

大手前高校 76期 S 探 理系 物理分野論文集

ろうそくの炎の同期

コインが回転するときに音が鳴る原因

スーパーボールの進む向き

メトロノームの同期

ペットボトル振動子

連成振動

筒を用いて音を鳴らす

トクトク音

音と循環流

ろうそくの炎の同期

1. 緒言

二本のろうそくを近づけると炎が同じリズムで振動する、つまり同期する現象がある。そこで私たちは、同期が起こる条件についての研究を行った。



図1 同期が起こっていない炎(左)
同期が起こっている炎(右)

写真の左の状態と右の状態を交互に繰り返している（ろうそくの炎が上下に振動している）状態が同期である。
ろうそくの炎が振動していない時は同期が起こっていない。

2. 実験手順

ろうそくを二本用意して、二本を並べ、条件を変えて実験した。
変えた条件は以下の通りである。

- ①二本のろうそくの間隔（1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm）
- ②二本のろうそくの高さの差（1cm, 2cm）
- ③二本のろうそくの間アルミホイルで作った仕切りを入れる。
- ④同期しているろうそくの上に線香を置き煙の流れからろうそくの周りの空気の流れを確かめた。

3. 実験結果

①ろうそくの間隔を開けると、1mm～4mmでは同期が起こったが、5mmでは同期が起きなかった。

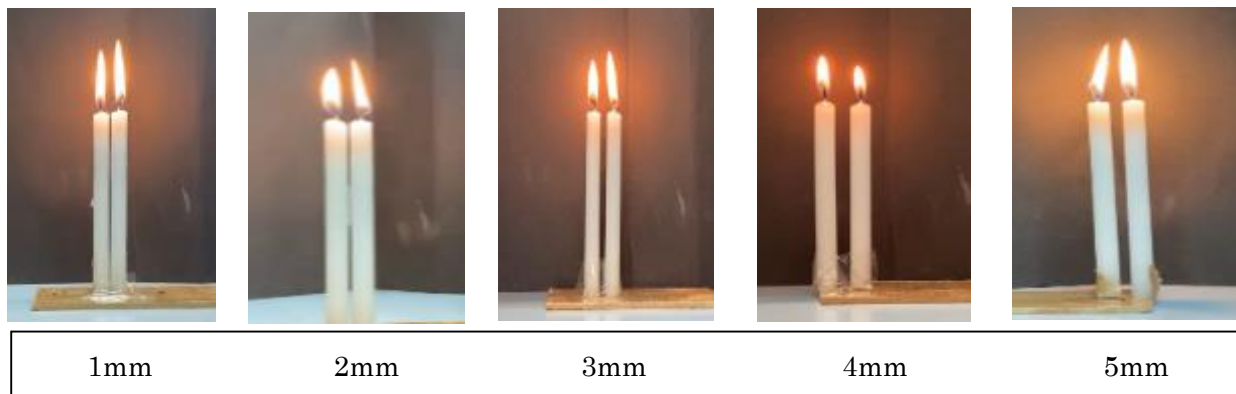


図2 間隔を1~5mm開けた時のろうそくの炎の様子

②ろうそくの高さの差を開けていくと 1cm 開けても変わらず同期したが、2cm 以上開けると同期が起こらなかった。

しかし、2cm 開けた場合は、短いろうそくの炎によって長いろうそくが早く溶かされ、高さの差が 1cm になった時に同期した。

1cm 開けた時

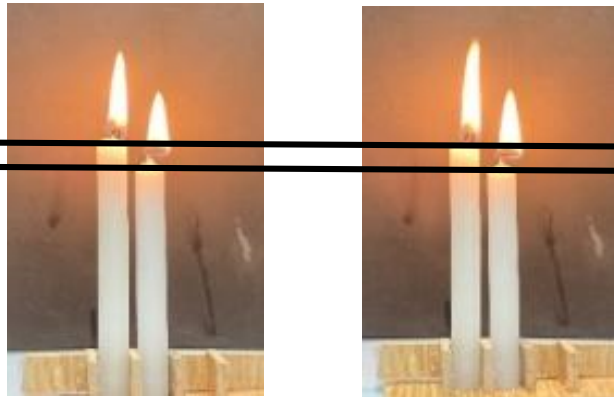


図 3 1cm 差を開けた時のろうそくの炎の様子

2cm 開けた時

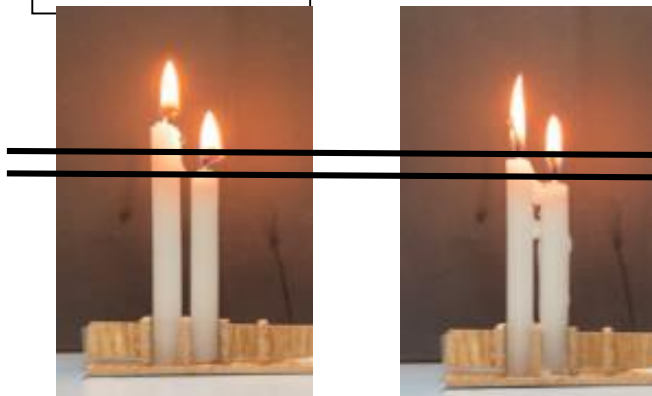


図 4 2cm 差を開けた時のろうそくの炎の様子

差が 1cm になると
同期が起こった

③ろうそくの上に仕切りを入れると、同期は起こらなかった。



アルミホイルの仕切り

図 5 仕切りを入れた時のろうそくの様子

④ろうそくの上に線香を入れると線香の煙はろうそくの同期のリズムと同じリズムで振動しながら上昇した。



図 6 線香だけの様子

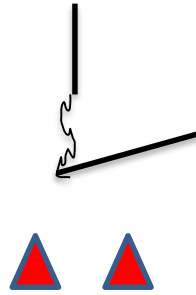


図 7 同期している炎の上に線香を置いた時の様子

4. 考察

①間隔を開ける ②高さの差を大きくする ③仕切りを入れる

これら①②③の時に炎が同期しなかったことから

ろうそくの中の空気の運動が同期をもたらしていると考えられる。

実際、線香を入れると煙が二つの炎の同期した振動と同じリズムで振動していることが確認され、空気がろうそくの振動を媒介していることが裏付けられた。

5. 結論

ろうそくの炎の同期は、ろうそくの周囲の空気が2本の炎の振動を伝えた時に起こる。

その振動を伝えるためには2本のろうそくの間隔がある程度短いことが必要であり、

また、ろうそくの高さの差もある程度小さいことが必要である。

ろうそくの炎の同期は空気の振動を媒介して生じていることが確認できた。

コインが回転するときのカタカタ音のリズム

1. 緒言

コインを落とすと図1のように運動をしながらカタカタと音が鳴る。しかしスローモーション撮影を行うことにより、コインが回転している様子を見るとコインが床面と衝突していないことが分かった。ここで私たちはなぜコインがカタカタと音を鳴らすのかについて注目し、カタカタと鳴る音（以下カタカタ音）のリズムの研究を行った。

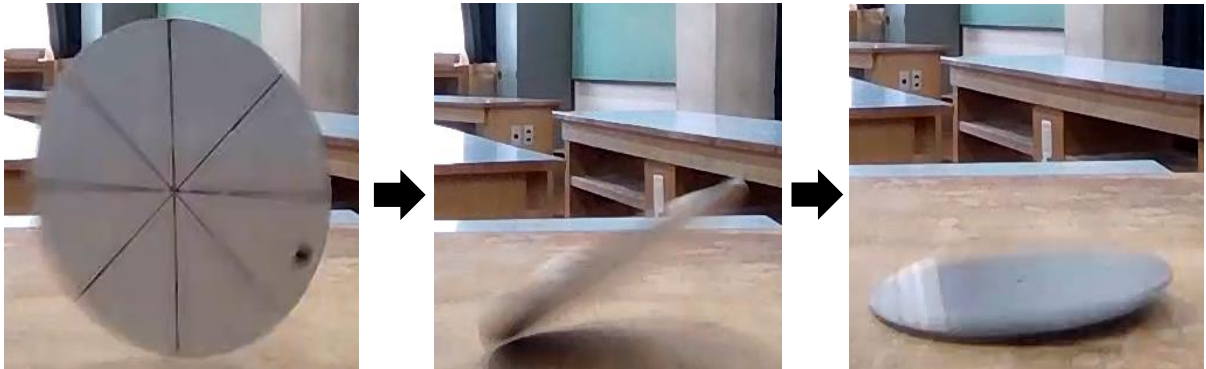


図1 円盤の運動の様子

2. 実験手順

半径 10cm、厚さ 0.3cm、質量 700g のアルミ合金の円盤を用意し、円盤の回転の様子が分かりやすくなるように、図2のように直線を引いて点を取り、円盤を水平方向に回転させる。

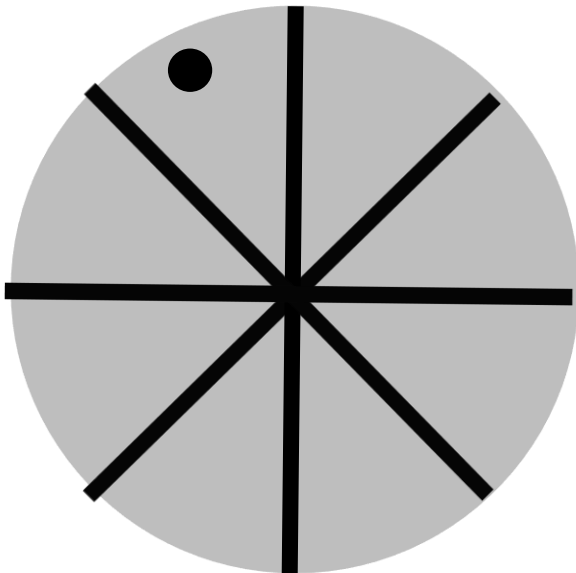


図2 実験に用いた円盤

その後、音の大きさの時間経過を計測するアプリ「Sound Oscilloscope」（図3）を円盤の横にセットする。

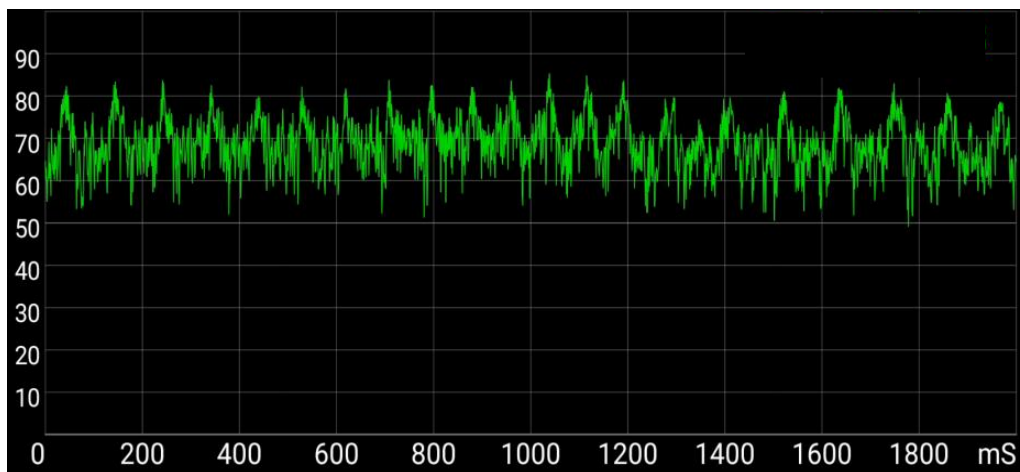


図3 Sound Oscilloscope (縦軸：音の強さ [dB]、横軸：経過時間 [ms])

そして、円盤の回転の様子とアプリの計測結果をスローモーションで撮影し(図4)、音の大きさと円盤の回転の関係性を調べた。

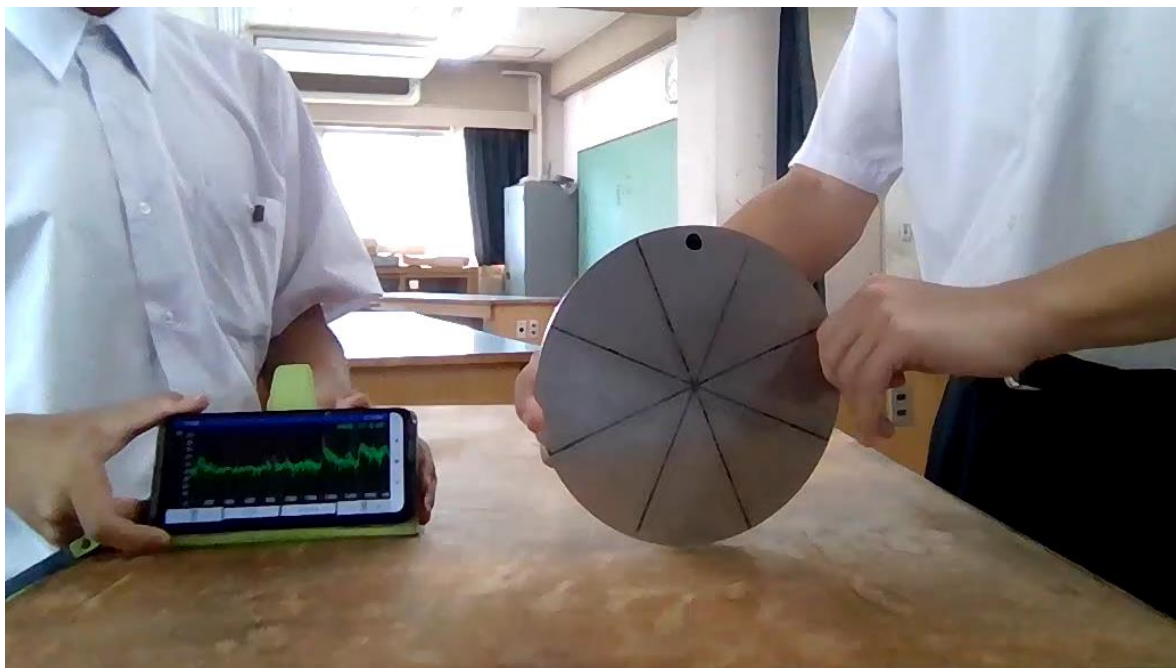


図4 実験の様子

3. 実験結果

カタカタ音のリズムに法則性があるのかを調べるために、円盤にある黒点が床面と接する回数と音の強弱の回数を比べた。円盤が静止する直前は音の強弱の変化が微小であり、計測することが困難だった。よってこの区間を除き、その直前の5.5秒間を計測すると表1のように、黒点が床面と触れた回数とアプリから読み取った音の強弱の回数がほぼ一致した。

(1) 黒点が床面と接する回数	4 5	3 6	3 4	3 1	3 5	3 2	3 4
(2) 音の強弱の回数	4 7	3 6	3 4	3 2	3 7	3 2	3 6

表1 黒点が床面と接する回数と音の強弱の回数

4. 考察

実験結果から円盤上の黒点が床面と接する回数と円盤の出した音の強弱の回数が一致していることから回転し始めてから決まった円盤上の一点が床と接したときに音が大きくなったと考えた。

円盤にはたらく力は図5のようになる。このうち重力は保存力であるためエネルギーに関係せず、垂直抗力と摩擦力①は運動の方向に対して垂直であるので仕事はしない。このことから、摩擦力②のみが仕事をして力学的エネルギーが減少する。この減少したエネルギーがカタカタ音のエネルギーや摩擦力により発生する熱のエネルギーに変換したと考えた。

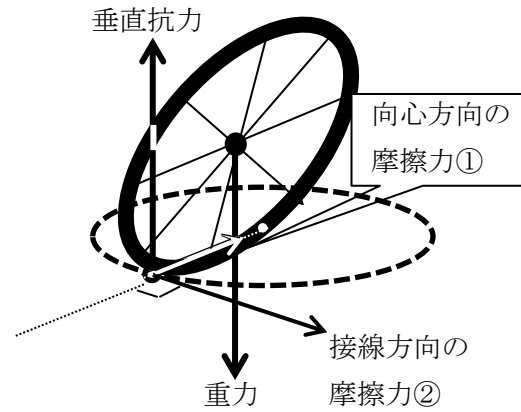


図5 円盤にはたらく力

5. 結論

カタカタ音の強弱のリズムが円盤上の特定の点が床に触れるリズム、すなわち円盤の回転のリズムと関係があることが分かった。

スーパーボールのバックสปินと運動の向き

1. 緒言

スーパーボールにバックสปิน（図1）をかけて投げると、床に着地した後に水平方向の運動の向きが変わらない場合（図2）と水平方向の運動の向きが逆になる場合（図3）がある。（図2を前進、図3を後進と表現する。）

この違いは何によって起こるのか明らかにするために研究を行った。

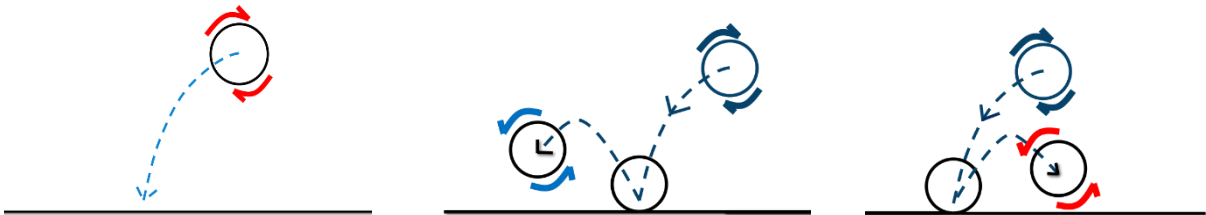


図1 バックสปิน

図2 前進

図3 後進

2. 実験手順

(I) 安定したバックสปินを作るために図4、5のような装置を作製した。

スーパーボール（重さ 23.9g、半径 1.8cm）を水平方向から 60° 傾けて固定した金属製のレール上で転がす。スーパーボールがレール上を転がる距離は 40cm（水平距離 20cm）で一定にする。



図4 実験装置（写真）

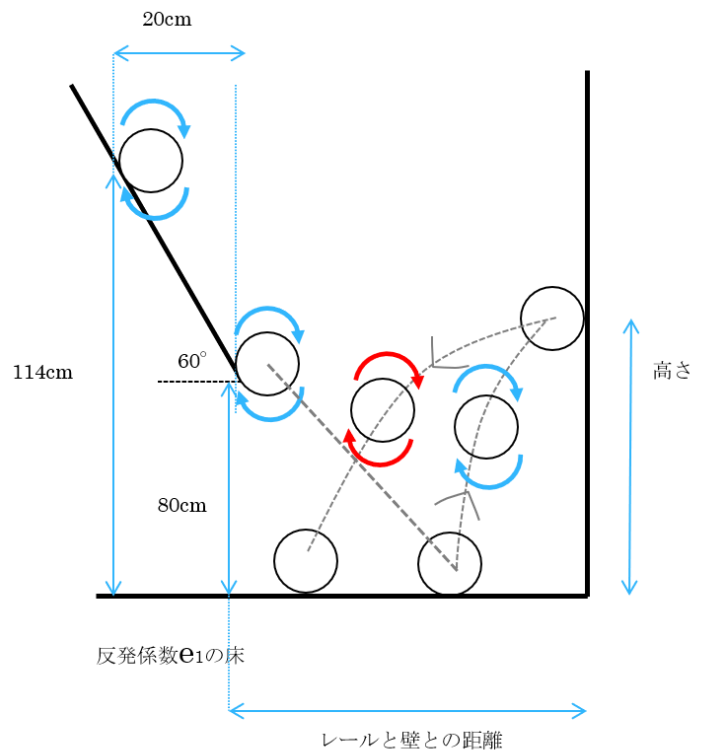


図5 実験装置（図）

壁に衝突した後のスーパーボールの回転方向を観察するとバックスピンのであった。レールの先端部分から壁までの水平距離（図6、ここでは「幅」と呼ぶ）を変え、バックスピンの直前の1秒間あたりの回転数を計測した。ボールには回転がわかりやすいよう印をつけ、回転する時の様子をスマートフォンでスロー撮影し、回転数は目測で計測した。

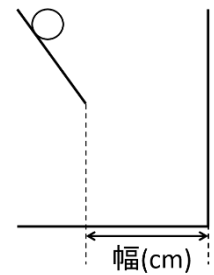


図6 幅

(Ⅱ) この装置を用いて、床への衝突前のスーパーボールの回転数と衝突後のスーパーボールの進行方向の関係を調べた。

3. 実験結果

(Ⅰ) 衝突前の回転数は以下ようになった。
(回転数の正負は図7のように時計回りは正、反時計回りを負とする。)

幅(cm)	45	50	55	60	65	70
衝突前の回転数(回/s)	+21	+24	+20	+17	+14	+10

表1 実験結果

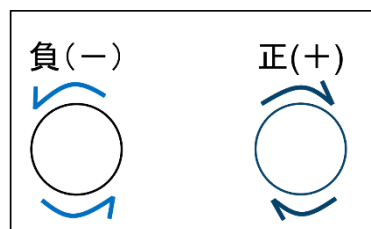


図7 回転の向き

幅を変えることにより、バックスピンの際の回転数を変えることができた。

(Ⅱ) 回転数と衝突後のスーパーボールの進行方向の関係は以下ようになった。
(回転数の正負は図7のように時計回りは正、反時計回りを負とする。)

幅(cm)	50	55	60	65	70
衝突前の回転数(回/s)	+24	+20	+17	+14	+10
衝突後の回転数(回/s)	-15	-9	-9	-10	-8
衝突前後の回転数の変化の大きさ(回/s)	39	29	26	24	18
跳ね方	後進			前進	

表2 実験結果

4. 考察

(1) バックスピンしている衝突前の回転数が大きいと（この実験では 17 回/s 以上の場合）衝突後に後進し、回転数が小さいと（この実験では 14 回/s 以下の場合）衝突後に前進することが分かる。

(2) スーパーボールが後進したときの衝突前後の回転数の変化の大きさは大きく（この実験では 26 回/s 以上の場合）また前進したときの衝突前後の回転数の変化の大きさは小さい（この実験では 24 回/s 以下の場合）ことが分かる。

5. 結論

今回の実験により、バウンドの方向の違いは回転数によるという仮説が正しいと分かった。バックスピンして床に衝突するスーパーボールの衝突前の回転数がある境界値より大きいとき、衝突後のスーパーボールは後進し、回転数がある境界値より小さいとき衝突後のスーパーボールは前進する。

メトロノームの同期現象

～世界初の実験モデルを開発して～

1. はじめに

① 研究の背景

自然界には個々別々の周期的な運動が自発的に揃う現象が多く見られる。同期現象と呼ばれる現象であるが、物理学のみならず科学や生命科学においても、そのメカニズムの解明が重要な課題となっている。私たちはメトロノームの同期現象に興味を持った。

図1のように、動くことのできる板の上に、振れるリズムを同じにした複数のメトロノームを置いて、メトロノームの針を振動させると、やがて針の振れるタイミングが揃う。メトロノームの同期現象には「同相同期」と「逆相同期」の2種類がある。同相同期は図2のように針が同じ向きに同期する現象で、逆相同期は図3のように針が逆向きに同期する現象である。

本校の先輩が行った先行研究では、図1のようにメトロノームを乗せる板を吊す糸が鉛直方向となす θ とすると、 θ が小さいときは同相同期、 θ が大きいときは逆相同期が起りやすいことが示されている。では、なぜ、 θ が小さいときに同相同期が起り、 θ が大きいときに逆相同期が起こるのだろうか？ 板の運動が2つの同期現象に関与していることは確かであるが、板のどのような運動が、同相同期、あるいは、逆相同期をもたらすのか、これを明らかにすることを目標に研究を進めることとした。

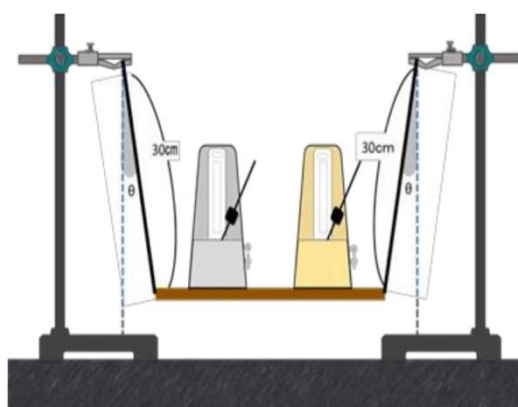


図1 大手前高校75期によるメトロノームの同期の実験モデル



図2 同相

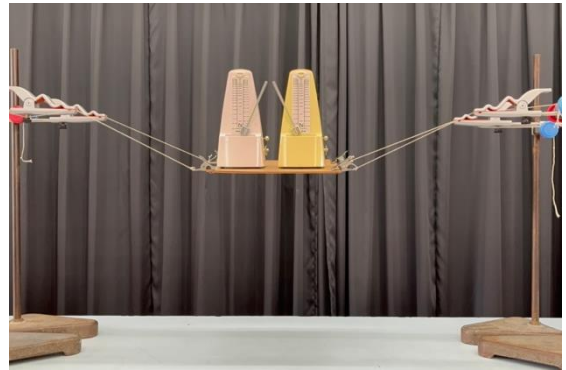


図3 逆相

② 先行研究の問題点

先行研究のメトロノームの同期現象（図4）はメトロノームを乗せている板を糸で吊るしているために、板の動きが立体的で複雑だった。先行研究より、 θ が大きいとき、つまり板が縦揺れしやすいとき逆相同期、 θ が小さいときつまり板が横揺れしやすいとき、同相同期するということが分かったが、縦揺れが逆相を起こす、また、横揺れが同相を起こすということを証明する方法がなかった。

③ 研究方針

横揺れのみを取り出す実験モデル（図5）は、過去に行われていたが、縦揺れのみを取り出す実験モデルは私たちが調べた限りなかった。そこで、私たちは試行錯誤の末、世界初の縦揺れのみを取り出す実験モデル（図6）を作ることができた。これによって、複雑で立体的な板の動きを縦揺れと横揺れ分けて、つまり直線的・平面的な動きに分けることができた。

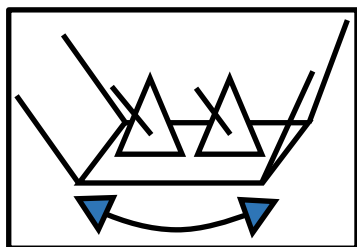


図4

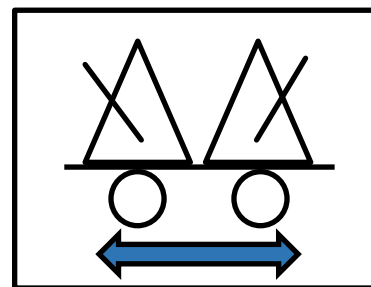


図5

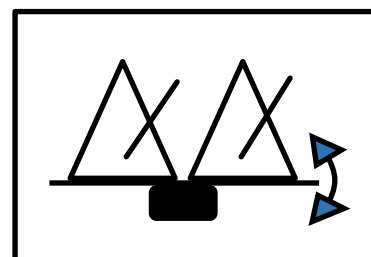


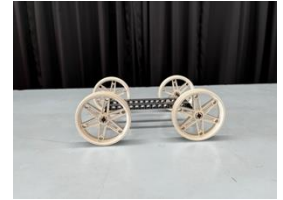
図6

2. 方法

横揺れのみを取り出すために、台車を使ってみることにした。次に、縦揺れのみを取り出すために、ある程度弾力のあるものが必要だった。そこで目をつけたのはLEGOブロックのゴムタイヤだ。ゴムタイヤを用いれば、メトロノームの同期について、縦方向のみをとりだした同期の実験モデルができるだろうと考えた。

<実験器具>

- ・ メトロノーム (nikko model : 2 2 1) 2つ
- ・ 台車 (レゴ製)
- ・ 板
- ・ ゴムタイヤ (レゴ製) 2つ



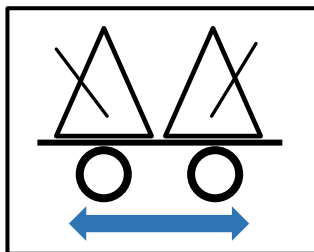
<実験手順>

【実験1】

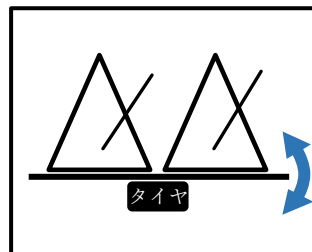
2つのメトロノームを台車の上に乗せて、針が逆の方向を向いた状態から手を離した。

【実験2】

2つのメトロノームを倒したゴムタイヤと板の上に乗せ、針を同じ方向を向いた状態から手を離した。



実験 1



実験 2

3. 結果

【実験1の結果】

- ・ 実験1では、時間が経つと最初に逆向きに設定した針は、徐々に同じ向きになり、同相同期した (図7)。
- ・ 実験1では板の振幅は徐々に大きくなっていった。

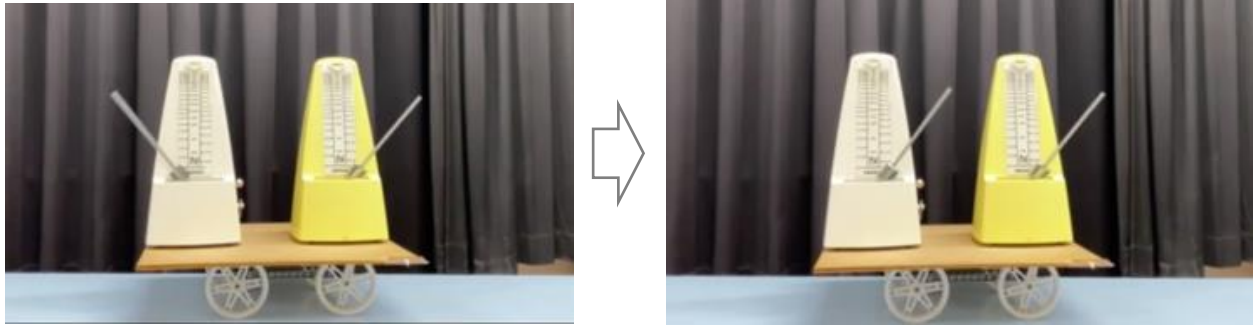


図7：実験1の最初の状態（左）と後の状態

【実験2の結果】

- ・ 実験2では、時間が経つと最初に同じ向きに設定した針は、徐々に逆向きになり、逆相同期した（図8）。
- ・ 実験2では板の振幅は徐々に小さくなっていった。

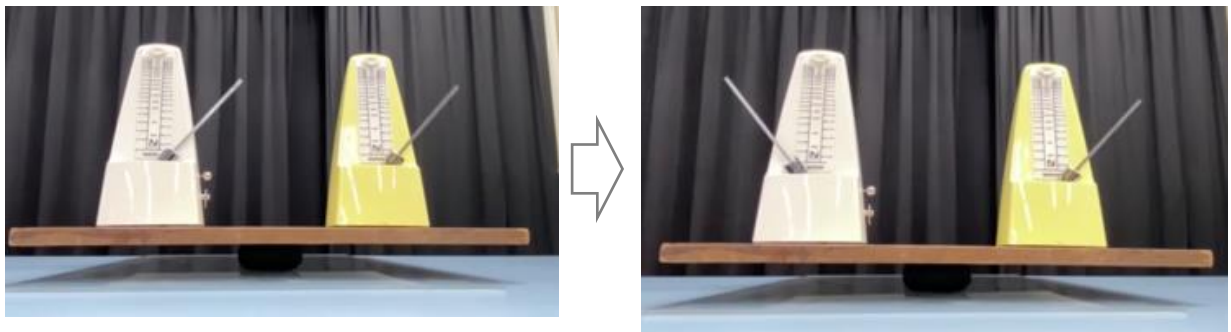


図8：実験2の最初の状態（左）と後の状態

4.考察

横揺れをする実験1では同相同期し、縦揺れをする実験2では逆相同期した。このことから、横揺れの成分が、メトロノームが同相同期することに働き、縦揺れの成分はメトロノームが逆相同期することに働くことが分かった。

5.結論

私たちの2つの実験モデル（図7・図8）により、先行研究の立体的で複雑な板の動きを純粋に縦横成分に分解できた。先行研究では、なぜ θ が小さいときに同相同期 θ が、大きいときには逆相同期が起こるかは分からなかったが、私たちの2つの実験モデルにより横揺れが同相同期、縦揺れが逆相同期の原因であることが分かった。

ペットボトル振動子の同期現象

1. 緒言

皆さんはペットボトル振動子を知っているだろうか。水を入れたペットボトルの蓋に管を取り付けひっくり返すと、水の流出と空気の侵入が交互に行われてリズムを形成する。このような周期的な振動運動(図1)が起こる装置をペットボトル振動子という。またペットボトル振動子を図2のようにチューブを用いて2本を繋げると、振動運動の位相が揃う。これを同期現象と呼ぶ。

私たちはこの同期現象の原理を明らかにするために、同期現象が起きる条件を調べた。

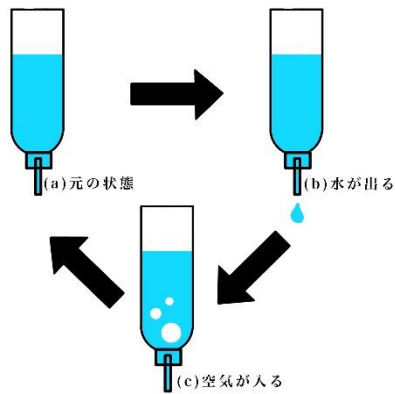


図1 振動運動の様子

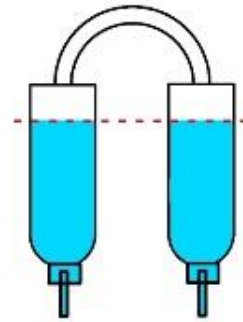


図2 ペットボトル振動子

2. 実験・結果・考察

まず初めに、2つのペットボトルに同じ水の量を入れて滴下したとき同期現象が起きるのか、確認するために実験①を行った。

〈実験①〉

方法：2本のペットボトル(アサヒ飲料社 三ツ矢サイダー 1500ml)の底にチューブ(全長50cm、内径0.7cm)を刺し、蓋にストロー(直径5cm、内径0.5cm)を取り付けた。(図3)

基本実験として、上記のペットボトルに900mlの水を入れた。(図4)

仮説：最初から水が滴下し始め、同期現象が起きる。

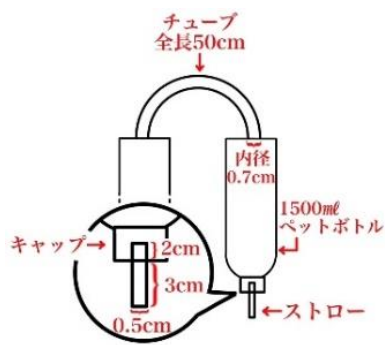


図3 実験装置の詳細と実験の様子

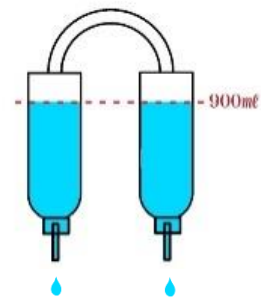
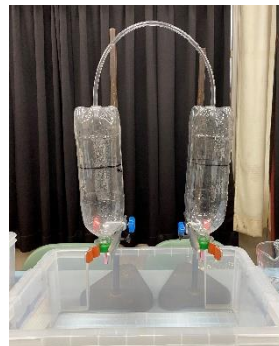


図4 実験①の初期状態

結果：最初から水が滴下し始め、同期現象が起きた。

考察：実験①で同期現象が起きた際にペットボトル自体が振動していたことから、ペットボトルが柔らかくポンプとしての機能を果たしていたことが同期現象に関係しているものと考えられる。

そこで私たちは、ペットボトルのような柔らかい容器ではなく、プラスチック製の硬い容器を用いて実験①と同様の条件で実験を行い、水が滴下されるのか、また滴下されたときに同期現象が起きるのか調べた。

〈実験②〉

方法：実験①で用いたペットボトルの代わりに、2本の硬いプラスチック製の容器（大創産業 ドリンクボトル 500ml 無地）を用いて、400mlの水を入れた。（図5）

仮説：硬い容器ではポンプの機能を果たすことができないため、水は滴下せず、同期現象も起きない。

結果：水は滴下しなかった。そのため同期現象も確認されなかった。（図6）

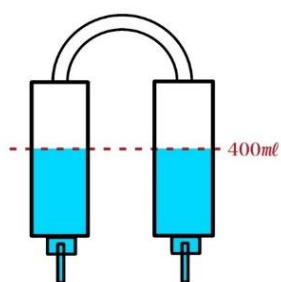


図5 実験②の初期状態

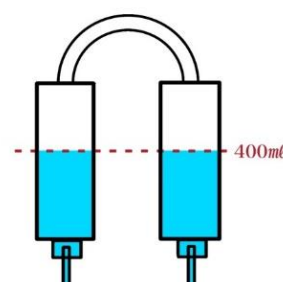


図6 実験②の結果

考察：実験①・②の結果より、柔らかく凹むペットボトルのような容器を用いることで、ポンプの機能を果たし、水を滴下させることができる。以降の実験では、ペットボトルを用いて、同期するための条件を調べた。

そこで私たちは、ペットボトル内の水量やペットボトルの位置などの初期条件によって同期現象に違いが生じるのか興味を持ち、実験③・④を行った。

〈実験③〉

方法：実験①で用いたペットボトルに900mlの水を入れ、片方のペットボトルの高さを4cmだけ高くした。（図7）

仮説：ペットボトルの出水口の高さが異なるため、同期現象は起きない。

結果：最初から水が滴下し始め、同期現象が起きた。（図8）

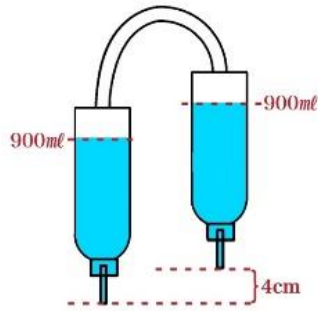


図7 実験③の初期状態

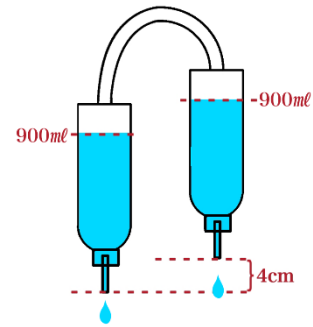


図8 実験③の同期開始時の状態

〈実験④〉

方法：実験①で用いたペットボトルの一方に 900ml、他方に 600ml の水を入れる。このとき左右の水の高さの差は 4cm であった。(図 9)

仮説：ペットボトル内の水量が異なるため、同期現象は起きない。

結果：2つのペットボトル内の水量が揃ったときに、同期現象が起き始めた。(図 10)

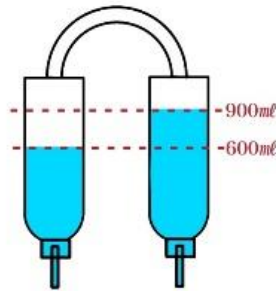


図9 実験④の初期状態

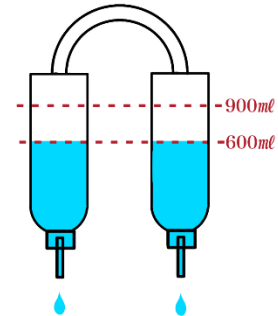


図10 実験④の同期開始時の状態

実験③④の考察：実験③・④の結果で共通していることは「2つのペットボトル内の水量が揃ったときに同期現象が起きる」ことである。しかし実験に用いたペットボトルは全く同じものであるため「2つのペットボトルの出水口にかかる水圧が等しいときに同期現象が起きる」と言い換えることもできる。このことから同期現象に関係している要素は「ペットボトル内の水量」、または「出水口にかかる水圧」であると考えられる。

そこで私たちは同期現象に関係している要素を絞り込むため、容量の異なるペットボトルを用いて、実験⑤を行った。

〈実験⑤〉

方法：一方のペットボトルを底面積の小さいペットボトル（神奈川県清涼工業組合 そのままでもおいしい炭酸水 1000ml）に変えて、600mlの水を入れた。他方のペットボトルは実験①と同様のペットボトルを用いて、600mlの水を入れた。このように底面積の異なるペットボトルを用いることで、水量が同じでも、出水口にかかる水圧が異なる状況をつくりだす工夫を施した。(図 11)

仮説：同期現象に関係のある要素が「ペットボトル内の水量」であれば、最初から同期現象が起きる。また同期現象に関係している要素が「出水口にかかる水圧」であれば、ペットボトル内の水面の高さが揃ったときに同期現象が起きる。

結果：2つのペットボトル内の水面の高さが揃ったときに、同期現象が起き始めた。(図12)

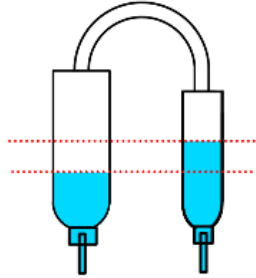


図11 実験⑤の初期状態

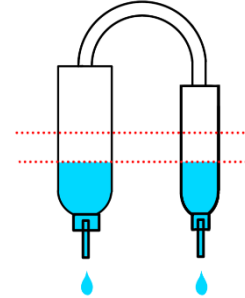


図12 実験⑤の同期開始時の状態

考察：同期現象にはペットボトル内の水量は関係なく、出水口にかかる水圧が等しくなったときに起きることが分かる。

3. 結論

ペットボトル振動子の同期現象が起きるためには、水を入れる容器がポンプとしての機能を果たせるだけ柔らかいこと、また出水口にかかる水圧が等しくなることが必要である。

連成振動

1. 緒言

長さの等しい2つの単振り子を、水平に張った糸に結び付けて、一方を振らせると他方も共振する。やがて、初めに振られた方は静止し、他方が最大の振幅となる。暫くすると初めの振り子が再び振動し始める。これら一連の現象を連成振動と呼ぶ。

私たちは、片方の振り子が静止した状態から動き始めた後、静止し、そしてまた動き始めるまでにかかる時間（以下連成周期とする）に影響を与える条件について研究を行った。

2. 実験手順

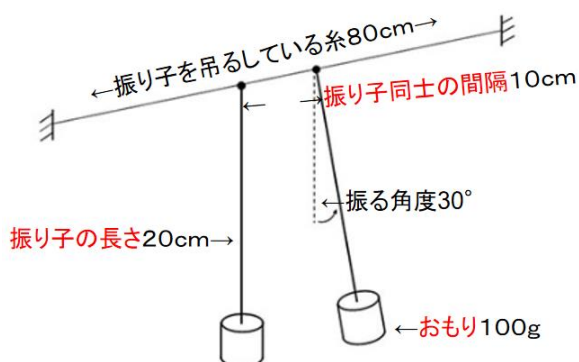


図1 実験装置

実験装置は図1のようなものを用いた。

振り子を吊るしている糸にかかる力を一定にし、糸の張り具合を一定にするため糸の端に4kgの砂袋をつけた。振り子を吊るしている糸を張っているスタンドはそれぞれクランプで固定している。また、重りは一つ25gのものを複数個並べて質量を調整した。

基本条件は振り子同士の間隔10cm、振り子の長さ20cm、重り100gとする。

以下3つの実験は、それぞれの条件がどの様に連成周期に影響を与えるのかを調べるために行い、また、変更した条件以外のものは基本条件に揃えている。

【実験1】振り子同士の間隔のみを10cmから30cmまで5cm刻みで変えた。

【実験2】振り子の長さのみを10cm、20cm、30cmと変えた。

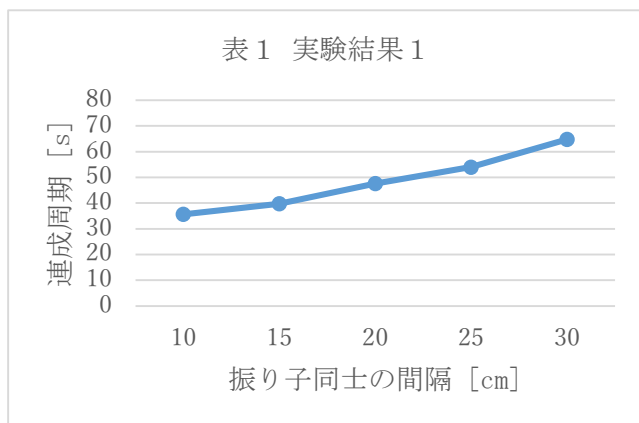
【実験3】重りの質量のみを50g、75g、100gと変えた。

3. 実験結果

【実験1の結果】



図2 実験1の様子

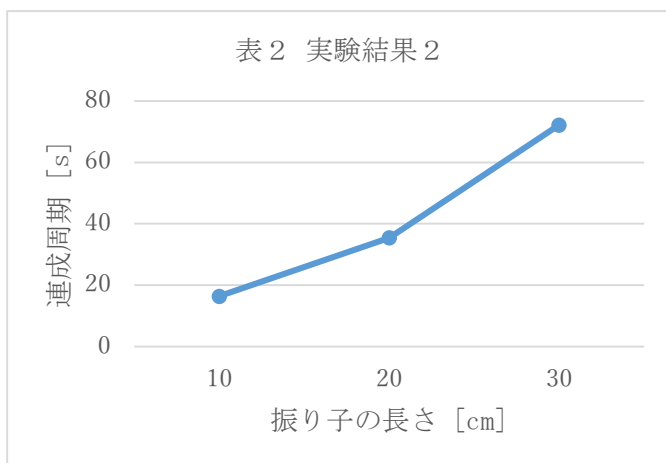


実験1の結果は表1の通りである。これより、振り子同士の間隔を大きくすると連成周期も大きくなることが分かった。

【実験2の結果】



図3 実験2の様子

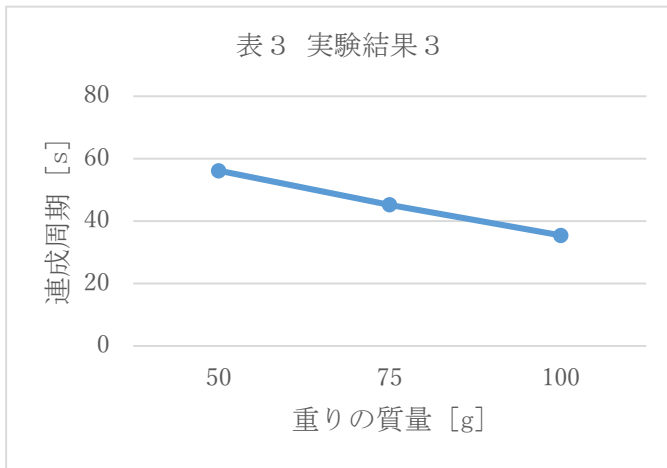


実験2の結果は表2の通りである。これより、振り子の長さを大きくすると連成周期も大きくなることが分かった。

【実験3の結果】



図4 実験3の様子



実験3の結果は表3の通りである。これより、重りの質量を大きくすると連成周期は小さくなることが分かった。

4. 考察

以上の実験結果を次の3つの物理量から考察する。

- ・振り子の振動のエネルギーの伝わる速さ・・・仕事率 $W[w]$
- ・運動の開始時に振り子に与えられたエネルギー・・・初期エネルギー $E[J]$
- ・単振り子としての周期・・・周期 $t[s]$

実験より、連成振り子が成り立つとき、互いに振り子のエネルギーは完全に伝わり、そして再び完全に戻されるということが分かる。このエネルギーの受け渡しの様子は三角関数のような様相をしていると考えられる。これより、連成周期（以下 $T[s]$ ）について以下のような式を作れる。

$$T[s] \approx \frac{E[J]}{W[J/s]} \quad \dots \textcircled{1}$$

【実験1の考察】

振り子同士の間隔を変えた実験では、振り子同士の間隔（以下間隔）が大きいほど連成周期は大きくなっている。これは、仕事率が小さくなっているためである。

間隔が大きくなる、つまり振り子が振り子をつるしている糸（以下 I 糸）の中心からの距離が大きくなるので、 I 糸が剛体でないために起こる、糸の弛みが小さくなる。そのため振り子同士

が互いに与え合う力のかかる角度が小さくなる。すると単位時間当たりの力積の大きさが小さくなり仕事率も小さくなる。この仕事率の倍率をkとし、式1に当てはめると、下のようになる。

$$\frac{T}{k} \approx \frac{E}{Wk} \quad \dots \textcircled{2}$$

【実験2の考察】

それぞれの振り子の長さを変えた実験では、長さが大きくなると連成周期も大きくなった。これは初期エネルギーEと仕事率が小さくなったためである。

振り子の長さが大きくなると初期エネルギーが大きくなることは自明であるが、このときtの変化による仕事率の変化は起きていないのかについて考える。

t=a, b (a<b)のとき、単振り子は三角関数で表される動きをするため、対となる振り子に与える力積の平均は、それぞれI糸を引く力をFA、FBとすると、これらの比はb:aになる。

$$\frac{1}{ab} \int_0^{ab} \left| \sin \frac{2\pi}{a} \right| : \frac{1}{ab} \int_0^{ab} \left| \sin \frac{2\pi}{b} \right| = b : a \quad \dots \textcircled{3}$$

また、単振り子の向心力を考えると、おおよそFA : FB = b² : a²の比が導ける。

α、βを単振り子の長さとする。

$$FA : FB = m\alpha \left(\frac{2\pi}{a} \right)^2 : m\beta \left(\frac{2\pi}{b} \right)^2 = b^2 : a^2 \quad \dots \textcircled{4}$$

以上はFA、FBの最大値であるが、おおよそ周期全体の平均としてはこの比になると考えられる。

③、④より、t=aの単振り子とt=bの単振り子とでそれぞれの力積の比はb³ : a³になる。そのため、仕事率はb³ : a³の比になる。

①に当てはめて考えると、実験2では初期エネルギーEと仕事率Wが変化していることになる。

初期エネルギーの変化の倍率をcとする。

$$T \frac{b^3}{a^3} \approx \frac{Ec}{W \frac{a^3}{b^3}} \quad \dots \textcircled{5}$$

【実験3の考察】

重りの質量を変えた実験では、質量が大きいほど連成周期は小さくなった。これは初期エネルギーと仕事率の変化による。

質量の大きさをC倍にすると、初期エネルギーの大きさもC倍になる。また振り子がI糸を引く力もC倍になる。

しかしここで、実験1と同じようにI糸を引く力によるI糸の弛みの変化によって、振り子が対となるもう一方の振り子を引く力の働く角度も変わる。そのため、仕事率の変化は単純にC倍とならず、Ck倍 (kはC>1のときk>1、C<1のときk<1となる実数) になる。このため、①よりTは $\frac{1}{k}$ 倍になる。

$$\frac{T}{k} \approx \frac{EC}{Wk}$$

5. 結論

[I]連成周期は

- ・ 振り子同士の間隔が広がるほど大きくなり
- ・ 振り子の長さが長いほど大きくなり
- ・ 重りの質量が大きいほど小さくなる

ことが分かった。

[II]連成周期 $T[s]$ は、振り子の初期エネルギー $E[J]$ と振り子を吊るしている糸に対する仕事率 $W[w]$ から次式で理解することが出来る。

$$T[s] \approx \frac{E[J]}{W[w]}$$

6. 参考文献

連成振り子の運動 ～振動エネルギーのキャッチボール～

横浜国立大学理工学部

<https://www.mirai-kougaku.jp/laboratory/pages/190322.php>

筒を用いて音を鳴らす

1. 緒言

学生生活で使わない人は恐らくいないであろうリコーダー。
学校で用いられることが多いが、なぜ穴を閉じるだけで音の高さが変化するのか、そのメカニズムを調べるために私達はこの研究を行った。しかし、リコーダー自体の構造が複雑なため、簡略化させた筒を用いて実験を実施した。

2. 実験手順

2つの実験を行った。

実験 1

「筒の長さを統一し、空ける穴の数を変化させ、振動数の変化を計測する」
長さ 16cm、口径 1.3cm の塩化ビニルパイプを用意し、4cm 間隔で穴を空ける。
そして、下図のように叩き振動数を計測する。

実験 2

「空ける穴の位置を統一し、筒の長さを変化させ、振動数の変化を計測する」
長さ $8+4n$ ($n=0, 1, 2, 3, 4$) [cm]、口径 1.3cm の塩化ビニルパイプを用意し、実験と同じように穴を空ける。そして、下図のように筒の端を叩き、生じた音の振動数を計測する。

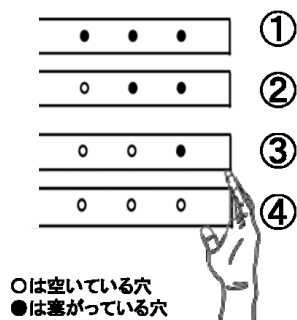


図1 実験 1 で使用

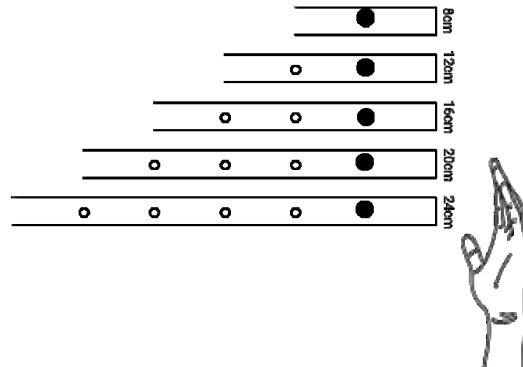


図2 実験 2 で使用

実験 1 によって空けた穴の位置と振動数の関係が、実験 2 によって空けた穴に続く筒の長さとの関係が分かる。

3. 実験結果

実験 1

全ての穴を閉じている①から 1 つずつ穴を空けていくと、振動数が 514Hz、596Hz、762Hz、892Hz と空いている穴が叩く方に近くなるほど振動数が大きくなった。

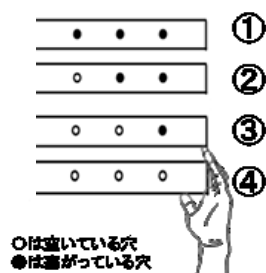


図1 実験1で使用

	振動数[Hz]
①	514
②	596
③	762
④	894

表1 実験1の結果

叩く位置を節、空けた穴の位置を腹とし $\lambda = 0.32[\text{m}]$ 、また音速を $V = 342.42[\text{m/s}]$ とし、 $V = f \lambda$ より $f = 1066[\text{Hz}]$ という予想値を出した。

実際の値は筒の長さが短い方から順に筒に生じた音の振動数 f は1062Hz、795Hz、796Hz、752Hzとなった。

長さ8cmの筒では予想値とほぼ同じ値となった。しかし長さ12~24cmの筒では実際の値が予想値よりかなり小さくなった。

次に4分の1波長を計算した。予想値は8cmである。実際の値は筒の長さが短い方から順に8.4cm、10.8cm、11.2cm、10.7cm、11.4cmとなった。

管の長さ [cm]	振動数 [Hz]	予想値 [Hz]	4分の1波長 [cm]	4分の1波長 予想値[cm]	予想値との差 [cm]
8cm	1026	1066	8.4	8.0	0.4
12cm	795	1066	10.8	8.0	2.8
16cm	762	1066	11.2	8.0	3.2
20cm	796	1066	10.7	8.0	2.7
24cm	752	1066	11.4	8.0	3.4

表2 実験2の結果

4. 考察

実験1の結果より筒を叩いた時、叩いた位置が節、筒の切れ目側が腹となる4分の1波長の定常波が発生していると考えた。この仮説を元に実験2を行った結果以下のようなことが分かった。

- ・空いている穴のない開口端の筒では腹の位置がほぼ筒の切れ目の位置となる。
(表2より、長さ8cmの筒の4分の1波長の予想値との差0.4cm)
- ・空いている穴のある筒は腹の位置が穴よりも叩く位置と反対側に大きくずれる。
(表2より、長さ12~24cmの筒の4分の1波長の予想値との差はいずれも約3cm)

興味深いことに、12~24cmのときの4分の1波長の予想値との差はかなり大きいですが、いずれの筒も3cm程度の差となっており、空いている穴以降に続く筒の長さにはほとんど影響されていない。

筒の内部に出来た定常波を図に表すと図3のようになった。

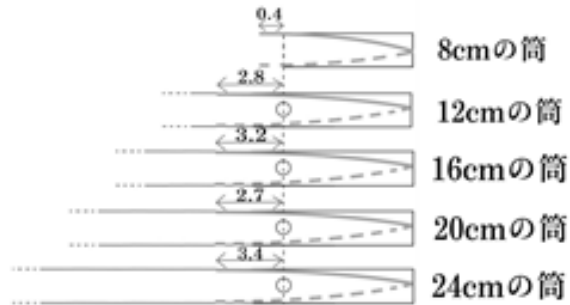


図3
開口端と穴における
波長の違い

これらのことから、予想値との差は開口端補正の値に相当するのではないかと私たち考えた。開口端補正とは、開口端における管口から腹の位置までの長さを指す。切れ目が開口端である筒、穴である筒について外の空気に触れている面積を比べてみると、穴では開口端よりも面積が小さくなる。よって大気圧による音圧の弱まりが小さくなり、開口端補正に相当する値が大きくなったのではないだろうか。

5. 結論

- ・穴を一つずつ空けていくと振動数が高くなる。(図4)
- ・穴に生じる定常波は叩いた位置を節、穴を腹とする場合の定常波の波長より少し長くなる。(表2、図3)
- ・穴の位置と腹の位置の距離は筒の長さによらずほぼ一定である。(図5)

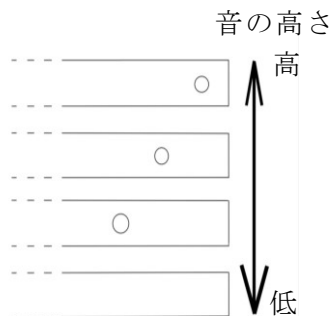


図4 穴による音の高さの変化

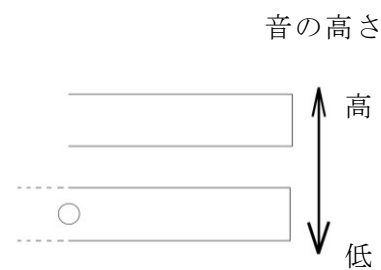
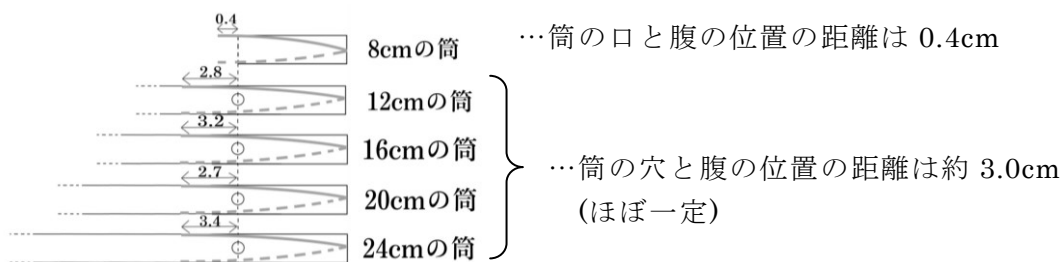


図5 開口端と穴における音の高さの変化



(再掲)図3 開口端と穴における波長の違い

トクトク音

1. 緒言

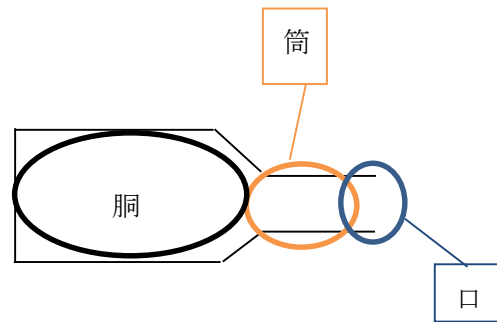
コップに水を注ぐときに「トクトク」という音が鳴っているのを聞いたことがあるだろう。私たちはこのトクトク音がどのようにして鳴っているのかを調べるために研究を行った。

2. 仮説

トクトク音がどのようになっているのかということについて私たちは、

- ①瓶自体が振動して音が鳴っている。
- ②瓶の口の部分で気柱共鳴を起こして音が鳴っている。

という二つの仮説を立てた。



3. 実験手順

実験 1

図1 実験 1 に用いた瓶の模式図

①の仮説を検証するために、次のような実験を行った。

- (i)一定の角度で瓶を傾けて水を注いだ時のトクトク音の振動数を FAST TRACK ULTRA (M-AUDIO) という、振動数を測定することのできる機器を用いて測定する。
- (ii)図2のように瓶の口及び胴の部分が振動しないように口及び胴の部分を片方ずつ抑え、再度トクトク音の振動数を測定する。



図2 瓶の口を押えている様子

実験 2

②の仮説を検証するために次のような実験を行った。

- (i) 19センチの筒を持つフラスコいっぱい水を注ぎ、徐々に傾けながらフラスコ内に水が入るときの音を計測する。
- (ii) 図4の丸の部分にマイクを近づけ、FAST TRACK ULTRA (M-AUDIO) という、振動数を測定することができる機器を用いて振動数を測定した。このとき、フラスコ内の液体が外に出ないようにするため、フラスコの筒の部分に液体がとどまるように注ぐ。
- (iii) 液体を注ぐ様子をスマートフォンでスロー再生し、フラスコ内に入る気泡の数を調べ、何個目の泡の時にどれほどの振動数であったかを調べる。
- (iv) 次に、瓶の口に蓋をして塞ぎ、(i)～(iii)と同様に音を測定する。

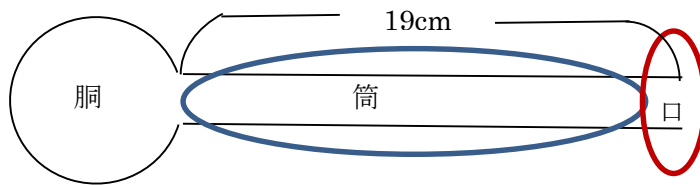


図3 実験2に用いたフラスコの模式図



図4 実験で使用したフラスコ

4. 実験結果

結果 1

瓶の口や腹を抑えても音の大きさや振動数は変化しないことが分かった。

結果 2

フラスコに入った泡の個数と振動数の関係を FAST TRACK ULTRA (M-AUDIO) で調べたところ、後に入った泡ほど振動数の大きい音を出すことが分かった。つまり、泡が入るほどトクトク音の高さは高くなることが分かった(図 5)。また、フラスコの口を塞いだところ、極めて小さい音しかならなかった。

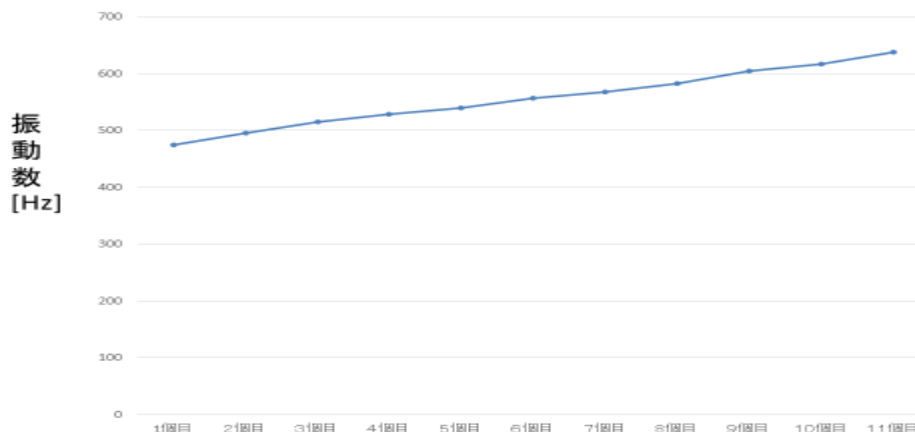


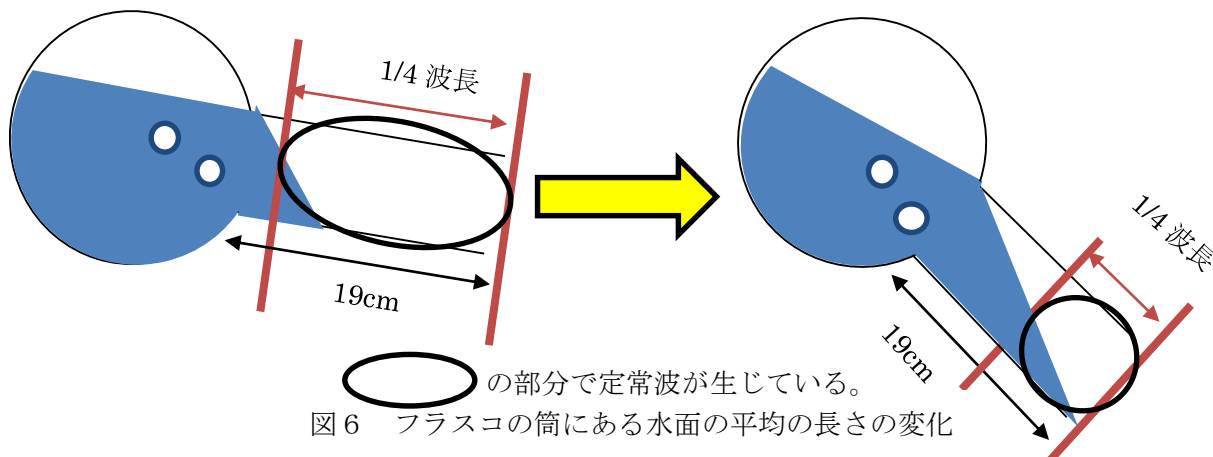
図 5 フラスコに入った泡の個数と振動数の関係

4. 結論

実験 1 の結果から、瓶の振動によって音が鳴っているわけではないという結論に至った。また、実験 2 から得られた振動数と、音の速さ (340m/s) から、音の波長を計算すると、0.53~0.68m になることが分かった。この波長を 4 分の 1 した値は 0.13~0.17m となり、およそ瓶の口の長さとも一致することから、瓶のトクトク音は、気柱共鳴によるものではないかという結論に至った。

5. 考察

最後に泡が入るにつれて、なぜトクトク音が高くなるのかを考察してみる。図 6 の青色の部分は水を表している。フラスコを傾け、水面が移動することによって、図 6 のように口の部分に生じる定常波の 1/4 波長の長さが短くなるためトクトク音の振動数が高くなると考察した。



音と循環流

1. 緒言

筒の中に音波を入射すると気柱共鳴を起こすと空気の循環流が発生する。その様子を直接目で見ることはできない。そこで、私たちは循環流の中に物体を入れ、循環流の様子を視覚化する研究を行った。

2. 実験手順

<実験器具>

スピーカー (Creative社 Creative T15 wireless)

筒

(アクリル製、全長102cm、内径4cm、片方の口を蓋でふさぎ、もう片方の口を開けておく)

直流電源 (KIKUSUI PMC18-3)

シートレーザー (Quarton レーザーモジュール)

フォグマシン (Stage Evolution SM400 TAPIR)

線香の煙

発泡スチロール球 (直径約5mm)

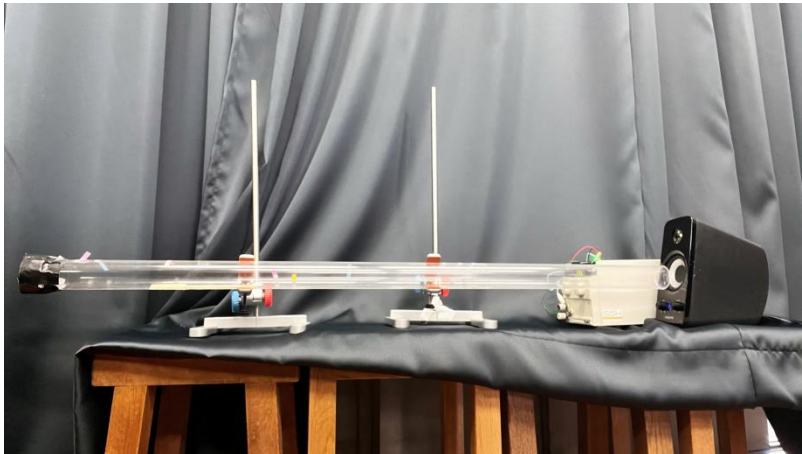


図1 実験の様子

<実験手順>

- ①筒の中に調べる物質を適量入れ、一様になるように広げる。
- ②スピーカーから出た音波が筒の中に入射するようにスピーカーと筒を並べる。
- ③スピーカーから約400Hzの正弦波 (筒に対して5倍振動の周波数) を流す。

※5倍振動を用いたのは一番大きな動きが見られたから

観察する物質は以下の3種類である。

A. フォグマシンの煙 B. 線香の煙 C. 発泡スチロール球

A,Bの実験は、暗室で行い、シートレーザーで筒の真上から筒全体を照らし、煙の動きが見やすくなるようにした。

Cの実験は、発泡スチロール球の全体的な動きと個々の動きをそれぞれ観察した。発泡スチロール球のひとつひとつの向きを観察しやすくするために、発泡スチロール球に1つずつペンで印を付けた。

3. 実験結果

実験A. フォグマシンの煙

実験前広がっていた煙は、音波を入射すると腹にあった煙が節に移動し、煙は節に集まった。



図2 実験Aの様子

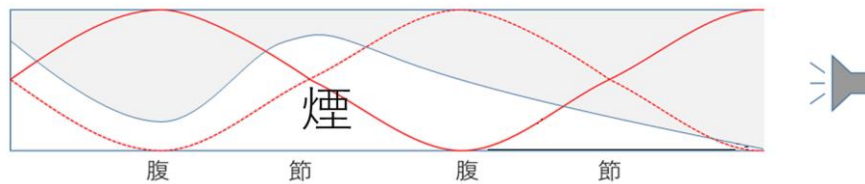


図3 実験Aの結果の図

実験B. 線香の煙

実験Aと同様に煙は節に集まった。音波を入射し続けると、元から節にあった煙と、腹から移動してきた煙とがぶつかり、移動してきた煙が節で図4のようにUターンし、腹へと戻っていくという循環流が観察できた。

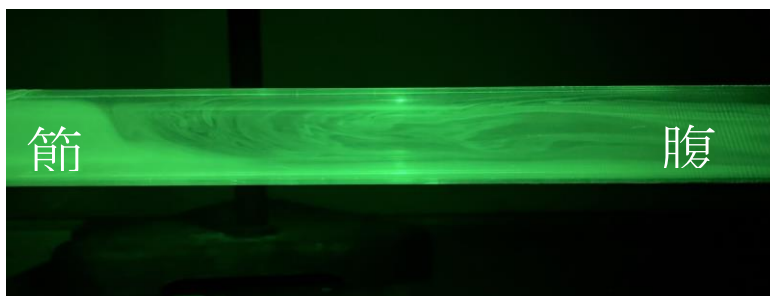


図4 実験Bの節での様子

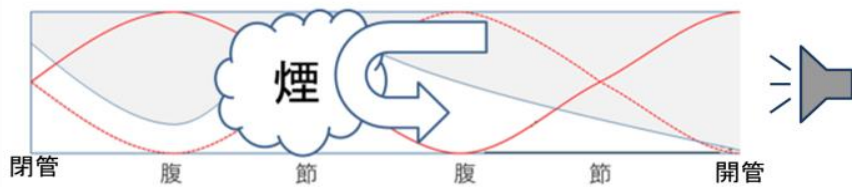


図5 実験Bの結果の図

実験C. 発泡スチロール球

均一に並べられた発泡スチロール球は音波を入射すると腹に集まった。腹に集まった発泡スチロール球を観察すると、1つ1つは図8のように縦方向の回転をして、腹を境に回転方向は逆になっていた。



図6 実験Cの様子

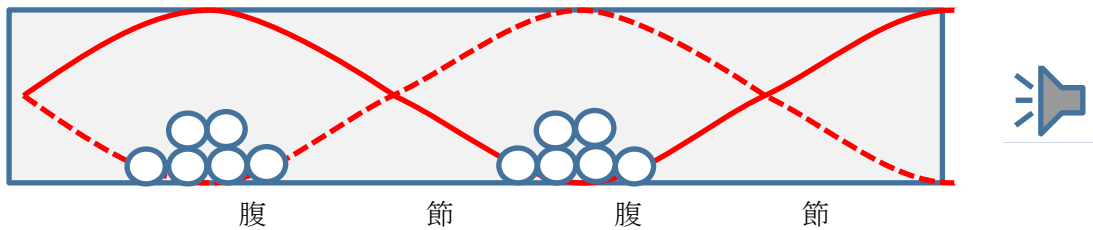


図7 実験Cの結果 1

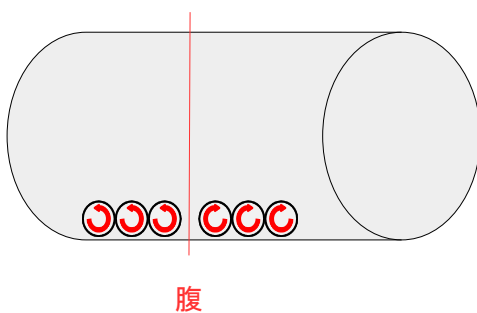


図8 実験Cの結果 2

4. 考察

実験A, Bの結果より音による気柱共鳴でフログマシンの煙は循環しなかったのに対し、線香の煙は循環した。そこで、循環するものと循環しないものの違いをその物質の粘度によって、説明しようと試みた (①)。また、実験B, Cの結果より煙の筒中での動き方と発泡スチロール球の筒中での動き方

は違っていた。そこで、二つの物質の動き方を比較し、共通点を見つけることで気柱共鳴による循環流の法則を調べた (2)。

① 粘度の違い

フォグマシンの煙の主成分はグリコールで比較的粘度が高いのに対し、線香の煙の主成分は炭素でグリコールに比べると粘度が低い。音波を入射することによって煙が腹から節へ移動し、節にとどまっていた煙とぶつかったとき、粘度の高いフォグマシンの煙はぶつかったことによって固まってしまう、粘度の低い線香の煙はぶつかっても固まることなく動き続ける。これによって、フォグマシンの煙は循環せず、線香の煙は循環したことの説明ができる。

② 物質による動き方の違い

実験2の結果より線香の煙は図9のように全体的に節に集まり腹から節へ、節から腹への循環流が見られた。また、実験3の結果より発泡スチロール球は図10のように全体的に腹に集まり、発泡スチロール球が腹で上に押し上げられ節で下へ回転している様子が見られた。

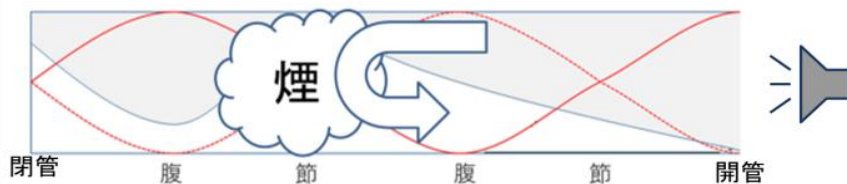


図5 実験Bの結果の図 (再掲)



図9 実験Cの結果の図

図5、図9の動き方をまとめた図が図10である。

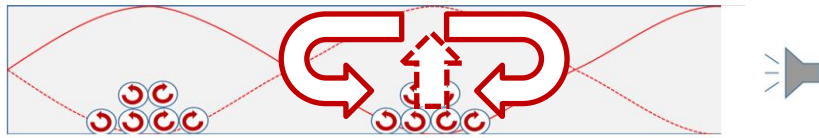


図10 実験B.Cのまとめ

右図より、動き方の共通点は

- 1 腹から節へ移動する
 - 2 節で下降気流が起こる
 - 3 節から腹へ移動する
 - 4 腹で上昇気流が起こる
- という動きが連続することによって循環していると考えた。

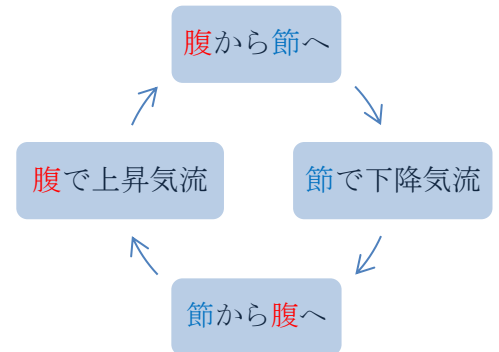


図 11 循環の仕方のまとめ

5. 結論

気柱共鳴による循環流は筒中に入れる物質の粘度が関係することがわかった。また、煙では観察出来ていなかった循環流の腹での動き方を発泡スチロール球によって可視化することが出来た。

6. 参考文献

音の定常波による物質の振る舞い

新潟県立教育センター研究報告書第157号 (1994)