

テスラコイルの作り方

テスラコイルとはニコラ・テスラが発明した共振型空芯変圧器で高周波・高電圧を発生する。テスラ変圧器とも言われている。自作したテスラコイルは、1次巻線は約10ターン、2次巻線は1000～3000ターンある。2次巻線の一端に取り付けた金属球体が地球との間に生じる静電容量と2次コイルとで直列共振回路が形成され、1次巻線にその共振周波数に等しい信号を加えると、大変高い電圧が金属球に発生する。金属球に針を取り付けておくと、針に先端から紫色のコロナ放電を観測することが出来る。

ネットの情報を頼りに、手探りでテスラコイルの製作を始めた。当初うまく動作せず、スイッチング用のFETを沢山飛ばしてしまったが、概ね動作原理が把握できたこともあり、3号機では計算通りのテスラコイルが完成した。多くの失敗から得た製作のノウハウを紹介しながら、テスラコイルの作り方を解説する。なお製作した装置は、テスラコイルの改良型として、半導体駆動回路を使用したSSTC (Solid State Tesla Coil) と呼ばれている。

なお 参考資料として以下のビデオも準備した。

・ [テスラコイルの作り方](#)

・ [テスラコイルの実験Ⅱ](#)

・ [テスラコイルの実験](#)

基礎編

●ニコラ・テスラ

ニコラ・テスラは、19世紀末に活躍したユーゴスラヴィア生まれの発明家で、「発明の天才」、「電気天才」、「電気の魔術師」、「交流の父」などと賛辞されている。アメリカではオバマ大統領の移民に関する演説でアインシュタインなどとともに名が上がるほど有名な人物ではあるが、日本では知名度が大変低い。

テスラは現在世界で使われている交流式電力システムを発明した。エジソンの発明した直流式電力システムより長距離の電力送電に有利である。テスラはさらに無線による電力送電システムと情報の伝達システムの技術を合わせた「世界システム」と命名したシステムの開発に取り組んだ。しかし、マルコーニが太平洋横断無線通信に成功し、無線通信の実用化を成し遂げてしまったことなどが影響し、研究のための資金が不足し完成することは出来なかった。

テスラコイルは電波によって世界中に情報とエネルギーを供給するために開発した高周波・高電圧発生装置である。高周波・高電圧を発生させると凄まじい稲妻が発生する事から映画『ターミネーター2』で『未来のロボットが現代に転送されてくるシーン』の放電でテスラコイルが使われたと言われている。

●感電

テスラコイルの高電圧部分に金属棒を握って近づけて放電を起こしても、高周波電流は表皮効果により導体の表面しか流れない。そのため人体の表皮にしか高周波電流は流れないことから感電しないようである。

参考文献によると感電の危険性は電圧、電流、周波数、通電経路によって異なる。

①**電圧**は皮膚が乾燥していなければ数十Vでも感電しないが、濡れている場合や口腔や生殖器など10V程度でも強い苦痛を感じる。(積層電池9Vを舌でなめると強いショックを受ける)商用電源(100-200V)の場合、短時間かつ小電流ならばショックのみで障害を負わない場合もある。

②**電流**は商用周波数で0.5mAが人体に感じる最小の電流と言われている。10mAを超える電流では筋肉の随意運動が出来なくなる。電流密度が上がるとジュール熱で火傷や組織の壊死が生じる。人体の器官で心臓は電流に敏感で、0.1mAを超える電流が心臓を通過すると心室細動、心停止を起こし死に至る場合がある。小児では成人の半分の電流で同等な障害が生じると言われている。

③**周波数**は1kHz以下が有害で、特に40~150Hz付近が最も危険である。つまり商用周波数は最も危険な周波数である。直流や50kHz以上の高周波は比較的影響が少ない。人体は、高周波になればなるほど感じにくくなり1kHzを越える電流には、周波数に比例してビリビリと感じ始める最小電流値が上昇する。電気メスで高周波電流を流しても電気ショックも感じず、心室細動も生じないのはこのためである。

④**電流経路**として電流の流入部分と出て行く部分の間の経路に心臓が存在すると危険性が高まる。たとえば手→胸、胸→背中に通電した場合が最も危険である。

1 テスラコイル1号機 失敗でノウハウを蓄積

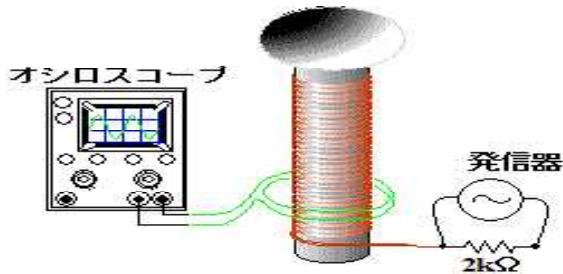
●1号機

半導体駆動回路を使用したSSTC (Solid State Tesla Coil) の自作はまずは2次コイルの製作から開始した。2次コイルの巻数に関して明確な指針は持ち合わせていなかったため、取りあえず身近にあった塩ビ管にポリウレタン線を巻き製作した。

(1) 2次コイルの共振周波数の測定

- ・巻線 0.4mmポリウレタン線
- ・巻枠 外形60mm 長さ400mm 塩ビ管
- ・巻数 950回 (巻幅380mm)

2次コイルは工具などは使わず手巻きで製作した。ポリウレタン線の長さは巻幅と線の直径から逆算して約179mとなる。LCRメータで特性を測定したインダクタンスは $L_s=7.1\text{mH}$ $Q=134$ (100kHz) となった。

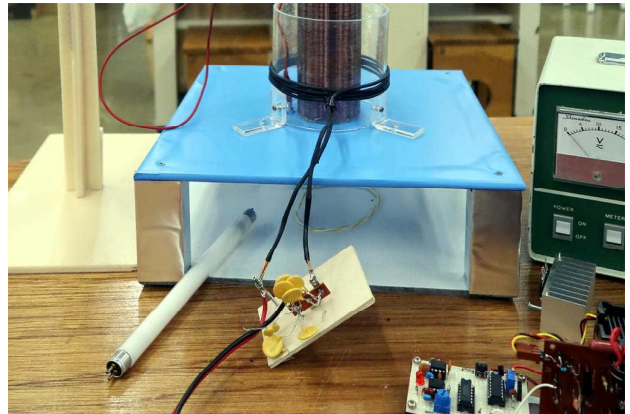


ダイソーで購入した20cmのボールを容量球とし、図の方法で共振周波数 f を測定したところ $f=444\text{kHz}$ であった。



(2) 1次コイルの製作と直列共振回路

- ・巻数 0.8mmポリウレタン線5本並列 4ターン
 - ・インダクタンス $L_s=3.4\mu\text{H}$ $Q=114$ (100kHz)
- の1次コイルをアクリルのパイプに巻いて試作した。



(3) 1次共振回路のコンデンサーの値

1次コイルに直列にコンデンサを接続し、2次コイルの共振周波数に一致する周波数で直列共振させる。そのコンデンサーの値は次式で計算した。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{より} \quad C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L}$$

なお、コイルのインダクタンスを測定するためにLCRメータは必要である。



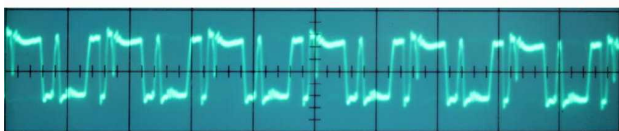
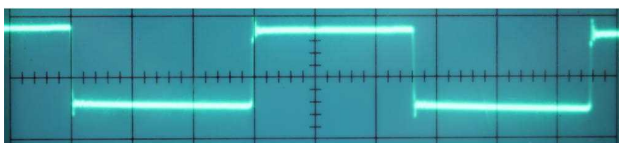
テスラコイルの動作確認の目的で、周波数を可変できる発信回路を自作した。電源からスイッチング回路に流れる電流値が最大になる発信周波数を探ると、516kHzであったため、この周波数が共振点だと思い込んだ。コンデンサCの値を28nFとしたが、実験の結果19nF (4700pF × 4) が最も放電が強かった。このコンデンサとの共振周波数は約600kHzである。2次コイルのグランドプレーンより引き出した線の先端に釘を挟み近づけると写真の様に放電した。少し電圧を上げるとFETがあっという間に壊れた。

理論的には2次コイルの共振周波数が444kHzであれば3.4μHの1次コイルには38nFのコンデンサを直列に接続したときに共振して放電するはずであるが、この値での実験は行っていなかった。この点を見逃していたので反省して

いる。また発信回路を金属ケースに収めなかったため、テスラコイルからの強烈な高周波信号の影響を受けていたので動作が安定せず、混乱したと思われる。

(4)失敗のまとめ

出来上がったテスラコイルは動作に不明な点が多く、もっと放電しないか試みる過程で、FETを何個か飛ばした。原因が分からず、FETのドライブ回路をICに変え試したが、動作が不安定であり何らかの問題点を含んでいると思った。そこで、1次コイルの波形をオシロスコープで観察したところ、写真上のようにまず発信回路を約180kHzで発振さ



時間軸 1 μs / DIV

せたが、この状態では放電しない。

多くの例では自励発振で動作させていたので、この状態で、インバータによる発振回路の入力端子にアンテナを付けてみたところグロー放電が観察できた。周波数を測定すると約600kHz(写真下)で発振していることがわかった。

注入同期現象が生じていると判断した。しかし、回路の発振周波数を周波数カウンターで測定しても安定しない。発振周波数が高すぎ、スイッチング回路の損失が多く、もっと低い周波数で発振する2次コイルを製作し、再度検討することにした。

テスラコイルは2次コイルでは1/4λの共振モードを基本としているが多くの共振モードが存在する。おそらく1/4λの共振モード以外で共振したと考えられる。SSTCにおいては1次コイルを2次コイルの1/4λの共振モードに対応する周波数で駆動することにより効率的で強力な放電が得られると解説されている。実測した共振周波数444kHzを無視して、約600kHzで自励発振させていたのだから動作が不安定であったと考えられる。

1/4λの共振モードの周波数が高いと、駆動回路の損失が多くなり設計が難しくなるので、もっと低い周波数の共振モードを持つように、巻線の長さを長くするように設計をし直すことにした。

2. テスラコイル2号機 ほぼ成功

2次コイルの共振周波数 f はコイルの巻線長が1/4λになる周波数 f になると考えられる。つまりテスラコイルは1/4λモノポールアンテナである。スイッチング回路を製作する上で出来るだけ低い周波数にしたい。

そこで1号機の反省から200kHz程度になるように巻線の長さを約375mになるように設計した。

(1) 2次コイルの製作

- ・巻線 0.26mmポリウレタン線
- ・巻棒 直径115mm 塩ビ管
- ・巻数 1057回 ポリウレタン線の長さ 382m
- ・インダクタンス $L_s=38.85\text{mH}$ $Q=74.8$ (100kHz)

2次コイルの高さを30cm程度とするため、0.26mmのポリウレタン線で巻幅27.5

cmと決めた。この結果巻数が1057回と逆算できる。2次コイルにダイソウで購入した15cmのボールを容量球として、共振周波数 f を測定した結果 $f=228\text{kHz}$ だった。

$1/4\lambda=382\text{m}$ とすると、

$$f=c/\lambda \text{ より}$$

$$f=196\text{kHz} \text{ となりほぼ予想通りの値となった。}$$

(2)1次コイルの製作

できるだけ Q が高くなるように手に入る最も太い線を選んだ。直径1.6mmのアース線で、厚紙の巻棒に巻いた。

- ・巻数 1.6mmアース線 7ターン
- ・インダクタンス $L_s=7.76\mu\text{H}$ $Q=134$ (100kHz)

(3)1次共振回路のコンデンサーの値

1次コイルと共振させるコンデンサーの値は、2次コイルの共振周波数と一致させる値にすれば良いことが1号機の失敗から確認することができた。228kHzに共振するために

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ より } C=\frac{1}{(2\pi f)^2L}$$

より、 $c=62.8\text{nF}$ とした。(10nF×6+1000p×3とした)

1次コイルだけの場合、228kHzにおける7.76μHのインダクタンスのインピーダンスは11Ωになる。電源電圧が12Vと仮定すると1A以上の電流は流れない。し



かし直列にコンデンサをつなぎ直列共振回路で共振させると、コイルとコンデンサの両端の電圧が逆位相になり打ち消され、電源から見た場合コイルの直流抵抗のみ見えてくるので電流は最大になる。

1次コイルの直流抵抗を仮に 0.08Ω (Q値より $11\div 134$)とすると、電流は $12V\div 0.08\Omega$ より、 $150A$ になる。コイルの両端の電圧のみを見ると、このときのコイルのインピーダンスは 11Ω であるから、 $1650V$ の電圧が発生することになる。従って1次コイルを2次コイルの共振周波数で直列共振させるようにコンデンサを選ばなければ放電は起きない。(共振時、コイルには加えた電圧のQ倍の電圧が発生する。)

(4) SSTCの回路

ロジックICで共振周波数を発振させてテスラコイルを駆動する方式なので安定して動作する。(安定して動作するようになった。)

インバータによる発振回路、555タイマーによるインタラプタ、フルブリッジ回路によるスイッチング回路からなる。

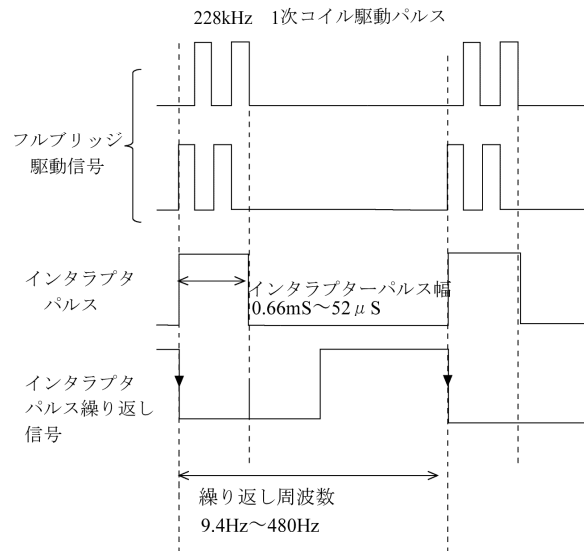
(5) 2号機の動作確認

動作確認にトランスのタップを切り替えて電圧を可変する自作電源を利用した。商用電源を直接整流して直流を得る例も多いが、絶縁されていないと感電の危険があるため、レギュレーションは悪いが、充電器に使っていたEI型トランスを2個使った。(20V5A×2)



接続コードは長すぎる。

電源はトランスによる全波整流で最大45V、タップ切り替えで電圧を変えた。インタラプタのパルス幅は $0.66mS\sim 52\mu S$ の範囲で可変できる。インタラプタのパルスの繰り返し周波数は $9.4Hz\sim 480Hz$ 。パルス幅と繰り返し周波数で duty比が変化し、電源から流入する電流が変わる。電流計で確認している。



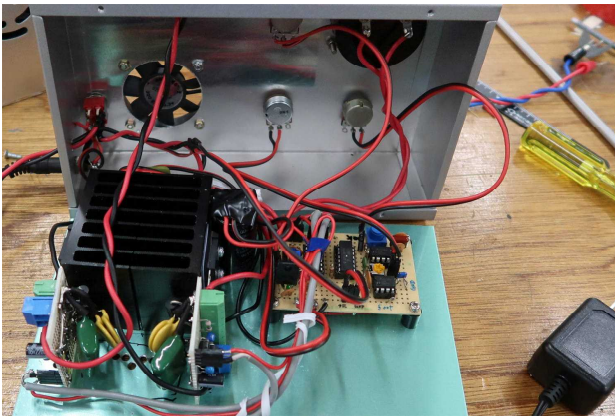
電源電圧を12Vに設定し、 $2.75mS$ に1回の割合で、 $0.66mS$ 間スイッチング回路に信号を供給する動作をインタラプタが行う動作で、針式電流計が $2.5A$ を示した。この時テスラコイルに蛍光灯を近づけると点灯し、電球を近づけるとプラズマボールになった。



この条件でのピーク電流 I_p は

$$I_p = 2.5 \times (2.75 / 0.66) = 10.4A$$
 となる。オームの法則から抵抗値 r を求めると

$$r = 12 / 10.4 = 1.15\Omega$$
 となる。この抵抗は1次コイルの抵抗とテスラコイルまでの接続コードの合計値で、殆どが接続コードの抵抗値と推測される。(テスラコイルを動作させると接続コードが温かくなる。)

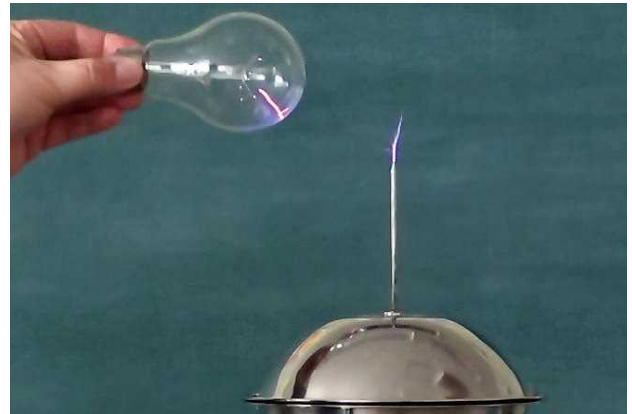


全ての回路はアルミケースに収めテスラコイルからの高周波信号の影響を回避した。回路に流れる電流のモニターとしてデジタル電流・電圧計を使ったが、パルス状に電流が流れるため、電流を正しく表示できない。針式の電流計は針が振れるが、電流を測定する事ができた。保護回路として100V2A (4Aでトリップ)のポリスイッチ2個を並列にしてFETの保護回路とした。

参考文献

- ・新戸雅章(2015)『知られざる天才コラ・テスラ』(平凡社新書765) 平凡社
- ・稲葉保(2004)『パワーMOS FET活用の基礎と実際』CQ出版
- ・ウキペディア 感電 <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%84%9F%E9%9B%BB>
- ・人体の電撃反応 <http://www.eonet.ne.jp/~hidarite/me2/anzenkanri01.html>

電流計で電流値をモニターしながらインタラプタを操作し、テスラコイルを動作させるようになったので、過大電流でスイッチング回路を壊すことは無くなった。放電の様子を見ると、放電の長さは約3cm程



度であった。しかし金属棒を近づけると5cm程度の放電が見られる。10kVで1cmの放電が生じるとすれば、テスラコイルにより約30kVの高周波電圧が発生したと推定できる。

実践編

テスラコイルの製作において、2次コイルの製作が中心となる。2次コイルを4本製作したがその諸元をまとめて表にした。2次コイルの共振周波数はおおよそ巻線の長さが1/4波長になる電磁波の周波数となる事がわかる。

	1号	2号	3号	4号		
コイル巻棒直径	mm	60	115	110	60	
巻幅	mm	380	275	320	330	
巻線直径	mm	0.4	0.26	0.1	0.1	
巻数	ターン	950	1057	3200	3300	
巻線長	m	188	382	1156	622	
1/4波長の周波数	Hz	399k	196k	65k	121k	※1
インダクタンス	H	7.06m	38.9m	342m	174m	
直流抵抗	Ω	24.1	112	2.5k	1.52k	
Q (100kHz)		134	75	8.1(10k)	15(10k)	
実測共振周波数	Hz	444k	228k	72k	124k	※2
1次コイル巻数	ターン	4	7	15	9	
電源電圧	V	48	48	72	80	
その他		試作機	放電3cm	放電20cm 感電する	放電25cm 感電しない	

※1 巻線長が1/4λとなる電磁波の周波数 $f = 3 \times 10^8 \div (\text{巻線の長さ} \times 4)$ で計算

※2 2次コイルに容量球をつけて測定した直列共振時の共振周波数

1 テスラコイルの形状

(1)2次コイルの形状



1号機

2号機

3号機

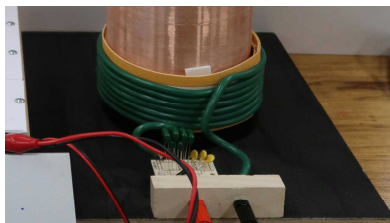
4号機

4号機 放電

SSTC (Solid State Tesla Coil) を動作させる場合、スイッチング回路の損失を考えると共振周波数は低い方が良いのだが、3号機の65kHzでは感電の閾値が下がり金属棒をしっかり握って放電に触っても、かなりビリビリ感じる。実験の結果4号機の124kHzの周波数ならばあまり感じないことが判った。感電の閾値

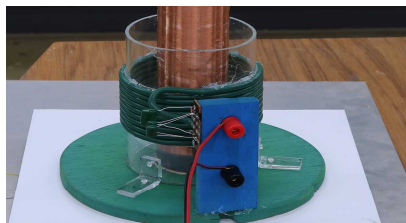
とスイッチング回路の損失のバランスを考えると、共振周波数が100kHz程度の2次コイルにするのが良いと判断した。この周波数に共振周波数を持つて行くには巻線の長さが600m程度になるようにすると目的の周波数になることが確認できた。

(2)1次コイルの形状



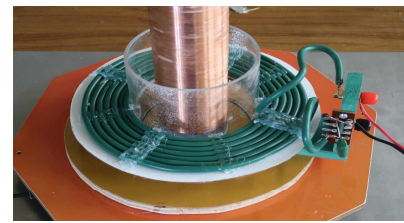
2号機 1次コイル

1.6mmアース線 7ターン
インダクタンス 7.76 μ H
Q 134



4号機 1次コイル

1.6mmアース線 9ターン
インダクタンス 10.28 μ H
Q 270



4号機 1次コイル 平面コイル

1.6mmアース線 7ターン
インダクタンス 10.45 μ H
Q 169

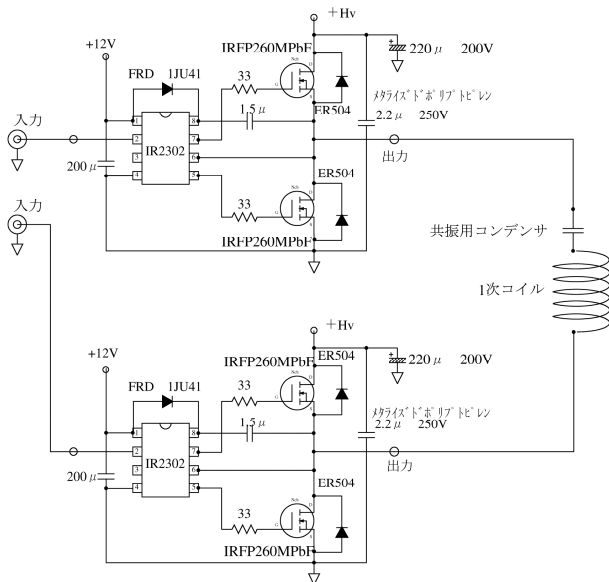
1次コイルの形状や巻数など変えて検討した。2号機の1次コイルは厚紙にアース線を巻きつけ、2次コイルとの間には殆ど間隔をとらなかったが、スイッチング回路(フルブリッジ)への電圧が45V程度までの動作では問題なく動作した。しかし、それ以上電圧を上げると1次コイルと2次コイルの間で放電が起きた。その反省から4号機の2次コイルの直径が60mmに対して、直径120mmのアクリルの円柱に1次コイルを巻いた。そ

の結果80Vの電圧までは放電は起きなかった。4号機では平面コイルも試した。インダクタンスはほぼ同じであるが、Qは小さい。80Vの電圧では全く問題はなかった、また放電の強さも殆ど同じであった。ただし、直列に接続するコンデンサーの発熱が多く、0.1 μ のコンデンサー1本では破裂してしまった。0.22 μ Fを2本直列に接続して対応した。

(3) スイッチング回路・インタラプタ回路

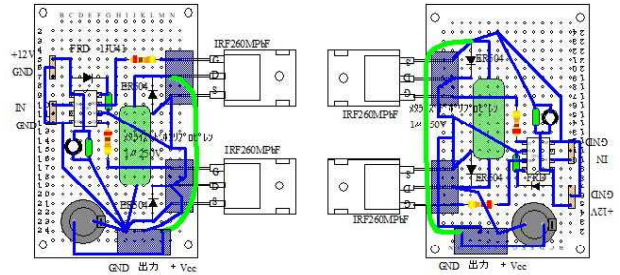
①フルブリッジスイッチング回路

商用電源を直接整流した非絶縁電源を使ったテスラコイルが多いが、感電が心配であったので、直流電源装置を電源にする事に決めた。また出来るだけ低い電源電圧で放電が生じるようにフルブリッジによるスイッチング回路を採用した。

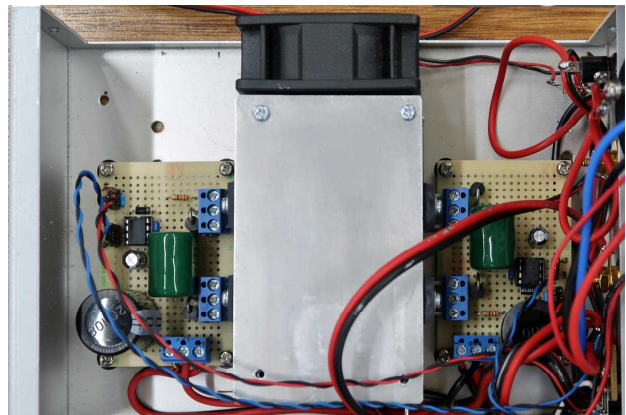


回路を設計し実装する上で注意することは、 $2.2\mu\text{F}$ のコンデンサーは出来るだけFETの近くに配置する。メタライズドポリプロピレンコンデンサーを利用する

こと。 $220\mu\text{F}$ 電解コンデンサーも出来るだけFETの近くに配置する用に心掛ける。

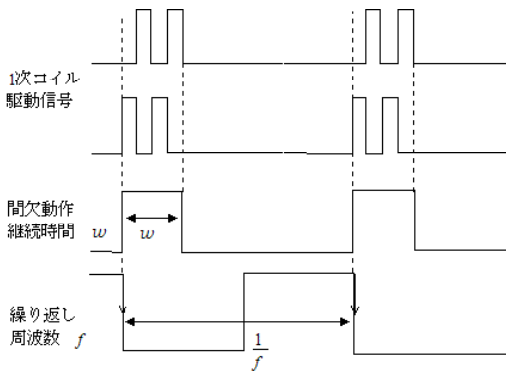


上の実態図は、ブリッジ回路を左右対称にレイアウトした。FETは放熱板に取り付けるが左右の放熱板の間にファンで強制的に空気の流れを作り放熱した。



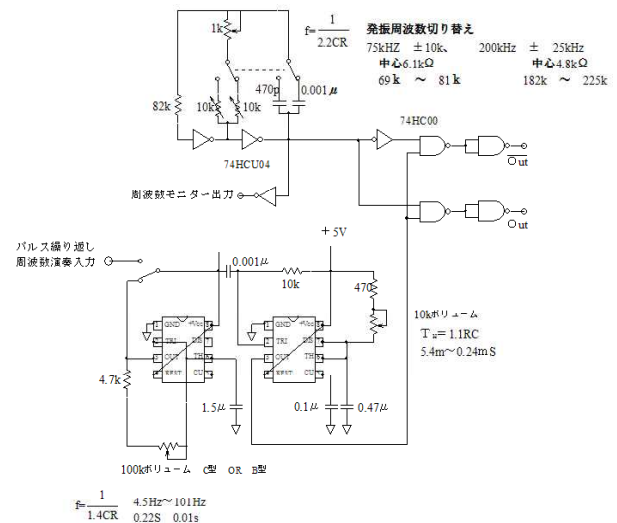
②インタラプタ

1次コイルを連続してスイッチングすると莫大な電力が注入されることになり電源が破壊されてしまう。瞬間的には大電流が流れても平均値を小さくするために間欠的にスイッチングする必要がある。この制御を行うのがインタラプタである。1回の間欠動作の動作継続時間 w と1秒間に何回間欠動作させるかの繰り返し周波数 f をインタラプタが制御する。電流計を見ながら

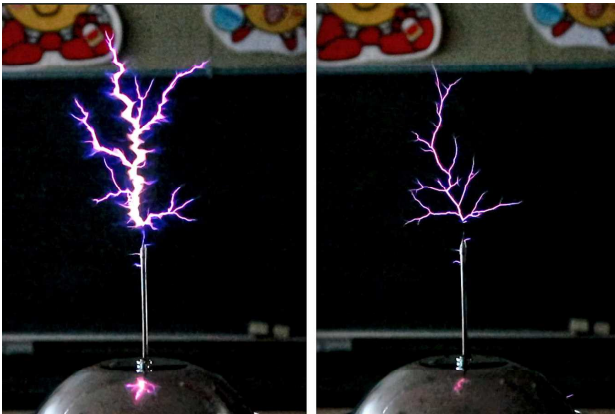


w と f を調整し平均電流が5A以内に収まるように操作する。

w は $0.24\mu\text{ms} \sim 5.4\text{ms}$ の範囲で、 f は $4.5 \sim 100\text{Hz}$ の範囲で変化できるように設計した。なお、 $w=5\text{ms}$ 、 $f=100\text{Hz}$ では連続してスイッチングすることになり電源が壊れてしまう事になる。



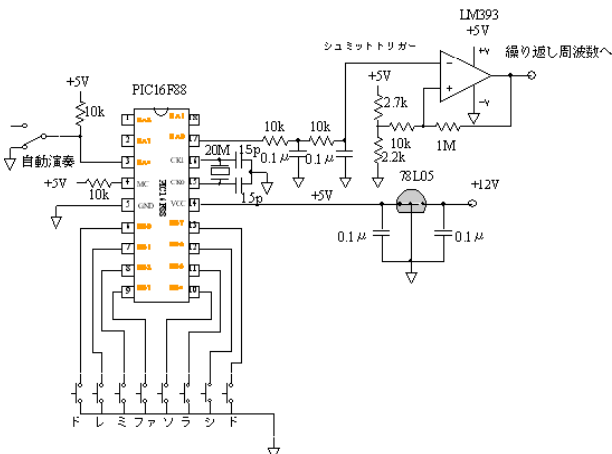
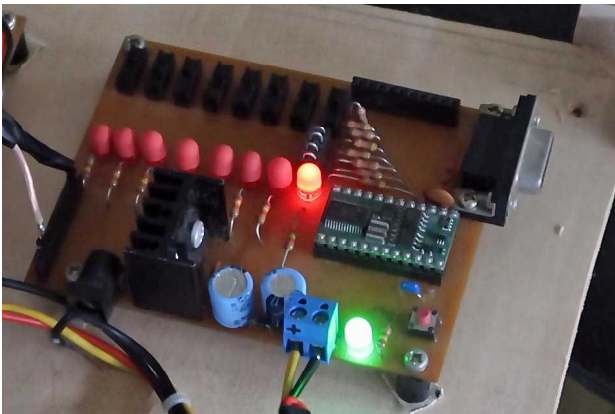
繰り返し周波数を5Hz程度に設定し、 w を徐々に長くしていくと、放電が太くなっていく。同時に放電の長さが増加するが、電源の電圧降下があり最高点を過ぎると放電の長さは短くなる。



(3) 繰り返し周波数による音程の発生

放電により空気が急激に加熱されるため大きな破裂音が生じる。繰り返し周波数を変えることで破裂音で音程を変えることが可能で、繰り返し周波数を変化させて音楽を奏でることも可能である。

試験的にBASICStamp (PICを使ったBASICインタープリター)で繰り返し周波数を制御して「しずかな湖畔」を演奏させたところ、十分音楽として認識できたのでPICを使って演奏用の回路を製作し組み込んだ。



PicBasicProによる周波数制御による演奏プログラム

```

*****
* Notes : 静かな湖畔 テスラコイル 演奏 *
*****
DEFINE OSC 20
Define _16F88' Only use for PM, MPASM will define this by itself

ADCON0 = 0 'A/D control register 全ピンをデジタルモードに
ANSEL = 0 'analog select register
CMCON = 7

TRISB = %11111111
OPTION_REG = %00000000
m var byte[72]
i VAR BYTE
x var byte
y var byte
d var byte
p var byte
' ド レ ミ ファ ソ シ
m( 1)=12:m( 2)=11:m( 3)=12:m( 4)=21:m( 5)=32:m( 6)=31:m( 7)=32:m( 8)=31
' レ ド レ ミ ソ
m( 9)=22:m(10)=11:m(11)=22:m(12)=31:m(13)=12:m(14)=11:m(15)=33:m(16)=01
' ミ ミ ミ ソ ソ
m(17)=32:m(18)=31:m(19)=32:m(20)=41:m(21)=52:m(22)=51:m(23)=52:m(24)=51
' ソ ソ ソ
m(25)=42:m(26)=31:m(27)=42:m(28)=51:m(29)=34:m(30)=01:m(31)=01
' ソ ソ
m(32)=52:m(33)=32:m(34)=03:m(35)=52:m(36)=32:m(37)=03
' ソ ソ
m(38)=51:m(39)=31:m(40)=01:m(41)=51:m(42)=31:m(43)=01
m(44)=51:m(45)=31:m(46)=09

loop_top:
if porta.4=0 then gosub ensou
while PORTB.0=0
freqout PORTA.0,100,43 '33
wend
while PORTB.1=0
freqout PORTA.0,100,48 '37
wend
while PORTB.2=0
freqout PORTA.0,100,53 '41
wend
while PORTB.3=0
freqout PORTA.0,100,57 '44
wend
while PORTB.4=0
freqout PORTA.0,100,64 '49
wend
while PORTB.5=0
freqout PORTA.0,100,72 '55
wend
while PORTB.6=0
freqout PORTA.0,100,81 '62
wend
while PORTB.7=0
freqout PORTA.0,100,85 '65
wend
goto loop_top

ensou: 'すづかな湖畔 演奏ルーチン

for i=1 to 46
d=m(i)/10
p=m(i)//10 :gosub oto
pause 50
next i
return

oto:
select case d
case 0 pause 100*p
case 1 freqout PORTA.0,150*p,43 'ド
case 2 freqout PORTA.0,150*p,48 'レ
case 3 freqout PORTA.0,150*p,53 'ミ
case 4 freqout PORTA.0,150*p,57 'ファ
case 5 freqout PORTA.0,150*p,64 'ソ
case 6 freqout PORTA.0,150*p,72 'ラ
case 7 freqout PORTA.0,150*p,81 'シ
case 8 freqout PORTA.0,150*p,85 'ド
case 9 freqout PORTA.0,150*p,86 'レ
case 10 freqout PORTA.0,150*p,96 'ミ
case 11 freqout PORTA.0,150*p,106 'ファ
case 12 freqout PORTA.0,150*p,114 'ソ
case else
pause 100*p
end select
return

```