

中学生の部【金賞】

## メトロノームの同期現象について

学校名：和泉市立南松尾はつが野学園

学 年：8年、6年

名 前：中本 愛椀、中本 結香

# ～メトロノームの同期現象について～



南松尾はつが野学園8年 中本 愛椀

共同研究者 南松尾はつが野学園6年 中本 結香

## ～目次～

- 1,要旨・・・・・・・・・・・・・・・・・・p,2
- 2,研究目的・・・・・・・・・・・・・・・・p,2
- 3,研究方法・・・・・・・・・・・・・・・・p,3.4
- 4,予想と結果 A・・・・・・・・・・p,4.5
- 5,考察 A・・・・・・・・・・・・・・・・p,5.6
- 6,研究方法 B・・・・・・・・・・p,7
- 7,予想と結果 B・・・・・・・・・・p,7.8.9.10
- 8,考察 B・・・・・・・・・・・・・・・・p,11
- 9,結論 課題・・・・・・・・・・p,11,12
- 10,参考文献・・・・・・・・・・p,12

## 1, 要旨

揺れる台に同じテンポに設定したメトロノームをのせ、違うタイミングで動かし始めると、どのように同期するのか、なぜ同期するのかを研究した。複数のテンポで調べてみて、何かの規則があるのかを調べた。すると、大体は、テンポが速い方が同期するまでの時間が短いことがわかった。

どのテンポでも台が動き、テンポが同期していたので、本当に台がテンポをそろえているのか調べた。結果は、針の動く方向と、台の動く方向が垂直関係だと、テンポが安定しなかった。なので、針の動きと台の動きが平行関係にある場合は、2つのメトロノームのテンポは同期するとわかった。

次に、メトロノームが自由に動けるようになると、どうなるのかが不思議に思いメトロノームを、吊り下げたステンレス網の上にのせて実験した。すると、テンポがあまり安定せず、針2つが同じ方向で同期したり(同位相同期 という)、ずれたり、針2つが逆の方向で同期したり(逆位相同期 という)した。

1つ1つの力のエネルギーが小さくても、方向が同じなら大きなエネルギーで集中するが、かかるエネルギーの方向が前後左右、もしくは斜め方向と分散してしまうと、影響力が少ないとわかった。

## 2, 研究目的

妹が、「実験対決」を読むのが好きで、ある巻の振り子の実験について、不思議だねと話していた。そこで身近なもので、ふりこの原理と似ている、メトロノームの同期現象というものがあると知り、なぜそろうのかと、(本来メトロノームはテンポがずれてはいけない！！笑)とても疑問に思ったので、実際に調べてみたいと思った。

見つけたメトロノームの同期現象の動画



(写真 1)

### 3, 研究方法

#### 〈実験 A.B の準備物〉

- ・メトロノーム2個
- ・タイマー
- ・電子メトロノーム1個
- ・三脚
- ・スマホ
- ・台紙
- ・発泡スチロール
- ・空き缶2個
- ・ワゴン2台
- ・S字フック4個
- ・ひも
- ・ステンレス網
- ・メジャー



(写真2)

#### 〈実験方法A〉

- ・平らな机に、黒い台紙を引き、同じ空き缶を2つ置く。
- ・空き缶の上に発泡スチロールをおき、空き缶の真上になるようにメトロノームを2個おく。
- ・メトロノームを動かすと同時にタイマーで秒を測り始める。
- ・メトロノームの針の動きと、音を聞いて、同じ方向にバッチリそろった時の秒を記録する。
- ・台の動き方も観察する。
- ・1つのテンポにつき、3回実験して、平均を求める。
- ・160.168.176.184.192.200bpmの6つのテンポで調べる。



(写真3)

※bpm:1分間の拍の数の単位

## 〈実験の条件〉

- ・家にあるメトロノームは、違うメーカーで、1つはとても古いので、全く同じメトロノームを2つ購入した。
- ・メトロノームは自分でメモリを動かし、テンポを合わせるのでぴったり合わせるのが難しい。⇒家にある電子メトロノームを使って両方のメトロノームのテンポをそろえた。
- ・メトロノームの位置をそろえるために台に印をつけ、その印にそって置く。
- ・片方のメトロノームを動かし始めてから、もう片方のメトロノームを動かす間を2秒あける。
- ・メトロノームのねじがゆるんでくると、テンポが変わってきてしまうので、1回1回しっかりまわしておく。

## 4, 予想と結果 A

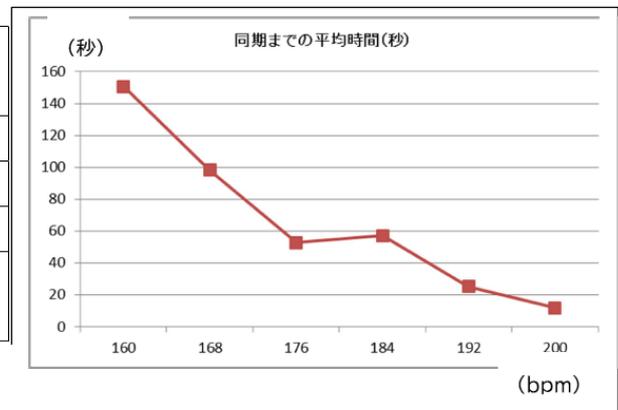
### 〈予想〉

テンポが速い方が台が激しく動いて、影響が大きく、すぐに同期すると思う。

### 〈結果〉

テンポ (bpm)	160	168	176	184	192	200
1回目	157	94	55	54	23	10
2回目	148	101	52	56	30	10
3回目	147	100	51	62	23	16
平均値 (秒)	150.7	98.3	52.7	57.3	25.3	12.0

(表1)



(グラフ1)

- ・大体、テンポが上がるにつれて、同期するまでかかる時間が早くなっている。
- ・台の様子⇒テンポが速い方が台がはやく動いていた。だんだんと台が設定しているテンポで横揺れし始めていた。(どのテンポでも)

例)160bpm

1, 全然そろっていない時



・台はほとんど動いていない (写真4)

2, 少しそろい始めた時



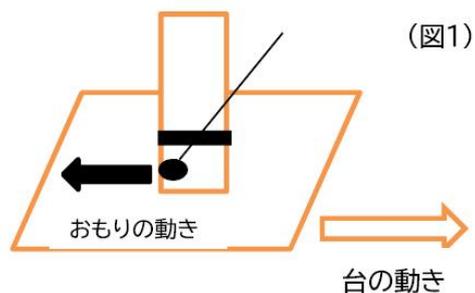
・台が少し動き始めた (写真5)

3, そろった時



・台が大きく横揺れし始めた (写真6)

〈作用・反作用の法則〉

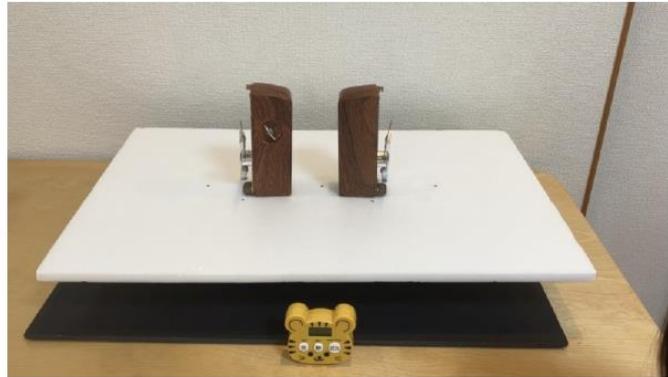


物体に力を加える時、必ず逆向きの力が現れる。このとき、一方の力を作用、もう一方の力を反作用という。2つの物体が互いに及ぼし合う作用と反作用は、同一作用線上にあり、大きさは等しく、互いに逆向きである。これを、作用・反作用の法則という。

## 5, 考察 A

- ・テンポがはやい方が、速く台が動くのでそろいやすいとわかる。
- ・台が動いて、だんだんとテンポがそろったので、台が二つのメトロノームのテンポを合わせたのかもしれない。
- ・片方のメトロームの動かす力に引きずられて、もう片方のメトロノームがだんだんと合わせていったのではないか。

- ★ 本当に、台がメトロノームのテンポをそろえているのか調べてみる。  
⇒先ほどでの実験は、メトロノームの針の動く向きが台の動く向きと同じであった。では、メトロノームの向きを逆にしておく。(写真7)のように置くと、メトロノームの針の動きと台の動きが垂直関係になるので、メトロノームの同期がどうなるのか調べてみる。



(写真7)

### 〈予想〉

針と台が垂直関係なので、テンポは同期しないと思う。

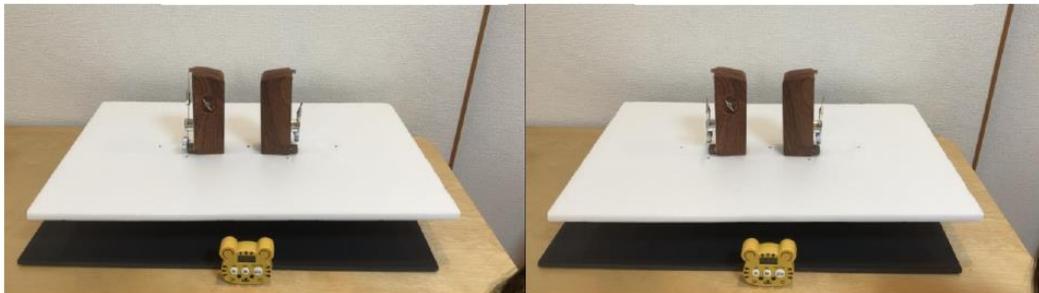
### 〈結果〉

〈針の向き〉

左は奥、右は手前(写真8)

〈針の向き〉

左も右も手前(写真9)



・針の動きは、少しだけそろって、ずれて、の繰り返しだった。同じ向きにそろったり、逆の向きにそろったりして、同期が安定しなかった。⇒このことからメトロノームの同期現象は、台の動きが針の動きに影響を与えていることがわかった。

- ★全方向に自由に動けるようになると、メトロノームはどのように同期するのだろうか。

## 6,研究方法 B

### 〈実験方法 B〉

- ・ステンレス網にひもをつけて、S字フックにかけて、ワゴンにつりさげる。
- ・ステンレス網の上にメトロノームをのせる。



(写真10)

- ・1つのテンポにつき、3回実験して、平均を求める。
- ・研究Aと同様に、記録する。

### 〈研究の条件〉

研究Aと同様。

## 7, 予想と結果 B

### 〈予想〉

研究Aより台が全方向に自由に動くので、全てのテンポが、研究Aより早く同期すると思う。テンポが速い方が同期するまでの時間が短いというのは、変わらないと思う。

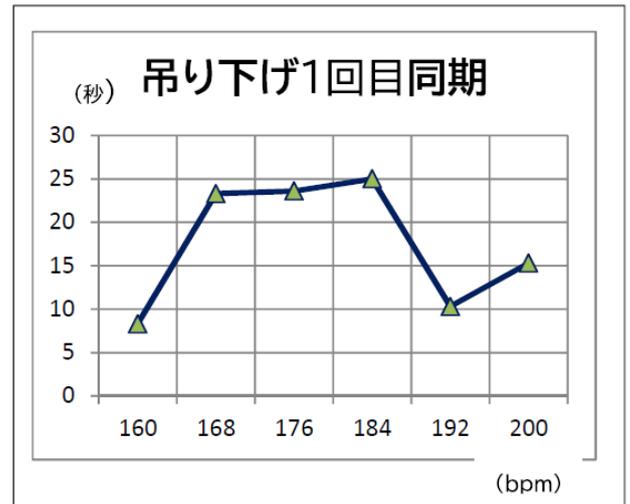
### 〈結果〉

- ・同位相同期になったり逆位相同期になったりしたので、スタートしてから1回目に同期した時、スタートしてから2回目に同期した時、と両方記録した。

〈スタートから1回目に同期した時〉

テンポ (bpm)	160	168	176	184	192	200
1回目	9	21	25	7	8	14
2回目	7	18	24	15	10	6
3回目	9	31	22	53	13	26
平均値 (秒)	8.3	23.3	23.6	25.0	10.3	15.3

(表2)



(グラフ2)

- ・研究Aの時のように、テンポが速い＝同期までの時間が短い とは言えない。
- ・研究Aよりも、吊り下げた方が同期するまでの時間が短かった。(200bpm 以外は)

例)160bpmの同相同期の様子



(写真11)

実験終了後、160bpmと200bpmに特徴がみられたので、2つのテンポに着目した。

台の様子⇒・160bpmは前後に動いたり、Zのような動きをしていた。(ずっと)

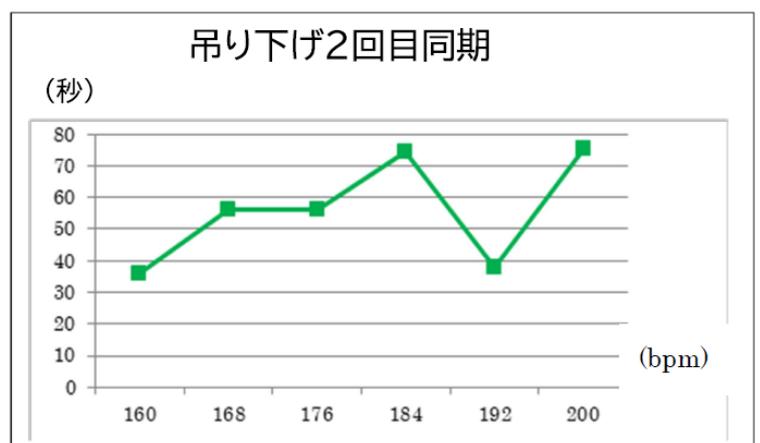
・200bpmは初め、激しく動いていたけど、テンポが合ってくるとテンポ通りに左右に回転していた。

〈スタートから2回目に同期した時〉

テンポ (bpm)	160	168	176	184	192	200
1回目	39	52	58	42	34	97
2回目	38	50	57	84	39	43
3回目	31	67	54	97	41	86
平均値 (秒)	36	56.3	56.3	74.3	38	75.3

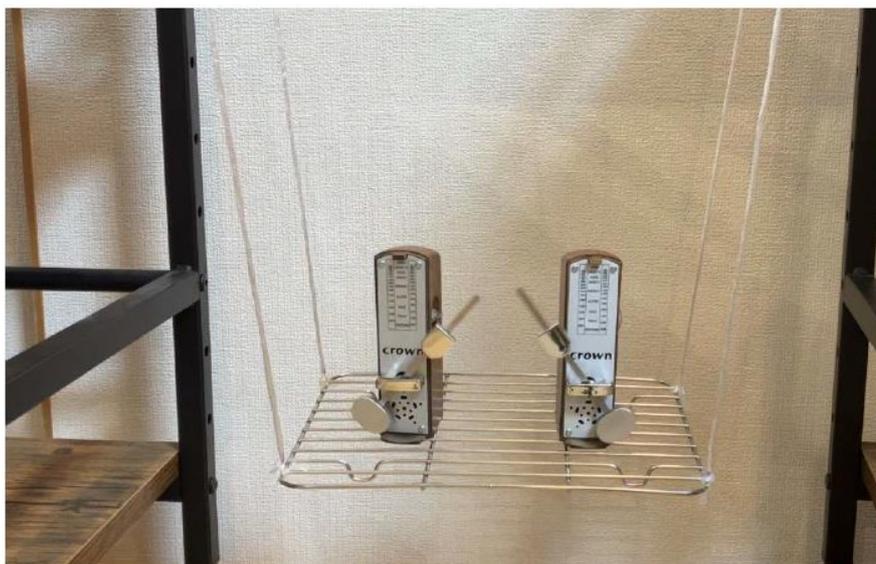
(表 3)

- ・2回目だけとしてみると、192bpmを例外として、テンポが速くなるにつれて、同期するまでの時間が長くなっている。



例)160bpmの逆相同期の様子

(グラフ 3)



(写真 12)

(同期の種類)

例)160bpm

回数	1回目の同期の種類	2回目の同期の種類
1回目	同位相	逆位相
2回目	同位相	逆位相
3回目	逆位相	同位相

(表 4)

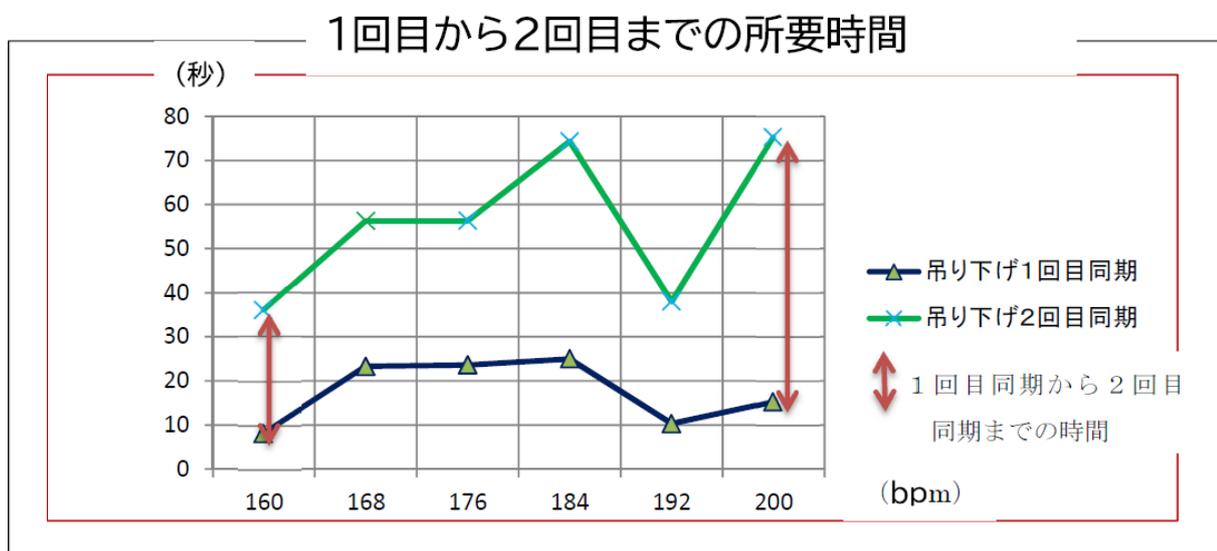
例)200bpm

回数	1回目の同期の種類	2回目の同期の種類
1回目	同位相	逆位相
2回目	逆位相	同位相
3回目	同位相	逆位相

(表 5)

・スタートしてから1回目に同期した時と反対の種類で同期した。

〈1回目同期から2回目同期するまでの時間〉



(グラフ4)

- ・160bpmの矢印の幅と、200bpmの矢印の幅が全然違う。
- ・テンポが速い方が、1回同期してから、2回目同期するまで、時間がかかるとわかった。

## 8, 考察 B

・空き缶の実験では、160bpmは同期するまでにとっても時間がかかっていたが、今回の吊り下げる実験では、スタートしてから1回目に同期するまでの時間がとても短かった。それは、吊り下げる方が、左右に動ける幅も大きくなるからだと思う。

・(グラフ4)で、160bpmと200bpmの結果がとても違うのは、スタートしてから1回目に同期した時の台の様子(8ページ)のように、160bpmに合わせて台が動いている感じはない。その一方で、200bpmは台の動きが安定してしまっているの、そこからずれていくのに時間がかかるからだと思う。

## 9, 結論 課題

### 〈今回実験してわかったこと〉

- ・メトロノーム同期現象は2つ以上動く台が必要であり、メトロノームと台の間では、作用反作用の働きがあることがわかった。
- ・テンポを変えることで、台の動き方や同期するまでの時間が変わると知った。
- ・空き缶にのせて実験を行うのと、吊り下げて実験を行うのでは結果が全然違って、吊り下げた方が同期するまでの時間が短いとわかった。

### 〈調べてわかったこと〉

このような同期現象は、メトロノームだけでなく、カエルの鳴き声や、蛍の光、人間の心臓の拍動、炎のゆらぎなど、自然界多くの場面で見られるようだ。

メトロノームの同期現象については、「蔵本予想」と呼ばれる方程式があり、40年間誰1人として数学的に証明できなかった難問だそう。

その謎を解き明かしたのが、数学者千葉逸人氏。解くのに6年かかり、数学の専門家がチェックするのに2年かかったそう。

その方程式が↓

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i), \quad i = 1, \dots, N$$

## 〈課題〉

- ・メトロノームが2つだと吊り下げて調べた時に、台が動く可能性がある方向にメトロノームを置くことができなかつたので、メトロノームの数を増やして、色々な向きに置くとどうなるのかを調べてみたいと思った。
- ・2つのメトロノームが同期するまでには、どちらかのメトロノームが合わせているはず。(お互いかもしれない)その経過を目で見える形に表現しようと考えてみた。しかし、詳しく書かれている論文を見ると、特殊な機械を使い波形でずれを表していた。そのような機械は使えないので、まずは2人で担当するメトロノームを決め、歌を歌ったり、ピアノで弾いてみたが、お互いつられてしまい、できなかつた。自分たちで方法を見つけて、来年は証明できるようにしたい。
- ・「蔵本予想」の方程式が理解ができなかつたので、少しだけでも理解すると、実験で役立つことがあるのかもしれない。色々なサイトや本で調べてみようと思う。

## 10,参考文献

・吊台上のメトロノームの同・メトロノーム同期(100個)

<https://m.youtube.com/watch?v=suxu1bmPm2g>

同期現象—モデルパラメータの同定と実験検証

泉 晋作・ 鴻上 凌也・ 忻 欣・ 山崎 大河

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/iscie/31/11/31\\_400/\\_pdf#:~:text=メトロノームの同期現象と,そろうという現象である%EF%BC%8E](https://www.jstage.jst.go.jp/article/iscie/31/11/31_400/_pdf#:~:text=メトロノームの同期現象と,そろうという現象である%EF%BC%8E)