

# 蜃気楼

家田涼平 佐々木太一 白浜真 辻部壮真 湯浅貴道

## 1. 緒言

私たちは、蜃気楼が発生する条件に興味を持った。蜃気楼とは光の屈折によって物体の見かけの位置が変化する現象である。そこで光の屈折のメカニズムを解明し、蜃気楼の発生について研究することにした。屈折率は光が通過する物質の密度に関係すると考えて実験を行った。まず、水溶液の屈折率について研究をした。次に空気の圧力や温度が変わると密度が変わることから、圧力と屈折率、温度と屈折率との関係を研究した。

## 2. 方法

### I. 水溶液の密度と屈折率の関係を調べる実験

密度 (g/ml) の違う砂糖水を4種類作り、屈折率を測定した。

図1のように水面にレーザー光を入射させ、

$$\tan \theta_1 = \frac{l_1}{d_1} \quad \tan \theta_2 = \frac{l_2}{d_2} \text{ を求め、 } n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

を利用して、屈折率を求めた。(n: 屈折率)

このとき作成した砂糖水にコーヒーフレッシュを入れ、砂糖水中を通るレーザー光を散乱させることによりレーザー光の通る経路が見えるようにした。

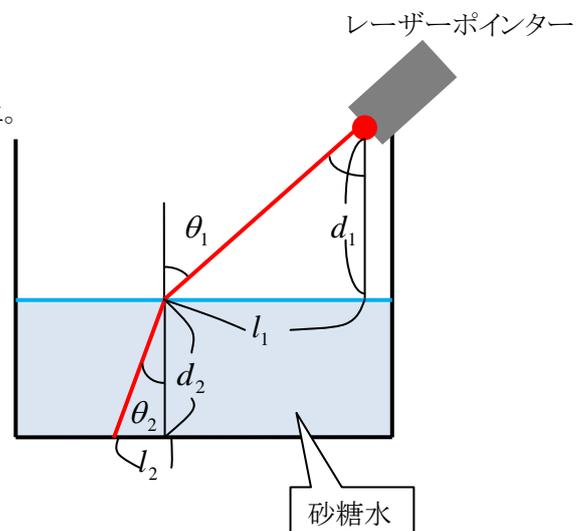


図1 砂糖水を用いた実験

### II. 空気の圧力と光の経路を調べる実験

圧力P、体積V、質量w、分子量M、気体定数R、絶対温度T

$$\text{とすると気体の状態方程式より } PV = \frac{w}{M} RT$$

これを変形して  $\frac{w}{V} = \frac{PM}{RT}$  となるので密度は圧力に比例し、絶対温度に反比例する。

よって、圧力を変化させることにより空気の密度を変化させ屈折率との関係を調べることにした。

ペットボトル内の空気の圧力を変え、その空気を通過するレーザー光の屈折を調べた。自転車の空気入れによって空気をペットボトル内の圧力を変えた。空気を入れることによってペットボトルが膨張して光の入射方向が一定でなくなるのを防ぐためペットボトルを横にして実験を行った。ペットボトルを横にして、光が中心軸を通るようにすると入射する位置は膨張の影響を受けず、屈折率の変化だけを検出できた。図3のようにペットボトルとレーザー光をスタンドで固定し、写真の奥にある方眼用紙に光を当て、内圧を変えたときの光の到達点のずれを測定した。なお内圧はペットボトル内に入れた注射器の体積変化により測定した。



方眼用紙

図2 ペットボトルを用いた実験の写真

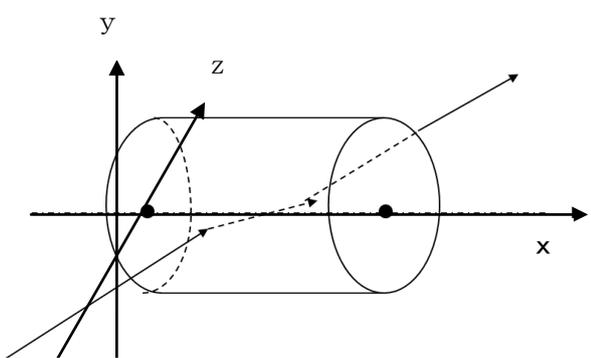


図3 ペットボトルの中心軸を通るように入射させたときの図

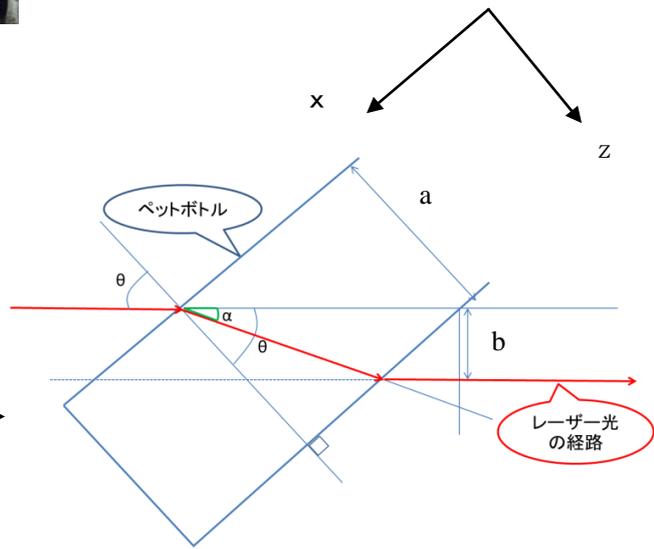


図4 ペットボトルを上から見た図

入射角は  $\theta$ 、屈折角は  $\theta - \alpha$ 、ペットボトルの直径は  $a$ 、光の到達点のずれは  $b$  である。

角  $\alpha$  は 
$$\alpha = \frac{180}{\pi} \arctan \left( \frac{b}{\frac{a}{\sin \theta} - \frac{b}{\cos \theta} \cos \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right)} \right)$$
 で求められる。

### Ⅲ. 空気の温度と光の経路の関係を調べる実験①

ストーブを並べその上の空気の温度を変え、高温の層を通して物体を見て、光の屈折による物体のゆがみを観察する。比較するために常温の時とストーブを使って高温にしたときの写真を撮った。

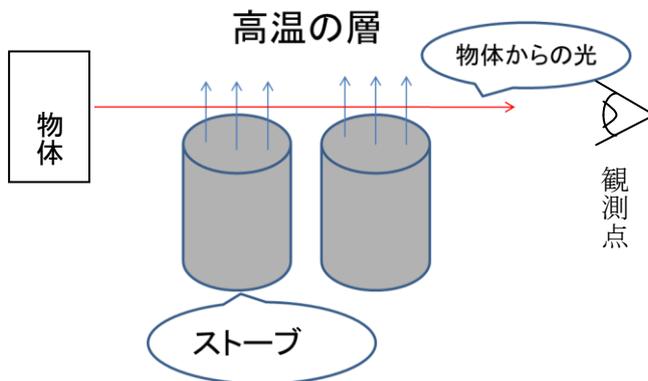


図5 高温の層にレーザー光を入射させた様子



図6 ストーブで空気の温度を変えたときの様子

### Ⅳ. 空気の温度と光の経路の関係を調べる実験②

高温の層を通過する光がどのような曲がり方をするのかを調べるために実験②を行った。図7のようにレーザーポインターの光を上から下に向かってストーブの上の高温層に通した。高温層内に①から⑦の観測点を設け、その7観測点と最終到達点での光が通る位置を調べた。室温時とストーブをつけたときのずれを測定することで、光の経路の変化を明らかにできると考えた。

図7のように、ストーブの上では下部が上部よりも温度が高いため、上部のほうが屈折率が大きく、光の経路は上方向に曲がると思った。

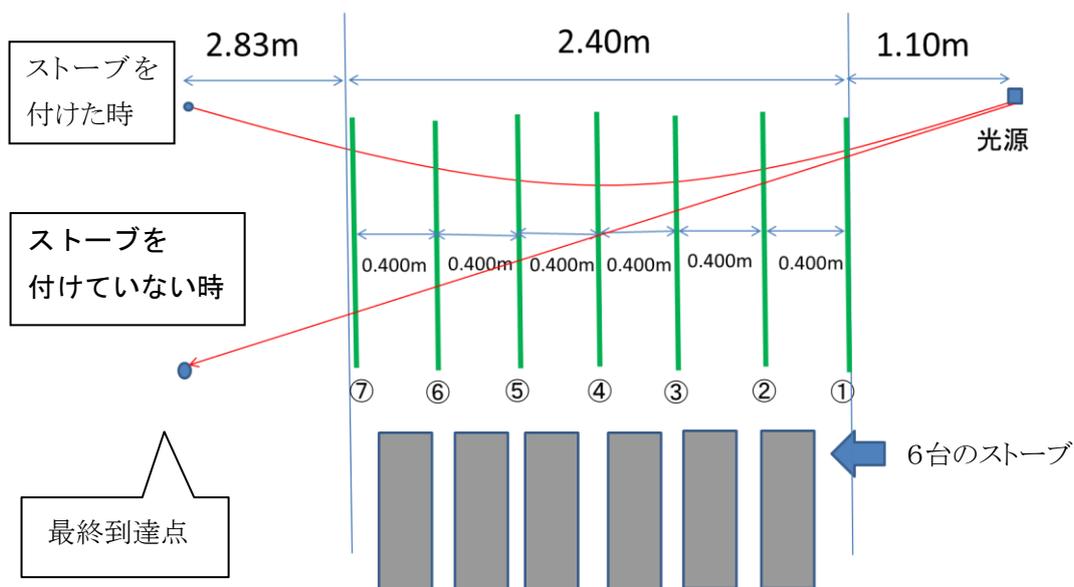


図7 ストーブをつけていないとき(直線)とストーブをつけたとき(曲線)の光の経路の予想

### 3. 結果

#### I. 水溶液の密度と屈折率の関係を調べる実験

図8のように水溶液では密度が大きくなると屈折率が大きくなるという相関関係があるとわかった。

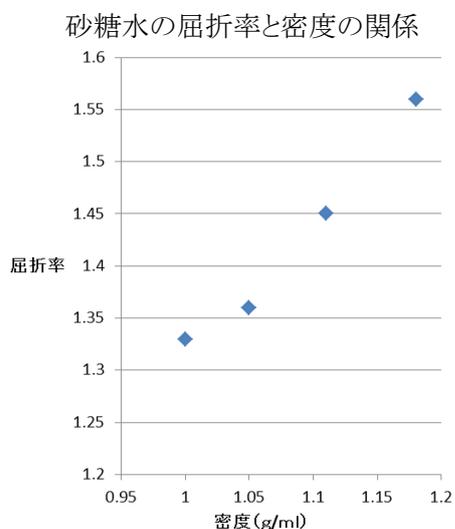


図8 密度と屈折率の関係

#### II. 空気の圧力と光の経路を調べる実験②

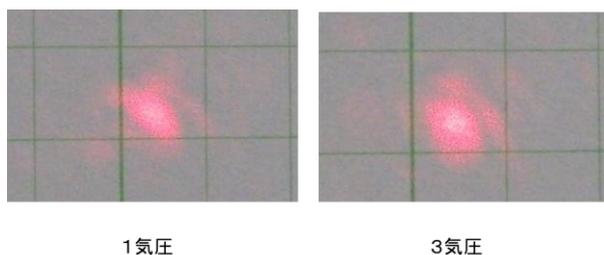


図9: ペットボトルを通した光の到達点のずれ

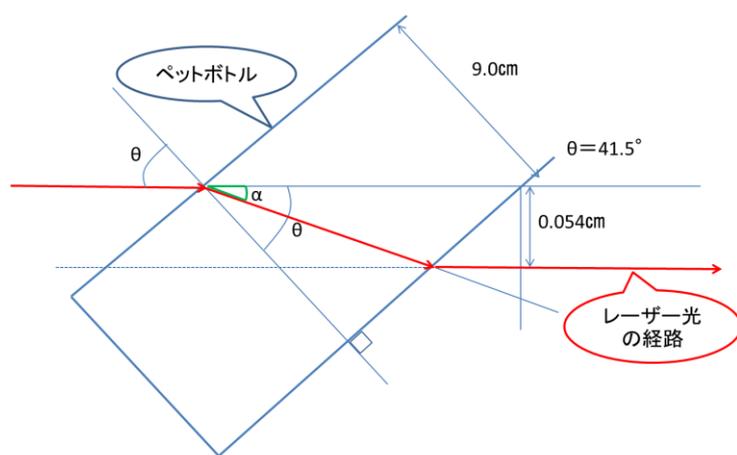


図10: 実験装置を上から見た図

3気圧のとき図10において、入射角が $41.5^\circ$ 、屈折角が $(41.5^\circ - 0.508^\circ)$ であった。

( $\theta = 41.5^\circ$ 、 $\alpha = 0.508^\circ$ ) 空気の屈折率は1.01であった。

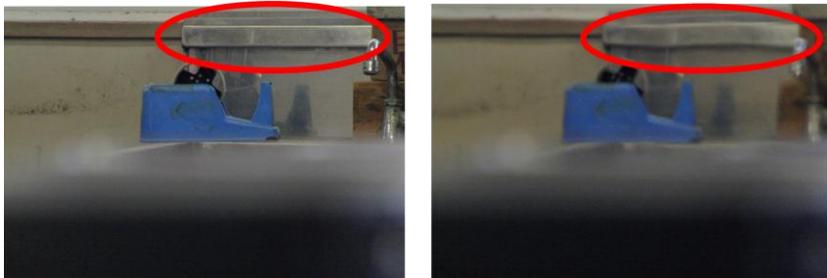
気体と屈折率の関係を調べると、1.0008であったが私たちの値はこれとは大きな差があった。

### III. 空気の温度と光の経路の関係を調べる実験①

空気の温度が変化したことにより、像は上に0.028度ずれた。

写真上での物体の位置のずれとカメラ・物体間の距離から像のずれを計算した。

写真の丸で囲んだ部分について、温度を変化させる前は歪みがないが、高温の層を通したときは物体は歪んで見えた。高温の層を通すことで光が屈折し、物体の見かけの位置が変化することが確かめられた。



常温時

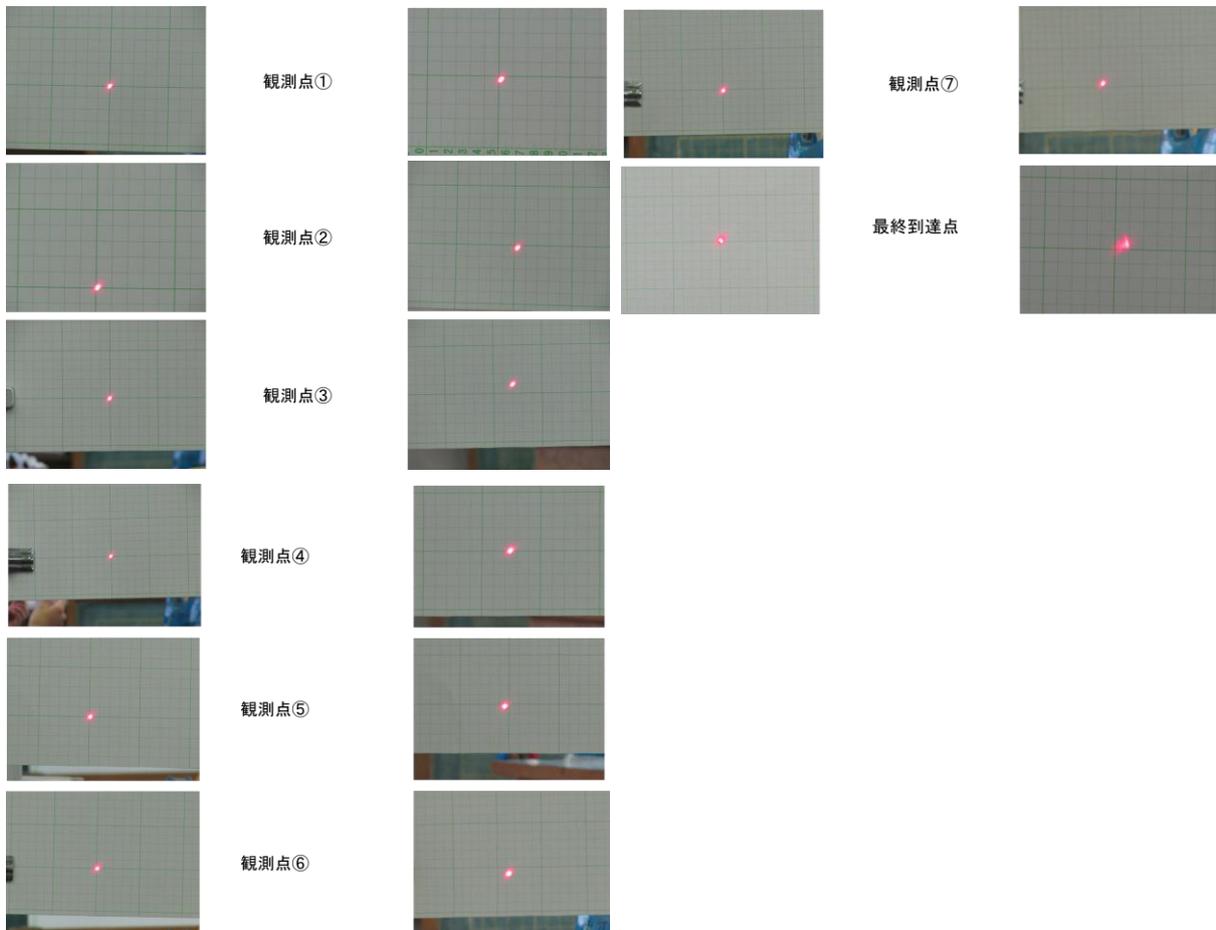
高温時(ストーブ表面温度約300度)

図11: 高温の層を通して見たときの物体の歪みの様子

### IV. 空気の温度と光の経路の関係を調べる実験②

各観測点における光の位置を撮影した写真を図12に示した。左の列はストーブをつけていない時、右の列はストーブを付けている時である。左と右の写真では光の位置がずれていることが分かる。

図12 光のずれの様子の写真



光の位置のずれは

観測点①  $-0.30\text{cm}$     観測点②  $-0.24\text{cm}$   
観測点③  $+0.93\text{cm}$     観測点④  $+0.0026\text{cm}$   
観測点⑤  $-0.26\text{cm}$     観測点⑥  $-0.64\text{cm}$   
観測点⑦  $+0.64\text{cm}$     最終到達点  $+0.31\text{cm}$  であった。

+は上へのずれ、-は下へのずれを表す。これをグラフにした。

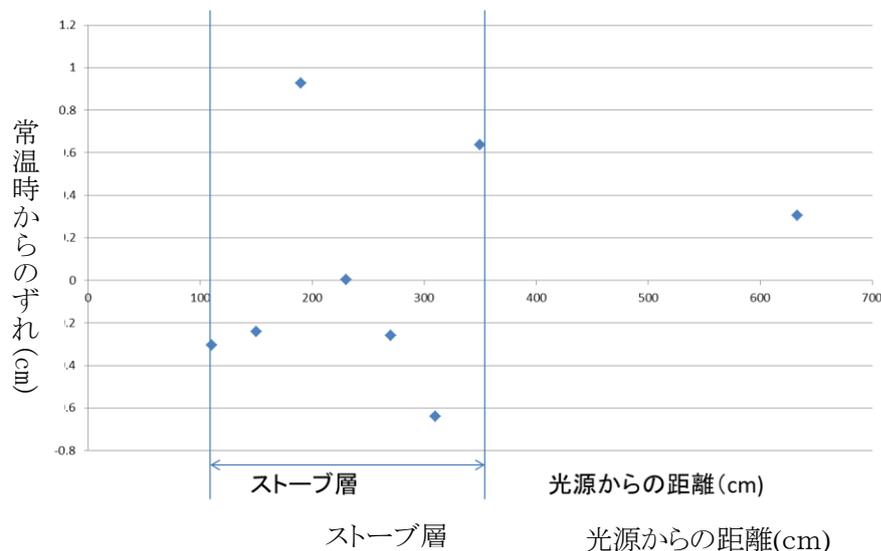


図13 光源からの距離と光のずれの関係

図13のように光が上にずれた場所と下にずれた場所が混在しており、光が上にずれるという仮説を裏付けることはできなかった。

#### 4. 考察

我々はまず、液体を用いた実験から始めた。そして、液体の密度を大きくすると、屈折率は大きくなることが分かった。次に、気体の屈折率もまた、密度との相関関係があると考え、気体の実験に移った。まず、圧力を変えて実験を行ったが、圧力の変化による屈折率の変化を正確に測定することはできなかった。この原因としてペットボトルの膨張の影響を除き切れていなかったことが原因と考えられる。そこで、温度を変えて実験してみることにした。この実験より、温度の変化によって屈折率が変化することが分かった。しかし光は上にずれたところと下にずれたところが混在しており、この原因は高温の層が一様ではなく温度にむらがあったからだと考えられる。

#### 5. 結論

水溶液の密度と屈折率の関係を調べた実験では、密度が大きくなると屈折率も大きくなるという関係が分かった。この結果をもとに気体でも同じ関係が成り立つという仮説を立てて実験を行った。圧力を変化させて密度を変える実験では圧力を上げると屈折率も大きくなったもののこれは誤差が大きく信頼できる値ではなかったため、次に温度を変化させて密度を変える実験を行った。この実験により高温の空気層を通った光は屈折し光の到達点がずれることが確かめられた。今後の課題は圧力の実験においてペットボトルの膨張の影響をより小さくすることと、温度の実験において高温の空気層のむらをなくすことである。

# 静電気の発生と利用

井上千種 廣瀬早都希

## 1. 研究概要

冬によく見られる放電現象を新たなエネルギー源として利用できないかと考え、エレキテル式の静電気発生装置とコップ型コンデンサー、放電加工電極を自作し、放電加工実験装置を製作した。ここでいう静電気発生装置とは、正に帯電しやすい物体と負に帯電しやすい物体を互いに摩擦させることで、静電気を発生させる装置である。次に、発生させた電気をコップ型コンデンサーに貯める。そして、コンデンサー同士を導線でつなぎ、放電加工電極で放電させる。私たちはコンデンサーに貯めた電気を放電させるときのエネルギー利用として、アルミ箔に孔を開ける微細加工を行った。

以下の項目 2 では静電気発生装置の製作と、製作した装置で得られる電圧の測定について述べる。項目 3 では発生した電気を蓄えるコップ型コンデンサーの製作と作成したコンデンサーの電気容量の測定について述べる。項目 4 では製作した静電気発生装置とコップ型コンデンサーを用いて、アルミ箔に孔を開ける放電加工について述べる。最後に項目 5 で私たちの研究の結論をまとめる。

## 2. 静電気発生装置の製作と発生電圧の測定

### (1) 静電気発生装置に用いる物質の選定

#### 【実験方法】

塩化ビニル管を基準としたとき、どの材料がもっとも大きな静電気を発生させるかを調べた。

①20cm×20cm の一定の大きさに切った様々な布を用意する。

(種類は、綿【ガーゼ・平織り(シーチング)・綾織り(デニム)】・レーヨン【ちりめん】・ポリエステル・アクリル【毛糸】・ウール【毛糸】・ポリウレタン【パンチングエナメル】・画用紙・コピー用紙・不織布・絹)

②塩化ビニル管に①の布をそれぞれ 10 回ずつ摩擦させる。

③摩擦させた布を箔検電器に近づけ、帯電力を箔検電器の目盛りを用いて比較した。

この時、箔検電器の 1 目盛りを 1 とし、最小を 0、最大を 18 とした。

#### 【実験結果】

塩ビ管との摩擦により帯電力を箔検電器で測定した結果を表 1 にまとめる。表 1 の結果から、塩ビ管との摩擦帯電で帯電力が 10 以上と高い材料は、ウール【毛糸】=18、絹=18、ポリエステル=12 の 3 種類であることが分かった。

この結果から、静電気発生装置に用いる材料は、ウール(毛糸)か絹が良いと考えられるが、絹は材料が薄く、破れやすいと考え、今回の静電気発生装置ではウールを選択した。

表 1 摩擦による帯電量の比較表

糸の種類 【布の名称】	帯電力*)
1. 綿 【ガーゼ】	0
2. 綿：平織り 【シーチング】	0
3. 綿：綾織り 【デニム】	0
4. レーヨン 【ちりめん】	2.3
5. ポリエステル	<b>12</b>
6. アクリル 【毛糸】	0
7. ウール 【毛糸】	<b>18</b>
8. ポリウレタン 【パンチングエナメル】	7.6
9. 画用紙	0
10. コピー用紙	0.67
11. 不織布	1.3
12. 絹	<b>18</b>

\*)箔検電器における箔の開き度合い

(2) 静電気発生装置の製作

【実験方法】

(1)の実験の結果から塩化ビニル管とウールを摩擦させる静電気発生装置を次の①から④のように製作することにした。

①塩化ビニル管にハンドルを取り付け自由に回るようにした。

②塩化ビニル管に接するようにウールを下から沿わせて取り付けた。

③塩化ビニル管の上に銅板を、ウールの下にアルミ板を取り付け、塩化ビニル管とウールに発生した静電気を銅板、アルミ板に移動させた。

④銅板、アルミ板にたくわえた静電気がコンデンサーに流れるように導線を取り付けた。

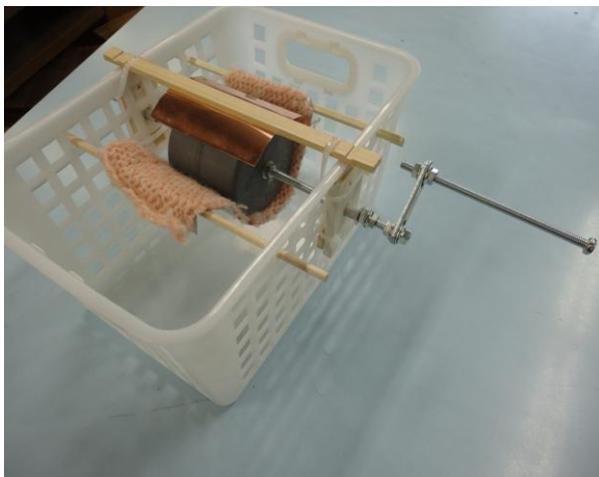


図 1 静電気発生装置の写真

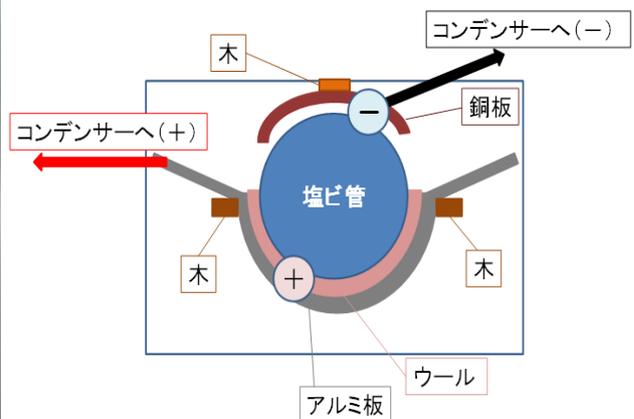


図 2 静電気発生装置断面図

### (3) 静電気発生装置の電圧測定

#### 【実験方法】

静電気発生装置の電圧測定は、1組のコップ型コンデンサー(約 300 pF)に針電極を取り付け、この針電極間に放電が発生するか否かで装置の発生電圧を測ることとする。図 3 は測定の回路図を示したものである。

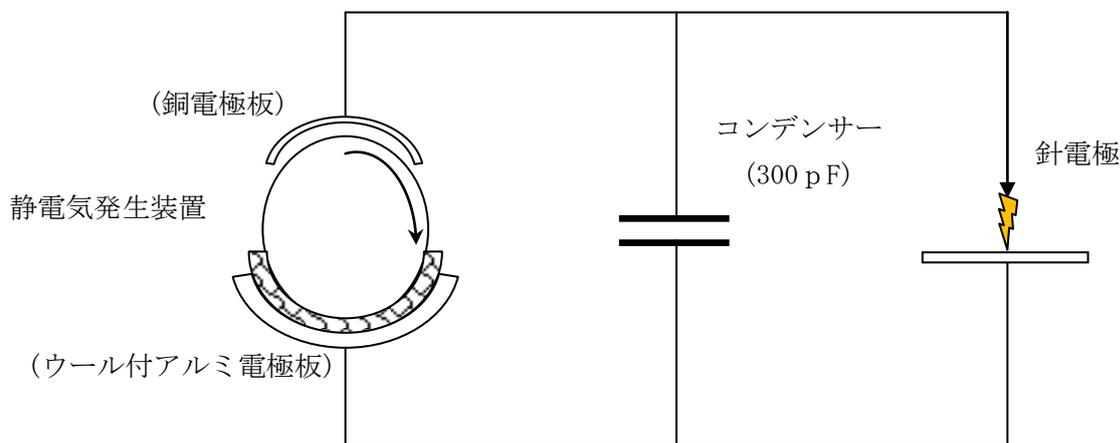


図 3 電圧測定の回路図

この測定はパッシェンの法則による空気の絶縁破壊電圧(約 3,000V/mm)を利用した方法で、電極間距離を変えながらその電極間の放電を確認し、発生電圧を推定するものである。なお、測定にコンデンサーを入れるのは、本装置が塩ビ管の回転摩擦により発生する電荷が電極から徐々に放電するのを防ぐためである。

発生電圧の測定では回転数あるいは回転時間を一定とし、ここで発生する電荷量を一旦蓄えることで発生電圧を評価することとする。なお、今回の測定試験は2~3回転/秒の回転速度で1分間の摩擦時間内に電極間で放電が発生するか否かを確認するとともに、この放電の可否とパッシェンの法則から発生電圧を試算する。

#### 【実験結果】

放電の可否試験は電極間距離に対し、それぞれ3回行い、3回全て放電が確認された場合を○、1~2回の放電を△、放電しなかった場合は×と評価した。

表 2 は各電極間距離に対する放電の可否結果およびその電極間距離から試算した静電気発生装置の発生電圧値を示したものである。

表 2 に示す測定結果より、電極間が 2.5 mm 以前では 3 回放電し、3.0 mm 以後は 3 回放電することがなくなったので、先に述べた絶縁破壊電圧:約 3,000V/mm を用いて、

$$3,000\text{V/mm} \times 2.5\text{mm} = 7,500\text{V}$$

以上であり、

$$3,000\text{V/mm} \times 3.0\text{mm} = 9,000\text{V}$$

以下、すなわち、7,500~9,000V であることが分かる。

表 2 発生電圧測定結果

電極間距離 $L$ [mm]	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
放電の可否	○	○	○	○	○	△	×
発生電圧 $V_p$ [ $\times 10^3$ V]	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	(9.0)	—

○ ; 3回放電、△ ; 1~2回放電、× ; 放電なし  
 発生電圧 = 3,000V/mm  $\times$  電極間距離 (mm)

### 3. コップ型コンデンサーの製作とコンデンサー容量の測定

#### (1) コップ型コンデンサーの製作

##### 【実験方法】

コップ型コンデンサーの製作は、コップ型に切り取ったアルミ箔をスチロールコップの外面に密着させるように貼り付ける。次に、短冊型の電極を準備し、コップ口からはみ出すように先のアルミ箔へ接続固定することでコンデンサーの電極を作る。コップからはみ出した銅板部分は市販のテフロンテープを巻きつけてコンデンサーの一電極を作った。(図4参照) なお、テフロンテープは、充電した電荷が電極の角部から放電しないように絶縁を施すためである。



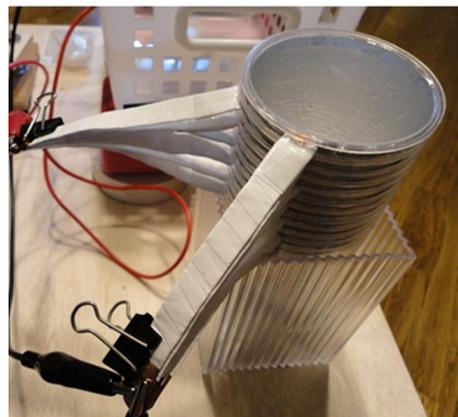
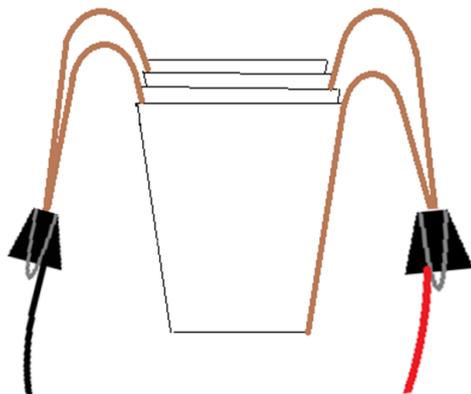
図4 コップ型コンデンサー

#### (2) コップ型コンデンサーの容量の測定

##### 【実験方法】

(1)のように作製したコップ電極を2つ重ね合わせることで1組のコンデンサーを作ることができる。作製したコンデンサーを1組毎にNo. 1、No. 2、No. 3、・・・と名前をつけ、個々のコンデンサー容量をテスターで測定する。今回は全部で7組のコップ型コンデンサーを作製した。

また、No. 1から順に重ね合わせ、はみ出した電極を並列接続した合成コンデンサー(図5参照)も作製し、その容量もテスターで測定した。



(a) 2つのコンデンサーの並列合成の仕方

(b) 並列合成したコンデンサーの外観

図5 重ね合わせした高容量コップ型コンデンサー

### 【実験結果】

表 3 に今回作製したコップ型コンデンサーの容量測定結果をまとめる。また、表 3 にはそれぞれ作製したコップ型コンデンサーを順に重ね合わせ並列結合して得られるコンデンサー容量も記載した。

作製した 7 組それぞれのコンデンサー容量は 380~547pF の容量であり、平均 488pF であった。これらを順に重ね合わせた 7 組並列結合によるコンデンサー総容量は 4,980 pF であり、各コンデンサー容量を並列合成により足し合わせた  $C' = C_1 + C_2 + \dots$  から得られる総容量(=3,415pF)よりも大きな容量となった。

表 3 コップ型コンデンサーの容量測定結果

コンデンサー No.	コンデンサー容量 C [pF]	コンデンサー重ね合わせ並列容量 C' [pF]
1	450	-
2	380	No. 1 ~ 2 ; 1,220
3	547	No. 1 ~ 3 ; 2,030
4	525	No. 1 ~ 4 ; 2,755
5	488	No. 1 ~ 5 ; 3,510
6	511	No. 1 ~ 6 ; 4,219
7	514	No. 1 ~ 7 ; 4,980

### 【実験考察】

#### (1) 並列合成したコンデンサーの容量の増加について

重ね合わせたコップ型コンデンサーの容量が一個当たりの容量を並列合成により足し合わせたられる総容量(=3,415pF)よりも大きな容量(=4,980pF)よりも大きくなった理由は以下のように考えられる。

コップ型コンデンサーを積み重ね、それぞれの電極を並列結合すると図 6 に示すように表わすことができる。

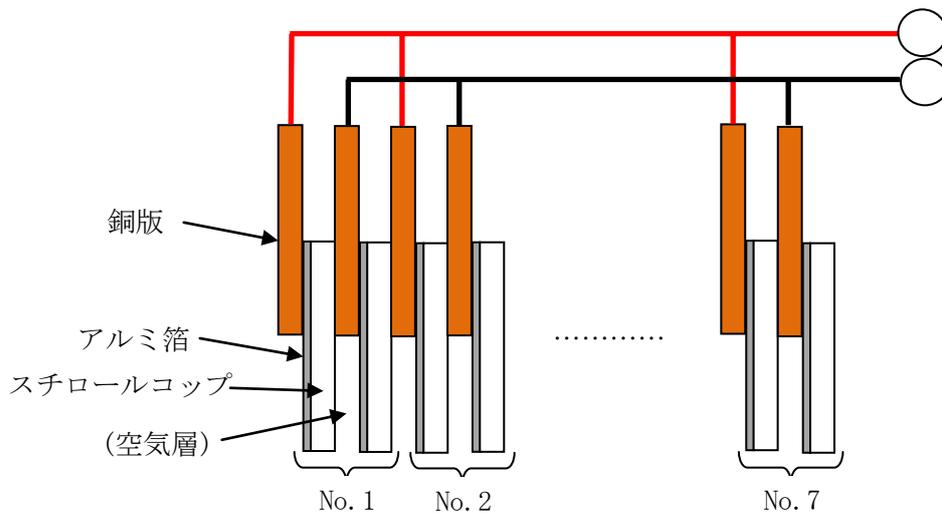


図 6 コップ型コンデンサーを積み重ねた回路状況

図 6 から、コップ型コンデンサーを積み重ねることに容量が増加したのは、例えば、No. 1 の負極と No. 2 の正極で新たなコンデンサーが生じ、その容量が加わったためと考えられる。この考えによれば、7 組のコップ型コンデンサーを積み重ねることにより、間に生じる新たなコンデンサー 6 個と合わせて、合計 13 個のコンデンサーを並列結合することになる。

1 個当たりのコンデンサー容量を平均 488pF として総容量を試算すると、そのコンデンサー容量は 6,344pF となり、測定値よりも大きな結果であった。

これは図 6 で示すように、各コップ型コンデンサーに設けた電極などにより、コップ間に空気層ができることで少しずつ容量が小さくなったためと考えられる。

この空気層がどの程度かを試算するため、電極間にできる誘電体(ここではコップのスチロール)と空気層の並列コンデンサー容量を試算してみる。なお、試算の条件は以下とした。

- ・ スチロールコップの厚み ; 0.1mm
- ・ 電極を形成したコップの上部および下部の直径 ; 上部 7 cm、下部 5 cm
- ・ 電極高さ ; 7 cm
- ・ 取り出し電極の厚み ; 0.1mm
- ・ スチロールの比誘電率  $\epsilon_r$  ; 2.5(文献より)、 空気の比誘電率  $\epsilon_a$  ; 1

電極間にできる誘電体(ここではコップのスチロール)と空気層の並列コンデンサー容量計算式  $C'$  は、

$$C' = \text{電極面積 } S(\text{m}) / \{ \text{スチロール厚み } t(\text{m}) / \epsilon_0 \cdot \epsilon_r + \text{空気層厚 } d(\text{m}) / \epsilon_0 \cdot \epsilon_a \} \cdots \cdots \text{(式 1)}$$

と表わされ、上記条件に対し、空気層の厚みを変化させたときの 1 組のコンデンサー容量は次のように試算される。

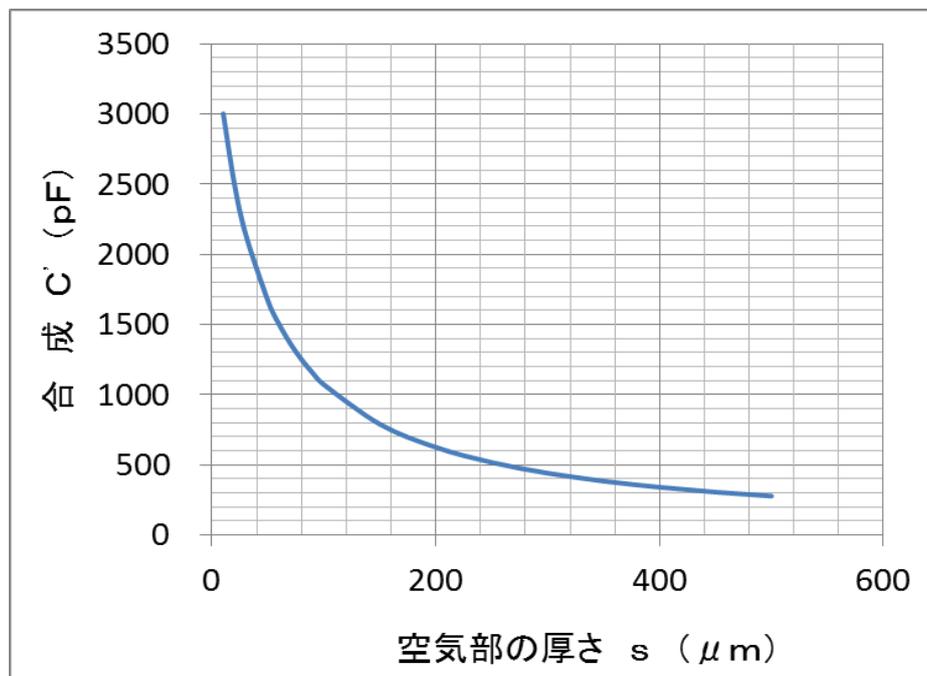


図 7 空気層を考慮したコップ型コンデンサーの容量変化

図7の結果から、今回作製したコップ型コンデンサーに形成された空気層は概ね250~300 $\mu\text{m}$ 程度あると予想される。そこで、重ね合わせたコンデンサーを上部から押し付けて空気層を可能な限り少なくし、そのコンデンサー容量を測定した結果、約6,250pFが得られ、1個の当たりの平均容量から試算した総容量とほぼ同じ値となった。

この結果から、コンデンサーを重ね合わせることで、各コンデンサーの間に空気層が発生していたと考えられる。また、図7の結果によれば、この空気層を更に小さくすることができれば、より大きな容量のコンデンサーを作ることができるものと思われ、今後の課題としておく。

#### 4. 放電加工装置の製作と加工実験

##### (1) 放電加工装置の製作

###### 【実験方法】

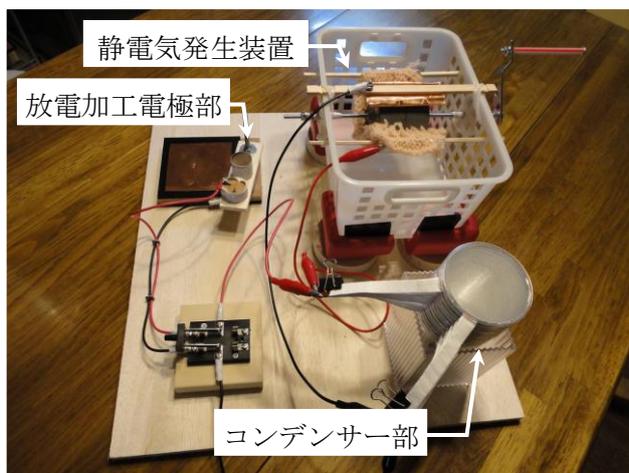
上記(2)の静電気発生装置と(3)の並列合成したコンデンサーを接続し、放電加工装置を製作する。図8は装置の外観写真を示したものである。放電部分は断面積の小さな金属(今回は針と電線ケーブルの銅素線を準備した)と銅板を電極とし、それぞれの電極に設けた接続端子とコンデンサー電極を導線で接続する。

##### (2) 加工実験

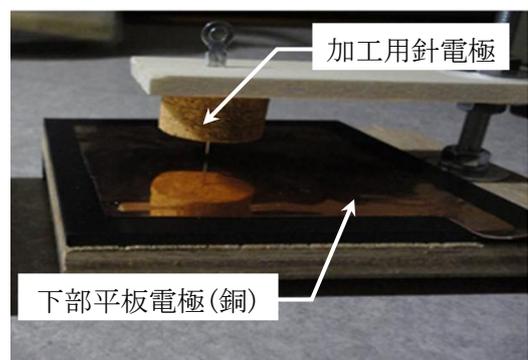
###### 【実験方法】

構造は図3と同じであるが、コンデンサーから加工電極部への接続の間に手動スイッチを挿入し、コンデンサーに蓄えたエネルギーを後、このスイッチを切り替えることで放電加工電極にコンデンサーに蓄えた充電エネルギーを放電する。

しかしながら、実際に放電加工電極に充電エネルギーを放電した際、スイッチの接触部分で放電が発生してしまい、エネルギーを消費してしまうことが分かったため、加工試験ではスイッチは加工電極側にONしたままコンデンサーへの充電を行い、充電後、加工電極である針電極を押すことで電極間距離を近づけ、電極間で放電をさせることとした。この方法により電極間に発生する放電現象を利用して、電極間に置いたアルミ箔に孔加工ができるか実験を行う。



(a) 放電加工実験装置の外観写真



(b) 放電加工電極の拡大写真

図8 放電加工実験装置の外観写真

### 【実験結果】

放電加工電極に縫い針を用い、電極間に厚み  $12\mu\text{m}$  厚さのアルミ箔を置いて穴加工実験を行った。図9は大気中で電極間に5回の放電を繰り返した後のアルミ箔の状況を示したもので、大気中での放電では孔加工できず、傷が入る程度であった。そこで、針とアルミ箔の間に油(サラダオイル)を垂らし、放電加工実験を行った。

図10はその状況示したものである。

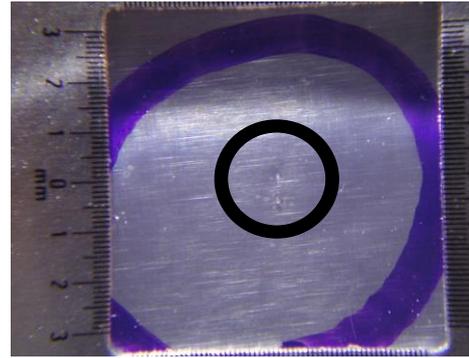
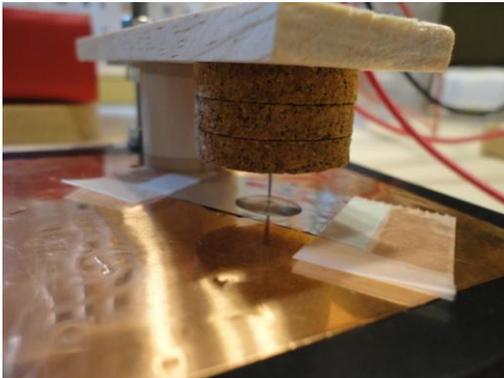
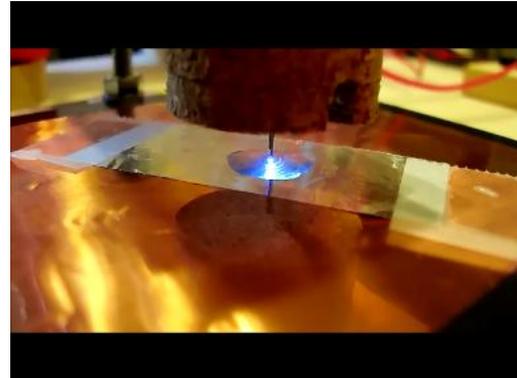


図9 大気中で放電加工したアルミ箔の加工状況(5回の放電)



(a) 放電加工電極間を油で満たした状況



(b) 放電の瞬間

図10 放電加工電極間に油を満した孔開け加工実験の状況

図11は図10の方法で穴加工実験をした結果を示したものであり、電極間に油をたらずことで1回の放電で直径  $0.2\text{mm}$  程度の孔開け加工ができた。また、加工された孔の周囲部分をよく見ると、アルミ箔にクレーター状の変形も見られた。これは、放電によりアルミ箔に力がかかり、変形したものと考えられる。

図11は縫い針を放電加工電極として用いたが、より微細な孔開け加工ができないかを調べるため、針電極を電線ケーブル内の銅素線1本に代え、同様の加工実験を行った。

図12はその孔開け加工結果を示したものである。1回の放電で縫い針を電極とした時よりも小さな孔開け加工ができ、その直径は  $0.1\text{mm}$  以下の小さな孔であった。また、加工された孔の周囲には、変形は小さいものの図11のような影響が見られた。

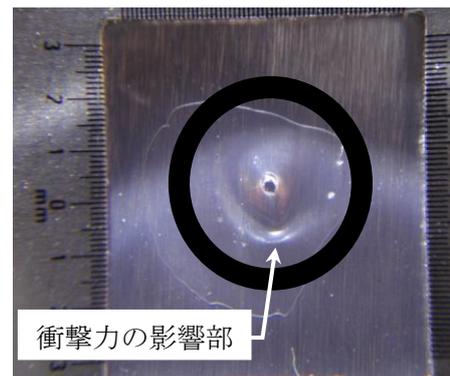


図11

縫い針を電極とした孔開け加工状況  
[(注) 目盛りは  $0.1\text{mm}$  刻みを示す]

以上の結果をまとめると、気中では放電による孔開け加工は難しいものの、電極間を油などの液体で満たして放電を行えば、針電極サイズに応じた孔開け加工ができることが分かった。また、針電極よりも銅素線1本の電極の方が孔開け加工のサイズが小さかったため、微細な孔開け加工を作るためには、加工に用いる電極サイズがより小さい方が良いとわかった。

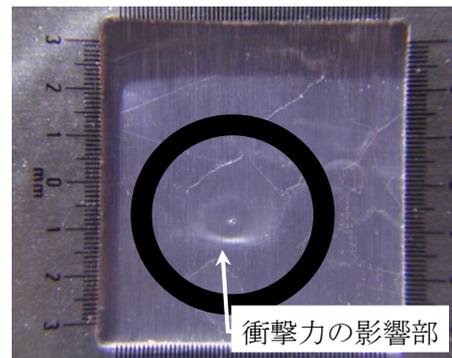


図 12

電線ケーブルを電極とした孔開け加工実験

#### 【実験考察】

- ・放電加工による孔開け加工について

ここで、今回の放電加工実験による孔開け加工について考察してみる。放電加工では図 11～12 に示した加工状況から、コンデンサーに蓄えられたエネルギー  $U$  が作用して加工ができていると考えられる。

加工に関与するエネルギー  $U$  は、

$$U = CV^2/2 = 4,890 \times 10^{-12} \times (7,500V)^2 / 2 \approx 0.14 \text{ (J)} \quad \dots\dots \text{(式2)}$$

と試算される。

アルミ箔に孔が開いたのは、針電極から放出された電子がアルミ箔に高速でぶつかることによりアルミ箔が溶けたためだと考えられる。油を用いずに行った実験では、最初に溶けた表面のアルミが残りの電子の衝突の妨げになったため、孔が開かなかった。そのため、油を用いて実験すると、溶けたアルミが油の方へと流れ、残りの電子のエネルギーがアルミ箔の奥へと伝わり孔が開いたと考えられる。

また、この実験の際に発生した孔の周りのクレーター状の変形は、電子とアルミ板が衝突したことによるアルミ箔のたわみが原因であると考えられる。

## 5. 結論

- (1) エレキテル方式の静電気発生装置を製作し、その発生電圧は約 7,500V であった。
- (2) コップ型コンデンサーの容量は 1 組当たり約 488pF 程度で、7 組のコンデンサーを重ね合わせることで、4,980pF のコンデンサーを作製することができた。

この重ね合わせコンデンサーは、重ね合わせた部分でもコンデンサーを形成されるため、単純に並列接合するよりも大きな容量のコンデンサーを作り出すことができ、かつコンパクトなコンデンサーとなる。

また、コップ型コンデンサーに形成される空気層を小さくなるように工夫すれば、より大きな容量のコンデンサーを作り出せることが分かった。

- (3) 電極間に発生する放電現象を利用し、電極間に油を入れることでアルミ箔への孔開け加工に成功した。加工される孔のサイズは針電極のサイズ(太さ)関係しており、より精密な加工を行うために小さな孔を開けるためには極めて細い針電極を用いればよいことも分かった。

## 6. 参考文献

- ◆ 静電気の基礎と帯電防止技術. 村田雄司(日刊工業新聞社)
- ◆ 静電気のABC - 帯電の謎解きから防ぎ方、応用まで. 堤井信力(講談社)
- ◆ 初等物理シリーズ4 静電気. 永田一清(培風館)

# LED を用いたプランク定数の考察

伊藤里沙子 後早希子 片山杜萌 小山詠未 佐々木耀子 橋本里香

## 1. 緒言

私達は量子力学を基礎づける重要な物理定数であるプランク定数に興味を持った。プランク定数とは、光の粒子性と波動性という相反する2つの性質をつなぐ役割を果たすものである。光子1個のエネルギーを  $E$ 、光の振動数を  $f$ 、プランク定数を  $h$  とすると、

$$E = hf$$

という関係式で表すことができる。また、 $E$  は電子の電荷  $e$ 、立ち上がり電圧 (LED が発光しはじめる電圧)  $V$  を用いて

$$E = eV$$

と表される。この時の  $E$  は LED が光りはじめる時のエネルギーである。以上2つの関係式より、

$$hf = eV$$

が成り立ち、またこれより、

$$h = \frac{eV}{f} \quad \dots \textcircled{1}$$

が導ける。このことから、LED に加える電圧を徐々に上げるとき、立ち上がり電圧と LED が発する光の振動数を調べれば、プランク定数を求めることができると私達は考えた。そこで LED を用いてプランク定数の概数を求めることを試みた。さらに、その結果と文献に載っていたプランク定数の値 ( $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ) を比較すると、実験で求めたプランク定数の値が、赤、黄、緑、青の LED の場合は文献の値よりも小さくなり、ピンク、白の場合は文献の値と比べて小さい値から大きい値まで、値に幅が出るのが分かったので、そのずれが生じる原因について考察した。

## 2. 方法①

実験は以下の手順で行った。また、LED は個体差が大きいので、各色 LED について15回ずつサンプルを取った。

・光り始める電圧からプランク定数を求める

(i) LED が光り始める電圧  $V$  の測定

赤・黄・青・ピンク・白の5色の LED (OptoSupply、赤…OSHR5111A-TU、黄…OSYL5111A-TU、青…OSUB5111A-ST、ピンク…OSPK5111A、白…OSPW5111A-Z3) について、直流安定化電源 (菊水電子工業株式会社、PMC 18-3) を用いて、LED が光り始める電圧を測定した。

(ii) LED の発する光の振動数を求める

振動数  $f$  と波長  $\lambda$  の関係式、

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (c \text{ は光速})$$

を用いて直視分光器(ナリカ株式会社、LS-C)で波長を測定し振動数を求めた。

(iii) プランク定数を求める

式①に  $e = 1.60 \times 10^{-19} [C]$  (文献の値) と、(i)、(ii) で求めた  $V$ 、 $f$  を代入し、プランク定数  $h$  を求めた。

### 3. 結果①

方法①の実験の結果について、図1は15回の結果のうち、10回目の実験値をまとめたものである。また、図2は15回実験したプランク定数の平均値を図示したものである。

いずれの結果についても、 $h = 6.63 \times 10^{-34} [J \cdot s]$  (文献の値) とする。

	赤	黄	青	白	ピンク
電圧 [V]	1.29	1.34	1.90	1.97	2.12
波長 $\times 10^{-7} [m]$	6.00 ~6.50	5.70 ~6.10	4.60 ~5.20	4.30 ~6.40	青 4.30~4.70 赤 5.90~6.40
プランク 定数 $\times 10^{-34} [J \cdot s]$	4.14 ~4.48	4.08 ~4.37	4.67 ~5.28	4.53 ~6.74	青 4.87~5.32 赤 6.68~7.25

図1 方法①から求めた各色についての光り始める電圧、波長、プランク定数

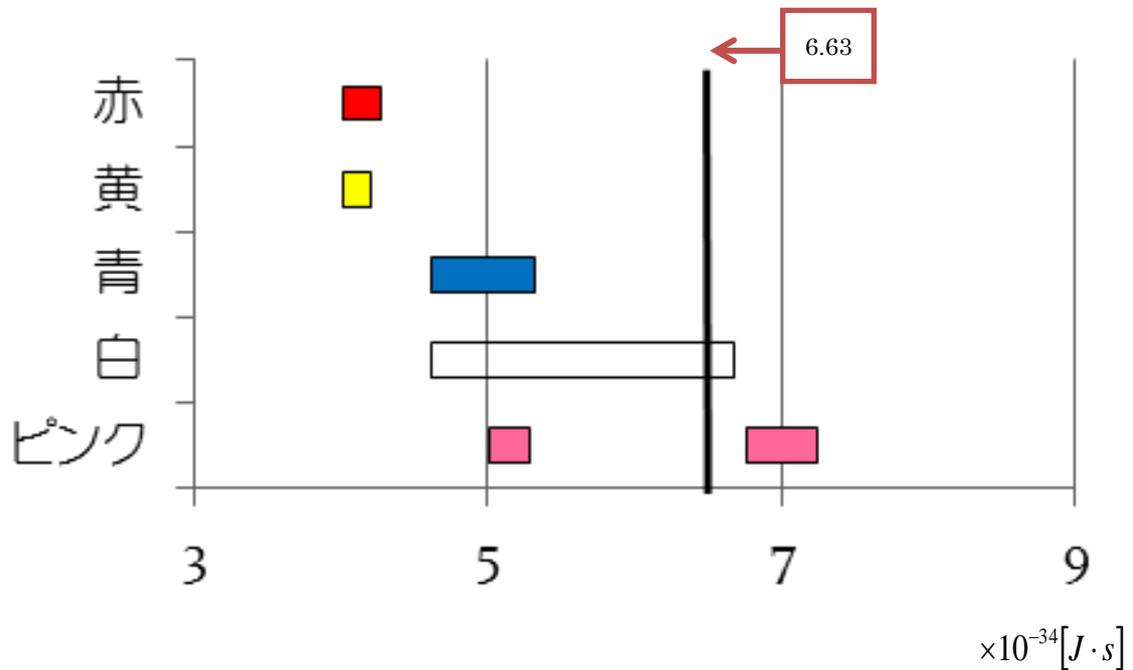


図2 実験から求めた6色それぞれのプランク定数の範囲

図1でピンクの欄について赤色と青色に分かれているのは、スペクトルを観察した際に赤色と青色に分かれていたからである。また図2のグラフを見て分かるように、各色のプランク定数の値が文献の値から大きくずれた。

#### 4. 考察①

実験から得たプランク定数の値が文献値から大きくずれることがわかった。

波長は直視分光器から求めたため正確であると考えられるので、緒言の①式より原因は電圧であると考えられる。

そこで目視で光はじめる電圧を求めるのではなく、電流電圧特性グラフから光りはじめると考えられる電圧(立ち上がり電圧)を求めた。

すると下のグラフからわかるように、目視で求めた光りはじめる電圧と、電流電圧特性の立ち上がり電圧が大きくずれることがわかった。

以上から研究方法①の光りはじめる電圧を、目視から電流電圧特性の立ち上がり電圧に変えて、再びプランク定数を求めた。

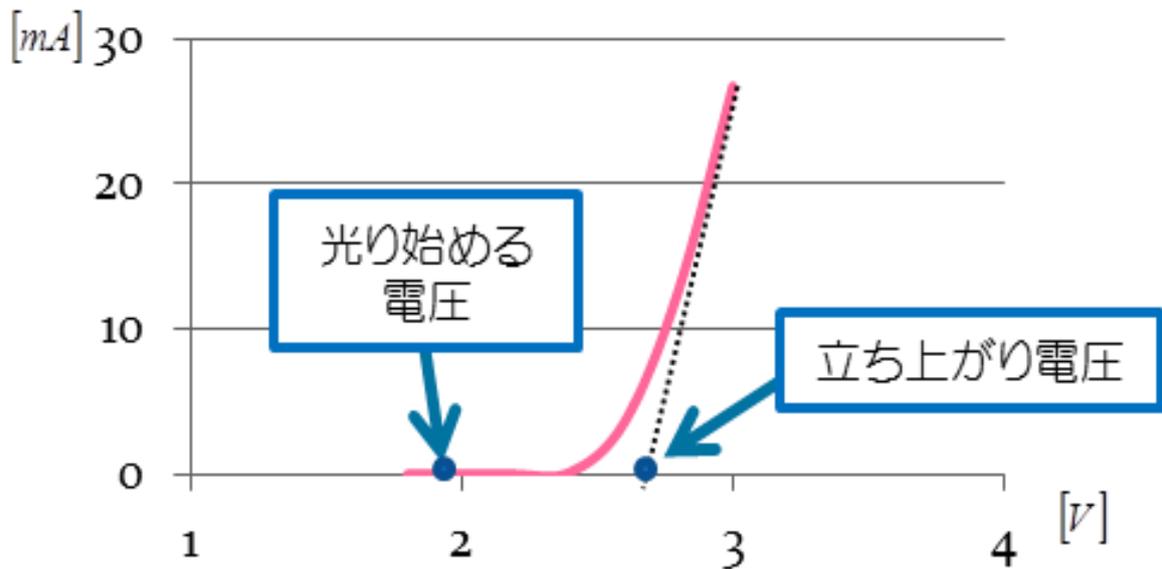


図3 電流電圧特性のグラフ

## 5. 方法②

- ・電流電圧特性からプランク定数を求める

(i) デジタルマルチメーター(横河メータ&インストルメンツ株式会社、KCC-REM-IMY-EEN320)を用いて、電流電圧特性のグラフを作成する。指数関数の傾きがほぼ一定になるところに近似した直線の  $x$  切片を立ち上がり電圧  $V$  とし、その値を求めた。

方法①と同様に(ii)、(iii)からプランク定数を求めた。

## 6. 結果②

結果①同様、図3は10回目の実験値で、図4は15回平均したプランク定数の値のグラフである。

結果①とは違い、電流電圧特性の立ち上がり電圧から求めたプランク定数の値は、文献の値より近くなった。

しかし白、ピンクのLEDから求めたプランク定数の値は大きくずれたままだった。

	赤	黄	青	白	ピンク
電圧 [V]	1.84	1.97	2.62	2.83	2.90
波長 $\times 10^{-7} [m]$	6.00 ~6.50	5.70 ~6.10	4.60 ~5.20	4.30 ~6.40	青 4.30~4.70 赤 5.90~6.40
プランク 定数 $\times 10^{-34} [J \cdot s]$	5.90 ~6.39	5.99 ~6.41	6.44 ~7.28	6.49 ~9.66	青 6.66~7.28 赤 9.13~9.91

図4 方法②から求めた各色についての立ち上がり電圧、波長、プランク定数

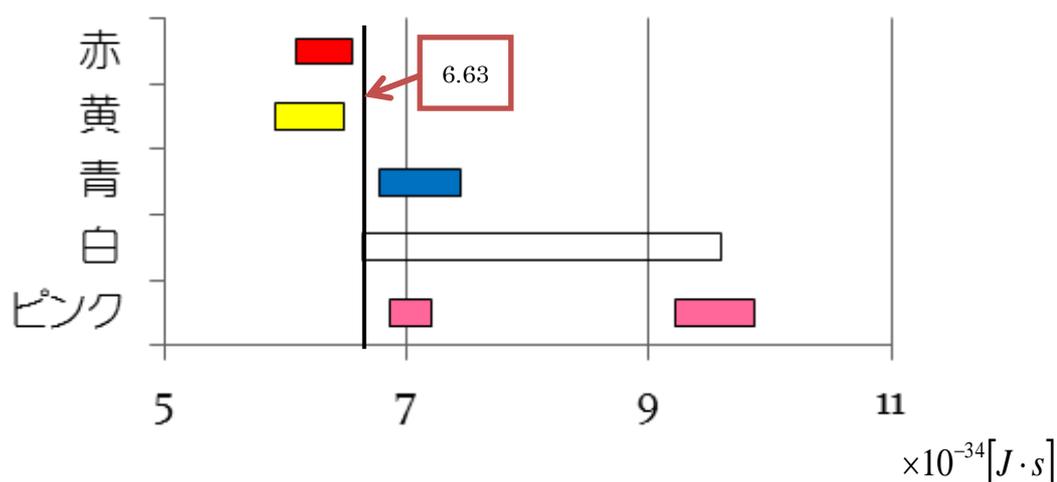


図5 実験から求めた6色それぞれのプランク定数の範囲

## 7. 考察②

1. 目視で求めた光りはじめる電圧から求めたプランク定数よりも、電流電圧特性から求めたプランク定数の方が文献値により近くなったことから、 $eV = hf$  の  $V$  は立ち上がり電圧を示すと考えられる。
2. 結果①、②より、赤、青、黄と比べて、白、ピンクのLEDから求めたプランク定数が大幅にずれていることが分かったので、私たちはその原因を調べるためにLEDを解体してみた。すると、白、ピンクのLEDには蛍光体というものが使われており、赤、青、黄のLEDには使われていないことがわかった。(写真1)

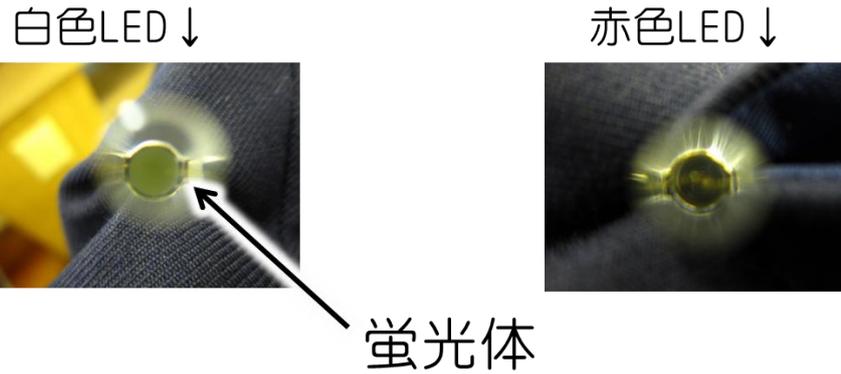


写真1 白色 LED と赤色 LED の内部

そこで白色 LED について、スペクトルが赤～青まで観察できたことと、蛍光体には吸収した光のエネルギーよりも小さいエネルギーの光を出す性質があることから、白色 LED の構造は「青色 LED+蛍光体」か「紫外線 LED+蛍光体」のどちらかであると予想した。

次に、白色 LED の構造がどちらの構造かを特定するために実験を行った。  
紫外線に反応し発光するもの（パスポートや蛍光ペン）に当てて発光するか調べた。

## 8. 方法③

・LED の構造を調べる

求めたプランク定数と文献の値との間に誤差が生じたため、その理由を考察する一環として LED の内部構造を調べた。

→白色 LED について、紫外線に反応し発光するもの（蛍光ペン、パスポート）に、LED から発せられた光を当て、その発光の有無を調べた。

## 9. 結果③

蛍光ペン、パスポートのいずれの場合においても、紫外線では発光したが、白色 LED では発光しなかった。（写真2、写真3）



紫外線を当てた場合



白色 LED を当てた場合

写真2 蛍光ペンに紫外線、白色 LED を当てた実験の結果



紫外線を当てた場合



白色 LED を当てた場合

写真3 パスポートに紫外線、白色 LED を当てた実験の結果

以上の実験より白色 LED の構造は「青色 LED+蛍光体」であると判断した。

ピンク色 LED についても同様に、スペクトルが赤と青に分かれていたこと、蛍光体には吸収した光のエネルギーよりも小さいエネルギーの光を出す性質があることの2点から、白色 LED の構造は「青色 LED+蛍光体」であると考えた。

### 10. 考察③

・蛍光体の仕組みを用いた白、ピンク色 LED のプランク定数が文献の値よりも大きくなった理由についての考察。

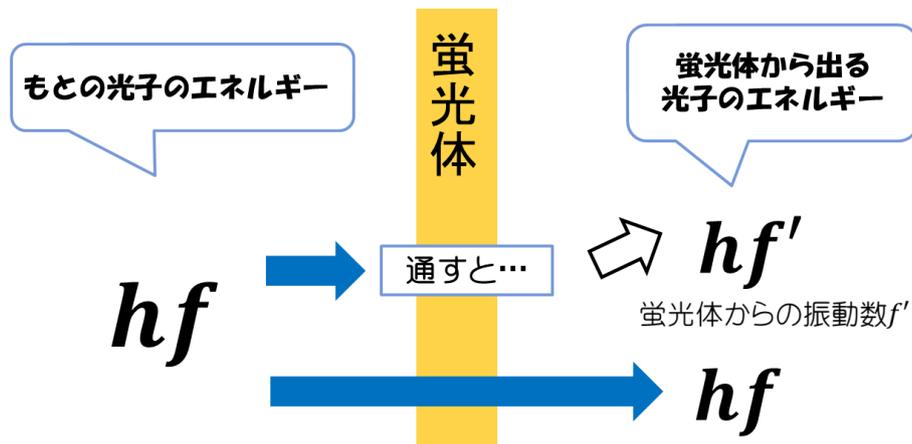


図4 蛍光体を通したときの光のエネルギーの変化

図4の通り、もとの光子のエネルギーを  $hf$  とすると、この  $hf$  の一部が蛍光体を通ることによって  $hf'$  のエネルギーに変わる。

このとき、 $f'$  は蛍光体から出た光の振動数である。

また、蛍光体には吸収した光のエネルギーよりも小さいエネルギーを出す働きがある。

したがって、 $hf' < hf$  より、

$$f' < f \quad \dots \text{②}$$

$f'$  から求めたプランク定数を  $h'$  とすると、 $h'f' = eV$  となる。

また、もとの光子のエネルギーについても  $hf = eV$  が成り立つ。

よって、

$$h'f' = hf \quad \dots \text{③}$$

式②、③より、

$$h' > h$$

以上より  $f'$  から求めたプランク定数  $h'$  が大きくなると考えた。

## 1 1. 結論

- ①立ち上がり電圧（電流電圧特性）を用いて赤・黄・青色 LED から求めたプランク定数の値は、文献値にほぼ一致した。
- ②LED の光り始める電圧と、電流電圧特性から求めた立ち上がり電圧は異なった。  
電流電圧特性から求めたプランク定数が、光りはじめる電圧から求めた場合よりも文献の値に近いことから、 $eV = hf$  の  $V$  は立ち上がり電圧を示すと考えられる。
- ③白、ピンク色 LED から求めたプランク定数は内部の蛍光体によって本来よりも小さい振動数の光が出てきたために、光り始める電圧と立ち上がり電圧（電流電圧特性）、どちらの場合においても文献値と比べて大幅にずれた。

## 1 2. 参考文献

- ・コンピュータを使った実験と計測  
鹿兒島大学物理学部物理科学科個体物理講座  
重田 出 助教授
- ・啓林館 物理 I 物理 II

# 早押し判定回路を作ろう！

鈴木 湧久 深作 亮介 村橋 令隆

## 1. はじめに

私たちは、クイズ番組などで誰が最初にスイッチを押したのかを判定する仕組みに興味を持って、早押し判定を実際に行うことを目標に、回路を作製した。この回路を早押し判定回路と呼ぶ。

早押し判定回路とは、複数人の競技者がスイッチを押し、誰が最初にスイッチを押したかを判定し、出力する回路のことである。

## 2. 方法

早押し判定を実現するためには、大きく分けて2つの構造が必要となる。第一に、スイッチを押して、離れた後も入力信号を保持する必要があるので、NOR 回路 (図1) を組み合わせた、デジタル回路の記憶素子である RS フリップフロップ (図2) を用いて信号を保持させる。また、敗者の信号が反映されてはならないので、勝者の信号の否定を AND 回路 (図3) に入力することで、先に押した方のみが反映される。これらを回路に組み込むことによって、2人のうちどちらが先にスイッチを押したかを判定する回路 (以下、2人型回路) を完成させた (図4)。

また、最初に2人型回路を考えた際には、回路の電源を入れた時点で、RS フリップフロップが  $S=1, R=1$  の状態になり、起動時の Q の値が定まらないことを避ける必要があると思い、NOT 回路 (図5) を組み込んだ回路 (図6) を考えたが、起動後リセットをしてから競技を行うことで、NOT 回路を用いる必要がないことに気づき、AND 回路の数を減らせるため、NOT 回路を組み込まなかった。

3人以上の回路を作成するには、人数分の RS フリップフロップの増設に加え、敗者の人数が増えるため、AND 回路の増設も必要である。この方法で回路を構成する際には、n 人型回路の場合、RS フリップフロップは n 組、AND 回路は n 人の入力部に n-1 人分の信号の否定を送るため、 $n(n-1)$  個必要となる。3人型回路の場合の AND 回路の個数は、 $3 \times 2 = 6$  (個) で済むため、回路 (図7) を完成させることができた。

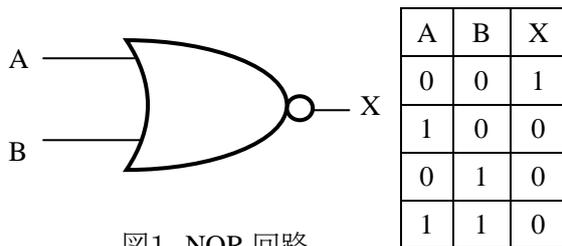


図1 NOR 回路

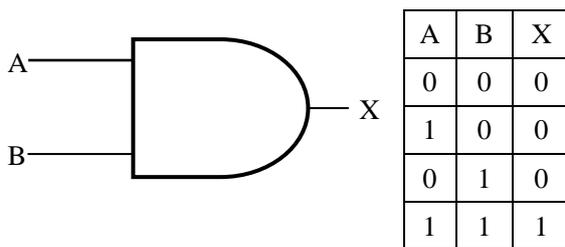
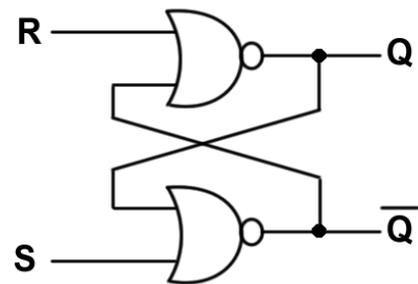


図3 AND 回路



R	S	Q	$\bar{Q}$
0	0	値を保持	値を保持
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	値が定まらない	

図2 RSフリップフロップ

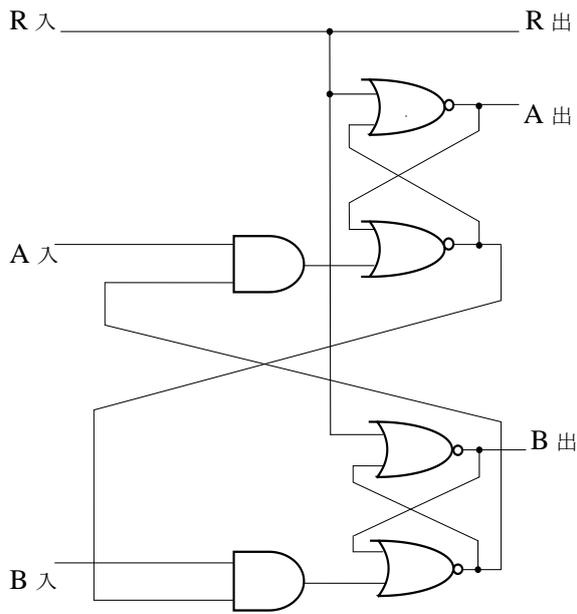


図4 2人型回路

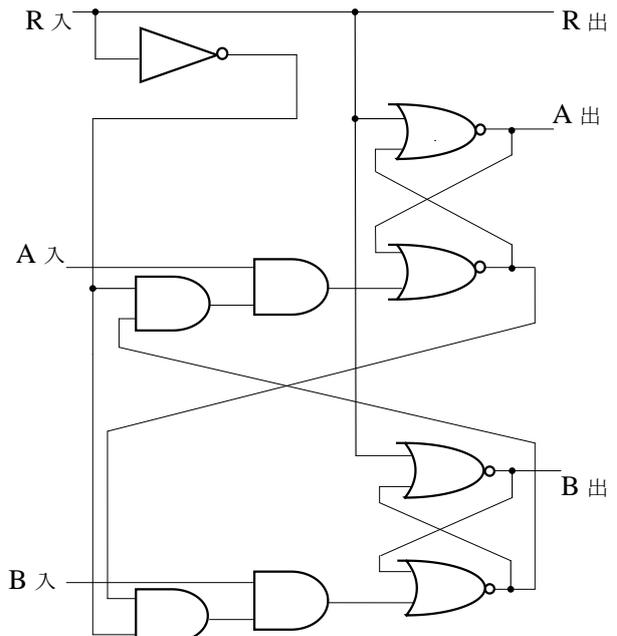


図6 NOT回路を用いた2人型回路

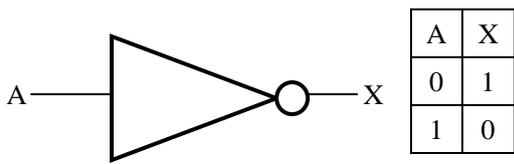


図5 NOT回路

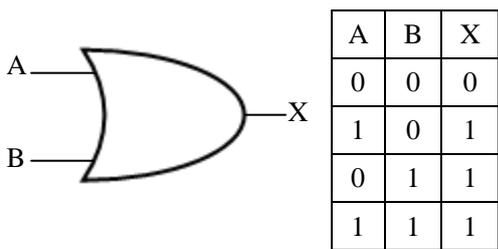


図8 OR回路

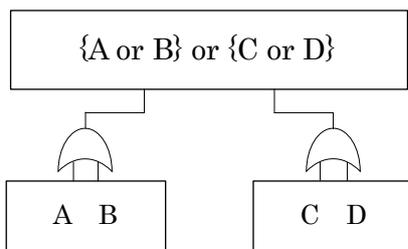


図9 組み合わせ型回路 略図

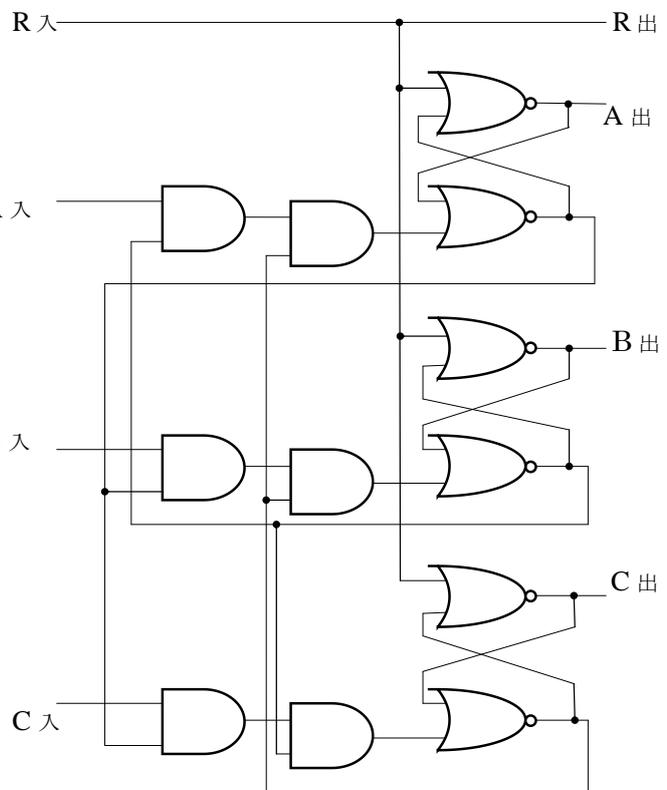


図7 3人型回路

しかし、4人型回路の場合、AND回路は $4 \times 3 = 12$ (個)も必要で、回路規模が大きくなるため、誤作動の発生箇所を特定することが難しく、完成させることができなかった。5人以上の場合も、人数が増えるにつれ必要な AND 回路の個数が増加して、さらに回路規模が大きくなるため、この方法で完成させることが可能なのは3人型回路までであると判断した。そこで、4人以上の回路を作る新たな方法を考えた。

#### ・組み合わせ型回路

4人以上の早押し判定を行うのに、2人型回路と3人型回路を複数組み合わせることで、回路を作製することを試みた。4人型回路の場合、競技者を A,B,C,D として、まず2つの2人型回路で A と B、C と D の早押し判定を行い、その勝者同士で3つ目の2人型回路で決勝にあたる判定を行えば、勝者を判定できると考えた。しかし、2人型回路の入力は2つであるため、4人の出力全てにつなぐことはできず、4人のうちの2人につなぐと、つないでいない人が最初の回路で勝ってしまうと3つ目の回路に反映されない。そこで、A と B、C と D の出力を OR 回路(図8)に入力することで、最初の回路でどちらが勝とうとも、3つ目の回路に判定させることを可能にした。すなわち、3つ目の回路で最初の2つの回路からの信号のどちらが早かったかを判定し、最初の回路の結果と組み合わせ、4人のうち誰が勝者かを判定する。(図9、11)

また、奇数人で早押し判定を行う場合、3人型回路を用いる必要がある。その際 OR 回路は2つ必要で、1つ目を2人に、2つ目を残りの1人と1つ目の出力につなげば、3人のうち誰が勝っても次の回路に反映させることができる。(図10)

### 3. 結果・考察

2人型回路、3人型回路を、OR 回路を用いて組み合わせることにより、理論上は何人でも勝者を判定することが可能になった。大人数で早押し判定を行う際は、1つ当たりの回路規模が大きくなることを避けるため、より少ない人数の早押し判定回路を組み合わせ、大人数の判定を行う方法が有効であることが分かった。

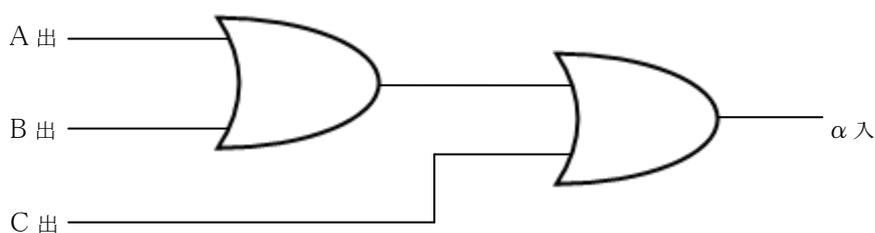


図10 3人型回路に用いる OR 回路の配置

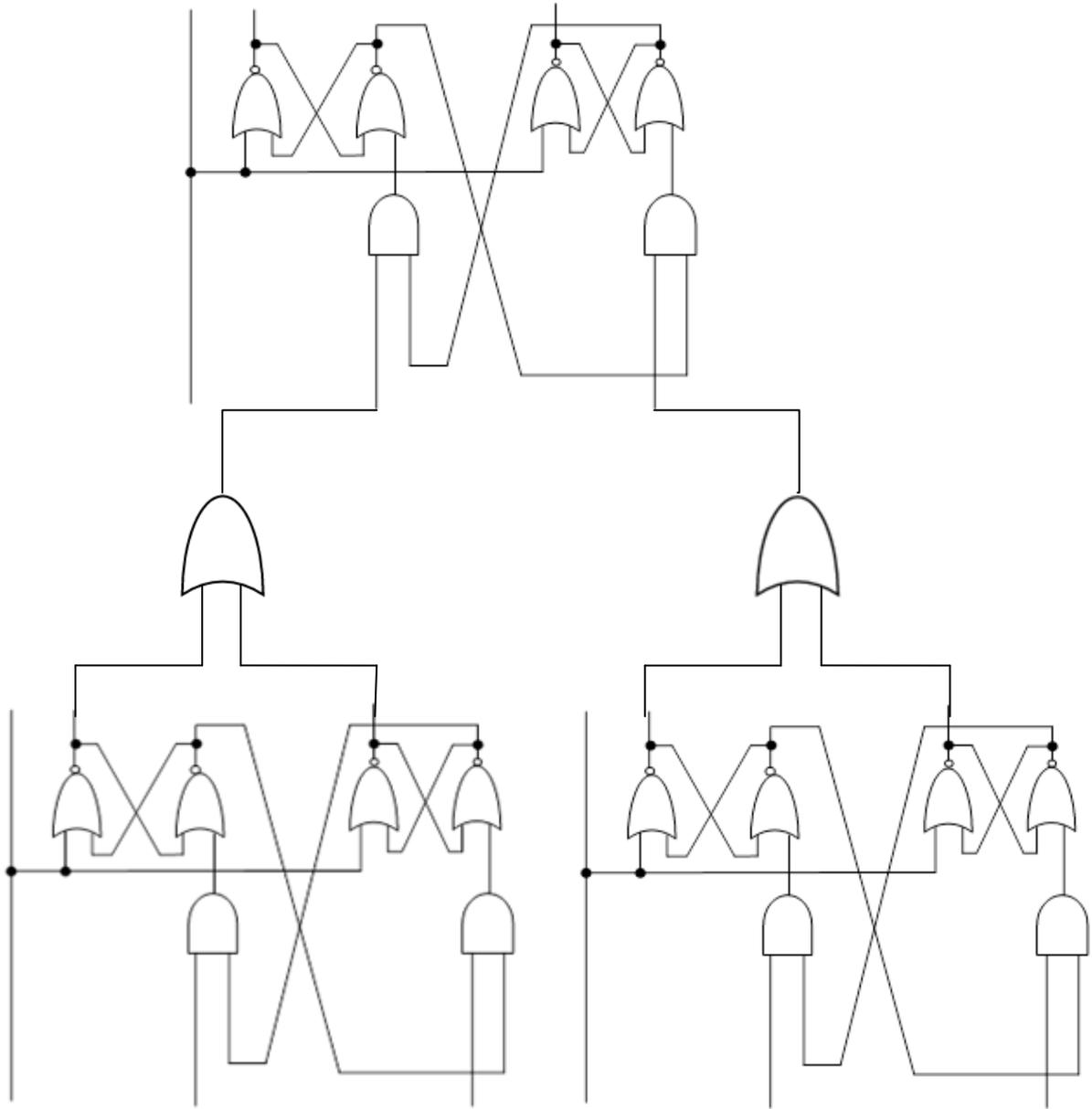


图11 4人型回路

# ストップウォッチ回路の設計と作製

岡崎祐樹 隠岐光 東谷健太

## 1. 緒言

ストップウォッチは現在私達の身近にある電子機器の一つである。私たちは、ストップウォッチの構造に興味を持ち、IC等の電子回路のみを用いて、ストップウォッチを作製することにした。始めに、計時、停止、リセットの3つの状態を1つのスイッチで実現する回路を作製し、次に2つのスイッチを用いて、1つのスイッチで計時と停止の2つの状態を交互に切り替え、もう1つのスイッチでリセットとラップをとる回路を作製し、実際に動作させた。

## 2. 方法

ストップウォッチ回路の作製のために用いたICは以下の通りである。

74HC04 (NOT)

74HC08 (AND)

74HC161 (カウンタ、レジスタ)

74HC283 (加算器)

74LS47 (7セグメントLED用IC)

また、その他に

クロック信号(CKと表記) 1Hz, 1000Hz

スイッチ(ボタン式のもの)

7セグメントLED(値の表示)

を利用した。

ストップウォッチは、計時、停止、リセットの3つの状態をスイッチで切り替えられることによって動作している。3つの状態を以下のように状態①、②、③と定義した。

- ・状態①…ストップウォッチの値が0で停止している状態。
- ・状態②…ストップウォッチの値が動いている状態。
- ・状態③…ストップウォッチの値を保持して、表示が停止している状態。

この3つの状態を切り替える機能と、計時機能を持たせることでストップウォッチの機能が実現できると考えた。

状態の切り替えのための回路を、「制御」

計時を行うための回路を、「本体」と呼ぶことにする。

### (1) ボタン1つのストップウォッチ

始めに、1つのスイッチで3つの状態を切り替える回路を作製した。

私達はスイッチを押すたびに状態が切り替わるということに注目し、CK信号を送るたびに内部の値が増えるカウンタを制御に利用することを考えた。

カウンタの値が

0000→状態①

0001→状態②

0010→状態③

…といったように、状態を切り替えるような回路を考えた。

ここで、状態③の次の状態、つまりカウンタの値が 0011 になったときのストップウォッチの状態を考える。作製を目指すストップウォッチは、3 回目のスイッチを押すと、状態が①に戻るというものだった。そこで、私達はカウンタの値が 0011 になった時に、カウンタの値を 0000 に戻す回路を作製した。カウンタの出力の 1 の位と 2 の位を AND に接続し、その出力をカウンタの CLR に接続することで、状態③の次に状態①に戻るようにできた (図 1)。

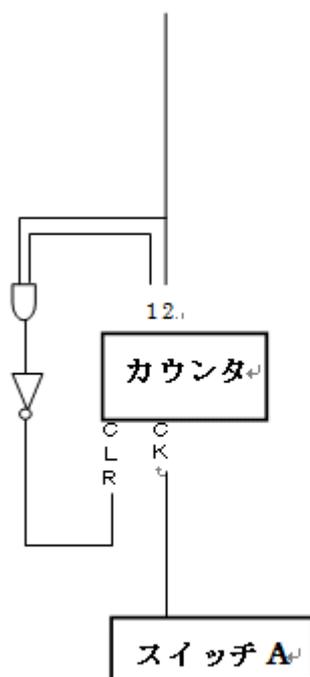


図 1

次に、計時機能を行う部分 (本体) を作製した。

1 秒ごとに内部の値が 1 ずつ増えるということに注目し、私達は加算器を用いて値を 1 ずつ足していく回路を考えた。繰り返し足し続けるために、レジスタを用いて値をその都度保持することを考えた。

レジスタの出力を加算器に入力し、加算器のもう 1 つの入力には 0001 を入力しておく。加算器の出力をレジスタに出力し、レジスタの CK に 1Hz の CK 信号を入力することで、1 秒ごとに値を読み込み、値を 1 ずつ足していくようにした (図 2)。

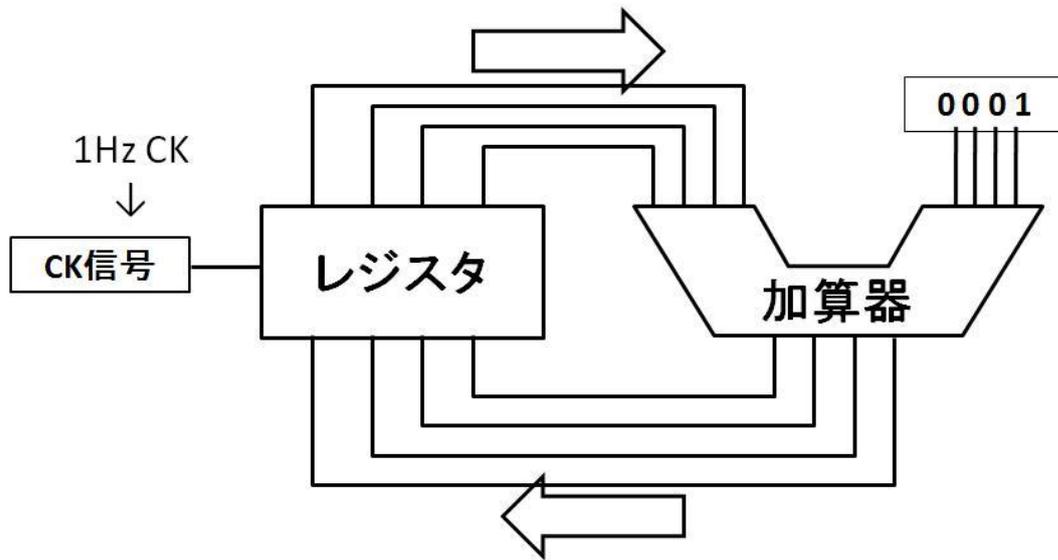


図2

最後に、制御と本体を接続するために  
 カウンタの1の位の値を NOT に接続し、その出力をレジスタの LOAD に接続した。  
 カウンタの1の位と2の位の値を AND に接続した出力を NOT に接続し、その出力をレジスタの  
 CLR に接続した(図3)。

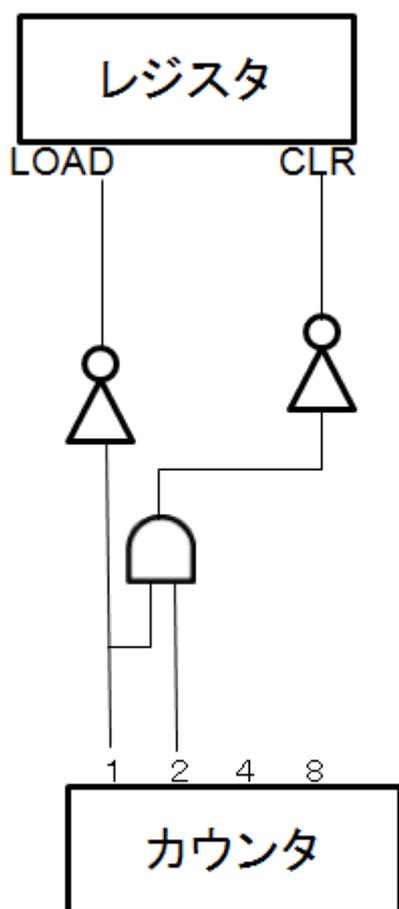


図3

(2) ボタン2つのストップウォッチ

(1)で作製したストップウォッチの機能は  
 1回目にスイッチを押すと、計時が始まり  
 2回目にスイッチを押すと、計時を停止し  
 3回目にスイッチを押すと、値を0に戻す  
 というものだった。

ここで、このストップウォッチと一般的なストップウォッチの機能を比較してみると  
 このストップウォッチは停止後に停止した値から再び動き始める動作ができないという事が分  
 かった。

そこで、次に再び動き始めることが可能なストップウォッチを作製した。

スイッチをAとBの2つとし、作製するストップウォッチの機能の目標を  
 状態②でスイッチAを押すと、計時が始まり (状態①)

状態①でスイッチ A を押すと、計時を停止し (状態②)

状態②でスイッチ A を押すと、計時を再開し(状態①)

状態①でスイッチ B を押すと、動作は起こらず

状態②でスイッチ B を押すと、ラップ(そのときの時刻を別の時計に記憶させる)をとり

状態③でスイッチ B を押すと、値を 0 に戻す(状態①)

とした(表 1)。

	スイッチ A を押す	スイッチ B を押す
状態①	計時開始 (状態①へ移行)	動作無し
状態②	計時停止 (状態②へ移行)	時刻保持 (ラップ)
状態③	計時再開 (状態①へ移行)	リセット (状態①へ移行)

表 1

(2)のストップウォッチは(1)で作製したストップウォッチの回路を参考に回路を作製した。

制御の部分には、同じくカウンタを利用することにした。

カウンタの CK にスイッチ A を接続し、スイッチ A を押すたびに状態①と②を切り替える回路を作製するために、カウンタの値が交互に変化しているところを探したところ、1 の位が 0 と 1 が交互に繰り返されていることが分かり、これを利用することにした。カウンタの 1 の位の値を NOT に接続し、その出力をレジスタ A の LOAD に接続した。カウンタの 1 の位の値とスイッチ B の値を AND に接続した出力を NOT に接続し、その出力をレジスタ A, B の CLR に接続した(図 4)。

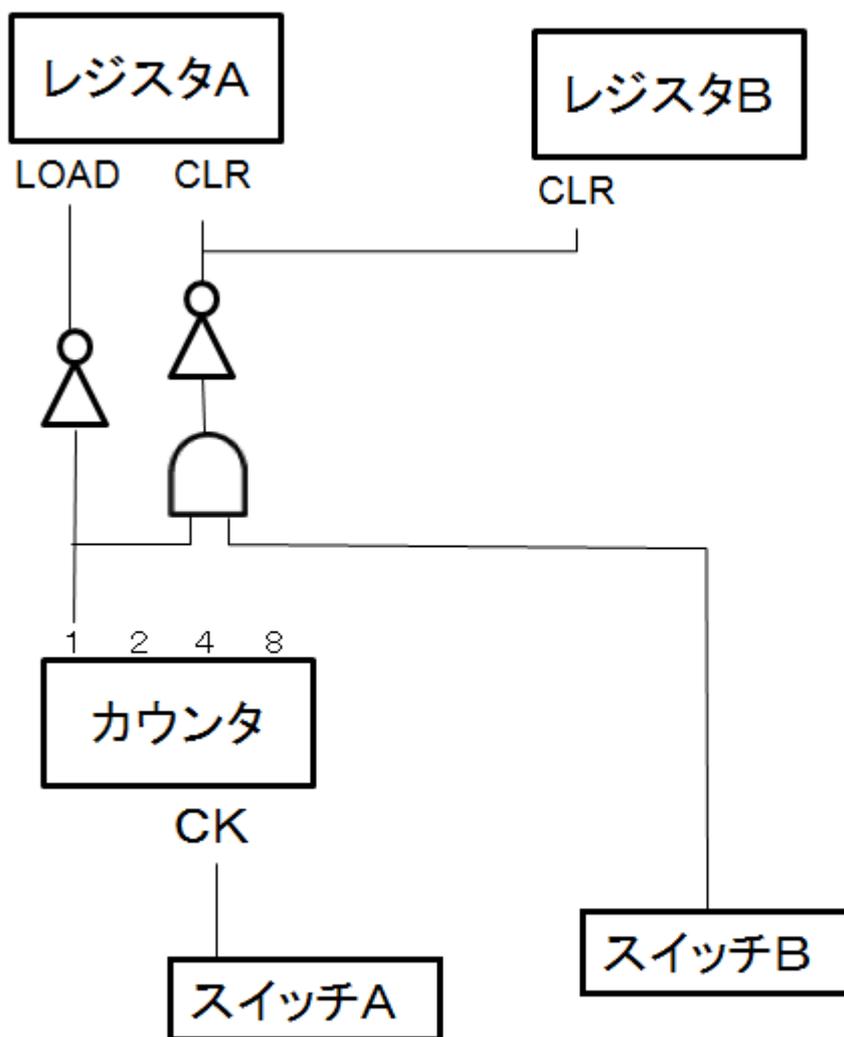


図4

こうすることで、制御の回路が作製できた。

本体の回路には、加算器の繰り上がりを利用して計時できる時間を増やすとともに、CK を 1000Hz にして短い時間を測れるようにし、計時の誤差を少なくした。

ラップには本体と別のレジスタ(レジスタ B)を用いた。レジスタ A の出力をレジスタ B の入力に接続し、カウンタの 1 の位の値とスイッチ B の値を AND に接続し、その出力をレジスタ B の CK に接続することで、状態①のときにスイッチ B を押すとラップをとる回路が作製できた(図 5)。

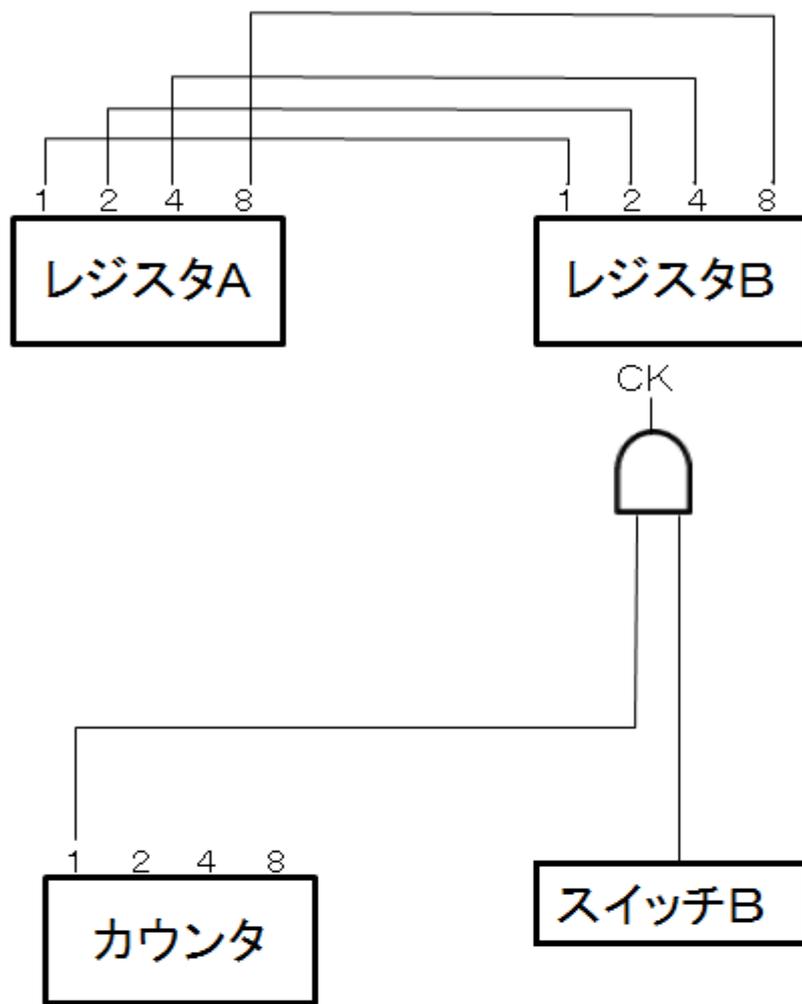


図5

### 3. 結果

ラップ機能を備え、停止後再スタート可能なストップウォッチを作製し、動作させることに成功した。また、より実用的なストップウォッチとするため、CKを1000Hzとし、1000分の1秒の時間間隔で計測できるようにした(図6)。

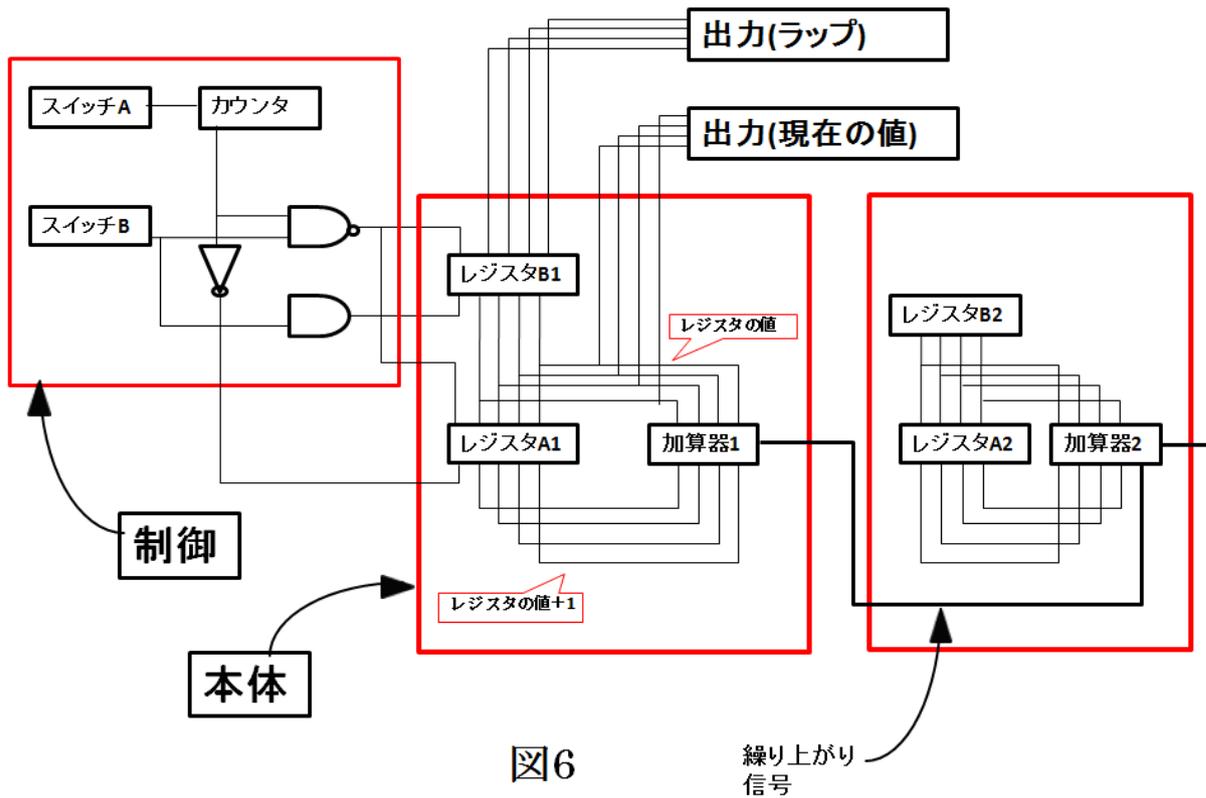


図6

繰り上がり  
信号

今後の発展としては、時間の10進数での表示、リコール（停止後にラップを再表示させる）機能の作製、配線を単純化し誤動作を少なくすることなどが挙げられ、さらに高機能のストップウォッチの作製もしていきたい。

#### 4. 参考文献

CPUの創りかた-渡波 郁  
株式会社 毎日コミュニケーション

# CPU を創ろう

濱本美咲 倉中渉 篠原大和 森田航希 穂本幸助

## 1. 緒言

先輩方が研究した「CPU を創ろう」では、CPU 回路を利用してスロットを作成をしたが、それを引き継ぎ発展させることは難しいと判断し、私達はCPU回路を利用したストップウォッチを作成することを目標とした。

## 2. 方法

私たちは目標とするストップウォッチの動作を次のとおりである。

- ① 一回目のボタンを押すと…時計が動き出す
- ② 二回目のボタンを押すと…時計が停止する
- ③ 三回目のボタンを押すと…時計が0にリセットされる

これらを繰り返すこととする。

### 2-1 プログラム

上記の命令を実現する為図1のようなプログラムを作成した。なお、レジスタに格納されている値がストップウォッチが示す時刻であり、ストップウォッチのボタンが押された時に、1の矢印の方向へ進むものとする。

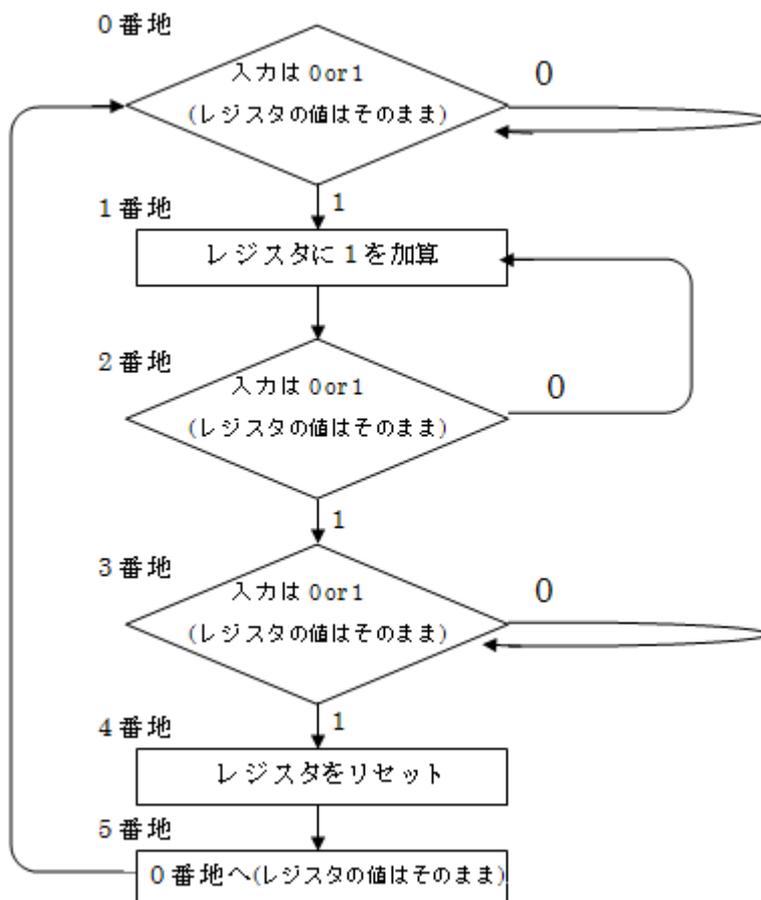


図1.プログラム

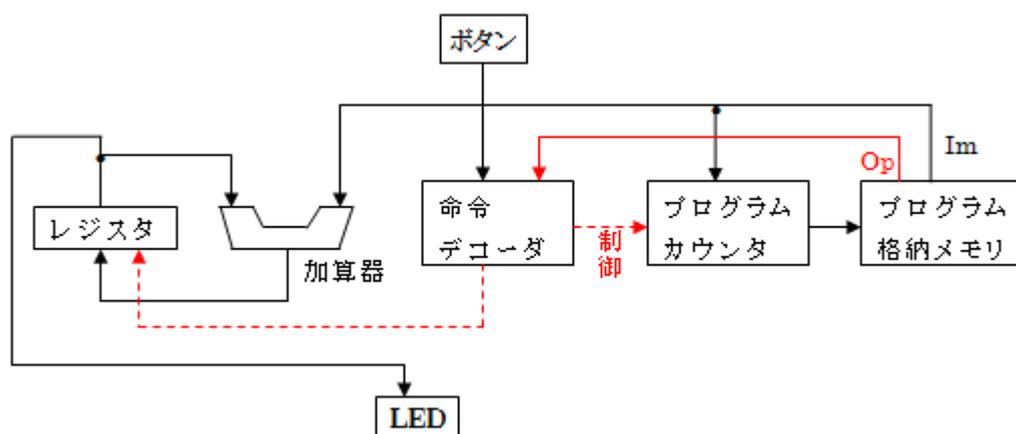
## 2-2 命令の種類

上記のプログラムを実現する為の命令は下の4種類になる。

命令	内容
命令1 (加算)	レジスタに1を加算する
命令2 (リセット)	レジスタの値を0にする
命令3 (分岐)	Im (イミディエイトデータ) が指定する番地の命令へジャンプする。
命令4 (条件分岐)	入力が0ならばImが指定する番地へジャンプする (レジスタの値はそのまま)

## 2-3 CPUの構成

上記の命令を実現するため、図2のように CPU を構成する。



Op (オペレーションコード)・・・命令の種類

Im (イミディエイトデータ)・・・加算する値や番地などの具体的な値

図2.CPUの構成

私たちのCPUは、ALU (加算器)、レジスタ、プログラムカウンタ、プログラム格納用メモリ、命令デコーダの5つの部分で構成されている。ALU とは、さまざまな演算を行う回路であり、レジスタとは、計算結果を保持し、命令デコーダからの指示により、値をそのまま保持し続けるか、ALU から送られてきた計算結果を格納するかのどちらかの動きを行う。また、プログラムカウンタとはクロック信号 (CK) に従ってプログラムを1つずつ進めるか、ある番地の命令にジャンプするかのどちらかの働きをする。プログラム格納用メモリは、プログラムを格納しており、各番地に格納されている命令を命令デコーダとレジスタに送る。命令デコーダは、メモリから読みだされたプログラムとレジスタの値から、プログラムカウンタとレジスタの動作を制御し、その指示をそれぞれに送る。

## 2-4 命令デコーダの設計

### ①□ 真理値表

下図のような真理値表作成し、これをもとに命令デコーダを構成した。図3において、プログラムカウンタは $\overline{\text{LORD}}=0$  のとき、 $I_m$ が示す番地にジャンプし、 $\text{LORD}=1$ のとき、カウントアップ(1 が加算)される。また、レジスタは $\overline{\text{LORD}}=0$ のとき加算器から出力された値を格納し $\overline{\text{LORD}}=1$ のとき、元の値が保持される。レジスタに $\overline{\text{CLR}}$ が入力されると、レジスタの値は0にリセットされる。また $\times$ はあ0, 1によらず同じ動きを示すことを示す。

オペレーションコード		スイッチ	レジスタの $\overline{\text{LORD}}$	プログラム カウンタ $\overline{\text{LORD}}$	レジスタの リセット $\overline{\text{CLR}}$	命令の種類
OP 1	OP 2	SW	$\overline{\text{LORD}}$	$\overline{\text{LORD}}$	$\overline{\text{CLR}}$	
1	1	0	1	0	1	SWが0のとき指定する番地の命令へ
1	1	1	1	1	1	SWが1のとき次の番地の命令へ
0	0	$\times$	0	1	1	レジスタに $I_m$ の値を加算する
0	1	$\times$	1	1	0	レジスタの値を0にする
1	0	$\times$	1	0	1	$I_m$ が指定する番地の命令へジャンプする

図3. 真理値表

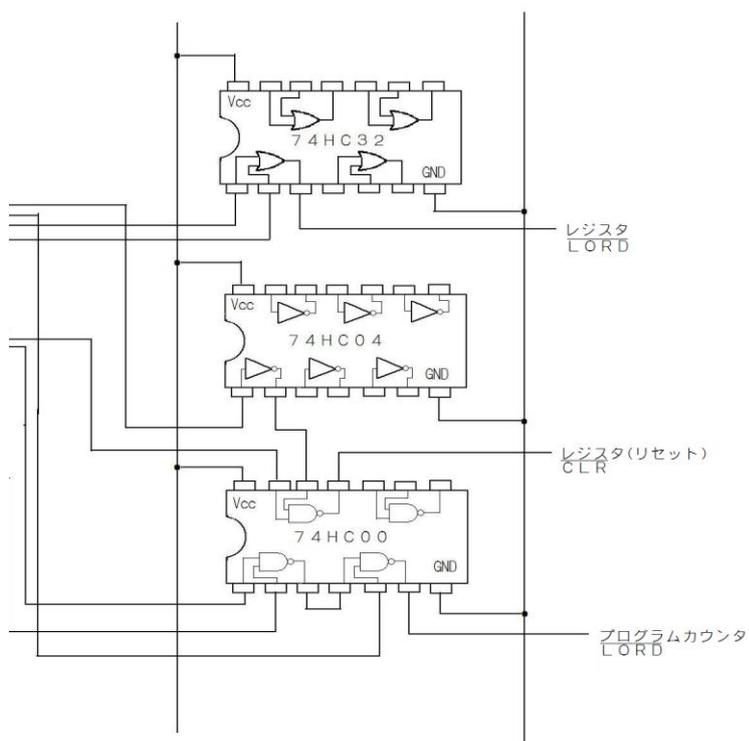


図4. 命令デコーダの回路図

### 3. 結果

ストップウォッチを実現させるCPU回路を完成させることができた。以下は実際の写真である。

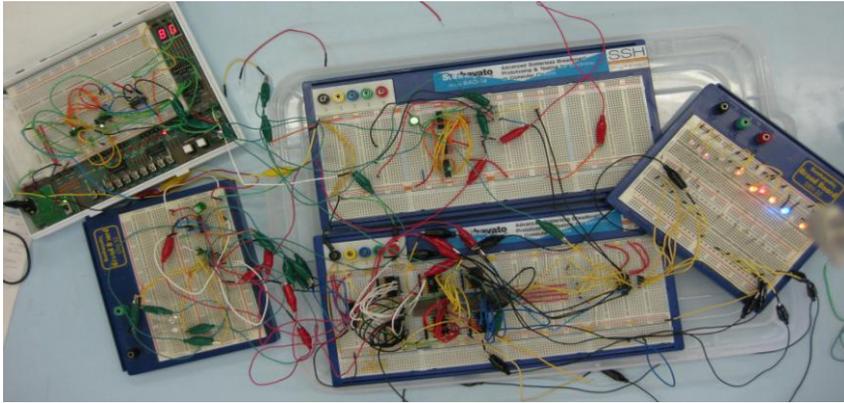


図5.全体図

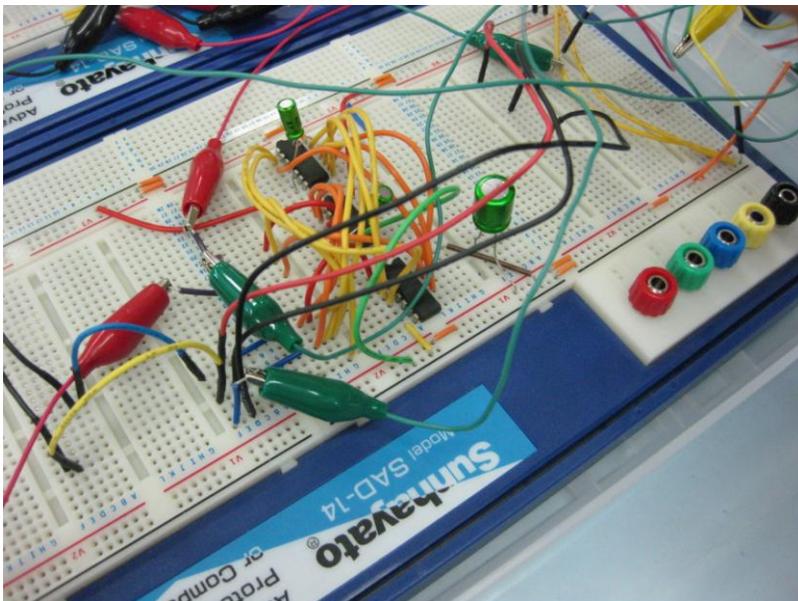


図6.レジスタ・加算器

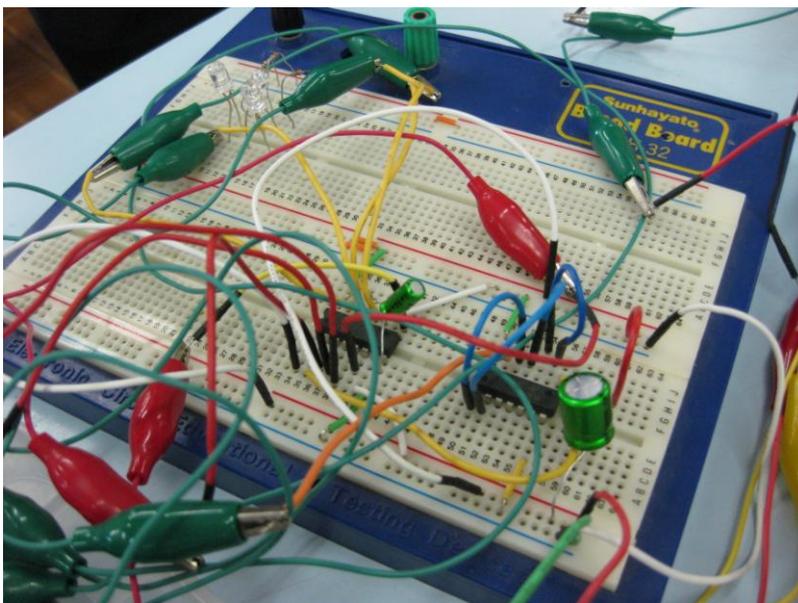


図7.プログラムカウンタ

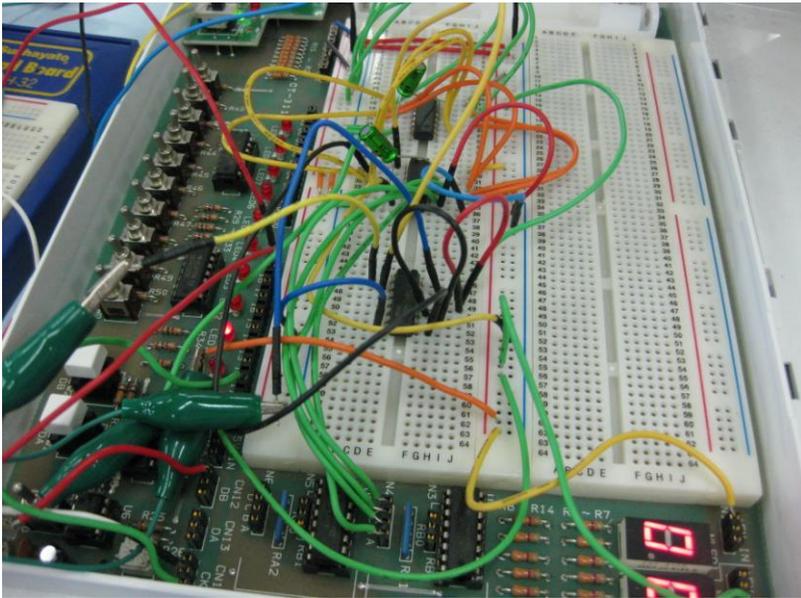


図8. 命令デコーダ

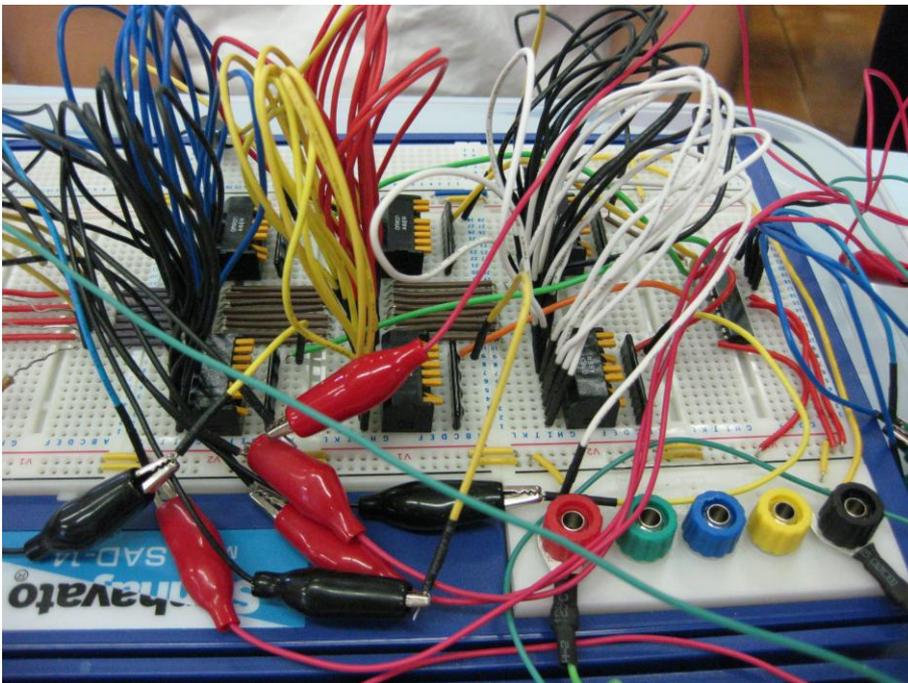


図9. プログラム格納メモリ

### 3-2 不具合対策

各部分を接続した結果、誤作動が生じたため、どこまで正しい信号が流れているかを視覚的に確認するために、発光ダイオードを用いた。

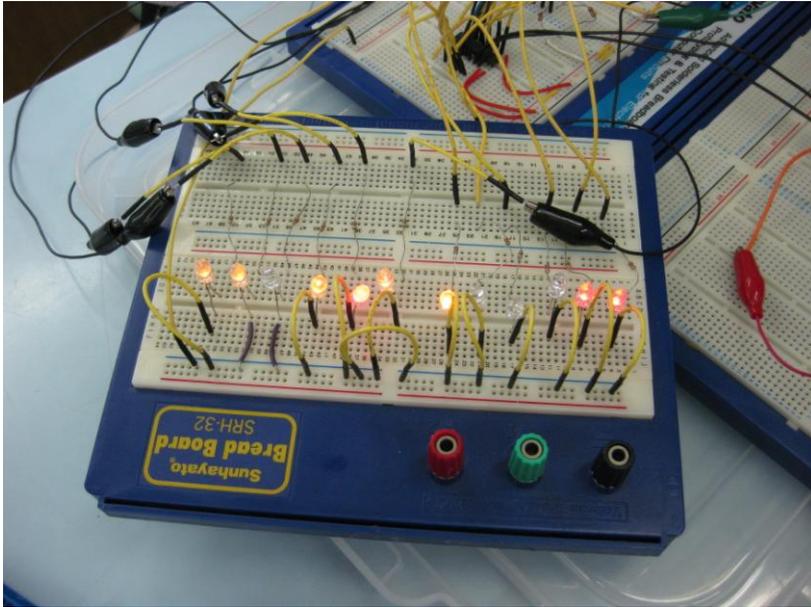


図10. 内部信号確認用LED

その他

- 配線の不備見直しを徹底した。
- シュミットリガーNOTを使用した。
- コンデンサを配置した。

## 4. 結論

以下の成果が得られた。

- ストップウォッチの動作を行うCPUが作成できた。
- また、以下の点の解決が、今後の課題である。
  - ①スイッチに関して、スイッチを1秒以上2秒未満押さなくてはならない点
  - ②2秒に1カウントする点
  - ③CPUとしては、CK信号1Hzではなく、1000Hzで動作させなくてはならない点

## 5. 参考文献

CPUの作り方 渡波郁著

## 6. 謝辞

大阪市立大学理学研究科数物系専攻の清矢良浩先生、萩尾彰一先生、小原顕先生、ありがとうございました。