

スーパーボールの跳ね返り運動

1. 緒言

スーパーボール（以下ボールと呼ぶ）に十分な逆回転を加えて投げると、床と衝突する度に進行方向を変え、往復するような特徴的な跳ね返り運動が生じる（図1）。この跳ね返り運動がどのような条件で生じるのかを明らかにすることを目的に研究を行った。なお、以下では図1中のボールの回転方向を逆回転、その反対向きの回転を順回転とする。

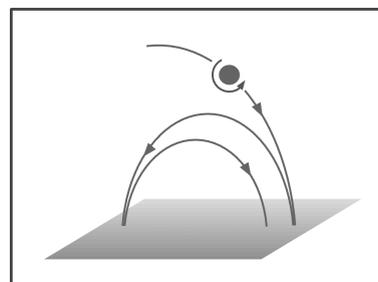


図1 | 跳ね返り運動の図

2. 実験手順

実験準備

図2のように椅子とスタンドを設置し、金属製のレール（長さ1m）を水平面からの角度60度、下端の高さが床から35cmとなるように設置した。このレール上にボール（質量 $m = 0.012\text{kg}$ 、半径 $r = 0.015\text{m}$ ）を転がす。（これを「回転装置」とする。）床には定規2本を平行に設置し、10cm間隔でテープを貼った。奥手にはストップウォッチを表示したChromebookを設置した。

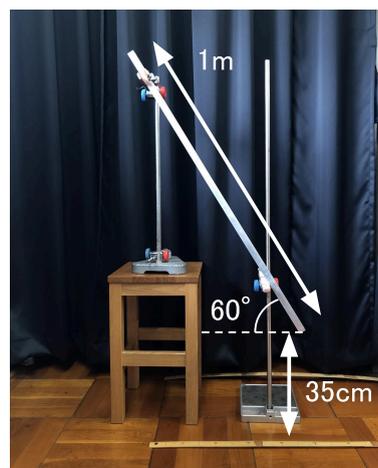


図2 | 回転装置の写真

実験Ⅰ. 1回目の床との衝突前に「逆回転」をかけた場合

回転装置を壁の前に設置し、レール上にボールを置き、静かにはなした。その際、ボールを床と壁で跳ね返らせることで逆回転を発生させた（図3）。この様子をスローモーションで撮影し、ボールが移動した距離 x 、時間 t 、回転数 n を床との衝突ごとに計測した。以上の実験を、レールの端と壁との距離を45cmから65cmの間で5cm間隔ずつ変化させて行い、回転数が異なる5種類のデータを集めた。

実験Ⅱ. 1回目の床との衝突前に「順回転」をかけた場合

回転装置を設置し、レール上にボールを置き、静かにはなして順回転をかけた様子（図3）を、実験Ⅰと同様に撮影した。撮影した動画から、ボールが移動した距離 x 、時間 t 、回転数 n のそれぞれを床との衝突ごとに計測した。これらの測定を、転がす距離を10cmから70cmの間で10cm間隔ずつ変化させて行い、順回転の回転数が異なる7種類のデータを集めた。

実験Ⅲ. 1回目の床との衝突前にほとんど「無回転」である場合

ここでは回転装置は用いず、ボールが極めて小さい回転になるように手で投げた（図3）。実験Ⅰ、Ⅱと同様にこの様子を撮影し、ボールの距離 x 、時間 t 、回転数 n を床との衝突ごとに計測した。以上を、投げる初速を変えて行い、速度の水平成分が異なる3種類のデータを集めた。

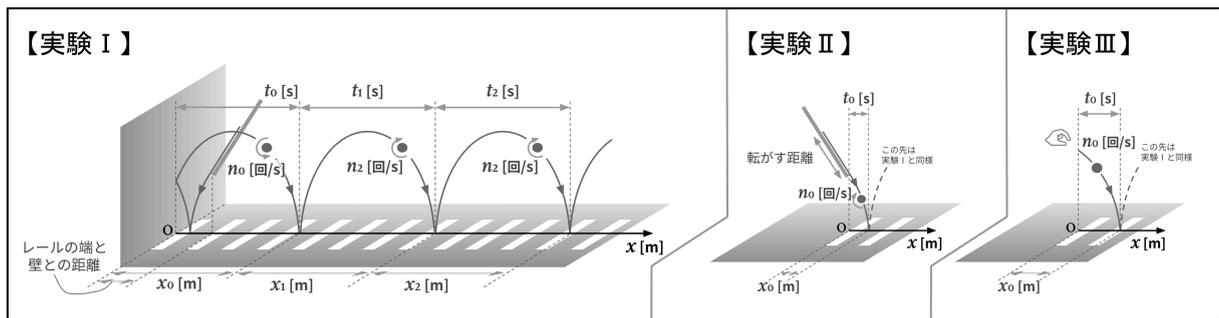


図3 | 各実験の様子と計測値

実験に使用する物理量の算出

実験 I ~ III での計測値から、以下の値を算出した。(図4)

- ・ ボールの速度の水平成分 v_{xn}
- ・ ボールの角速度 ω_n
- ・ ボールの表面での回転の速度 $r\omega_n$
- ・ 回転の速度も考慮した、ボールの床に対する相対速度の水平成分 $v_{xn} + r\omega_n$

また、各衝突前後の速度の水平成分をそれぞれ v_x, v_x' 、角速度をそれぞれ ω, ω' とし、ボールが床から受ける力積 $I = mv_x' - mv_x$ を求めた。(図5)

※ n は床との衝突回数を表し、 $n = 0, 1, 2, \dots$ とする。

実験 I は $n = 0, 1$ の値のみ算出しているが、実験時期の違いから、実験 II、III は $n = 0, 1, 2$ の値を算出している。

※ v_{xn} は v_{x0} の向きを、 ω_n は ω_0 が逆回転であるときの向きをそれぞれ正とする。(図5)

※いずれの算出値も、表計算ソフトを用いて算出した。

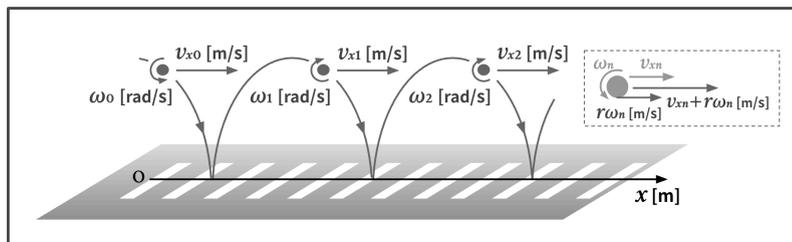


図4 | 算出した値①

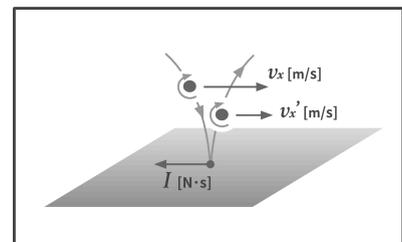


図5 | 算出した値②

3. 実験結果

集めたデータから各物理量どうしの関係を調べたところ、以下の関係が明らかになった。

- ・ $v_x + r\omega$ と I の向き (符号) は逆 (図6)
- ・ $v_x + r\omega$ と I が比例する (図7)
- ・ $v_x + r\omega$ と $v_x' + r\omega'$ が比例する (図8)

	$I > 0$	$I < 0$	計
$v_x + r\omega > 0$	0	13	13
$v_x + r\omega < 0$	9	0	9
計	9	13	22

※表内の数字はデータの個数

図6 | $v_x + r\omega$ と I の向き (符号)

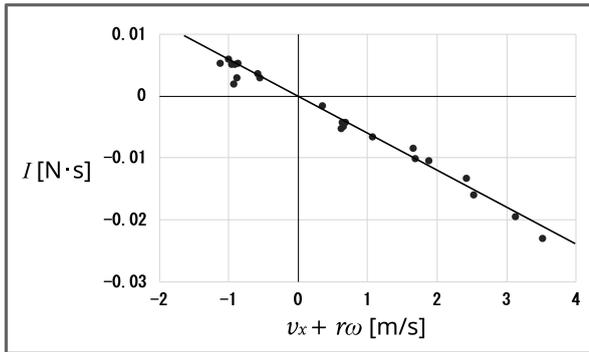


図7 | $v_x + r\omega$ と I のグラフ

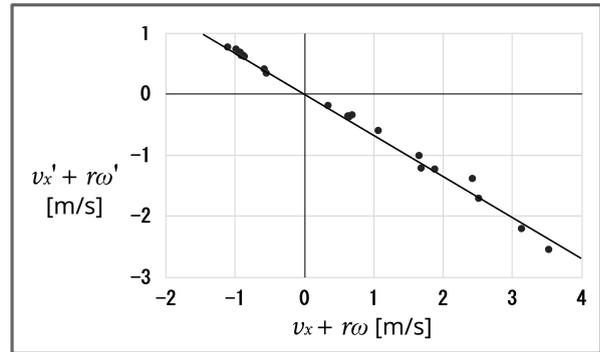


図8 | $v_x + r\omega$ と $v_x' + r\omega'$ のグラフ

4. 考察

最初に $v_x + r\omega$ と $v_x' + r\omega'$ の関係について考察する。

図7から、 $v_x + r\omega$ と I の関係を以下のように表す。

$$I = -k(v_x + r\omega) \quad (k: \text{正の実数}) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、左辺 (I) の単位は、 $[N \cdot s] = [(kg \cdot m/s^2) \cdot s] = [kg \cdot m/s]$

右辺 ($-k(v_x + r\omega)$) の単位は、 $[(k \text{ の単位}) \cdot (m/s)]$

であるから、 $(k \text{ の単位}) = kg$ と分かる。

このことから比例定数 k は質量に比例すると考え、

$$k = fm \quad (f: \text{無次元の正の実数}) \text{ と表す。}$$

よって(1)式は以下ようになる。

$$I = -fm(v_x + r\omega) \quad \dots\dots (1)'$$

運動量と力積の関係より、

$$I = mv_x' - mv_x \quad \dots\dots (2)$$

力積のモーメントと角運動量の関係より、

$$rI = \frac{2}{5}mr^2\omega' - \frac{2}{5}mr^2\omega$$

$$\frac{5}{2}I = mr\omega' - mr\omega \quad \dots\dots (3)$$

(2), (3)式より、

$$\frac{7}{2}I = mv_x' + mr\omega' - mv_x - mr\omega$$

(1)'式を代入して、

$$mv_x' + mr\omega' - mv_x - mr\omega = -\frac{7}{2}fm(v_x + r\omega)$$

$$m(v_x' + r\omega') = -\frac{7}{2}fmv_x - \frac{7}{2}fmr\omega + mv_x + mr\omega$$

$$m(v_x' + r\omega') = -(\frac{7}{2}f - 1)mv_x - (\frac{7}{2}f - 1)mr\omega$$

$$v_x' + r\omega' = -(\frac{7}{2}f - 1)(v_x + r\omega)$$

$\frac{7}{2}f - 1 = \alpha$ とすると、

$$v_x' + r\omega' = -\alpha(v_x + r\omega) \quad \dots\dots (4)$$

$$\alpha = -\frac{v_x' + r\omega'}{v_x + r\omega} \quad (0 < \alpha < 1) \quad \dots\dots (4)'$$

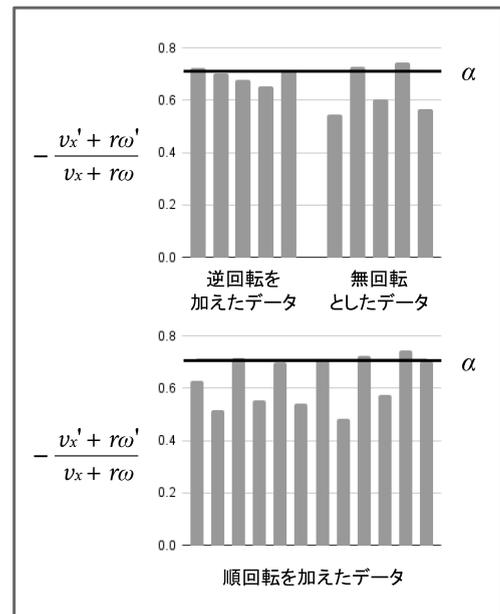


図9 | (4)式の関係性の確認

k	0.0060
f	0.49
α	0.71

※ k の値は図7の
近似直線の傾きを使用
図10 | k, f, α の値

以上より、床との衝突後の床に対する相対速度の水平成分 $v_x' + r\omega'$ の値は、床との衝突前の床に対する相対速度の水平成分 $v_x + r\omega$ に比例し、 $\frac{7}{2}f - 1 = \alpha$ とすると、一般的に知られる反発係数と同様の関係が水平方向にも成り立つことが明らかになった。図9は、この研究で集めたデータでの各物理量の値を代入し、(4)'式の関係性を確かめたものである。なお、 α の導出に用いる無次元量 f の値は、図10の値を使用した。

次に、床との n 回目の衝突後の、ボールの速度の水平成分 v_{xn} について考察する。

(2)式を(3)式に代入して、

$$\begin{aligned}\frac{5}{2}mv_x' - \frac{5}{2}mv_x &= mr\omega' - mr\omega \\ v_x' - v_x &= \frac{2}{5}r\omega' - \frac{2}{5}r\omega \\ v_x' - \frac{2}{5}r\omega' &= v_x - \frac{2}{5}r\omega \quad \dots\dots (5)\end{aligned}$$

(4)式より、数列 $\{v_{xn} + r\omega_n\}$ の一般項は

$$v_{xn} + r\omega_n = (-1)^n \alpha^n (v_{x0} + r\omega_0) \quad \dots\dots (6)$$

(5)式より、数列 $\{v_{xn} - \frac{2}{5}r\omega_n\}$ の一般項は

$$v_{xn} - \frac{2}{5}r\omega_n = v_{x0} - \frac{2}{5}r\omega_0 \quad \dots\dots (7)$$

(6)× $\frac{2}{5}$ + (7)より、

$$\begin{aligned}\frac{7}{5}v_{xn} &= \frac{2}{5}(-1)^n \alpha^n (v_{x0} + r\omega_0) + v_{x0} - \frac{2}{5}r\omega_0 \\ v_{xn} &= \frac{2}{7}(-1)^n \alpha^n (v_{x0} + r\omega_0) + \frac{5}{7}v_{x0} - \frac{2}{7}r\omega_0 \\ v_{xn} &= \left\{ \frac{5}{7} + \frac{2}{7}(-1)^n \alpha^n \right\} v_{x0} + \frac{2}{7} \{-1 + (-1)^n \alpha^n\} r\omega_0 \quad \dots\dots (8)\end{aligned}$$

次に、 n 回目の床との衝突後の、ボールの進む向きについて考察する。

(8)式において、床との衝突後の速度の水平成分 $v_{xn} > 0$ 、つまり床との衝突後正の向きに進むときについて考えると、

$$\begin{aligned}\left\{ \frac{5}{7} + \frac{2}{7}(-1)^n \alpha^n \right\} v_{x0} + \frac{2}{7} \{-1 + (-1)^n \alpha^n\} r\omega_0 &> 0 \\ \{5 + 2(-1)^n \alpha^n\} v_{x0} &> 2\{1 + (-1)^{n+1} \alpha^n\} r\omega_0 \\ \{5 + 2(-1)^n \alpha^n\} &> 2\{1 + (-1)^{n+1} \alpha^n\} \frac{r\omega_0}{v_{x0}} \quad (\because v_{x0} > 0)\end{aligned}$$

$0 < \alpha < 1$ より、 $2\{1 + (-1)^{n+1} \alpha^n\} > 0$ であるので、

$$\frac{r\omega_0}{v_{x0}} < \frac{5 + 2(-1)^n \alpha^n}{2\{1 + (-1)^{n+1} \alpha^n\}} \quad \dots\dots (9)$$

よって、 n 回目の衝突時に $v_{xn} > 0$ となるためには、(9)式の関係を満たす必要がある。

同様に $v_{xn} = 0$, $v_{xn} < 0$ についても考えると、

n 回目の衝突時に $v_{xn} = 0$ となるためには以下の(10)式を満たす必要がある。

$$\frac{r\omega_0}{v_{x0}} = \frac{5 + 2(-1)^n \alpha^n}{2\{1 + (-1)^{n+1} \alpha^n\}} \quad \dots\dots (10)$$

n 回目の衝突時に $v_{xn} < 0$ となるためには以下の(11)式を満たす必要がある。

$$\frac{r\omega_0}{v_{x0}} > \frac{5+2(-1)^n \alpha^n}{2\{1+(-1)^{n+1} \alpha^n\}} \quad \dots\dots (11)$$

なお、以下では $\frac{5+2(-1)^n \alpha^n}{2\{1+(-1)^{n+1} \alpha^n\}} = s_n$ とする。

最後に、跳ね返り運動が生じる条件について考察する。なお、 α の値は図10に示したものを
用いる。

跳ね返り運動が生じるためには、まず1回目の床との衝突で、 $v_{x0} > 0$ に対して $v_{x1} < 0$ となる
必要がある。よって、(11)式に $n=1$ を代入した $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} > s_1$ を満たすとき、1回目の衝突では進
行方向を変える跳ね返り運動が生じる。また、2回目の床との衝突では、 $v_{x1} < 0$ に対して
 $v_{x2} > 0$ となる必要がある。よって、(9)式に $n=2$ を代入した $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_2$ を満たすとき、2回目
の衝突でも跳ね返り運動が生じる。次に、3回目の床との衝突について考えると1回目と同
様に考えて、満たすべき条件は $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} > s_3$ となる。4回目についても、満たすべき条件は2回
目と同様に $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_4$ となる。

このように、 $\frac{r\omega_0}{v_{x0}}$ が満たすべき条件は、床との衝突が奇数回目であるか偶数回目であるかで
異なることが分かる。よって、 n 回目の床との衝突で跳ね返り運動が生じるときの条件は、

・ $n = 2m-1$ (奇数) のとき $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} > s_n = s_{2m-1} \quad \dots\dots (12)$

・ $n = 2m$ (偶数) のとき $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_n = s_{2m} \quad \dots\dots (13) \quad (\text{ただし、} m \text{ は自然数})$

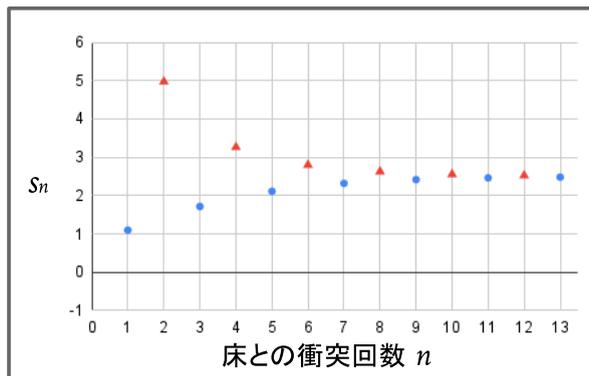


図11 | 床との衝突回数 n と s_n のグラフ

ここまでは n 回目の床との衝突で跳ね返り運動が生じる条件を考えたが、ここからは n 回目
の床との衝突まで跳ね返り運動が継続する条件を考える。例えば2回目の床との衝突まで跳
ね返り運動が生じ続ける条件は、 $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} > s_1$ かつ $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_2$ より $s_1 < \frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_2$ となる。3回目の床
との衝突まで生じ続ける条件は、 $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} > s_1$ かつ $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_2$ かつ $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} > s_3$ より $s_1 < s_3 < \frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_2$ と
なる。つまり、跳ね返り運動を継続させるためには、それまでの床との各衝突での跳ね返り
運動が生じる条件を全て満たす必要がある。ここで図11に注目すると、奇数回目の s_n すなわ

ち s_{2m-1} の値 (●) は、 n が大きくなるにつれて単調に増加する。また、偶数回目の s_n すなわち s_{2m} の値 (▲) は n が大きくなるにつれて単調に減少し、奇数回目と偶数回目の s_n のどちらもある値に収束していくことが分かる。よって、 n 回目の床との衝突まで跳ね返り運動が継続するときの条件は、

$$\cdot n = 2m-1 \text{ のとき} \quad s_{2m-1} < \frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_{2m-2} \Leftrightarrow s_n < \frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_{n-1}$$

$$(\text{ただし } n = 1 \text{ のときは } s_1 < \frac{r\omega_0}{v_{x0}})$$

$$\cdot n = 2m \text{ のとき} \quad s_{2m-1} < \frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_{2m} \Leftrightarrow s_{n-1} < \frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_n$$

また実験では、ボールが数回跳ね返り運動をしたあと、進行方向を変えずに床の上をボールが跳ねながら進む運動が観測された。これは図11より、跳ね返り運動が生じ続けるとき $\frac{r\omega_0}{v_{x0}}$ が満たすべき範囲が、 n が増加するにつれて小さくなり、初めは $\frac{r\omega_0}{v_{x0}}$ が条件を満たしていたものの、途中でこの範囲から外れたことで生じたと考えられる。

一方で、跳ね返り運動が最も長く続くのは、 $\frac{r\omega_0}{v_{x0}}$ の値が s_n の収束値のときであることが図11から分かる。 s_n の n を限りなく大きくすると、 $0 < \alpha < 1$ より、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{5+2(-1)^n \alpha^n}{2\{1+(-1)^{n+1} \alpha^n\}} = \frac{5}{2}$$

よって、 $\frac{r\omega_0}{v_{x0}}$ の値が $\frac{5}{2}$ に近いほど、跳ね返り運動がより長く繰り返されると考えられる。

5. 結論

A. 力積 I と $v_x + r\omega$ との関係

ボールの床との跳ね返りにおいて、ボールが床から受ける力積 I と床に対する相対速度の水平成分 $v_x + r\omega$ が比例しており、(1)'式の関係が成り立つ。

$$I = -fm(v_x + r\omega) \dots\dots (1)'$$

B. ボールの速度の水平成分

(1)'式と、一般的に成り立つ(2),(3)式より、 n 回目の床との衝突後のボールの速度の水平成分 v_{xn} は(8)式のように表される。

$$v_{xn} = \left\{ \frac{5}{7} + \frac{2}{7}(-1)^n \alpha^n \right\} v_{x0} + \frac{2}{7} \{ -1 + (-1)^n \alpha^n \} r\omega_0 \dots\dots (8)$$

C. 跳ね返り運動が生じる条件

(8)式より、 v_{xn} の向きは初期条件である v_{x0} と $r\omega_0$ の比により決定される。

このことから、 n 回目の床との衝突まで跳ね返り運動が生じ続けるときの条件は、

$$\cdot n = 2m-1 \text{ のとき} \quad s_{2m-1} < \frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_{2m-2} \Leftrightarrow s_n < \frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_{n-1}$$

$$(\text{ただし } n = 1 \text{ のときは } s_1 < \frac{r\omega_0}{v_{x0}})$$

$$\cdot n = 2m \text{ のとき} \quad s_{2m-1} < \frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_{2m} \Leftrightarrow s_{n-1} < \frac{r\omega_0}{v_{x0}} < s_n$$

また、ボールの跳ね返り運動は $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} = \frac{5}{2}$ のときに最も長く続き、 $\frac{r\omega_0}{v_{x0}} \neq \frac{5}{2}$ のときには、跳ね返り運動は一度も生じないか、跳ね返り運動が生じた後に進行方向を変えずに床の上をボールが跳ねながら進む。

6. 参考文献

國友正和ほか 物理 数研出版株式会社 2024

馬場敬之, 高杉豊 力学 キャンパス・ゼミ 改訂1 マセマ出版社 2012

ペットボトル振動子の同期現象

1. 諸言

自然界には複数のもの同士が相互作用し、お互いのリズムを変化させ合うことで動きが揃う現象がある。これを同期現象という。中でも特に、我々はペットボトルを用いた同期現象に注目した。水を入れたペットボトルを逆さにして起こる水の滴下と空気の流入が一定のリズムを形成する装置をペットボトル振動子という。2本のペットボトルをチューブで繋いだペットボトル振動子の同期現象として「同相同期」と「逆相同期」が起こることが知られている。同相同期とは図1のように左右のペットボトルで水の滴下と空気の流入が同位相で同期する現象であり、逆相同期とは図2のように左右のペットボトルで水の滴下と空気の流入が逆位相で同期する現象のことである。我々は後者が起こる仕組みについて研究を行った。

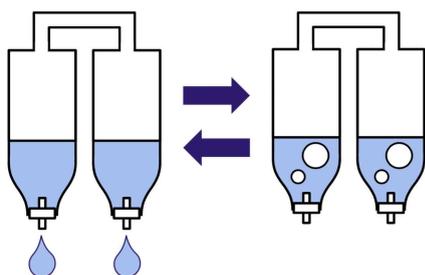


図1 同相同期の様子

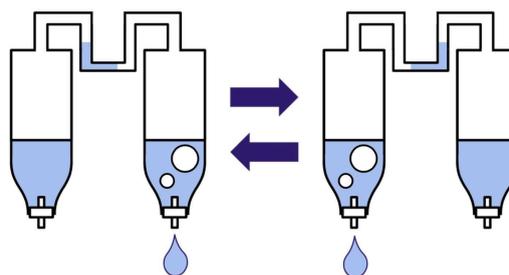


図2 逆相同期の様子

2. 実験手順

まずはじめに、実際に同相同期と逆相同期を起こして観察することにした。

《実験①》

ペットボトル(サントリー 伊右衛門2L)2本の底に穴を開け、50cmのビニールチューブ(コーナン商事、内径9mm、長さ50cm)で繋ぎ、それぞれの蓋にプラスチックストロー(日本マクドナルド、内径7mm、長さ5cm)を通して容器内を水で満たし装置を逆さにした。

《実験②》

《実験①》の実験器具のビニールチューブとペットボトルとの隙間を空気の流出入が起こらないように修正し、容器内を半分ほど水で満たし再度装置を逆さにした。

《実験③》

《実験①》のビニールチューブを長さ150cmのものに交換し、その中央を垂らして内部に水が留まる状態にし、容器内を半分ほど水で満たし装置を逆さにした。



《実験1》



《実験3》

3. 実験結果

《実験①》

2本のペットボトルから水の滴下が見られたものの空気の流入は行われず、滴下が止まってしまったため同相同期は見られなかった。このとき、2本のペットボトルがどちらも大きく凹んでいた。

《実験②》

2本のペットボトルからの滴下が見られ、次第に2本のペットボトルで水の滴下と空気の流入が同位相で同期する同相同期が見られた。このとき、はじめはペットボトルが凹んでいたが、滴下が進むにつれ凹みは小さくなり、滴下が終わったときには凹みもなくなっていた。

《実験③》

2本のペットボトルからの滴下が見られ、次第に2本のペットボトルで水の滴下と空気の流入が逆位相で同期する逆相同期が見られた。このとき、ペットボトルの凹みの変化は〈実験②〉と同様で、はじめはペットボトルが凹んでいたが、滴下が進むにつれ凹みは小さくなり、滴下が終わったときには凹みもなくなっていた。

またこのとき見られたビニールチューブ内の水の動きを以降図3を用いて説明を進める。ビニールチューブ内の水が中央(①)から右側に移動する(②)と同時に左側のペットボトルに空気が流入し、移動が止まった(③)と同時に左側のペットボトルへ流入した空気が水面に達した。再び中央に移動し(④)、中央に到達したとき(⑤)に右側のペットボトルに空気が流入した。そしてそのまま左側に寄り(⑥)、移動が止まった(⑦)と同時に右側のペットボトルへ流入した空気が水面に達した。その後は再び中央に移動し(⑧)、以降①から同様の現象を滴下が終了するまで繰り返した。

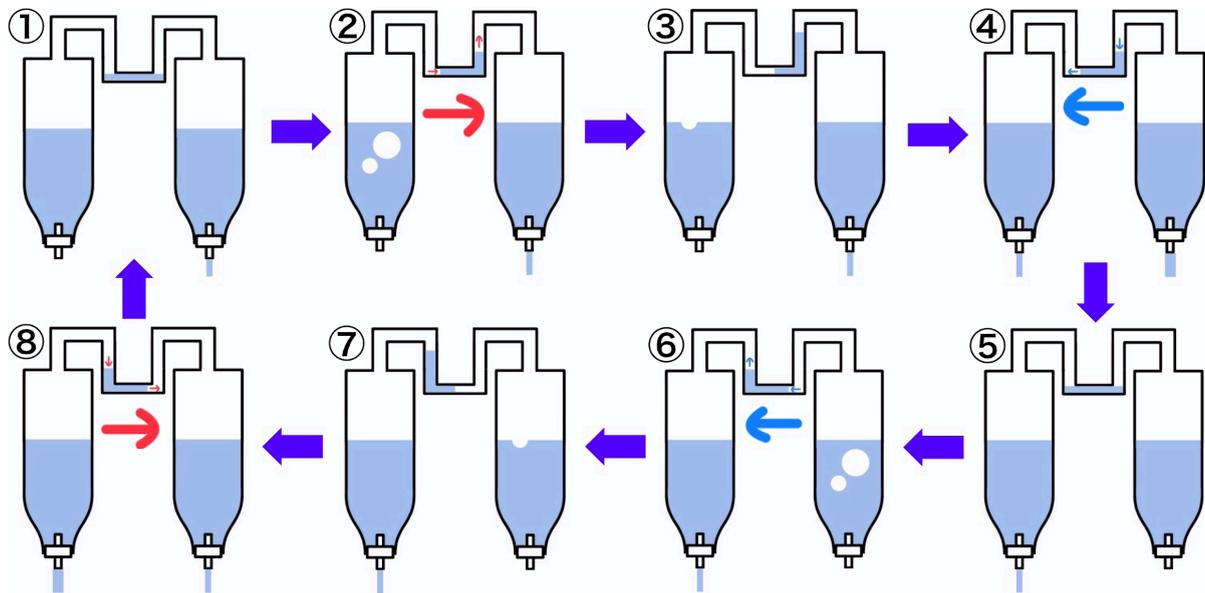


図3 チューブ内の水の動きと水の滴下、空気の流入との関係

4.考察

《実験①》

ペットボトルが凹んだこと、水の滴下後に空気が流入しないことからペットボトル内の気圧が大気圧よりも小さいと考えられる。このことから気圧に焦点を当てて研究を進めた。

《実験②》

ペットボトル内の水がその重力によって滴下するとき、〈実験①〉よりペットボトル内の空気部分の圧力が外気圧と比べて小さくなるのがわかる。この気圧差を是正するためにペットボトル内に空気が流入し、水面に到達したと同時に再び水がその重力によって滴下し、再び空気が流入するという現象が繰り返されることで同相同期が起これると考えられる。

《実験③》

一方のペットボトル内の気体について状態方程式($PV=nRT$ 、 P :圧力、 V :体積、 n :物質量、 R :気体定数、 T :温度)を立てて考える。この実験において T が常に一定とすると、 RT は常に一定と考えることができる。①において $PV=nRT$ とする。②において空気が流入すると③で n が増加し(n' とする)、それに伴い PV も増加する($(PV)'$ とする)。その後④から①まで、空気が流入するまでは水は滴下し続けており、 P 、 V は各々増減をするが、空気の流入は起これないため③から n は一定であり、 PV の積も③から一定である。①に戻ってきたとき、再び同じサイクルを繰り返すが、このときの PV および nRT の値は以前より増加している。これをペットボトル内の水がなくなるまで繰り返すと、次第にペットボトル内の空気圧が大気圧に近づき、ペットボトルの凹みがなくなっていく。また、図4の①から⑧を一周期とすると、もう一方のペットボトルでは⑤から④で同じサイクルを繰り返しており、ちょうど半周期ずれているため、逆相同期が起これると考えられる。

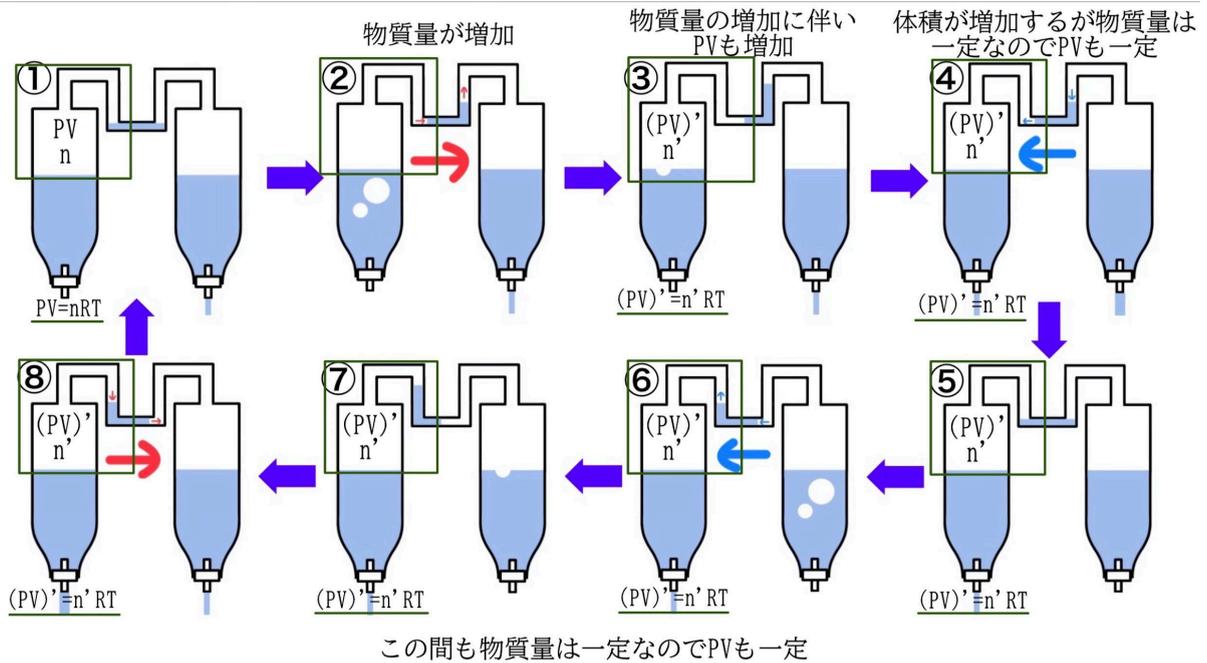


図4 一方のペットボトル内の気体の状態方程式の変化の様子

5. 結論

同相同期(チューブ内の水がないとき)は2つのペットボトル内の空気部分の圧力が共有されている(等しい)ため、水の滴下と空気の流入が同時に起こる。

逆相同期(チューブ内に水があるとき)は2つのペットボトル内の空気部分の圧力が共有されず(異なり)、その時に生じる圧力差を是正するため、圧力が高い方(左側とする)のペットボトルの空気部分がチューブ内の水(左側に寄っているとす)に力を加え、他方(右側)のペットボトルの方向に移動する。この間、左側のペットボトルの空気部分の体積が大きくなるため、圧力が小さくなっていく。右側のペットボトル部分は体積が小さくなるため、圧力が大きくなっていく。チューブ内の水はやがてチューブの中央に達し、ペットボトル左右での圧力は等しくなるが、このとき空気が流入するため再び左側のペットボトルの圧力が大きくなる。同じようにチューブ内の水を押し、やがて左右のペットボトルの圧力が逆転し、チューブ内の水は少し右側に寄った状態から左側に移動を始める。このとき、左側のペットボトルの空気部分の圧力は小さく、右側のペットボトルの空気部分の圧力は大きくなる。これが左右で半周期ずれて起こっているため、水の滴下と空気の流入が逆位相で同期する。

6. 参考文献

- ・京都大学 ペットボトル振動子 水/空気流が描き出す時空間構造
<https://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/pdf/1522-13.pdf>
- ・明治大学 ペットボトル振動子の同期現象
<https://www.isc.meiji.ac.jp/~ikedalaboratory/pdf/2017/5.pdf>
- ・大手前高校 76期S探 物理分野論文集 ペットボトル振動子
<https://otemae-hs.ed.jp/ssh/dat/2023StanP.pdf>

7. 謝辞

この探究にご協力して下さった皆様に、心より感謝申し上げます。

ムペンバ効果の発生

1. 緒言

ムペンバ効果とは1962年にタンザニアで発見された、高温のお湯と低温の水を同時に冷却し始めたとき、水より先にお湯が凍結することがあるという現象である。一見物理法則に反するよう感じられるこの現象は、現象の発見から今日に至る約60年以上もの間、数々の研究者が実験を重ねてきたにもかかわらず、その発生メカニズムはいまだ未解明である。

わたしたちは、この現象に興味を持ち、ムペンバ効果がそもそも再現可能な現象であるのかどうか、そしてその発生はどのような条件に影響を受けるのかということの研究した。

2. 実験手順

ムペンバ効果の発生とその原因を探るために、お湯の入ったカップと水の入ったカップを冷凍庫内で冷却し、凍結までの時間を測定した。

〈実験道具〉

- ・ステンレスカップ (70mL) (DAISO KMI-21-P20)
- ・物理研究室内の冷凍庫 (設定温度は約 -18°C)
- ・温度計 防水型無線温度ロガー (分離タイプ) (SK SATO SK-320BT-C)
ワイヤレス温度センサ (NaRiKa GDX-TMP(Go Direct) Cat. No. E31-8200-16)

〈実験1〉

お湯の入ったカップと水の入ったカップを同時に冷凍庫に入れ、冷却時間を測定する。
この実験ではムペンバ効果が発生しうるかを確かめている。

〈実験2〉

最初にお湯を冷却し、準備していた水道水の温度と等しくなったとき、その水道水を冷凍庫に入れ温度変化の様子を記録する。この実験ではお湯を冷却することで得られた水と直接水道から得られる水の内部の様子の違い(水の前処理による違い)を確かめている。

〈実験3〉

お湯が入っているカップの水面付近と底付近の温度変化の様子を2つの温度計を用いて計測する。この実験ではカップ内部で熱対流が発生しているかを確かめている。

3. 実験結果

〈冷却時間の測定方法〉

一度0°Cに到達した瞬間(過冷却状態の始点)から、過冷却状態が終了して温度が急激に上昇し、氷が形成された瞬間までの時間を冷却時間と定める。

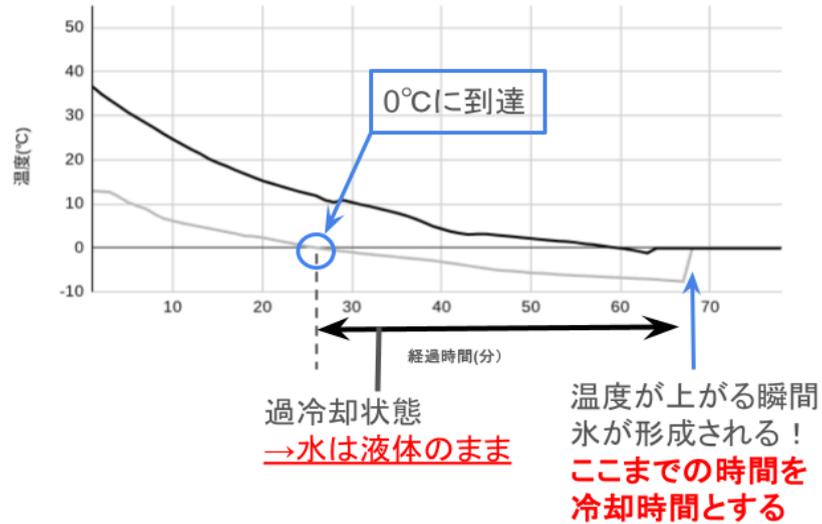


図: 冷却時間の測定方法

〈実験1〉

合計約20回の実験を行い、そのうち3回でムペンバ効果の発生が確認された。(下図はムペンバ効果が確認された時のグラフ) 水は68分で凍結し、お湯は64分で凍結している。

実験1

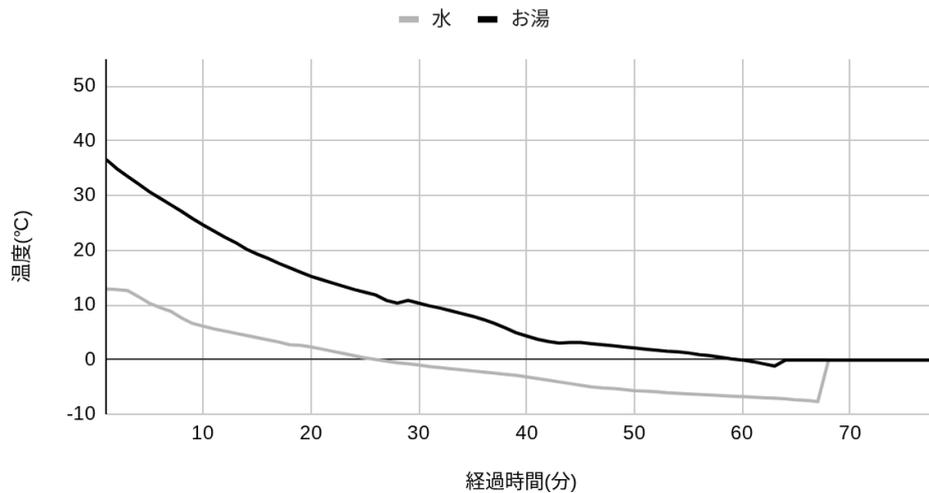


図1: ムペンバ効果が発生した際の水とお湯の温度変化の様子

〈実験2〉

お湯の冷却開始の約15分後に水のカップの冷却を開始した。あらかじめ冷却していたカップと、あとから入れたカップでは、温度変化に大きな差異が見られなかった。(下図ではカップ①が最初から冷却しているお湯、カップ②が途中から冷却した水である)①、②ともに80分で凍結した。

実験2

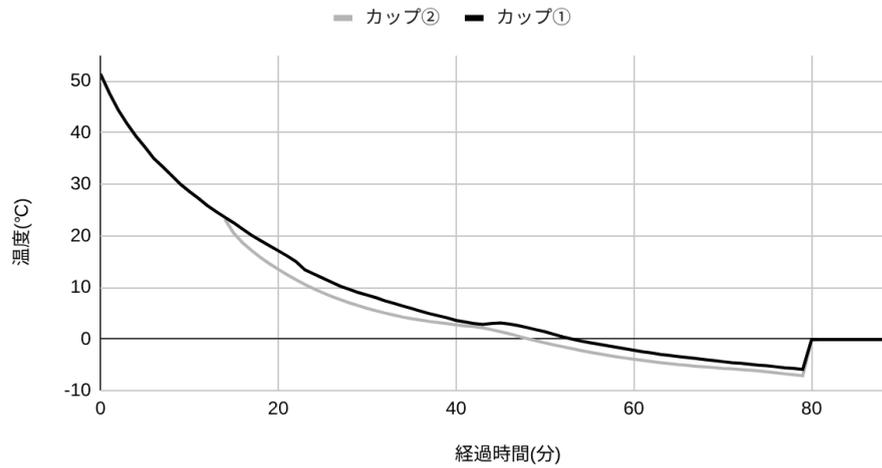


図2:カップ①(お湯)とカップ②(途中で追加した水)の温度変化の様子

〈実験3〉

カップ上部の水が下部の水よりも5分早く凍った。

実験3

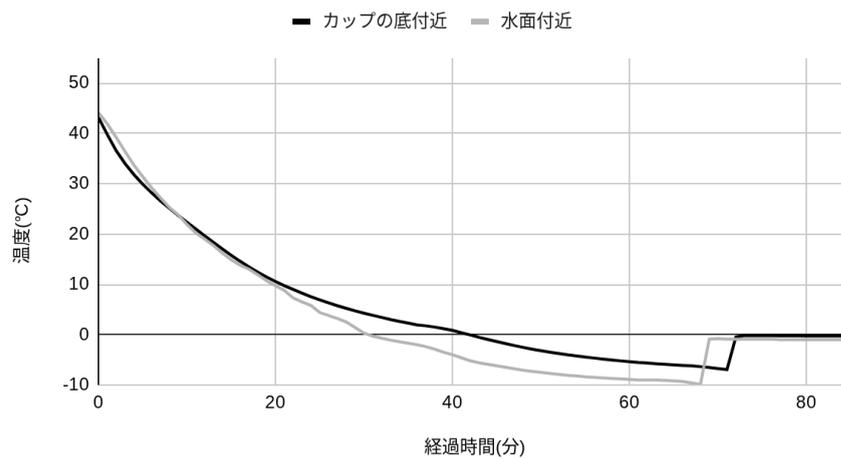


図3:カップの底付近と水面付近での温度変化の様子

4. 考察

〈実験1〉

ムペンバ効果発生時のお湯と水の過冷却状態の時間を比較すると、お湯のほうが水よりも圧倒的に短いことが分かる。またムペンバ効果が発生しなかった際のお湯の過冷却状態の時間は水と概ね同じであった。ここから過冷却が短時間で終了するときムペンバ効果の発生が確認できると考えた。

〈実験2〉

お湯と水の冷却曲線に大きな違いはなかったことから、お湯を冷却することで得られた水と直接水道から得られる水の内部の様子の違い(水の前処理すなわち冷却前に水を加熱し常温まで冷やすという過程による違い)による冷却時間への影響はないと考えた。

〈実験3〉

水面付近のお湯が底付近のお湯よりも凍ったことから、カップ内部で温度のムラが生じていると推測し、それにより熱対流が起きていると考えた。

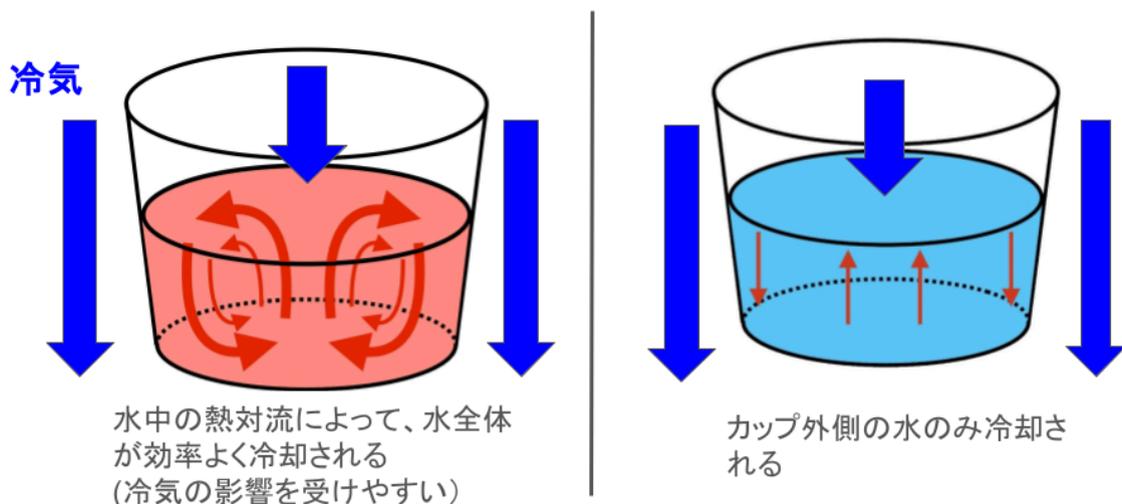
・熱対流について

水温による密度の違いにより熱対流は起こる。具体的には一般的に水温が高まるほど水の密度は小さくなるので、水内部で下方に行くにつれ温度が高くなっている温度勾配が生じている場合、下方の水が上昇し、熱対流が生じる。

この現象は今回の実験でも発生していると考えた。お湯のカップを冷却する際、冷却が進むにつれカップ内部のまだ冷却されていないお湯とカップ外部の冷気により温度が下がっているお湯の間で温度勾配が生じている。そこで内部の水が上昇し、お湯全体が均等に冷凍庫内の冷気と触れ合うことで効率よく冷却が進むと考えた。

一方、水のカップを冷却する際、冷却が進んでもカップ内部で温度勾配が生じづらいのでお湯よりも冷却が遅れたと考えられる。

下図は熱対流による冷却速度の違いを表している図である。



5. 結論

〈実験1〉

ムペンバ効果は、毎回発生するというわけではないが、確かに発生する物理現象である。ムペンバ効果が確認された実験では、お湯の過冷却時間が水の過冷却時間よりも短かった。しかしながら、水の過冷却状態の終了については様々な研究にもかかわらずはっきりとした説がないため、なぜ過冷却期間が短縮されたのかを知ることはできなかった。

〈実験2〉

お湯に加えた前処理、すなわち冷却前に水を加熱し常温まで冷やすという過程は、水の冷却の様子に影響しない。

〈実験3〉

お湯のほうが熱対流が活発におき、それによって内部が効率的に冷却されると考えられる。

6. 参考文献

S. Esposito, R. De Risi, L. Somma, arXiv, 2007, arXiv:0704.1381.

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、発表会にて様々な助言を下された大阪公立大学、近畿大学の先生方に、心から感謝申し上げます。

熱音響現象

1. 緒言

エンジンの種類を調べる中でいくつかの大学等の研究者が実用化に向けた研究が現在行われている、熱音響現象を利用した熱を音に変えて発電する熱音響システムを知った。熱音響現象とは熱エネルギーと音エネルギーが相互に変換される現象である。私達は熱音響現象を理解する足掛かりとして、「ガラスパイプの内部に金網を設置し、ガスバーナーで加熱すると、加熱をやめた後にポーと笛のような音が数秒間鳴る」という現象に注目し、加熱→音が鳴るという一連のメカニズムを解明するための研究を行った。具体的には音が鳴る条件と音の発生源について定性的に考察を行った。

2. 実験手順

実験では、ガラスパイプ（ケニス株式会社 全長50cm 口径28mm 以後「パイプ」とする）、パイプの断面積と同等の大きさにカットした金網（カインズ株式会社 線径0.29mm×20メッシュ）、実験用ガスバーナーを用いた。

以下の実験では、パイプ内の物質は床と平行に入れ、物質の設置する高さはパイプの下端からの長さとする。また、ガスバーナーの火の高さを8cm、加熱時間を10秒に固定する。

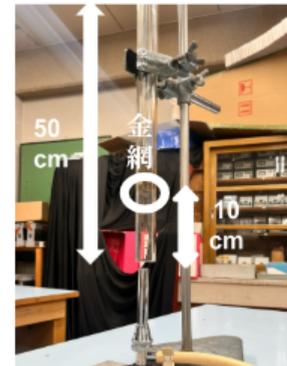


図1 実験装置

【実験1】パイプ内に金網を10cmの所に入れ、加熱し火を止めた。火を止めた直後に燃やした木片を管内に入れ、木片から出る煙が上がる様子を観察した。

【実験2】パイプ内に金網を入れ、金網の設置する高さを1cmから20cmまで1cmずつ変えていき、火を止めた直後に燃やした木片を管内に入れ、煙が上がる様子を観察した。

【実験3】パイプ内にスチールウール、銅線、アルミニウムの3種類の物質を入れた。(図2)加熱し火を止め、音が発生するかについて調べた。この操作を3回繰り返した。

【実験4】パイプ内に巻数が1～15回の銅線を入れた。(図3)加熱し火を止め、音が発生するかについて調べた。



図2 実験で使用した金網、銅線、アルミニウム



図3 実験4で使用した銅線

3. 実験結果

実験1：煙の動きから、金網より下では渦を発生し、金網より上ではそのまま直線的に上昇していることが分かった。(図4)

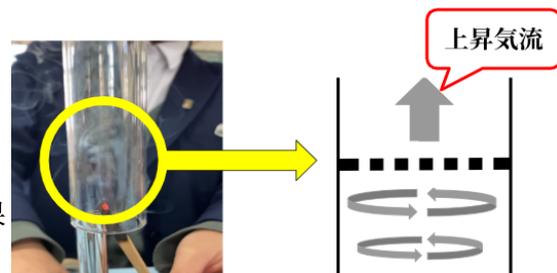


図4 実験1の結果

実験2 : i) 1cm、19cm、20cmの場合...音と渦は発生しなかった。
 ii) 2cm、3cm、15~18cmの場合...音と渦はかすかに発生した。
 iii) 4~14cmの場合...音と渦ははっきりと発生した。
 下の表には、i、ii、iiiの結果をそれぞれ×、△、○で示している。
 ○：音と渦が発生した △：音と渦がかすかに発生した(図6)
 ×：音と渦が発生しなかった

金網の高さ (cm)	音の発生	渦の発生	金網の高さ (cm)	音の発生	渦の発生
20	×	×	10	○	○
19	×	×	9	○	○
18	△	△	8	○	○
17	△	△	7	○	○
16	△	△	6	○	○
15	△	△	5	○	○
14	○	○	4	○	○
13	○	○	3	△	△
12	○	○	2	△	△
11	○	○	1	×	×

表1

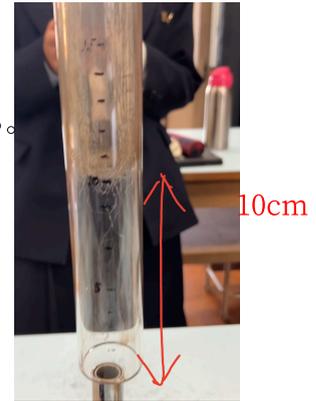


図5 金網の高さ

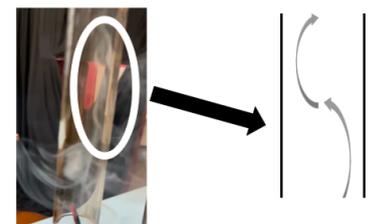


図6 △のとき

実験3:i) スチールウールの場合...スチールウールが燃焼している時に音が発生した。
 ii) 銅の場合...音が発生するときとしない時があった。
 iii) アルミニウムの場合...音は発生しなかった。

実験4:i) 1cm~8cmの場合...音は発生しなかった。
 ii) 9cm、10cmの場合...音はかすかに発生した。
 iii) 11cm~15cmの場合...音は発生した。
 下の表には、i、ii、iiiの結果をそれぞれ×、△、○で示している。
 巻数は銅線の巻数を示している。
 ○：音が発生した △：音がかすかに発生した ×：音が発生しなかった

巻数(回)	音の発生				
1	×	6	×	11	○
2	×	7	×	12	○
3	×	8	×	13	○
4	×	9	△	14	○
5	×	10	△	15	○

表2

4.考察

実験1、実験2

音と渦が同時に発生していることから、音と渦は相関関係があるといえる。

実験3

iiでは、銅線同士の間隙が狭いと、空気が通過する際に、銅線が激しく振動することにより、その振動が音源となり、音が発生すると考えた。

実験4

銅線の巻数を増やしていくと音が鳴るようになったことから、物質にある隙間が小さいほど音が鳴りやすいのではないかと考えた。

5. 結論

私達の研究目的である熱音響現象のメカニズムについて、次のことが分かった。

i)音が鳴っている間に煙を入れると渦が発生する。

ii)管内の物質の網目を増やすと音が鳴る。

一方、実験3のiでスチールウールが燃焼している間に音が鳴った理由について考察できなかったため、この考察を今後の研究課題としたい。

また、上記のiとiiを踏まえ、パイプの長さを変えたり、メッシュ数の大きい物質を燃焼する実験を行うことで、加熱された物質が振動を生む仕組みや物質が固有振動に関わっている仕組みを解明したい。

6. 参考文献

平成30年度大手前高校「熱音響現象」 田之上達也 氷山涼雅 花谷一圭

7. 謝辞

ご指導、ご助言頂いた大阪公立大学、近畿大学の先生方に感謝申し上げます。

合成音声

1. 緒言

ITの発展に伴い、近年急速に成長している技術の一つに、機械とプログラムを用いて人間の声のような音声を生成する「合成音声技術」がある。私たちはそのメカニズムと活用方法に興味を持ち、正弦波を合成して人の声に近い波形を作り出すというシンプルな手法で合成音声を生成することを目標に研究を行った。

2. 実験手順

<実験器具>

パソコン(今回はchromebook)の録画機能を音声の録音に用いた。また、プログラミング言語の1つであるPython(実行環境はGoogle Colaboratory)を用いて、音声データのフーリエ変換及び音声の合成を行った。

<実験方法>

①録音

パソコンの録画機能を用いて、班員5人の母音を「あ」や「い」といった単音(一文字音)ごとに録音する。このときに、すべての音を音階でいう「ラ」の音[周波数220Hz]に固定して録音する。

②フーリエ変換

人間の声は、空气中に伝わる波であり、様々な周波数の波を重ね合わせたものとして表現できる。プログラム上で音声の周波数とその大きさを分析する手段がフーリエ変換である。

班員の声の音声データをPythonのプログラム上でフーリエ変換し、音声の周波数成分を示すグラフを表示する(下図1)。

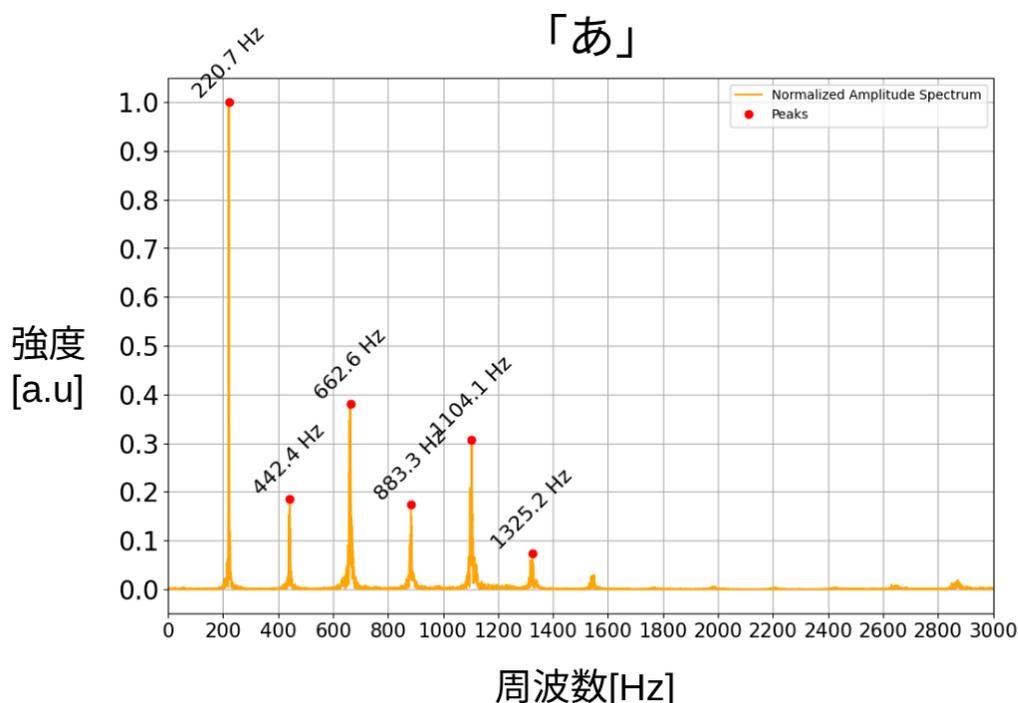
③合成

フーリエ変換により得られたグラフに見られる、ピークに対応する周波数をフォルマント周波数という。グラフから、フォルマント周波数の大きさを読み取る。読み取った各フォルマント周波数とその大きさにより定められる正弦波を重ね合わせることで、単音(一文字音)の母音を再現する。

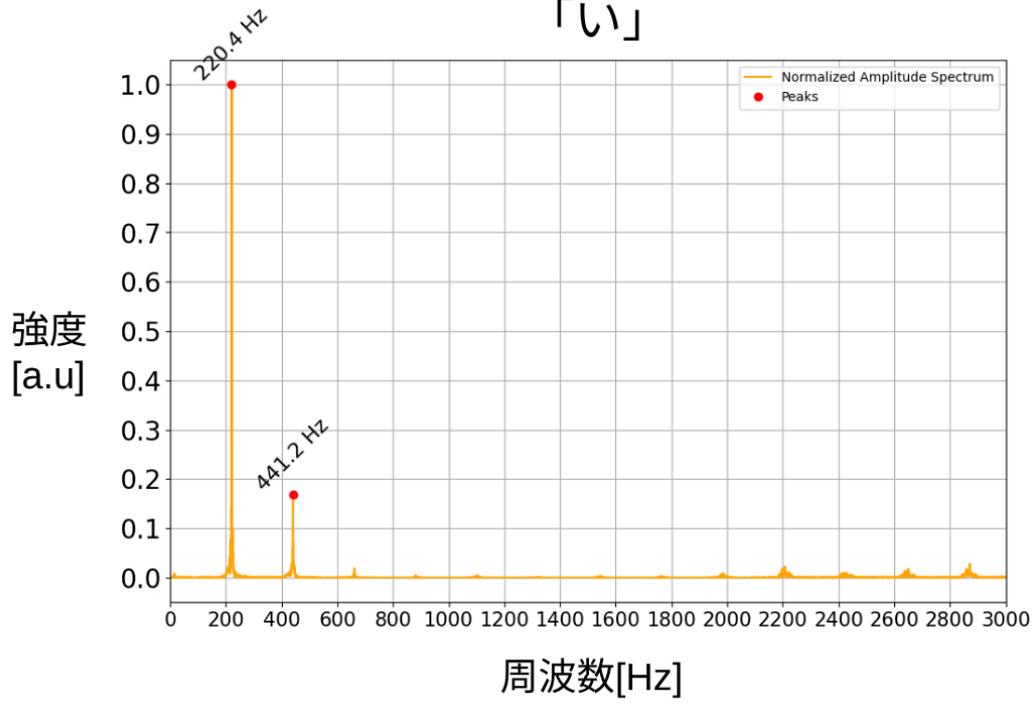
④接続

合成した単音(一文字音)の各母音を「あ」→「い」→「う」→「え」→「お」の順につなぎ合わせて、「あいうえお」という音声を再現する。

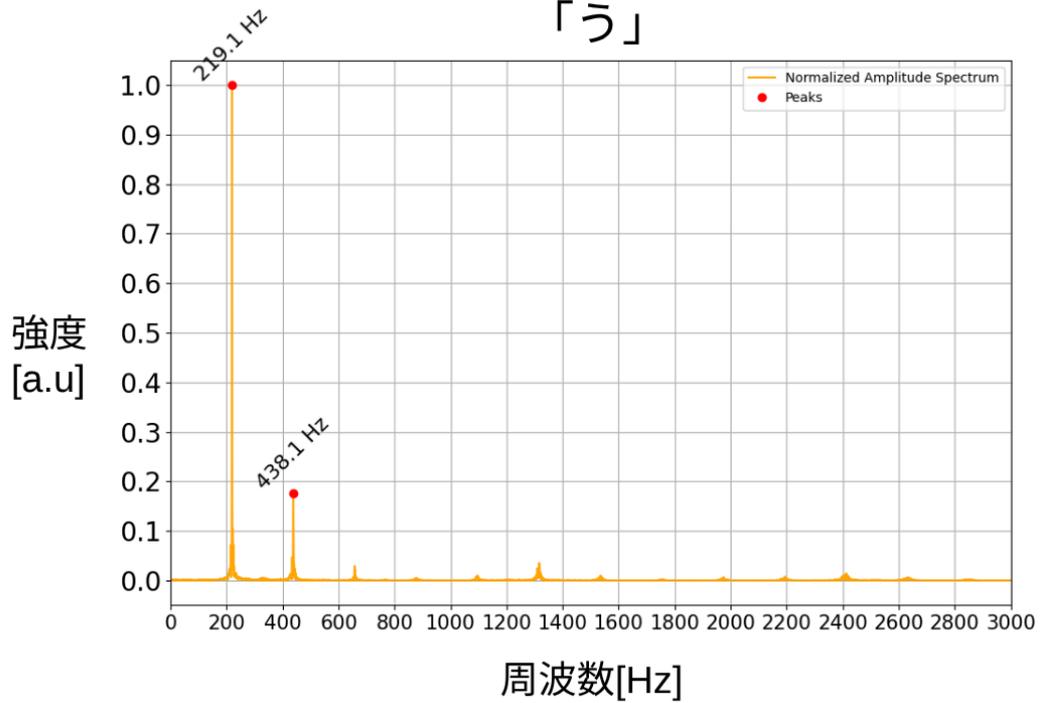
図1 各母音の周波数分布

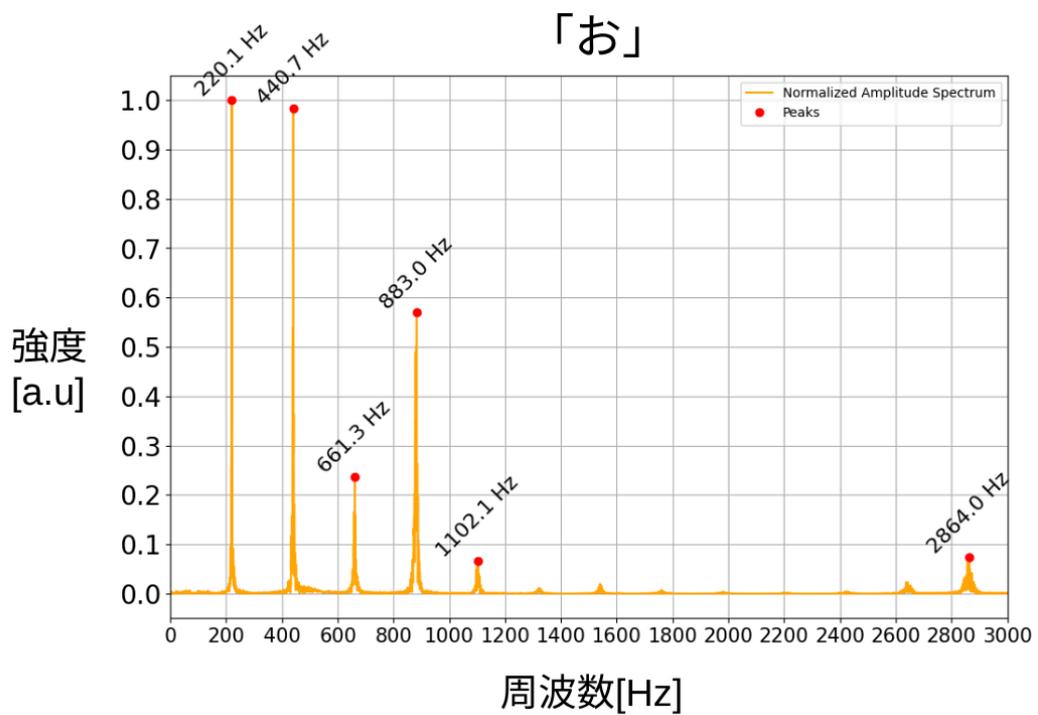
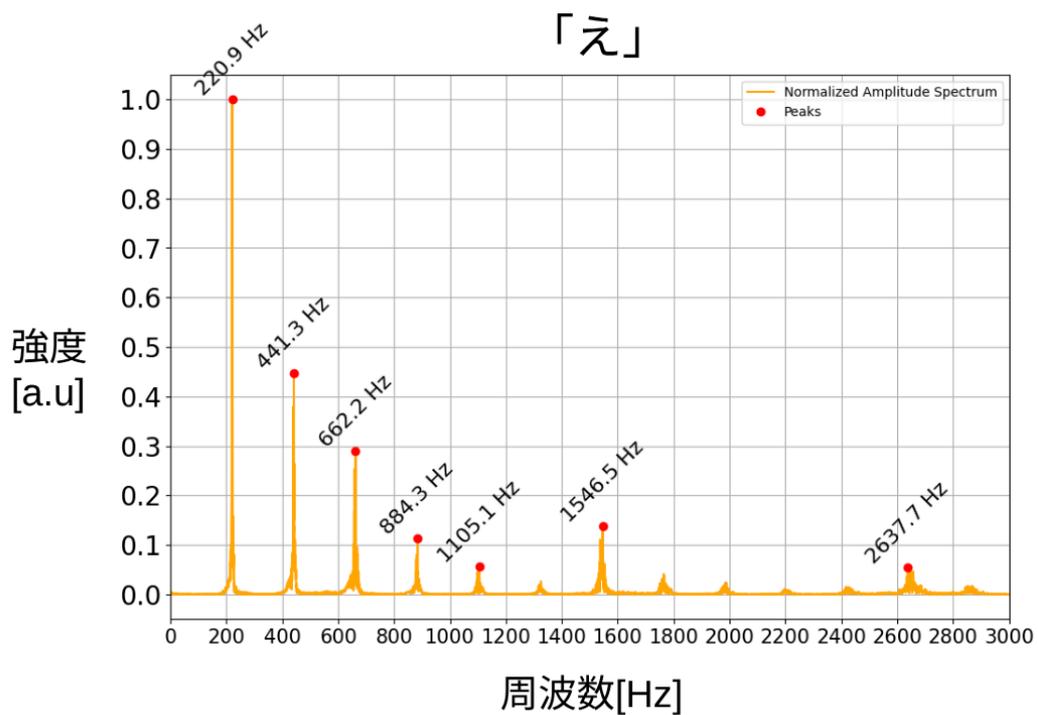


「い」



「う」

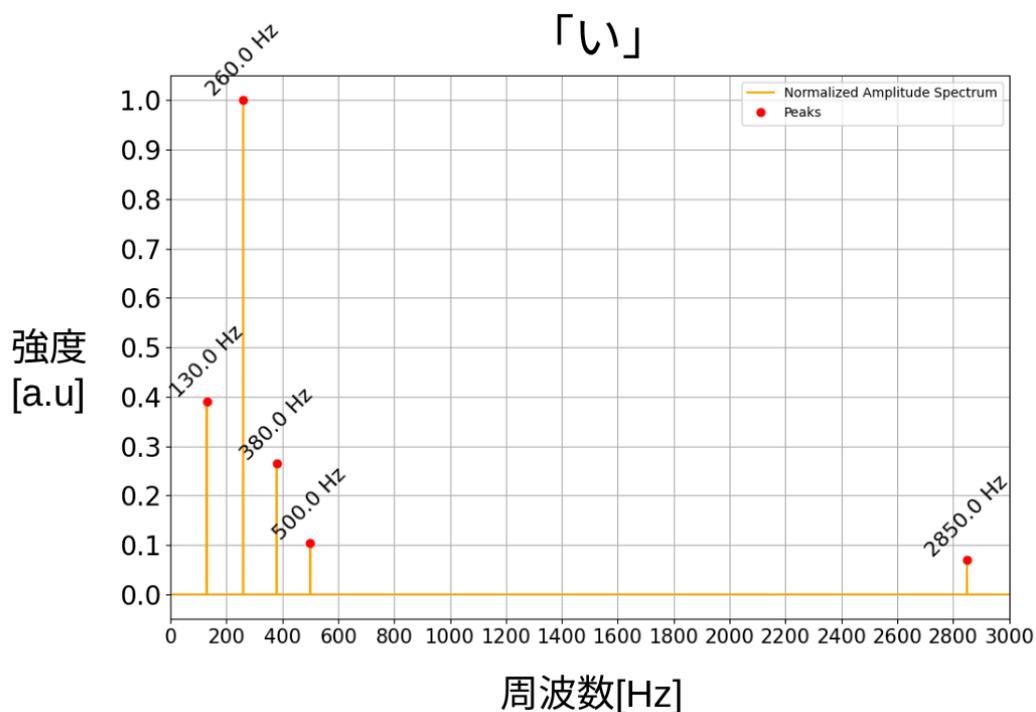
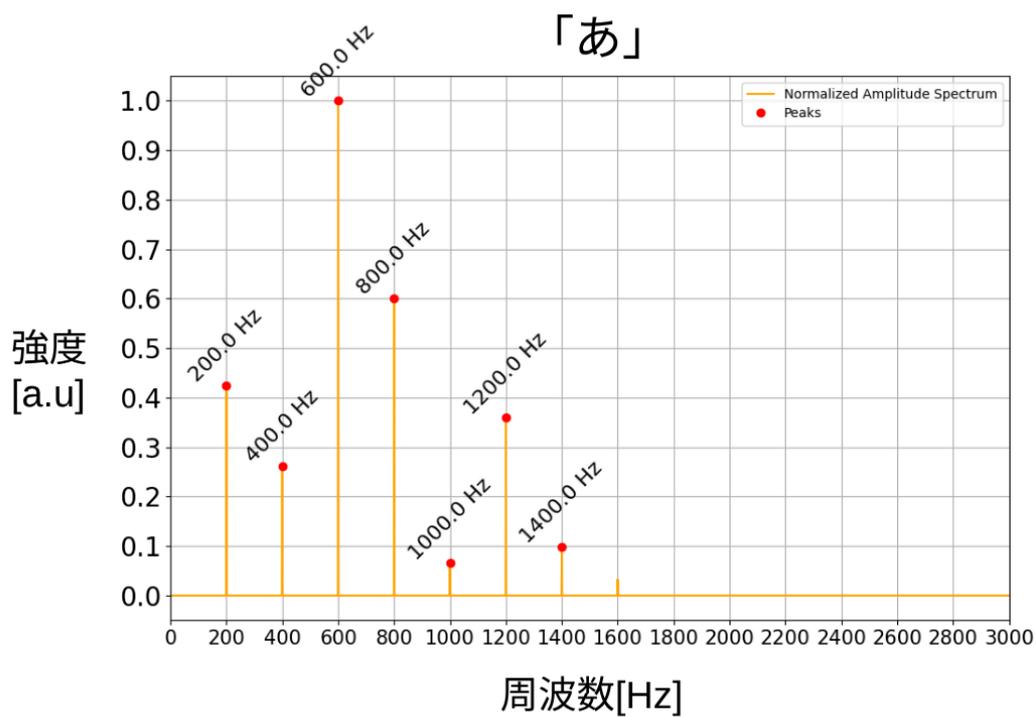


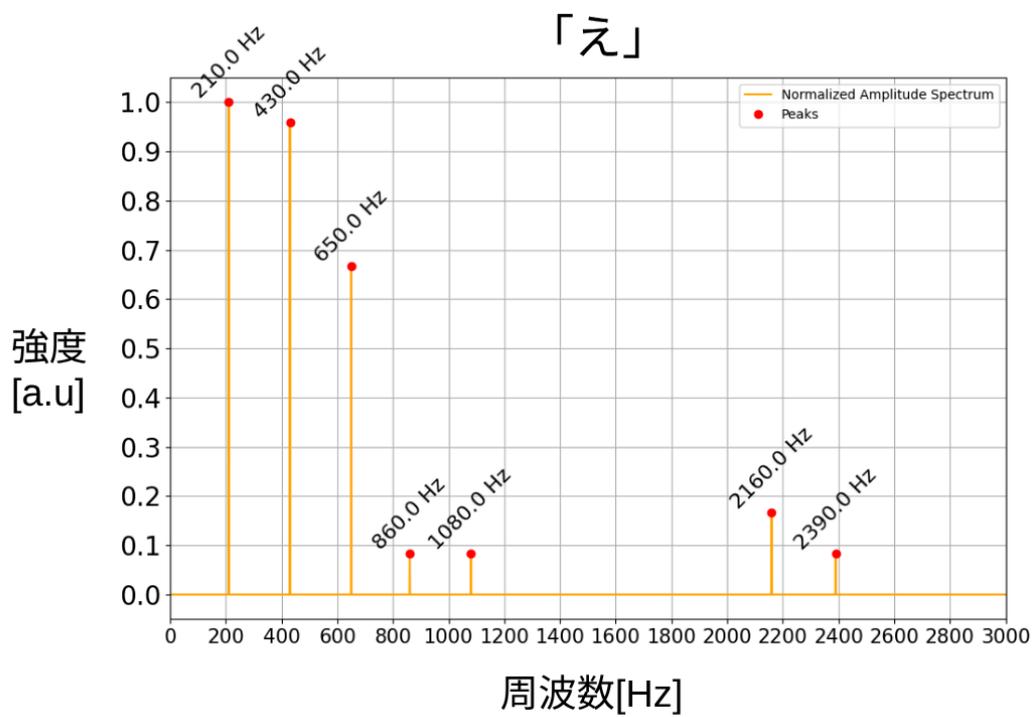
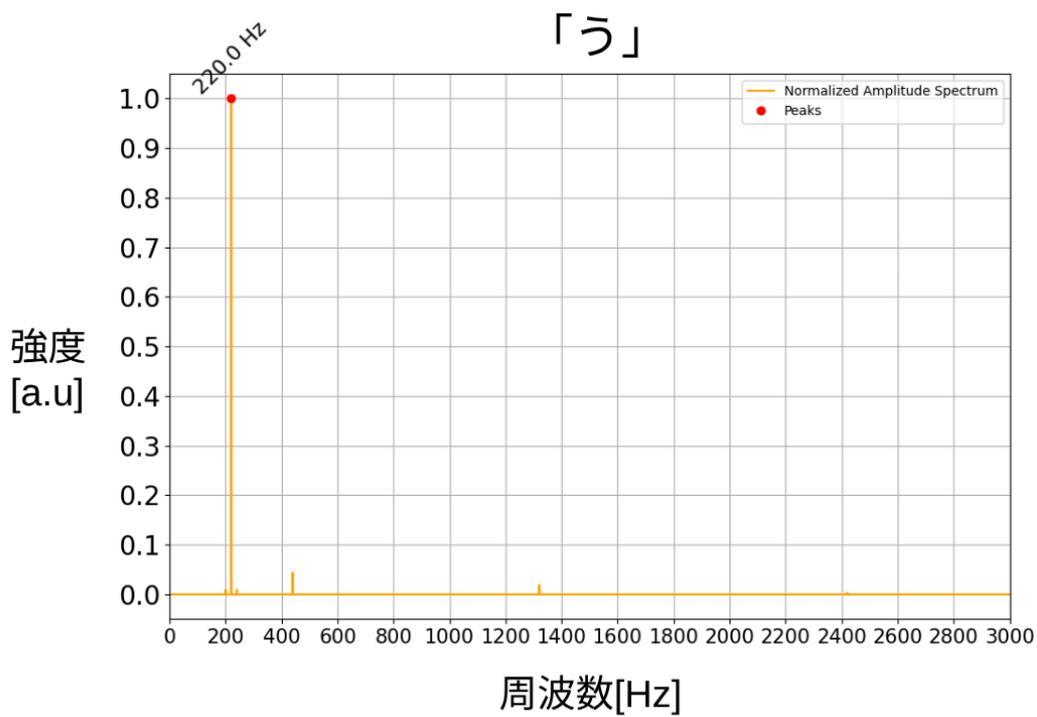


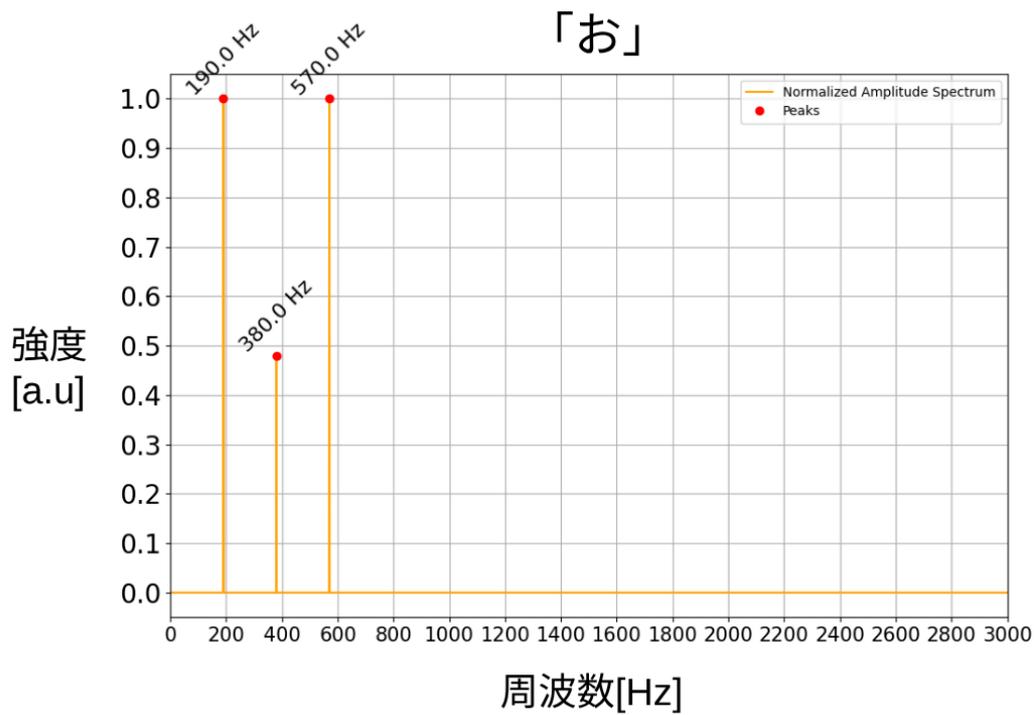
3. 実験結果

以下に、Pythonを用いて合成したそれぞれの母音をフーリエ変換したグラフを示す。(下図2)
ここで、「あ」「い」のような母音一文字を「単音」、「あいうえお」という5つの母音が連続した音を「連続音」、
「あいうえお」という5つの母音が連続した音のイントネーションを変更した音を「イントネーション変更後の連続音」と呼ぶことにする。

図2 生成した合成音声の周波数分布





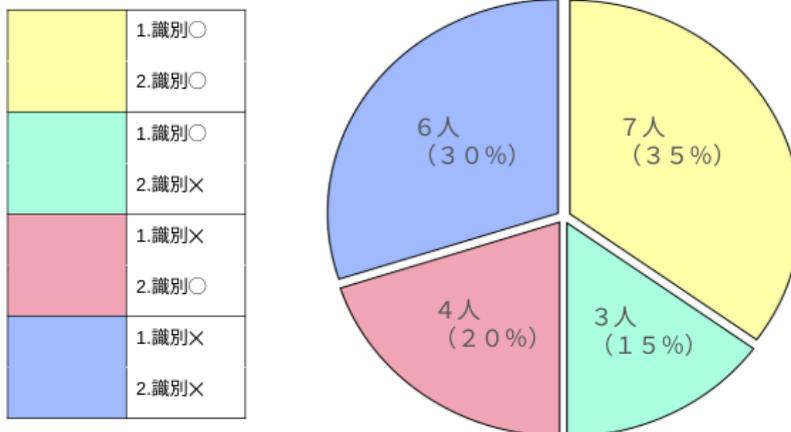


班員5名で作成した音声を聞いたところ単音では「あ」「い」「う」「え」「お」の識別ができなかったが、「あいうえお」と繋げた連続音では識別しやすくなった。

〈イントネーションについて〉

人が発する言葉の中には音程の変化がある。その音程の変化をイントネーションとし、再現することでより人の声に近づくのではないかと考えた。ここで、イントネーション変更後の連続音が「あいうえお」と言っているように聞こえるかどうかのアンケートを実施した。(突然「この音声は何に聞こえますか?」と尋ねた。)

1.イントネーション変更前
2.イントネーション変更後 「あいうえお」と識別できたかのグラフ(20人)



イントネーションを変更しても、「あいうえお」と識別できた人数はあまり変わらなかった。一方で、変更前、変更後合わせて7割の人が合成した音声を「あいうえお」と識別できた。

4. 考察

録音した日本語の母音の声に含まれる各周波数の成分を分析し、その結果をもとに聞き取れるような音声を作成できたことから、日本語の母音をつくる音は各周波数の成分の大きさという要素から成り立っていると考えて良いと言える。また、「あいうえお」とつなげることで聞き取りやすくなったことには、人の音声認識の仕組みが関わっているのではないかと考える。

5. 結論

班員の声から日本語の母音に含まれる周波数成分とその大きさを分析し、それを再現する正弦波を組み合わせることで実際に合成音声を作成した。また、人間が言語を認識するとき、単音を認識するよりも、単語や文章の流れの中において認識していると考えられる。

6. 参考文献

峯松信明．“孤立音[あ]を聞いて/あ/と同定する能力は音声言語に必要か？”．峯松・齋藤研究室．2007
． https://www.gavo.t.u-tokyo.ac.jp/~mine/paper/PDF/2007/SP2007-30_p37-42_t2007-7.pdf

エコスピーカー

1. 緒言

エコスピーカーというものがしばしば売られている。エコスピーカーとは、電力を用いずに音を大きく聞こえさせるもので、様々な形のものがあり、どの形がいちばん大きく聞こえるのか興味を持った。そこで私たちはエコスピーカーを用いることでなぜ音が大きくなるのか、そして、どの形で一番音が大きく聞こえるのかを研究していく。

写真1
メガホン型のエコスピーカー



2. 実験・結果

まず、画用紙を用いて、写真のようにエコスピーカーを模作する。

音源側が直径7cm、それと反対側は直径15cmの円で、エコスピーカーの長さは10.5cmの円錐台にした。また、音源側には高さ1.5cm、幅7cmの長方形の穴を開け、スマホの音が出る部分を挿し込めるようにしてある。そして音源と反対側は、塞がれていない。

この作成したエコスピーカーにスマホ(iPhone13)の音が出る部分を挿して、指定の周波数の音を発してくれるサイト(OnlineMicTest)を用いて1000Hzの音源を流した。(エコスピーカーはすべての音に対応するものなので、今回は高すぎず低すぎない、耳が痛くならないなど、実験に使いやすい1000Hzにしている)

エコスピーカーを通して流れてきた音源の音の大きさを計測するにはスマホ(iPhone12)にダウンロードしたアプリ(Sonic Tools)を使用した。

実験はすべて10回行い、その平均を結果とする。

実験1

模作したエコスピーカーを用いて前方向に1m離れた点とそこから左右に50cm離れた点(右図参照)で音の大きさを計測し、エコスピーカーの有無による指向性の違いがあるか観察する。

(この実験で指向性とは、一般的に音は同心円状に広がっていくところを、一定の方向に集中させることを意味する。)

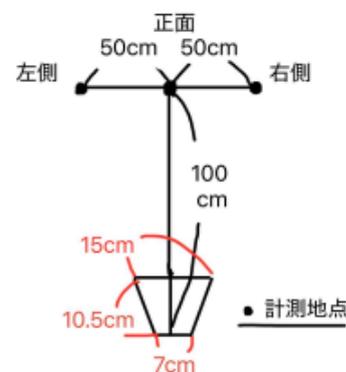


図1 実験1のイメージ

実験1の結果

	左側	正面	右側
エコスピーカーなし	59.0db	52.2db	57.8db
エコスピーカーあり	66.4db	70.0db	64.2db

実験1より、エコスピーカーは指向性を高めていると考えられるので、エコスピーカーの形状による指向性の高め具合の違いを調べるために実験2を行った。

実験2

実験1で用いたエコスピーカー(メガホン型とする)に加えて、円筒形、箱型のものを作り、10cmごとに前方向への音の大きさの変化を計測する。



円筒形
写真2



箱型
写真3

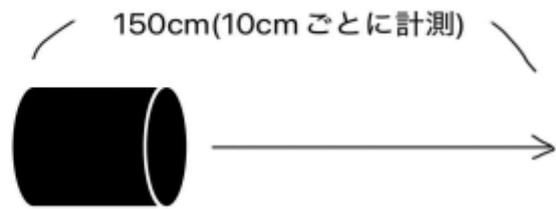


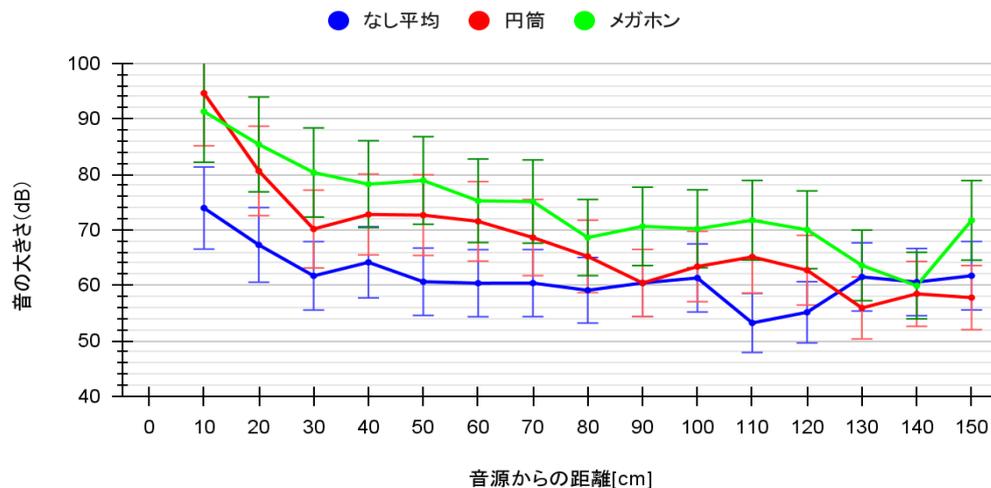
図2 実験2のイメージ

実験2の結果

(10回の実験で計測した最大値と最小値をエラーバーで表示してある。)

また、箱型のエコスピーカーを用いたとき、エコスピーカーを用いなかった場合と明瞭な変化がなかったため、下のグラフには乗せていない)

音源からの距離と音の大きさの関係



グラフより、エコスピーカーなしでの計測よりもエコスピーカーを用いたときのほうが指向性が高く見られ、さらにエコスピーカーの中では円筒形よりもメガホン形のほうがより指向性が高く見られた。

これら2つの実験を終え、次のような仮説を立てた。

仮説: 右の絵のようにエコスピーカーを作る素材を厚くすることで、エコスピーカーから外に逃げってしまう音が小さくでき、より大きな音を計測できる。

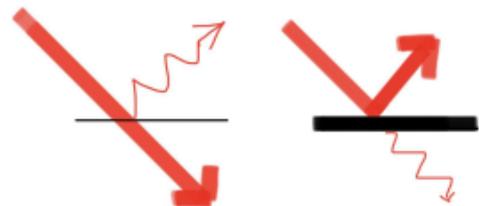


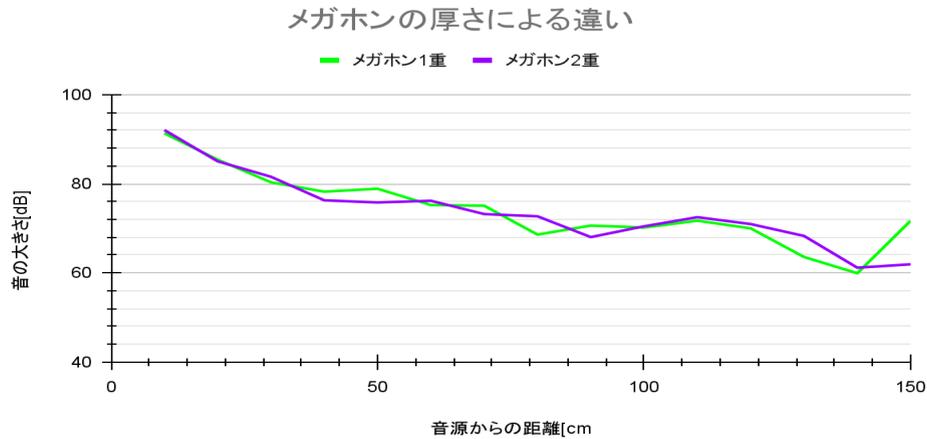
図3 仮説のイメージ

この仮説を調べるために、続いて、実験3を行った。

実験3

3つのうちで一番指向性が高かったメガホン形を画用紙を2重にして計測する。

実験3の結果



4. 考察

実験1よりエコスピーカーは指向性を高めることで音が大きく聞こえるようにしていると考えられる。また、実験2でより大きな音を計測できたのは、メガホン型が円筒形や箱型に比べて 指向性が高いためだと考えられる。さらに、実験3では、指向性が高いため、音源から遠くなくても音の減衰が小さいと考えられる。なお、実験4ではエコスピーカーの画用紙が1重なのと2重なのでは差がないことがわかった。

5. 結論

- ・エコスピーカーによって音源の音の指向性を高めることができる。
- ・箱型、円筒形に比べてメガホン型が指向性が高い。
- ・メガホンの厚さによる違いは見られない。

6. 参考文献

使用したサイト

<https://www.onlinemictest.com/ja/tone-generator/>

使用したアプリケーション

<https://apps.apple.com/app/id1245046029>

クラドニ図形

1. 緒言

クラドニ図形の不思議さに惹かれ、クラドニ図形が形成されときの振動数と図形について、なんらかの規則性を明らかにすることを目的としてクラドニ図形の研究を行った。

2. 実験手順

クラドニ図形実験セット(NaRiKa)、低周波発振器(TEXTIO)を使用。

円と正方形の板において、特定の周波数で現れる形を記録した。

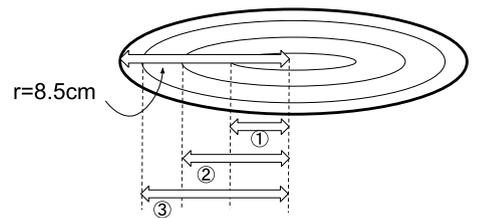
円板の半径8.5cm、正方形の板の一辺14cm、板の素材は鉄。

低周波発振器を用いて半径8.5cmの円形の鉄板を乗せたバイブレーターを振動させて、図形が形成された振動数と図形を記録する。0Hzから徐々に増加させていって模様ができる振動数を探し出す。粒子は大きさが均一ではない砂を使用する。

3. 実験結果

以下の図形が現れた。

ただし、①,②,③はそれぞれ右図の長さを表したものである
鉄板の半径8.5cm



振動数(Hz)	197Hz	205Hz	825Hz	2100Hz
上図の ①,②,③(cm)	-	6,-,-	2,6.5,-	1,4.7,7

197Hzでは双曲線のような図形、205Hz、825Hz、2100Hzでは円が生成され図形的な規則性が見られた。

しかし、クラドニ図形の円の半径と周波数に比はなく、数値的な規則性は見られなかった。

4. 考察

図1のように円の中心と円周上の一つの点を結んだ線分上における定在波について考える。共振する振動数が、基本振動数の2倍,3倍となり節の間隔が1/2,1/3倍になるのではないかと予想し、生成される円の数も増加していくと予想した。

しかし、197Hzでは円と異なる図形が生成された。

197Hzのような図形ができた原因として、振動源が円の中心から少しずれていたことが考えられる。またその結果、図2のような振動が生じたと考えられる。

また205、825、2100Hzでは円が生成されたが振動数に関係は見られなかった。

よって弦の定在波のように正弦波で表されるものではない。

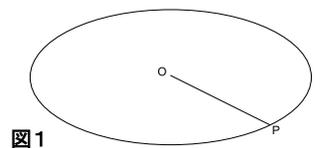


図1

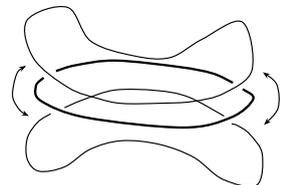
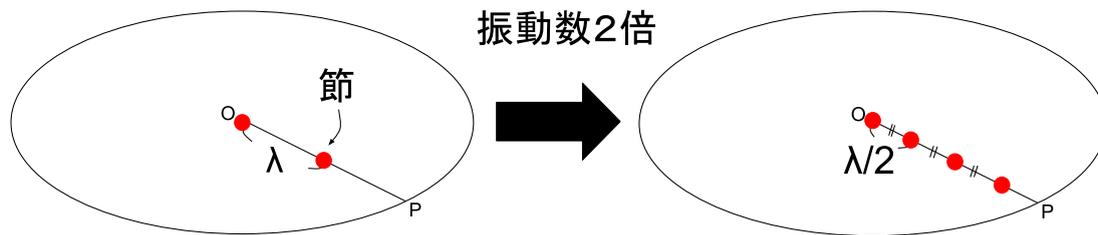


図2



5.結論

クラドニ図形の振動数や節の位置は、弦の定在波からの予想からの予想とは異なることが分かった。また、振動源が円の中心と異なると、別の図形が生じる可能性があることが分かった。205Hz以降で生成された図形では形の規則性が見られたが、クラドニ図形の形状や大きさと振動数の間に単純な数値的規則性を見出すのは困難であり、弦の振動に見られる整数倍の共鳴振動数や等間隔に現れる節は現れなかった。これらの図形と振動数を予測するには、2次元空間での振動の様子を記述する偏微分方程式による考察が必要であると考えられる。

6.参考文献

小釜燈台.”クラドニ図形の数値解析-桂田研究室”.明治大学.2013.

<http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/report/open/2012-kogama.pdf>,(参照2025-5)

磁性流体に生じるスパイク現象について

1. 諸言

磁性流体に磁場を加えると、トゲ状のスパイク構造が現れる。この現象をスパイク現象という。磁性流体に磁石を近づけると、磁石の種類によって生じるスパイクの本数の変化がみられた。そこで、スパイクの本数に着目し、生じるスパイクの本数が変わる条件は、磁石のどのような条件が関係しているのかを突き止める研究を行った。

2. 実験手順

<実験器具>

磁性流体(シグマハイケミカル,DS-50)

磁石①(ケニス株式会社,118-0114)

磁石②(NaRiKa,B10-3300)

磁石③(NaRiKa,B10-3301)

磁石の詳細は表1の通り

容器(イノマタ化学株式会社,ドライブードキャニスター520)

種類	磁束密度 (mT)	底面積 (mm ²)	高さ (mm)
①	330	710	5.0
②	465	620	5.0
③	330	1960	5.0

<実験方法>

[実験1]

図1のように磁石①,②,③を、磁性流体を入れた容器の底から一つずつ下からゆっくり近づけたときに形成されるスパイクの本数を計測する。

表1

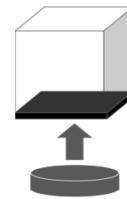


図1

容器に接する面には磁石①が用いられる



図2

[実験2]

①,②の磁石を図2のように重ね合わせて、実験1と同様に磁石を近づけ、そのときに形成されるスパイクの本数を計測する。

[実験3]

磁性流体の底面に磁石のN極とN極、および、磁石のN極とS極を、2つの磁石を接触させず同時に近づけ、形成されるスパイクの様子を観察する。

3.実験結果

[実験1]

表2の結果になった。

磁石①および②を比較すると、磁束密度が変化しているにもかかわらず、発生するスパイクの本数に変化はあまりみられなかった。

一方で、磁石①および③を比較すると、底面積が大きくなると、生じるスパイクの本数が多くなったことがわかった。

種類	磁石			スパイクの本数(平均)
	磁束密度(mT)	底面積(mm ²)	高さ(mm)	
①	330	710	5.0	4.4
②	465	620	5.0	4.3
③	330	1960	5.0	86

表2※スパイクの本数は10回の平均値

[実験2]

表3のような結果になった。

容器に接する表面積が同じ時、磁石の高さが高くなるほど、生じるスパイクの本数は多くなるという傾向がみられた。

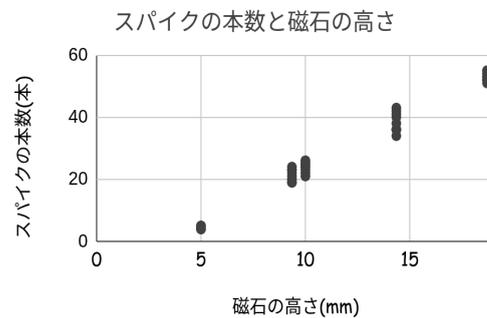


表3

[実験3]

磁石のN極とN極を容器の底に近づけると、それぞれの磁石に対してスパイクが生じるが、それぞれのスパイクの間は、きれいに分かれている。

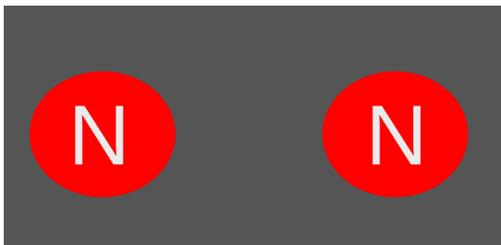


図4



図5

磁石のN極とS極を容器の底に近づけると、それぞれの磁石に対してスパイクが生じるほか、磁石と磁石の間は、磁性流体のスパイクの一部がつながる。

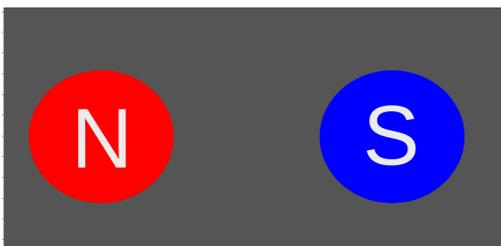


図6



図7

4.考察

(i)スパイク構造が形成される理由について

実験1,2より、スパイクの本数が面積と高さに依存することがわかる。

実験3より、同極同士が同じ面にあると磁力線が繋がることがないのでスパイク同士はくっつかず、 z 異極同士が同じ面にあると n 極側から出た磁力線が s 極に入るためスパイク同士がくっついたと考えられる。よってスパイクは磁力線に沿うと考えられる。

- ①磁石によって磁化された粒子同士がつながり連なっていく。
- ②①で形成される連なりを止めようと表面張力がはたらき、スパイクのような形になる。
- ③粒子同士には反発力があるため、磁化されていたとしても連なりを形成しない粒子が存在し、それらが液体を構成する

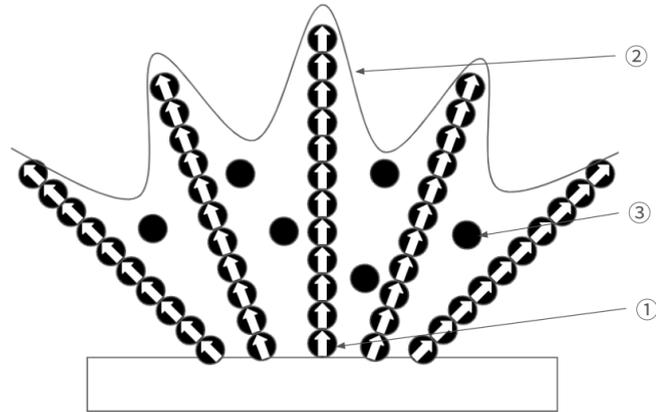


図8

(ii)高さの変化によるスパイクの本数の変化について

磁石の極を単磁価として考えると、図9は高さの大きな磁石、図10は高さの小さな磁石が作る磁力線の様子となる。磁場の向きは磁力線の傾きと同じであるため、N極から見て同じ位置とある点における磁場の向きは図8,9の矢印のようになる。その結果、磁石の高さにより磁場の向きが変化することがわかる。

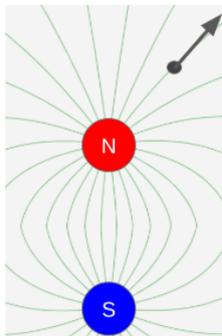


図9

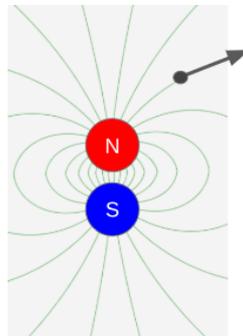


図10

スパイクは磁力線に沿って形成されるため、磁場の向きが水平方向へ近づくとスパイクの向きも水平方向に近づく。スパイクの向きがある程度水平方向に近づくとスパイクは形成されなくなるため、磁場の向きが鉛直方向に近くなるため磁石の高さが大きくなるとスパイクの本数が増加する。

(iii)底面積の変化によるスパイクの本数の変化について



図11



図12

磁石の磁束密度が同じ場合、磁力線の本数は磁石の底面積に比例するため形成されるスパイクの本数が増加することがわかる。しかし実験1の結果から比例より大きな割合で増加することがわかるので他の要因もあると考えられる。図11,12において黒い棒は磁石、緑の線は磁力線を表す。底面積が同じ磁石2つと底面積が2倍の磁石1つがつくるスパイクの本数について比較すると、底面積が同じ磁石2つの場合は図13の赤い丸の部分では水平方向の磁場が大きく鉛直方向の磁場が小さくなるためスパイクを形成しない。しかし、底面積が2倍の磁石1つの場合は図14のように、図13の赤い丸に相当する部分が存在しないため、スパイクを形成する磁力線の本数が増加する。したがって、磁石の底面積が増加するとそれに伴いスパイクの本数も増加する。またその増加は磁石の底面積に比例するわけではない。



図13



図14

5.結論

- ・磁石の底面積や高さが大きくなるとスパイクの本数も増加する。
- ・スパイクは磁力線に沿って形成される。

6.参考文献

- ・シグマハイケミカル DS-50化学物質等安全データシート
<http://www.sigma-hc.co.jp/MSDS/DS-50%20GHS.pdf>
- ・株式会社イチネンケミカルズ フェリコロイド
https://www.ichinen-chem.co.jp/pdf/pdf temp/20141111103331_fericolloid.pdf
- ・Jabalab 電気と磁気シミュレーション
<https://javalab.org/ja/magnetic force ja/>

7.謝辞

本研究に対してアドバイスを提供して下さった皆様に心から感謝致します。

直流から交流への変換

1. 緒言

電流は流れる向きが周期的に変わる交流と常に一定の向きに流れる直流の2つに分けられるが、発電所で作られる電流は交流で、それを直流へと変換して利用している。磁石とコイルを用いて作られる交流電源から直流を取り出すことはダイオードを用いた回路で容易にできる。一方、私達は電池から作られる直流を交流へと変換し利用することは可能なのか疑問に思い、直流から交流へと変換し、その周波数を調整、加えて元の直流電圧に近い交流電圧を得ることを目標に以下の実験を行った。

2. 実験手順

〈実験で用いた回路及び電子部品〉

図1 スイッチング回路

まず、交流を作り出すためにスイッチング回路(図1)を用いた。斜めの位置にあるスイッチ(1,1' 同士と2,2' 同士)を交互に押しと抵抗の部分で電流の向きが変わるため交流を取り出すことができる回路である。

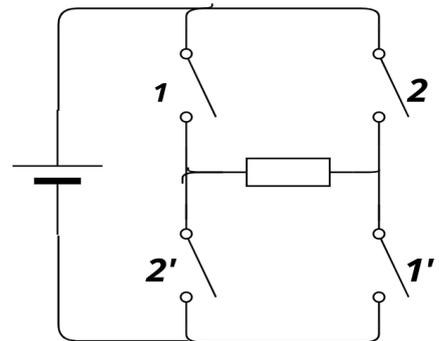


図1 スイッチング回路

図2 トランジスタ(スイッチング作用)

ベース、エミッタ、コレクタの3本の足がある。ベースに電流が流れると、コレクタからエミッタ方向に電流を流すという性質がある(スイッチング作用)。

スイッチング回路では手動でスイッチを切り替える必要があり、一般的な交流の周波数とはかけ離れている上に不安定である。そこで、スイッチング回路のスイッチをトランジスタに置き換えて電流でオン・オフを制御できるようにした。

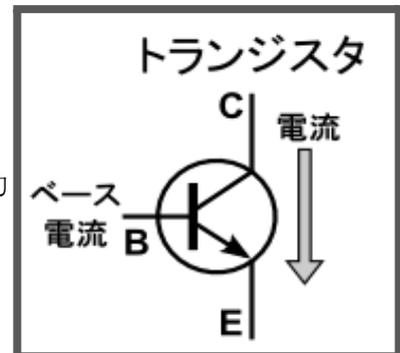


図2 トランジスタ

電流が交互に流れるような回路を用いると、その電流をトランジスタのベースに流すことで、スイッチのオン・オフが切り替わり続け、スイッチング回路で交流を作り出せる。そこで目をつけたのが、パルス発振回路である。

図3 パルス発振回路

抵抗、トランジスタ、コンデンサーから構成される回路である。AとBでは周期的に電流が流れる場所が変わる。つまり一方に電流が流れているとき、もう一方には電流が流れていない。そしてこの切り替わる周期は回路内のコンデンサーの電気容量に依存する。

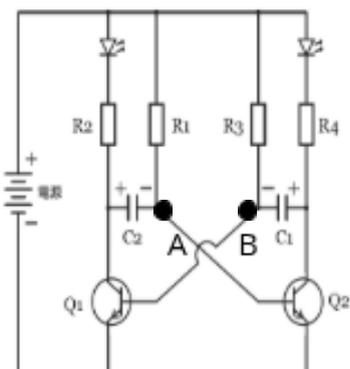


図3 パルス発振回路

3.実験と結果

実験1

- ①パルス発振回路の交互に電流が流れるA部分、B部分をそれぞれスイッチをトランジスタに置き換えたスイッチング回路の1,1'と2,2'と接続する。
- ②抵抗部分の電圧をイーザーセンスによって測定する。電源電圧は4.5V、抵抗は100k Ω ,1000k Ω 電流の周期はコンデンサー(1 μ F,100 μ F)によって制御する。

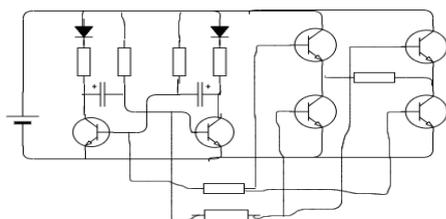


図4 設計回路

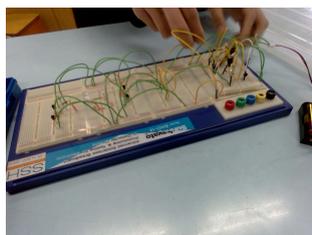


図5 実験回路

結果1

直流を交流に変換できた。また、コンデンサーの電気容量を調整することで、交流の周波数を調整することができた。電気容量を互いに100 μ Fにしたとき、周波数は約1.55Hz、1 μ Fにしたとき、約172Hzとなった。

また、起電力4.5Vに対し計測した交流の最大値は約1.85Vであり実効値は約1.31Vであった。加えて、コンデンサーの電気容量を1 μ Fにすると右下のグラフのように振幅の値も周期的に変化した。

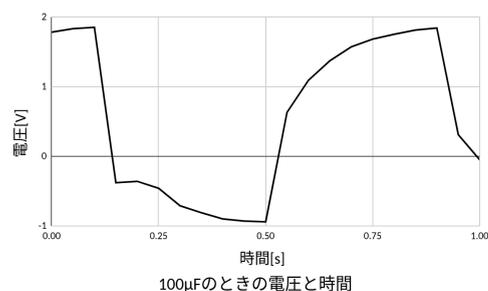


図7 100 μ Fのときの電圧と時間の変化

電気容量	100 μ F	1 μ F
周波数	約 1.55Hz	約 172Hz
電圧の 最大値	1.85V	1.85V

図6 コンデンサーの電気容量における周波数や電圧の最大値の変化

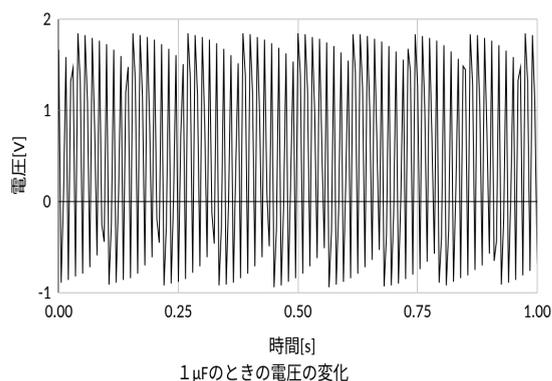


図8 1 μ Fのときの電圧と時間の変化

このように、図4の回路を用いれば直流を交流に変換できることがわかったが、電圧の最大値の減少や振幅の変化が生じているため、それを改善するため実験2を行った。

実験2

- ①スイッチ回路とパルス発振回路の接続箇所をスイッチ作用に関わる部分のみにする。
- ②スイッチ回路と発振回路それぞれに電池を接続する。

図9 実験2で作成した回路

電池を分けることで、先で述べた実験1での改善点を修正できると考えた。電源を区別するために、並列に接続していた箇所を分離し、スイッチ回路のトランジスタへと接続している箇所のみを残した図がこの図である。すなわち、独立したスイッチ回路とパルス発振回路を一部でのみ繋いだものがこの回路である。

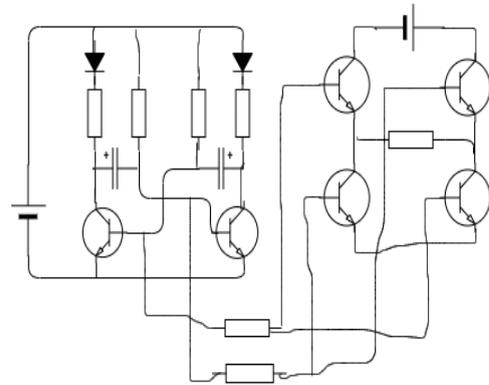


図9 実験2で作成した回路

結果2

同様に直流を交流に変換できた。周波数に関しても同様で、交流の最大値も変化しなかったが、実験1と比較したとき、振幅の周期的な変化をおさえることができた。

4.考察

実験結果から、交流の電圧の最大値と起電力の電圧の最大値に差が生まれること、発振回路のコンデンサーの電気容量を小さくすると、電圧が振動するとともに、電圧の最大値まで振動し始めたことがわかる。

ここから仮説として、トランジスタのコネクターを通る電流が流れていないと考察し、電流がそこに流れるようにするため、スイッチ回路のみを流れる電池を用意した。この回路を用いて再度測定したところ、電圧の振動がなくなり、より交流に近い波形が見られた。

5.結論

コンデンサーを用いた発振回路の振動で、スイッチ回路を制御して、直流を交流に変換することは可能である。加えて、発振回路の振動周期を決定するコンデンサーの電気容量を大きくすることで、交流の振動周期も長くなることがわかった。

また、発振回路とスイッチ回路で電源を一つとしたとき、交流の振幅の大きさが振動した。この問題は電源を2つに分けることで解決した。

6.参考文献

堀 桂太郎.初めて学ぶデジタル回路入門ビギナー教室.2009,p93,p94,p95

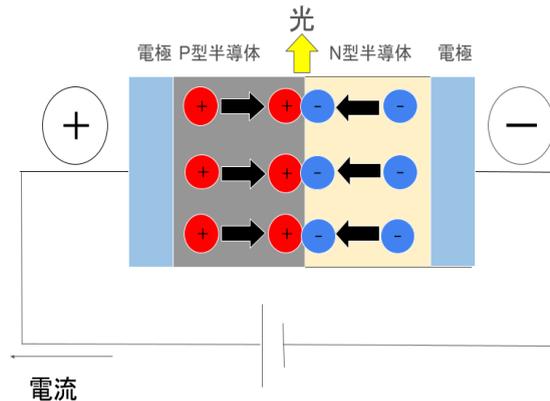
7.謝辞

本研究では大阪公立大学、近畿大学の先生方には研究へのご助言をいただき心より感謝申し上げます。

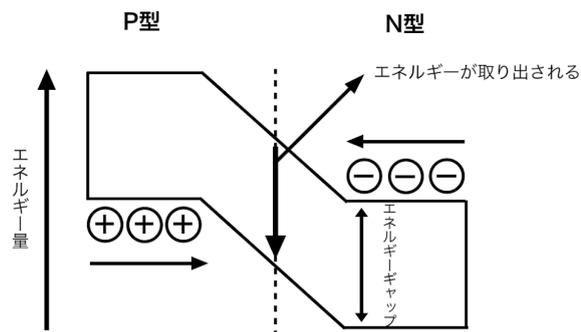
LED発電 -電流の抽出に成功-

1. 緒言

LEDは、光を発するだけでなく、光を当てることで発電することができる。LEDはP型半導体とN型半導体を接合させた半導体ダイオードのことである。P型半導体は正孔が多く、一方でN型半導体は電子が多い状態であり、ここに電流を流すことでP型半導体の正孔とN型半導体の電子が移動する。そして移動してきた電子と正孔が接合部で出会い結合する。これを再結合と言ひ、その際に、エネルギーが光として放出される。



半導体は、電子が自由に移動できる「伝導帯」と、電子が移動できない「価電子帯」という2つのエネルギー帯に分かれている。この2つの帯の間には、電子が移動できないエネルギーギャップが存在する。LEDに光を当てることで、エネルギーが電子と正孔の生成に使われ、それが電流として取り出せるということである。このLEDが発光する過程を逆に利用すると電流が流れる。LEDに光を当てるとP型、N型半導体の接合部で光のエネルギーが電子を価電子帯から伝導帯にたたき上げて、自由電子とホールに分離し、ホールはP型、自由電子はN型を通過して外へ流れ出すことで電流が発生する。私達はこの仕組みを利用し、ハンディファンを回せるほどの電力(2.5~5.0W)を得て、LED発電を実用化させエコ社会に役立てることを目標に研究を行った。



2. 実験手順

〈実験器具〉

超高輝度赤色LED(秋月電子,OS5RKA5B61P)

Kenis強力ランプ(ケニス株式会社)

ブレッドボード(秋月電子,EIC-801)

ジャンプワイヤキット(サンハヤト,SKS-350)

デジタルマルチメータ(Kaise,C1 S405400001062)

マイクロアンペア計,電圧計

【実験1】

直列回路でLED発光を行うときを考えるために、直列につなぐLEDの個数を増やしていったときの電圧の変化を調べた。

〈実験条件〉

天候:晴れの日、曇りの日でそれぞれ計測する。

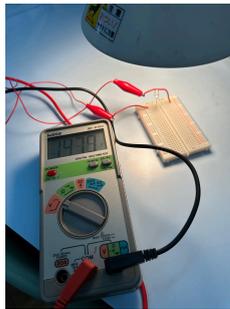
照射する光:太陽光、ランプの光

光の当て方:LEDと地面が垂直になるようにする。

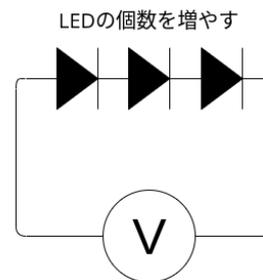
〈太陽光〉



〈ランプ〉



〈回路図〉



【実験2】

私達の持っているLEDを、できる限り繋いで電流値の値を測定した。太陽光を照射し、LEDを直列に3個、それを並列に120列、合計360個のLEDをつなげて測定を行う。

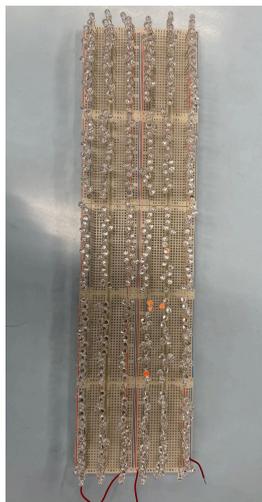
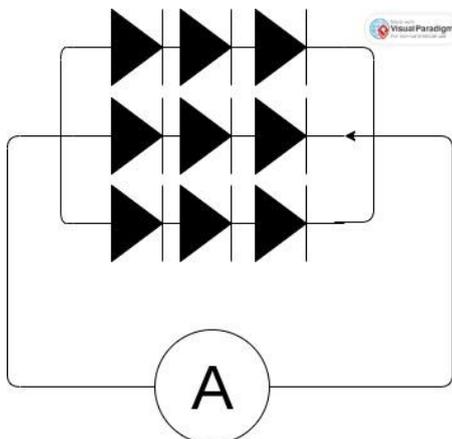
〈実験条件〉

天候:晴れの日計測

照射する光:太陽光

光の当て方:LEDの発光部分に直接当てる

〈回路図〉



【実験3】

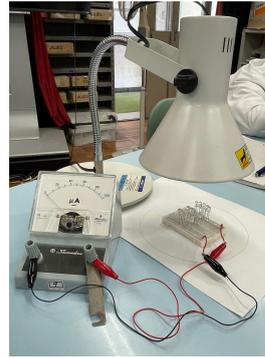
LEDの個数を3個ずつ増やしていき、
LEDの個数と電流値に関係があるのか調べた。
ランプの光を照射して実験を行う。

〈実験条件〉

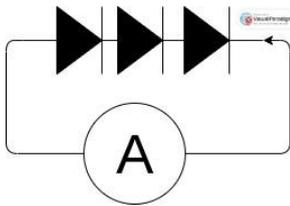
照射する光:ランプの光

光の当て方:LEDの発光部分に直接当てる

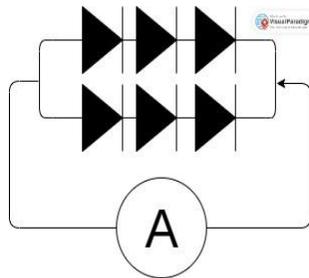
〈回路図〉



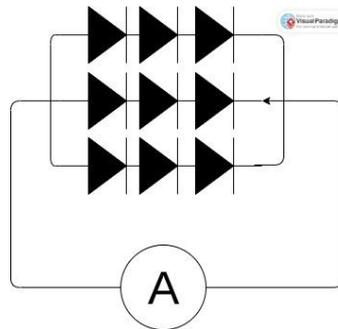
3個



6個



9個



【実験4】

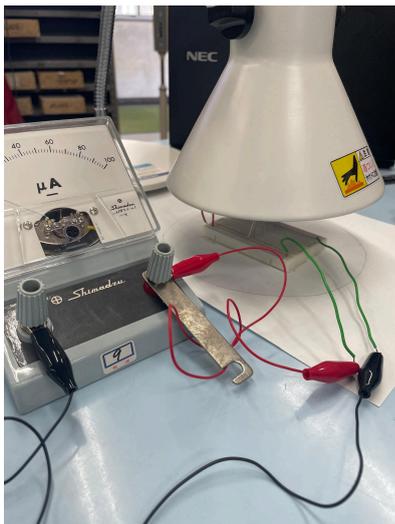
ランプとLEDの距離を変えて、実験3と同様の実験を行い、電流値の変化を調べた。

〈実験条件〉

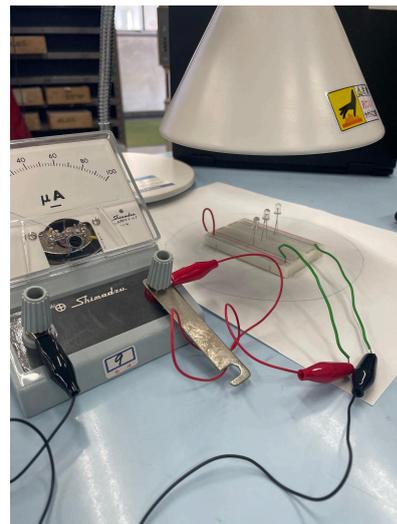
照射する光:ランプの光

光の当て方:LEDの発光部分に直接当てる

〈5cm〉



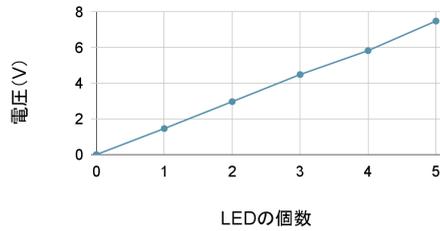
〈10cm〉



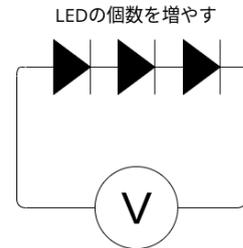
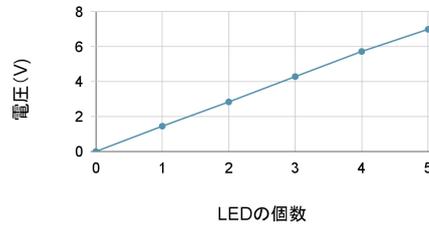
3. 実験結果

【実験1】

ランプの光を照射したとき



太陽光を照射したとき



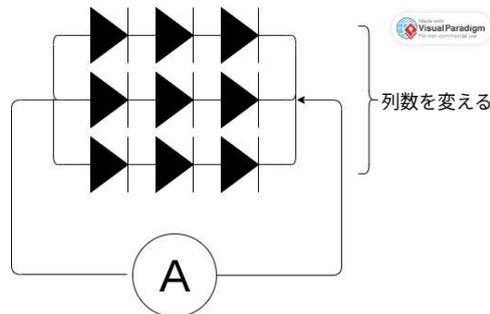
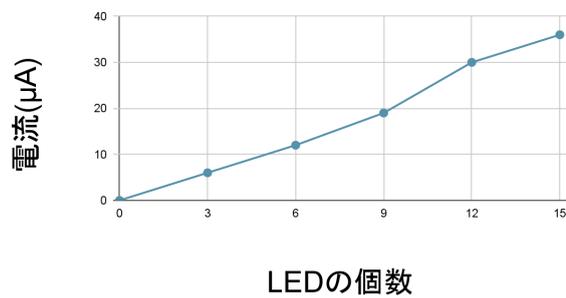
ランプの光、太陽光のどちらの場合でも、直列に繋いだLEDの個数と電圧の値に比例関係が見られた。どちらの場合も、LEDを1個増やすごとに約1.4~1.5Vずつ上がった。

【実験2】

LED360個で、約1mA計測することができた。

【実験3】

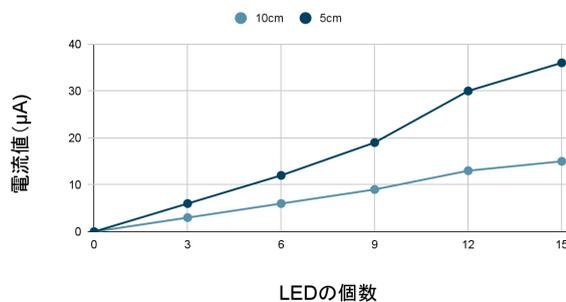
③LEDの個数を増やしていったときの電流の変化



並列の列数と電流値に比例関係が見られた。

【実験4】

光源とLEDの距離を変えたときの電流値の変化



光源とLEDの距離を遠ざけると、電流の値が小さくなることが分かった。

4. 考察

実験1について、ランプの光、太陽光の両方の場合で、LEDの個数と電圧の値に比例関係が見られた。このままLEDの個数を増やしていくと、比例関係が続いていくと考えられる。この比例関係においてLEDを3個増やすごとに、電圧の値は約4.2Vずつ増えていくので、ハンディファンを回すのに必要な最低の電力2.5Wを得るためには、 $2.5 \div 4.2 = 0.5952 \dots$ より約0.6A必要になる。

実験2について、360個のLEDで約0.001A電流値を計測することができた。このことから、実験1で必要とわかった0.6Aを得るためには、 $360 \times 600 = 216,000$ 個のLEDが必要になるため、LEDの個数を増やして電力を得るのは現実的ではないと考える。

実験3、実験4について、LEDを直列に3個つなげたものを並列に多数の列つなげると、並列の列数と電流値に比例関係があることがわかった。並列を一行増やすごとに、約 $6.0 \mu\text{A}$ 電流値が上がることから、実験2のように360個のLEDをつなげた場合、 $720 \mu\text{A}$ の電流しか得られないため、太陽光のほうがランプの光よりもより大きな電力を得られると考えられる。同じ個数の条件において、太陽光とランプの光という条件のみ変えたとき、太陽光のほうが電流値が大きくなることは、ランプを用いるときに比べて効率的に発電できたことや、ランプの光と太陽光のエネルギーの違いによるものだと考える。また、太陽光で実験を行った場合、太陽光のほうが光が当たる面積が大きくなることも、要因の一つだと考える。更に、実験4でLEDとランプの距離を近づけると、電流の値が大きくなることから同様のことが考えられる。

5. 結論

僅かにLED発電による電流の計測に成功したが、ハンディファンを回すほどの電力量は得られなかった。必要な電力量を得るためにLEDの並列につなぐ列数を増やすだけでなく、LEDに効率良く光を当てることが必要である。

6. 参考文献

- ◆物理 教科書 数研出版
- ◆(光電効果)電気を光に 光を電気に NGKサイエンスサイト

7. 謝辞

研究の指導助言をしてくださった大阪公立大学、近畿大学の先生の皆様、ご援助していただきありがとうございました。

タッチパネルをつくろう

1. 緒言

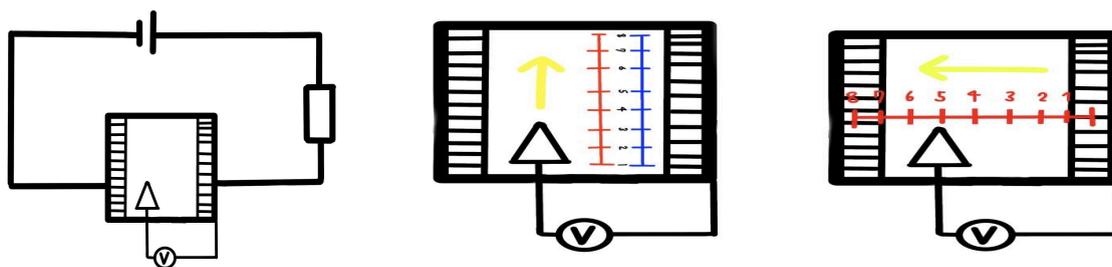
タッチパネルのしくみを考えたことがあるだろうか。スマートフォンなど、身近なものの多くにタッチパネルが使われている。私達は、自分たちの力でタッチパネルを作ることができないかと考え、この研究を行った。

2. 実験手順

タッチパネルをつくるために、一点を押したときに二次元上で位置を特定する必要がある。よって、一次元、二次元それぞれの位置を特定する実験を行った。

(i) 一次元の位置の特定

導電性を持つガラス、抵抗器、電源を直列につなぎ、ガラスの両端にアルミ製のテープを貼る(ガラスの両端を帯電させることで一様な電場をつくるため)。電圧計の端子の一方をガラスの右端に固定し、もう一方を左に1cmずつずらして押したとき、押した位置と計測される電位差にどのような関係が見られるか観察する。また、横軸を同じ位置で縦に1cmずつずらして押し、位置と電位差の関係を観察した。



↑ 回路図

このとき、ガラス内に一様な電場ができていれば、ガラスの右端から左端にかけて等しく電位が下がると考えられるので、この実験では横軸方向に導電性のガラスと端子の接触点を変化させたときは電位差は距離に比例して変化し、縦軸方向に変化させたときは、電位差が変化しないはずである。

使用した物品

ガラス板(アズワン)、アルミ箔テープ(LOEK)、ラップ、アルミホイル、テスター

(ii) 二次元の位置の特定

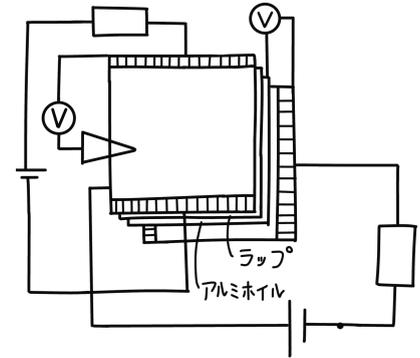
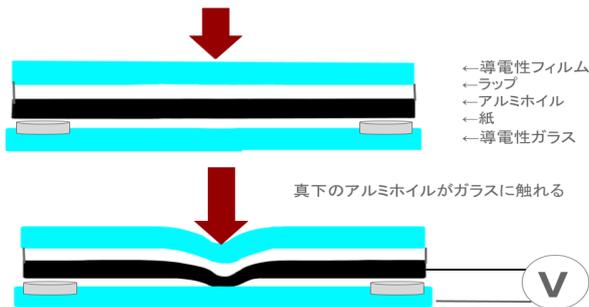
検出方向が交差するように2つの装置を重ね、間にラップとアルミホイルを挟む。ラップにより導電性フィルムとアルミホイルは絶縁されている。この状態で上部の電圧計の端子でフィルムを押すと、

○上部の電圧計:押した部分と右端の電位差

○下部の電圧計:アルミホイルが触れた部分と右端の電位差

(押した部分の真下のアルミホイルがガラスに触れるため、ガラスと電圧計がアルミホイルを通して通電するから)

が検出される。



↑ 2次元の実験での回路図

3.実験結果

(i) 一次元

横軸(X軸)では、比例の関係が見られた。また、縦軸(Y軸)では電位差の値が変化しなかった。

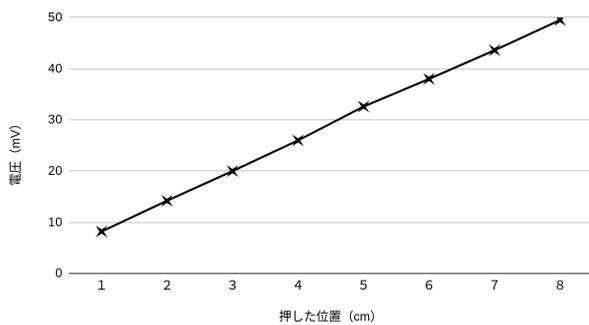
よって、ガラス上には一様な電場があることがわかる。

Y軸の値から得られる一次関数は、

$$V=4.33x+0.25 \quad (V:\text{電位差} \quad X:\text{位置})$$

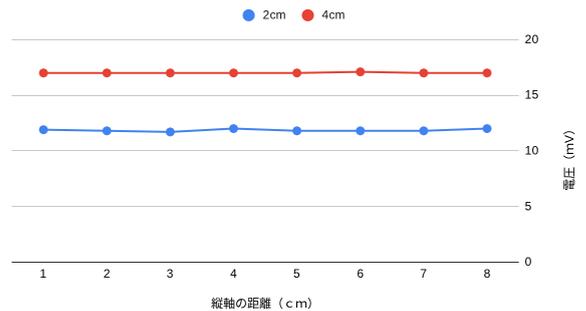
Vに電位差の値を代入することで、一次元上で押した位置が特定できる。

押した位置と電圧の関係



↑ 縦軸(Y軸)のグラフ

アルミを巻いたときの縦軸の値の変化

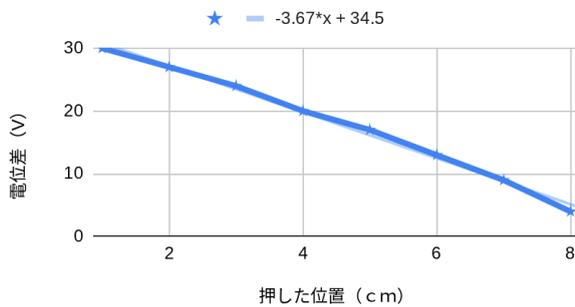


↑ 横軸(X軸)のグラフ

(ii)二次元

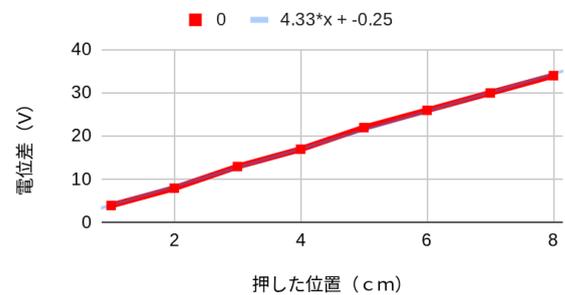
縦軸、横軸どちらにも押した位置と電位差の値に比例の関係がみられた。よって、上部のフィルム、下部のガラスのどちらにも一様な電場があることがわかる。

押した位置と電位差の関係（縦軸）



↑ 縦軸(Y軸)のグラフ

押した位置と電位差の関係（横軸）



↑ 横軸(X軸)のグラフ

縦軸、横軸それぞれの一次関数の式は、

横軸: $V_1=4.33x+0.25$ (V_1 :電位差 X :位置)

縦軸: $V_2=-3.67y+34.5$ (V_2 :電位差 Y :位置)

V_1 、 V_2 それぞれに電位差を代入することで二次元上で押した位置(X,Y)を特定することができる。

4.考察

一次関数で押した位置を表すことができるので、電位差の値をコンピュータ等に入力すれば、この装置をタッチパネルとして使用することができるのではないかと考えた。

5.結論

電圧計の片方の端子を押した位置とガラス又はフィルム的一端との電位差を計測することで、1次元、2次元において電位差の値から位置を一点に特定することができた。

6.参考文献

NKKswitches. “タッチパネルの基礎”. NKKスイッチズ株式会社.2009

https://www.nkkswitches.co.jp/pdf/sw-kiso_ver05.pdf (2024-09)

万歩計を作ろう

1.目的

私たちは身近にある万歩計の仕組みに興味を持った。

万歩計は、歩行時に観測される加速度を、内蔵された加速度センサーが感知し、歩数を分析している。具体的な歩数計測の仕組みとしては、まず万歩計を持って歩行をするという動作の中で、歩き始め数秒(約7秒)の一定した歩行動作がなければ万歩計はカウントし始めない。その歩き始めの数秒で発生した加速度から歩行が始まったと認識すれば歩数カウントが始まる。この時、歩き始めの数秒間のうちに歩いた歩数も含めてカウントされているのだが、その過程で万歩計が誤って認識してしまうことがありそのため、実際の歩数との差が生まれてしまう。

そこで歩数計測の際に観測される加速度の変動について周期的な規則性を見だし、その規則性を使って万歩計が歩数を計測することの精度を上げることを目的とした。

2.実験方法

〈使用器具〉

micro:bit ver.2.21 (2台) 接続コード (AmazonベーシックマイクロUSBケーブル) chrombook (少なくとも2台)

〈実験〉

すべての実験において、5回同様の計測をし、再現性が認められたうえでその中で一番周期性の見られるものをデータとする。ただし「再現性がある」とは、対象である実験の結果のグラフにおいて、5回とも同様の波形が見られた時を表す。

また、micro:bitが計測したデータは、ダウンロードして、スプレッドシートに書き起こしてグラフ化をする。

micro:bitプログラミング時の使用サイト<https://makecode.microbit.org/#>

i) プログラミングされたmicro:bitを手で持って肘を固定して上下に振る。ただしx軸加速度を測定する。

→micro:bitのプログラミングの正確性を確認

条件:10秒間鉛直方向に振る。micro:bitの向きは、上向きを正とし、それをx軸とおく。実験では右手で計測した。

以下 i と同様のプログラミング

ii) micro:bitを足首に固定してその場で足踏み

→その場で足踏みをしたときのグラフの概形の確認、再現性の確認

条件:10秒間足踏みをした。micro:bitの向きは、上向きを正とし、それをx軸とおく。

以下は以降の実験の条件

1.micro:bitの鉛直方向、水平方向、その合成成分の加速度をすべて同時に測る。

(合成成分の加速度は、鉛直方向、水平方向の加速度をそれぞれx,yとしたときに、それぞれの二乗を平方根でとったもの。)

2.左足首に固定して取り付ける。ただしx軸を鉛直方向、上向きを正、y軸を水平方向、進行方向を正とする。

iii) 一秒で二歩のペースで歩く。ただし歩くペースを確認できるように、歩行者の前でストップウォッチなどを見せながら行う。

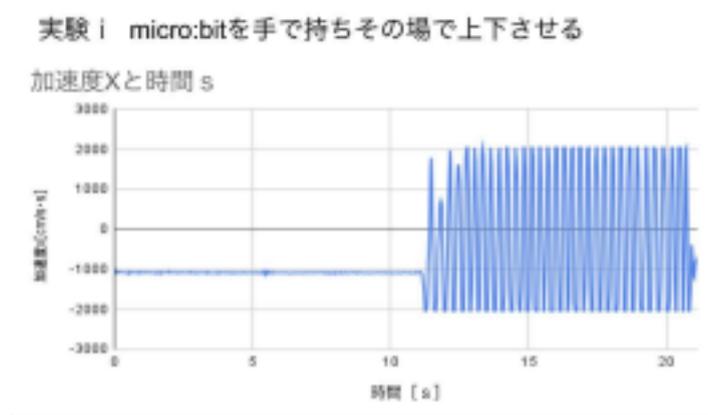
→実際の歩行時の加速度の変化を確認する。

iv) iii)と同様にして二秒で二歩のペースで歩く。

→iiiのグラフの概形をつかみやすくする。周期の山と山の間の微小な振動などを確認する。

3.結果

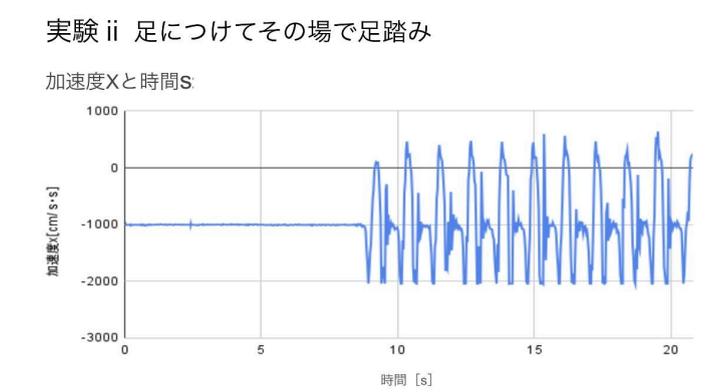
i 手に持って固定し上下に振る



(結果)

一定の周期を繰り返す周期性が見られた。よってこのプログラムは正確であると示された。

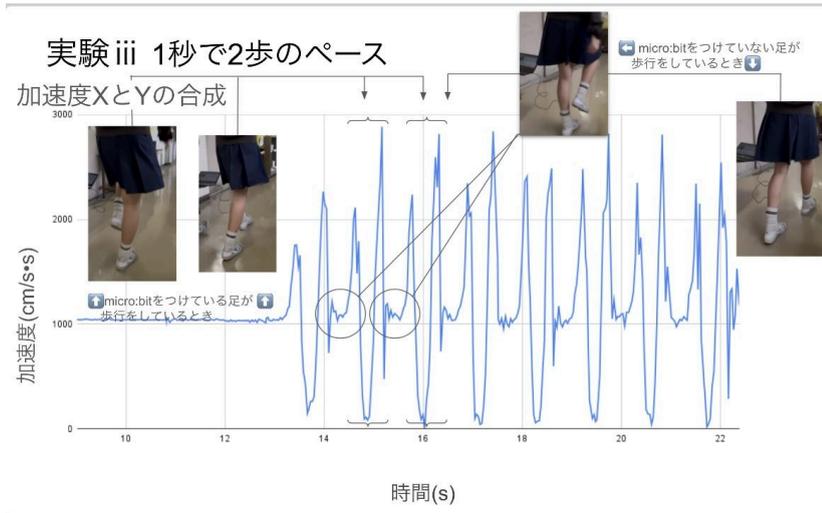
ii 足首に固定してその場で足踏み



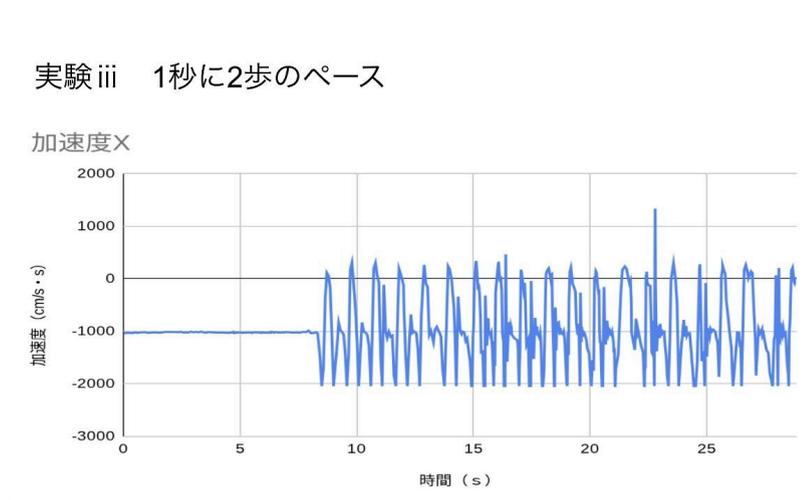
(結果)

同じような波形を繰り返す周期性が見られた。ただし再現性は見られなかった。

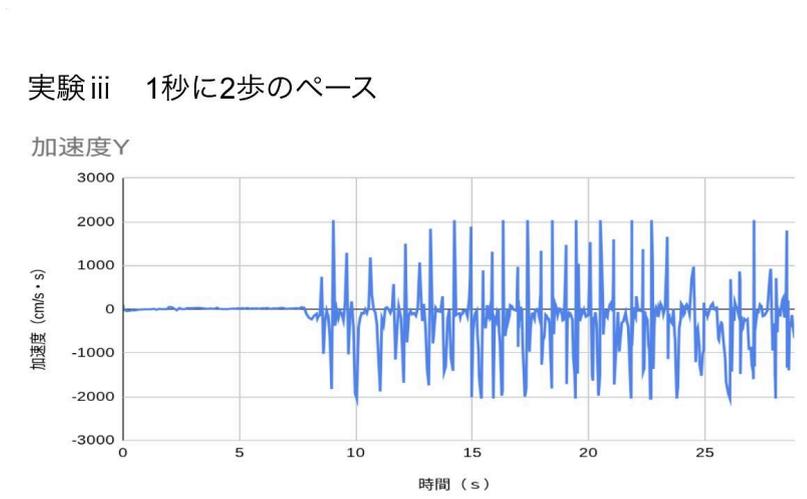
iii) 1秒に2歩歩いたときのxy合成のグラフ



1秒で2歩歩いたときのx軸方向のみの加速度変化のグラフ



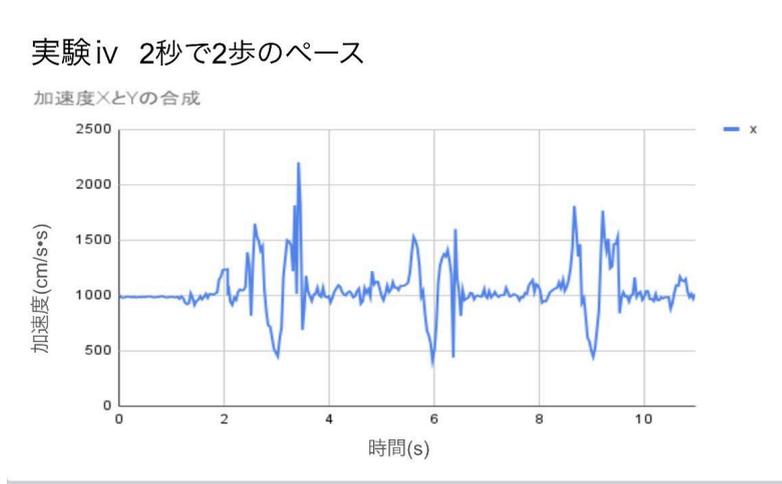
1秒で2歩歩いたときのy軸方向のみの加速度変化のグラフ



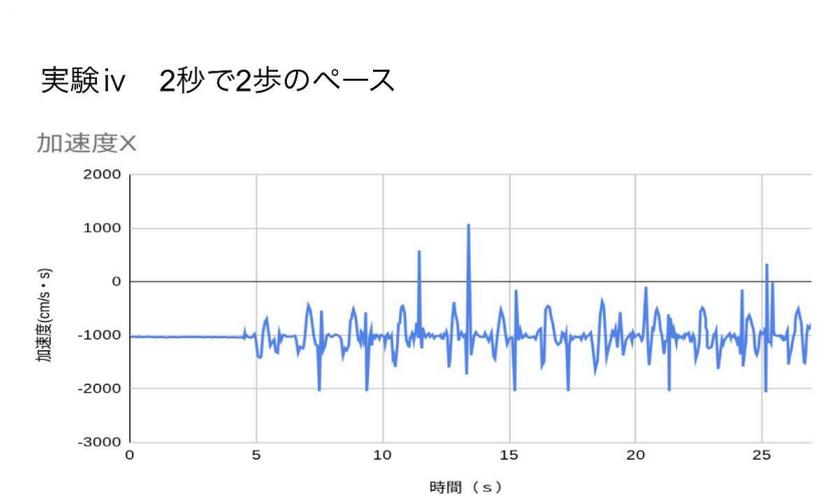
(結果)

1秒に2歩歩いたxy合成のグラフを見ると、丸印の部分がmicro:bitをつけていない足が浮いているとき、中括弧の部分でmicro:bitをつけている足が浮いて地面につくとき、かつmicro:bitをつけていない足が地面についているときであるとわかる。

iv) 2秒で2歩歩いたときのxy合成のグラフ

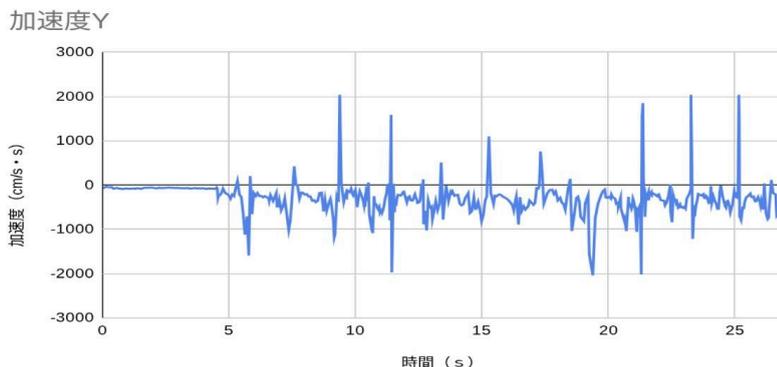


2秒で2歩歩いたときのx軸方向のみの加速度変化のグラフ



2秒で2歩歩いたときのy軸方向のみの加速度変化のグラフ

実験iv 2秒で2歩のペース



(結果)

実験 iii 同様に加速度の値が変動→一定→変動→一定となる周期性が確認できた。また iii よりもペースを遅くしたことでよりその規則性は明確になった。

※今回は、micro:bitのx軸負の向きと重力加速度の向きを同一の向きにして計測したため、x軸のみのグラフでは最初重力加速度-980をとっており、y軸では水平方向の加速度を図るため、最初は0の値をとっている。そして、xy合成は2乗の平方根をとっているので正の値を常にとる。

4. 考察

micro:bitをつけていない方の足(右足)が動いているとき、micro:bitの加速度は一定になりその後変動する。この一定と変動が周期的に入れ替わっている。よって、この加速度が一定であることに着目することで周期性が見られた。

すべての加速度のデータ処理において、あらかじめ重力加速度を差し引いたうえで処理するほうが正確であったと推定される。

5. 結論

加速度センサーを用いて加速度の変化の周期性が確認できた。また、一方の足が地について他方の足が動いているとき、一方の足の加速度が一定であることに着目することで正確な歩数カウントの可能性が開けた。これを万歩計を作成するプログラミングに反映させていきたい。

6. 謝辞

本研究にご協力・ご助言いただいた大阪公立大学、近畿大学の先生方に深く御礼申し上げます。

7. 参考文献

Microsoft Makecode for micro:bit.”Microsoft Makecode”.

<https://makecode.microbit.org/?lang=ja>

Micro:bit Educational Foundation.”高感度歩数計”. サンプルプロジェクト

<https://microbit.org/ja/projects/make-it-code-it/sensitive-step-counter/>

スマホで歩数がなぜわかる？ 体の上下の動きのパターンを感知して…

https://www.asahi.com/articles/ASR4541TRR39ULBH0J.html?iref=pc_photo_gallery_bottom