

公 益 財 団 法 人

# 下中記念財団

The Shimonaka Memorial Foundation

---

## 下中科学研究助成金取得者研究発表

---

研究発表一覧は下記からご覧いただけます。

<https://www.shimonaka.or.jp/3s-grant-contest/>

# イメージしにくい物理現象を具体的に体験できる装置の開発と利用方法の提示

山口県立防府商工高等学校

古本 宏

## 1 研究概要

今回の研究では、次のことについて実施したが、まだ時間をかけて継続したいものも残った。

### (1) エレベータと似た運動を起こす

#### 実験装置の製作

運動中の速度がリアルタイムで観察できるものを製作した。エレベータが停止状態から上の階に移動し、再び停止するまでの運動は、正の等加速度運動→等速運動→負の等加速度運動という組み合わせとみなすことができる。教科「物理基礎」で実際の例を見せながら、運動の向きと速度の正負、速度変化の向きと加速度の正負について学習することができる。

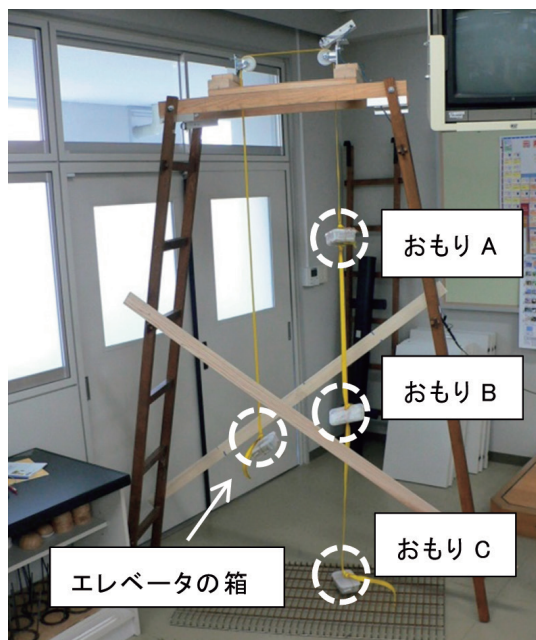


写真1 エレベータ模型全景

この模型は、物理の世界で「アトウッドの装置」と呼ばれているものと基本構造は同じである。左側の錘は人が乗るエレベータの箱に相当し、右側の3つの錘がエレベータに先程の3種類の運動を連続的に起こす様に各錘の質量を調整している。

模型上部、ベルトに接して回る速度センサにより、エレベータの速度変化を授業中に見せることができるようになった。高校生にとって加速度は大変分かりにくいものだが、具体的な運動例を使って考えさせることで、より効率が高くなったと実感できた。

上部の構造は以下の通り。

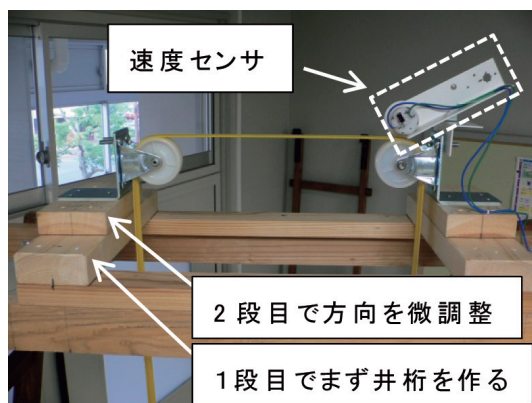
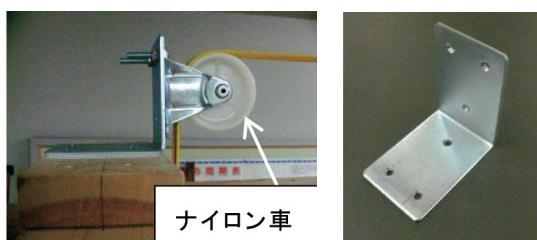


写真2 エレベータ模型上部の構造

(写真1)に全景を示した。たまたま不要の木製梯子2本があったので、この上部に垂木2本をレール状に渡してやぐらを作る。更にツーバイフォー（構造用木材）を両側に渡して井桁を組む。この井桁にベルトを架けるナイロン車と速度センサをのせた(写真2)。

ベルトは左右を直径65ミリのナイロン車で支えている。ナイロン車はM6のボルト2本でL字アングル（商品名 幅広金折ユニクロ3.2×60×90）に固定。L字アングルには大きな力が加わるので、ツーバイフォーに木ねじでしっかりと固定する。さらに、右側のL字アングルには、速度センサを取り付ける必要があるが、これには次の（写真3）の様に、40×40厚さ2ミリのPVC製アングル①、③と鉄製L字アングル②を用いた。



速度センサとして、光電池用モータH-158を使い、モーター軸に直径50ミリのプーリーを取り付ける。このプーリーはタミヤ製プーリーユニットセットに入っているもので入手は容易である。速度センサについては力学台車につけるものと基本的な作りが同じなので、作り方は（4）で詳しく述べる。

エレベータの箱と、おもりA、B、Cは、100円ショップにある（写真4）のようなプラスチック製容器に、ホームセンターで売っている1個約50gの角ワッシャを必要枚数入れて作った。容器の中で、ワッシャが動かないような工夫が必要。

箱、おもりA～Cの質量をそれぞれ、 $M$ 、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ とする。また、エレベータの箱が加速上昇、等速上昇、減速上昇する距離をそれぞれ、 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、箱の全上昇距離を $L$ とおく。本校で作ったものは、やぐらの高さから、 $L=210\text{cm}$ である。こ

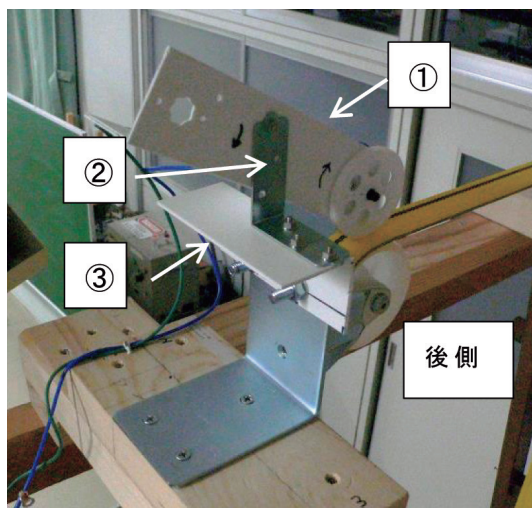
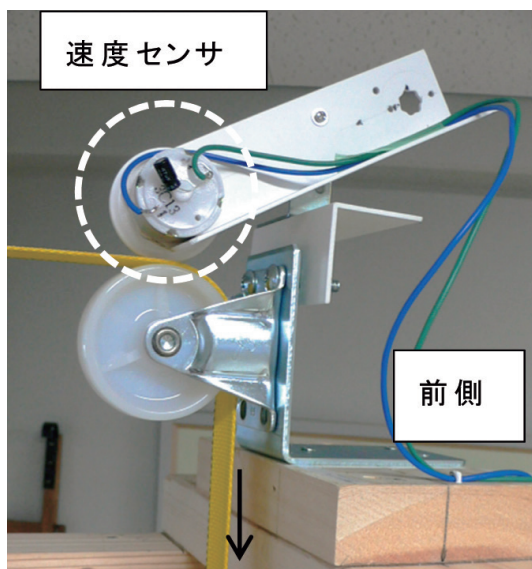


写真3（上下）



写真4

の程度の距離があったほうが、 $v-t$  グラフを見たとき“見栄え”が良いようだ。

ロープと滑車の間の摩擦がなく、これらの質量が無視できるとき、次の条件を満たすように質量を決めておき、後で微調整する。

加速度上昇の条件は、

$$m_1 + m_2 + m_3 > M$$

等速上昇の条件は

$$M = m_1 + m_2$$

減速上昇の条件は

$$M > m_1$$

全上昇距離は  $L$  しか取れないので、

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

やってみるとわかるが、この最後の条件は結構厳しく、 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  を調整するのは少しだが苦労する。

摩擦があり、滑車、ロープ自体も運動することなどを考慮して、ある程度質量は大きくすることが必要になる。(写真4)の角ワッシャは1つあたりの質量がちょうどよい。大ざっぱに加速度、等速度の大きさを決めて、すべての質量が決まったら、箱～おもり間をベルトでつなぐ。箱を最下部(床の少し上)まで下げてから、オシロスコープで速度変化を観察する。結果を見ながら、何回か容器に入れるワッシャの枚数を調整することが必要だった。容器のふたとワイヤでくるみ、その後ワッシャを出し入れしたので、結構手間はかかった。

## (2) エレベータ模型の活用

エレベータの運動は物理の演習でよく取り上げられる。等速度運動と等加速度運動の組み合わせなので問題のレベルとしてち

ょうどよいからだろう。一通り等加速度運動の公式について演習が終わった頃、エレベータの問題に移る。この模型を使ってエレベータの運動を観察させる前に、センサの基本的性質を生徒に示しておくことが大切だ。つまり、左側の錘が①静止しているとき、黒板に映った輝線は0のところをずっと横に移動して変化しないこと、②錘が等速上昇中は、黒板の輝線は正の一定値を描くこと、③錘が等速下降中は負の一定値を描くこと、④上下運動を小さく繰り返したら、輝線はサインカーブのように正負を滑らかに繰り返すこと、である。これで、そのあとに見せるエレベータの運動がどんな速度変化をしているかが少し分かりくなるはずだ。

以上の準備が終わったら、模型を使って、実際のエレベータの運動を見せる。最初、模型左の錘を床近くに静止させておき、静かに手を放してそのあとの運動を観察する。黒板に映し出される速度は(写真5)のようになる。



写真5

2度は見せたほうが良いと思う。また、画面は停止させられるので、終わったらこのグラフを投影したままにしておく。

次は、センサの出力結果を見ながら、生徒に質問し、考えさせる段階になる。①エ



レベータは上昇して停止するまで、どんな速度変化をしているのか？（言葉ではどのように表現すればよいか？）②上昇中の加速度の正負はどの場合が正で、どの場合が負になるのか？など。

なお、授業の順番から、エレベータの問題を扱う前に、斜面上の台車の滑走を学習している。

### (3) エレベータ用速度センサの開発について

速度センサとしては当初、ベルトを乗せるプーリーを兼ねて、自転車のハブ内臓ダイナモを使う予定だった。（写真6）



写真6

（写真6）の左側は、エレベータ模型に使っているベルトで耐荷重は250kg重、右側はベルト移動速度を調べるための自転車用ハブダイナモ（サンヨウ製、回転に必要なトルクが小さいが現在入手困難）。前任校では理数科の課題研究で、自転車のペダルを踏む力と加速度の関係を調べる際、大いに役立った。ところが、今回これを使ってエレベータの等加速度上昇時の速度変化（V-t グラフは直線状に増加するはず）を調べたところ、速度の立ち上がり時に毎回不自然な電圧の盛り上がりが出ることがわかった。原因を調べると、このダイナモの回転速度と起電力の関係（図1）から出て避けようがないことが分かり、最終的に使用を諦めた。

以後、センサとして適したものを直流モーターから探すことにした。

| 回転数[1/s]    | 電圧[V] |
|-------------|-------|
| 0           | 0     |
| 0.505050505 | 6     |
| 1.234567901 | 8     |
| 2.136752137 | 14    |
| 2.777777778 | 20    |

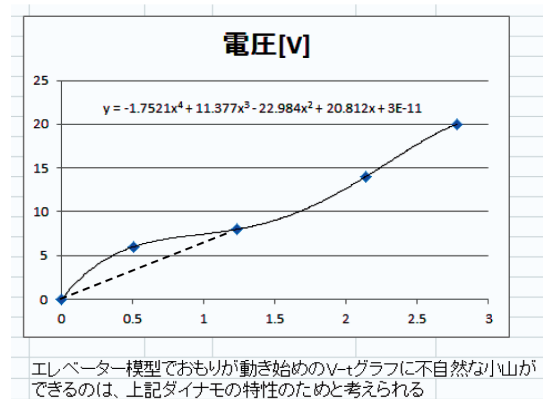


図1

直流モーターも色々ある中で、光電池用として販売されているH-158 (Nakamura)（写真7）が、回転に必要なトルクが小さく、起電力が低速時から大きいのでこれを使うことにした。



写真7

次に、速度と発生電圧の関係を調べた。

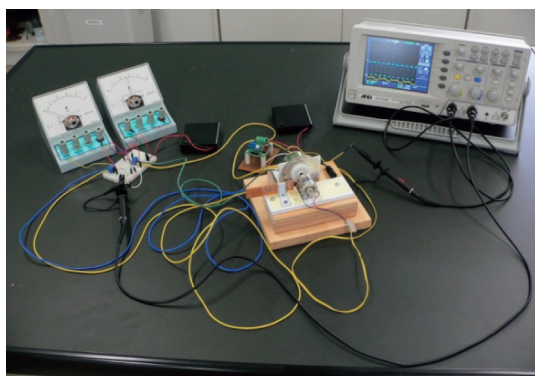


写真8 実験装置全景

中央の木製台に乗っている装置の拡大写真が次の（写真9）である。

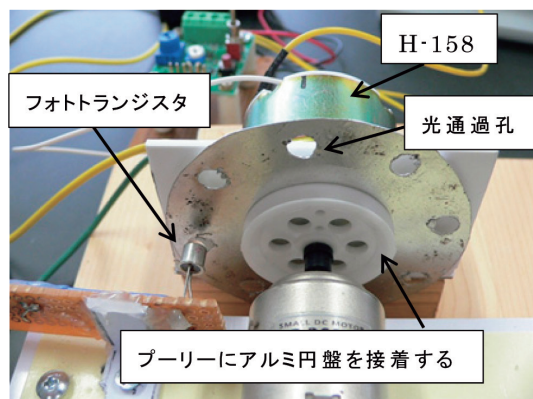


写真9

光電池用モーターに穴の開いたアルミ円盤を自作して取り付け、別のモーターで回転させ、穴を通過する光をフォトランジスタで受けて、オシロで観測した。この実験で得られる波形は（写真10）の右側になる。

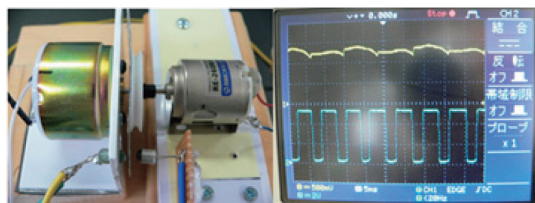


写真10

（写真10）の左側で、左から右に向けて赤外線を当て、光の通過をフォトランジスタで受ける。円盤の穴を光が通過するとき、フォトランジスタに電流が流れ、抵抗によって電圧に変換すると、右下のような電圧波形（矩形波）が得られる。この時間間隔からH-158の回転速度が求まる。一方、右上の波形はH-158の起電力を表している。結果は、図2のようになった。モーターの回転速度と起電力の間には、精度の高い比例関係が成り立つことが確認できた。

| 回転数[1/s]    | 電圧[V] |
|-------------|-------|
| 0           | 0     |
| 4.166666667 | 0.24  |
| 7.225433526 | 0.405 |
| 9.541984733 | 0.6   |
| 13.02083333 | 0.85  |
| 21.55172414 | 1.4   |
| 29.76190476 | 1.98  |
| 41.66666667 | 2.75  |
| 46.64179104 | 3.05  |
| 64.1025641  | 4.05  |

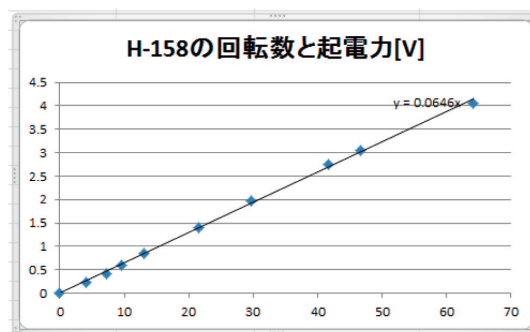


図2 横軸は回転数[1/s]縦軸は起電力[V]

以上の結果から、モーター H-158 にプーリーを取り付けてタイヤとして使えば、速度センサとして使えることが分かる。エレベータの模型上部に取り付けた速度センサは、ベルトの上にプーリーが乗って回転し、ベルトの速度を出力する（力学台車の場合は、元々あった前輪を取り外し、プーリーを前輪として使えば台車の速度をとらえることができる）。詳しい作り方は次の（4）で取り上げる。起電力はオシロスコープに入力し、画面を小型カメラで写し、

プロジェクターで黒板に直接投影して、授業中に利用した。生徒には“黒板に映し出されたグラフは台車のv-tグラフだ”と言っても定性的にはまったく違和感はないようだ。なお、最初にエレベータの移動方向を逆にすると電圧が正⇔負と変わることを見せておく。実験を見せた後、オシロの画面を静止させ、電圧→速度の読み替えを行い、エレベータの加速度を具体的に計算することもできる。

#### (4) 力学台車用の速度センサの作り方 (エレベータ用もほぼ同じ)

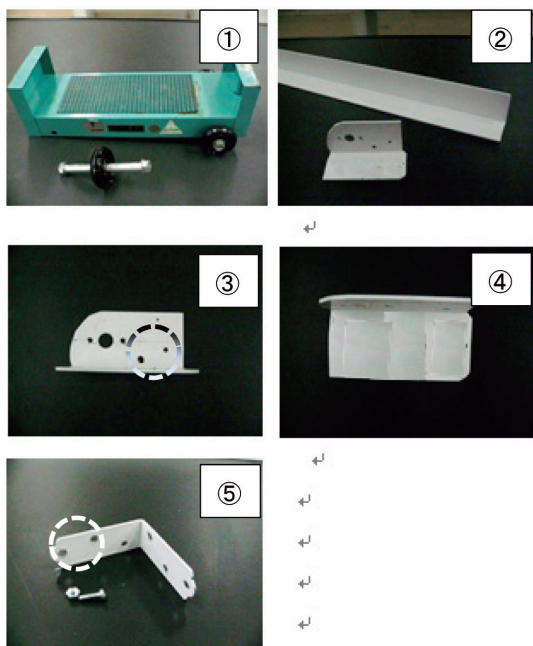


写真11

(写真11)の上から順に作業していく。

- ①力学台車の前輪を取り外す
- ②40×40厚さ2ミリのPVCアングル(白)をカットして、角を一か所丸くしておく。これは、直径50ミリしかない車輪(プーリー)が幅40ミリのフレームより外側に出る必要があるため。

素材はPVC(ポリ塩化ビニル)が適す。

ドリルで穴をあけるとき、割れにくいため。

- ③光電池用モーターH-158の止めねじ位置と⑤の先端部の穴に合わせて、穴あけ加工をする。
- ④右側の角も少し丸く削っておく。
- ⑤③の囲みの穴と⑤の穴を合わせてビス止めする。
- ⑥H-158とプーリーを③にビス止め。
- ⑦⑤を力学台車にビス止めする。
- ⑧モーターの電源端子に50V、47μFの電界コンデンサをはんだ付けした後、イヤホン用コード3m程度をはんだ付けし、速度センサの出力とする。斜面を滑走させて、電圧をオシロスコープで見ると、モーターの回転速度が変化するとき、整流ブラシでかなりノイズが発生することがわかる。電界コンデンサは周波数の高いノイズを低減してくれる。

(写真12)が完成したもの。最近の台車はアルミダイキャスト製のものが多いが、その場合ビスで固定することが難しいかもしれない。別途工夫が必要だろう。



写真12 プーリー側

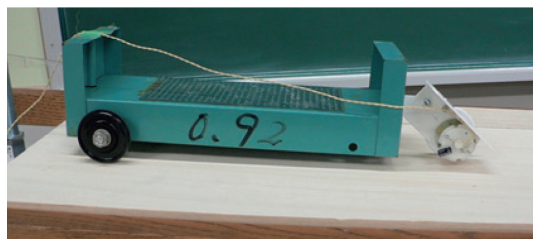


写真13 モーター側



＜プーリーとモーターについて＞

車輪として使うプーリーは、田宮模型から販売されている楽しい工作シリーズのプーリー（S）セットに含まれている。付属のWプッシュという部品を使ってH-158に取り付けることができる。

電圧センサとして使うH-158は、小型の工作用モーターとしてはめずらしくビス固定用の穴が最初からついているので都合がよい。

#### （5）速度センサ付力学台車の活用

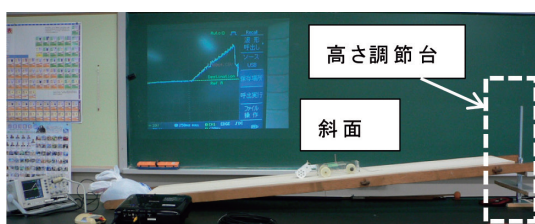


写真14

「物理基礎」で等加速度を学習するとき、加速度の定義などが終わったら、(写真14)にあるような斜面を教卓に準備する。写真の右側に映っているのが高さ調節台である。座金付ナットを木板にビス止めし、M8×600のボルトを立てて支柱として使っている。理科室にある鉄製スタンドより、個別の用途に特化して使いやすいている（実は本校の理科室にはスタンドがまったく不足しているという実情もあって自作した）。ボルトには2枚、厚い板がナットで固定してある。斜面を架けると、どちらを使うかで、傾きがおおよそ2倍異なる。

この斜面上で、速度センサ付力学台車を滑走させ、速度変化を見せる。斜面上を滑走する台車の $v-t$ グラフが等加速度運動そのものであること、身近な運動が等加速度運動だということを、皆で直ちに確認でき、そのうえで次の段階に進めことができる。続いて、斜面の角度を大きくすると、グラフがどうなるか生徒に予想させから、実際にやつ

て見せる。斜面の角度を変えるのは、斜面の板を上段に差し替えるだけなので容易である。このように具体的な例で基本的な事項を確認しながら、話を進められるので、授業がスムーズに進むと実感している。

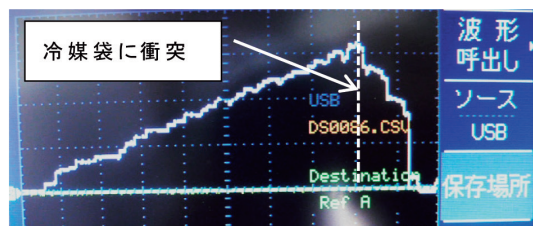


写真15

（写真15）は台車が初速0で斜面を下に向かって滑走する場合の結果である。グラフの終わりが“ストン”と0になっていないのは、斜面の最下部で台車を保護するため、柔らかい冷媒の袋を数個ビニル袋に入れてそれに衝突させているためである。

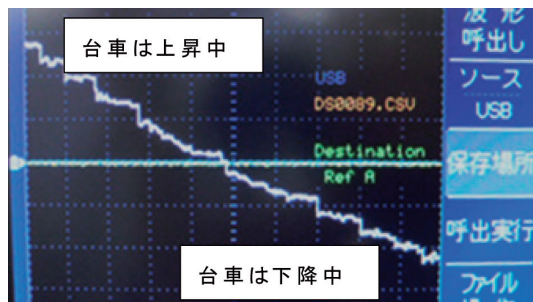


写真16

＜斜面を使った最後の考察＞

台車に初速を与えて、台の下端から上方に向けて投げ出した後の速度変化（写真16）を見て運動を考察させる。このグラフを正しく読める生徒は、そう多くはいないと感じている。しかし、台車が斜面を上るとき、速度（電圧）は正で、後ろ向きに下ってくるとき、速度は負で大きくなることはこの（写真16）見れば、認めないわけにはいかない。



このセンサを使った運動の観察は、記録テープや動画撮影の後、画像処理をするのに比べ、準備が簡単である。台車の運動を授業中に見せながら、運動方向と速度の正負の関係を理解させること、斜面の角度と速度変化（加速度）との関係を直ぐに、しかも何回も見せることができるのは大きなメリットと思う。

（補足）現在、台車にはより強度の大きい次の部品を見つけたので、それを取り付けている（写真17）。



写真17 前輪を外して、プーリーを取り付ける

モーターと同じ直径2ミリの穴があけてあり、モーターへの取り付けは、ねじで行える。プーリーの外形が50ミリなので、前掲の図2のグラフで、回転速度10 [1/s] が速さ1.57 [m/s]、60 [1/s] が速さ9.42 [m/s] に相当する。

#### （6）地震の揺れを実際に起こし、実験で利用できる起振機の製作と改良。

震度5強/6強の地震の揺れを起こすのは装置A、震度4の揺れを起こすのは装置Bである。震度6強を除いて、装置そのものは、昨年8月には完成していた。今回、A、Bとも幅が大き過ぎて棚に収まらないことから、改良することにした。併せて、装置Aのパーツを見直し、震度5強と震度

6強をパーツの交換だけでできないか検討することにした。いずれの振動台も、原理は同じで、等速円運動（2次元の運動）を直線上の運動に変換して実現している。

#### ＜装置Aについて＞

（写真18）にある2本のレールと木製台の両端を切断して特に問題なく完成した。

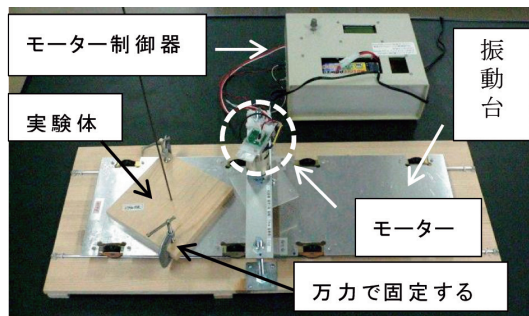


写真18 装置A（震度5強）

（写真18）にあるモーター制御器は、2012年～14年度に行った研究（注3）で、鉛直振動台の駆動用モーターを動かすために設計・製作したものである。装置A・Bともに、その時と同じ「タミヤギアードモーター「540K75」」を使用している。メーカーの資料（図3）を見ると、始動トルクが80kg・cm、電流が40Aと大きく、電池は7.2Vのニッカド電池（写真19）または7.2Vのニッケル水素が必要である。



写真19 7.2V ニッカド電池

| 540K75            |                           |
|-------------------|---------------------------|
| ■電源電圧7.2V         |                           |
| 無負荷時回転数           | 221rpm                    |
| 無負荷時消費電流          | 1.2A                      |
| 最大効率時のトルク         | 12kg・cm<br>(6.32A/185rpm) |
| ★DC7.2Vの特性グラフはこちら |                           |
| 重量＝約270g          |                           |

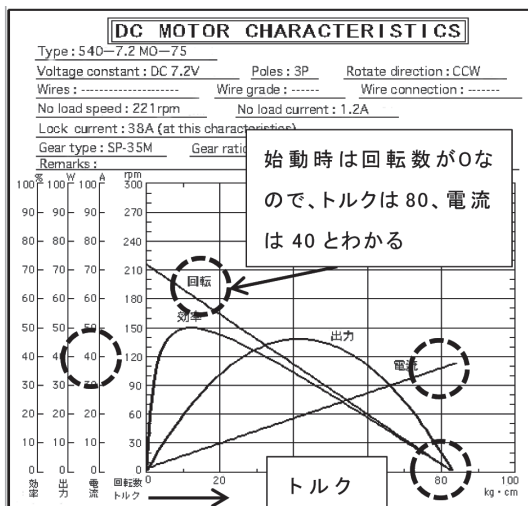


図3 タミヤギアードモーター特性グラフ

#### ＜装置Bについて＞

(写真20)にある装置Bの台を揺らす直接の動力は(写真21)にある注射器2のピストンに固定した金属製の“ツメ”である。昨年完成していたが、注射器に水を入れる

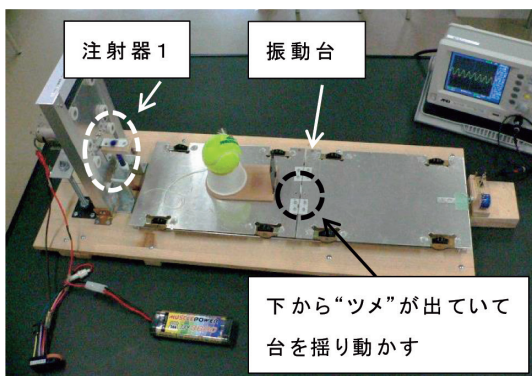


写真20 装置B(震度4)

さい、注射器1の保持機構が関係して苦労していた。今回、若干改良することができた。

なお、各注射器の容量は、注射器1が2cc、2が10ccである。2のシリンダー直径の方が大きいので、注射器1の振幅をさらに小さくすることができる。

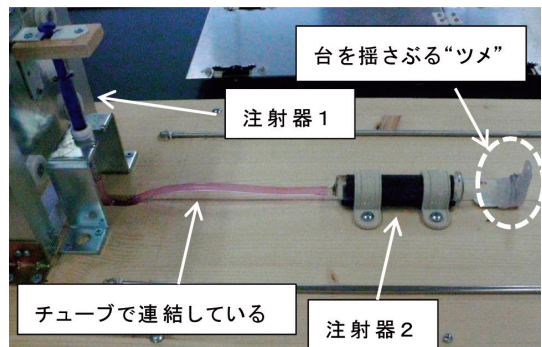


写真21

#### ＜起振機の活用について＞

教科「科学と人間生活」の単元、地震災害と防災や教科「物理基礎」では、建物を模したピアノ線の共振実験などで利用できる。

経済産業省のホームページによれば、平成28年3月には、電気需要場所における感震ブレーカーの設置が規定され、その中で地震時等に著しく危険な密集市街地の住宅などに施設することを勧告し、それ以外のすべての地域の住宅などに施設することを推奨している。今回改良した起振機は同HPにある「感震ブレーカー等の性能評価ガイドライン」(図4)の簡易試験に使用することができる。

|       | 標準試験     |             | 簡易試験     |       |
|-------|----------|-------------|----------|-------|
|       | 加速度(gal) | 周期(秒)       | 加速度(gal) | 周期(秒) |
| 作動確認  | 250      | 0.3,0.5,0.7 | 250      | 0.5   |
| 不動作確認 | 80       | 0.3,0.5,0.7 | 80       | 0.3   |
|       | 250      | 0.1         |          |       |

図4

図表12 感震性能の評価試験区分

震度 4・・・最大加速度80ga 1、周期  
0.3秒、振幅0.182cm、水圧式  
震度 5 強・・・最大加速度250ga 1、周期  
0.5秒、振幅1.58cm、機械式  
震度 6 強・・・最大加速度600ga 1、周期  
0.7秒、振幅7.45cm・・・試作を試みたが、  
振幅がかなり大きくなるので、装置全体  
を少し大きくするか、今の大きさのまま  
構造を考え直す方が良いと判断し、今回  
の報告には間に合っていない。

#### <振動台の振幅について>

最大加速度  $a$  と周期  $T$  が決まると、単振動の公式を使って、振幅  $A$  を求めることができる。それに基づいて起振機の振幅を決めている。

$$a = A (2 \pi / T)^2$$

よって、

$$A = a T^2 / 4 \pi^2$$

装置 B の震度 4 の場合、最大加速度  $a$  は  
80ga 1 = 0.80m/s<sup>2</sup>、周期0.30秒なので、

$$\begin{aligned} A &= 0.80 \times 0.30^2 / 4 \times 3.14^2 \\ &= 0.001822\text{m} \\ &= 0.182\text{cm} \\ &= 1.82\text{mm} \end{aligned}$$

となり、かなり小さい。断面積の異なる  
2つの注射器を使うことにより、この小さ  
な振幅をつくることができた。

#### (7) 科学館や地域の科学教室で利用できる テスラコイルについての研究・改良

私がテスラコイルに関わることになったき  
っかけは、以前勤務していた山口県立山口  
高校で、生徒が完成したテスラコイルを見  
たことから始まる。詳細については(注1)  
に書いているが、年を経てそのテスラコイ

ルが故障し、動かなくなっていることを知っ  
た。時間が十分にあるわけではないが、何  
とか動くよう修繕し、再度活用されること  
を期待して、作業に取りかかった次第である。

しかし、修繕のためテスラコイルの原理  
について調べ始めると、きちんとした学問  
に基づいて書かれたものが少ないことが分  
かった。現時点で私が信頼を寄せて読んで  
いるのは、【参考文献 1】である。公的機  
関で評価されていることと、理論的にどう  
扱った場合、どういう結果になるというこ  
とが明確に分けて記述されていることと、  
数学的計算も省略せず書いてある点がよい。

以下に、改良・修繕した現在の状態での  
テスラコイルの特性について、得られた実  
験結果について記述する。

#### <修繕・一部改良後のテスラコイル>

現状は、(写真22)の様に、電源部が本  
体からケーブルでつながっているだけで、  
物理的には完全に分けて置かれている。最  
終的には設置場所が決まってから、電源部  
の収納方法を定める予定である。火炎長約  
20cmの放電が観察される。



写真22



＜放電中のテスラコイルから4m

離れた場所における電圧波形について＞  
測定方法は、オシロスコープのプローブをスタンドのアームから空中にぶら下げておくだけである。少し不思議な感じがするが、これで測れる。

観測された波形が（写真23）で、この波形から周波数は270kHz前後であることがわかった。

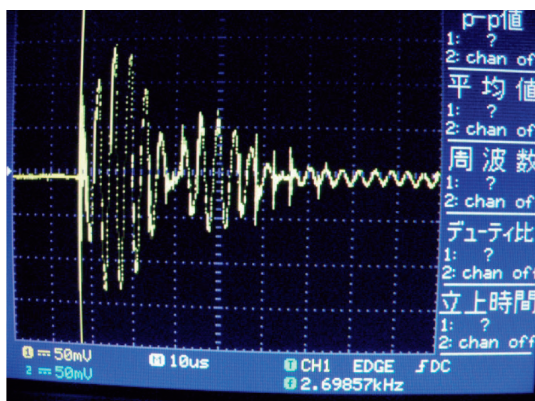


写真23

【参考文献2】に出てくる2次コイルの電流波形の“Bounces”が見られる。1次コイルの電流が最大の時、2次コイルの方は0で、1次コイルの電流が0のとき、2次コイルの電流は最大になるという、エネルギーが1次コイルと2次コイルの間で往復しているためと説明される。

（写真23）の波形を時間軸で拡大したものが、次の（写真24）である。

（写真24）を見ると、一定周期でもっと高い周波数のパルスが含まれていることがわかる。調べると約21MHzの振動波形で、テスラコイルをステンレスのネットで完全に覆っても、ネットから出てくるパルスと同じものであることがわかった。

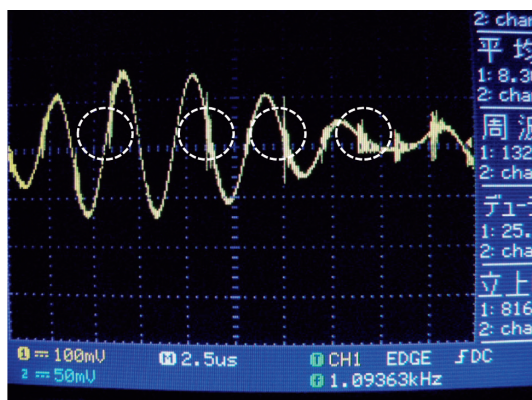


写真24 4m離れたところの波形

＜1次コイルの周波数特性＞

【参考文献3】の（図6）の方法で測定。

オシロスコープの電圧が最大になるときの周波数が共振周波数である。

1次コイルはらせん状に巻いてあり、巻き数を変えられるようになっている。

各巻き数位置での共振周波数  $f_1$  は

12ターン・・・235kHz

10.5ターン・・・272kHz

10ターン・・・281kHz

9+3/4ターン・・・290kHz

9ターン・・・308kHz

であった。現在は、10.5ターン位置で動作させるようにケーブルを固定している。

＜2次コイルの周波数特性＞

【参考文献3】の（図7）の方法で測定。

測定の結果、共振周波数  $f_2$  は290kHzであった。テスラコイルを作動させているとき周囲に放出される電磁界が約272kHzなので、少しずれている。

因みに【参考文献4】の方法で測定すると、2次コイルの共振周波数は280kHzと800kHzの2つあるという結果になった。



＜1次コイルに流れる電流を

CTで測定した結果＞

CTは、current monitoring transformerの略で、回路に流れる電流を測るのに用いる変圧器を指す。実物は、次の（写真25）で、小型の100V用変圧器から、鉄心を抜き出したものである。

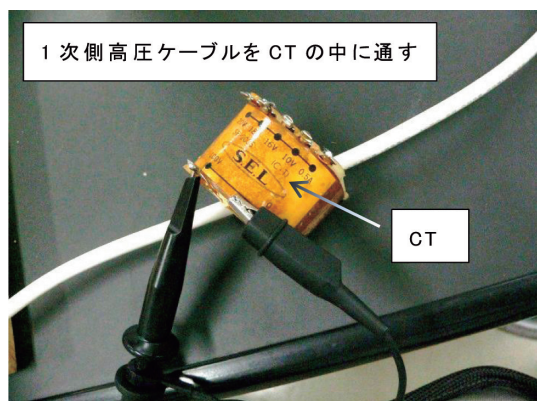


写真25

測定結果は、次の（写真26）である。

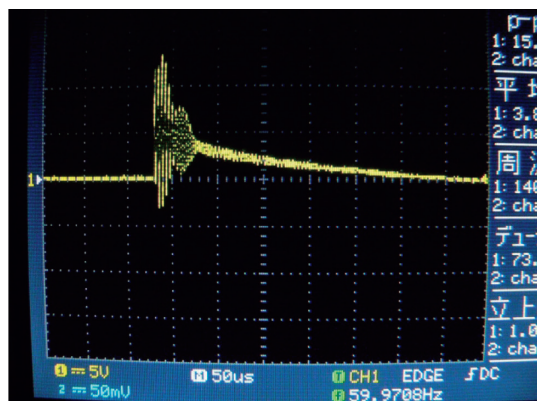


写真26

時間軸を5倍に拡大したのが、次の（写真27）である。

この波形は、4 m離れた場所で2次コイルから放出された電界波形（写真23）とおなじで、2回の“Bounces”をしていることがわかる。

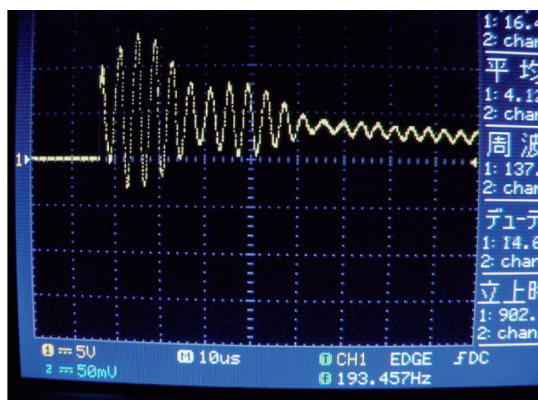


写真27

＜テスラコイルを安全に使う工夫＞



写真28

この様にステンレス製の網で囲んで実験すると、感電の危険がまったくなくなる。しかし、約4 m離れたところのオシロスコープには、次の波形（写真29）が観測された。

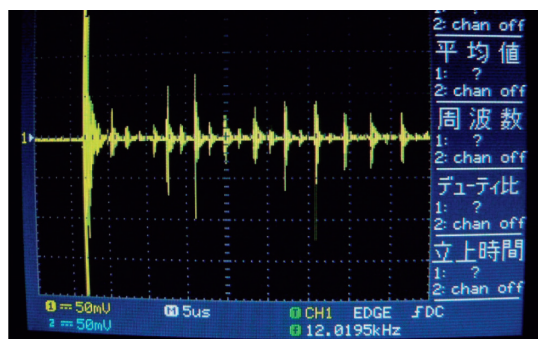


写真29

個々の短い波形を時間軸で拡大すると、

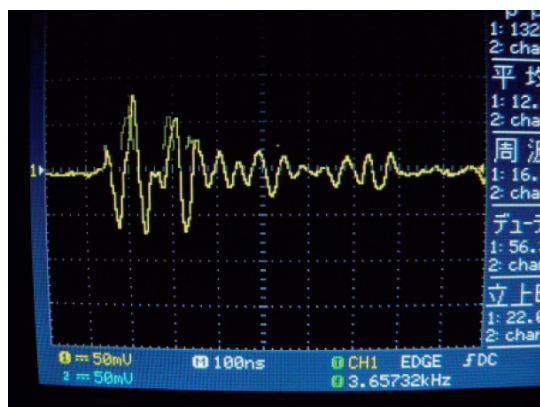


写真30

(写真30) となっていて、周波数が約21MHzであることがわかった。この電界が人体にどう影響するかは現状で不明である。

<テスラコイルの各パーツについて>

ア. 電源部と整流回路 (写真31)

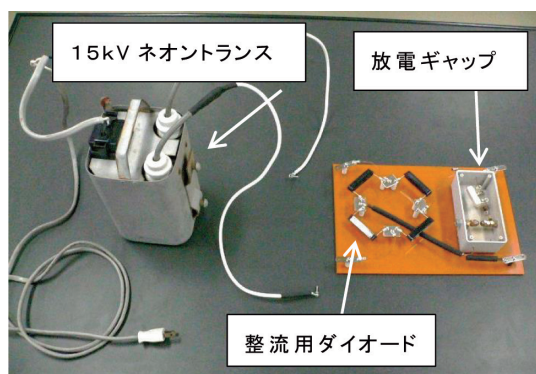


写真31

左側がネオントランスで、出力はAC15kV、内部抵抗が41k $\Omega$ である。内部抵抗が大きいことはコンデンサの充電時間(時定数)に影響してくる。右側は両波整流回路。4つのダイオードを使って、高压の交流を直流(脈流あり)に変えるもの。今後、抵抗

と平滑用コンデンサを追加して電圧の変動を減らせば、1次回路の電流波形の解析・理解が進むのではないかと考えている。

イ. 1次コイルとコンデンサ (写真32)

2つの部品でLC共振回路を構成する。

1次コイルの巻き数は0～13で可変。

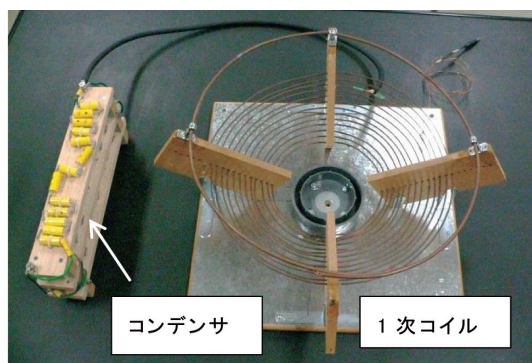


写真32

コンデンサの容量は0.0126  $\mu$  F。

ウ. 2次コイルとアルミ製終端電極 (写真33)

2つでLC共振回路を構成する。

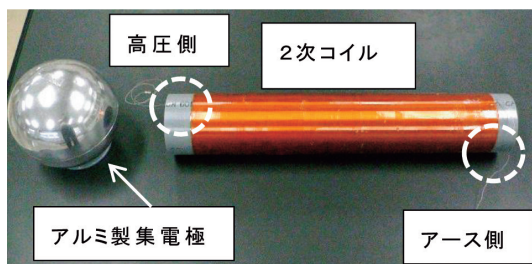


写真33 (横に寝かしているが、立てて使う)

2次コイルは1次側と異なり、分布定数回路(コイルやコンデンサといった回路要素が連続的につながって、伝送線を構成している)とみなすのが良いようだ。

### <放電の様子>

周囲を取り囲んだステンレスの網に向かって放電している。

網は、簡易接地している。



写真34

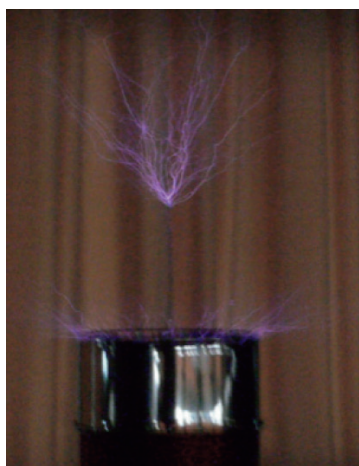


写真35  
改良途中の放電の様子

## 2 特に参考になった文献について

テスラコイルの動作原理は物理の学習者にとって大変興味がわくものである。しかし、理論的な解釈をきちんと行なおうとすると、かなり高度で多方面の知識が必要に

なる。大学や研究機関による包括的な研究報告がされていればそれを学習すればよいのだが、一個人の立場での制約もあり、今のところ見つけることはできていない。学習者のレベルに合わせて実験とともに理屈も楽しむのが良いと思われる。ただ、装置を改良していく上で、文献が必要なので探したところ、以下の資料が最も信用できると感じたので、読み解きながら、その他の資料も利用していくという方法をとった。

### 【参考文献1】

TESLA COIL RESEARCH 1992年

著者James Corum and James Daum (Battelle)、  
Harry L.Moore (ARDEC)

BattelleはBattelle Memorial Instituteを指す。米国オハイオ州にある非営利団体  
ARDECはU. S. ARMY ARMAMENT RESEARCH,  
DEVELOPMENT AND ENGINEERING CENTERを指す。米陸軍の軍事力・技術の研究機関

この資料は理論的取り扱い（特に数学）が丁寧で、実際の数値例が出ている。英文なので、読み解くのにかなり時間を要している（まだ完了していない）。途中からこの資料に集中するくらい役立った。関係する理論は以下のとおり。

ア キルヒホッフの回路方程式

イ 電磁誘導の公式

ウ 分布定数回路（伝送線路の理論）

エ 定常波の理論

### 【参考文献2】

A Project Report On “Tesla coil”

Vinay Jadwani 他4人の学生

所属Chhattisgarh Swami Vivekanand  
Technical University（インド）

この資料では、コイルの自己インダクタ



ンスを計算する公式や、1次コイルと2次コイルで起こる“Bounces”現象を取り上げてあり、本校の実験で得ていた波形の解釈に役立った。

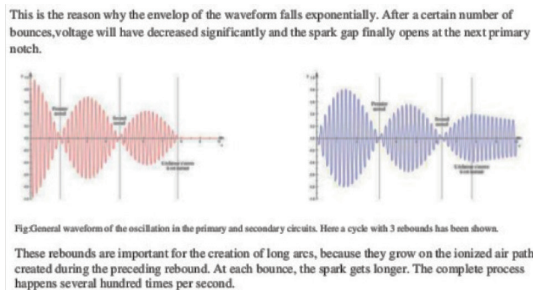


図5 1次コイル、2次コイルの“Bounces”

### 【参考文献3】

Tuning A Tesla Coil with an Oscilloscope  
(HP)

<https://youtu.be/Euy2U92I8e4>

この資料では特に、1次コイルと2次コイルの共振周波数の調べ方が参考になった。

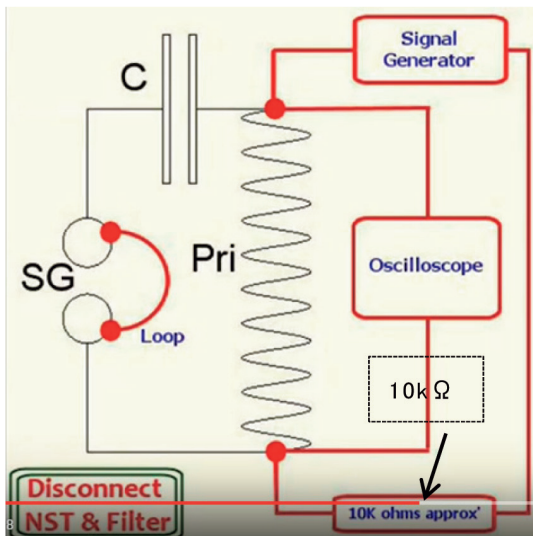


図6 1次コイルの共振周波数測定

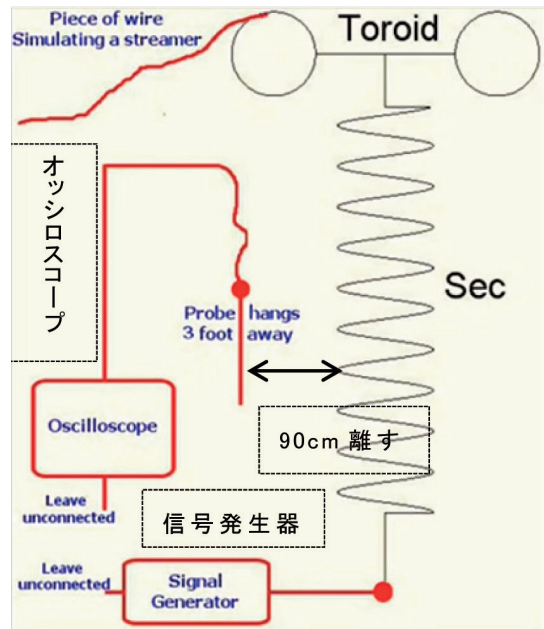


図7 2次コイルの共振周波数測定

(注1)

装置の原型は、私が2007年に勤務していた山口県立山口高等学校で、当時理数科の3年生であった(故)宮原淳徳君が中学校時代より製作を続け完成したものである(写真100)。校内文化祭では、山高体育館において、彼が自らDJとなり、作品を使った科学ショーを行った。稲妻の発生に伴って発生する大音響の中、手に持って振り回す蛍光管が強く発光することや稲妻を発生するほどの高電圧にもかかわらず彼がまったく平気であることに皆が驚かされたことを思い出す(写真101)。その後、山口県立博物館で所蔵・活用していたが、不具合などもあり使用は中止していた。今回、再度の活用に向けて、修繕と改良を施すことにした。目標は、①周囲に人体に有害な電磁波を出さないこと、②安全に操作できること、③回路原理を学習できる装置になること、④電気回路を壊れにくいものにする事とした。作業に当たって、止むを得ない場合を除いて、当初の姿をできるだけ変え

ないよう心掛けた。特に、1次コイル、2次コイル、コンデンサ群はできるだけ当初のものを生かし、最小限の変更・改良に留めることにした。また、装置の特性を知るため、実験をしながら基本性能についての確認をおこなった。



写真100



写真101



写真102  
この当時のテスラコイルの放電の様子  
ネオントランスが3つ使われていた。また、放電ギャップはロータリー式だった。

(注2)

テスラコイルは、100kHz以上の高周波で動作する高圧変圧器。2次コイルの一端が金属球などで終わっていて、他の回路部品と直接つながっていないが、100kV以上の高い電圧を発生する。セルビア出身のニコラ・テスラが1890年以降、アメリカ合衆国特許をとっている。

(注3)

武田科学振興財団の2012年度「高等学校理科教育振興奨励」の振興奨励金を頂いて行った研究で、研究題目は以下のとおり。

物理Ⅱ「円運動と単振動」、地学「地震」の学習指導に役立つ鉛直振動台の設計と製作。

#### 【参考文献】

- 1) 本文に掲載
- 2) 本文に掲載
- 3) 本文に掲載
- 4) テスラコイルの製作法 (HP)

<http://WWW.ekbo.co.jp>

共振特性の観測方法が5)と異なり、結果も違った。

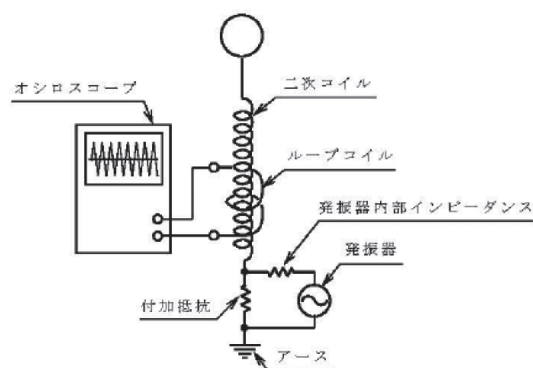


図5 共振特性の観測

- 5) J. Plasma Fusion Res. Vol87, No3 (2011)  
202-215

講座 パルスパワー技術入門

4. パルスパワー発生回路の設計と実践  
100V 直流電源とインバータネオントラ  
ンスを用いた高電圧発生の記事

- 6) The Tesla Coil Design, Construction  
And Operation Guide

テスラコイルの各部の構造について  
詳しい。ネオントランスの保護を目的  
とした“テリーフィルタ”と、ロータ  
リーギャップの問題点についての記事  
あり

- 7) 伝送線路の基礎理論 (HP)

分布定数回路 MEL Inc. -SnapApp11-  
小川隆博

テスラコイルの2次コイルを伝送線路  
としてみたとき、“伝送線路でトランス  
が形成できる”という記事が注目され  
る



古本 宏先生  
(ふるもと ひろし)

#### <略歴>

1953年 7 月 3 日 山口県宇部市生まれ  
1974年 3 月 九州大学理学部物理学科卒業  
1977年 3 月 同大学大学院工学研究科修士  
課程終了  
1980年 4 月～山口県立下関工業高校  
1985年 4 月～山口県立小野田高校  
1995年 4 月～山口県立山口高校  
2009年 4 月～山口県立萩高校  
2015年 4 月～山口県立防府商工高校 教諭  
現在に至る

#### <研究歴>

- ①初任校下関工業高校で、文部省の科学研究費補助金をいただき、バンデグラーフ起電機の改良版を製作した。  
また、これとは別に、運動がリアルモードで電気出力できる力学台車を製作した。
- ②3校目の勤務校山口県立山口高校でH16～H18年度スーパーサイエンスハイスクールの研究に取り組み、主に理科学習に役立つ生徒の体験学習の開発とその有効性の実証研究を行った。
- ③4校目の勤務校山口県立萩高校では、山口県教育財団より奨励金を頂き、振動台装置の製作に取り組んだ。またこれとは別に、エレベータの運動を連続的に見せる装置や弦の固有振動を生徒実験で行う



方法、2次元の電界を理解するための生徒実験方法を開発した。

- ④ 4校目萩高校（～5校目の防府商工高校）で、武田科学振興財団より研究奨励金を頂き、円運動と単振動の関係を示す振動台装置の設計・製作をおこなった。
- ⑤平成28年度は、内閣府の「感震ブレーカー等の性能評価 ガイドライン」に従い、性能評価に必要な「周期0.3秒、最大加速度80gal、震度4」の揺れを起こす装置Aと「周期0.5秒、最大加速度250gal、震度5強」の揺れを起こす装置Bをそれぞれ製作した。この装置は本年8月の本校が実施した中学生対象の実験講座「感震ブレーカーを作ろう」で性能評価に使用した。

#### <勤務校>

山口県立防府商工高等学校

〒747-0802 山口県防府市中央町3-1

電話 0835-22-3790