

Journal of Plasma and Fusion Research

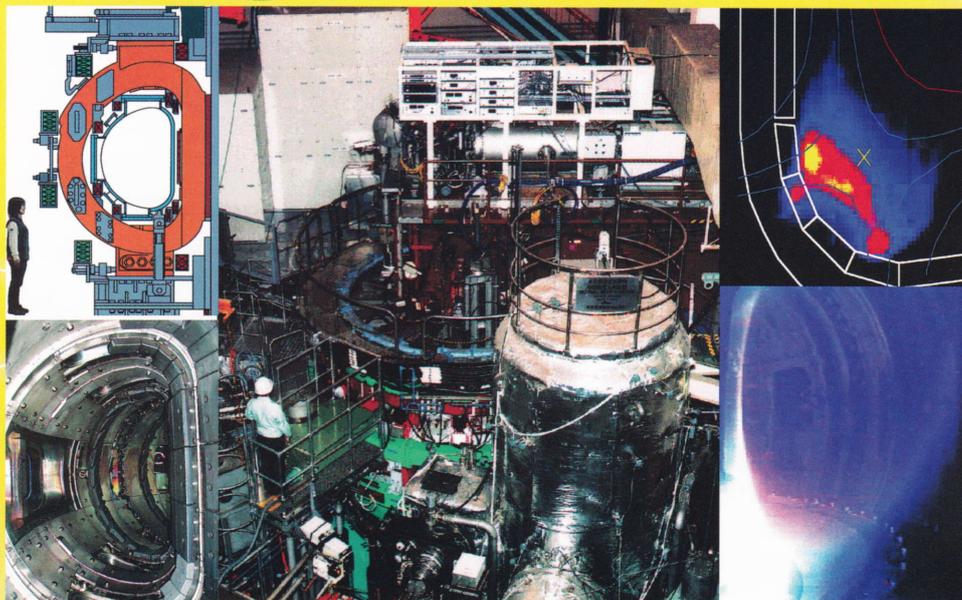
プラズマ・核融合学会誌

VOL.80 NO.8

August 2004

解説：JFT-2Mトカマクの21年間の実験を振り返って
講座：身近なプラズマ ～雷～

PSS-2005 / SPP-22 開催案内



JSPF 社団法人 プラズマ・核融合学会

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

<http://www.jspf.or.jp/>



3. 雷番外編 ～理科教育の駆け込み寺～

高木 浩一, 猪原 哲¹⁾, 高橋 徹²⁾, 杉山 敏樹³⁾

(岩手大学工学部, ¹⁾佐賀大学理工学部, ²⁾大分工業高等専門学校電気電子工学科, ³⁾株スリージーシーエム)

A Recipe of Science Education; Scientific Demonstrations of Lightning

TAKAKI Koichi, IHARA Satoshi¹⁾, TAKAHASHI Tohru²⁾ and SUGIYAMA Toshiki³⁾

Department of Electrical and Electronics Engineering, Iwate University, Iwate 020-8551, Japan

¹⁾ *Department of Electrical and Electronics Engineering, Saga University, Saga 840-8502, Japan*

²⁾ *Department of Electrical and Electronics Engineering, Oita National College of Technology, Oita 870-0152, Japan*

³⁾ *3GCM INC. 517-2-3F, Oigawa, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0212, Japan*

(Received 19 May 2004)

Four scientific demonstrative presentations concerning a lightning are presented in this article. All presentations can be easily performed on the scientific events held in educational and/or research institutions, such as university, college, research center, elementary, secondary and high schools. The first topic is long gap discharge which shows the model of the lightning from lightning clouds to ground. The high voltage is generated using an impulse voltage generator, which consists five capacitors, gap switches, and dc high-voltage power supply. Human shaped wet sponges were employed in the presentation as a human-body. The second topic is turning-on a fluorescent lamp without direct power supply using Tesla coil as electromagnetic wave radiation source. We show not only some commercial products of Tesla coil but also show how to construct the Tesla coil with much higher output voltage than the merchandise. The third demonstration is a ball lightning using a microwave. Finally, we show a handicraft of small lightning generation on the name card using a piezoelectric crystal in an electric throwaway lighter.

Keywords:

lightning, scientific demonstration, impulse generator, tesla coil, ball lightning

3.1 はじめに

伝統的な工業社会から知識社会への変貌を迎え、生涯学習の場の提供が国の義務になりつつある[1, 2]. こうした流れをうけて、また理科離れを防ごうといった目的から、理科教育に関する小中高生や一般の方々を対象にしたイベントが増えている。プラズマ現象の中でも、雷やオーロラなどの自然現象は比較的人々の注意をひきやすい。このため小中高校や大学・高専などの教育機関や科学館、研究施設などで行われるイベントで、雷やオーロラに関するテーマが出される機会も多い[3, 4]. ここでは雷に関する理科実験として3件、また理科工作として1件ほど紹介する。タイトルに“理科教育の駆け込み寺”と銘打ったように、必要となるパーツなどイベントで用いた具体例も紹介し、読むだけでイベントに使用できる、マニュアル的なものを目指している。

3.2 雷の模擬実験

ここではマルクス方式高電圧発生装置を作成し、それを用いた落雷のモデル実験(デモ)を紹介する。マルクス方

author's e-mail: takaki@iwate-u.ac.jp, iharas@cc.saga-u.ac.jp, tohru@oita-ct.ac.jp, qyj10616@nifty.com

学会 Web にて、本講座で紹介した内容のカラー写真及び動画を公開します。あわせてごらんください。(http://www.jspf.or.jp/journal/kaminari/)

式高電圧発生装置は通称インパルス電源といわれ、並列に複数個並べたコンデンサを、ギャップスイッチなどのクローキングスイッチを用いて直列に並べなおして高電圧を得る[5]. 以下、電源の作り方と、その電源を用いた実験例を紹介する。

3.2.1 マルクス方式高電圧発生装置の作り方

比較的安価で簡単に作れるコンパクトな高電圧発生装置の製作例について述べる。本装置の回路図はFig. 1である。この回路図ではコンデンサを3個使用しているが、個数を増やすことによって出力電圧を増やすことができる。本例(佐賀大学での試作機)では合計6個使用した。

製作にあたって、主に以下のようなものが必要である。

(1)コンデンサ (0.2 μ F, 定格 40 kV)

(2)抵抗器 (5 W, 定格 30 kV)

(3)ギャップスイッチ

(4)トリガパルス発生器

(5)充電電源

(6)架台

コンデンサは、Fig. 2のように立てた状態で一列に並べ

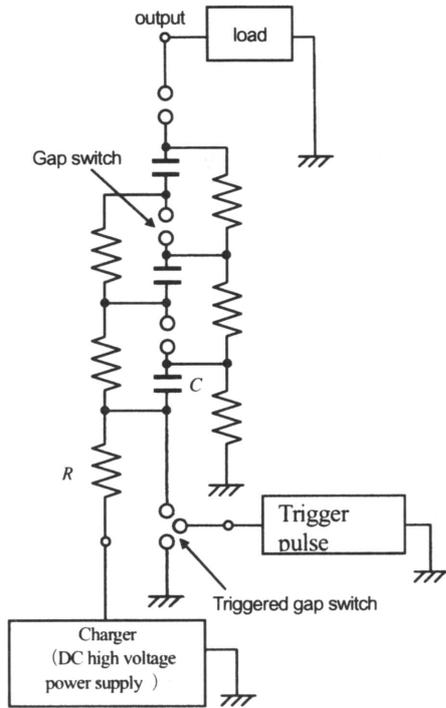


Fig. 1 Equivalent circuit of Marx generator.

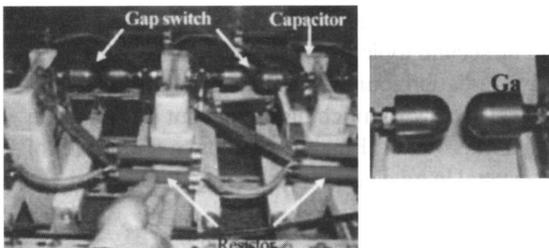


Fig. 2 Photograph of setup of capacitors, gap switches and resistors.

られており、ギャップスイッチと抵抗器を取り付けた。抵抗器はコンデンサの充電抵抗の役目をしている。充電電圧に耐えるものであればよい。ここでは抵抗値 1 MΩ を使用したが、充電電源の容量やコンデンサと負荷で決まる回路時定数に応じて抵抗値をもっと小さくしても構わない。

ギャップスイッチの材質は真鍮で、丸棒の片方を球面に丸めたものを対向させている。始動用ギャップスイッチは装置の動作をスタートさせるためのものである。これは、ギャップスイッチ間にトリガ電極（被膜銅線の先端の被膜をはがしたもの）を設置しただけのものである (Fig. 3)。トリガ電極にトリガパルスを印加すれば、接地側とトリガ電極間で予備放電が起き、それが引き金となってギャップスイッチが火花放電によって閉じる。一般的には、ギャップスイッチの電極は、その曲率半径を電極間隔に比して大きくする、すなわちできるだけ平等電界に近くしておくことと自爆が少なく始動性能がよい。

トリガパルス発生器は数十 kV 程度の正極性のパルス電圧を出力するものである。これは後節のテスラコイルによる高電圧発生回路と基本構造は同じである。ただし、外部信号入力で始動できるように、一次側はサイリスタによる

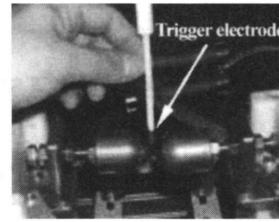


Fig. 3 Photograph of triggered spark gap switch.

スイッチングを用いている。昇圧トランスとしては、自動車用のスパークプラグ用のイグニッションコイルが流用できる。

充電電源は、ネオトランス（定格電圧 15 kV）とダイオードを使った半波整流回路を使用した。出力端に正極性の高電圧を出すために、充電電圧は負極性の高電圧にした。スライドトランスでネオトランスの一次側電圧を調整することによって充電電圧を調整する。充電に少々時間がかかるが、繰り返し性能を求めなければこれで十分使用できる。

Fig. 4 が組み上げた全体像である。架台は街のホームセンターなどで売っている金属製のアングルで組み、脚にはキャスターをつけて手軽に移動できるようにした。架台の寸法は、幅 30 cm、高さ 65 cm、長さ 140 cm となっている。

装置を組み上げたら、それぞれのギャップスイッチの電極間隔の調整をする。間隔が狭すぎれば充電中に自爆し、広すぎれば始動しない。最適な間隔を予想するのは難しいので、実際にコンデンサを充電して、間隔を変えながら確実に始動するように間隔を調整する。まず、始動用ギャップスイッチをある程度の間隔に設定しておき、他のギャップスイッチについては十分に間隔を広げるか、あるいは絶縁物を挟んで火花放電しないようにする。ここでは充電電圧を 10 kV とし、トリガギャップスイッチの電極間隔を 1 cm 弱に設定した。トリガギャップスイッチがトリガパルス発生器によって確実に閉じるように間隔を調整できたら、随時出力端の方へギャップスイッチの間隔の調整をしていく。すべてのギャップスイッチが同時に閉じるようになったら完成である。いきなり全部のギャップスイッチを飛ばしても、始動するかもしれないが、安全のために接地側から順番に確認したほうがよい。

Fig. 5 は完成した高電圧発生装置の動作結果で、出力端

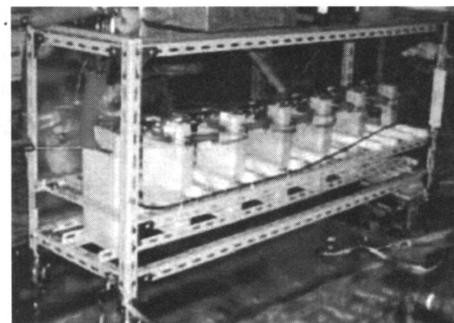


Fig. 4 Photograph of Marx generator.

を無負荷にした場合の電圧波形である。電圧測定には高電圧プローブ(入力抵抗 500 MΩ)を用いた。キャパシタ 1 個あたりの充電電圧は 10 kV として、約 50 kV の電圧を発生させることができた。理想的には 10 kV × 6 段 = 60 kV の出力電圧になるはずであるが、ギャップスイッチなどによる損失によって電圧は若干低くなる。電圧の立ち上がり時での高周波信号はギャップスイッチによるノイズである。Fig. 6 は、約 12 Ω の水抵抗を負荷とした場合の電圧電流波形である。

高電圧発生装置の製作にかかる費用をおよそ見積もってみた。それを Table 1 に示している。トリガパルス発生器と充電電源は、回路部品の価格の合計である。総額 85 万円となっているが、ほとんどがコンデンサの費用である。高電圧用コンデンサさえうまく入手できれば安く製作することができる。ここではギャップスイッチを業者発注したが、工作機械ができれば十分自作可能である。また、トリガパルス発生器や充電電源も流用品や有り合わせの部品で製作できるので、もっと安く済ませることは可能である。

3.2.2 スポンジ人形を使った落雷模擬

100 円ショップなどで売られている台所用のスポンジで人形を作り、水を含ませると、導体の代わりとして実験に使える。これを電極間において長ギャップ放電を起こすことで、より一層、デモを楽しくできる。ここではオープンキャンパスでのデモを例に説明する。デモは以下の 4 項目である。

- (1) かみなりが来ているときに外にいると...
- (2) おとなといっしょにいれば安全？
- (3) 高い木のそばでは...
- (4) 自動車の中は安全？

項目 1 のデモ実験の様子を Fig. 7 に示す。この実験では、前述の佐賀大学の装置構成と少し異なり、コンデンサ 5 段

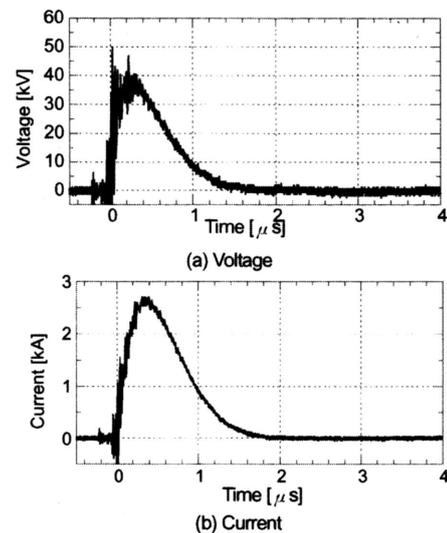


Fig. 6 Waveforms of voltage and current in case of water resistor load with resistance of 12 Ω.

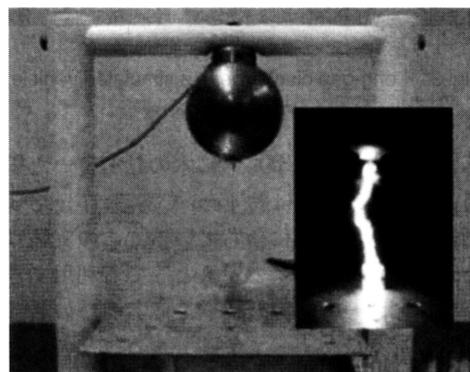


Fig. 7 Long-gap discharge to a human-shaped sponge doll.

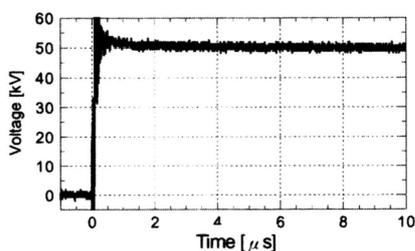


Fig. 5 Waveform of output voltage in case of open circuit load.

Table 1 List of parts and their prices.

Name of parts	Price (¥)
Capacitors	600,000
Resistor	35,000
Gap switch (made to order)	150,000
Trigger pulse generator	20,000
Charger	30,000
Frameworks	15,000
Total price	¥850,000

で構成したものを用いている。各コンデンサの充電電圧は 10 kV なので、上部電極への印加電圧は約 50 kV である。あまり高い電圧を加えなかったのは、イベントの性質上、小さなお子さんも来られるため、放電の音を抑え、びっくりさせないようにとの配慮である。球状の上部電極への電圧の極性は正で、放電が飛びやすいように小さな突起物を取り付けている。下部電極にはアルミ板(導電性の良い金属板なら何でも使用可能)を用いており、接地してアース電位になるようにした。電極間は 10 cm 程度で行っている。子ども型スポンジ人形の高さは約 2 cm で、スポンジには水道水を含ませている。放電は人形に当たっており、ここで「だからかみなりが来ているときには、外で遊ばないように。」といった説明を加える。

Fig. 8 に、項目 2 および項目 3 のデモ実験の様子を示す。おとな型の人形は高さ 3 cm と子ども型より 1 cm ほど高くしており、電極の真下に子ども型人形と並べて立てる。放電は高いほうに飛ぶ性質があるので、この場合、おとな型の人形に落ちる。そこで「おとなといっしょにいると君達は助かるかもしれない。」といった説明をする。さらに、「でも、おとなが雷に打たれたら大変なので、もっといい方法を考えてみよう。」と次の 2 項目の実験の前振りを行う。

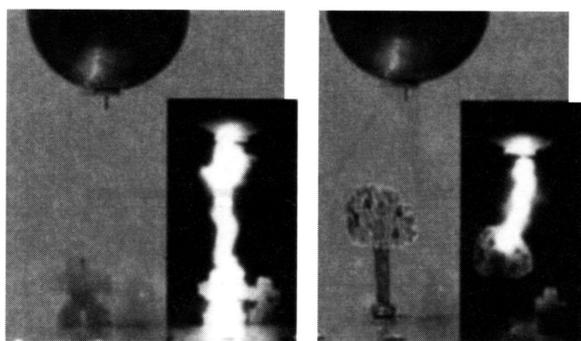


Fig. 8 Long-gap discharge to a higher sponge doll (left photograph) and a simulated tree (right photograph).

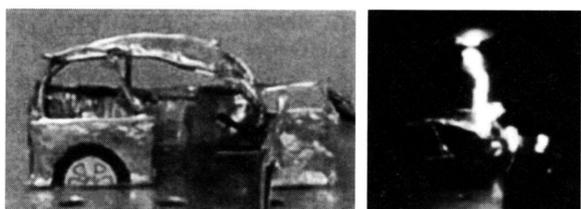


Fig. 9 Long-gap discharge to a simulated vehicle.

木への落雷のデモでは、ボルトに木の絵を書いた紙を貼り付けて用いている。高さは約4cmである。Fig.8より、放電は人形には落ちず、木に落ちている。この実験は、2章で述べた『保護角』などの話の導入としても利用できる。しかしこの実験に関して、『側撃』（2章参照）の話は、すなわち高い木の近くはかえって危険であることの説明は必ず加えておく必要がある。木の材料として、実際に湿った木質の材料を使用すると、側撃の実験も可能になる。

Fig.9に項目4のデモ実験の様子を示す。雷に対してもっとも安全な場所は、2章に詳しく述べられているように、鉄筋コンクリートの建物の中や自動車の中など、いわゆる『ファラデー・シールド』の中である。自動車は銅線を曲げてフレームを作り、放電が中に進入しないようにアルミテープ（台所のシンク用に販売されているもの）を貼り付け、車体を作成している。スポンジ人形を中に入れている。放電は車に落ちるものの、人形には放電は起こらない。このデモのあとでファラデー・シールドの安全性を説明すれば一連のデモがうまくまとまる。

3.3 テスラコイルの作成と蛍光灯点灯

テスラコイルは共振を利用した高電圧発生回路で、手軽に、安価な素子で構成可能なため、理科実験の教材や研究用に用いられてきた。ここでは、100 kV以上の電圧を発生する電源の作成法や、また取り扱ひの簡単な10 kV程度の電圧を発生する電源を用いた蛍光灯の点灯デモ実験について紹介する。

3.3.1 テスラコイルの作り方

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、高電圧放電現象の実験をするのに適した教材であ

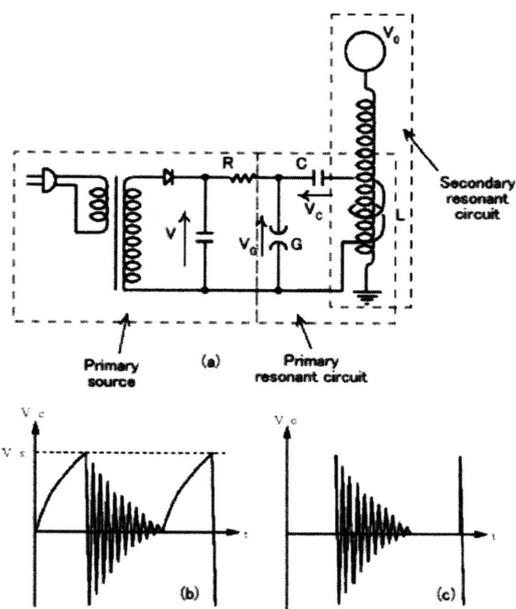


Fig. 10 Electrical circuit of Tesla coil.

る。ここではテスラコイルの製作法について述べる。なお作成上のノウハウなどは文献[6]に詳しい。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。

【基本構成と動作原理】

Fig.10に基本構成を示す。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 は上昇していく。このとき放電ギャップGにも同じ電圧が印加される。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。

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電圧は二次コイル内に共振を起こし、コイル両端に高電圧が発生する。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。

【製作の手順】

○ 二次コイル

二次コイルは絶縁性の筒に被覆線（エナメル線、ビニール被覆線等）を巻いて作成する。コイル（ボビン）の形状は一般に円筒形が用いられる。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。放電端子をそのまま尖った状態にしておくと、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。大きな電圧を発生させるためには、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して、空中絶縁破壊耐電圧を大きくする。筆者は、二次コイルは直径 80 mm、高さ 1,000 mm であり、導線は $\phi 0.55$ 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。

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_c とすると、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。

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

ここで、 R_2 、 L_2 、 C_2 はそれぞれ二次コイルの等価抵抗、インダクタンス、キャパシタンスを示す。上式に今回製作した装置の値 $L_2 = 17.18$ mH、 $C_2 = 14$ pF、 $R_2 = 31.2 \Omega$ を代入すると、 $Q = 1.123$ が求まる。

また、共振時に C_2 の両端に現れる電圧 V_0 は

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

で与えられる。一次コイルからの誘導による電圧 E_c が低くてもこれが Q 倍されるので高電圧を得ることができる。先の例では、仮に $E_c = 1$ kV で計算上は約 1.1 MV の電圧が得られることになる。実際は表皮効果による R_2 の増加や接地抵抗があり、 Q 値は低く抑えられ、出力電圧も低下する [7]。

○ 一次回路

[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。ここで f_{r1} は次式で与えられる。

$$f_{r1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

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

$$E_C = CV_C^2 / 2 \quad (4)$$

が大きくなるように工夫する。

[コイルの製作] 式(3)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 $\phi 155$ 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

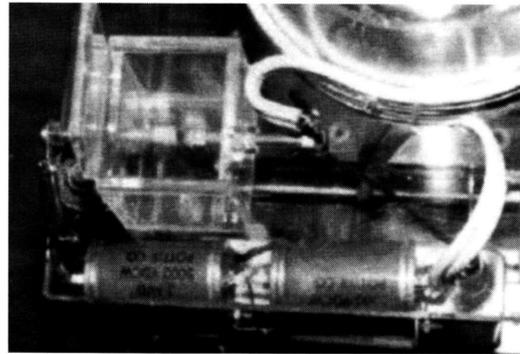


Fig. 11 Gap switch in Tesla coil.

場合は、 C の値を変更し、再度 L を算出する。

[放電ギャップの製作] Fig. 11 にギャップスイッチの様子を示す。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。

[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、AC 100 V をインバータ式ネオントランスで 18 kHz、10 kV に昇圧する。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が動作が不安定になる。 C の充電時間 T_r は C と R の積 (時定数) と同等とみなせ、今回製作したものは、

$$T_r = CR = 0.175 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^3 = 3.5 \text{ ms}$$

である。

○ 試作機の仕様

Fig. 12 に試作機の外観を示す。また以下に仕様をまとめる。二次側の出力電圧は、Fig. 13 に示すような放電の開始電圧から推定でき、本装置では 550 kV となる。

A. 電源回路

変圧器 (インバータ式ネオントランス)

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, 0.7 A

抵抗 R : 2 k Ω (変圧器の巻線抵抗分)

B. 一次共振回路

一次コイル L (空芯コイル)

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 $\phi 155$ mm

巻方: 2 本並列に 2 回巻

インダクタンス: 1.4 μ H

コンデンサ C (オイルコンデンサ): 0.17 μ F

放電ギャップ

電極材料: 真鍮製 M6 フクロナット

ギャップ長: 1.3 mm

C. 二次コイル

ボビン: アクリル製, 外径 $\phi 80$ mm, 高さ 1,000 mm

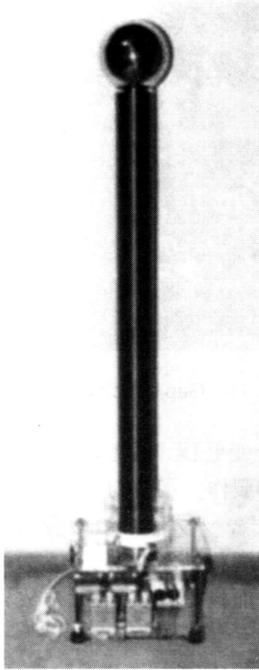


Fig. 12 Tesla coil.

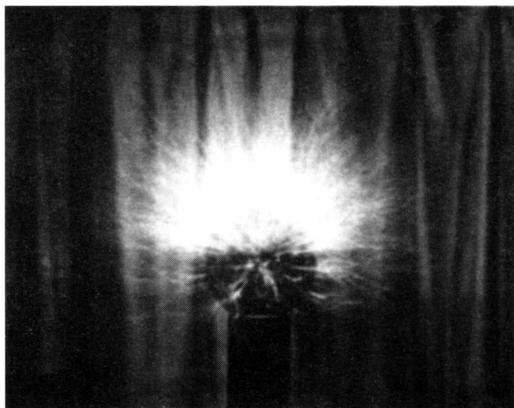


Fig. 13 Photograph of discharge from top of the Tesla coil high voltage generator.

巻線：φ0.55 mm エナメル銅線
 巻数：約 1,780 回
 巻線抵抗：31.2 Ω at 25 °C

D. 放電球：ステンレス製，φ150 mm

E. 出力特性

共振周波数：326.3 kHz

Q の実測値：171

電圧：550 kV

装置の製作にかかる費用をおよそ見積もったものを Table 2 に示す。

3.3.2 蛍光灯を点灯させよう！

テスラコイルを動作させると電磁波がでる。このため、近くに蛍光灯を置くと点灯する。この様子を Fig. 14 に示す。前述の試作機は数百kVの高電圧を発生するため、観客と距離をおいて使用しなければならない。多くの子どもの前にしたデモでは教材用に市販されているテスラコイル

Table 2 Prices of parts for Tesla coil high-voltage generator.

Name of parts	Price (¥)
Capacitors	20,000
Resistor	2,000
Electric wires, cables	4,000
Rectifier (diode bridge)	14,000
Charger	9,000
Frameworks	23,000
Total price	¥72,000

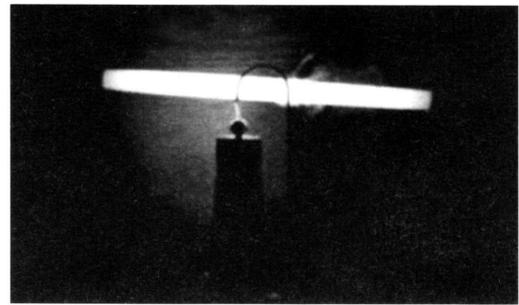


Fig. 14 Light emission from a non-connected fluorescent lamp excited with electromagnetic wave generated by Tesla coil.

(約 5 万 4 千円，株ESS) を用いると便利である。図中，発光しているのが手に持った 15 W 定格の蛍光灯管で，その前に写っている塔のような影がテスラコイルである。横に写っている曲がった棒状のものは，アース電位の金属棒である。その先端とテスラコイルの天辺にある高電圧部の金属小球との間で放電させており，この放電やテスラコイル自体が発する電磁波により蛍光灯が点灯する。単純なデモではあるが，その割には受けがいい。間にアルミ板を入れると電磁波が遮断されるために消える。入れたりはずしたりして，その変化を見せると喜ばれる。

3.3.3 なぜつく蛍光灯？

テスラコイルに蛍光灯を近づけると点灯する理由を考えよう。

蛍光灯のガラス管内には電極の間にアルゴンガスと微量の水銀蒸気が入っている。アルゴンガスは放電をしやすくする効果もある。蛍光管の内壁には蛍光物質が塗布されている。

まずおさらいを兼ねて通常の使用方法で蛍光灯がつく理由を考える。電極に電流が流れて加熱されると熱電子が放出される。放出された電子は両電極間に印加される電圧によって加速され管内を移動するが，この際水銀と衝突して水銀が励起される。励起された水銀は紫外線を発生するので，蛍光管内壁の蛍光物質に紫外線が照射されることになる。このとき紫外線を照射された蛍光物質が可視光線を発光する。従って，蛍光物質が変われば発光色も変化する。

さてでは，テスラコイルに蛍光灯を近づけた場合を考えよう。この場合はテスラコイルから発生する高周波電界が蛍光管内の気体の放電プラズマを直接発生させていると考えられる。こうして発生した電子が高周波電界によって加速されて水銀原子と衝突し水銀を励起する。このあとの蛍

光物質の発光までの過程は通常の蛍光灯と同じである。

最近ではこの現象を応用した無電極ランプというものもあり、電極がないため長寿命である。

さまざまな色の蛍光灯やネオンランプをテスラコイルで点灯させてやるとライトセイバーのようになるので、子どもたちにはその不思議さと相まってとても喜ばれる。

なお、上記にあるように蛍光灯は高周波電界中で発光するので、電子レンジの中に入れては発光を楽しめる。(加熱に気を付けること。子どもたちだけで実験しないように注意が必要。)

3.4 電子レンジで作る火の玉

電子レンジで火の玉を作るデモもしばしばイベントで用いられる[3]。一例として、口が狭くなっている耐熱ガラス容器の底に乾いた砂をしき、その上に細い炭素繊維を何本か束ねて作った直径3 cm くらいの輪を置くものがある。容器を電子レンジに入れスイッチを入れると容器の中にプラズマの火の玉が浮かび上がる。もっと身近なものを用いようとすると、鉛筆の芯を3本使ってもプラズマを作ることにはできる。その様子を Fig. 15 に示す。カップの上に砂を敷き、これに鉛筆の芯を斜めに立てかけて、ある点でクロスさせている。それを電子レンジに入れ、スイッチを入れると、交わる位置付近の芯の間に高電圧が生じ、放電を起こし、強い発光が生じる。図の黒いメッシュは電子レンジの扉部分の電磁波が外部に漏れるのを防ぐためのものである。鉛筆の芯として製図用のものを用いているが、一般に鉛筆の芯は油で表面の滑らかさが増すよう処理されている。そのまま用いると発火するので注意が必要である。このデモに必要な道具は電子レンジと鉛筆の芯程度でほとんど設備がなくても行うことができる。ただし、子どもが1

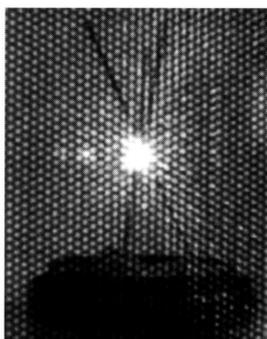


Fig. 15 Plasma at cross-point of carbon rod in a microwave oven.

Table 3 Parts for mini-lightning panel using an electric lighter.

Name of parts	Price (¥)
Throwaway electric lighter	100 × n
Aluminum foil	200
Name card size Printing paper	450
2B pencil	
Color pencils or color felt-tip pens	
Total price	¥ 650 + 100 n

人で家庭で行わないよう注意しておく必要がある。

3.5 圧電素子を利用したミニ雷

子ども向けのデモで喜ばれるのはお持ち帰りのお土産を用意して置くことである。ここではそんなときの一品、100円ライターの圧電素子を使っての“かみなりパネル”の作り方を紹介する。準備するものを Table 3 に示す。表中の n は個数である。アルミテープおよび名刺の紙はパネル100個分の材料代になる。子ども向けのイベントで実際に配布した構成図を Fig. 16 に示す。参加者は小学校低学年が中心だったため、漢字を用いないなどの配慮をしてある。作成手順は以下のとおりである。

- (1)ライターを分解して、“圧電素子”を取り出す。
- (2)名刺用紙にアルミテープを、Fig. 16 のように貼る。上は“雲”で、下は“地面”に相当する。アルミテープの間隔は1~2 cm にすると放電しやすい。放電の距離を伸ばしたい場合は、放電してほしい場所を2Bの鉛筆で薄く塗る。濃く塗りすぎると電流は炭素中を流れ放電しない。
- (3)圧電素子から出ている線を一方のアルミテープにセロテープで貼り付け、底の金属部をもう一方のテープに押しあてた状態でボタンを押す。Fig. 17 のようにアルミテープの間に放電が起こる。

圧電素子は約 10 kV の電圧を数 μ 秒間発生する。放電しにくい場合は、アルミテープ間の距離を短くしたり、圧電素子を新しいものに取り替えたり、工夫する。鉛筆の濃さを適当に調整すると 10 cm 程度まで放電距離を伸ばすことができる。また、そのままでは殺風景なのでマジックなどを使って好きな絵を描かせる。岩手大学で行われたイベントに参加した子ども(幼稚園児~小学校中学年)の作品の一例を Fig. 18 に示す。図中、右上に置かれたものが電子ライターから取り出した圧電素子である。当イベントでは、

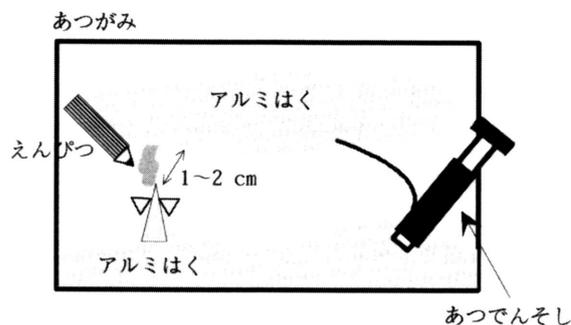


Fig. 16 Schematics of mini-lightning panel.



Fig. 17 Discharge on the mini-lightning panel.

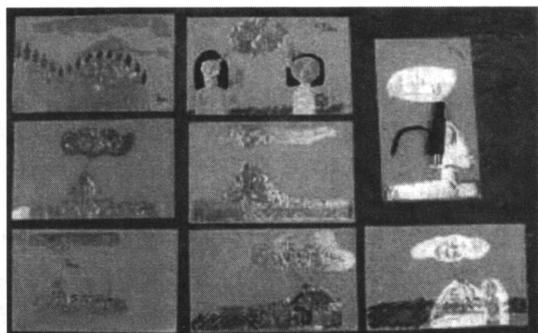


Fig. 18 Handicraft of mini-lightning panels by participant under the age of 10.

『デザイン賞』、『放電の長さコンテスト』などいろんな企画を仕掛け、盛り上がるよう試みた。ここでも、子どもには、絶対に圧電素子を人にあてたりしないよう注意しておく必要がある。

3.6 おわりに

生涯教育や理科教育の充実、研究施設の公開などを目的にいろんなイベントが行われるようになってきた。雷はプラズマや高電圧放電現象を説明するには有効な題材と思われる。本講座がこうしたイベントの手助けになれば幸いである。

参考文献

- [1] ケルン憲章 -生涯学習の目的と希望-。
(http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/summit/cologne99/g8s_sg.htmlで参照可能)。
- [2] G8教育大臣会合(2000年4月1日・2日, 東京)議長サマリー
(http://www.mext.go.jp/a_menu/kokusai/g8/jpn/j_h1.htmで参照可能)。
- [3] 応用物理学会第7回科学と生活のフェスティバル「体験しよう! 夢いっぱいプラズマの世界」(2001年6月23日・24日, 名古屋市科学館)。
- [4] M. Hori and H. Fujiyama, J. Plasma Fusion Res **79**, 567 (2003).
- [5] 秋山秀典他: EE Text 高電圧パルスパワー工学(オーム社, 2003) p.95.
- [6] 横山信雄他: 驚異のハチソン効果(たま出版, 1993) p.170.
- [7] 電気学会編: 電気学会大学講座 電気磁気学第二次改訂版, (オーム社, 1979) p.303.

コラム: スタンレー・ミラーの実験

スタンレー・ミラーの実験は大変有名である。生命の誕生に雷が関与した可能性として、いろんなイベントで夢を与えるには有効な題材である。

シカゴ大学のハロルド・ユーリは、原始大気が主に水素・メタン・アンモニアなどの成分からなる還元型で、このような大気中では有機化合物が比較的容易に生じると考えていた。1953年、彼の指導の下で当時大学院生のスタンレー・ミラーは、原始地球の大気を模擬した混合ガスに電気火花を通す実験を行い、生命の素材となる種々の有機分子が合成されることを発見した。ミラーは2つ連結したフラスコを用意し、一方に水200mlを、もう一方に原始地球の大気組成を模擬した混合ガス(水素・メタン・アンモニアを1:2:3の割合で混合)を入れ装置を密閉した。そして下の水の入ったフラスコを加熱し、混合ガスが入った上のフラスコには電極を入れ、1週間に亘って60kVの火花放電を飛ばし続けた。ここでは混合気体は原始地球の大気を、水は海を、加熱して発生する水蒸気は火山活動を模していた。そして原始大気中の雷のエネルギーが、複雑な有機分子の合成に寄与すると推定したのである。1週間後、フラスコに入れておいた水は濃赤色になり、様々な有機分子が生成されていることが確認された。そこには、グリシン・アラニン・アスパラギン酸など、タンパク質を構成するアミノ酸(C-N-H-O)の他、 β -アラニン・乳酸・ギ酸などの有機物質が合成されていたのである。もちろん、この実験が生命の誕生を再現してみせるかについては異論が多い。しかしながら、放電で生物の原型であるアミノ酸が合成できることは、放電の深遠さを物語っている。