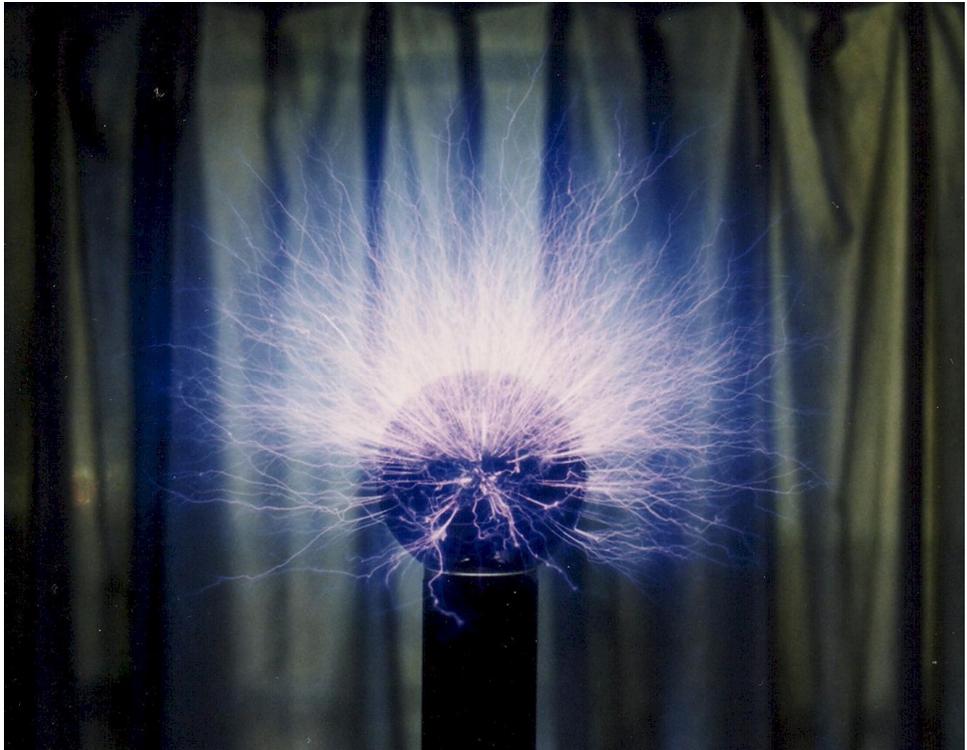


写真 2 : 作動中のテスラコイル

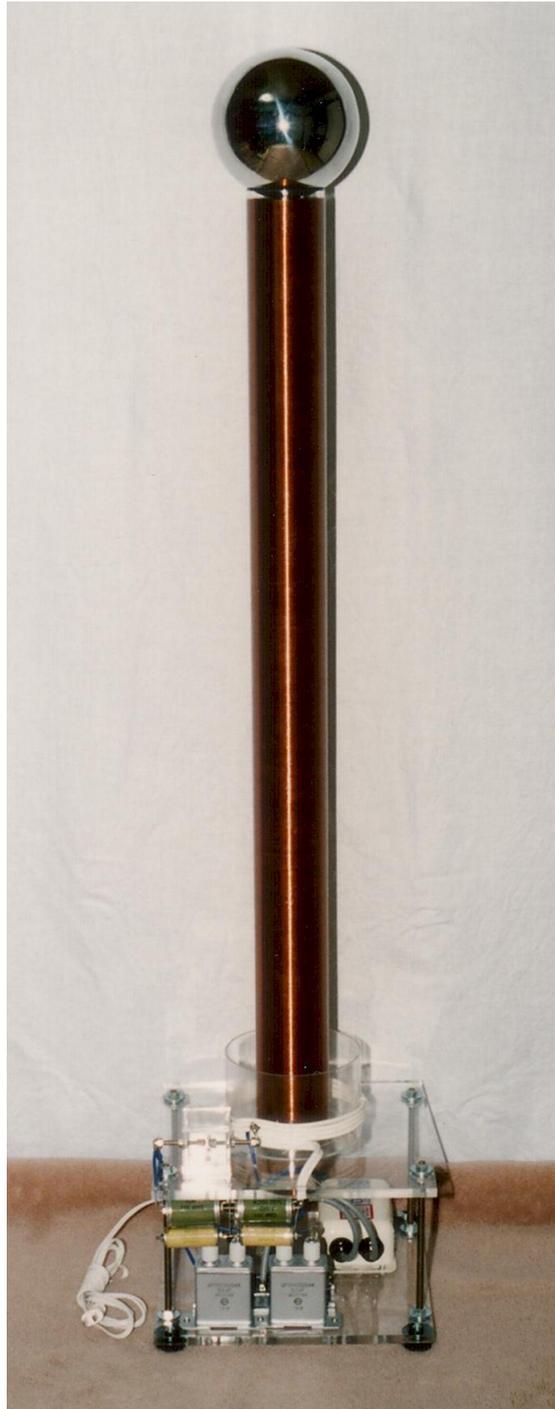


写真 3 : テスラコイルの外観

変更履歴

2005-1026 新規作成

2008-0306 校正

2014-0121 HP リンク挿入

2023-0124 HP リンク更新