

平成22年度指定スーパーサイエンスハイスクール

# 活 動 記 録 集

第2年次 平成24年3月

宮城県仙台第三高等学校



# 巻 頭 言

宮城県仙台第三高等学校長 中川西 剛

今年度は、3月11日に発生した東日本大震災の影響により、大変な状況のもとでスタートした一年間であった。本校は仙台市内の丘陵地に位置しているために津波による被害は幸いにも無かったものの、震度6強という大きな揺れにより実験室に備えてあった光学顕微鏡はじめ、多くの実験機器がもろとも床に投げ出され、ガラス器具等の欠片が床一面に散乱した状況となった。また、電気・水道といったライフラインの復旧にも時間もかかり、結局、授業は4月21日からのスタートとなった。これまで生徒達が継続的に行ってきた課題研究に伴う実験も中断、やり直しをせざるを得ない状況となった。授業がほぼ定常の形で開始できたのは5月の連休明けであった。

さて、SSHも2年目となり、試行錯誤状態の昨年度とは違い、震災でスタートが遅れたものの生徒達も教員側もある程度の計画性を持ちながら一步前進した課題研究に取り組めたものと思っている。しかし、我々が目指しているものは「学都・仙台」という素晴らしい教育環境を十分に活かし、本格的な探求活動を行うことで領域横断的な高い科学的分析力と国際社会と科学との関わりを認識した高い倫理性を有した人材の育成にあり、その視点からすれば内容はまだまだほど遠いのが現状である。

幸い今年度も、運営指導委員の先生方を中心に、東北大学、宮城教育大学、宮城大学、産業技術総合研究所東北センター等の方々から大きな御支援をいただき、御講演はもとより、実験講座、フィールドワーク、研究室見学、課題研究会における助言指導など、生徒達の科学する心を揺さぶる多くの場を与えていただいた。感謝を申し上げたい。

生徒達には、大学や研究機関等と肩を並ることができる素晴らしい研究も目標の一つとは思いますが、まずは、自分の身の回りの自然現象を落ち着いてしっかりと観察する眼を養うことが何より重要と思っている。更に、不思議・疑問と思った部分があれば、それを何としても解明してみようとする行動力を身に着けて欲しいと思っている。

困難をどう捉え、その困難をどう乗り越えたら良いのか、その為にはどんな力を蓄えれば良いのか……。課題解決能力は、まさしく震災の復旧・復興にもそのまま当てはまる。

本活動記録集では、今年度を実施したSSH課題研究の研究成果の報告に加え、自然科学部の日頃の活動内容も盛り込んでいる。まだまだ十分でない部分が多いが、生徒達の意気込みは十分に込められている記録集となっている。二回目の発行となるが、来年度、再来年度と更に質を高めた内容にしていきたいと考えている。

本活動記録を関係の皆様にご覧いただき、御指摘・御指導をいただきたいと思っている。

## 目次

### 巻頭言

### SSH課題研究

#### 地理領域

学校敷地内の環境と気温の関係について考える	1
-----------------------	---

#### 数学領域

思い通りのあみだくじを作る	9
---------------	---

#### 物理領域

ヘリコプターの製作を通して飛ぶ原理を知る	16
----------------------	----

水平尾翼容積で飛行時間は変わるのか	21
-------------------	----

平面スピーカーと指向性	25
-------------	----

立体音響	29
------	----

3Dを美しく見せるために	33
--------------	----

受動二足歩行ロボットの歩行条件	37
-----------------	----

ボールの運動と距離	41
-----------	----

ワイヤレス送電技術を用いて遠距離送電をする	45
-----------------------	----

エレキギターの音の仕組み	49
--------------	----

#### 化学領域

天然染料による金属イオン検出試験紙の作成	53
----------------------	----

色素増感太陽電池と光の色の発電効率の違い	59
----------------------	----

#### 生物領域

カラスのくるみを落とす行動の研究	64
------------------	----

珪藻を用いた七北田川の水質調査	69
-----------------	----

粘菌を用いたネットワークモデル	75
-----------------	----

DNAの塩基配列情報で生物種を同定する	80
---------------------	----

SDS電気泳動による糸腺を用いたクモの糸のタンパク質の分析	84
-------------------------------	----

ニワトリ胚への造影剤注入による血管形成の観察	89
------------------------	----

メダカの遅筋と速筋	94
三高の桜の組織培養	99

#### 地学領域

津波による波の変化	103
-----------	-----

#### 情報領域

分化の流布のシミュレーション	108
砂山崩しにおける自己組織化臨界現象	116
光学式マウスを利用した重力加速度の測定	120

#### SSH特別課題研究

クサイロアオガイにおけるベリジャー幼生から稚貝への変態過程	124
レタス種子（ちりめんちしゃ）の発芽における温度と光照射の影響	128
音の音色の違いについて	134
素数の「周期」に基づいたフェルマー数の素因数の判別	142
黄金比とフィボナッチ数列	146
白神山地の地滑りについての考察	154

#### 部活動

##### 自然科学部化学班

ルミノール反応とケミカルライトの混合	160
--------------------	-----

##### 自然科学部生物班

マウスとヒトの赤血球の食塩濃度による形態変化	165
魚類視交叉の左右非対称性	172
マウスとハムスターのバランス能力と尾の役割	175
酵素活性による魚類の体温の推定	179

##### 数学部

ロピタルの定理	183
確率と期待値	185
決定理論	188
世代を超えて親しめる数学 ～確率編～	191



# 学校敷地内の環境と気温の関係について考える

高橋 楓

仙台第三高等学校

## 1. 要約

普通の学校生活を送る中で気温の違いを感じる場面があった。そこで狭い範囲であっても環境の違いによってどのように気温が変化するのかを調べるため、温度計を設置し気温を測定、気温と環境の関係について調べた。得られた結果を元に気温と環境の関係について考察したところ、植物の有無や種類、建物の位置、地表面の状態が気温形成に影響し、仙台三高という狭い敷地内においても測定地点によって気温の差が生じることが分かった。

## 2. はじめに

学校生活を送る中で学校の敷地内においてもグラウンドの日向にいる時と校舎の影にいる時とでは暑さが異なっているように感じる、木陰に入ると涼しく感じる、といった気温の違いを感じる場面があった。そこで学校という狭い敷地の中であっても、地表面や植物の有無などの環境の違いによって気温がどのように変化するのか調べるため、温度計を設置し気温を測定、気温と環境の関係について調べた。得られた結果を元に気温と環境の関係を季節や天候などの気象データと照らし合わせながら気温形成について考察した。

## 3. 方法

[1] 三高敷地内 10ヶ所に温度計「ハイグロクロン」を設置し、15分間隔で気温を測定、環境と気温の関係について考察する。

〈測定期間〉

夏: 6月30日～9月13日

秋: 10月20日～12月1日

冬: 12月14日～1月7日

今回は上の期間の中から、夏の晴れた日として7月17日、冬の晴れた日として12月28日のデータを使用した。

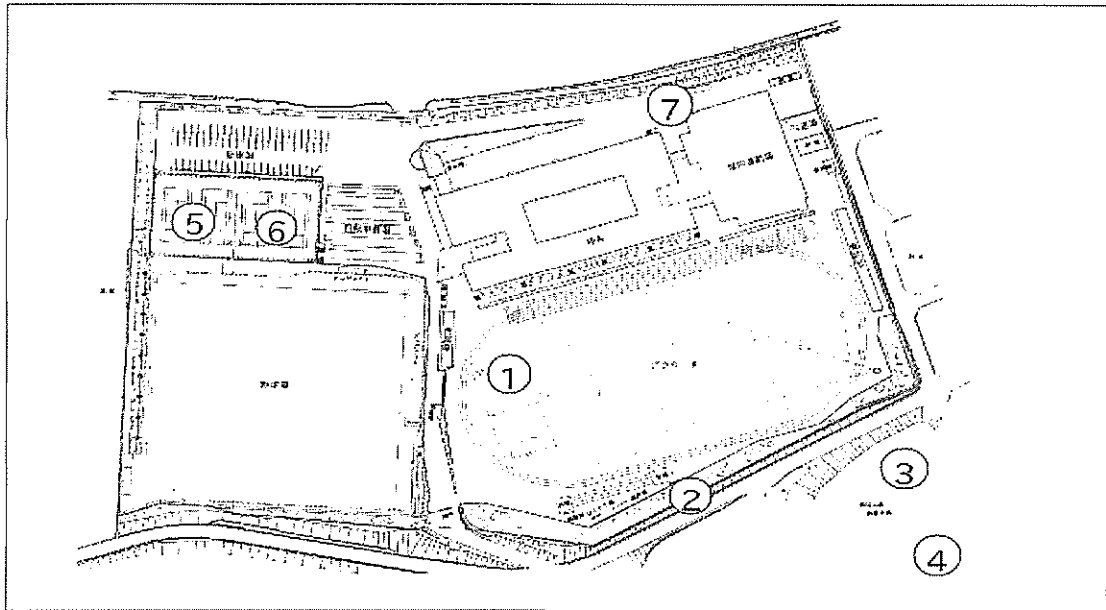
### 〈測定場所〉

三高敷地内 10ヶ所に温度計を設置したが,考察には以下7箇所の気温データを使用した.

1・グラウンド(日向) 2・グラウンド(日陰) 3・三高の森

4・第二グラウンド(日陰) 5・テニスコート(人工芝) 6・テニスコート(砂) 7・校舎北側

※第二グラウンドは校舎よりも低い所に位置する.



(図 1)仙台三高施設配置図

[2] 三高内の様々な場所の表面温度を「放射温度計」を用いて測定し,地表面と気温の関係を調べるために温度毎に色分けをした「三高温度マップ」を作成する.

※放射温度計とは

熱の伝わり方の一つである「放射」を利用した温度計.

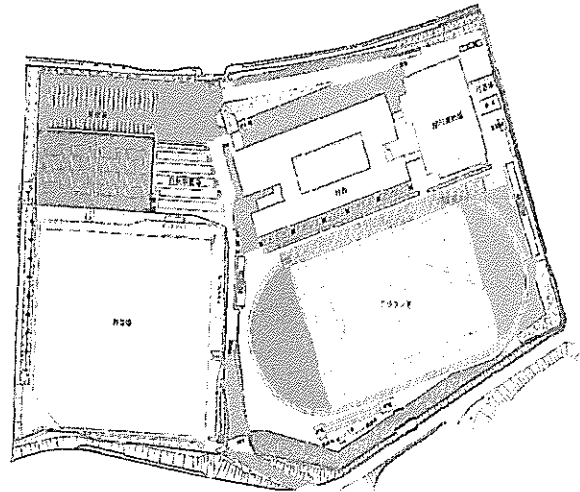
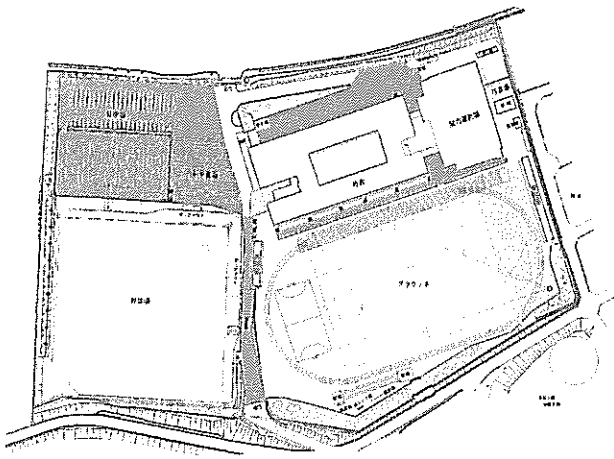
身の回りのすべてのものはその温度に対応した波長の赤外線を放出している.その赤外線をとらえ,温度に変換することによって表面温度を表示する仕組み.

## 4. 結果と考察

### 〈1〉温度マップの作成

右図が夏,左図が冬の温度マップである.色分けは以下の通り行った.





【夏】

【冬】

- ~26.9°C 青色
- 27.0~29.9°C 緑色
- 30.0~32.9°C 黄色
- 33.0~35.9°C オレンジ色
- 36.0~39.9°C 赤色

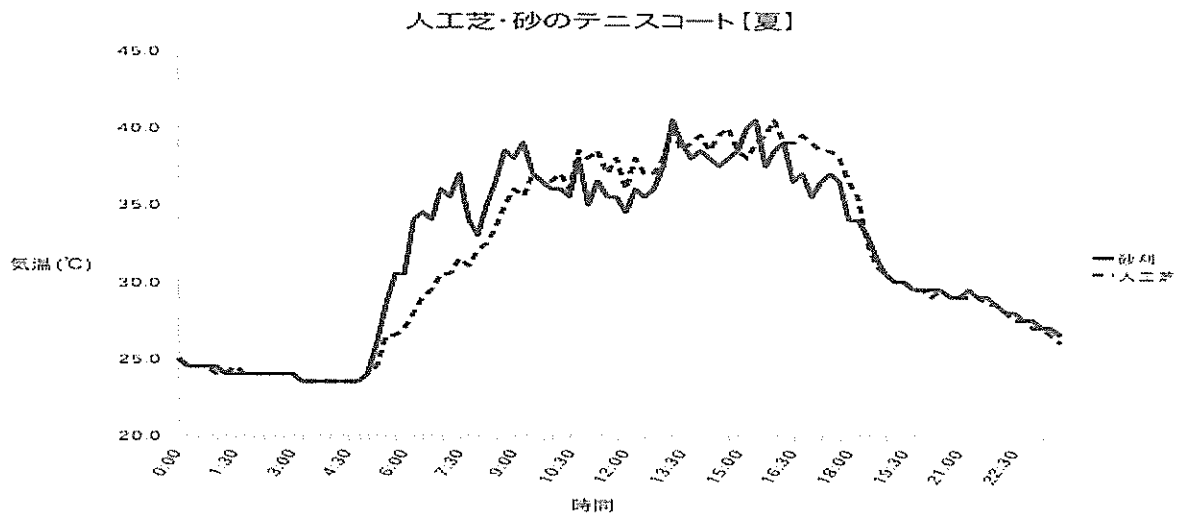
- ~2.9°C 紫色
- 3.0~5.9°C 青色
- 6.0~8.9°C 緑色
- 9.0~11.9°C 黄色
- 12.0~14.9°C オレンジ色
- 15.0~17.9°C 赤色

地面がアスファルト・コンクリートの部分(人工皮膚という)は赤・オレンジ・黄色になっており温度が高いことが分かる。逆に青・緑色である日陰の場所や建物の影になっている所,三高の森(両図右下)は夏・冬ともに温度が低いことがわかる。

これよりアスファルト等人工被膜は熱を蓄えやすく,温度が高くなるが,地表面が土・植物等に覆われている箇所は植物の蒸発散により,熱を吸収しても蓄えにくいということが考えられる。

## 〈2〉テニスコート(砂・人工芝)の気温の比較【夏・晴れ】

※砂のテニスコートとは軟式用のコートを,人工芝のテニスコートは硬式用のコートのことを指す。



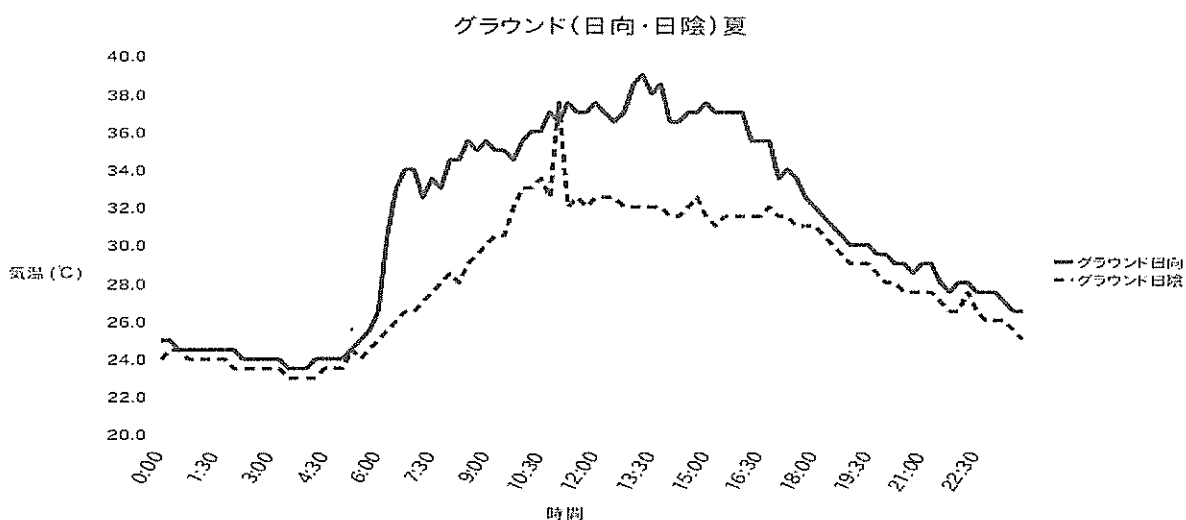
(図2)人工芝と砂のテニスコートの気温の比較【夏・晴れた日】

0:00~5:00日の出前,18:00~24:00の日の入り後の時間は二ヶ所に気温の差は見られない。

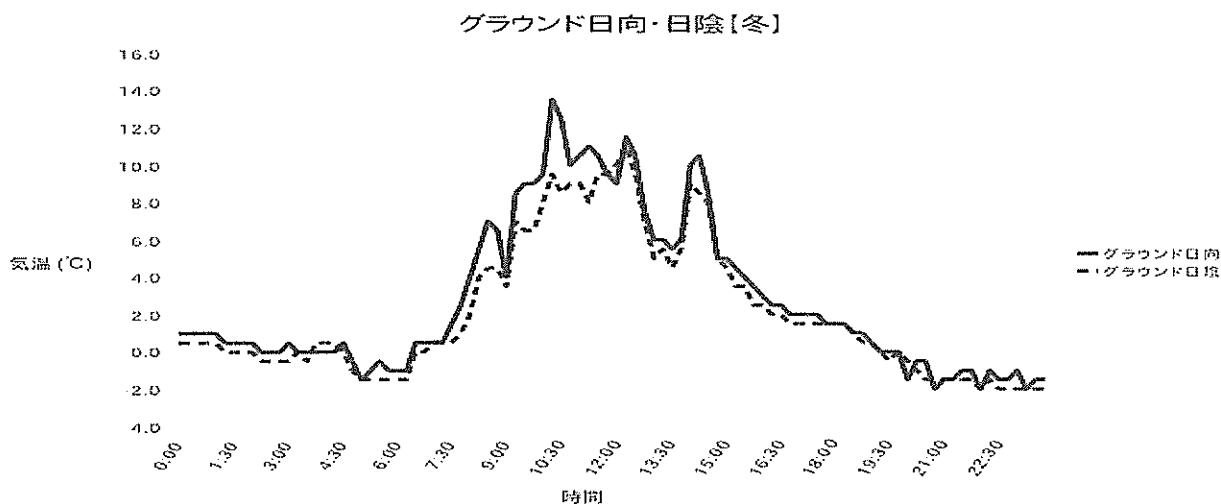
しかし日の出とともに,砂のテニスコートは人工芝のテニスコートよりも気温が急激に上昇しているのがみられ,日が沈み始めると砂のテニスコートの気温の方が速く下がっている。これより,人工芝のテニスコートよりも砂のテニスコートの方が気温が太陽の影響を受けやすいと考えられる。

### 〈3〉グラウンドの日向と日陰の気温の比較【夏と冬・晴れ】

※グラウンドの日向は地面が土,グラウンドの日陰は地面が土と草覆われていて,さらにグラウンドの日陰は木陰になっている。



(図3)グラウンドの日向と日陰の気温の比較【夏・晴れた日】



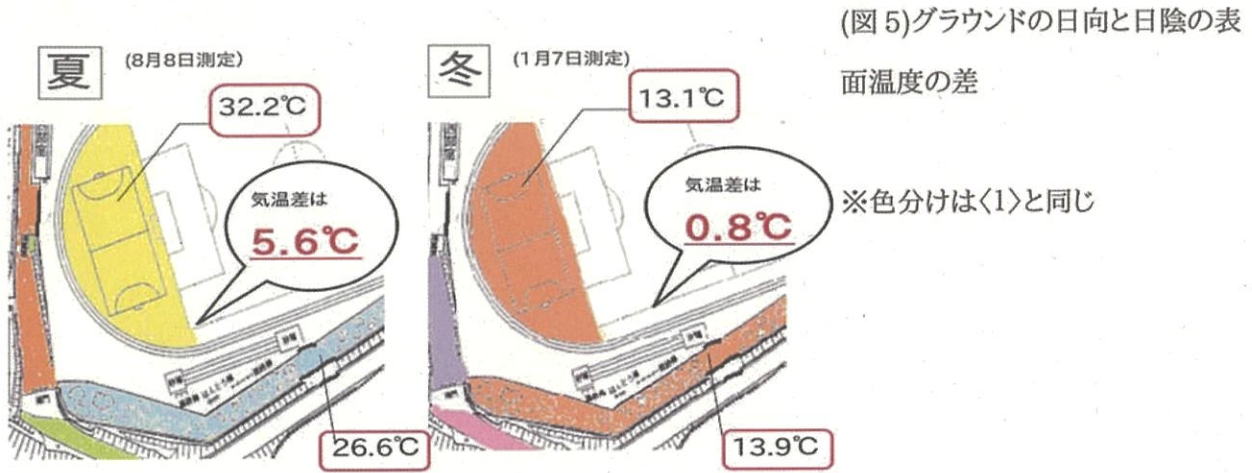
(図4)グラウンドの日向と日陰の気温の比較【冬・晴れた日】

夏:グラウンドの日向の方が日陰のグラウンドよりも気温が高い。これはグラウンドの日向の方が木陰になってい

る方よりも太陽が当たりやすいため、気温が上昇したと考えられる。

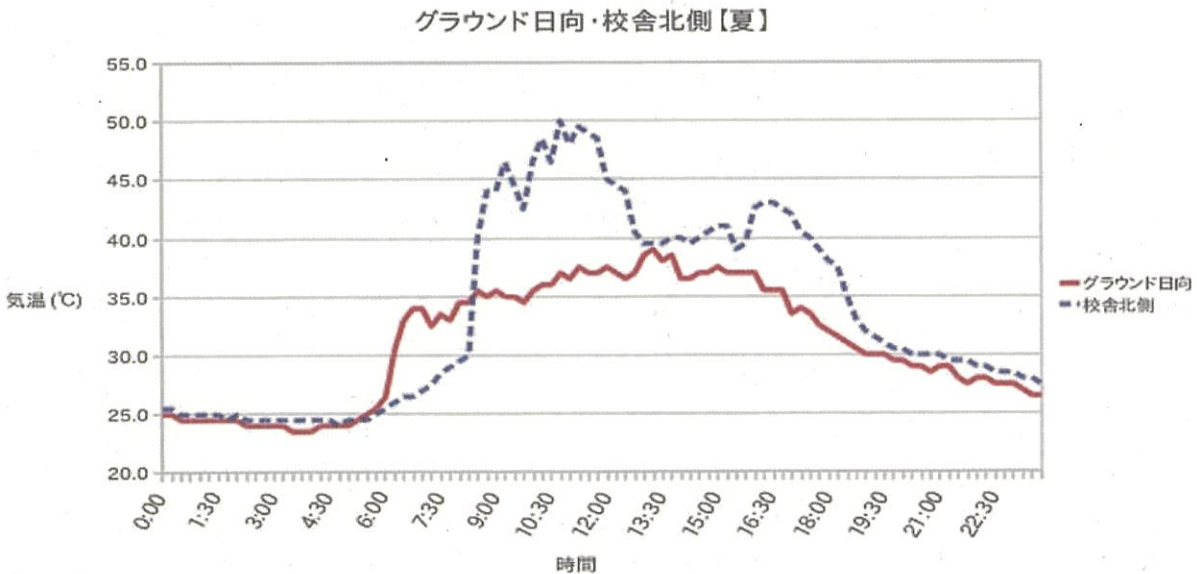
冬:夏のグラフと比べるとニヶ所の気温の差が小さい。グラウンドの日陰に影をつくっていた木が落葉樹であるため、冬になり葉が落葉し、日向の方と日の当たる量の差が小さくなり、気温の差が小さくなったと考えられる。

さらにこのニヶ所の表面温度を温度マップ(下図)で比較すると、夏には表面温度の差が5.6℃あったのに対して冬には温度差がわずか0.8℃になっており、差が小さくなっている。これより表面温度の差は気温の差と関係していることが分かった。

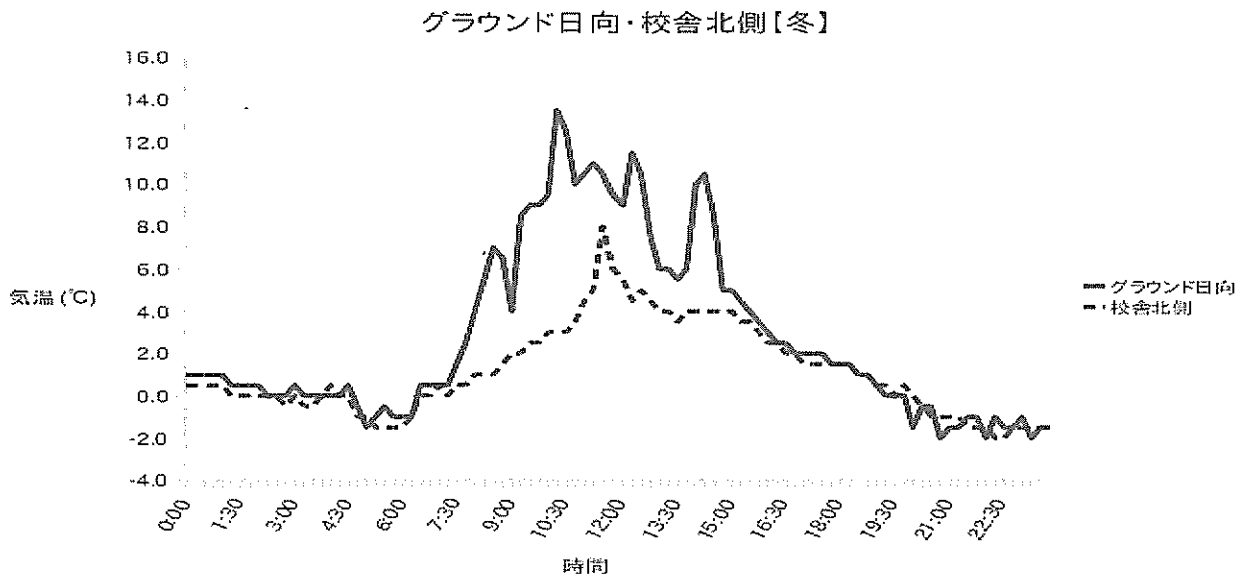


#### 〈4〉グラウンドの日向と校舎北側の気温の比較

※校舎北側は周囲の地面がアスファルトに囲まれていて、校舎の影になっている。



(図5)グラウンドの日向と校舎北側の気温の比【夏・晴れた日】



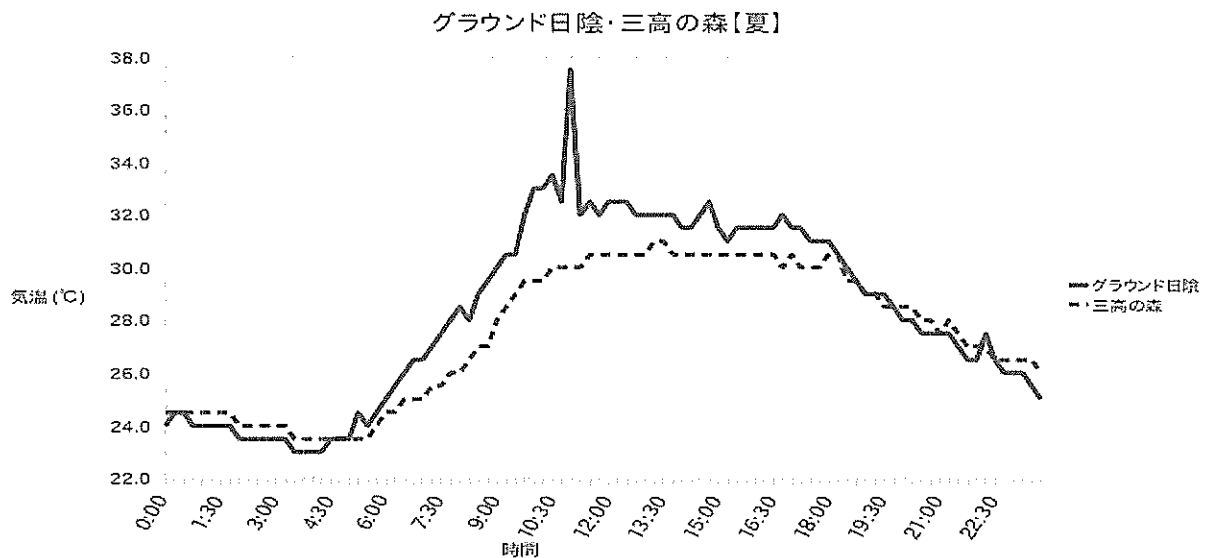
(図6)グラウンドの日向と校舎北側の気温の比【冬・晴れた日】

夏の晴れた日は校舎北側の方が気温が高いのに対し、冬はグラウンドの日向の気温の方が高い。

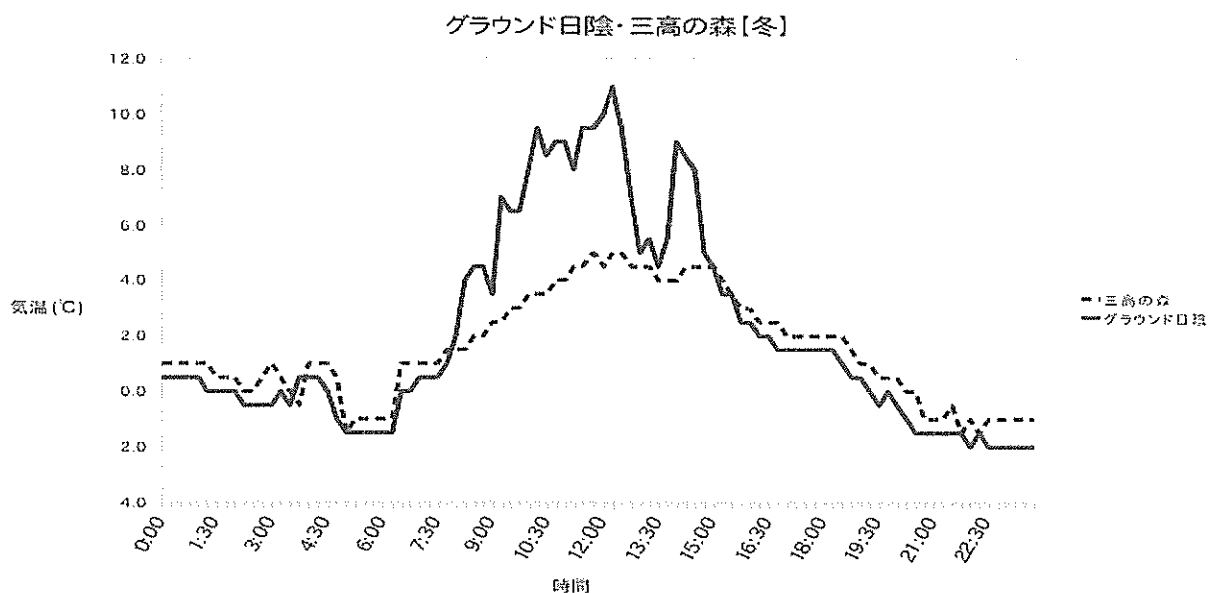
夏は太陽の位置が高く、校舎北側に日が当たる状態であるのに対し、冬は太陽の位置・高さが低く、校舎北側に日が当たりにくかったため気温が夏のように上昇せず、グラフが逆転したと考えられる。

〈5〉グラウンドの日陰と三高の森の気温の比較【夏と冬・晴れ】

※三高の森は常緑樹が多く生えている森である。



(図 7)グラウンドの日陰と三高の森の気温の比較【夏・晴れた日】



(図8)グラウンドの日陰と三高の森の気温の比較【冬・晴れた日】

夏:ニヶ所とも夏の間は木陰になっているので気温差は小さい。(※グラウンド日向のグラフの11:00の値が急激に上昇しているのは設置した温度計に直射日光が当たったためと考えられる。)

冬:夏に比べて気温差が大きくなっている。グラウンドの日向と日陰の比較の時と同じく、グラウンドの日陰に木陰を作っていた落葉樹の葉が少なくなり、日が当たりやすくなったのに対して三高の森には常緑樹が多く生えていたり、樹木がたくさんあることで夏と同じように日が当たりにくい状態を保っていた。そして冬に気温の差が現れたと考えられる。

また、三高の森においては、夏と冬でも一日の間で最高気温と最低気温の差が小さく、一日を通して気温が他の観測地点よりも変化しないことが分かった。

## 5. 結論

仙台三高の敷地内で温度計を10地点に設置し、気温と環境の関係について考察したところ、以下のようなことが分かった。

- ・砂のテニスコートの方が人工芝のテニスコートよりも太陽の影響を受けやすい。
- ・植物の有無、またその種類(常緑樹と落葉樹など)によって気温は変化する。
- ・建物の有無やその位置によって日の当たり方が夏・冬で異なり、気温の差が変わる。
- ・三高の森は一日を通して気温の差が小さく、他の観測地点よりも気温が変化しない。

以上より、仙台三高の敷地という狭い範囲においても、気温は地表面の状態によって左右され、また植物・建物の有無によって変化するという結果が得られた。

## 6. 参考文献

- ・尾島俊雄「ヒートアイランド」
- ・入田央 「とことんやさしい気象の本」
- ・HORIBA,「放射温度計とは?」<http://www.horiba.com/jp/process-environmental/features/thermometry/plaza/1/> (最終利用日2011-1-11)

# 思い通りのあみだくじを作る

太田 風乃・後藤 杏

仙台第三高等学校

## 要約

あみだくじが一番下まで下りたとき、本当に結果が重ならないのか、また、自分の思い通りの結果が得られるあみだくじを作ることができるのか、ということについて数学的に考察した。結果が重ならないことは、数学的帰納法で証明できること、思い通りのあみだくじを作るには置換の考え方を使えばよいことが分かった。また、素あみだや、あみだくじの平等性についても考察した。

## はじめに

一年生のとき、私たちのクラスでの席替えはあみだくじで行われていた。窓側の一番後ろの席になりたくて、どうしたらその席になれるのかと考えた。一般的に、あみだくじが一番下まで行った時の結果は重ならず、どこからスタートしても平等だと思われる、そんな当たり前のことに「本当に結果は重ならないのか、ひよっとしたら平等ではなく自分に有利なあみだくじがつかれるのではないだろうか?」という疑問を抱いた。それが、この研究を始めたきっかけである。

## 1. あみだくじの定義

本研究でのあみだくじとは、以下のようなものとする。

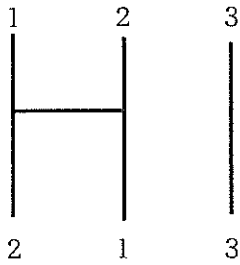
- ・何本かの縦線と横線からなるもので、横線は隣り合う縦線同士のみをつなぐ。
- ・横線同士は端点を共有しない。
- ・上方から下方に進む。
- ・横線にぶつかったらそこで横線の方向に進み、縦線にぶつかったら縦線を下方に進む。

## 2. 結果は本当に重ならないのか

あみだくじの結果が重ならないことは数学的帰納法によって証明することができる。

縦線3本のあみだくじを用いて「あみだくじの結果は重ならない」ということを証明する。また、このとき、あみだくじの横線の本数を  $n$  本とする。

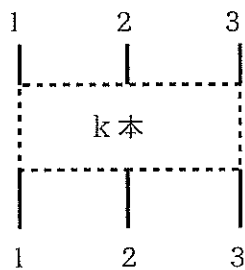
(i)  $n=1$  のとき



(図1)

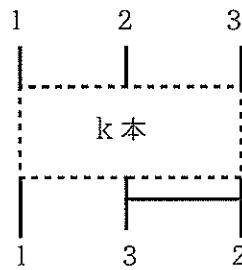
よって、結果は重ならない。

(ii)  $n=k$  のとき成り立つと仮定すると



(図2)

$n=k+1$  のとき



(図3)

よって、 $n=k+1$  のときも結果は重ならない。

(i), (ii) より、横線が何本であってもあみだくじの結果は重ならない。また、縦線が4本以上のときも同様に証明することが可能である。

### 3. あみだくじと置換

**定義**  $n$  個の文字の入れ替えを置換(permutation)という。例えば5個の文字(1, 2, 3, 4, 5)を

(4, 5, 1, 3, 2)と入れ替えることを次のように表す。

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 4 & 5 & 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} \dots(1)$$

**定義** 巡回置換(cycle)とは、ある相異なる  $k$  個( $k \geq 2$ )の数字  $i_1, i_2, \dots, i_k$  を

$i_1 \rightarrow i_2, i_2 \rightarrow i_3, \dots, i_k \rightarrow i_1$  のように移し、それ以外の数字は動かさないような置換のことであり、

$(i_1 \ i_2 \ \dots \ i_k)$  また、巡回置換に用いられる数の個数を長さという。

(例)  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 4 & 5 & 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} = (1 \ 4 \ 3) \quad 1 \rightarrow 4, 4 \rightarrow 3, 3 \rightarrow 1$  となっている。

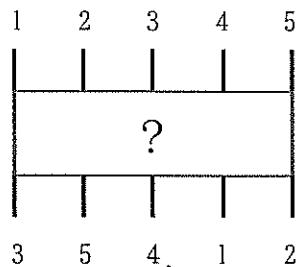


**定義** 長さ 2 の巡回置換を互換(transposition)という.

**定義** 互換の中でも特に, 隣り合った数字からなる互換( $i, i+1$ )のことを基本互換(elementary transposition)という.

**定義** 2つの置換を行うことを積という. 一般に, この積は順序によって結果が異なるものとなる.

(1)の置換は, 1 番目を 4 番目に, 2 番目を 5 番目に, とそれぞれ入れ替えると考えて, 次のようなあみだくじに対応させることができる.



(図 4)

横線は基本互換に対応するので, 図の空白部分(?の箱の部分)をうめるには, 与えられた置換に書き直すことができればよい.

#### 4. 置換の性質

**命題 1**(星[1]) 任意の置換は互いに共通な数字を含まない巡回置換の積に表すことができる(これをサイクル分解という).

**命題 2**(星[1]) 任意の巡回置換は互換の積で表すことができる.

**命題 3**(星[1]) 任意の互換は基本互換の積に表すことができる.

命題 1 ~ 3 より, 任意の置換は, 基本互換の積で表すことができる.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 4 & 5 & 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}$$

$$= (2\ 5) \circ (1\ 4\ 3) \quad \leftarrow \text{サイクル分解}$$

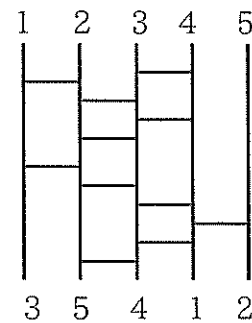
$$= (2\ 5) \circ (1\ 4) \circ (4\ 3) \quad \leftarrow \text{互換の積}$$

$$= (2\ 3) \circ (3\ 4) \circ (4\ 5) \circ (4\ 3) \circ (3\ 2)$$

$$\circ (1\ 2) \circ (2\ 3) \circ (3\ 4) \circ (3\ 2) \circ (2\ 1) \circ (4\ 3) \quad \leftarrow \text{基本互換の積}$$

以上より, 図の空白部分をうめると, (図 5) のようになる.

しかし, 同じ結果になるあみだくじは他にも存在し, 横線の本数は一通りではない.



(図 5)

**命題4**(内田, 高木, 剣持, 浦川[3]) 与えられた置換を互換の積に表す方法は一通りではないが, 互換の個数が偶数か奇数かは一通りに決まる。(偶数個となるものを偶置換, 奇数個になるものを奇置換という。)

これより横線の本数は偶数か奇数かに決まる。

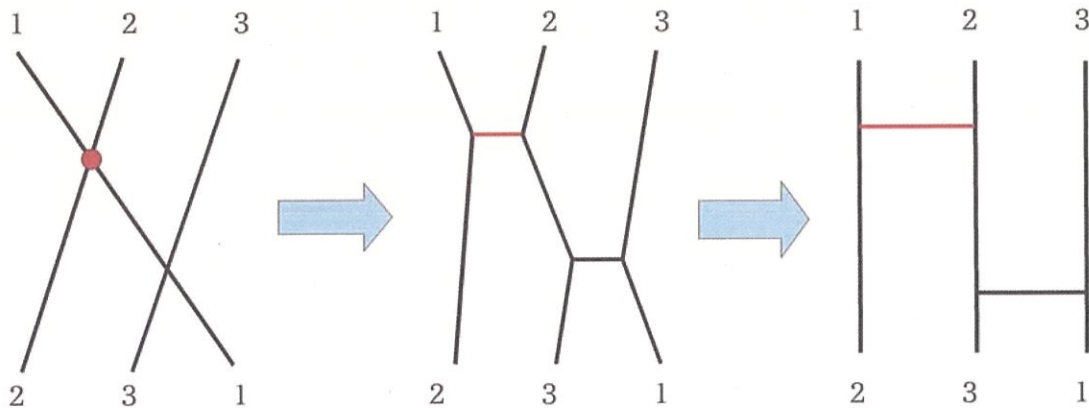
### 5. 素あみだ

素あみだとは, 横線がない時と同じ結果になるあみだくじのことである。サイクル分解の性質より, 次の結果が得られる。

**定理1**  $1, 2, 3, \dots, n$  の最小公倍数を  $L$  とすると, 縦線が  $n$  本のあみだくじは縦に  $L$  回繰り返すと素あみだになる。

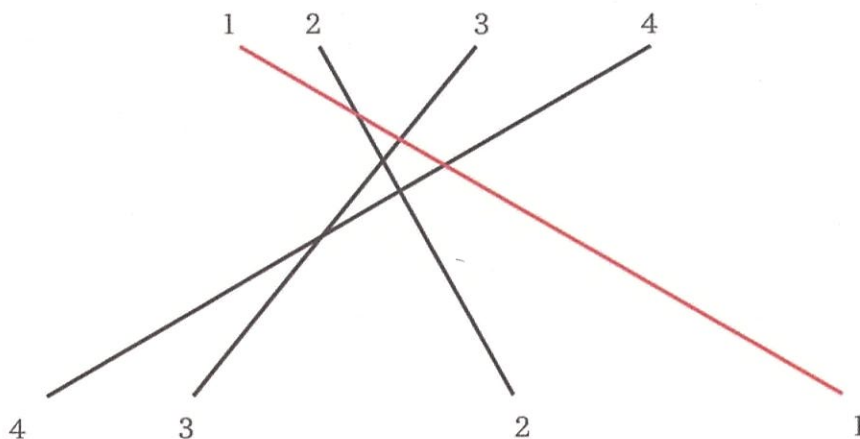
### 6. 直線からあみだくじを作る

上の数字と, 結果として得たい数字を下に並べたものを線で結び, 交点を横に引き伸ばしていくと, 任意のあみだくじを作ることができる。(図6)



(図6)

### 7. あみだくじを作るのに最低必要な横線の本数



(図7)

交点1個は、横線1本を表している。(図7)の赤線に注目すると、交点が3個できている。よって、3本の横線ができることが分かる。

直線を2本選ぶと、その交点は0個か1個である。このことから、次の結果を得る。

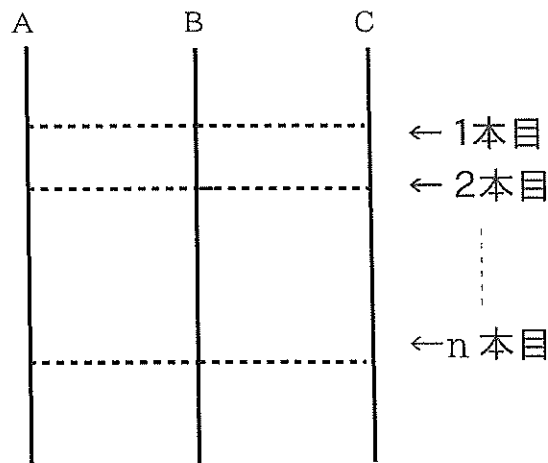
**定理2** 縦線の本数を  $n$  本とすると最低限必要な横線の本数は高々  ${}_n C_2 = \frac{n(n-1)}{2}$  本である。

### 8. あみだくじの確率

もし、今まで紹介してきたような任意のあみだくじの作り方を知らなかったとしたら、あみだくじは平等であろうか？

例えば、下の図(図8)のようにBの下に当たりがあり、点線には左右ランダムに横線をひいたとする。このときの当たりに行く確率について考える。

- ・  $\frac{1}{2}$  の確率で左右どちらかに横線を引く。
- ・ 横線を  $n$  本引いたとき、縦線A, B, C上にある確率を  $a_n, b_n, c_n$  とする。



当  
(図8)

(i) 3本のうち、真ん中からスタートする場合

$a_0=0, b_0=1, c_0=0$  とすると、以下のような漸化式が得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{n+1} = \frac{1}{2} a_n + \frac{1}{2} b_n \\ b_{n+1} = \frac{1}{2} a_n + \frac{1}{2} c_n \\ c_{n+1} = \frac{1}{2} b_n + \frac{1}{2} c_n \end{array} \right. \xrightarrow{\text{一般項}} \left\{ \begin{array}{l} a_n = \frac{1}{3} \left[ 1 - \left( \frac{-1}{2} \right)^n \right] \\ b_n = \frac{1}{3} \left[ 1 - \left( \frac{-1}{2} \right)^{n-1} \right] \\ c_n = \frac{1}{3} \left[ 1 - \left( \frac{-1}{2} \right)^n \right] \end{array} \right.$$

この数列の極限值は

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{3} \left( 1 - \left( \frac{-1}{2} \right)^n \right) = \frac{1}{3}$$

同様にして

$$\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \frac{1}{3}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} c_n = \frac{1}{3}$$

よって、 $n$  を大きくすれば、すなわち横線の本数の本数を多くすればこのあみだくじは平等である。

実際、 $n=7$  とすれば

$$a_n = 0.338768116 \approx 34\%$$

$$b_n = 0.328125 \approx 33\%$$

$$c_n = 0.338768116 \approx 34\%$$

となって、その差は非常に小さいことが分かる。

(ii) 3本のうち、端からスタートする場合

$a_0=1, b_0=0, c_0=0$  とすると、以下のような数列の一般項が得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} a_n = \frac{1}{3} - \frac{1}{3} \left( \frac{-1}{2} \right)^{n+1} + \left( \frac{1}{2} \right)^{n+1} \\ b_n = \frac{1}{3} - \frac{1}{3} \left( \frac{-1}{2} \right)^n \\ c_n = \frac{1}{3} - \frac{1}{3} \left( \frac{-1}{2} \right)^{n+1} - \left( \frac{1}{2} \right)^{n+1} \end{array} \right.$$

この数列の極限值は

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{3} - \frac{1}{3} \left( \frac{1}{2} \right)^{n+1} + \left( \frac{1}{2} \right)^{n+1} \right) = \frac{1}{3}$$

同様にして

$$\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \frac{1}{3}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} c_n = \frac{1}{3}$$

よって、この場合も平等である。

## 9. まとめ

- ・ 思い通りのあみだくじは置換を使った方法と直線から作る方法の2通りで作ることができる。
- ・  $1, 2, 3, \dots, n$  の最小公倍数を  $L$  とすると、縦線が  $n$  本のあみだくじは縦に  $L$  回繰り返すと素あみだになる。
- ・ 任意のあみだくじを作るのに最低限必要な横線の本数は縦線が  $n$  本するとき、高々  $\frac{n(n-1)}{2}$  本である。
- ・ 縦線が3本するとき、当たりがどこにあっても横線が多ければ多いほど当たる確率は等しい。

## 10. 今後の課題

- ・ 縦線が4本以上の場合の確率について考察すること。

## 参考文献

- [1] 星 明考 代数序論 (早稲田大学講義プリント), 2011.  
<http://www2.rikkyo.ac.jp/web/hoshi/2011/algintb2.pdf>, (accessed 2012-2-9)
- [2] 黒木 玄 東北大学オープンキャンパス2007数学クイズ, 2007.  
<http://www.math.tohoku.ac.jp/~kuroki/LaTeX/OpenCampus2007-Problem.pdf>, (accessed 2012-2-9)
- [3] 内田伏一, 高木齊, 剣持勝衛, 浦川肇 線形代数入門, 裳華房, p.119-126, 1988.

# ヘリコプターの製作を通して飛ぶ原理を知る

藤井佑弥・加藤匠悟・豊間根諒

宮城県仙台第三高等学校

## 要約

ヘリコプターが飛ぶ基本的な原理を知るために、ラジコンヘリコプターを観察することにした。またその過程で疑問に思ったところを調べた。さらに実際にラジコンヘリコプターを作ることでより理解を深めることにした。ラジコンヘリコプターの観察から、ヘリコプターは思っていたよりも複雑であり、またラジコンヘリコプターと本物のヘリコプターには違いがあることがわかった。ヘリコプターが飛ぶ基本的な原理を知ることは出来たが、製作までには至らなかった。

## 初めに

私たちはときどき飛んでいるヘリコプターを見かけるが、何故ヘリコプターがプロペラを回転させるだけで飛ぶことが出来るのか疑問に思った。そこで、私たちはラジコンのヘリコプターの観察を通して、ヘリコプターが飛ぶ原理を理解した上で、実際にラジコンのヘリコプターを製作することにした。調べるにあたり、観察により疑問に思ったことを調べることにした。

## 材料

ラジコンヘリコプター(シングルローター式・ツインローター式 各一台ずつ)

バルサ材 (厚さ:2mm, 3mm)

モーター

## 方法

### 観察

1. 市販のラジコンヘリコプターを観察し、その形状から飛ぶ原理について推測する
2. 教室などの広い場所で実際にラジコンを操縦してみる

## ラジコンヘリコプターの製作

「機体が回転せず安定して飛ぶヘリコプターを作る」ことを目標として製作に取り組んだ。

今回はラジコンヘリコプターの構造に多いツインローター式のラジコンヘリコプターを作ることにした。また、軸1つで2つのプロペラを回転させるのは大変なので、軍用ヘリコプターで見られる軸が2つのものを作ることにした。プロペラや機体は当初プラスチックで作る予定だったが、軽くて丈夫なバルサ材で作ることにした。



図1

## 結果

### 観察

ヘリコプターには基本的にプロペラが2枚以上ついている。もしプロペラが1枚だと「作用・反作用の法則」によって機体も回転してしまうためである。

ヘリコプターには大まかに分けて2種類に分けられることが分かった。

### シングルローター式とツインローター式の違い

	シングルローター式…図2	ツインローター式…図3
メインローターの数	1枚*	2枚
テールローターの役割	機体の回転を防ぐ	前進に使う**
方向転換の仕方	テールローターの回転数を変えることで方向転換	各メインローターの回転数を変えることで方向転換
前進の仕方	メインローターを前に傾ける	テールローターを回転させる***

\*…図2についている上部のプロペラのようなものはスタビライザーと言うもの

\*\*…ない場合もある

\*\*\*…メインローターを傾けるものもある



図2

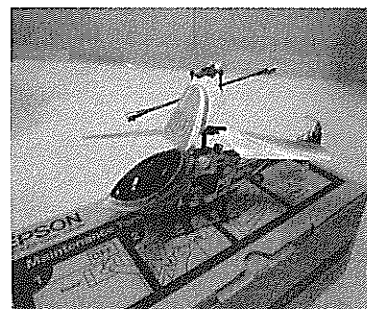


図3

ラジコンヘリコプターのプロペラは軽いため重くするためにスタビライザーという重りがついている。これは遠心力を発生させることで機体のバランスを調整するためである。これはジャイロ効果と呼ばれ、それによって飛んだときに機体を安定させる。本物のヘリコプターはプロペラが十分重いためスタビライザーはついていない。

### ・ジャイロ効果

物体が自転運動をすると自転が高速なほど姿勢を乱されにくくなる現象

### ・ジャイロの性質

1. 円盤が高速で回転運動を行っているあいだは、外部から力が加わらないかぎり回転軸の向きが常に一定不変に保たれる。
2. 回転軸にいったん外力が加わり、傾いたとしても、それ以上倒れないようになる。

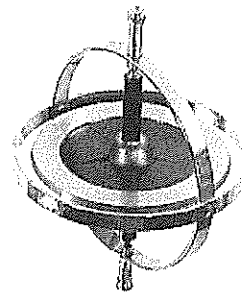


図4

ヘリコプターはプロペラを回転させることで揚力を発生させて飛ぶ。揚力は「ベルヌーイの定理」や下向きの風による下向きにはたらく力によって発生する。

### ベルヌーイの定理

流体はその流れの各点において、基準面からの高さによる位置エネルギー、速度による運動エネルギー、圧力エネルギーを持っている。

これらのエネルギーは流れの状態によって相互に変化をしながら、総量は保存される。

$$v^2/2g+z+p/\rho g=D$$

v: 流線にそった流速

g: 重力加速度

z: 高さ

p: 圧力

$\rho$ : 密度



D:定数

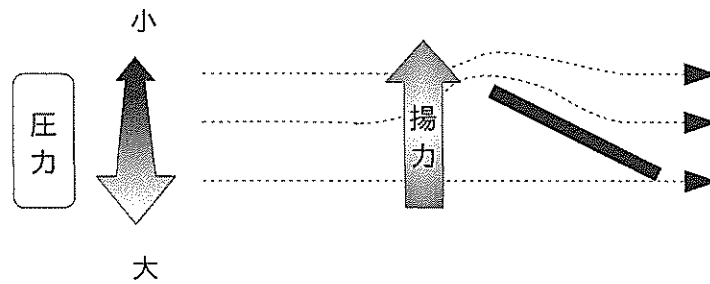


図5

風は図5のように進むため、プロペラによって上へカーブした風はそれだけ進む距離が伸びる。また風は同じ時間進むため結果、上の方の風は速く進む。このようにしてプロペラの上側は圧力が小さくなり下側は圧力が大きくなるため、上向きに力が発生する。

また、空気分子が、プロペラと衝突し下へ動かされることによって力が発生し、その反作用により上向きに力が発生する。

これらが揚力の原理である。

## ラジコンヘリコプター製作

私達はプロペラにスタビライザーをつける代わりに、プロペラの端に重りをつけることでジャイロ効果を生み出すことにした。ラジコンヘリコプターの材料、構造などは大まかに決まったが、製作までには至らなかった。

## 反省・考察

ヘリコプターについて大まかなことは分かったが、ヘリコプターの観察や調べ学習に時間をかけすぎてしまったため、重要な実験に踏み出すことができなかった。

## ・参考文献

飛行の原理

<http://www.ops.dti.ne.jp/~gotha/Aircraft/study1.html>

ベルヌーイの定理1

<http://www.gijyutu.com/kyouzai/kikai/beru1.htm>

世代を超えて伝えられる科学玩具「地球ゴマ」

[http://www.aibsc.jp/nsj/02syoun/110801\\_01/print.shtml](http://www.aibsc.jp/nsj/02syoun/110801_01/print.shtml)

## ・補足

- ・ヘリコプターには様々な種類があるが、私たちは一般的に知られているシングルローター式とツインローター式の2種類について調べた。
- ・ツインローター式のヘリコプターは軸が1つのものと2つのものの両方を指す。

# 水平尾翼容積で飛行時間は変わるのか

伊藤裕輔・三浦裕悟・渡辺卓弥

仙台第三高等学校

## Abstract

飛行機の水平尾翼容積を 0.7 から 1.3 の間で 0.1 ずつ変化させて紙飛行機を作り、それらの飛行機を自作のカタパルトを用いて一定の角度で発射し飛行させ、その飛行時間を 20 回以上計測した。その結果すべての飛行機が 3.0～3.9 秒間飛行した。そのなかで水平尾翼容積が 1.2 のものがそれぞれ平均したときに最も長時間飛行していた。また、数字が大きいものほど安定して飛んでいた。

## \*水平尾翼容積とは

主翼の長さ、幅、モーメントアーム、水平尾翼面積によって決まる数値で、飛行機のピッチ方向の安定性の目安になる。

一般的に実機だと 0.5～0.7 程度、フリーフライトの模型飛行機の場合 0.7～1.5 程度である。

$$\text{式: } V_h = (S_h / S_w) \times (L_h / C_w)$$

( $V_h$ :水平尾翼容積, $S_h$ :水平尾翼の面積, $L_h$ :モーメントアーム, $S_w$ :主翼の面積, $C_w$ :平均翼弦)

## \*ピッチとは

飛行機の重心を中心に上下に運動すること。

## Introduction

私たちは普段私たちの上を飛んでいる飛行機の水平尾翼が果たす役割について疑問に思い、それを飛行時間という視点から調べるとにした。

私たちは飛行時間の最も長い、つまり最も飛行に効率のよい水平尾翼の位置を求めることができれば、無駄な力を使わずに遠くへ飛ばすことができる効率的な飛行機を製作することができると考え、実験を行った。一定の大きさ、質量、形の紙飛行機を製作しその水平尾翼の位置(水平尾翼容積)を変えて模型飛行機を飛行させ、その結果から水平尾翼容積の紙飛行機に与える影響について考察した。

## Materials and Methods

### 実験方法

水平尾翼容積が0.7から1.3の間で0.1ずつ違う紙飛行機をそれぞれ作り、それらを発射角20度の自作の発射台を用いて飛ばしその飛行時間を計測した。また、風などの気流による実験への影響を避けるために体育館で実験を行った。その際、飛行機が発射後着地する前に壁などにぶつかった場合を無効とし、それぞれ20回以上測定を行った。

### 実験機体の材料

- ・カラーケント紙#200
- ・割りばし
- ・板鉛

### 機体の製作方法

胴体: 図1の赤線のところで割り箸を切り、図2のように組み合わせて接着し、図3のように先端部に紙をはった後、図4の赤線で切り図5のように加工し、図6のように図1の右側のように切った紙を後部に接着する。

主翼: 図7のようにケント紙を切り出し、図8のように貼り付ける。

尾翼: 図9のようにケント紙を切り出し、図10のように折り曲げる。

## Results

図11の様になった。

## Discussion

それぞれの飛行機の飛行時間にあまり差がなかったことから、水平尾翼容積は飛行機が水平に安定するまでの時間に関わる数値なので、飛行時間を大きく左右しないようだ。しかし、今回の実験の際に、水平尾翼容積が1.2の飛行機がやや長い飛行時間を記録したことから機体によって最適値のようなものはあるのかもしれない。

参考文献

NHK趣味悠々 大空へ!模型飛行機を飛ばそう

図1

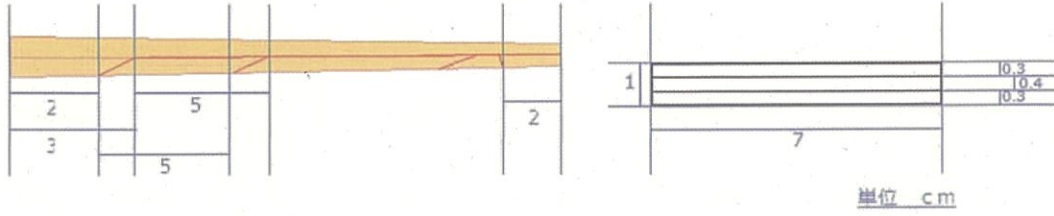


図2



図3



図4



図5



図6



図9

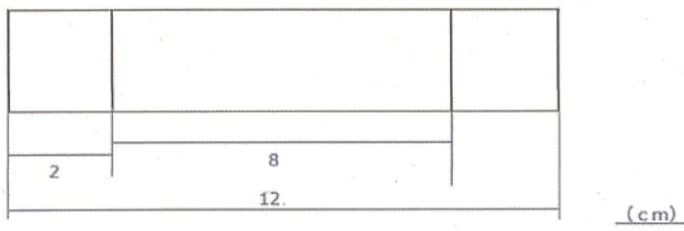


図7

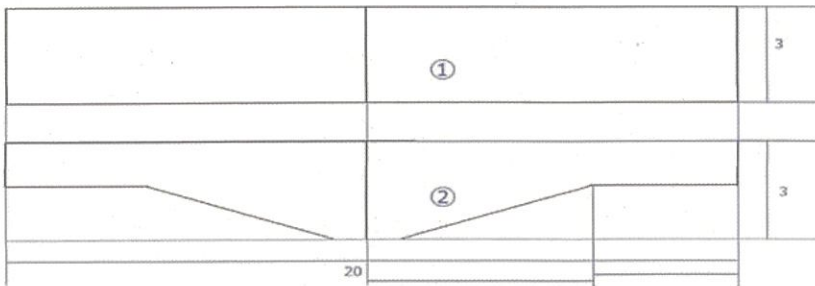


图8

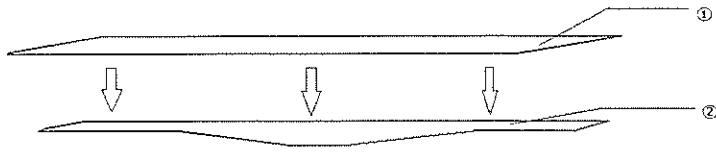


图10



图11

水平尾翼容積	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	平均
飛行時間平均值	3,17	3,26	3,29	3,22	3,44	3,87	3,43	3,38

# 平面スピーカーと指向性

今野 亘

森 琢 磨

仙台第三高等学校

## ~abstract~

私たちは平面スピーカーの指向性を調べるために、平面スピーカーと一般的なスピーカーを用意し、条件を変えて比較実験を行なった。その結果、平面スピーカーの指向性を調べるためのデータを  
得ることができた。これを元にして、平面スピーカーと一般的なスピーカーの違いを研究した。

## ~introduction~

近年、都市化に伴って、電車などの騒音が問題視されてきた。そのため、私たちは、その騒音を  
減らすために音の拡散を防ぐことはできないか、と考えた。そこで、平面スピーカーの  
“音の指向性が高い”という特性に注目し、平面スピーカーでこの問題を解決できないか、と考え、  
平面スピーカーの特徴をつかむことで、平面スピーカーの作成に近づくためにこの研究を始めた。

## ~Materials and Methods~

### ◆実験1◆

実験1では距離における音の差異を平面スピーカーと一般的なスピーカーとで測定し、比較した。

#### 《方法》

平面スピーカーからノイズを流し、そこから2 m、4 m、6 m、8 m、10 m、と2 m 間隔で距離をとり、  
それぞれの地点で“Wave spectra”を用いて音波を測定した。また、平面スピーカーと  
一般的なスピーカーを入れ替えて、同様に測定した。

\*図1を参照

#### ◆実験2◆

実験2では角度における音の差異を平面スピーカーと一般的なスピーカーとで測定し、比較した。

#### 《方法》

平面スピーカーからノイズを流し、スピーカーを中心に、0°、30°、60°、90°、と30°間隔で5 m の点を取り、それぞれの地点で“Wave spectra”を用いて音波を測定した。

また、平面スピーカーと一般的なスピーカーを入れ替えて、同様に測定した。

\*図2を参照

### ~Results~

#### ◆実験1◆

グラフ1.2 で青い丸で示したように、中音より低い位置での音の違いをわずかに見ることはできたが、空調の音が入り込んでしまったため詳しくは分からなかった。

また、視聴覚室を実験場所を選んだ、音が反射してしまったのかもしれない。

だが、平面スピーカーと一般的なスピーカーではあまり差がないということが分かった。

\*グラフ1は一般的なスピーカー、グラフ2は平面スピーカーを示している。

\*また、このグラフは、10m のときである。

#### ◆実験2◆

この実験からは、自分たちが予想していたことと違う結果がでてき、平面スピーカーの売りである音が直進方向にのみ進むということが見られず、実験の成功を確認することができなかった。

また、この実験で同様に空調の機械音と反射音が入ってしまい、

正確な値を測る事ができなかった。

このグラフからは、実験1の平面スピーカーのグラフと比べて音の変化がよく分からなかった。

\*この実験の結果はグラフ3、4から見る事ができる。(0度の時)

### ~Discussion~



今回の実験から平面スピーカ―の“指向性が非常に高い”という特徴を確認することができなかった。

これは、実験場所に音響がある視聴覚室を選んでしまったことが挙げられる。

また、時間が無くなり、多くの試行ができなかったことも考えられる。

しかし、今回の結果で、ある音域で谷ができることが分かった。

この点を今後の実験で明らかにしていきたい。

第二に、ある地点同士で平面スピーカ―と一般的なスピーカ―を比較する、という実験方法の根本に間違いがあった。近距離でそれぞれのスピーカ―の音を測定し、それを基準として、距離・角度における音を調べるという方法で測定していきたい。

### ~Objective~

・実験1、2ともに測定範囲を拡大し測定してみる。

・特定の音域にしぼっての測定

◆最終目標◆

・平面スピーカ―の作成

### ~References, or, Literature Cited~

・ネットから

夢の扉

<http://topicsnow.blog72.fc2.com/blog-entry-1104.html>

・書籍等、その他

無し

### ~Complement~

○平面スピーカ―

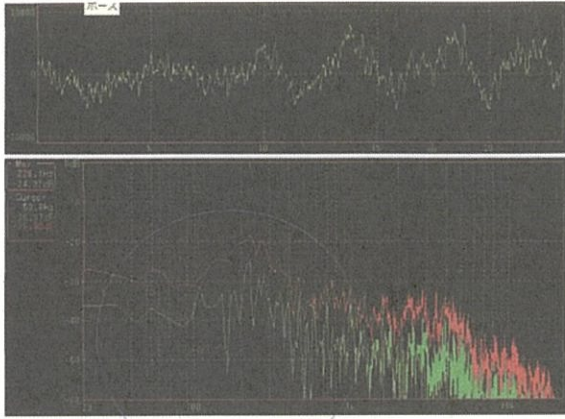
従来のスピーカ―と比べて、小型で音が直線的に進むスピーカ―。

○Wave spectra

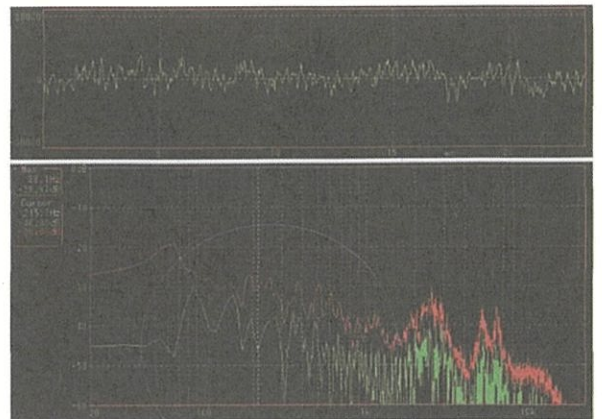
音の音波、音圧を測定することができるソフト。

グラフの左側が低音域、右側が高音域で、縦軸が音圧の大小を表す。

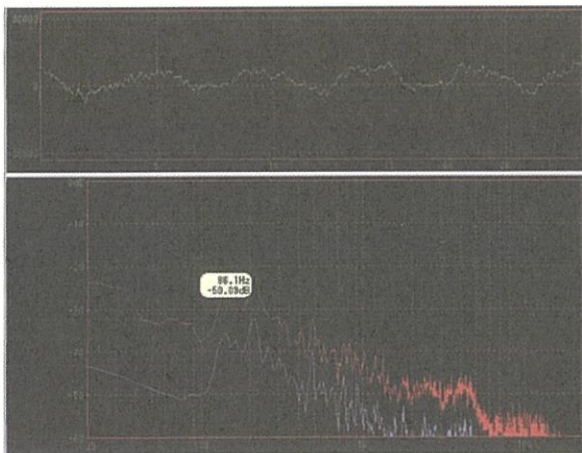
グラフ1



グラフ2



グラフ3



グラフ4

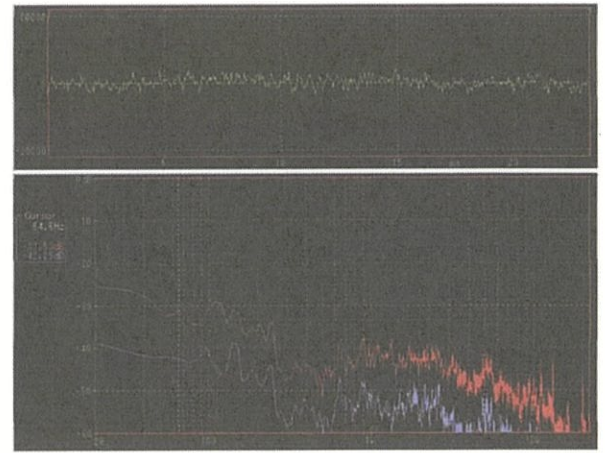


図1

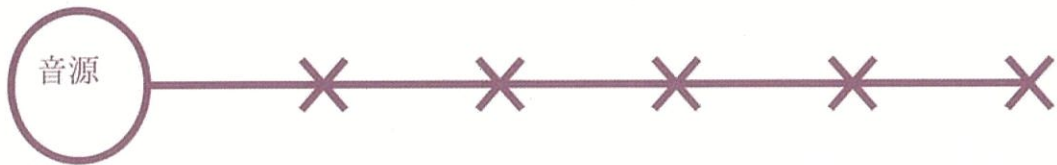
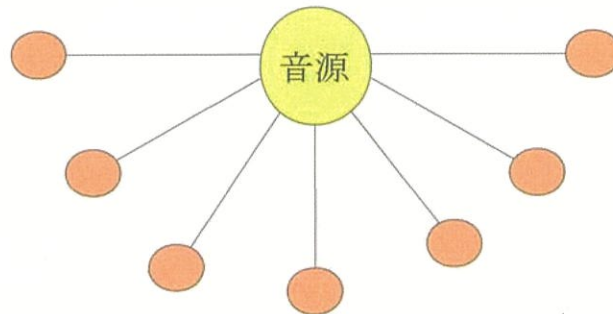


図2



# 立体音響

名前 阿部由雅・斎藤浩光・間形駿介・三浦慶介

仙台第三高校

## Abstract

立体音響について調べる。立体音響とは音を三次元的に録音したもので、立体的に聞こえる。

立体音響を構成する要素は5つあり、それをふまえ、色々な録音を試し、立体音響を作る。立体音響の要素とは音の音量差、時間差、周波数特性の変化、位相の変化、残響の変化である。それをふまえた録音方法は、2個のマイクロフォン、2チャンネルの録音再生システム、2個のスピーカーを使用して再生するステレオ方式、ダミーヘッドを使い、耳にマイクを入れて録音するバイノーラル方式などがある。

また、両耳間強度差や、頭部伝達関数についても調べ、発表時には2つのスピーカーを使い、立体音響を実際に流してみようと思う。

## Introduction

私たちは普段、普通に録音している音と映画館やホールで聞こえる音の聞こえ方の違いについて疑問に思っていた。そこで私たちは音の距離、方向が掴みやすい「立体音響」を研究することにした。

立体音響を作るに当たってその方法は三通りにわけられる、一つはバイノーラル録音、次にホロフォニクス録音、音の頭部伝達関数などを編集しての方法がある。一般にバイノーラルと呼ばれている物は、音域別にスピーカーを増やした物を除けば2チャンネルのステレオ式の再生環境に準拠した仕様となっています。これは最も一般的なステレオの仕様で、この様な最も普及した装備でも手軽に立体的な音響効果が味わえる事は、バイノーラルが現在に於ける立体音響の代名詞的に普及している事実の根拠となっていると思います。非常に古い歴史が在ります。バイノーラルの音源リソースは、録音段階で一般のステレオとははっきりと差別化された手法で録音されます。また、スピーカーでもヘッドフォンでも立体感が味わえますが、音源リソースの内容が少し異なります。立体音響の実現手法の中では最も手軽ですが、縮退と言われている、実際の音源の位置との不整合が、特に上下方向で著しく、また前方には音像定位が殆ど無いといった欠点も在ります。ホロフォニクスは、ホロフォニック、Holophonics、Holophonicなどと一般的な呼称が微妙に異なりますが、正確にはHolophinicsです。アルゼンチン人の技術者(脳神経科学者、神経生

理学者説在り)のヒューゴ・ズッカレリ(Hugo Zuccarelli)によって20年以上前に開発された技術で、再生環境はバイノーラルと同様に2チャンネルステレオですが、バイノーラルの弱点であった縮退が劇的に改善されていて、距離感や、特に上下の音像定位が非常に優れ、実際の音とまがう程です。しかし依然として前方には殆ど音像定位しません。

計算による合成といっても、2チャンネルステレオによる物と言え、実質的には頭部伝達関数(HRTF)を用いた手法に限定されると思われます。逆に2チャンネルステレオ以外となれば、手に負えない程の冒険的な試みが様々に行われていると思います。しかし私には到底扱えません。この手法は、コンピューター的能力が劇的に向上して来た事から普及し始めた技術で、基本的にはバイノーラルでの録音時に生成される効果を合成によって付け加えようという発想に基づいています。バイノーラルで扱われる立体的に認識可能な音の波形は、人間の頭部付近での歪曲によって生成されると考え、歪み方の規則性に着目して補正する手法です。そして今回は私たちはしました。

## Materials and Methods

### 材料

バイノーラルマイク・イヤホン・レコーダー・人型顔マネキン・携帯電話の音源

### 方法

- ・8つの方向から音を録音し、音を取って波の形を見る
- ・マネキンの耳にマイクを入れてバイノーラル録音をする
- ・バイノーラル録音を使用(図1 参照)

### Results

- ・マネキンのバイノーラル録音は失敗して、三次元的には聞こえなかった
- ・このように音の大きさの違いは確認できたが、そもそもこれは二次元的な録音だったので、立体音響とは関係がなかった(図2~図9 参照)

### Discussion

- ・マネキンにマイクを付けて録音した音はなぜ立体音響にならなかったのか
  - 両耳間強度差、頭部伝達関数を理解し、頭や耳の構造に気をつけてやってみる

### 反省

次からはバイノーラルの基本を確認して、しっかり取り組む。

正確に録音できたものだと思っていなかったものが失敗に終わったことは非常に残念である。まずは、録音する環境を配慮して音が周りの音と交じらないような環境で実験するべきであった。

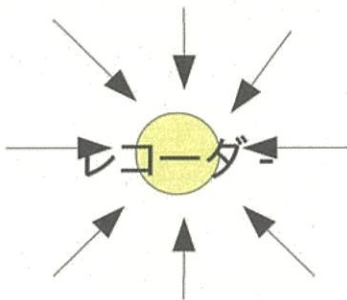
録音したものをパソコンのアプリケーションで加工し、グラフに表すということは、正しいと思って研究を進めていたがパソコンのアプリケーションで加工するということに問題点があり、波形状にしたところで何も意味がないという点に気がついた。これらのことに加え、班の研究に対する意識が非常に低く、真面目に研究に取り組まなかった私たちの意識の低さがこれまで研究が進まなかった大きな原因である。次回から深く反省をしたうえで、真剣に研究に取り組む。

参考文献

・立体音響-Wikipedia,最終更新2010年10月 10 日

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AB%8B%E4%BD%93%E9%9F%B3%E9%9F%BF>

図 1



正面

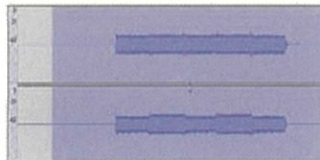


図 2

後方

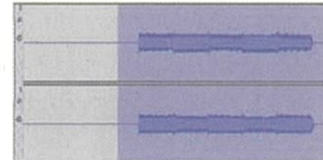


図 3

左

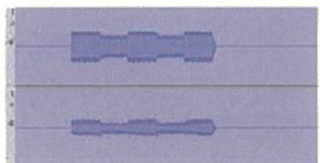


図 4

右

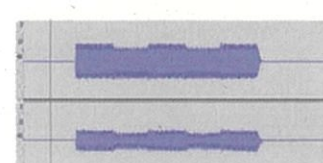


図 5

左前

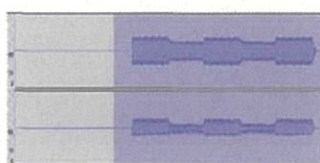


図 6

左後

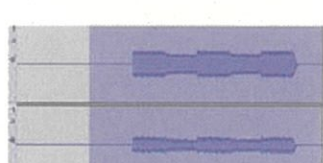


図 7

右前

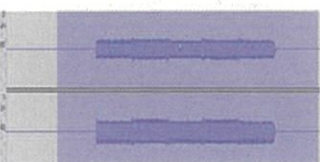


図 8

右後

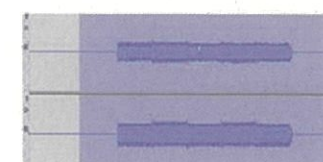


図 9

・このように音の大きさの違いは確認できたが、そもそもこれは二次元的な録音だったので、立体音響とは関係がなかった

#### Discussion

・マネキンにマイクを付けて録音した音はなぜ立体音響にならなかったのか

→両耳間強度差、頭部伝達関数を理解し、頭や耳の構造に気をつけてやってみる

#### 反省

次からはバイノーラルの基本を確認して、しっかり取り組む。

#### 参考文献

・立体音響-Wikipedia,最終更新2010年10月10日

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AB%8B%E4%BD%93%E9%9F%B3%E9%9F%BF>

## 3Dを美しく見せるために

太田 航・富樫 遥太・佐久間 航

仙台第三高等学校

### ・要約 (Abstract)

私たちは3Dについて興味を持ち、実際に3D写真を作ってみようと考えた。立体的に見える仕組みは「交差法」と「平行法」があり、私は「交差法」を用いて写真を作成した。しかし作成した写真はズレが大きすぎて、立体的に見えなかった。そこで、物体とカメラの間隔を決め、2枚の写真のズレをデジタル化し、写真を作成した。実験の結果、40cm離れた物体を立体的にするためには、0.5cmのズレが必要だと分かった。

### ・研究動機 (Introduction)

最近3Dが話題になっています。3D映画や3Dテレビ、3Dゲームな近年3Dが話題になって商品がたくさんでており2011年は3D元年ともよばれています。実際に私たちはそれらの3Dのゲームをやったり、3Dの映画をみたりして、どうして立体に見えるのか疑問に思い思ったのが1つ目の理由です。2つ目はキレイに見える3D画像を私たちが作ることで、皆さんにも作り方を理解していただき、各個人で楽しむことができ、日本を元気にできると思ったことです。以上によりこの課題に取り組むことにしました。まず3Dについて説明します。人間が風景を立体的に見る仕組みは、脳が両目で見た映像をずらして重ね、立体的に見えるように処理します。つまり人間が自然に立体認識する仕組みと、人工的に作られた3D画像を見る仕組みとは違うことが分かります。人工的に作られた3D画像を見るための方法として、「平行法」「交差法」「アナグリフ法」があります。まず交差法の説明します。2枚の画像が少しずれてあるとします。左の画像の情報が右目に入り、右の画像の情報が左目に入ります。すると、左と右の画像の情報がもとある画像の少し手前の位置で交差します。よって、この交差したところに立体的にあると脳が認識します。これらをまとめると、「右の画像を左目で見る」「左の画像を右目で見る」「左の画像が左目で見えない」「右の画像が右目で見えない」という条件がそろうことで画像が飛び出して見えます。次に「平行法」の説明します。同じように2枚の画像が少しずれてあるとします。この方法の場合は左の画像の情報が左目に入り、右の画像の情報が右目に入ります。すると、左と右の画像の情報がもとある画像の少し奥の位置で交差します。よって、この交差したところに立体的にあると脳が認識し、奥行きのある画像見えます。これらをまとめると、「右の画像を右目で見る」「左の画像を

左目で見ると「左の画像が右目で見えない」「右の画像が左目で見えない」という条件がそろって画像が飛び出して見えます,最後に「アナグリフ法」について説明します.これは,直接法とほぼ変わりませんが,二枚の画像を重ねることに違いがあります.セロファンやパソコンソフトを使って,画像を赤と青に着色して重ねて合成します.そして,その画像を赤青メガネで見ます.すると直接法と同じような原理になり,立体的に飛び出して見えます.今回私たちは昔から3D映画や3D画像に使用されていた「直接法」を使用しました.

#### ・実験方法1 (Materials and Methods)

実験は2種類行った.初めに行った実験を実験 $\alpha$ とし,2回目に行った実験を実験 $\beta$ とした.実験 $\alpha$ の手順はまず初めに2つのカメラを横に並べて固定し,物体の写真を撮る.そして撮ったそれぞれを1枚に合成する.実験 $\beta$ の手順は2つのカメラで物体の写真を撮る.撮った写真をそれぞれ赤と青に合成する.合成した写真を1枚に合成する.

#### ・結果1 (Results)

実験 $\alpha$ と実験 $\beta$ の結果は図1,図2のようになった.

実験 $\alpha$ の結果は,立体的に見えた.しかし実験 $\beta$ の結果は立体的に見えなかった.

#### ・考察1 (Discussion)

どうして実験 $\beta$ が立体的に見えなかったのか考えてみると,背景は立体的に見える,赤と青の写真のズレが実験 $\alpha$ よりも大きい,ということが分かった.なので2枚の写真のズレが立体写真を作る上で重要ではないのかと考えた.

#### ・実験方法2 (Materials and Methods)

仮説から別な実験方法を考えた.今回は被写体を模型の飛行機を使った.そしてカメラと被写体の間隔を40cmにし,その先に2つのカメラを固定した.そのカメラの間隔を初め8cmに決め,そこから少しずつ小さくしていき,1番立体的に見える間隔を見つける.

#### ・結果2 (Results)

結果は図のようになった.(図2,図3,図4,図5,図6,図7,図8,図9参照)間隔8cm~間隔4cmの写真は全く立体的に見えなかった.しかし間隔2cm~間隔1.0cmの写真は模型の飛行機は



立体的に見えなかったが、背景は立体的に見えた。そして間隔0.5cmの写真は否模型の飛行機も背景も立体的に見えた。

#### ・考察2 (Discussion)

この実験結果から、40cm離れた物体を立体的にするには2つのカメラの間隔を0.5cmにすればいいということが分かった。このことより、今回はカメラと被写体の距離は40cmに固定したが、その距離を近くしたり、遠くしたりすると2つのカメラの間隔は0.5cmから変わっていくのかと思った。

#### ・参考文献 (References, or, Literature Cited)

立体写真 STEREO. 4 Feb. 2012

[http://www.stereoeye.jp/index\\_j.html](http://www.stereoeye.jp/index_j.html) (accessed 2012-11-2)

図1 実験  $\alpha$  の結果



図2 実験  $\beta$  の結果



図3 間隔 8cm

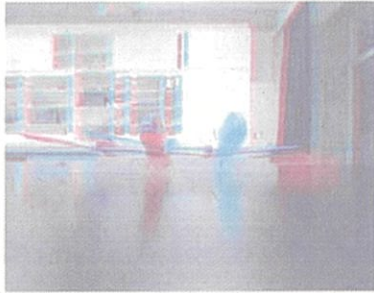


図4 間隔 6cm

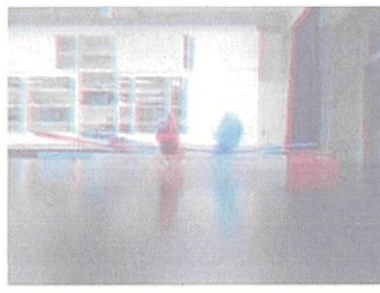


図5 間隔 4cm

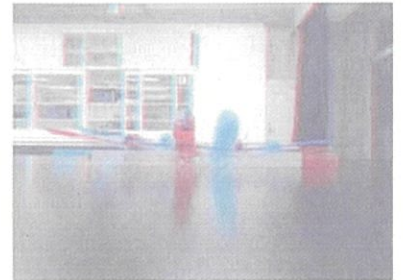


図6 間隔 2cm

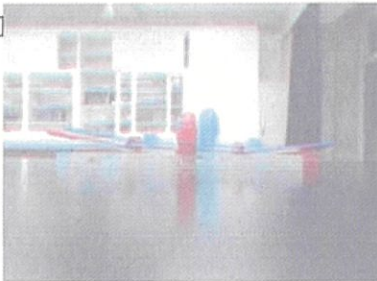


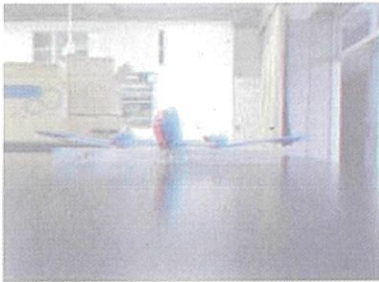
図7 間隔 1.5cm



図8 間隔



図9 間隔 0.5cm



## 受動二足歩行ロボットの歩行条件

鹿岩 潤・矢吹 拓也・佐藤 瑛・矢吹 和也

宮城県仙台第三高等学校

### -要約-

受動二足歩行ロボットの歩行条件を調べるために実際に木材を用いてロボットを作成し、緩やかな下り坂上を歩行するか実験を行った。「斜面角度」・「軸の位置」の2つの条件について各値を設定し、総当たりで歩行するか調べたところ、歩く組み合わせは見られなかった。

### -はじめに-

受動歩行とは、外部から能動的なエネルギーの入力し続けなくても、機構を工夫し、初速を与えるだけで緩やかな斜面を足を交互に振り出して下っていく歩行を指す。

よく知られている二足歩行ロボットは、電気を動力としている。受動二足歩行ロボットが歩行する条件を見つけることで、二足歩行ロボットが斜面を下る際に使用するエネルギーの削減につながり、ロボットのエネルギー効率の向上に貢献できるのではないかと考え研究を行うことにした。今回は、両足間の幅や足の大きさなどの条件の中から、実験しやすい「斜面角度」、「軸の位置」の2つの条件について実験を行った。

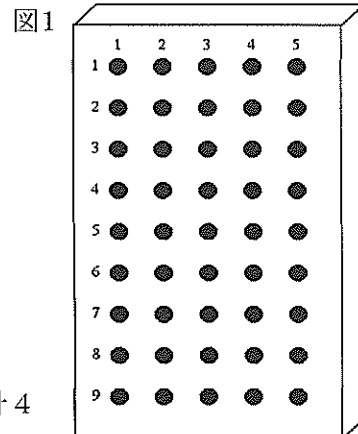
### -材料と方法 1-

#### 【1】材料

- ・ステンレス丸棒(直径2mm×長1000mm)
- ・中密度繊維板
- ・ラワン合板
- ・座金(直径10mm×厚1mm)

#### 【2】実験方法

- ・中密度繊維板を縦100mm, 横60mmに切り図1のように計45個の穴を空け, 穴にステンレス丸棒を通すことで軸の位置を変える。



- (1) 傾斜角度を $10^{\circ}$  ~  $30^{\circ}$  の間で $5^{\circ}$  毎に設定する。
- (2) 軸の位置の条件と斜面角度の条件を総当たりで、各条件を10回ずつ行う。
- (3) 分銅と針金で重りを作成し、軸の端5mmの所に重りを掛けて、手を離すことで軸に入力する。  
・入力後、停止せず、足を交互に振り出して斜面下端(約700mm)まで達したものを「歩いた」とする。

- ・今回は、両足間を 100mm、足の重さを一定にして実験した。
- ・ただし、軸の歪みは考えない。

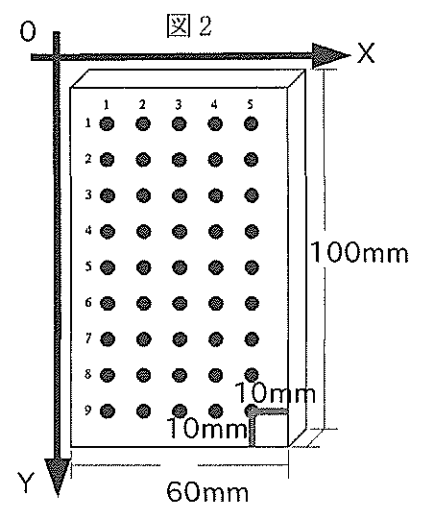
-結果 1-

回数	斜面角度	10°		15°		20°		25°		30°	
	軸の位置										
0050	(1, 1)	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×
0100	(2, 1)	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×
0150	(3, 1)	3/10	△	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×
×～×											
0400	(3, 2)	1/10	△	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×
×～×											
0650	(3, 3)	0/10	△	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×
×～×											
0900	(3, 4)	0/10	△	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×
×～×											
2250	(5, 9)	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×

- ・ □/10…10 回中□回歩いた
- ・ ○…歩く条件 (6～10/10)
- ・ △…×中で可能性有り (数歩歩いた場合)
- ・ ×…歩かない (0～5/10)
- ・ 歩く条件は見つからなかった。
- ・ 斜面角度が 20° 以上になると歩行する可能性のある条件は見られない。
- ・ 軸は中央の列で比較的安定。
- ・ 軸は半分より下で歩行する可能性のある条件は見られなかった。
- ・ 斜面角度が 10° ～15° の間に歩く可能性有のものが集中。

-材料と方法 2-

- (1) 実験 1 と同じ足を使用する。
- (2) 斜面角度を 5° ～15° の間で 1° 毎に設定する。
- (3) 軸(ステンレス丸棒)の位置を図 2 の 45 箇所に変更する。
- (4) 以上以外、-材料と方法 1-と変更することなく総当たりで行った。



-結果 2-

回数	斜面角度	10°		11°		12°		13°		14°		15°	
	軸の位置												
0050	(1, 1)	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×
0100	(2, 1)	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×
0150	(3, 1)	3/10	△	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×
×～×													
0400	(3, 2)	1/10	△	0/10	△	0/10	△	0/10	×	0/10	×	0/10	×
×～×													
0650	(3, 3)	0/10	△	0/10	△	0/10	×	0/10	△	0/10	△	0/10	×
×～×													
0900	(3, 4)	0/10	△	0/10	△	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	△
×～×													
2250	(5, 9)	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×

回数	斜面角度	5°		6°		7°		8°		9°	
	軸の位置										
0050	(1, 1)	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×
0100	(2, 1)	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×
0150	(3, 1)	0/10	×	0/10	△	0/10	△	0/10	△	0/10	△
0200	(4, 1)	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×
×～×											
0400	(3, 2)	0/10	×	0/10	×	0/10	△	0/10	△	0/10	△
×～×											
0650	(3, 3)	0/10	×	0/10	△	0/10	×	0/10	△	0/10	△
×～×											
0900	(3, 4)	0/10	×	0/10	△	0/10	×	0/10	×	0/10	×
×～×											
2250	(5, 9)	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×	0/10	×

- ・ □/10…10 回中□回歩いた
- ・ △…× 中で可能性有り (数歩歩いた場合)
- ・ 歩く条件は見つからなかった.
- ・ 軸は中央の列で比較的安定.
- ・ ○…歩く条件 (6～10/10)
- ・ ×…歩かない (0～5/10)

- ・ 軸は半分より下で歩行する可能性のある条件は見られなかった。
- ・ 斜面角度が  $10^\circ$  で歩く可能性があるものが最も多く、 $\pm 5^\circ$  にかけて少なくなる。

-考察-

「軸の位置」と「斜面角度」の組み合わせだけでは、歩行する条件を作り出すことは難しい。  
今回の場合、 $10^\circ$  以下では傾斜が緩く、あまり進まなかったため「軸への入力」を強く、 $10^\circ$  以上では倒れるものが多かったため「両足間の幅」を広ろげるなどの条件を加えれば見つかるかもしれない。

-今後の課題-

- ・ 正確なロボットの作成
- ・ 入力の正確化・一定化
- ・ 条件の追加(入力の大きさ・両足間の幅・足の重さ=大きさ・足の素材 など)

-参考文献-

森山 和道.” 受動的動歩行の謎を探る”

<http://robot.watch.impress.co.jp/cda/news/2006/05/31/14.html>. June. 2008

(accessed 20110822)

# ボールの運動と飛距離

板垣充彦・菊谷恭平・菅野雅文・松島渉・三上慎吾

宮城県仙台第三高等学校

## Abstract

メンバーの部活柄, 野球ボールの運動について調べて理解することでプレーに生かそうということになり, ボールを打ち出す角度や回転が違くとボールの飛距離にどのような影響があるのか調べるために, バッティングマシンを用いて角度を 35 度, 40 度, 45 度, 50 度と変えてボールを打ち出し飛距離を測定した. バックスピンがある場合と無回転の場合の 2 通り調べたところ, 予想通りどちらの場合も 40 度の時が最も飛距離が長くなった.

## Introduction

私たちは皆運動部に所属している. 野球やサッカーやラグビーなど, それぞれ違ったボールを使っている. それらは形や重さに違いがあり, さまざまな運動(動き)が見られる. しかし私たちが毎日行っている部活の中でも, 理屈を理解していない現象がたくさんある. そこで私たちはボールの運動について研究し理解することによって, プレーや技術の向上につながるのではないかと考えた. 今回は機材がそろっていて実験しやすいし扱いやすいなどの理由から, 野球ボールを使って実験をすることにした.

野球でおこるボールの運動にはさまざまなものがある. ピッチャーが投げたボールは, 曲がったり落ちたり伸びたりといろんな変化を見せる. またバッターが打ち返したボールも, 跳ねたり伸びたり曲がったりする. そして私たちは, そういう運動に関係していて, 実際にバッティングや送球に結びつくと思われるボールの飛び方や飛距離に着目した. ボールの運動にはさまざまな要因が考えられる. その中でも特に大きな影響を与えると考えられるボールの回転と空気抵抗について調べることにした. また, 今回の実験では使用できる機材の関係上ボールの回転はバックスピンについてのみにした.

## Materials

- ・ バッティングマシン (回転数と角度を調整できるもの)
- ・ メジャー, 硬式ボール (いつも野球部が使用しているもの)

## Methods

バッティングマシン角度を変えながらボールを打ち出しその飛距離を測定する。

ここで実験を二つ行ったのはボールに回転がかかっている場合とかかっていない場合の飛距離を比較した場合どのような違いが表れるのか調べるためと、二つの実験どちらでも最も飛ぶ角度が同じとは限らないからである。

打ち出した角度と飛距離

	回転数	回数	角度
実験 1	一定	20 回	35度, 40度, 45度, 50 度
実験 2	なし	20 回	35度, 40度, 45度, 50 度

### <結果予想>

実験 1 では、空気抵抗を受ける時間が少ない方がよく飛ぶと考えたので、計算による証明から求められた空気抵抗を無視したときに 45 度が一番飛ぶというのも含めて考えると、現実では 45 度よりもすこし小さな角度の方が飛び、35 度では角度が小さすぎて滞空時間が短くなってしまいすぎると考えて、40 度が一番妥当なのではないかと考えた。また実験 2 も実験 1 と同様に考えて 40 度が一番飛ぶのではないかと予想した。

## Results

20 回分の計測結果から平均値を出して見ると下の表の値になり、予想通り 40 度の時が最もよく飛ぶ結果となった。



## 打ち出した角度と飛距離

	35度	40度	45度	50度
実験1 (距離)	44.10m	45.07m	44.60m	42.51m
実験2 (距離)	38.73m	41.59m	39.23m	39.42m

## Discussion

### 実験1

実験1では40度でボールを打ち出した時が一番飛んだ。回転によってボールにかかる力は鉛直上向である。このことと、水平方向の速さが45度より速いことから、45度で打ち出した時より空気抵抗を受ける時間が短い40度が最も飛んだのではないかと考察した。

### 実験2

実験2ではボールにかかる力は空気抵抗のみである。

35度で打ち出した時は確かに水平方向の速さが早く、空気抵抗を受ける時間が少ないがあまりに地面に着くまでの時間が早すぎるため、あまり飛ばない。また実験1でも話した通り、45度より40度のほうが水平方向の速さが早いことから40度のほうがよく飛ぶ、と考察した。

### 双方の実験

この実験では同じ角度でボールを打ち出した場合ボールに回転がかかっている方がよく飛んだ。このことから、ボールにバックスピがかかっている場合、ボールの飛距離は無回転のボールに比べて長くなると考察した。

実験1でも実験2でも、35度、40度、45度、50度、の中では40度が最もよく飛んだ。また、どちらの実験結果でも35度より45度の方がよく飛んでいるので、実際にボールを飛ばした時に最もよく飛ぶ角度は40度から45度の間にあると考察した。その理由として先ほど繰り返し述べたこ

とが考えられる。

また、空気抵抗を考慮して 35 度から 50 度までの角度別に飛距離を数値解析したところ、44 度が一番よく飛ぶという結論が得られてしまった。そして、40 度より 45 度の方がよく飛んでいた。この計算結果は実験結果に反している。今回の場合、空気抵抗は  $kv$  とおいて計算した。k は比例定数で、野球ボールの場合 0.008 で、 $v$  はボールの速度である。しかし、ボールの速度によっては空気抵抗は  $kv^2$  となりうる。空気抵抗をその値で計算すれば違う結果になっていたかもしれない。今回はその計算をすることができなかったが、今後行っていきたい。

#### Acknowledgment

今回私たちは実験を行うにあたり宮城県工業高等学校の方々にバッティングマシン、測定するスペースをお借りしました。本当にありがとうございました。

#### References, or, Literature Cited

ロバート・アデア著

ベースボールの物理学

## ワイヤレス送電技術を用いて遠距離送電をする

小野寺勇稀 川森弘晶 太田俊樹 志摩拓哉 高橋央 西村駿

仙台第三高校

### 要約

現在開発が進んでいる科学技術であるワイヤレス送電技術に関する研究を行った。2種類の、電磁誘導方式と磁気共鳴方式という面から送電効率について実験し、電磁誘導方式は受電側で電圧を測定することができたが、磁気共鳴方式は周波数を合わせることができず、送電できなかった。

### 序論

現代の私たちの生活に電気は必用不可欠なものである。暖房や携帯電話、自動車など、あらゆる分野で使われている。しかし、それらは機器本体とコンセントをケーブルでつながなければ使用できない。つまり、電気を使うには機器に応じた専用のケーブルが必要になるということである。携帯電話などのバッテリーを使っている物も、充電する際にはケーブルは必要となるので同じことが言える。このデメリットを解消するために現在開発が進んでいるのが非接触送電すなわち「ワイヤレス送電」である。これは使用する電子機器と送電する機器が金属接点をもたず、コードを必要としない。しかも、複数の機器を同時に使用できる。ただし、距離が開くと効率が低下する、電力を余計に消費してしまうなどの問題点もある。私たちはこの技術の最大の利点である、遠距離で送電できるという点に注目し、その方法や効率を調べるために、2種類の送電方式で実験した。この中で現在実用化が進んでいるのは「電磁誘導方式」と「磁気共鳴方式」である。私たちはこの2種類の送電方法について研究することにした。2種類の送電方法については以下のとおりである。

#### 「電磁誘導方式」

2つの隣接するコイルの片方に電流を流すと発生する磁束を媒介して隣接したもう片方に起電力が発生する電磁誘導を利用する方式。短距離では高い効率であるが、距離が開くと効率は極端に低下してしまう。

#### 「磁気共鳴方式」

送電側のコイルに電流を流すことにより磁場の振動を発生させ、同じ周波数で共振する受電側の共振回路に送電する方式。原理としては遠く離れた音叉が同じ共振周波数によって共鳴するのと同じ。長距離でも送電の効率が落ちにくいのが、共振するものには送電できない。通常は数 MHz 程度の高周波電源を用いるが、今回は通常の50 Hzの電源装置を用いて、できないかを調べた。

## 実験

### 実験1 <電磁誘導方式>

～実験方法～

1. コイル(図1)を2つ製作する.
2. 送電側のコイルは電源装置と抵抗器( $10\Omega$ )に, 受電側のコイルは抵抗器のみにそれぞれ繋ぐ(図2参照).
3. 電源装置の電圧を変えながら, テスターで回路に流れる電圧を計測する.

### 実験2 <磁気共鳴方式>

～実験方法～

1. コイル(内径28 cm, 外径33 cm, 高さ 2.5cm を15回巻いたもの)2つ製作する.
2. 送電側のコイルは電源装置(50 Hz)と抵抗器( $10\Omega$ )に, 受電側のコイルは抵抗器のみに, それぞれ繋ぐ(図3参照).
3. 2つのコイルの距離を変えながら, テスターで2つの回路に流れる電圧を計測する.

## 結果

### 結果1 <電磁誘導方式>

結果は表の通りである(表1参照). ほぼ100%の効率で送電することができた. しかし, 数 cm コイルをはなしただけで送電できなくなった.

### 結果2 <磁気共鳴方式>

結果は表の通りである(表2参照). この方法で送電させるには, 数MHz程度の高周波が適しているの  
で, 周波数の低さを補うために, 面積の大きなコイルを作製してみたが, 0.2%ほどしか送電することができ  
なかった.

## 考察

電磁誘導方式では、高い送電効率で受送電することができたが、距離を置くに連れて効率が非常にひくくなった。このため、私たちが目的としていた遠距離送電には向いていないと考えた。

私たちが磁気共鳴方式の実験をするにあたって、三高が所有する機械だけでは、実験のために必要なだけの周波数を持つ電気を発生させることが出来ず、送電効率は非常に低かった。磁気共鳴方式を成功させるには数 MHz という周波数が必要であるため普通の電源装置では難しいと思われる。

## 今後の課題

低周波数でも可能な磁気共鳴方式がないか考えていきたい。

## 謝辞

研究に助言をしてくださった、東北大学の安藤先生、松木先生、佐藤先生、太田先生、ご協力ありがとうございました。

## 参考文献

「暮らしを支える新しい送電技術-磁気共鳴伝送の仕組み-」

<http://www.tdk.co.jp/techmag/knowledge/200912u/index.htm>

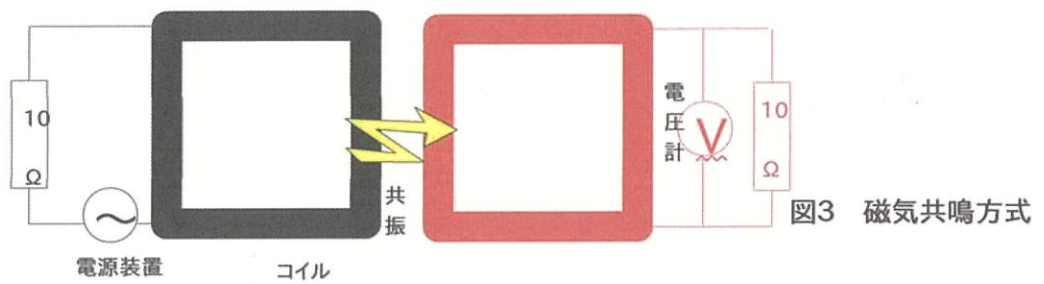
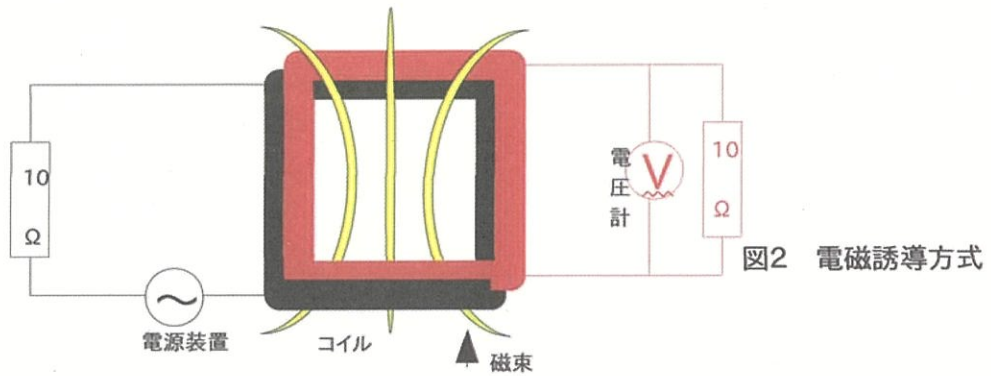


表1(電磁誘導方式)

電源装置の電圧	受電側での電圧
5.0V	4.35V
10V	9.50V
15V	14.9V
20V	20.0V

表2(磁気共鳴方式)

電源装置の電圧	受電側での電圧あ
5V	0,011V
10V	0,024V
15V	0,037V
20V	0,047V
25V	0,065V



図1 電磁誘導方式

# エレキギターの音の仕組み

阿部 雅樹 八木沼 耕太

宮城県仙台第三高等学校

## 要約

われわれはエレキギターの「音作り」の参考とするために、エレキギターの音を直接読み取る「ピックアップ」という部分に着眼し、その仕組みを調べることで、エレキギターの音の仕組みを解明しようとした。そのため、自分たちで簡易ギターとピックアップを作成し、ピックアップによる音量の違いを知るために比較実験を行った。その結果、ピックアップの巻数が増えるにつれ、ギターの音量が大きくなることが判明した。

## はじめに

この研究の目的は、エレキギターの音の仕組みの解明することである。また、研究の動機は趣味で弾いているエレキギターの、アコースティックギターとは違う、複雑な音の仕組みが気になったということであり、エレキギターの演奏の際にとっても重要となる、ギターやアンプの設定を変えたり、エフェクターなど用いて、ギターの音を自分の思う音やきれいな音に近づける「音作り」の参考とするということである。

アコースティックギターとエレキギターの音の仕組みの違いとして、アコースティックギターは、ボディーに組み込まれた「サウンドホール」と呼ばれている穴によってボディー内で共鳴した音を外に出している。また、外から電気は一切供給されておらず、弦を弾いたそのままの音を出している。一方、エレキギターは弦を弾いて出た音を、シールドを通して音を増幅させるアンプへと伝えて音を出している。アンプは外から電気供給しているが、エレキギター自体は電気を外から供給しない。また、エフェクターなどを用いて音を変化させたりできる。そこで、電気を外から供給していないエレキギターが、どうやってアンプに音を伝えているのか、という問題がでてきた。調べてみると、「ピックアップ」と呼ばれる部品の電磁誘導を利用して音を伝えていることが分かった。ピックアップとは、弦の振動を電気信号として検出する装置であり、磁石と鉄心とコイル

によってできている。ピックアップは直接音を読み取る部分であることから、ギターに大きな影響を与えると考えられる。また、様々な種類があり、取り替えが可能なものなので簡単に音の比較が考えられると思い、このピックアップと呼ばれる部品を用いて音の比較実験を行うことにした。

## 材料と方法

われわれは、ピックアップの抵抗値の違いによるギターの音量の違いを調べることにした。音量は電圧によって変化することから、テスターを用いて電圧を測ることにした。しかし既存のギターを使うと、他のパーツの干渉等が考えられたので、簡易ギターを作成した。また、ピックアップのコイルの巻き数として、100巻、300巻、500巻の3つ作った。

材料として、簡易ギターのネックに75mm×910mm×21mmの角材用い、52mmの間隔を開けて、木ネジ、ヒートンなどで32インチのギターの弦を固定した。そして、100mm×100mm×10mmのフェライト磁石を台の上においた。ピックアップには、鉄心、0.04mmホルマル線を用いた。作成した簡易ギターを図1に、ピックアップ・コイルを図2に示した。

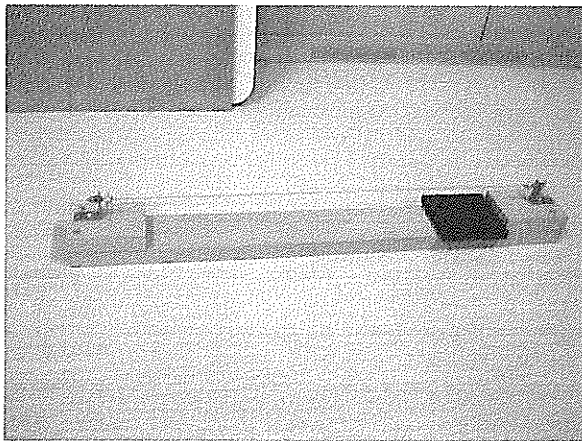


図1 簡易エレキギター

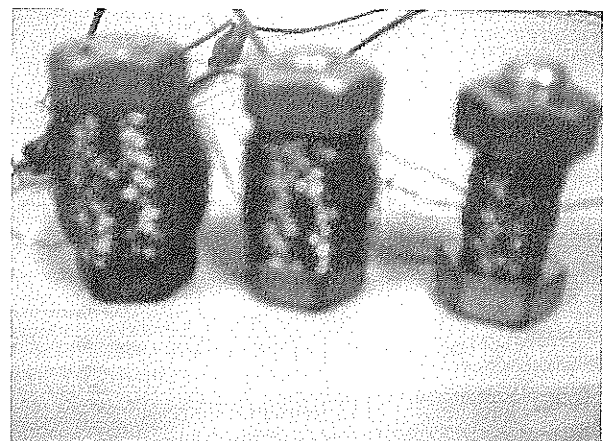


図2 自作コイル（ピックアップ）

弦を弾いたときのコイルの電圧が小さすぎ、われわれの使っているテスターでは測れなかったため、ミニアンプを用いて測定することにした。

設定が全て最大の状態に設定したミニアンプにテスターと簡易エレキギターをつなぎ、ある一定の高さから振り子のように重りを落とす方法で弦を弾いて、それぞれのピックアップの電圧を



調べた。

## 結果

表1と図3に示したように、ピックアップの巻数を大きくすると、電圧は大きくなっていった。また、ピックアップの巻数に対し、電圧は直線的に上昇するのではないかと考えたが、今回の実験ではグラフは予想していたような直線型にはならなかった。

巻数	100 巻	300 巻	500 巻
電圧	4.78V	6.87V	7.90V

表1 ピックアップの巻数と電圧

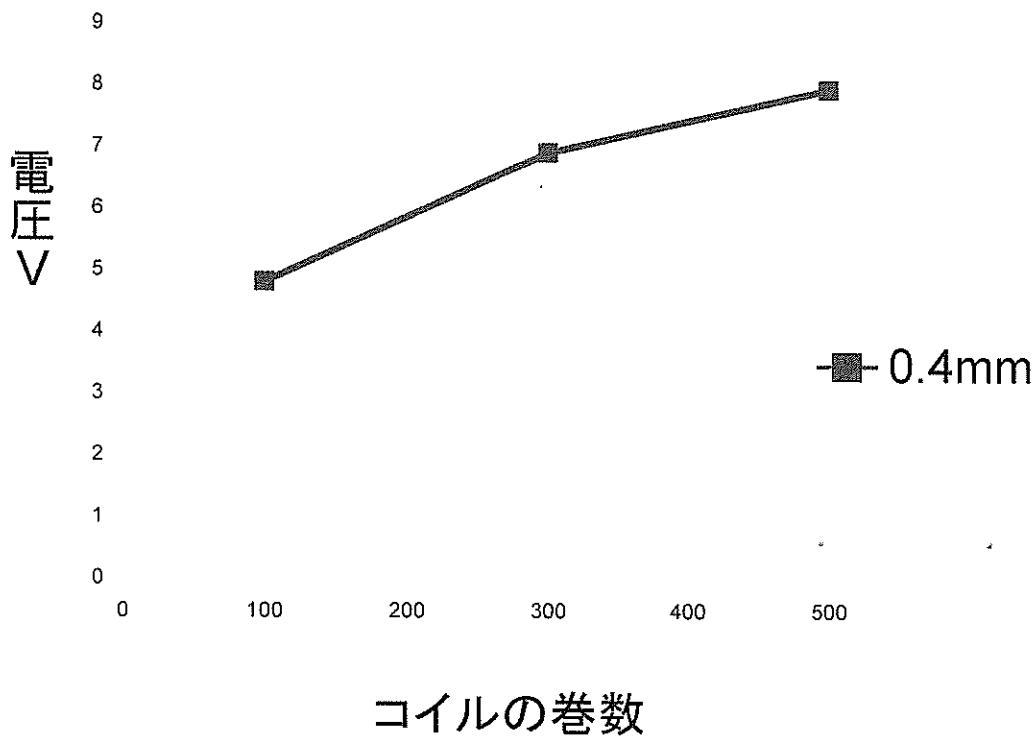


図3 ピックアップの巻数と電圧

X軸はコイルの巻数, Y軸は電圧 (V) を表す

## 考察

コイルの抵抗が増すごとに電圧は大きくなり、音量は大きくなった。グラフについて、比例的な関係があると思ったが、直線のようにはならなかった。今回の実験では誤差が大きかったため、もっと巻数を細かくして実験するべきだった。実際のギターとの比較をしたほうがよかった。

今回の実験で、グラフが直線型にならなかった理由として、使用したミニアンプの抵抗が影響していると考えられる。

次回の課題として、ピックアップと音量との間にどのような関係があるのか詳しく調べること、音質・音の波形とピックアップの関係について調べること、この2点があげられる。

また、普通のエレキギターに使用されている一般的なピックアップは、6500～8000回程度の巻数だが、この巻数が大きいほど出力が増していき、高音域が弱くなっていくと言われている。なぜ巻数が大きいと高音域が弱くなるのか、ということも考えていきたい。

今回われわれが作成したピックアップは実際のギターに比べると巻数が小さいのにも関わらず、アンプからはしっかりとした音が聞こえた。なぜピックアップは巻数の大きいものが一般的なのか、ということも調べていきたい。

## 参考文献

1. THE 中古楽器屋 (有)ミュージック・ソリューションズ  
[http://www.tcgakki.com/fair/22\\_a.html](http://www.tcgakki.com/fair/22_a.html)
2. audio-technica マイク使いこなし講座  
<http://www.audio-technica.co.jp/atj/mic/01/index.html>
3. YAMAHA 楽器解体全書エレキギター  
[http://www.yamaha.co.jp/plus/electric\\_guitar/?ln=ja&cn=11203&pg=2](http://www.yamaha.co.jp/plus/electric_guitar/?ln=ja&cn=11203&pg=2)

# 天然染料による金属イオン検出試験紙の作成

阿部正裕・倉井円香

宮城県仙台第三高等学校

## 1 要約

私たちは、玉ねぎの外皮とマリーゴールドの花を使ってろ紙を染め、金属イオン検出試験紙を作成した。この二つの試験紙は $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ を含む水溶液につけると変色する。玉ねぎの外皮の検出試験紙は $\text{Al}^{3+}$ を0.1mol/Lまで検出でき、 $\text{Pb}^{2+}$ は検出できなかったが $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ は0.001mol/Lまで検出することができた。また、マリーゴールドの花の検出試験紙は4種類すべての金属イオンを0.001mol/Lまで検出できた。そして、ふのりやきくらげなどの食品に含まれる鉄も検出することができた。

## 2 はじめに

人間の身体に影響を及ぼす可能性がある金属イオンは、世の中には多く存在する。しかし、それらの金属イオンを検出することができる方法が、私たちの身の周りにはない。そこで、私たちは簡単にそして低コストで作ることができる金属イオン検出試験紙を作りたいと考え、研究をすることにした。私たちが検出試験紙を作るのに注目したのが、草木染めである。草木染めは、植物を煮て色素を抽出し、その染色液に布を浸し染めるのだが、それだけでは色素が水に溶けやすい状態のため、色が落ちてしまう。そのため金属塩の水溶液に布をつけて、色素を水に溶けにくい状態にさせる。この工程を媒染といい、金属塩の水溶液を媒染剤という。媒染することにより、色が落ちにくくなるだけでなく、媒染剤に含まれる金属イオンによって元の染色液とは異なる発色が見られる。この現象を利用すれば、金属イオンの検出ができると考えた。

## 3 材料と方法

<染材として使用したもの>

紅茶の葉、ハーブティの葉、りんごの果皮、ブルーベリー、かぼちゃの実、かぼちゃの外皮、玉ねぎの外皮、玉ねぎの実、紫玉ねぎの外皮、紫玉ねぎの実、メロンの実、メロンの外皮、スイカの外皮、スイカの実、赤い薔薇の花、黄色の薔薇の花、葡萄の外皮、葡萄ジュース、ブロッコリー、マリーゴールドの花、パッションフルーツの果皮、オレンジジュース、ピンクグレープ

ルーツの果皮、赤ピーマン、ツツジの花、クローバーの葉、ほうれん草の葉、ハルジオンの花、桜の花、ムスカリの花、椿の花、椿の葉、すももの花

<金属イオンとして使用した薬品>

塩化鉄(Ⅲ)、酢酸銅(Ⅱ)、酢酸アルミニウム、酢酸鉛(Ⅱ)

<検出試験紙の作り方>

- (1) 沸騰させた100mLの精製水に、染材を入れ30分間煮出す
- (2) できた染色液にろ紙(縦5cm×横2cm)を30分間入れる
- (3) ろ紙を乾燥させる

ただし、検出試験紙の色が薄かった場合は(1)～(3)の工程を繰り返す。

<食品から金属イオンを検出する方法>

- (1) るつぽに食品を入れガスバーナーで加熱する
- (2) 灰になったものを精製水の入ったビーカーに入れ再び加熱する
- (3) 加熱した溶液をろ過する
- (4) ろ過した溶液に試験紙をつける

#### 4 結果・考察

##### 実験Ⅰ 検出試験紙に適した染材の検討

染材として使用した33種類のものを使って検出試験紙を作り $Fe^{3+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ の検出を行った。

表1 染材と金属イオン検出後の試験紙の色

染材 金属イオン	赤い薔薇の花	玉ねぎの外皮	ブロッコリー	マリーゴールドの花	ブルーベリーの実	かぼちゃの実	りんごの果皮	葡萄ジュース	葡萄の果皮
なし	赤	茶	薄い緑	薄い黄	赤紫	白	白	赤紫	赤紫
$Fe^{3+}$	黒	黒	変色なし	黒	青	茶	変色なし	黒	緑
$Cu^{2+}$	緑	濃茶	緑	茶	変色なし	緑	黄	青	茶
$Al^{3+}$	紫	黄	変色なし	黄	変色なし	変色なし	変色なし	変色なし	変色なし

33種類の試験紙の中で金属イオンによる変色があり、分かりやすかったものを表1に示した。

この試験紙を作る際、大変な点があった。それは試験紙を乾燥させるときに、錆びた金属類と接

触すると試験紙が変色してしまうことだ。そのため、私たちは最初金属製のピンチコックを用いて干してしまっただけで試験紙が変色してしまっただけで、そこで次からプラスチック製の洗濯ばさみを使用して干した。

この実験から、マリーゴールドの花と玉ねぎの外皮の染料が検出試験紙を作成するときに適していると分かった。(写真 [1] [2]) なぜなら、この二つの染料はろ紙を染めたときの色が濃く、目で見て分かりやすいものであったからである。そして、この二つの染料は簡単に手に入れることができるため大量に試験紙を作れる点から、この二つの染料で作成した試験紙を用いて実験を行うことにした。

## 実験Ⅱ 金属イオン検出試験紙の検出限度測定

玉ねぎの外皮とマリーゴールドの花で作成した試験紙の性能を確かめるために  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  の検出限度を調べた。

### <実験方法>

- 1 セルプレート(12穴の生化学実験用多穴プラスチックセル)の一つのセルに 0.1mol/L の金属イオン溶液を入れ、試験紙を浸す
- 2 スポイトで 0.1mol/L の溶液を 1 滴別の隣のセルに入れ、別のスポイトで精製水を 9 滴入れ 10 倍希釈溶液を作る。そこに試験紙を浸す。
- 3 試験紙が金属イオンを検出できなくなるまで希釈し、金属イオン検出を繰り返す。

このような実験を行い、表 2 の結果が得られた。試験紙を金属イオンの溶液に浸したときの色が、試験紙を精製水に浸したときと色と変わらなくなった濃度を変色なしと判断した。

表 2 玉ねぎの外皮の検出試験紙の検出限度測定

金属イオンのモル濃度	0.1mol/L	0.01mol/L	0.001mol/L	0.0001mol/L
$\text{Fe}^{3+}$	黒	黒	黒	変色なし
$\text{Cu}^{2+}$	茶	茶	茶	変色なし
$\text{Al}^{3+}$	黄	変色なし	変色なし	変色なし

表 3 マリーゴールドの花の検出試験紙の検出限度測定

金属イオンのモル濃度	0.1mol/L	0.01mol/L	0.001mol/L	0.0001mol/L
$\text{Cu}^{2+}$	オレンジ	オレンジ	黄	変色なし
$\text{Fe}^{3+}$	黒	黒	黒	変色なし
$\text{Al}^{3+}$	黄	黄	黄	変色なし

この実験では、玉ねぎの外皮の検出試験紙は  $\text{Al}^{3+}$  を  $0.1\text{mol/L}$  までしか検出できないことが分かった。しかし  $\text{Fe}^{3+}$  と  $\text{Cu}^{2+}$  は  $0.001\text{mol/L}$  まで検出することができた。(表2)また、マリーゴールドの花の検出試験紙は三つすべての金属イオンが  $0.001\text{mol/L}$  まで検出できた。(表3)そして、マリーゴールドの試験紙が金属イオン溶液の濃度によって変色が異なることから、この試験紙は検出後の変色によって金属イオンのおおよその濃度を定量できることが分かった。(写真【3】)また、金属イオンの検出限度を上げるために、試験紙を染料で何度も染めた色の濃い試験紙を使って実験してみた。しかし、試験紙自体の色が濃くなってしまい金属イオンと反応させたときの変色がはっきり見えなくなり検出限度を上げることはできなかった。

### 実験Ⅲ 食品から $\text{Fe}^{3+}$ を検出する

先の実験で、試験紙の検出限度が分かったので身近な金属イオンを検出する実験を行った。そこで食品に  $\text{Fe}^{3+}$  が含まれていると考えられるものや、食品の成分表から鉄が含まれていると確認できるものについてマリーゴールドの花の試験紙と玉ねぎの外皮の試験紙を用いて調べた。そして、表4の結果が得られた。

表4 食品等に含まれる鉄の検出

食品名	わかめ	ひじき	ふのり	きくらげ	鉄瓶で熱した水	一日分の鉄飲むヨーグルト
マリーゴールドの花	検出可	検出可	検出可	検出可	検出不可	検出不可
玉ねぎの外皮	検出可	検出可	検出可	検出可	検出不可	検出不可

ここで、どうして成分表示に鉄が含まれていると書いてある飲料から試験紙で検出できなかったのか二つの仮説を立ててみた。一つ目は試験紙の検出限度である  $0.001\text{mol/L}$  を超えていたこと。一つ目は、飲料に含まれている鉄はクエン酸鉄アンモニウムとして存在しているため鉄イオン単独ではないから試験紙では検出できなかったということである。二つ目の仮説から、酸化剤として硝酸を加えればクエン酸鉄アンモニウムから鉄イオンを取り出せるのではないかと考え実験してみたが、試験紙では検出することができなかった。このことから、一つ目の仮説が有力である。また、今回は食品等の質量測定などは行わなかったが、今後成分表などから鉄イオンの濃度が  $0.001\text{mol/L}$  より少なかったのかを検討していきたい。

### 実験Ⅳ $\text{Pb}^{2+}$ との反応

作成した試験紙は環境を調べることに使えないかと考え、環境に悪影響を及ぼす金属イオンの

一つである  $\text{Pb}^{2+}$  を検出できるか調べてみた。その結果、玉ねぎの外皮の検出試験紙ではあまり変色せず見づらかった。しかし、マリーゴールドの花の検出試験紙は変色ははっきりとしていて、 $0.001\text{mol/L}$  まで検出できた。(写真【4】)

#### 実験 V 染色液の分光光度計による吸光度測定

これまでは試験紙の変色を見てきたが、染色液そのものを検出液として使えないかと考え、玉ねぎの外皮の染色液を使って金属イオン溶液を入れたときの変化を調べ、さらにその溶液の吸光度(可視光線  $400\text{nm}\sim 500\text{nm}$  の間を  $5\text{nm}$  刻み)を計測した。吸光度は日立製分光光度計 U-1100 型により測定した。結果はグラフ【1】を参照。

原液はなだらかなのに対し、 $\text{Al}^{3+}$  を加えた溶液は  $430\text{nm}$  あたりにピークがある。 $\text{Fe}^{3+}$  を加えた溶液は、黒っぽい見た目であったが、吸光度が大きく上がり、反応が大きいことがわかる。これは、 $430\text{nm}$  あたりでわずかに変化があった。

また、今回の実験では金属イオンを入れたときに不溶のものができていたので、ろ過をして吸光度計測をした。このことから、金属イオン検出には水に溶けにくい色素が関係していることも考えられるため、不溶物を溶かして吸光度を測定することも考える必要がある。

私たちはこの5つの実験を通して、玉ねぎの外皮とマリーゴールドの花の染料で作成した試験紙で  $0.001\text{mol/L}$  までの  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  を検出することに成功した。そして食品の  $\text{Fe}^{3+}$  や、環境に悪影響のある  $\text{Pb}^{2+}$  を検出できる実用性の高い試験紙を作成した。今後は、検出限度を拡大させて、さらに微量の金属イオンも検出できる試験紙を作成したいと思う。そのために、玉ねぎの外皮に含まれるケルセチンや、マリーゴールドの花に含まれるケルセタゲチンとルテインを単離してその色素で試験紙を作ってみたい。また、マリーゴールドの花の試験紙が、 $\text{Cu}^{2+}$  のモル濃度が異なると試験紙の変色に変化するという現象から、モル濃度を定量することができる試験紙を作れるのではないかと考えている。そして、鉄飲料やその他の食品に含まれる金属イオンや、川や沼の水に含まれる金属イオンも検出できる試験紙作成を目指していきたいと思う。

## 5 参考文献

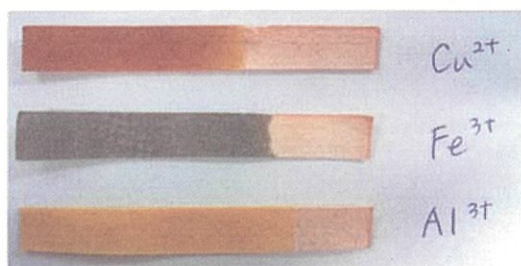
(1) 三池田修, 任田康夫

草木染めを応用して作る金属イオンの検出試験紙 化学と教育 58巻7号 P316~317

写真【1】

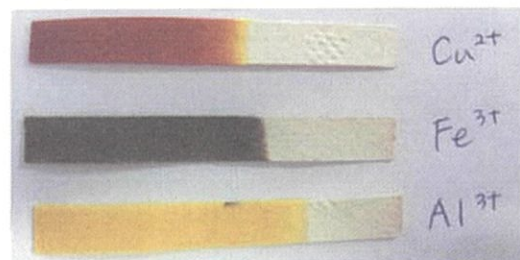
玉ねぎの外皮の検出試験紙

(右が試験紙の元の色、左が金属イオンと反応後の色)



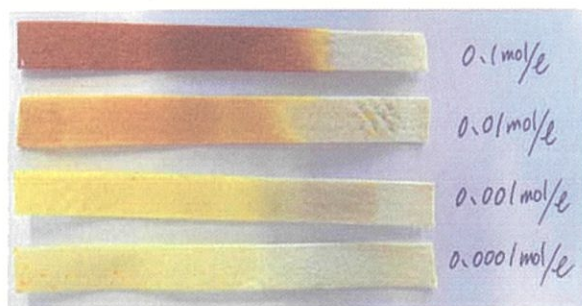
写真【2】

マリーゴールドの花の検出試験紙



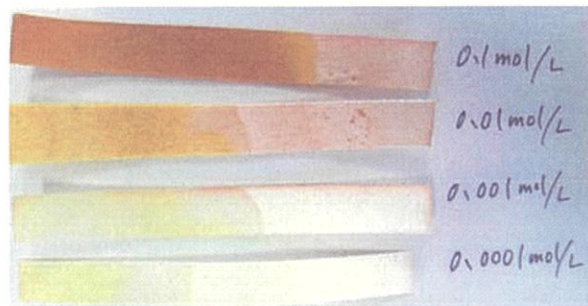
写真【3】

マリーゴールドの花の検出試験紙と $\text{Cu}^{2+}$ のモル濃度を変化させたときの反応



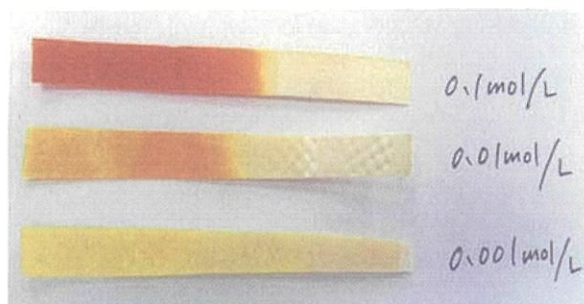
写真【4】

玉ねぎの外皮の検出試験紙が $\text{Cu}^{2+}$ のモル濃度を変化させたときの反応



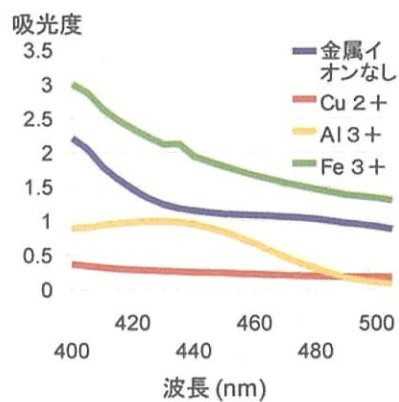
写真【5】

マリーゴールドの花の検出試験紙と $\text{Pb}^{2+}$ が反応したときの変化



グラフ【1】

分光光度計による吸光度の変化





# 色素増感型太陽電池と光の色の発電効率の違い

高橋瑛美 新堂光

仙台第三高等学校

## 1、要約

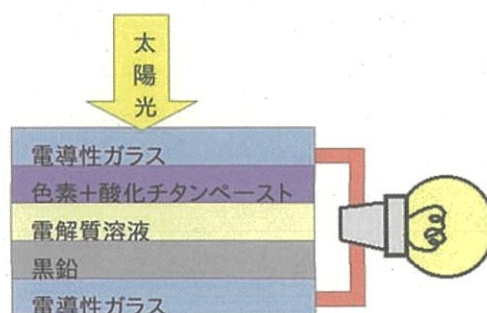
太陽電池には現在普及しているシリコン型の他に色素増感型というものがあり。色素増感型は色素を用いた電池で色・形・大きさ共に変幻自在、さらに安価な製造が可能なため普及が期待されているもののそれは実現されていない。発電効率が低いのが大きな原因といえる。よって、私たちはこの色素増感型太陽電池の発電効率の向上を計り、色素増感型太陽電池の普及を目指した。今回は当てる光の色と発電効率の関係を調べることにした。色セロハンを用いて当てる光の色を変え、各電圧を測定したところ、用いた色素と発電効率の良い光の色は補色の関係にあった。また、補色の関係にある2色の混合色素を用いた電池はすべての色の光に同様に反応する事がわかった。

## 2、はじめに

福島第一原発事故を受け、今まで以上に再生可能エネルギーへの変換が望まれています。その中で注目されているものの中に太陽電池というものがあります。太陽電池は自然エネルギーの太陽光を電気エネルギーに変換する発電方法で、有害な物質を出さない上、光が当たる場所ならどこでも設置できるので、更なる普及が期待されています。現在普及している太陽電池は黒一色のシリコン型といわれるものですが、他にも色素増感型というものがあります。色素増感型は色素を用いた太陽電池で、色も用いる色素により多彩、形・大きさも変幻自在利点が多い。しかし発電効率がシリコン型に劣る事から普及は実現していない。この色素増感型が普及すれば太陽電池の活躍の場は広がるだろう。よって、私たちはこの色素増感型の発電効率を上げようということを目的に色素増感型太陽電池の研究を始めた。

## 3、色素増感型太陽電池とは

色素増感型は一般に広まっているシリコン型とは仕組みが異なる。シリコン型は半導体と呼ばれるシリコンが太陽光により電子を送り出すが、色素増感型では色素が電子を送り出す手助けをする。層状に



なっていて、図1のように比較的簡単な構造をして

いる。この図1の色素には様々な色素を用いる事が

図1

き、電池全体の色はこの色素の色で決まる。また、この電導性ガラスの部分を電導性加工を施したプラスチック版等に置き換えることも可能である。

#### 4、予備実験

##### 【目的】

自作の色素増感型太陽電池がきちんと作動するかを確認する。

##### 【実験方法】

・色素増感型太陽電池を制作する。

1、ブドウの皮を煮出し色素を得る。

2、1枚の電導性ガラスの電導面に酸化チタンペーストを塗り、電気炉で約30分焼きつける。

3、もう一枚の電導性ガラスの電導面に4Bの鉛筆で黒鉛を塗りつける。

4、電解質溶液を作成する。

5、上記の二枚の電導性ガラスの間に電解質溶液を2mm滴下し、挟むと完成。

・実際に太陽光に当て、チェスターを用い電流、電圧を測定する。

・太陽光でなくとも発電するのか白色ライトを用いて測定する。

##### 【結果】

太陽光に当てたところ、電圧は測定できたが、電流は測定されなかった。白色ライトでも太陽光の時と同じ結果が得られた。

##### 【考察】

電圧が測定できたことから、電池は可動していることがわかった。電流が測定されなかったことに関しては、電池自体の抵抗が大きかったからと考えられる。よって、これからの実験では、電圧を測定することとする。また、白色ライトでも同じ結果が得られたことから、今後は天候に左右されない白色ライトを用いて実験を行うこととした。

## 5、実験1

### 【目的】

色素増感型太陽電池の発電効率は当たる光の色と関係があるのかを知る。

### 【実験方法及び材料】

- ・ 暗室に自作の色素増感型太陽電池と白色ライトの距離が一定となるように固定する。
- ・ 電池とライトの間に色セロハンを設置し、当てる光の色を赤、黄色、青、緑に変え、各電圧を測定する。

### 【結果】

発電効率の良かった順に並べると、セロハンなし>黄色>赤>青>緑となった。(表1)

表1

mV	セロハンなし	赤	黄色	緑	青
1回目	502	466	481	434	449
2回目	370	330	358	318	328
3回目	386	356	373	332	333
4回目	396	354	378	340	343
平均	413.5	376.5	397.5	356	363.3

### 【考察】

実験の結果より、なぜ黄色の光の発電効率が良いのかを考えると、黄色という色が用いた色素の紫色の補色であることに気がついた。補色とは色を円循環に並べた際、反対側に位置する色である。このことから発電効率の良い光の色は補色の関係にあると考えた。

## 6、実験2

### 【目的】

発電効率が良い色は本当に用いた色素の補色なのかを確かめる。

### 【実験方法及び材料】

紫色のぶどうのほとんど反対に位置するオレンジの色素で電池を作成。それを用いて実験する。

実験方法、その他の材料は実験1と同様。

### 【結果】

発電効率の良い順に並べると、セロハンなし>青>緑>黄色>赤となった。(表2)

表2

mV	セロハンなし	赤	黄	緑	青
1回目	80	74	68	104	125
2回目	88	69	66	79	110
3回目	142	54	56	140	105
4回目	150	148	129	114	116
5回目	102	113	104	90	88
6回目	102	93	106	123	120
7回目	140	122	122	135	130
平均	114.8	96.1	111.4	112.1	113.4

【考察】

オレンジの補色の青が一番良かったので、やはり用いた色素と発電効率の良い光の色は補色の関係にある。

7、実験3

【目的】

補色にあたる2色の混合色素を用いた電池は当たる光の色の変化にどう反応するのかを調べる。

【実験方法及び材料】

ほとんど補色の関係にある紫のぶどうの色素とオレンジの色素の混ぜた色素で電池を作成。それを用いて実験を行う。実験方法、その他の材料は実験1と同様。

## 【結果】

発電効率の良い光の色はその度ごとに異なった。(表3)

表3

mV	ゼロハンなし	赤	黄色	緑	青
一回目	70	63	61	78	53
二回目	60	53	42	37	38
三回目	64	32	40	32	65
平均	64.5	49.3	47.7	49	52

## 【考察】

これと言って一番発電効率が良い光の色はなかったため、すべての色の光に対して同じように反応したといえる。よって、異なった色の色素を混ぜて作成した電池は発電効率の良い光の範囲は変化する。また、補色に当たる2色の混合色素を用いた電池はどの色の光にも同じように反応することが分かった。

## 8、結論

上記の実験の結果から、色素増感型太陽電池と発電効率の良い当たる光の色は補色の関係にある事が分かった。それは色素により吸収できる色が異なるからである。また、補色にあたる2色の混合色素を用いた太陽電池はすべての範囲の色に同じような反応を示す。これはそれぞれの色素がお互いに発電効率の悪い範囲を補い合うからだと考えられる。

これからは、色素の組み合わせを変え、より発電効率の良い色素増感型太陽電池をつくりたい。

## 9、参考文献

『知っておきたい太陽電池の基礎知識』

斎藤勝裕 著 サイエンス・アイ新書

『2009 課題研究』

宮城県仙台第三高等学校理数科

『色の事典』

小島尚美 編著 西東社

# カラスのクルミ割り行動の研究

2103 飯野晶太郎 2124 細川治起

## 序論

「もっとも身近にいる野鳥は？」という質問に対して、カラスを思い浮かべる人は多いはずだ。では、「彼らについてどれぐらい知っていますか？」という質問に対して、満足な答えを返せる人はどれぐらいいるだろうか。私たちは、身近にいるはずのカラスのことを精々、ゴミをあさるずる賢く厄介な鳥くらいにしか認識していない。だが、カラスは鳥類でもっとも頭がいい動物なのである。

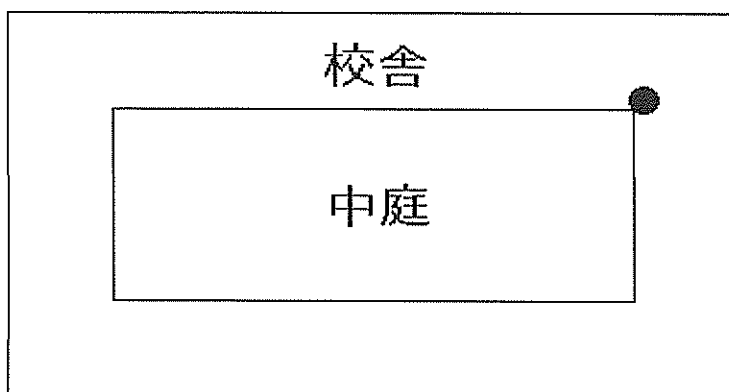
私たちは、カラスが三高の中庭にクルミを落として割り、中身を食べているという話を聞いた。日本で日常的に見られるカラスは、ハシボソガラスとハシブトガラスの2種類である。くちばしが太く、地上では両足で飛び跳ねるように移動する（「ホッピング」という）のがハシブトガラス、くちばしがスリムで、地上では両足を交互に出して歩いて移動する（「ウォーキング」という）のがハシボソガラスで、ともに雑食性だが、前者は動物食傾向、後者は植物食傾向が強い。また、ハシボソガラスは、道路にクルミを置き、自動車にひかせて殻を割るという行動や、堅すぎて自分のくちばしでは砕けないものを、飛行場の滑走路や防波堤、建物の屋上などの硬い場所に落として割る行動が報告されており、三高の中庭で見られるのもこの行動の一例だと思われる。だが、調べた限りでは課題研究でこの「クルミ割り行動」について研究した例はない。そこで私たちは、この行動について詳しく調べることにした。

## クルミの強度実験

今後の実験で使うためネット通販の山菜屋.comで新品のクルミを購入した。クルミが届いてから高いところから落としたくらいでクルミが割れるのか疑問に思い、実際にクルミを四階から中庭に向かって落としてみた（水平投射）。二個をそれぞれ一回ずつ落とした。

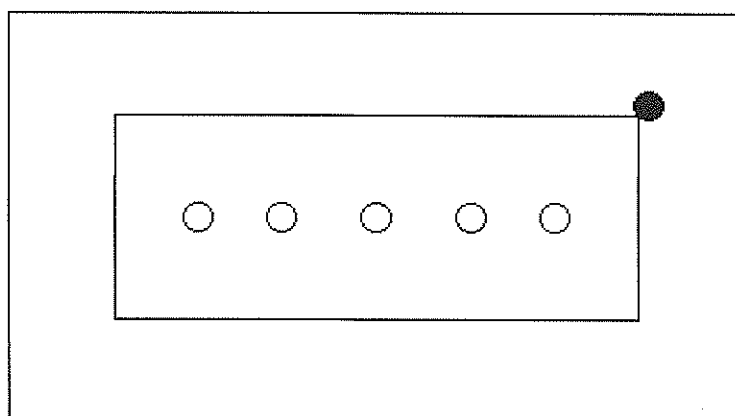
## カラスの行動観察

私たちは、中庭を一望できる四階の北東側、物理質前の水飲み場のわきにビデオカメラ（sony HDR-cx170）を三脚で固定し、それを用いて学校にいる間中庭を撮影した。



カラスがクルミを見つけるプロセスを省き、観察する回数を増やすため、中庭にクルミをあらかじめ置いておくことにした。クルミは個数を五個とし、置く場所を決め、平日の夕方に毎日置いた。いつどこに置いたものなのか分かるようにするため、クルミには全面に日と置く場所ごとにマーキングを施した。

下図のようにクルミを置いた。○がクルミ。

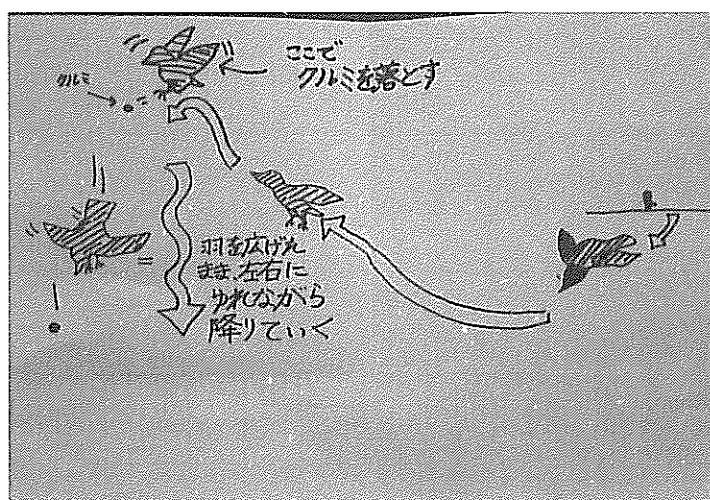


## クルミの強度実験の結果

中庭の床でバウンドしたが、まったく割れなかった。傷一つつかなかった。

## カラスの行動観察の結果

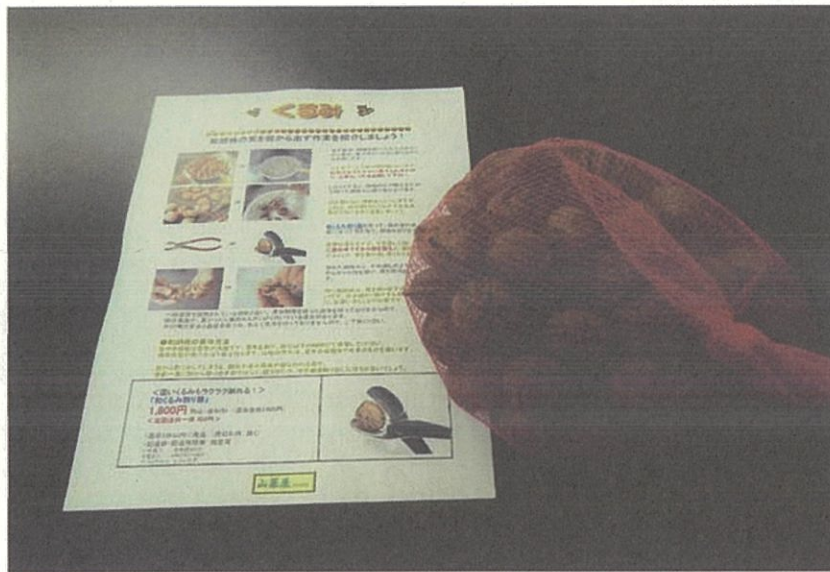
カラスがクルミを拾っている映像を撮影した。クルミは置いた翌日には五個すべてなくなっていることがほとんどで、後日マークをつけたクルミの破片を数多く中庭で発見し、カラスがクルミを落とす姿も撮影することができた。細かい破片も多く集めるとクルミの形になるものが多いので破片を持ってきて中庭では食事だけをしているとは考えにくい。また撮影に成功したビデオの映像の中に、クルミを落とす高さが変わっているものがあった。具体的には四階ぐらいの高さから落としているものと、二階ぐらいの高さから落としているものがあった。一回で落とすだけで割っているようだった。クルミを落とすときの飛び方は普段とは異なり、クルミをくちばしに加えながら落とすタイミングを図るように上がって行って、落とした後は羽を広げて左右に揺れながら降りるという姿を見せた。それから、クルミを足で押さえつけ、中身を食べていることが確認できた。だが、せっかくマークをつけたのに、いつどこに置いたものにどのマークをつけたのか、その破片が中庭のどこに散らばっていたのかなどの正確な記録をつけておらず、手元に残る成果はビデオ映像のみとなってしまった。



位置の記録をする方法として床の正方形のタイルを利用する方法を考えた。



山菜屋.com で購入したクルミ



マーキングしたクルミの例(この写真では TNP)



上の写真の TNP と書いたクルミ、見事に割られている。



## まとめ

1. カラスはクルミを一度中庭から持ち去り、その後再び中庭にやっけてきてクルミ割り行動をする。
2. これら二つの行動を同じ個体が行っているのかは個体識別が出来ていないので不明。
3. クルミ割り行動の際は、クルミをくちばしにくわえてはなす。
4. いつも同じ高さからクルミを落とすわけではない。
5. 割ったクルミはその場で食べる
6. クルミはなかなか強度があり、四階から一、二回落としたくらいでは割れない。

## 考察

### 方法論の特徴・利点と中庭の利点

カラスがクルミを落とす瞬間を観察するためには、中庭を常に見張らなくてはならない。しかし、学生である私たちには授業があるため、それは実行不可能だ。そこでビデオカメラを用いたのだが、これがもし屋外だったら、カメラが雨風に晒されたり、勝手に持っていかれたりするおそれがあり、とてもこの手法は取れなかった。中庭なら校舎内から撮影できるためにそのような心配が無く、安心して観察することができた。

### 観察・実験から得た事実からの推論

1, 2の事実から「カラスは持ち去ったクルミに何らかの割れやすくするための処置を施しているのではないか」と考えることもできる。

また、4の事実から「カラスは何らかの理由、例えばクルミの強度によって、落とす高さを変えているのではないか」とも考えられる。

### 今後の展望

上記の仮説の真偽を確認したい。また、破片の落ちていた場所を詳細に記録すれば、どこからどんな強さでどこに向かってクルミを落としているのかなどを調べることもできそうだ。

### 観察に適する時期と天候

基本的に、秋から冬にかけて、クルミ割り行動を観察できる。おそらく秋になってエサが無くなる時期に、クルミの実が食べ頃となるのだろう。私たちは夏はクルミを置かず、秋になってクルミの破片が中庭に落ちていることを確認してからクルミを中庭に置きはじめた。夏の間はクルミが無く、他のエサも豊富なため、わざわざクルミを割って食べることはしないようだ。また、天候が雨や雪だとさすがにカラスは飛ばず、晴れや曇りの日にクルミ割り行動をするようだ。

# 付着珪藻を用いた七北田川の水質調査

後藤媛香・庄子夕夏

宮城県仙台第三高等学校

## <要約>

珪藻の数や種類で七北田川の水質を知るために付着珪藻の種類や数とリン酸イオンの濃度の関係を調べた。河川の水質を珪藻の種類や数で検証ができないかということについて上流から中流に至る4つの地点で12月に調べた結果、七北田川の水質はバランスが取れていて珪藻の種類や数に影響を与える値になっていないのではないかとことが分かった。

## <はじめに>

私たちは、都市を流れる河川の水質がどれだけきれいなのか、またはよごれているのかに興味を持ち、それについて研究することにした。そこで河川のなかでも本校に最も近い七北田川で研究を行うことにした。七北田川は仙台の北部を流れる河川で泉ヶ岳から蒲生干潟を経て仙台湾に注ぐ一級河川である。

また、水質の汚濁は、自然発生、人為的なものがあり、その汚濁について調査するため生物学的水質調査に着目し、研究を進めていくことにした。水質調査には水生昆虫を用いるという既に確立された方法があり、市民団体が七北田川で実施している。その方法とは別の観点で、リン酸イオン濃度が植物プランクトンの増殖の限定要因になりやすいことから、珪藻という微生物に着目し、リン酸イオン濃度と珪藻の分布の相関を調べ、七北田川の水質調査を行うことにした。珪藻は河川の重要な生産者であり、水生昆虫、またそれを食べる魚、そしてその魚を食べる鳥たちにまで影響する。つまり珪藻の動向で川の生態系や環境までもが大きく変わると思われる。そのため、水生昆虫での調査では分からないような、川の環境とのより密接な関係を発見できるのではないかとことも珪藻を研究するに至った一因である。

## ～珪藻とは～

川や海などの水辺に生息する単細胞生物。体がガラスの成分であるケイ酸でできた殻でおおわれているのが特徴であり、そこには非常に美しい幾何学的模様が描かれている。種類は約2万種に及ぶともいわれ、種によって大きさ、形、模様が異なる。植物プランクトン的一种であるため、河川の生産者として生態系における重要なファクターである。

## ～水質の定義～

水質の定義を私たちになりにまとめた。河川において、栄養塩類が増加すると、特定のプランクトンもそれに伴っ

り,悪臭も放つようになる.以上のことより,私たちは有機物類と栄養塩類の濃度を水質と考えた.

### ～水質の調査方法～

大きく分けて化学的調査と生物学的調査がある.化学的調査は,日々変化していく川の環境に対応するため,継続した細かいデータを必要とする.よって,常に続けることができる状況がないといけない上,大きなコストと労力がかかってしまう.一方生物学的調査は,日々変化する川の環境に適応して生きている生物から調査する.つまり,長期的な水質の状況を反映するので,化学的調査よりも調査回数が減り,労力もコストも少なくて済む.また,珪藻は生産者として川の生態系を支えているため,動物的な時間スケールで調べる方が有効ではないかと考えた.これらの事により,私たちは生物学的調査で研究を進めることにした.

そして私たちは次のような2つの仮説を立てた.

(1)七北田川の上流には無機塩類が少なく,下流ほど高濃度になる.

(2)特定の種類の珪藻がリン酸イオン濃度の高いところと低いところに分かれて存在している.

これら2つの仮説を検証するため,珪藻の分布と水中のリン酸イオン濃度をある程度の期間計測することにした.

### <材料と方法>

#### ～珪藻の採取と観察～

珪藻を採取するに当たって七北田川に以下の4つのポイントをとって,そこから珪藻と水質を採取した.同時に,川の流速と水温,気温も測定を行った.12月から1月にかけて調査を行った.

源流部…泉ヶ岳少年自然の家付近

上流部…福岡浄水場付近

中流部…七北田公園付近

下流部…岩切大橋

通常,川から適当な石を採取し,歯ブラシなどでこすって珪藻を落とし,それを観察する.しかし,その方法だと珪藻の殻が壊れてしまう上,少ない数の珪藻しか採取できなかった.そこで,様々な改良を重ね,私たちなりの採取方法を考えた.発泡スチロールに太いテグスでプレパラートをいくつか固定し,それに長いテグスを取り付け,しっかりとした場所に結びつけて,そのまま川に投げ入れるという方法である(図1).これにより,珪藻をたくさん採取することができ,また採取方法も簡単にすることができた.

珪藻を観察するに当たって珪藻殻を観察しやすくするためのクリーニング処理が不可欠となる.クリーニング処理の方法は以下の通りである.

- 1.ピペットで遠心管や試験管に少量の採集品を入れ,しばらく静置すると珪藻が沈殿するので,上澄みを吸い取る.

- 2.市販のパイプ洗浄剤(パイプユニッシュ,ジョンソン社)を試料と同量～2倍ほど加える.
- 3.ピペットで水流を起こし,軽く攪拌したら15～20分静置する.
- 4.時間になったら蒸留水を加え,遠心器を用いて珪藻殻を沈殿させる.
- 5.上澄みを捨て,4の操作を3回繰り返す.

これらの処理が終わったら,プルーラックスという珪藻殻を見やすくするための封入剤で封入し,永久プレパラートを作成した.今回は,このようにクリーニングしたものと,何の処理もしないものの2つを観察した.観察方法は,プレパラートを顕微鏡の目盛で20ポイントをとり,それを観察することにした.

### ～水質調査～

水質はリンの濃度によって測定することにする.今回は全リン処理を行ったものとししないもので測定を行った.全リン処理とは,動物の糞や,植物に含まれるリンも全て抽出し,その濃度を測ることである.また,それをしないものは,自然に川の水に溶けているリン濃度を測るということである.測定方法は,リンを測るための薬品を調合し,それを分光高度計にかけて計測した.

### <結果>

#### ～リン酸イオン濃度の測定～

七北田川の各ポイントにおけるリン酸イオン濃度を表1,図3に示した.また通常の河川のリン濃度は0～0.01mg/Lとされる<sup>3)</sup>.全リン処理と処理なしのどちらも七北田公園が最も数値が高くなっている.福岡浄水場は全リンより処理なしの値が高くなった.

表1 七北田川のリン酸イオン濃度

※単位:mg/L

場所	自然の家	福岡浄水場	七北田公園	岩切大橋
全リン	0.0016	0.0025	0.0093	0.0080
処理なし	0.0009	0.0046	0.0080	0.0064

#### ～水質評価のための基準～

水道水,通常の河川…0～0.01 mg/L 通常の湖沼,ため池…0.01～0.03 mg/L

栄養化状態…0.05～0.08 mg/L 富栄養化状態…0.08～0.12mg/L

#### ～珪藻の分布～

観察された主な珪藻の顕微鏡写真を図2に,珪藻の種類分布のグラフを図4に示した.

#### (1)クリーニング処理なし

珪藻の種類が多く,特徴的なのは自然の家はイタケイソウ,七北田川はフナガタケイソウが突出して多いことである.また,アウラコセイラは自然の家,クサビケイソウ,ハネケイソウは七北田公園にしかいないというも分かる.しかし全体的に見ても,はっきりと分かるほどの規則性は見受けられない.

#### (2)クリーニング処理済み

処理なしと同じく、珪藻の種類が多い。全体的にフナガタケイソウが多いが、特に福岡浄水場が突出して多い。また特徴的なのが、マガリクサビケイソウは自然の家、タルケイソウは岩切大橋にしかいないことである。しかし処理なしと同様、全体的に見ても、はっきりと分かるほどの規則性は見受けられない。クリーニング処理なし同様、規則性は見受けられない。

## <考察>

七北田公園のポイントでリン酸濃度がやや高い傾向が見られた。これはすぐ上流の上谷川下水処理場からの排水の影響が出ている可能性があるかもしれない。しかし、リン酸イオン濃度の値として、通常の河川濃度の上限値である0.01mg/Lという値をどの採取場所でも大きく下回っていた。また、上流にいる珪藻は下流でも観察することが可能であり、種類ごとの分布に顕著な傾向は見られなかった。これらのことから、七北田川は上流から下流までで数値にでるほどの水質の差が無いのではないかと考えた。七北田川はどの場所においても十分に低いリン酸イオン濃度であるため、上流と下流における珪藻の分布にはっきりした差が見られなかったのではないかと思う。

七北田川の上流には無機塩類が少なく、下流ほど高濃度になるという第一の仮説は正しいとは言えない。七北田川は予想したよりもリン酸イオン濃度について低い状態であった。したがって、特定の種類の珪藻がリン酸イオン濃度の高いところと低いところに分かれて存在しているという第二の仮説は、七北田川がきれいなため検証するのが難しかったと考えられる。

ただし、岩切大橋だけで、クリーニング処理済みのプレパラートにおいてタルケイソウが観察されたことから、タルケイソウが何らかの水質の違いを反映している可能性があるかもしれないと思う。

このことをふまえての問題点と改善点は以下の通りである。

調べるポイントに、下水処理場や水路からの流れ込む場所を加え、リン酸イオン濃度に差がある地点での検証を行いたい。

珪藻の種類がかなり困難であった。珪藻は多くの種類が存在するため、細かな種類の特定は厳しいということが分かったので、まずは珪藻の量の測定から行うべきだったと思う。また珪藻の面積あたりの数など、もう少し簡素化する必要があった。珪藻の観察時に20ポイントに定めて観察したが、珪藻の見え方にどうしてもムラができてしまい、当たり外れが出てきてしまった。このことにおいてはもっとポイント数を増やすか、面でとらえて珪藻を数えていくという作業が必要であった。

福岡浄水場で全リンよりも処理なしの値の方が高くなってしまった。これはきちんとボトルを振っていないのが原因と考えられるので振ってから測定するなど、もっと丁寧な作業が必要だったと考えられる。

特にクリーニング処理してないもので珪藻が塊として存在するものがあった。塊の珪藻は判別しにくく、それによって結果に差が出てしまったのではないかと思う。

設置場所についてはスライドガラスが土にふれてしまっているものや川の流速の違いなどによって調査に差が

でしてしまうと思うので、ある程度条件を合わせて実験を行う必要がある。また七北田川では、水鳥などが集まるという場所が存在するというような外的要因からリンの濃度が変わってしまう可能性をふまえて実験を行う必要があった。

今後は BOD や COD といった酸素の濃度や窒素の濃度の測定も行って細かな七北田川についてのデータも集めていきたいと思う。それに加えて条件の設定をおこなって単離培養を行ってリンの濃度を変えていった場合どの濃度で珪藻が変化し始めるかなどといった観察も行っていきたい。

#### <参考文献>

～参考書～

1) 一瀬諭, 若林徹哉監修. やさしい日本の淡水プランクトン改訂版図解ハンドブック. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター.

～参考 URL～

2) 真山茂樹. 珪藻の世界. <http://www.ugakugei.ac.jp/~mayama/diatoms/Diatom.htm> (accessed 2012-2-9).

～資料～

3) 自然水における「よごれ」の発生メカニズムとその解釈に関する講義と実習 村松隆

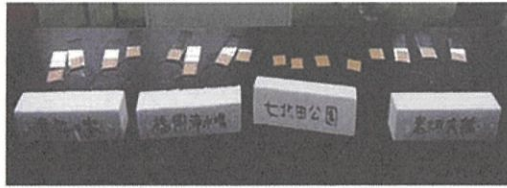
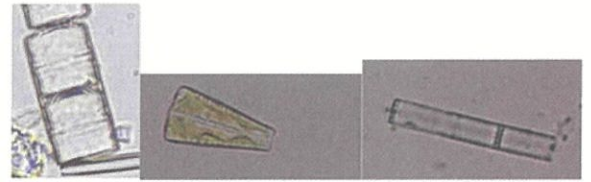
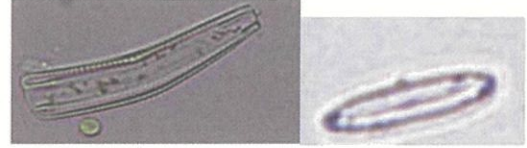


図1 珪藻を付着させるスライドガラス  
スライドガラスにナイロン糸をガムテープで固定し、発泡スチロールにつけて河川に設置した。



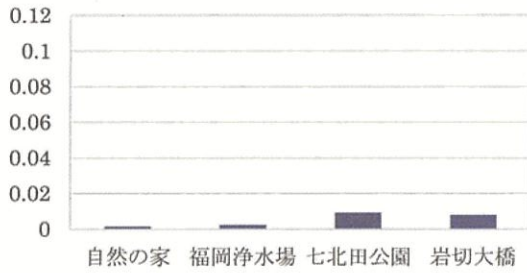
A タルケイソウ B クサビケイソウ C アウラコセイラ



D マガリクサビケイソウ E ハネケイソウ

図2 観察された珪藻の例

A 全リン処理 (mg/L)



B 全リン処理なし

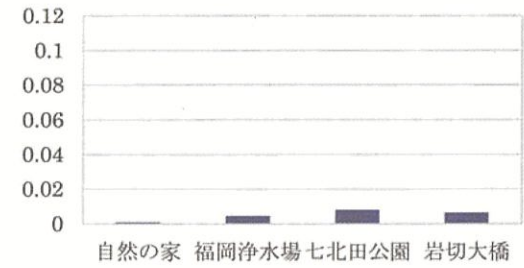
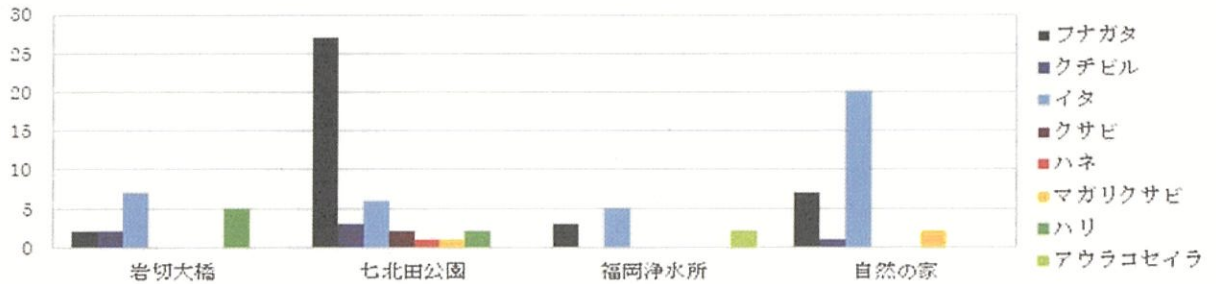


図3 リン酸イオンの濃度

A: クリーニング処理をせず、生きたままの珪藻を観察した。B: クリーニング処理を行い、ケイ酸塩の殻を観察した。

A クリーニング処理なし



B クリーニング処理済

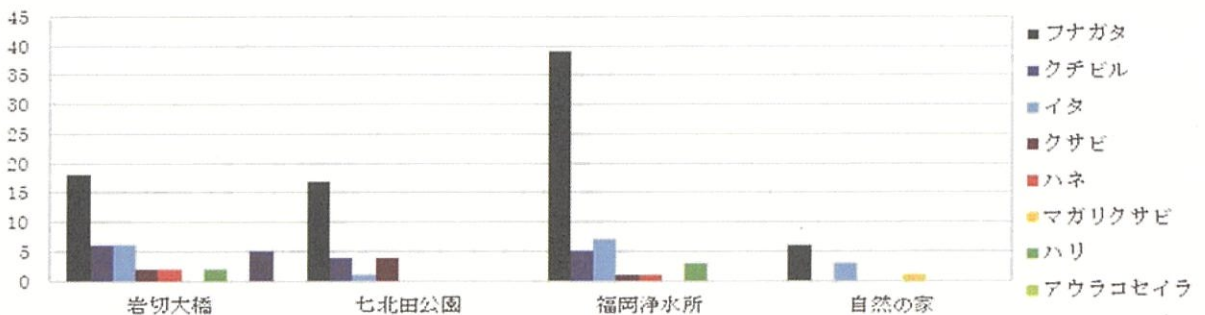


図4 珪藻の種類と数

A: クリーニング処理をせず、生きたままの珪藻を観察した。B: クリーニング処理を行い、ケイ酸塩の殻を観察した。



# 粘菌を用いたネットワークモデル

宮城県仙台第三高等学校理数科

岡田勇真 三ヶ田開 我妻洸 今野裕介

## 要約

私たちは、公立はこだて未来大学の先行研究を元に、その研究に粘菌の走性を利用するという新しい実験を行った。粘菌の走性を利用することにより先行研究ではできなかった地形(山や山脈など)を表現することができる。その粘菌の走性を利用するために粘菌が何を嫌うかを調べ、そして私たちは粘菌が塩分を嫌うことについて新たに発見することに成功した。それを用いて粘菌による交通ネットワークモデルを作成し考察を行った。

## はじめに

この研究で使用した粘菌はモジホコリカビ(*Physarum polycephalum*)と言い、変形菌(真性粘菌)とも呼ばれ、カビやキノコと同じような菌類の生物である。粘菌は不思議な生物で、胞子を作る植物のような性質も持っていて、微生物を食べる動物のような性質も持っている。粘菌は単細胞生物で細胞分裂は行わないが、核は何度も分裂し、大量の核を持つ1つの生物になる。細胞の内部では非常に早い原形質流動が起きていて約1分ごとに流れる向きを変える。このような働きをもつ粘菌だが、脳を持たないのに粘菌がエサとエサを最短距離で結ぶことに代表されるように、あたかも考えて行動しているかの様に振る舞うことができる。この性質を利用して私たちは粘菌を使い理想的な交通ネットワークを描くことを目的とした研究を行った。

この研究は私たちの先行研究として中垣俊之教授(はこだて未来大学)によって行われたことだが、私たちはその研究に粘菌の走性を用いることにした。その粘菌の走性を用いることにより先行研究では行われなかった実際の地形(山脈などの起伏)を表現することができる。この研究では「走性」を「エサとなるオートミールへ粘菌が向かう」と定義する。また「最短距離でオートミールへと粘菌が向かうこと」を「正の走性」と呼び、「障壁となるものを避け、最短距離でオートミールへと粘菌が向かわないこと」を「負の走性」と呼ぶことにする。

その粘菌の走性を調べるために私たちは始めに、粘菌がどんな物質を避けるのかを研究した。結果、この研究では粘菌が塩分に対して反応すること、そしてその反応は台地の塩分濃度によっても変化すること

が分かった。その結果をもとに先行研究に塩分濃度によって地形を考慮させることを+αとして粘菌に理想的な交通ネットワークを描かせる研究を行った。その研究では地形の対象を宮城県とその周辺として行い、オートミールを人口の多い地域に配置し一日後の粘菌の様子を観察した。結果はほぼ現実と同じ交通ネットワークを形成するものだった。

## 材料と方法

### ○モジホコリカビ

東北大学からスクレロの状態で譲り受けた。

### ○粘菌の培養方法

・ビーカに入れた適量の寒天・純水をガスバーナで熱し、タッパーに入れ、粘菌の培地とし、粘菌と粘菌のエサとなるオートミールを適量置き、恒温器(25℃)に入れて培養した。

### ○塩分に対する負の走性の実験(図1参照)

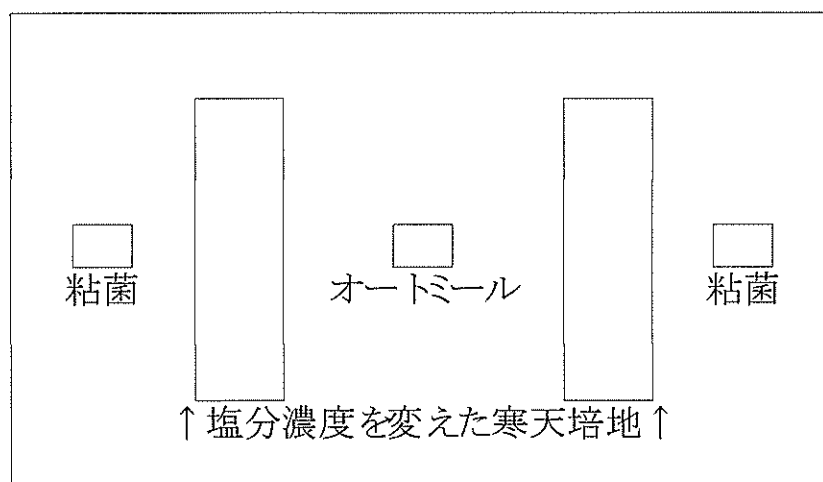
粘菌の走性を「粘菌の走性を利用した交通ネットワークを描く実験」に用いるために、粘菌がどんな物質を嫌い、そして、どう反応するかを調べた。

手順1、左右対象に一つずつプレパラート一つ分の範囲の寒天培地を切り抜き、そこに塩分を含んだ寒天培地のもとをそそいだ。ここで、もともとの寒天培地の塩分濃度は0%と0.5%とし、塩分を含んだ寒天培地は0.1%から1.0%まで0.1%ずつ濃度を増やし実験した。

手順2、タッパーの真ん中にエサとなる適量のオートミールを置き、両端に適量の粘菌を置いた。

手順3、粘菌はエサとなるオートミール目指して動くのだが、そのとき障害となる塩分を含んだ寒天培地を粘菌は避けるかどうかを観察した。

図1



## ○粘菌の走性を利用した交通ネットワークを描く実験

手順1、タッパーの大きさ分に切り取った地図（宮城県や東北地方、関東平野、アメリカ大陸などなんでもよい）を用意し、タッパーの裏側に地図が表側から見えるように地図を貼り付けた。

手順2、塩分0%濃度の寒天培地を流し込んだ。

手順3、地図の標高線などを元に、標高を3段階から4段階にわけ、それに準じて寒天の塩分濃度を変えていった。塩分濃度は標高が低いところを0%、高いところを1%とした。宮城県とその周辺の地形を元にした作成したモデルでは、仙台平野を中心に塩分濃度を0%、泉ヶ岳以西を0.4%、奥羽山脈を0.7%、さらに栗駒山や蔵王を1.0%にし、標高差を塩分を含む寒天培地によって表現した。また仙台・白石・石巻・気仙沼・古川・山形市・一関など人口が集まっていると思われる部分にエサとなるオートミールを置き、そして粘菌を適当な位置に置いた。

## 結果と考察

### ○「塩分に対する負の走性の実験」の結果と考察

表1 台地:塩分濃度0%寒天

くりぬいた部分の寒天の塩分濃度	結果
0.1%	避けなかった
0.2%	避けなかった
0.3%	避けなかった
0.4%	避けた
0.5%	避けた
0.6%	避けた
0.7%	避けた
0.8%	避けた
0.9%	避けた

表2 台地:塩分濃度0.5%寒天

くりぬいた部分の寒天の塩分濃度	結果
0.1%	避けなかった
0.2%	避けなかった
0.3%	避けなかった
0.4%	避けなかった
0.5%	避けなかった
0.6%	避けなかった
0.7%	避けなかった
0.8%	避けた
0.9%	避けた

この表1、表2から粘菌は、塩分に塩分濃度0%台地では塩分濃度0.4%のときから反応し、塩分濃度0.5%台地では塩分濃度0.8%のときから反応していることが分かる。台地の塩分濃度によって避けはじめる最低ラインが違っていることから粘菌が塩分濃度に慣れている(耐性を持っている)ということが分かる。

図2

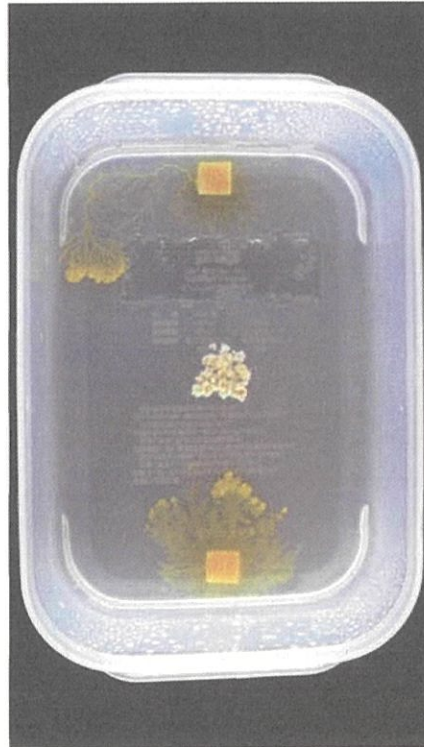


図2より上から真ん中にあるエサに向かう粘菌は塩分を含んでる寒天培地を避けることが分かる。また下からエサに向かう粘菌は塩分を含んでいる寒天培地がないためまっすぐにエサに向かっている。

○「粘菌の走性を利用した交通ネットワークを描く実験」の結果と考察

図3



図4

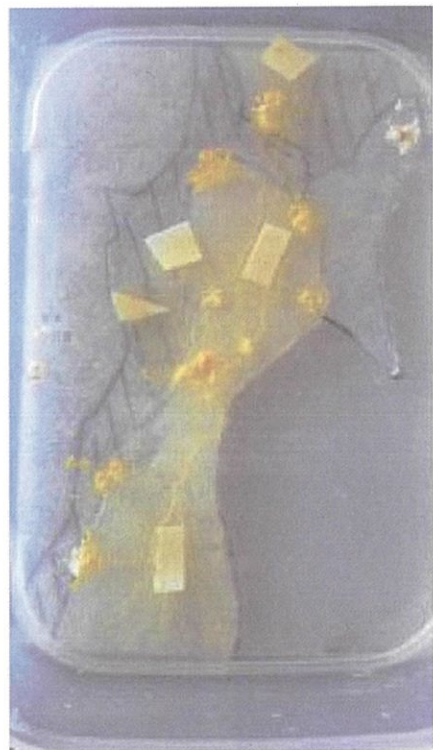


図5を見て分かるように粘菌は概ね、地図で示されている主要な交通網（新幹線や高速道路など）の上を通過して都市を結んでいた。粘菌の太い道を形成している部分は主要な交通網と一致し、そこからさまざま場所へと粘菌が変形していた。しかし粘菌は全体的に実際のネットワークよりも東側にそれていた。その理由は人口について詳しく調べていない、寒天培地の塩分濃度を変える際どうしても正確さが失われてしまうからだと思われる。

## 今後の展望

粘菌の走性について塩分濃度にどのように粘菌が反応するのか詳しく調べたい。詳しく調べるためには同じ実験を何度も繰り返し替えしたり、画像ソフトを使い粘菌の培地にしめる割合などを算出し、データ化するなどが考えられる。また、その結果を元にしてより精密に地形を表現し、粘菌に宮城県とその周辺や他の地域の交通ネットワークを描かせたい。

## 謝辞

粘菌のスクレロをいただいた東北大学電気通信研究所石黒研究室の石黒教授ありがとうございました。

## 参考文献

公立はこだて未来大学 中垣俊之教授

[http://www.fun.ac.jp/staff/staff\\_comp/nakagakitoshiyuki.html](http://www.fun.ac.jp/staff/staff_comp/nakagakitoshiyuki.html)

粘菌が迷路を最短ルートで解く能力があることを世界ではじめて発見

<http://www.riken.go.jp/r-world/info/release/press/2000/000926/>

粘菌の輸送ネットワークから都市構造の設計理論を構築

<http://www.jst.go.jp/pr/info/info708/index.htm>

# DNA の塩基配列情報で生物種を同定する

仙台第三高等学校  
加藤海輝 五十嵐英梨香

## ○要約 (Abstract)

たいていの生物は、その生物に精通している人でなければ、外見だけでは生物種を特定できない。そこで我々は、DNA の塩基配列で生物種が特定できる「DNA バーコード・オブ・ライフ」と呼ばれるプロジェクトに携わろうとしている。サンプルとなる動物の肉から DNA を抽出し、増幅し、業者にシーケンスをたのんで DNA の塩基配列を読み取ってもらう。その読み取ったデータをデータベースに登録する。

## ○はじめに (Introduction)

野菜や食肉の産地偽造問題はこうしたらはっきりと、その産地のものだと証明できて、安心して食べ物をたべれるのでしょうか。

そんなとき、DNA バーコーディングを使えば正確な生物種を特定できます。DNA バーコーディングとは、DNA の塩基配列情報を基にして生物種を特定できるシステムの事で、この技術は生物学においてとても役に立ちます。最大の魅力は、生物の DNA を採取してそれを調べるとすぐにその DNA が何の生物のものか分かるという点です。専門家に頼らずに正しい生物種と、その特徴がわかるようになれば、実験の効率も飛躍的に上昇します。DNA バーコーディングは現在進行形の国際プロジェクトです。世界の科学者が正しい(言わば血統書つきの)DNA を登録しています。今回、私たちは DNA を登録する側として、DNA バーコーディングのプロジェクトに参加しようとしています。私たちが参加したとなれば、三高の生物室でも正確な生物種の同定ができる、という証明と、ユーザーとして利用するだけでなく自分達が DNA 情報を提供する立場になる、ということになります。まだ、バーコーディングの技術は一般に広く浸透していません。それは1つの生物種を同定するのにコストがかかりすぎるからで、将来、単価が安くなれば、身近で、便利なシステムになります。

今回着目した遺伝子は、CO1 遺伝子および 18S リボソーム RNA 遺伝子です。これらは、ミトコンドリア、細胞の核にあるので、どの動物にも共通して存在しているので着目しました。

## ○材料と方法 (Materials and Methods)

### ◎材料

- ・サンプルの食肉…ワニ、カンガルー、ダチョウ(仙台市青葉区の肉の佐々木で購入)
- ・PCR 法装置…ASTECC
- ・電気泳動装置
- ・プライマー…

SR1 <sup>8)</sup>	F	TACCTGGTTGATCCTGCCAG
EU60F <sup>9)</sup>	F	GAAACTGCGAATGGCTCATT
CS322F <sup>9)</sup>	F	GATGGTAGTGTATTGGAC
SR6 <sup>8)</sup>	F	GTCAGAGGTGAAATTCTTGG
EU929R <sup>9)</sup>	R	TTGGCAAATGCTTTCGC
SR8 <sup>8)</sup>	F	GGATTGACAGATTGAGAGCT
SR9 <sup>15)</sup>	R	AACTAAGAACGGCCATGCAC
SR10 <sup>8)</sup>	F	AGGTCTGTGATGCCCTTAGA
SR11 <sup>8)</sup>	R	CGCTTACTAGGAATTCCTCG
SR12 <sup>8)</sup>	R	CCTTCCGCAGGTTACCTAC

- ・泳動に使用するゲル培地

プライマー作成,シーケンス解析は株式会社ファスマックに依頼します.

#### ◎実験手順

DNA バーコーディングの流れは,DNA 抽出→DNA ポリメラーゼ連鎖反応によるバーコード配列の増幅→電気泳動→シーケンス→DNA 解析→登録,です.

DNA ポリメラーゼ連鎖反応によるバーコード配列の増幅(PCR)は,温度変化を繰り返すことにより DNA の必要部分を増幅することです.プライマーという DNA のマーカを用いて DNA をマーキングすると 3 回目の複製から DNA の複製が始まり,n 回すると n の 2 乗個に複製されます.今回着目した遺伝子は,核の18sリボソーム RNS 遺伝子とミトコンドリアのチトクロム C 酸化酵素サブユニット1(CO1)です.18sリボソーム RNS 上に,プライマーの SR1と AU929R でマークした領域を領域1,SR6と SR9を領域2,SR8と SR12を領域3とします.(図1参照)CO1上に LCO1490と HCO2198でマークした領域を CO1とします.

電気泳動とは,試料の分子量の違いにより,現れるバンドの長さが違うようになります.電気泳動のゲルは内部が網目のようになっているので,分子量の大きい DNA ほどあまり進まず,小さい DNA ほど進むので進捗がかわってきます.そのとき表れたバンドを,外部にシーケンスを依頼して DNA を解析してもらえると,それをもとに DNA バーコーディングに登録することができるようになります.

## ○結果 (Results)

### ◎ 1分サイクル

まず,PCRの時間を1分サイクルにして電気泳動した.その結果,領域1にはどの動物もバンドが出現していなかった.領域2,3はすべて出現していた.ワニのCO1はどれも出現していないが,他の2種のCO1は出現していた.(図2参照)

### ◎ 2分サイクル

前者を踏まえて,領域1にもバンドが出現するようにPCRの時間を2分サイクルに延ばして,それ以外は同じ条件で実験した.その結果,カンガルーの領域1にのみバンドが出現した.(図3参照)

現在,これを基にしてシーケンスを依頼している段階です.

## ○結論 (disccution)

はじめに行った実験で領域1がすべてにおいて現れなかったのは,挟み込んだ領域自体が長いので,ポリメラーゼの反応時間が足りずに反応が終わりきらなかったからではないかと考えました.また,領域1は生物によって多様化しているため,その多様化に合致するプライマーではなかったのか,とも考えられます.

次に行った実験で,ダチョウとワニにバンドが出現しなかったのは,今回設定した試料の量(5マイクロリットル)が少なすぎたと考えられます.今後.例えば10マイクロリットルなどで実験をすればバンドが現れるかもしれません.

今までやってきたのは予備実験のようなものであり,本当の目的はDNAバーコーディングに登録することです.生物種が明確にわかっている動物園や水族館からサンプルをいただき,そのDNAを調べて本格的にデータを登録しようと思っています.

## ○参考文献 (References)

参考文献は以下のとおりです.

・日本バーコードオブライフ・イニシアチブ

[http://www.iboli.org/protocol/pcr\\_animal](http://www.iboli.org/protocol/pcr_animal)(accessed 20120114)



图1

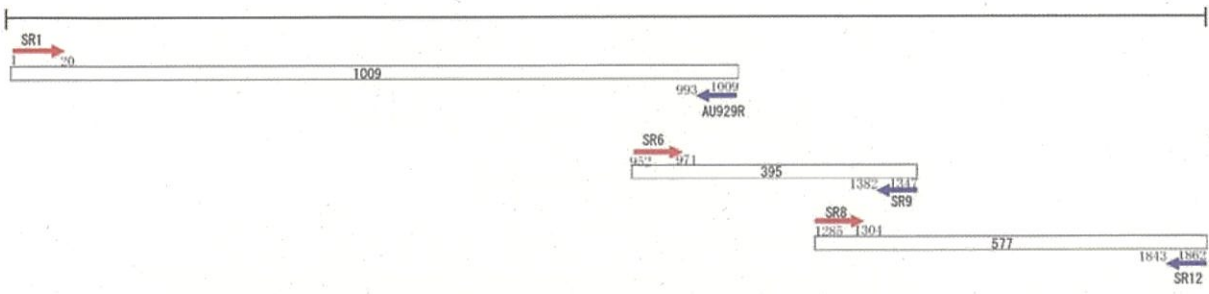
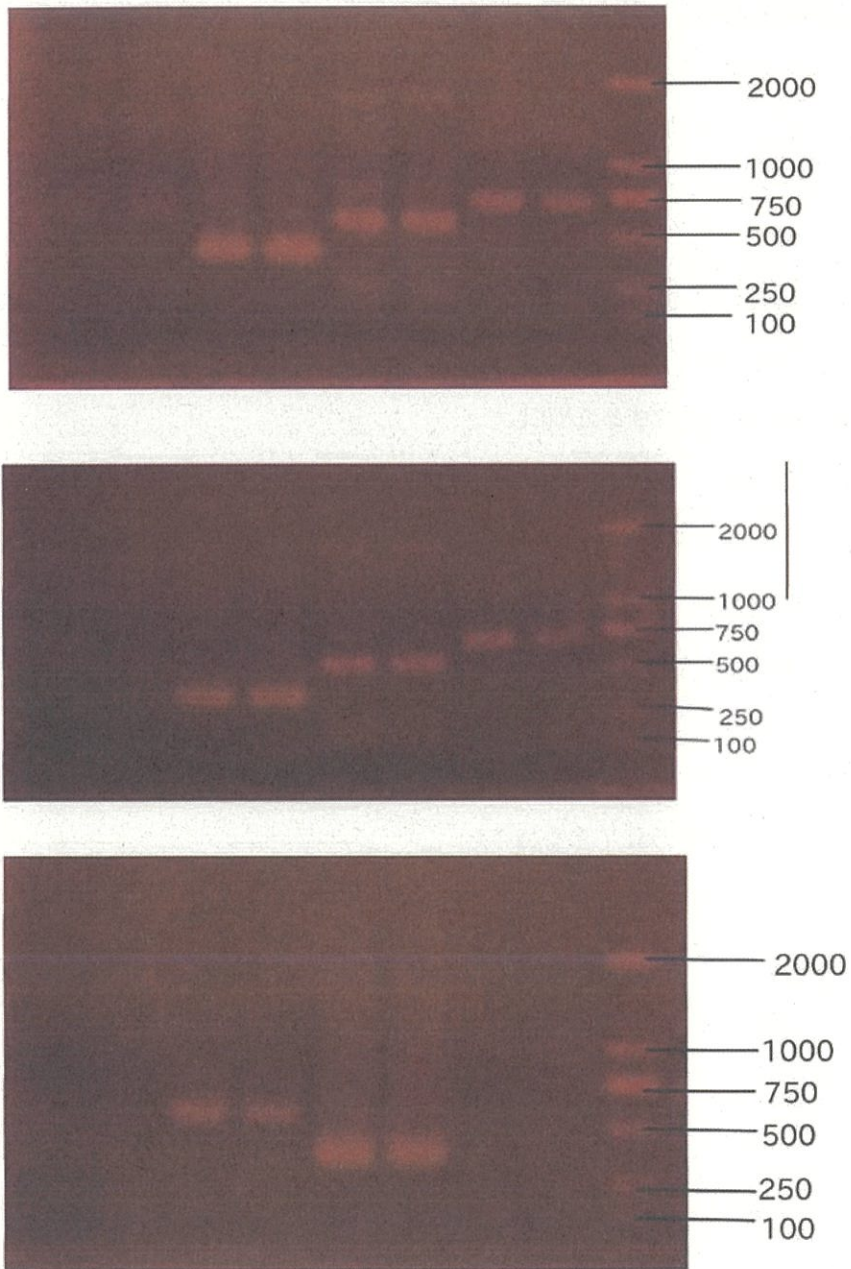


图2



# SDS 電気泳動による糸腺を用いたクモの糸のタンパク質の分析

寺岡将利 猪口達也 林秀哉 我妻冬磨

宮城県仙台第三高校

---

繊維開発の基礎実験として少しでも貢献できるように、クモの糸特有のタンパク質「スピドロイン」を研究することにした。スピドロインが高分子量であることを自分たちの目で確かめるために、解剖によって得られた糸腺を SDS 電気泳動にかけた。結果として、スピドロインだと思われるバンドを見つけることができた。

---

## はじめに

みなさんも一度は蜘蛛の糸に引っかかってしまったことがあると思う。蜘蛛の糸はねばねばして、よく伸び、なかなか取ることができない。そこで私たちは、どうして蜘蛛の糸は、ねばねばしたり、よく伸びたりするのか、またその原因は何なのかを研究することにした。

クモの糸は分子量が大きいタンパク質から構成されていて、その中にはクモ特有のタンパク質である「スピドロイン」が含まれていることが分かっている。またクモの糸は耐熱性・弾力性に優れているため、次世代の繊維として注目されている。各国でクモの糸についての研究がされているが、クモ特有のタンパク質である「スピドロイン」については解明されていない。クモの糸が7種類あることから(各種によって性質が違う)、私たちは各種の糸によって「スピドロイン」のタンパク質構成が違うのではないかと仮定を立てた。今回の研究でこの「スピドロイン」について解明できれば、次世代の繊維研究で役に立つと思う。そこで私たちは SDS 電気泳動を用いてクモの糸の分子量を調べた。

## 材料と方法

初めに蜘蛛の糸を採集して SDS 電気泳動しようと試みたが、タンパク質が溶けださなかったため結果が出なかった。糸は蜘蛛の体の中では液体になって糸腺のなかに入っているのを取り出して実験することにした。蜘蛛は7種類の糸をそれぞれ違う穴から出していて、その穴と糸腺がそれぞれつながっている。

### 実験1 解剖

糸線を取り出すこと、クモの体内の構造を知ることが目的である。対象はジョロウグモである。ジョロウグモの一生は一般的に5月から11月で、9月の求愛シーズンには雌は体が大きくなり、出す糸もかなり太くなる。そ

のため、このジョロウグモを実験に使った。実体顕微鏡の下で解剖しその様子を画像に保存できるようにした。解剖中は、7%生理食塩水にクモの腹部を漬けた。7%の食塩水を用いた理由は、同じ節足動物のバッタがその値に最適であるからである。資料をもとにした。

手順は、腹部の背側を正中線でハサミで切り、徐々に開いていく。開くと卵巣があるので取り除く。まわりには茶色い結合組織があるのでやさしく取る。糸腺は下部にあるので卵巣を取り除くと大きな黄色い糸腺が現れる。また、白い糸腺も左右対称にあるのが分かる。また、糸腺、出糸管、糸疣(いといぼ)を観察できる。

糸疣とは糸の出所であり、糸の種類によって使い分けられている。また、糸疣と糸腺をつなぐものが出糸管である。

## 実験2 SDS電気泳動

SDS 電気泳動はタンパク質とマーカの分子量を比較することで、タンパク質の分子量を特定する。スピドロインの分子量は数百k Da と分子量が大きく、私たちが所有している分子量マーカを使うことができなかった。もっと大きい分子量を調べられる分子量マーカも市販されているが高価で予算がつかなかったため、他の分子量がわかっているタンパク質をマーカの代わりとして使用することにした。そこで私たちはタイチンをマーカとして使用することにした。タイチンは動物の筋肉に含まれるタンパク質で、分子量が 2293451.39Da であるため適していると考えた。タイチンにはサンマの筋肉を利用した。

また、分子量が大きいいため今回は5%のゲルを作り実験した。(表2, 3)

表1 5%濃縮ゲルの材料とその量

濃縮ゲル (5%)	
Tris-HCl バッファー 0.5mol/l pH6.5	2.5 ml
アクリルアミド溶液	1.5 ml
過硫酸アンモニウム	0.1 ml
蒸留水	5.8 ml
SDS	0.1 μml
TEMED	10 μml

表2 5%分離ゲルの材料とその量

分離ゲル (5%)	
Tris-HCl バッファー pH8.8	5 ml
アクリルアミド溶液	3.3 ml
過硫酸アンモニウム	0.2 ml
蒸留水	11.3 ml
SDS	0.2 μml
TEMED	10 μml

表3 ウェルに入れたサンプル (糸腺を溶かした 20%SDS 溶液 (μml) : サンプルバッファー (μml))

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
分子量 マーカ	糸腺	糸腺	糸腺	糸腺	糸腺	糸腺	サンマ	分子量 マーカ	なし	
	(5:10)	(10:10)	(5:5)	(5:10)	(5:15)	(5:20)				

作成したゲルにサンプルを(表3)のように入れて電気泳動にかけた。( )の中の数値は、20%SDS 溶液とサンプルバッファーの比を変えている。この順番で電気泳動を行った。その後ゲルをBPB 溶液で染色、CBB 溶液で脱色した。

## 結果

### 実験1

解剖をもとに図1を作成できた。

クモを外から観察したところ、糸疣が5つ確認できた。また、解剖の結果、大きな黄色い糸腺は出糸管をたどり一番腹側の糸疣につながっていた。

(図2)この糸疣は外から確認すると牽引糸のものだった。つまり、牽引糸の元になる液体はこの黄色い糸腺の中にあるということが分かった。

### 実験2

結果は(図3,4)である。20%SDS溶液とサンプルバッファーの比が(5:10)のところであらうバンドが見られた。(図4)これが、クモの糸の元を含むタンパク質、スピドロインの可能性もある。サンマの筋肉のタンパク質もバンドがでていた。(図3)

## 考察

SDS電気泳動では、図4の⑥のところにてたバンドがスピドロインによると思われる。また、サンマの筋肉のタンパク質もバンドがでた。それはスピドロインと予想できるバンドより下にでたため、もし、糸腺によるバンドがスピドロインであれば、スピドロインの分子量はタイチンの分子量よりも大きいことが分かるだろう。ただし、溶液の条件を変えたところでは結果が出ていないため、正確なデータが得られるように工夫したい。

また、SDS電気泳動の結果は比較して分子量を特定するが、スピドロインと比較できるマーカーが必要である。マーカーでなくても、動物の筋肉のタイチンでも分子量が分かれば、比較の対象にできる。よって、これからは、サンプル濃度の調整と分子量の特定に迫っていきたい。さらには、タンパク質の構造式や、体外に出され凝固する際の化学変化を研究したい。クモの糸の構造をつき止め、“強い糸”の理由を解明したい。

## 今後の課題

○タイチン・スピドロインの分子量を推定する。

(方法1)最高22万kDaまではかれる分子量マーカー(Broad range)を使う。

(方法2)濃度の濃いゲルから順番に濃度を薄くしていき、分子量マーカーのバンドの相違を計算して分子量を推定する。

(方法3)タイチンに関しては免疫蛍光染色で同定できる可能性がある。

○解剖して直後の糸腺を使う。

保存していた糸腺と、解剖直後の糸腺のとけ出す量が違うと考えるため、解剖直後の糸腺を使うこと。それをふまえ、サンプルの濃度も調整する。

○糸腺のバンドの塩基配列を調べる。

スピドロインの末端構造は知られているので、

でできたバンドの塩基配列を調べることで、スピドロインと特定できると考える。

○7種類ある糸のうち牽引糸だけでなく、他の種類の糸でもSDS電気泳動を行う。

これらをふまえて、異なる糸腺をSDS電気泳動にかける。

#### 参考文献

ASKARIEH Glareh nature 2010.5.13

465巻7295号 236-238頁

(クモ糸タンパク質の自己集合はpH感受性のリレー機構により制御されている)

大崎茂芳著「クモの糸のミステリー：ハイテク機能に学ぶ」中央公論新社2000年発行-186p ISBN:

9784121015495

繊維状ポリペプチドおよび多糖を含む組成物

<http://www.ekouhou.net/繊維状ポリペプチドおよび多糖を含む組成物/disp-A,2011-504374.html>

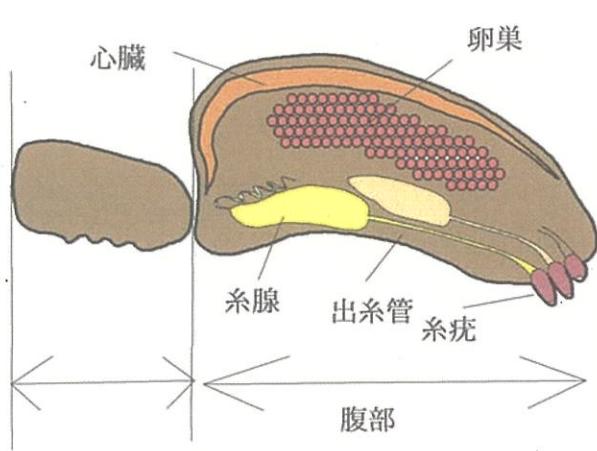


図1 解剖結果 ジョロウグモ断面略図

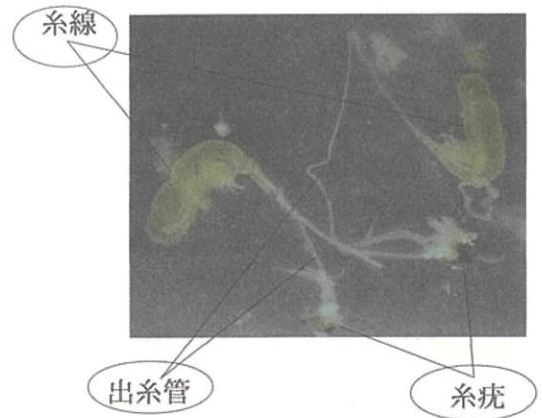
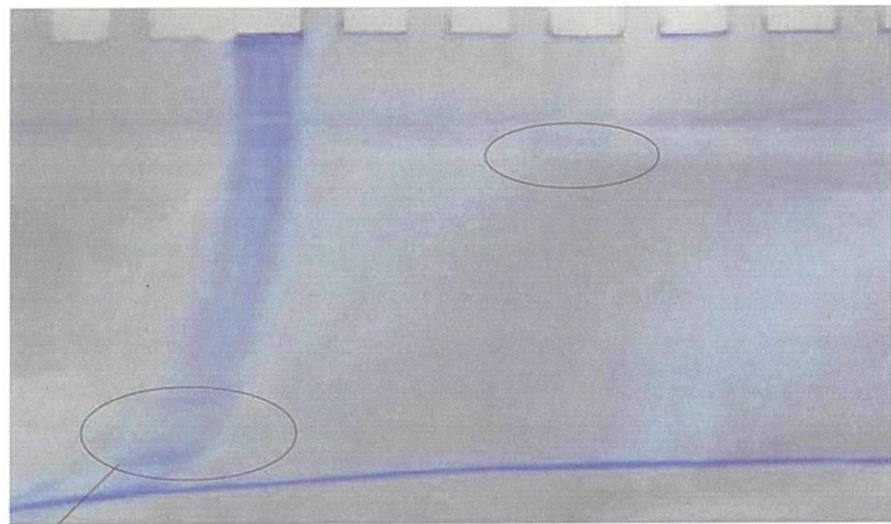
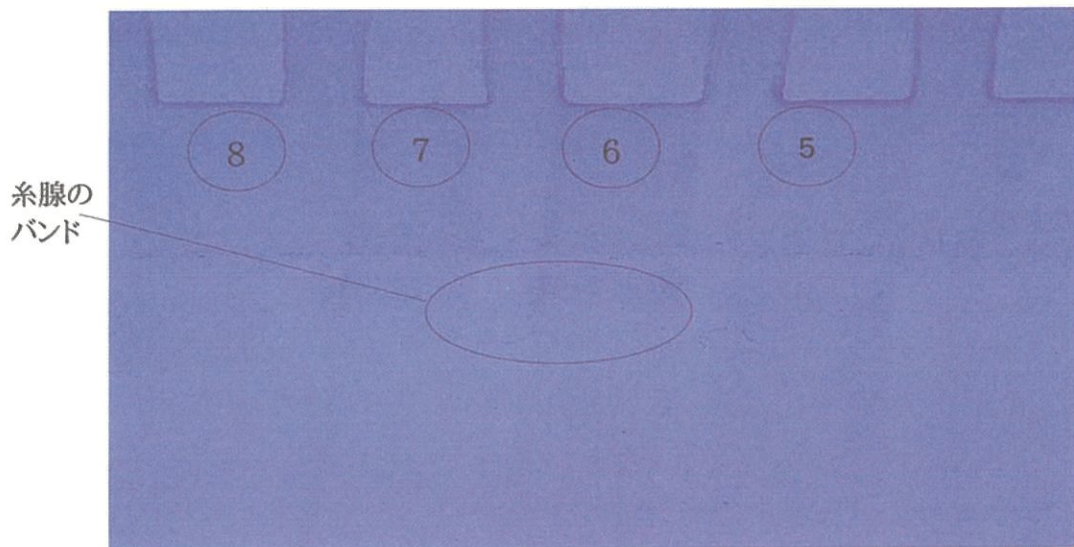


図2 取り出した糸腺, 出糸管, 糸疣



タイチンのバンド

図3 実験2 (染色後)



糸腺のバンド

図4 図3の拡大図

# ニワトリ胚への造影剤注入による血管形成の観察

宮城県仙台第三高等学校

2119中島智理・2121橋本卓也・2131八巻広大・2230服部晃己

## 要約

私たちは、先輩方の発表を見て先輩方の骨格標本の作製の研究を引き継ぎたいと思いニワトリ胚の内臓の移植実験を試みようとした。しかし、事前に過去の移植実験を見ると、移植する内臓や移植先があまりにも小さい、また失敗したときの原因を発見するのが至難であり改善できないという理由から私たちには移植実験は難しい事が分かった。よって、まずは循環器系の形成の仕組みを理解していくということで血管形成の過程を観察することにした。

ニワトリ胚の血管の形成過程を観察するために、血管に造影剤を注入した。かなりの数の卵を用いて注入を試みたが思うように血管に入らなかったり、入っても血管が注入の途中で破裂するなどした。結果的に血管への注入が成功した卵の数は同じ発生日数に成功したのも含めて12個だった。また、成功した卵の中でも観察に用いることができたのは同じ発生日数のも合わせて9個だった。顕微鏡を用いて指先の観察を試みたが指先まで造影剤が到達しておらず、思っていた観察はすることができなかった。

## 材料

- ・有精卵・・・38℃に保って発生を進めさせていたもの
- ・自家製の針（パスツールピペットの先端を熱し先を尖らせ加工したもの）  
↓針先が太くうまく注入できないため  
歯科医師が麻酔針として用いている35ゲージの針
- ・シリコンチューブ
- ・造影剤・・・墨汁（生理食塩水で0.8%にし3回ろ過したもの）
- ・D, W・・・蒸留水
- ・10%ホルマリン→3.7%ホルマリン原液をD, Wで50mlにメスアップしたもの…（固定、保存のため）

- ・ 2% KOH in D.W. . . . 1, 0 g KOH in 50 ml D.W (透明化のため)
- ・ グリセリンシリーズ . . . (2% KOH : グリセリン = 3 : 1、1 : 1、1 : 3 透明化のため)
- ・ 100% グリセリン {100 ml} + チモール {25 ml} . . . (保存のため)
- ・ ビーカー                      ・ ピンセット                      ・ ペトリ皿                      ・ メスバサミ                      ・ 漏斗
- ・ ろ紙                              ・ テープ (針固定のため)                      ・ 針金 (針とシリコンチューブ固定のため)
- ・ 自作マニピュレーター

## 方法

### 方法 1

有精卵の殻をピンセットで割っていき、ある程度開いたらシリコンチューブに針と注射器を接続し、卵黄動脈または卵黄静脈に造影剤を注入する。成功した場合は、胚を抽出し、10%ホルマリンに漬けて冷蔵庫に一晩入れる。

翌日、ホルマリンを洗浄するために20分間蒸留水に漬ける。この作業を三回繰り返す。そして蒸留水に漬けて冷蔵庫に一晩入れる。

翌日、2% KOH aq に漬けておき一晩冷蔵庫に入れる。

翌日、2% KOH aq とグリセリンの混合液の入った容器に20分間室温で漬けておき、この作業を三回繰り返す。この時、2% KOH とグリセリンの比率が3:1 1:1 1:3の順にしておく。その後、100%グリセリンとチモールの比率が4:1の混合液に漬けて、室温で保存する。

その後顕微鏡で胚の指先を観察する。(注入時の様子図1)

### 方法 2

方法1と同様に行うが、針を35ゲージのものに変えて実験を行う。

### 方法 3

方法2に加え、注入時にメスバサミで一番外の膜を破り、針を固定したところにピンセットを用いて血管を移動し注入する。



## 結果

方法1では針先が太すぎたため血管に思うように入らず、さらに細い歯科医師が用いる35ゲージの針を途中から使用した。

血管に針を刺す際に血管を固定せずに刺そうとすると血管がずれ刺すことに苦労したため、ピンセットとハサミで血管の周りの膜を破り、血管のすぐ脇の体液の中に針を沈めておき、ピンセットで血管をつかみ引っかけるようにして刺すようにした(方法3)。方法3を用いるようにした後、1個も造影剤の注入に成功しなかったという日はほとんど無くなった。ただ、この方法を思いついたのは研究期間が終盤に入った頃なので、あまり多くの造影剤の注入に成功した胚のサンプルを得ることはできなかった。

造影剤の注入は9日目、10日目、11日目、12日目の胚には成功したが、8日目以前、13日目以降は血管が細すぎて針が刺さらなかったり、体毛によって毛細血管を確認できなかったというのが主な理由で造影には失敗した。

観察は、指先までに造影剤が十分に到達しておらず、はっきりと血管が見えず、血管の形成過程を観察することはできなかった。

## 考察

今回の研究は、胚の血管への造影剤の注入は成功したが、肝心の指先までには途中血管が破裂して漏れてしまったというのが主な原因で造影剤がうまく到達していなかった。その理由として、造影剤の血管への注入が成功した胚のうち、日にちが早いほど指先まで到達していなかったことから造影剤の粒子が指先の毛細血管のなかで詰まり、そこで流れなかったり血管が破裂してしまっていたことが考えられる。また、指先以外の部分でも血管の破裂が起きていたので造影剤を注入する勢いが強すぎ、圧力がかかって必要以上の量を血管の中に注入してしまっただめだと思う。

改善策として、今回は目で見てわかりやすいように造影剤に0.8%生理食塩水に溶かした墨汁を選択したが、造影剤の製作過程のうち、ろ過の回数を増やしたり、また、ろ過の際に使用するろ紙をもっと目が細かいものを使用したり、ろ過の方法自体を変えてみたり、もっと適した造影剤を選ぶこと。技術面でも、造影剤を注入する勢い、またどの程度ピストンを押したら一定時間でどのくらい造影剤が出てくるのかということもしっかりとわかっておくということ

が挙げられる。また、できるだけ、胚の外で血管が詰まったり、破裂することを防ぎ、スムーズに胚本体に造影剤を注入できるように卵黄静脈の正確な位置を把握しておくことも挙げられる。

これからの課題として様々な造影剤を試し、ニワトリ胚の血管造影に最も適した造影剤を見つけること。観察が可能な胚のサンプルを8日目から12日目まで一通り完成させ、そして観察に入るということが挙げられる。

使用した墨汁について、今回は市販されている墨汁では粒子が大きいので、書道用の墨を水に磨って溶かしたものを使用した。今回の研究で用いた薬品のうち、グリセリン、チモールは主に防腐剤の役割を果たし、水酸化カリウムはタンパク質のペプチド結合を加水分解することで組織の外形を残し、適度にすかすかにするつまり透明化させる役割を果たしている。血管に造影剤を注入された胚は、すぐには死亡せず、確認したところ40分間は生きていたことから、造影剤が胚の体の隅々まで行き渡ることは可能だったと考えられる。しかし、注入開始からどれくらいの時間生き続けるのかということは、分かっていない。

#### 謝辞

今回の研究で有精卵を数多く提供して下さった岩谷種鶏場の方々  
生まれてきたニワトリの小屋を作って下さった粕谷先生、ニワトリの世話を手伝って下さった  
方々、本当にありがとうございました。

## 参考文献

田中 豊一・津川 龍三(金沢大学医学部病理学教室) 新しい血管の注入法

# 備考

図3～6はニワトリ胚の足の指先を撮影. また, 黒く見えている線は血管.

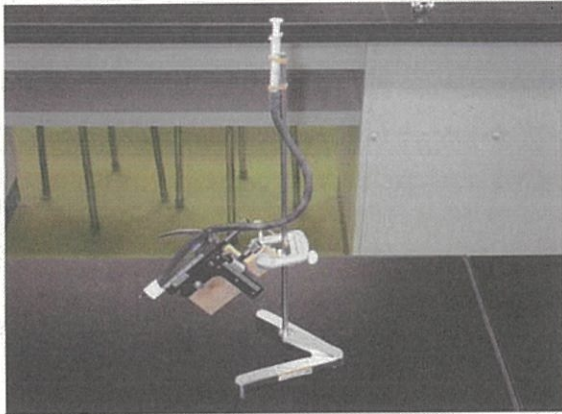


図1



図2 左 35ゲージの針  
右 方法1で作った針



図3 9日目

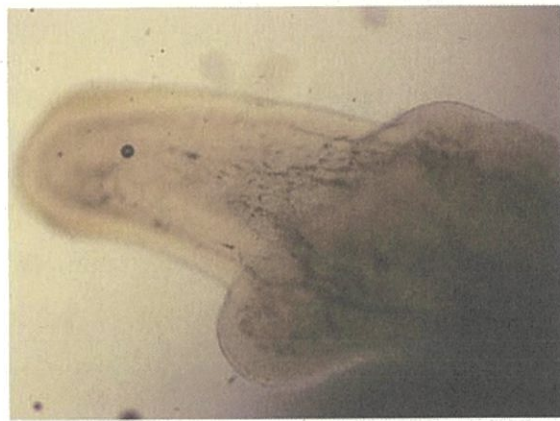


図4 10日目



図5 11日目

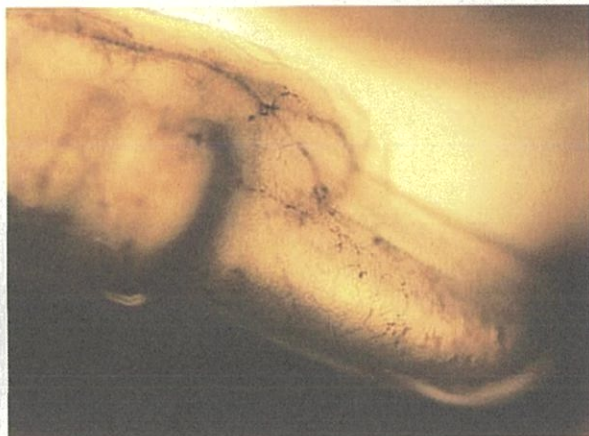


図6 12日目

## メダカの遅筋と速筋

菅原晃生・濟渡厚三・小山慧・熊谷樹・樋口達也

宮城県仙台第三高等学校

### ・要約

効率のよい筋肉トレーニングの方法を模索するため、筋肉の成長モデルとしてメダカを用いた。そこでメダカを水流の強さ別に飼育し、異なった環境で筋肉を発達させ、それらをパラフィン切片にして染色し、観察することで役割の異なる二つの筋肉である遅筋（持久力を発揮する筋肉）と速筋（瞬発力を発揮する筋肉）の面積比を求めた。その結果、メダカは弱水流の環境下において遅筋・速筋ともに成長率が一番高くなった。しかし、強水流、水流なしの環境下では筋肉の成長があまりみられなかった。

### ・はじめに

私たちは運動部の所属人数が多いということもあり、筋肉に興味を持っている人が多かった。筋肉を効率よく増やす方法を知るために、私たちは何らかの生物を使って実験を行うことにした。

当初人間と同じマウスなどの哺乳類を用いて実験をしようとした。しかし、マウスは解剖が困難で飼育にもコストがかかると知り、それでは研究をしづらいと考えた私たちは安価で筋肉構造が人間に近いと言われているメダカを用いて実験を進めることにした。

人間もメダカも同様に遅筋と速筋という役割の違う筋肉を持っている。その筋肉に着目した私たちはメダカの初期の筋肉面積からの遅筋と速筋の成長比を知ることで人間にも応用できるのではと考えた。なお、メダカを飼う際には水流を強水流・弱水流・水流なしの三種類として、その水流別の初期値からの筋肉面積の成長比を遅筋・速筋の成長とみる。そして、その結果を基にして、水流の速さを人間の筋肉への負荷に置き換えることで日頃の私たちの筋肉トレーニングに生かすことができると考えた。筋肉トレーニングの効率化が図れれば私たちの部活にもよい形で反映できると思う。

### ・方法

step1[メダカの飼育]

1. 市販されているメダカ45匹を用意
2. メダカ十五匹ずつを強水流、弱水流、水流なしの三種の水槽に分け飼育する。
3. 強水流の水槽内での水流の速さは毎秒15.48センチメートルとする。
4. 強水流は1時間おきに30秒間流す。この作業を一日に十二回行う。

5. 弱水流の水槽内での水流の速さは毎秒 1.902センチメートルとする。
6. 弱水流は24時間流しっぱなしとする。

水槽のサイズは統一した。(図1)

メダカに与える餌は一日一回、0.05gとする。

メダカを一ヶ月飼育する。(図2)

一ヶ月後時点でメダカの生存数は強水流で1匹、弱水流で3匹、水流なしで2匹、計6匹だった。

#### step2[パラフィン切片化1～固定・脱灰・脱水・パラフィン包埋～]

1. 飼育したメダカを2日間断食させる。
2. そのメダカを500ミリリットルの水の中に入れる。
3. フェノキシエタノール約10ミリリットルを水の中に入れてメダカを麻酔死させる。
4. それをピンセットでシャーレに移し、脱水のために体が浸るまでブアン液を入れる。
5. ブアン液の浸透を1時間待機する。
6. その後、メダカの体重の平均をもとめてその体重の20倍のブアン液に入れる。
7. ブアン液の浸透を3日間待機する。
8. メダカをブアン液から取り出して脱水のために濃度70パーセントのエタノールにつける。
9. 1時間待機して70パーセントのエタノールから80パーセントのエタノールに移す。
10. 1時間待機して80パーセントのエタノールから90パーセントのエタノールに移す。
11. 1時間待機して90パーセントのエタノールから95パーセントのエタノールに移す。
12. 1時間待機して95パーセントのエタノールから95.5パーセントのエタノールに移す。
13. 1時間待機して95.5パーセントのエタノールから100パーセントのエタノール(1)に移す。
14. 1時間待機して100パーセントのエタノール(1)から100パーセントのエタノール(2)に移す。
15. 1時間待機して100パーセントのエタノール(2)からキシレン(1)に移す。
16. 1時間待機してキシレン(1)からキシレン(2)に移す。
17. その後58℃のパラフィン(高密度のロウ)にメダカを入れる。(図3)
18. 1時間待機して72℃のパラフィンに移す。
19. 1時間待機して77℃のパラフィンに移す。
20. ここで完成したパラフィン切片を安定させるために木片に付ける。(図4)

#### Step3[パラフィン切片化2～切片作成～]

1. パラフィン切片をマイクロトーム(図3)で5マイクロメートルの厚さにスライスする。
2. 適温である40℃のお湯にスライスした切片を浮かべる。

3. 切片を熱した針を用いて切り離す.
4. うまく切り離せた切片をスライドガラスに乗せ、45℃を保ったまま一晩乾燥させる.

Step4[パラフィン切片化3～染色～]

1. スライドガラスをキシレン(2)・アルコールに浸して処理する.
2. エタノールで親水処理する.
3. ヘマトキシリン・エオシンをつかって染色する.
4. 再びキシレン・アルコールに浸して処理する.
5. ビオライトで染色した切片を封入する.
6. ビオライトが乾燥するまで一日待つ.

Step5[観察・計測]

1. 顕微鏡で観察する.
2. 「長さ・面積測定Free」lenaraf220bというソフトを使って筋肉の面積を計算する.
3. それぞれの水流での筋肉面積を比較する. (表1) (図4)

・結果

今回の実験でメダカの体長は大きくなったが、遅筋と速筋の成長の比をみるとあまり変化はなかった。体長の成長が顕著に見られたものとしては表1からわかるように弱水流だった。

	速筋 mm <sup>2</sup>	遅筋 mm <sup>2</sup>	全筋面積 mm <sup>2</sup>	速筋の 割合%	遅筋の 割合%
強水流	2.41	0.15	2.56	94.14	5.86
弱水流	5.09	0.23	5.32	95.67	4.33
水流なし	2.18	0.11	2.29	95.34	4.66

表1：飼育一ヶ月後のメダカの筋肉面積

・考察

図4及び表1より強水流の筋肉面積が弱水流の筋肉面積とあまり変化がないという結果から予想できることとしては、強水流の威力が強すぎたために餌の量のわりに運動量が増えてしまって、それ故に成長すべき筋肉量を成長しなかったものと考えられる。また、個体によって餌の量が均一でなかったことが考えられる。体長の成長が顕著に見られたのは表1からわかるように弱水流だった。

これは、弱水流は強水流に対して水流を与える時間が長かったことが原因だと考えられる。また、水流なしの水槽で体長自体は大きくなっていることから現在の飼育環境で成長は十分に見ら

れるということが分かった。

以上を踏まえて、今後の課題はメダカを飼い初めた時点での筋肉の面積、メダカの雌雄の区別、メダカの食べた餌の量、適切な水流の速さなど実験を開始する以前に調べておくべきことを見逃していたこと。また、強水流と弱水流を与え続ける時間を同じにしておくべきだったということ。これらの改善すべき点が多々あったので今回は実験の正確さを欠くものとなってしまった。

今回の実験で一つ一つの作業をメダカのことをいたわる気持ちでやらないといけないと分かったし、スライドガラスを浸すだけの作業にしても気を配ってやらなくてはいけないとも分かった。私たちの班は生物班ということでメダカの命を扱っている訳なので、これからは飼育も今まで以上に丁寧にして実験を進めていきたい。



↑強水流                    ↑止水                    ↑弱水流

図1：メダカの飼育時の環境

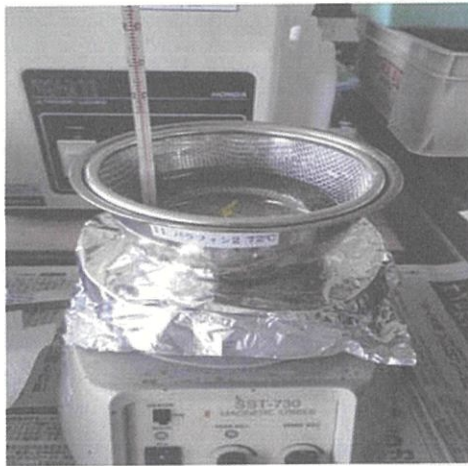


図2：パラフィン切片作成の様子



図3：マイクロトームの図



図4：水流別にしたメダカの筋肉の断面（尾鰭付近）



# 三高の桜の組織培養

生物班

仙台第三高等学校

石井 伸幸 伊藤 隼 高橋 颯一郎

## ◎要約

かつての桜咲き誇る春の三高の風景を取り戻すため、私たちは組織培養法の一つである茎頂培養を用いて桜の増殖を試みた。最初私たちは、菌の侵入を許さない繊細な作業を必要とする培養に手間取ったが現在は、目指したシュート形成が見られそうな状況にある。今後は、このシュート形成しそうなものの観察を継続し、また茎頂培養も継続して、桜の増殖を目指していく。

## ◎はじめに

仙台第三高等学校の旧校舎にはたくさんのソメイヨシノが植えられていた。しかし、新校舎建築の障害となるという理由で、木が切り倒され、現在桜は数えるほどしか残っていない。そこで私たちは旧校舎の時のように桜が咲き誇る風景を取り戻したいと考え、桜の増殖を課題研究のテーマに選ぶことにした。しかし、桜は自家受粉しないため、種子からの増殖はできない。種子増殖以外で、桜の増殖法として考えられるのは、「挿し木」「接ぎ木」「組織培養」の3つの方法だが、挿し木や接ぎ木で増殖する方法は、広い土地が必要なおうえ、成果を確かめるのに長い期間が必要となるため、私たちには不向きである。一方「組織培養」は、生物室などの限られた空間で、季節に関係なく、しかも短期間で成果を確かめる事ができるため、これは私たちの環境に適している方法といえ、私たちはこの「組織培養」に取り組むことにした。しかし、一般的に行われている「組織培養」には例えばMS培地のような高価な試薬を多数必要とする培地が用いられていて、これは限られた予算内で行わなければいけない私たちの研究には使用が難しいと、そこで、私たちはすでに培養用の培地に用いられ、培養の成功例もいくつか報告されている安価な家庭園芸用化学肥料のハイポネックスを用いた培地を使って、研究を行うことにした。

## ◎材料と方法

<培地作成>以下,材料の量は1 Lあたりの量とする.

培地は,使用目的に応じた三種類を作った.その三種類の培地は,それぞれ培地 A,培地 B,培地 C と名づけた.これらのうち培地 A,B は初代培養用,培地 C は継代培養用である.

培地 A,B,C に共通して液体ハイポネックス2.5 ml,シヨ糖20 g,ビタミン類の不足を補うためのリポビタミン D 10 ml を用いた.植物ホルモンは6-ベンジルアミノプリンとジベレリンを用い,培地 A には6-ベンジルアミノプリン1 mg,培地 B には6-ベンジルアミノプリン4 mg,ジベレリン4 mg,培地 C には6-ベンジルアミノプリン0.5 mg とした.各培地の pH は pH 5.7~5.8に調整した.各培地は同様に寒天を8 g 入れた.

<初代培養>

採ってきた休眠芽を70%エタノールに数秒,次亜塩素酸に10分間浸し,この後,クリーンベンチ内で滅菌水で洗浄する.休眠芽から成長点を摘出し,この成長点を培地 A,B に置床した.これを25℃に設定したインキュベーターに入れておく.

<継代培養>

初代培養で,シュートを形成したものを継代培養する.この培地には,培地 C を用いる.継代培養したもの(初代培養を始めてから3ヶ月を基準とし,シュート形成が見られないものは観察及び実験の継続をやめることとする.)も,初代培養の時と同様,25℃に設定したインキュベーターに入れた.

## ◎結果

現在まで計70本の培養を行ってきた.6月から10月まで初代培養は全て菌の侵入があったため破棄した.10月以降に初代培養したものは肥大化したが,シュート形成には至らなかった.現在の培養の詳しい状況については以下の表にまとめた.

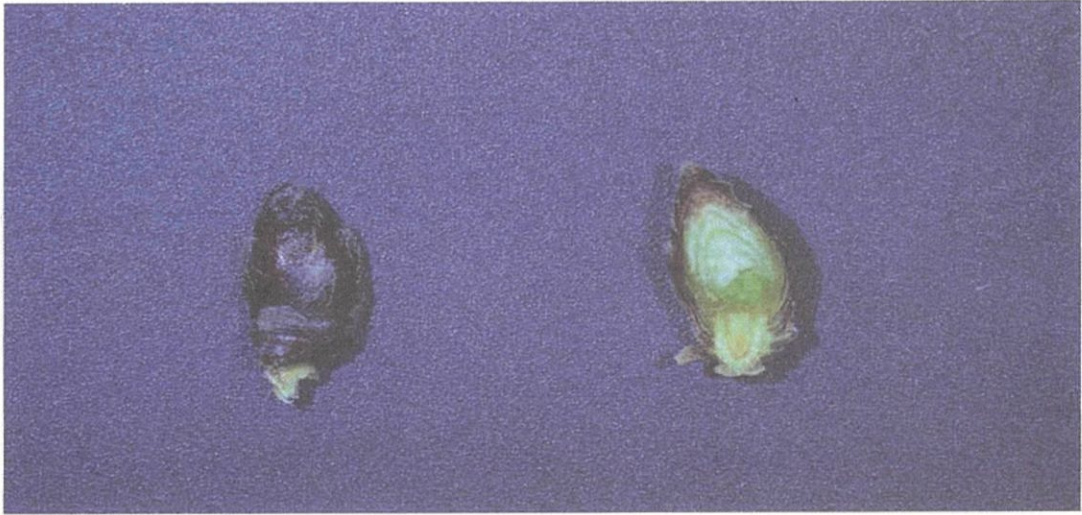
初代培養	培養数	現在成長を観察中のもの
12月14日	7本	7本
12月7日	14本	14本
12月1日	17本	17本
11月	10本	0本
10月以前	22本	0本

## ◎考察

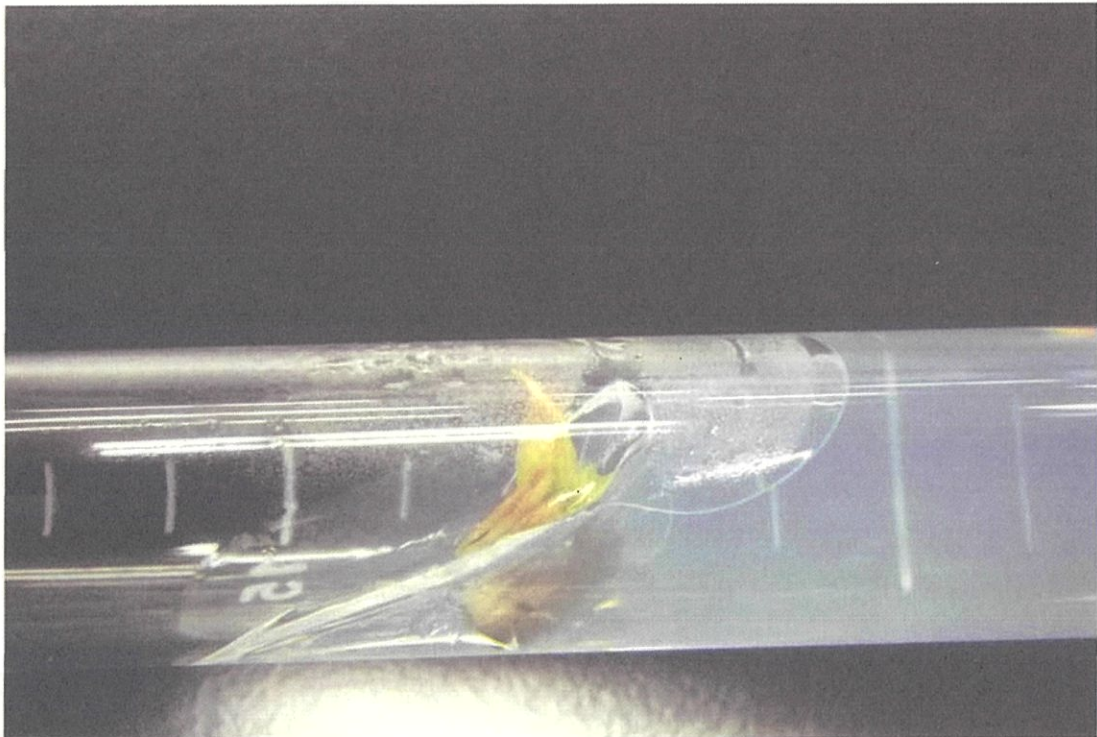
6月から初代培養を始めたが、9月まで一つもうまくいかなかった。気温の高い夏には、菌の繁殖率が高いためコンタミが起こりやすい。また、桜の成長点自体のホルモンバランスによるものと考えられる(論文を参考にした)。また他に、私たちの技術不足によるものも考えられる。10月から現在にかけては、初代培養した細胞に肥大化が見られるようになった。これは、この時期は桜の芽が春に向けての栄養を貯めていることや、暑い時期より菌が少ないため培養自体が成功しやすくなっていることが考えられる(論文を参考にした)。この結果から寒い時期に初代培養を行ったほうが良いことが考えられる。また、現在までのところ、継代培養の成功がなく、このことから培地に加える植物ホルモンの量も改善が必要と考えている。今後はシュート形成したものの継代培養行っていくとともに、どのような培地組成が適しているのかを考えて、次の研究を続けていく予定である。

## ◎参考文献

- ・天然記念物の梅護寺桜珠数掛桜の茎頂培養法による増殖と若木の獲得 笠原俊策、韓東生、新美芳二  
平成19年7月2日受付
- ・茎頂培養法によるエゾヤマザクラの大量増殖 北林試研報 1994年
- ・Woody plant medium (LLOYD et al., 1980)
- ・組織培養でサクラを増やす 佐藤 孝夫



三高のソメイヨシノの成長点



現在初代培養段階のソメイヨシノの細胞

# 津波による波の変化

久保田拓海 菅浪誉騎 小野寺威 千葉大義

宮城県仙台第三高校

## 要約

2011年3月11日千年に一度とも言われた東日本大震災が発生した。しかし、津波の被害は標高も震源からの距離もあまり変わらないのに、地域によって大きく異なっていた。波高の違いは地形の違いによると考え、様々な地形による波高の変化を実験により確かめた。地形と波高の関係は、教科書通りの結果が得られたのでこの実験装置が現実の津波の傾向を考察するのに適していると考えられる。

## はじめに

2011年3月11日、東日本大震災が発生した。この地震は太平洋プレートと北アメリカプレートの境界域における海溝型地震で、震源域は東北地方から関東地方にかけての太平洋沖の幅約200km、長さ約500kmにもわたる広範囲となった。さらに、この地震によって大規模な津波が発生した。最大のもので海岸から6kmの内陸まで浸水し、岩手県三陸南部、宮城県、福島県浜通り北部では津波の高さが8m～9mにも達し、1896年・明治三陸地震の津波を上回る最大潮上高40.5m(岩手県宮古市)を記録するなど、震源域に近い東北地方の太平洋岸では、津波が甚大な被害をもたらした。関東地方の太平洋岸でも被害をもたらしたほか、環太平洋地域を中心に世界中に波が到達した。また、岩手県から千葉県にかけて震度6弱以上を観測するなど広範囲で強い揺れとなり、関東地方の埋め立て地等で大規模な液状化現象が発生し、この地震による巨大な津波は東北の沿岸部を中心に様々な地域に多大な被害を残した。しかし、震源からの距離や標高に関係なく被害に差が生じていた。この現象を不思議に思い調べたところ波は地形によって高さや速さが変わることが分かり、その差がこのような変化をもたらしたと考えた。そこで私達は、この波を変化させる地形の条件について詳しく調べることにした。

ここで、津波発生メカニズムについて説明する。・・・図1

津波が発生する原因のほとんどは、海底地震によるもので、急激な海底の変形に伴って海面が変動し、ちょうど池に石を投げ入れたときと同じような波になって四方に広がっていきます。この波が伝わる速さは、海が深いほど速くなる。たとえば水深40mなら時速72kmと自動車程度だが、水深4,000mでは時速720kmとほぼジェット機並の速さになる。そして、津波の波長(波の山と山の間の長さ)は10～100kmと普通

の波の波長より長く、沖合いでは波高(波の高さ)が2~3m程度のために気づかないといわれる。ところが、沿岸などの平坦な海岸では最初の波が陸に近づき水深が浅くなるにつれて、急ブレーキがかかる。すると第二、第三の波がそれに追いつき、乗り上げるような形となるために沿岸部で波高が急激に高くなってしまふ。

また、リアス式海岸の様な湾奥が狭くなり水深が急変する地形では、エネルギーが一気に集中し、波が陸上高くまで駆け上ることがある。

## 材料と方法

今回の実験方法として、波の高さの変化の計測法は以下の様にし、アクリル水槽の実験装置を使うとする。

・波を均一に発生させることのできる装置を発泡スチロールを用いたものと、アクリル水槽を用いたものの二つを作成する。

・実験装置で発生させた波のうち、おもりを100gずつ足していき500gまでの波を対象とする

・発生させた重りごとの波をデジタルカメラで撮影する

・撮影した波のうち1つの場所を固定しその位置での最高点を計測する

・5種類の地形のパターンを作成し、実験行う

なお今回は二つの実験装置を作成したが、発泡スチロールの実験装置は波の形の変化をみるものとして、波の波高を計測するのものにはアクリルの水槽を用いた方が見やすいという理由からアクリルの実験装置を使用した。

<今回設置した波の条件について>・・・図3

パターン1:何も設置しない基本型   パターン2:直線の地形の直線型   パターン3:奥に行くほど狭くなっていくV字型   パターン4:奥に行くほど広がっていく逆V字型   パターン5:一度狭くなるが広がっていく溪谷型

これらのパターンでの波の高さの変化をみる。

#### <実験装置について>・・・図4

今回の実験に使用した実験装置は、すべて自分たちでの手作りとなった。作るにあたってすべての実験において均一なエネルギーで波が発生させられるように注意した。また、今回の研究の動機でもある東日本大震災のような巨大地震によって引き起こされた津波に近い波を発生できるように海面が持ち上げられることで波が起きるように作成した。しかし、地震によって発生される波の特徴である波長の長い波を再現することはできなかった。

#### <装置の材料>

10Lの亚克力水槽 プラスチックダンボール タコ糸 クリップ 滑車 スタンド 100gの重り5個

#### <波の発生方法>

波を発生させる仕組みは、水槽の側面にプラスチックダンボールを底面にかかるようにL字に張り付ける。そのプラスチックダンボールの先にタコ糸のついたクリップを付ける。つけた糸を滑車に通して、その先に重りをつける。その重りを一定の位置から落とすと、底面の部分のプラスチックダンボールが持ち上がりその力で波を発生させることとする。

## 結果

これらの実験結果は次のようになりました。

表1

重り(g)	基本型 (mm)	直線型 (mm)	V字型 (mm)	逆V字 (mm)	溪谷型 (mm)
100	2	4	1	1	1
200	3	16	30	12	3
300	10	22	35	14	23
400	20	24	40	31	31
500	28	30	43	40	25

この表をグラフにまとめると図2のようになる。

・図2から分かるのは、V字型の地形は基本型を大きく上回っていることや、渓谷型だけが基本型を下回っている事、波については簡単な式で表すのは難しい事などがわかると思う。

## 考察

これらのことから、V字型の地形や渓谷型の地形で一般的に言われているような波の変化の傾向が見ることが確認できた。また、これらの変化は、波が入り組んだ地形に集まるのでそれによって波が高く変化するためや、一度集まった波が再び分散されてしまうのでこのような結果になってしまうのではないかと考えられる。また、直線型の地形でのグラフの変化については発生させた波が条件の地形に沿って持ち上がるような変化をしているために威力の強い波ほど高い値へと変化をするのではないかと考えられる。しかし、今回発生させた波は津波のようにとても大きな波長の波を再現することができないが、現実の波に近似した波の再現が可能であり、この装置で様々な地形に発生する波を計測することができる。

## 謝辞

大型の実験装置の材料としてカツオの入っていた発泡スチロールの箱を2個提供してくださった、三高の近くにある魚屋の「魚富」さん急な訪問にも関わらず快くご提供していただきありがとうございました。

## 補足

<波と津波の違いについて> 波と津波の違いについては、波は風によって海面上だけで発生するものなので波長が短くなる。しかし、津波の場合は次々と後ろから追いつために波長が長くなる。

<図2>

・縦軸は波の高さ(mm) 横軸は重りの重さ(100 g)を表している。

<図3>

・これらの4つの地形は実際では・・・直線型は、崖に面しているような海岸。V字型は、入江のような地



形。逆V字型は岬などの地形。渓谷型は、湾などの地形を想定している。

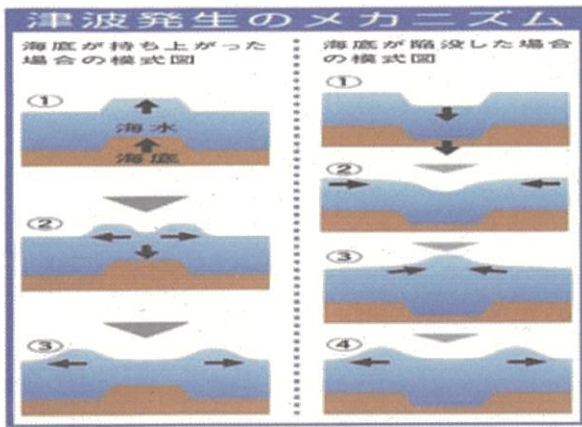


図1

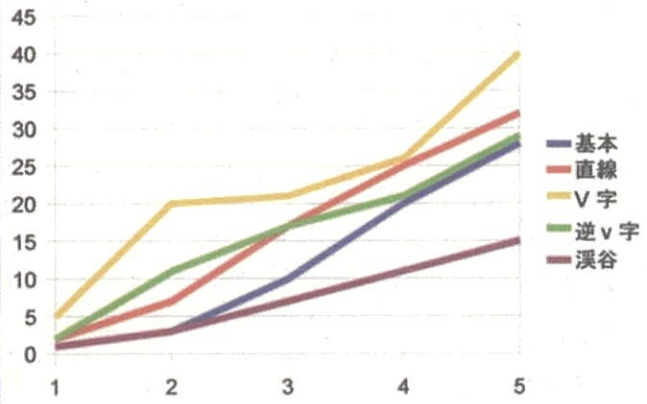


図2

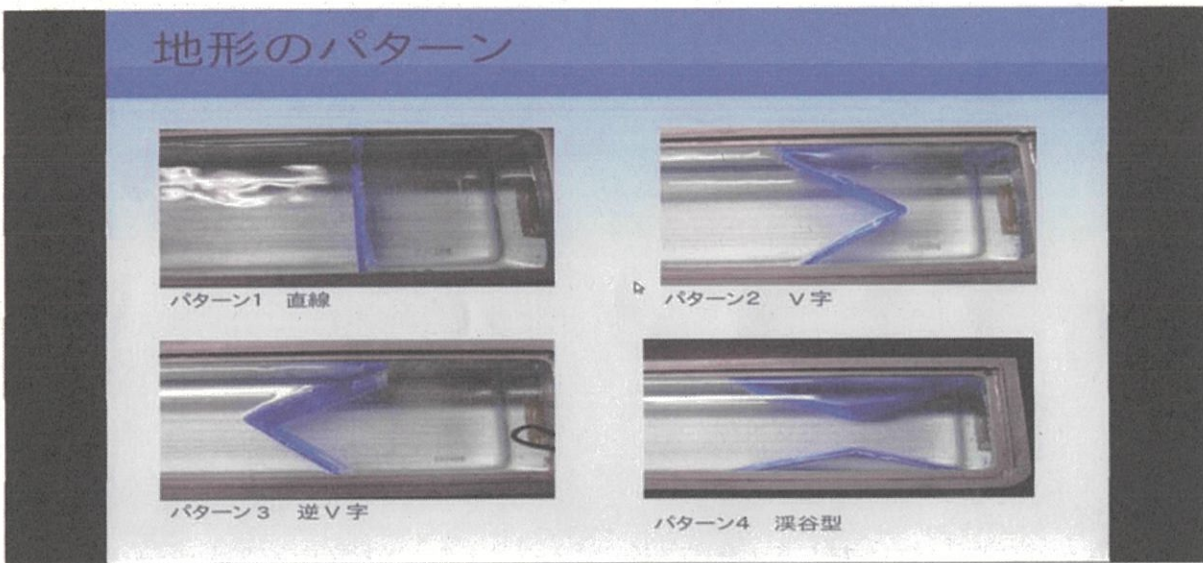


図3 地形のパターン

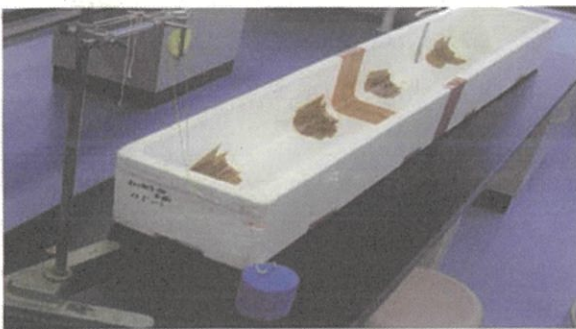


図4 作成した装置

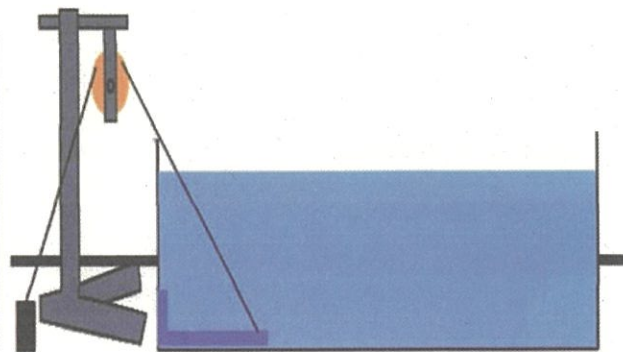


図5 装置の模式図

# 文化の流布のシミュレーション

田村俊介 ・ 安部民将 ・ 河東悠斗 ・ 早坂諒也

宮城県仙台第三高等学校

## 要約(Abstract)

コンピュータ・シミュレーションの可能性を探るため、アクセルロッドの解説に基づき、様々な社会現象について取り扱ったシミュレーション・モデルであるエージェント・ベース・モデルを用いたシミュレーションを試みた。その題材として、文化の流布を取り扱った。私たちはシミュレーション・モデルにおける世界の大きさや時間、着目する文化の種類やその文化の揺れ幅といった設定を変えることで、文化の流布にどのような傾向が見られるのかを調べた。結果として、時間(セッション数)の変更では、最大文化圏が世界に占める割合が一定までは時間にしたがって大きくなることが分かり、世界の大きさの変更では、「一番大きい文化圏が『世界』に占める割合」が定まる方向性に影響はないということが分かり、着目する文化の特徴の項数の変更では、最終的には数個の文化圏に収束することが分かり、世界の端の有無の違いでは、世界の端を設けない場合、文化が収束しにくいということが分かった。

## はじめに(Introduction)

西欧化、アメリカナイズ、資本主義化などの一極化が見られる一方で、文系と理系、伝統と最新科学機器、貧富の差、民主主義と民族主義、などの分極化も顕著となっている。隣接する国や民族が何らかの交渉・交流を行うとすれば、やがて一つの文化圏を形成するように思われるが、実際にそうなのか、コンピュータ内で再現しようと試みた。

コンピュータを用いたシミュレーション技術は科学や科学技術だけでなく、社会科学にも応用されている。アクセルロッドは、その著書の中で、さまざまな社会現象にシミュレーション・モデルを適用している。今回、アクセルロッドの解説にしたがい、文化の流布について実際にコンピュータ・シミュレーションを試みることにした。

言語、服飾、食生活、儀式、など国家や民族が保有する文化をそれぞれ数値として扱い、同じ数値を保有する集団ほど隣接地域との文化の交流が起こるという、単純化したコンピュータ内のモデルでは、文化の流布にどのような傾向が見られるのか、シミュレーションしてみた。

## 方法(Methods)

アクセルロッドの説明に基づいて、プログラミング言語Cで作られたプログラムに関して以下の条件を変更しシミュレートすることで、その条件が文化の流布に及ぼす影響を調べた。

- ・セッション回数(時間)
- ・世界の大きさ
- ・着目する文化の特徴の項数
- ・世界の両端のループの有無(球体世界か、平面世界かの違い)

なお、今回の実験において、世界の基本となる条件を以下のように設定する。

- ・世界の大きさ 10×10
- ・着目する文化の特徴の項数 5
- ・文化の特性の個数(揺れ幅) 10
- ・セッション回数 30000
- ・世界の両端のループ なし

また、モデルとしての「世界」と文化の設定を以下のように定める。

- ・二次元の正方格子を「世界」とする。
- ・各格子ごとに村がある。
- ・各格子(村)の住民は移動しない。
- ・各格子(村)の住民は近隣(東西南北)の格子(村)とのみ交渉を行う。
- ・各格子の住民が持つ文化を、言語、宗教、技術、食習慣、服飾などで記述できるものとする。
- ・これらの文化的特徴(feature)は、10の特性(trait)で表すことができる。たとえば、日本語という特徴について、津軽弁、仙台弁、山形弁、といった特性が10ある、など。
- ・隣接格子(村)との間で、ランダムに住民の接触が行われる。
- ・住民の接触が行われると、ある確率で文化の伝播が行われる。すなわち、特性が同じ文化的特徴を持っている村どうしほど文化のは起こりやすい。また、実世界では住民は移動することや、文化の伝播だけでなく、争いによる文化の拒否も起こりうることや、政治などによる文化の流布に対する「力」が関係することなどがあるが、この「世界」ではそれらの関係がないものとする。

実際のプログラムとしては、以下の通りである。

「世界」を正方形の二次元配列として準備する。

各格子(セル)に5つの文化的特徴を用意し、それぞれに10の特性を数値として与える。

これは5桁の数字で文化の属性を表現したことになる。

「世界」の開始

「世界」からランダムに1つのセルを選ぶ。

選ばれたセルの隣接セル(上下左右4セル)からセッション対象を選ぶ

セッション対象となったセルと文化の属性値(5桁の数字)を比較する

見つかった同じ値の個数に応じた確率で、文化の伝播を起こさせる

すなわち基本の条件においては、

同じ文化的特徴の個数	4	80%
	3	60%

2以下 40%

の確率で、ある1つの文化的特徴について、隣接セルの値が選ばれたセルにコピーされる。

失敗した場合、文化の変更は起こらない。

この流れを1回のセッションとし、これを繰り返す。

以上のシミュレーションにより得られた結果のデータを分析することで、各条件が文化の流布に与える影響を調べた。

## 結果(Results)

### (i) セッション回数

図1はそれぞれセッション回数15000, 50000回時点で、残っている文化の数を統計したものになる。グレーのグラフが50000回、黒のグラフが15000回のものである。また、試行回数はそれぞれ400回になる。

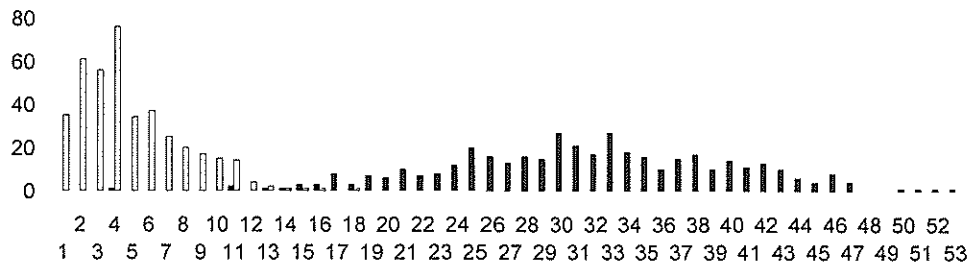


図1 縦軸:試行によって出てきた回数, 横軸:異なる文化の数 グレー:50000回 黒:15000回

この図を見て分かるとおり、15000回では文化の数にばらつきが多いが、50000回ではそれがほとんど見られず、しかも文化の数が著しく少なくなっている。したがって図より文化の数が時間にしたがって減少することが読み取れる。このことから、もっとも大きな文化圏が世界全体に占める割合も、時間とともに大きくなっていくだろうことは容易に想像がつく。そのことを確かめた結果、セッション回数15000, 30000, 50000ではそれぞれその割合が大体15%, 30%, 80%ほどになる事が分かった。

以上のことをまとめると、二つになる。

- ・文化圏の数は時間にしたがって減少する。
- ・最大文化圏が世界に占める割合は、一定までは時間にしたがって大きくなる。

つまり、このシミュレーションは、この実験の範囲では実際の文化とそれほど遠くない結果を

戻すと考えられる。

(ii)世界の大きさ

「世界」の大きさを5×5, 10×10, 11×11に設定した場合は100回, 6×6, 7×7, 8×8, 9×9に設定した場合は50回の試行をそれぞれ行った。なお、本来試行回数を合わせるべきであったが、5×5, 10×10, 11×11の場合においては、文化がどのくらい収束するかの方向性を調べるにあたって、50回では方向性が見えづらいため100回とした。

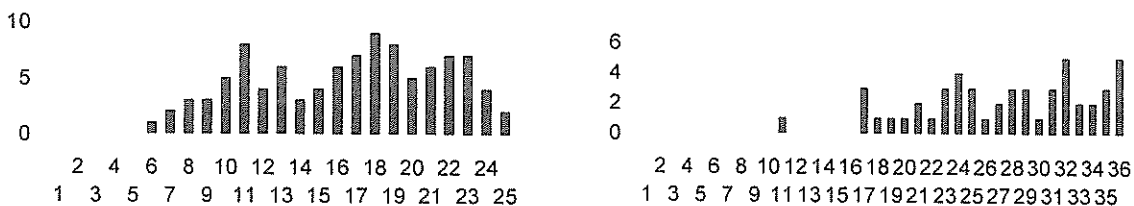
表1

世界の大きさ(縦の村の数×横の村の数)	5x5	6x6	7x7	8x8	9x9	10x10	11x11
もっとも大きい“国”が占める世界の割合(%)	67	76	80	76	75	41	20

集計したそれぞれ「世界」の大きさにおいて「一番大きい文化圏が『世界』に占める割合」を示した表が下の表1となっている。また各「世界」の大きさにおいて「一番大きい文化圏」の大きさ(村の個数)を一回の試行ごとにカウントし、出てきた回数とその大きさをグラフにしたものが、下の図2のグラフ1~7である。このグラフを見て分かる通り、5×5では18付近に収束(約72%)している試行が多い(11が出た回数が多くなっているのは、確率的な問題であるとみられる)。6×6~9×9にかけては5×5のグラフの形から、だんだん「一番大きい文化圏が『世界』に占める割合」の高い結果が多くみられるようになるのと同時に、「一番大きい文化圏が『世界』に占める割合」にバラつきが目立つようになってきている。そして10×10では、非常に数値がバラついていて、かつその「世界」においての村の総数の半分以下に落ち着くことが多い。11×11においては他のグラフの形とはほとんど異なり、村の総数の半分以下に集中している。

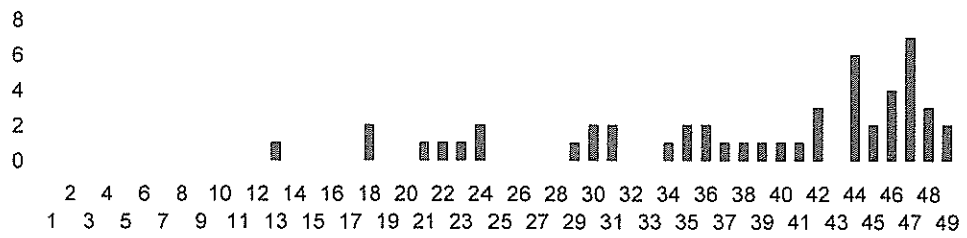
図2 以下のグラフにおいて

縦軸：試行によって出てきた回数(回) 横軸：一番大きい文化圏の村の個数(個)

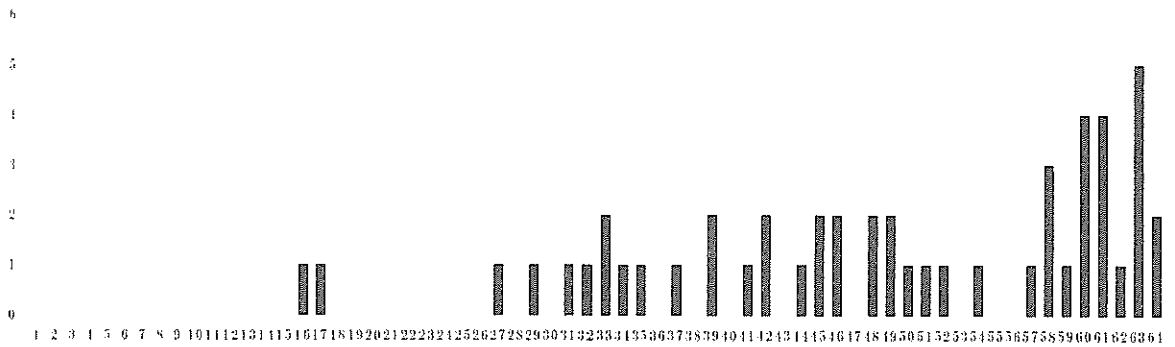


World Size 5x5 [図2-グラフ1]

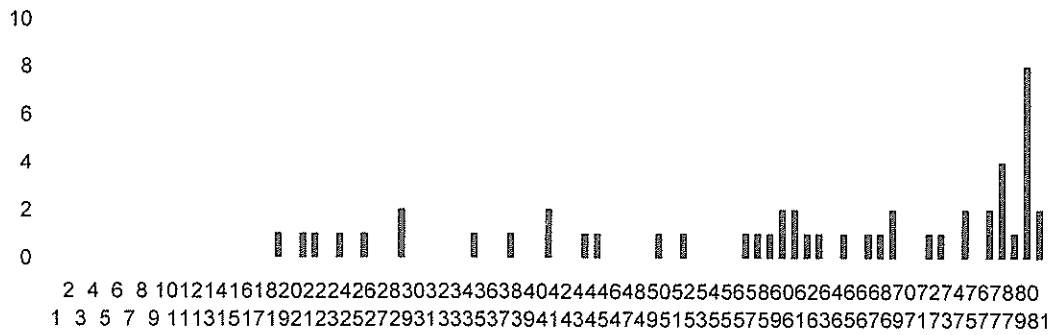
World Size 6x6 [図2-グラフ2]



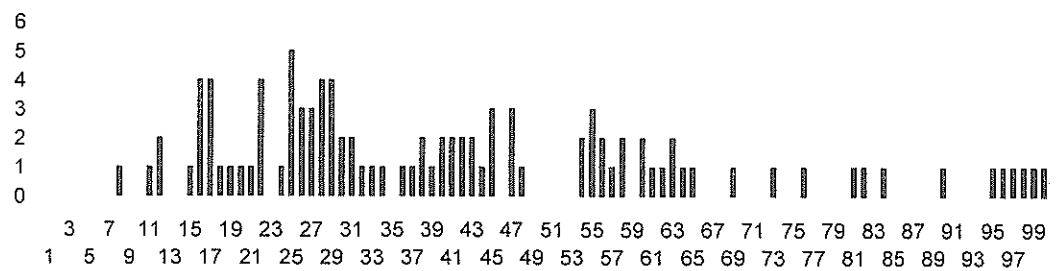
World Size 7x7 [図 2-グラフ 3]



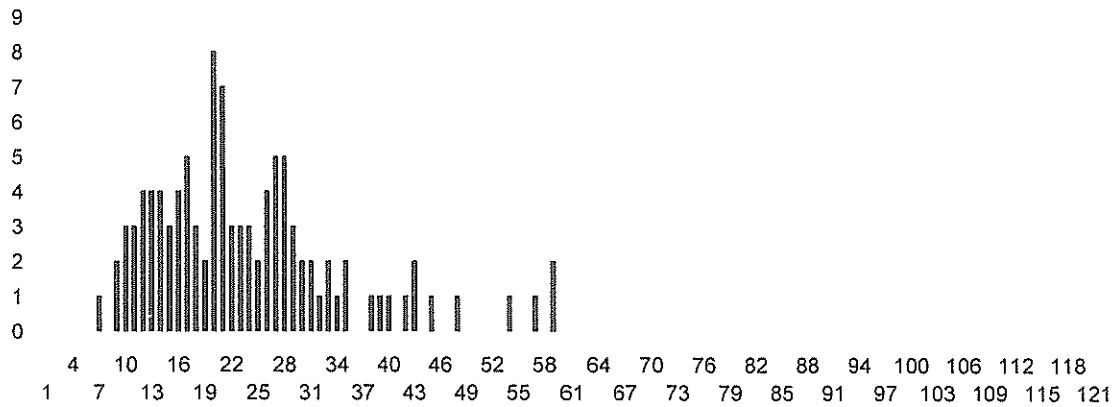
World Size 8x8 [図 2-グラフ 4]



World Size 9x9 [図 2-グラフ 5]



World Size 10x10 [図 2-グラフ 6]



World Size 11x11 [図2-グラフ7]

(iii) 着目する文化の特徴の項数

図3は横軸がセッション数、縦軸が国の数を表している。黒■、グレー◆、グレー▼、黒▲のグラフはそれぞれ文化数を2, 4, 6, 8に変化させたときの文化圏の数の推移である。また、文化圏の数は50回の試行の平均値をとった。文化数が2のときはセッション数6500回時点の文化圏の数が少なめだが、最終的な文化圏の数は他と比べ圧倒的に多い。それに対して、文化数が8のときはセッション数5000回時点の文化圏の数が多いが、最終的には収束して少なくなっている。

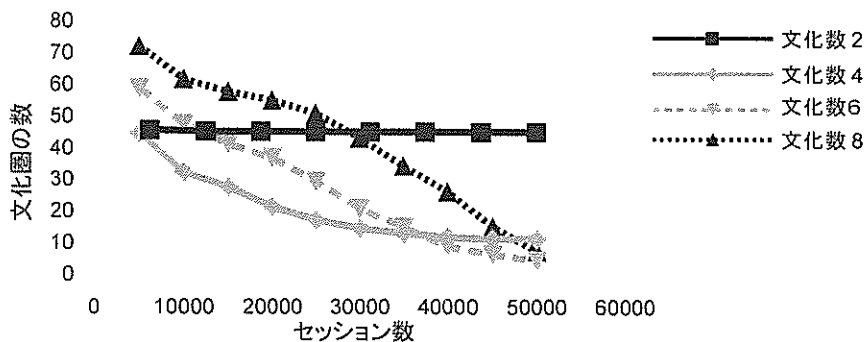


図3

(iv) 世界の端の有無

(i), (ii), (iii)では、世界を平面の世界として仮定していたが、(iv)では世界の端を反対側の端とつなげる(セッション対象として選べるようにする)ことで、3次元の世界に近い状態に設定した場合での、文化の広がり方を調べた。

方法は世界の端を設定しているものと、していないものとの50回検証し、セッション数10000ごとに文化圏の数を数え比較した。また、セッション数50000のときでの、最大文化圏の世界を占める割合を調べ比較した。その結果、前者の結果は図4のように、世界の端がある場合の方が文化の収束に向かう過程で、文化圏の数が端がない場合と比べ、少ないという結果となった。後者の結果は図5のように、わずかながら端がない場合の方がもっとも大きい文化圏が世界を占める割合が高い結果となった。

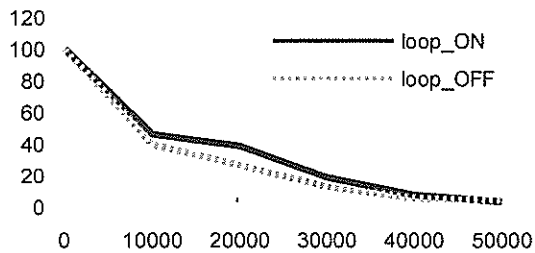


図4 縦軸:文化圏の数  
横軸:セッション数

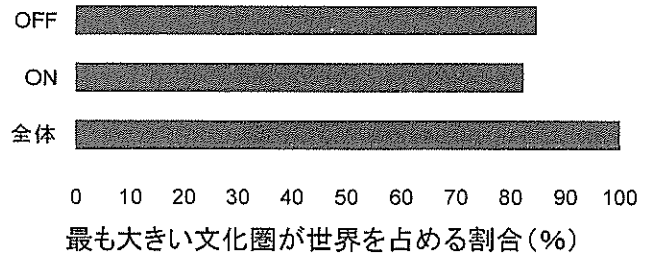


図5 最も大きい文化圏が世界を占める割合(%)

#### 考察(Discussion)

(i)最大文化圏の割合はロジスティック曲線を描くように値が変化するだろうと考えられる。なぜそう考えられるかという点、以下の点が上げられる。

- ・文化が増えるにはある程度の文化が必要。
- ・文化が増えすぎると、異なった文化が残り停滞する。

このことから、初めは緩やかに、中盤は急激に、終盤は緩やかに増えて一定値で止まる。つまりはロジスティック曲線のように推移するだろうと考えられる。これはエージェントベースモデルのもともとの利用法を考えれば当然の帰結であるが、今後は厳密なデータを集めてグラフにしてみたいと思う。

(ii)10×10及び11×11の大きさの「世界」における「一番大きい文化圏が『世界』に占める割合」は、表1から分かるように、他の5×5～9×9の大きさの「世界」のものとは大きく異なっているように思われる。しかしここで図2の各グラフを見てもらいたい。各グラフを比較すると、とりわけ10×10、11×11のグラフでは、「一番大きい文化圏」の大きさが他と比べても大きくバラついているように見える。加えて、特に11×11のグラフにおいて、「一番大きい文化圏」の大きさが村の総数の半分以下に集中していることから、10×10、11×11の条件では、他の条件の場合よりも、ある程度収束の方向性が見られるまでに多くのセッション回数を必要と



するが、今回の設定であるセッション数 30000 回では、セッション回数が不足していると思われるため、「一番大きい文化圏が『世界』に占める割合」が低いのではないのか、ということが考察ができる。つまり、「世界」の大きさを変更しても、最終的には「一番大きい文化圏が『世界』に占める割合」の方向性には変化がないということが考えられる。

(iii)文化数が極端に少ないと、文化の類似度が低すぎて「交流」が非常に成功し辛い。よって最初の文化圏の数からほとんど変化がないと考えられる。文化数を多くすると、文化の組み合わせが多くなるため、最初はたくさんの国が存在することになる。しかし、文化の類似点が多くなるので「交流」は文化数が多いほど成功しやすくなり、最終的にはほんの数個の文化圏に収束する。文化数は多いほど収束しやすくなるが、図3のグラフでは文化数が8のときより6のときのほうがセッション終了時の文化圏の数は少ない。これは、文化数を増やすとすべての文化的性質が一致するまでにより多くのセッションを必要とするためであると考えられる。つまり実際は文化数を増やせば増やすほど収束しやすくなるのではなく、文化圏が収束していくグラフの傾きには限界があるのではないかと考えられる。

(iv)今までのように世界に端がある場合では、セッションの対象となる村が端の村では3つ、角の村では2つとなる。一方、世界に端がない場合だと、どの村もセッションの対象となる村は4つとなる。端がある場合だと、セッション対象となる村が少ないことにより、周りの村との関連性が低くなり文化圏が形勢しやすくなっていたが、端がない場合だと逆に周りとの関連性が高くなり、文化圏を形成しにくくなったと考えられる。セッション数 50000 での文化圏の個数に差がなかったのは、50000 というセッション数がこの世界の大きさに対して、端がある場合、ない場合どちらでも、文化が収束するに十分な数だったからといえる。

## 結論(Conclusion)

一般的に、文化の流布として考えられるような事は再現されていることがわかった。また、この単純化された世界の中で独自の法則が成り立っているのであれば、それに関しても今後調査をしていきたい。

## 参考文献(References)

ロバート・アクセルロッド(寺野隆雄 監訳) 対立と協調の科学 エージェント・ベース・モデル  
による複雑系の解明. ダイヤモンド社. 2003. p.191-232. ISBN4-478-19047-X.

# 砂山崩しにおける自己組織化臨界現象

石川 直人 ・ 梅村 創大 ・ 柴田 涼真 ・ 堀籠 俊成

宮城県仙台第三高等学校

## 要約

砂山はある大きさに達すると、一定の角度を保ちながら崩れる。その一定の角度を保つ働きを自分たちで確認しようと思い、数学モデルを用いることで、実際の砂山とは異なる疑似砂山を作り、なだれを起こした。そこから2種類のグラフを作成し、外部からの影響は受けずに自らの形を保とうとする自己組織化臨界現象という働きを確認できた。

## はじめに

自然現象を説明するためにしばしば用いられる数学モデルの一つであり、砂山の崩壊をもとにバック・タン・ヴィーゼンフェルトにより考案されたBTWモデルを使用してコンピュータ上で擬似的な砂山の崩壊を起こした。これは、用意された一定面積の世界のどこかにランダムに砂粒を落としつづけ、あちこちで形成された砂山が、ある一定の大きさになると崩壊するというものである。ここでは崩壊後の砂粒は周囲に影響を与え、世界からはみ出た砂粒は消滅し、何の影響も与えないものとする。

このモデルから、落とされる砂粒に均衡状態を保つ「臨界状態」にあることが分かる。また、砂粒を落とすことにより大小様々な崩壊の連鎖が起こるが、砂山の大きさやその数の分布には変化がないことから、一つの構造が維持されており、崩壊における連鎖回数とその連鎖の発生回数をそれぞれ対数としてグラフを描くと直線になることから、べき乗則に従うことを確認できる。

ここでのべき乗則とは世界の大きさを変えても、一つの砂粒から起こる大小様々な規模の崩壊の仕組みは一定であるということであり、このように、外部からの構造維持操作なしに一定の構造維持を果たし、この構造が砂粒の追加及び消失という臨界状態において維持されている現象を、「自己組織化臨界現象」という。

## 方法

- 1 シミュレーション・プログラムをプログラミング言語Cで作成する。

※プログラムは、Linux上で動くことを前提とし、Linux上のCで開発を試みた。

- 2 そのプログラムを用いて

- (a) 世界の大きさを変えて砂山の大きさとその数が時間とともにどのように変化するかを調べる。
- (b) 崩壊における連鎖回数とその連鎖の発生回数との関係を調べる。

プログラムはアルゴリズムは以下の通りである。

```

「世界」の準備
{
  一辺が10~100の正方形(二次元配列)とする
  各セルの初期値は0とする
}

「世界」の開始
{
  乱数でセルを選ぶ
  安息角判定
  {
    セルの値が3なら
    {
      セルを0とする
      周囲のセルを選ぶ
      周囲の4つのセルについて「安息角判定」を呼ぶ
    } そうでなければ {
      セルの値を1増やす
    }
  }
}

```

**結果**

$n \times n$  マス ( $n=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100$ )の世界に一定時間ブロックを落としつづけた結果より得られたデータをもとに作成したグラフは以下の2種類である。

※ここでは、作成したグラフのうち例として1つを取り上げているが、他のグラフも同様な形状を示した。

**グラフ1 (図1)**

砂山の大きさごとの割合の変化、すなわち時間とともに0~3の砂山の数がどう変化するかをあらわすものを作成する。そのために、横軸に時間、縦軸に砂山の大きさごとの数をとる。

このグラフから読み取れることは次の通りである。

- (1) どのグラフも大きさは違うが, グラフの形はほとんど同じである.
- (2) しだいにどのグラフも, 砂山の大きさごとの数はほぼ一定になる.

## グラフ 2 (図 2)

崩壊における連鎖回数と連鎖の発生回数との関係を表すグラフをそれぞれ対数で作成する. ここで横軸には一つのブロックを落としたときに何回連続で崩壊が起きたかを, 縦軸にはその連鎖回数ごとに時間内に何回発生したかをとる. さらにこれらの分布図から平均を割り出し, 両軸のメモリを対数にしたものが, グラフの青線である.

このグラフから読み取れることは次の通りである.

- (1) どの大きさの空間でもグラフの形は変わらない.
- (2) グラフが直線となる.

## 考察

世界の 1 辺の大きさを変えても, 砂山の大きさ (0 ~ 3) の割合はほぼ一定となっていることから「臨界」状態にあり, 崩壊の規模(連鎖の回数)とその発生回数を両対数グラフであらわすと, 1 辺の大きさを変えても直線のグラフになることから「べき乗」の関係にあることがわかる. このことから, 砂山が均衡を保つ働き「自己組織化臨界現象」を自分たちの手で確認することができたと考えられる. しかし, プログラムを自分たちの手で一から作ることができず, 自己組織化臨界現象の確認で終わってしまった.

## 参考文献

香取眞理 『複雑系を解く確率モデル』 講談社ブルーバックス. 1997. p.145-183.  
ISBN4-06-257193-5.

例) 10x10

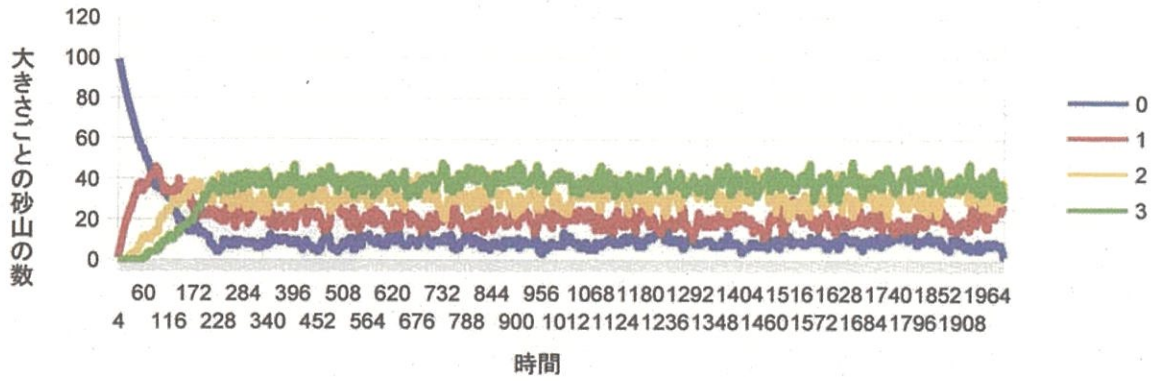


図1 グラフ1：大きさごとの砂山の数の変化

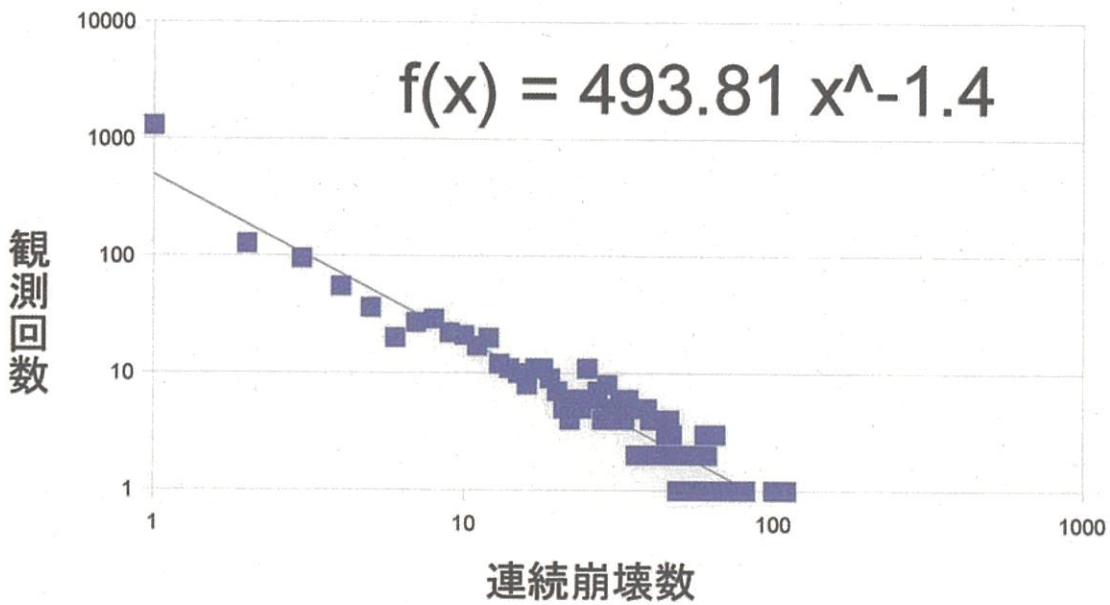


図2 グラフ2：崩壊における連鎖の連続回数と連鎖の観測回数

# 光学式マウスを利用した重力加速度の測定

齋藤 充志 ・ 佐藤 大哉 ・ 三木 裕生

宮城県仙台第三高等学校

新しい物体の運動の測定法の開発に挑戦し、光学式マウスを用いて、落下する物体の運動を計測することのできる装置と、運動の様子を数値化するコンピュータプログラムを開発に取り組んだ。装置は落下運動を観測し、プログラムによって運動の様子を画面上に数値化することに成功した。しかし、実際の速度の変化を求めるには至っていない。今回得られたデータから、速度の変化を算出し、重力加速度を導けば、それをもとに、この測定法の正確さを評価できると考えている。

## はじめに

現在、様々な種類の速度測定器が存在する。速度の測定は、物体の運動などの基礎的な物理現象において、測定の基本である。われわれは光学式マウスに注目した。光学式マウスは、マウスが置かれている場所に光を照射し、その部分の状態を「模様」として読み取り、読み取った模様を以前に読み取ったものと比べることで、移動方向と移動量を算出する。つまり、光学式マウスは、身の回りにあるものの中で、直接触れることなく、動きを読み取ることができるという特徴を備えている(光学式マウスの内部構造については図1を参照)。本研究では、光学式マウスとコンピュータプログラムをつかった新しい速度の測定法の開発に取り組んだ。物体の落下運動をマウスに読み取らせ、その速度の変化を測定し、そこから重力加速度を求めれば、重力加速度を尺度にして正確さを判断できると考えている。

## 材料と方法

落下物として、塩化ビニルパイプにガムテープを巻きつけて、外径を69mmにしたものを用意した。このガムテープには光学式マウスが物体の運動をよみとりやすいように表面に模様をつける目的もある。次に、内径が70mmの紙パイプに穴を開けて窓を作り、マウス(BUFFALO BOMC-

LSV)から取り出した基盤のレンズの部分で、そこに取り付けられた。以上で、装置は完成である(図2)。この装置の中に物体を落下させ、マウスに落下運動を読み取らせると、画面上のマウスポインタが落下運動に合わせて動く。マウスポインタの動きは、コンピュータープログラムを用いて数値化する。このプログラムは、画面上にウィンドウを表示し、そのウィンドウ上のマウスポインタの位置情報を、コンピュータを起動してからの時間とともに表示する。

## 結果

結果は、図3のようになった。左から、コンピュータを起動してからの時間(単位はミリ秒)、表示したウィンドウ上のx, y座標、画面上のx, y座標、を表している。例えば、3行目では、コンピュータを起動してから、7823235ミリ秒後に画面全体の座標で、x座標1249, y座標845、表示したウィンドウ上でx座標137, y座標270, の位置にマウスポインタが移動したことを表している。

今回は、落下物をマウスで検知するところまではできたが、実際に重力加速度を求めるところまでは至らなかった。

## 考察

今後、得られたデータを元に、重力加速度を算出し、正確さを判断する尺度にしたい。

まずは、この数値と実際の落下物の動きがどのように対応しているのかを調べる必要があるが、まだできていない。また、このデータから得られる、時間と移動量の関係から二次方程式で近似することで、重力加速度を求められるのではないかと考えている。

また、摩擦や空気抵抗の影響を、なるべく減らした実験装置の開発も行っていきたい。

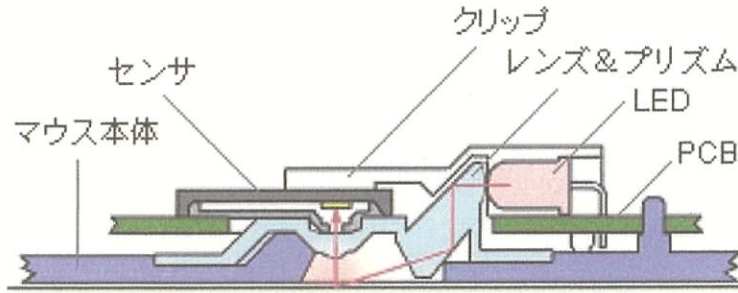


図1 光学式マウスの仕組み

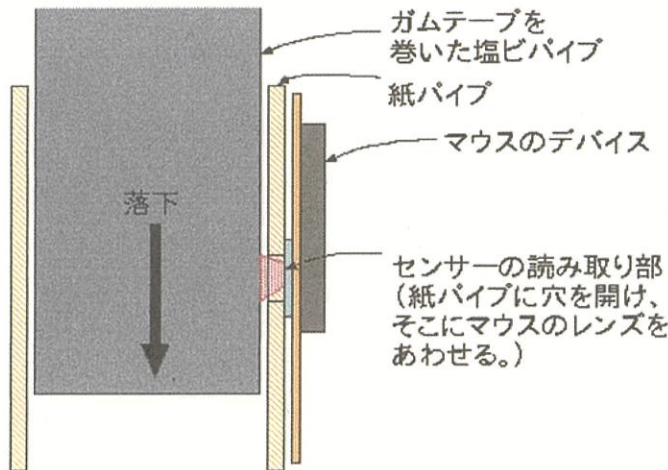


図2 装置の完成図

```

miki@sand: ~/mouse
ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 検索(S) 端末(T) ヘルプ(H)

time is 7823219(msec), current window: 139, 290, root window:1251, 865
time is 7823227(msec), current window: 138, 281, root window:1250, 856
time is 7823235(msec), current window: 137, 270, root window:1249, 845
time is 7823243(msec), current window: 136, 259, root window:1248, 834
time is 7823251(msec), current window: 134, 243, root window:1246, 818
time is 7823259(msec), current window: 133, 229, root window:1245, 804
time is 7823267(msec), current window: 131, 214, root window:1243, 789
time is 7823275(msec), current window: 129, 198, root window:1241, 773
time is 7823283(msec), current window: 126, 176, root window:1238, 751
time is 7823291(msec), current window: 124, 157, root window:1236, 732
time is 7823299(msec), current window: 122, 136, root window:1234, 711
time is 7823310(msec), current window: 120, 116, root window:1232, 691
time is 7823315(msec), current window: 116, 88, root window:1228, 663
time is 7823323(msec), current window: 112, 67, root window:1224, 642
time is 7823331(msec), current window: 108, 44, root window:1220, 619
time is 7823340(msec), current window: 104, 22, root window:1216, 597
XIO: fatal IO error 11 (Resource temporarily unavailable) on X server ":0.0"
after 9 requests (9 known processed) with 0 events remaining.
miki@sand:~/mouse$
miki@sand:~/mouse$
miki@sand:~/mouse$
miki@sand:~/mouse$
miki@sand:~/mouse$

```

図3 落下物の動きをマウスが捕捉・表示した結果



参考文献（いずれも最終アクセスは2012年1月14日）

Hard ware 光学式マウス

[http://www.infonet.co.jp/ueyama/ip/hardware/optical\\_mouse.html](http://www.infonet.co.jp/ueyama/ip/hardware/optical_mouse.html)

自分好みのマウスを選ぼう

[http://www.printout.jp/guidance/pc\\_supply/193.html](http://www.printout.jp/guidance/pc_supply/193.html)

BUFFALO 製品紹介

<http://buffalo.jp/products/catalog/item/b/bomc-l/spec.html>

# クサイロアオガイにおけるベリジャー幼生から稚貝への変態過程

佐藤 瑛 矢吹 和也

宮城県仙台第三高等学校SSHクラブ

海から採取したカキの殻を使い、クサイロアオガイ (*Nipponacmea Fucoviridis*) の変態過程と、変態を誘起する因子を明らかにするために実験を行った。クサイロアオガイは、日本の北海道から沖縄で沿岸の潮間帯上部に生息している。実験動物の利点として、入手が容易であること、採卵・採精が容易であることが挙げられる。今回の研究の結果、変態過程は明らかにすることができたが、因子を解明するには至らなかった。

## 序論

クサイロアオガイ (図1) は、軟体動物門、腹足綱、カサガイ目のユキノカサガイ科に属する。腹足綱に属する貝類は巻貝類であり、クサイロアオガイも殻は巻いていないが巻貝類である。分布域は広く、北海道南部から沖縄まで生息している<sup>1)</sup>。クサイロアオガイは卵の成熟を誘起することができ、人工授精が可能であり、ベリジャー幼生までの発生も速く、発生学の実験動物として用いられている<sup>2)3)</sup>。

私達は、クサイロアオガイを用いて受精と卵割の観察を行い、卵割の観察を終えたあとそのまま飼育を続けていた。するとトロコフォアと呼ばれる幼生から殻を持ったベリジャー幼生へと成長した。しかし、その後数日で全ての幼生が死滅してしまっ。カサガイの変態について調べたところ、ベリジャー幼生から稚貝への変態を誘起する因子についての情報は見つからなかった。また、クサイロアオガイのベリジャー幼生が稚貝になる過程も見つけられなかった。クサイロアオガイの幼生が稚貝へ変態するしくみは明らかになっていないと考えられた。

一方で、同じ腹足類であるアワビは、海の中に樹脂製のボードをいれて緑藻や珪藻を付着させ、そのボードにベリジャー幼生を着底させることで稚貝に変態させる養殖技術は確立されているが、どのような付着微生物が、どのような変態誘起物質をつくり、幼生を変態させているのかについては、決定的な証拠が未だに得られていない<sup>4)</sup>。

そこで私たちは、扱いやすい実験動物であるクサイロアオガイについて、自然の環境中でベリジャー幼生から稚貝へと変態するしくみを明らかにしたいと考えた。変態を誘起する因子、たとえば何らかの化学物質が、自然の環境中でクサイロアオガイのベリジャー幼生にどのように作用しているかを明らかにすることができれば、同じ巻貝の仲間であるアワビ、サザエ、ウミウシなどが自然の環境中で変態するしくみを理解する手がかりになるかもしれない。そして、養殖技術の向上や、飼育下での繁殖、個体群の保護・保全に役立つ可能性があると考えた。

この研究ではクサイロアオガイのベリジャー幼生を稚貝へと変態させる飼育方法を確立して、変態過程を明らかにし、さらに変態を誘起する因子を明らかにすることを目的とした。

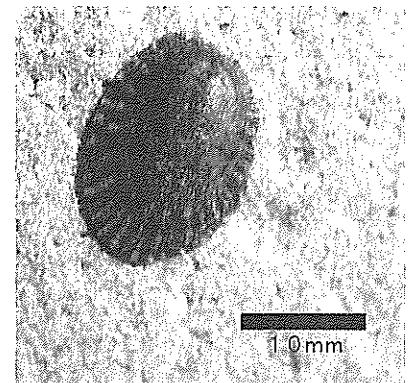


図1 クサイロアオガイ

## 材料と方法

### -個体の採集-

親個体は宮城県宮城郡七ヶ浜町沿岸でヘラを用いて採取，カキ殻は宮城県牛鹿郡女川町で桐ヶ崎で採取した。

### -海水-

海水は宮城県宮城郡七ヶ浜町沿岸で，20L のポリタンクに汲み取り，ろ紙でろ過したものをオートクレーブで 121℃，15 分間滅菌し，実験に用いた。

### -人工受精-

人工受精は出口の方法に従った<sup>2)</sup>。卵巣から取り出した未成熟卵を 5mM の塩化アンモニウムを含む海水 (pH9.0) に 15 分間浸し，海水に戻して 1 時間ほど経過して濾胞細胞が完全に剥がれたことを確認した(図 2)。成熟卵に海水で希釈した精子を受精させた。

### 卵の採取と卵成熟の誘起

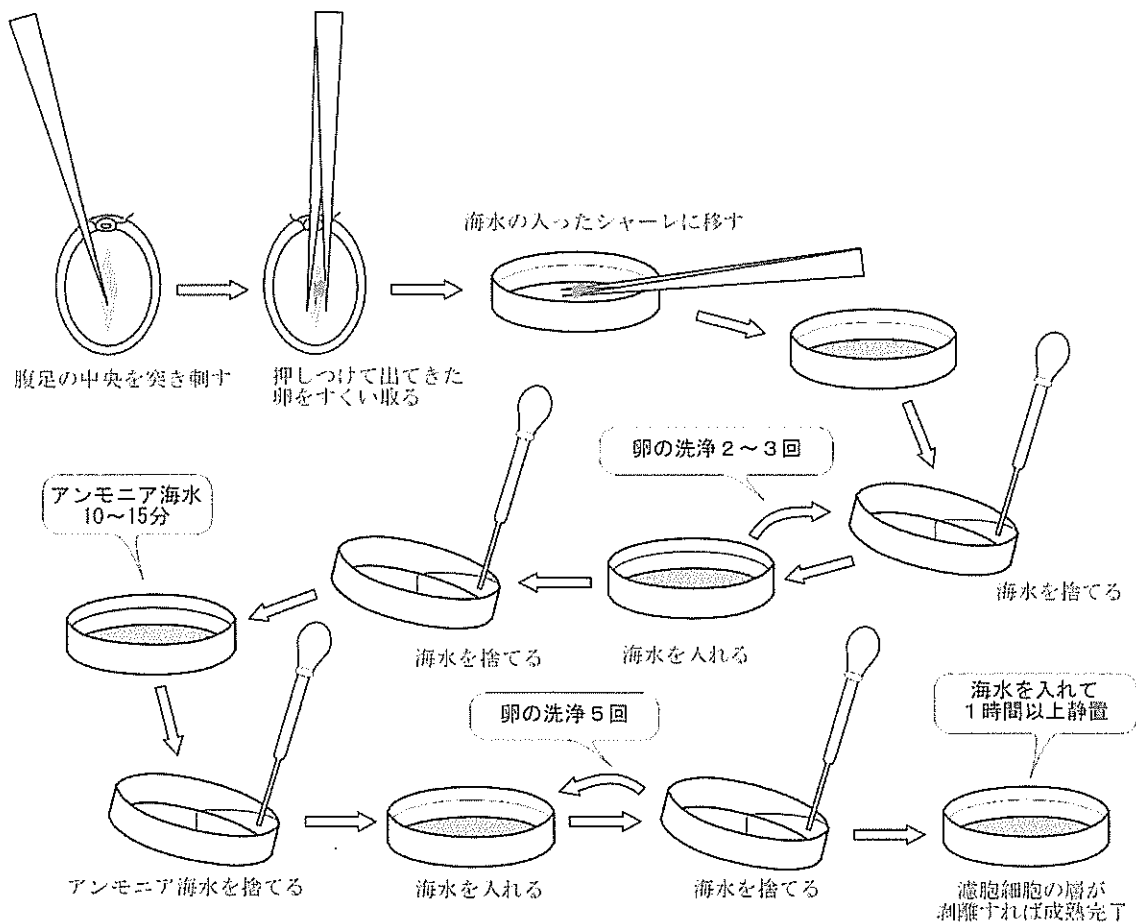


図 2 卵の採取とアンモニア海水処理による卵成熟の誘起

### -幼生の飼育-

インクベーターで海水温を 20° に保ち，受精卵を発生させ，トロコフォア幼生，ベリジャー幼生，稚貝を飼育した。水替えを 1 日 1 回行った。実験には受精後 2 日目のベリジャー幼生を使用した。

-実験 1 -

クサイロアオガイが生息する沿岸の潮干帯からカキの貝殻を採集し、滅菌海水にそのカキ殻を入れて、500mL のビーカーでベリジャー幼生を飼育した。滅菌海水だけで飼育したものを対照にした。

-実験 2-

実験 1 と同様に、滅菌海水だけで飼育する対照区、海から採集したカキ殻を入れた試験区に加え、オートクレーブ (121℃) で滅菌したカキ殻を入れた試験区をつくり、ベリジャー幼生を飼育した。カキ殻は採集して滅菌海水中で 2 週間放置し、実体顕微鏡でベリジャー幼生や稚貝が付着していないことを確認して使用した。

結果

-実験 1-

滅菌海水のみで飼育した場合、3 日目にはほとんどのベリジャー幼生が死滅した。滅菌海水に海から採集したカキ殻を入れて飼育した場合、一週間後に遊泳している個体はわずかに見られたが、ほとんどの個体は死滅し、10 日後には動いている個体は見つけれなかった。変態の誘起に失敗したと思われたが、1 ヶ月後に飼育容器を確認したところ、数個体の稚貝が見つかった (図 3)。



図 3 カキ殻表面で変態した稚貝  
赤で囲まれたところに稚貝が付着している。

-実験 2-

海から採集したそのままのカキ殻を用いた実験区ではベリジャー幼生から稚貝への変態が見られたが、滅菌したカキ殻を用いた実験区では変態した稚貝は見られなかった。また、図 4 のようにベリジャー幼生から稚貝への変態過程を観察することができた。

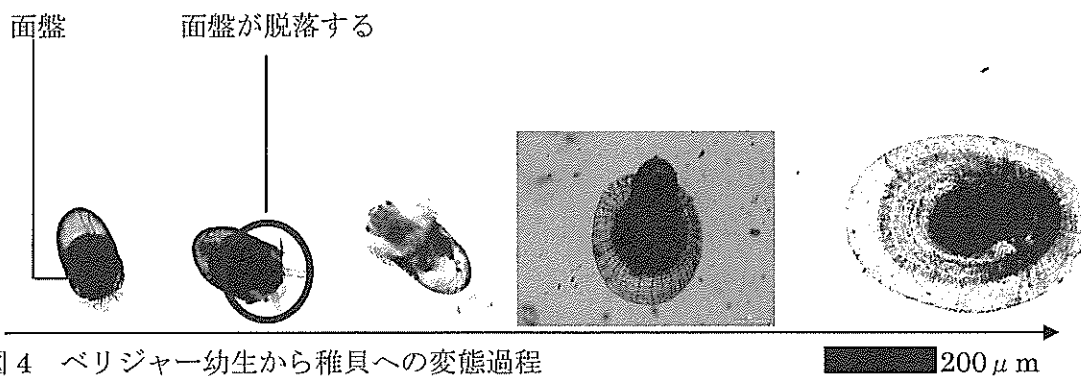


図 4 ベリジャー幼生から稚貝への変態過程

考察

-カキ殻採集時の幼生・稚貝の持ち込みの可能性-

生息環境から採集したカキ殻を用いることで、ベリジャー幼生から稚貝への変態を誘起できた。実験 1 では、カキ殻についていた稚貝について、カキ殻を採集したときに付着していた

幼生が変態・成長した「持ち込み」の可能性が否定できない。しかし、実験2では、カキ殻を採集してから2週間ほど経過したのち、実態顕微鏡で表面に幼生や稚貝が付着していないことを確認してから実験に用いたので、「持ち込み」の可能性は低いと考えられる。

#### -変態を誘起した因子-

また、実験2では、海から採集したそのままのカキ殻を用いた実験区ではベリジャー幼生から稚貝への変態が見られたが、滅菌したカキ殻を用いた実験区では変態した稚貝は見られなかった。これらのことから、カキ殻に付着した微生物等の因子が変態を誘起した可能性のほか、カキ殻そのものが変態を誘起した可能性も否定できず、カキ殻に含まれる熱に弱い成分が変態を誘起している可能性も考えられる。しかし、野外で採集する場所では、クサイロアオガイは岩やコンクリートなどに直接固着しており、周囲にカキはほとんど見られず、カキやその他の貝類の殻と間にクサイロアオガイとの密接な関係は観察できない。

#### -変態の定義-

今回の実験では、ベリジャー幼生の面盤が脱落し、周口殻が形成される過程を観察することができた。繊毛がついている面盤がなくなることは、泳いで移動しないことを示している。アワビで報告されているように<sup>4)</sup>、クサイロアオガイでも面盤の脱落をもって変態したと定義し、今後の変態誘導因子の探索では、貝殻が発達するより前に、面盤の脱落で早期に変態を判断することにした(図5)。

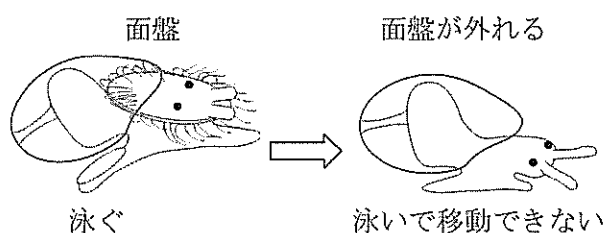


図5 変態の定義

泳ぐことができなくなり、浮遊生活から底生生活に変化したところを変態と定義した。面盤の離脱で判断できる。

#### -今後の展望-

今回の実験では、クサイロアオガイのベリジャー幼生について稚貝へと変態させる方法の確立し、稚貝へ変態する過程を明らかにできた。しかし変態を誘起する因子を明らかにするには至らなかった。カキ殻の付着微生物と、アワビなどの他の生物で報告された物質について変態誘起作用を検証していきたい。変態過程が明らかとなり、変態の定義ができたので変態誘起については、1つの試験区あたり10個体のベリジャー幼生を用いて変態率を算出したい。さらに自然環境中における繁殖生態を観察することも必要だと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 佐々木猛智・奥谷喬司. (1993). 新属 *Nipponacmea*: 従来 *Notoacmea* とされていたアオガイ類の再検討. *VENUS* 52, 1-40.
- 2) 出口竜作. (2007). 笠貝の発生過程と授業での活用. 宮城教育大学紀要 第42巻, 73-80.
- 3) 橋本直樹. (2010). Evolutionary Innovation 軟体動物巻貝における蓋の獲得. つくば生物ジャーナル Vol.9 No.1 January 2010, 78

#### 参考 URL

- 4) <http://otolith.aori.u-tokyo.ac.jp/member/kawamura/settlemt.htm> (2011年3月1日)

# レタス種子（ちりめんちしゃ）の発芽における温度と光照射の影響

宮城県仙台第三高等学校SSHクラブ

佐々木真大

植物に含まれる色素タンパク質であるフィトクロムは、種子が赤色光を受容すると発芽が促進され、遠赤色光を受容すると発芽が抑制される光発芽という現象に関わっており、レタス種子を用いた多くの研究が報告されている。一方、レタス種子の発芽が高温下で抑制される現象も知られている。そこで、「ちりめんちしゃ」というリーフレタスの品種を用いて、種子発芽に対する温度と光の影響を調べた。暗黒化における種子の培養では、20℃では90%以上の発芽率となり、25℃での発芽率に大きなばらつきが見られ、30℃ではほとんど発芽しなかった。種子を30℃で培養した後に20℃で培養することにより、暗黒化での発芽率を50%程度にすることができた。また、種子を30℃で培養した後にR光、FR光照射を行い、20℃で培養したところ、発芽の促進におけるフィトクロムに特徴的な光可逆反応が見られた。

## 1 はじめに

光発芽とは、小さくて貧弱な種子が波長660nmの赤色光（R光）を受けると発芽が促進され、波長730nmの遠赤色光（FR光）を受けると発芽が抑制される現象である。貯蔵物質の少ない種の植物は、光発芽のシステムを用いて光が届くところで発芽することや、他の植物との光を巡る競争を避けることで生存率を上げるような繁殖戦略を行っているのだと言われている。また、光発芽にはフィトクロムという色素タンパク質が関わっていることが知られている。フィトクロムには光量によって起こる反応が3つ存在し、その1つは1光子程の少ない光量において起こる超低光量反応、2つ目は通常的光量において起こる低光量反応、3つ目は高光量において起こる高照射反応である。低光量反応では、3つの反応の中で唯一R光とFR光の光可逆反応が存在する。

レタスは光発芽種子であることが知られており、研究で頻繁に使用されるが、暗黒下で発芽してしまい光発芽特性が見られないという高校生の課題研究報告もある。また、レタス種子では高温による発芽抑制の現象が知られており、種子のパッケージにも高温を避けるよう記載されている。

本研究では、R光とFR光の光可逆反応が見られる低光量反応について、「ちりめんちしゃ」というリーフレタスの品種を用いて、温度と光が発芽に与える影響を検証することにした。

## 2 材料と方法

### レタスの品種

レタスは、株式会社トーホクのリーフレタス品種である「ちりめんちしゃ」（品種番号03460-B）を用いた。種子のパッケージは、有効期限が2011年5月から1年である中国産のものを使用した。

### 播種

直径9cmのシャーレにろ紙を2枚敷き、種子を100粒入れ、次に水を5ml そっと入れた。そして光が入らないように2枚のアルミホイルで包んだ。

### 培養

インキュベーターとして、日立社製、島津製作所製、MASAO コーポレーション製のものを使用した。設定温度±1°Cで培養を行った。

### 光源

三洋電機株式会社の研究用LED光源システムを光源として使用した。発光波長のピークは、赤色光源が660nm、遠赤光源が730nmであり、光源と種子との距離を15cmとした。

### 発芽に対する温度の影響（実験1）の条件

10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C, 35°C, の6つの温度区分に分け、3つの種子パッケージをそれぞれ区別して3回試験を繰り返した。すなわち、54個のシャーレで合計5400個の種子を用いた。播種後、暗黒下で70時間培養し、発芽種子数をカウントした。

### 発芽に対する温度変化の影響（実験2）の条件

播種後から6時間→24時間→20時間の区切りで、30→30→30°C, 30→30→20°C, 30→20→20°C, 20→20→20°C, 20→20→30°C, 20→30→30°Cの6つの温度変化区分に分け、暗黒下で培養し、発芽種子数をカウントした。

### 発芽に対する光照射の影響（実験3）の条件

播種後、暗黒下で24時間、30°Cの条件で培養したのち、アルミホイルを開いて15秒間の光照射操作を行い、直ちにアルミホイルで包み、暗黒下で40時間、20°Cの条件で培養し、発芽種子数をカウントした。光照射区分は、アルミホイルを開かずに暗黒を維持した対照、R光、FR光、R光→FR光、FR光→R光の5つに分けた。

### 発芽率に対するFR光照射の影響（実験4）の条件

播種後、暗黒下で24時間、30°Cの条件で培養したのち、アルミホイルを開いてFR光照射操作を行い、直ちにアルミホイルで包み、暗黒下で40時間、20°Cの条件で培養し、発芽種子数をカウントした。光照射区分は、アルミホイルを開かずに暗黒を維持した対照、FR光照射条件0.3秒（フラッシュ）、3秒、10秒、30秒、300秒の6つに分けた。

### 3 結果

#### 発芽率に対する温度の影響 (実験1)

図1のように、15℃での発芽率は93.1%となった。20℃での発芽率は93.1%となった。30℃ではほとんど0%となった。35℃ではほとんど0%となった。25℃での発芽率はばらつきが大きかった。

また、種子パッケージごとの発芽率に差は見られなかった。

#### 発芽率に対する温度変化の影響 (実験2)

図2のように、30℃で30時間  
 →20℃で20時間保存した種子の発芽率は16%となった。30℃で6時間  
 →20℃で44時間保存した種子の発芽率は90%となった。20℃で6時間  
 →30℃で44時間保存した種子の発芽率は3%となった。20℃で30時間  
 →30℃で20時間保存した種子の発芽率は88%となった。

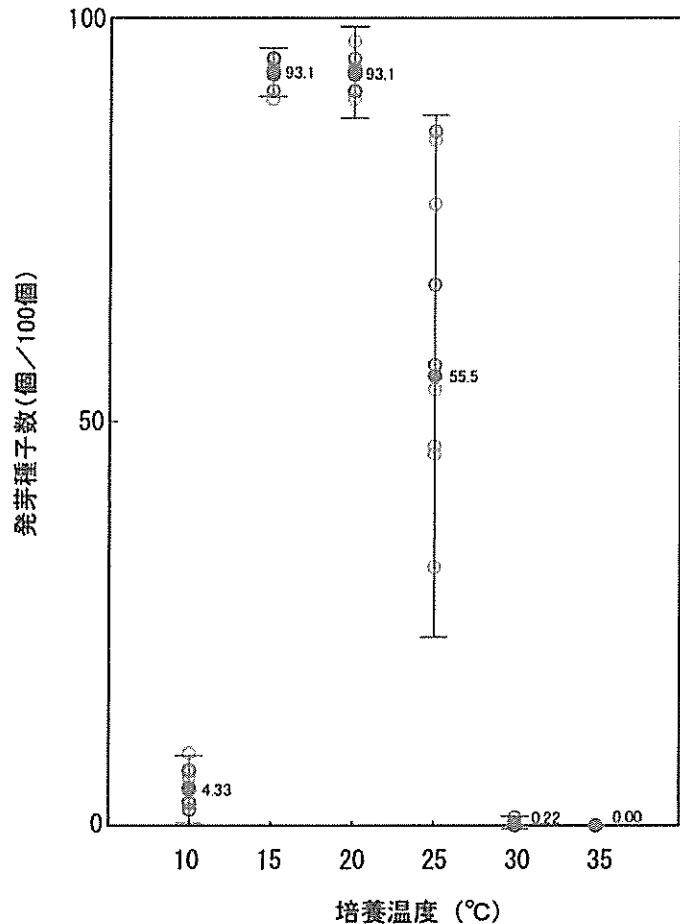


図1 発芽率に対する温度の影響

同じパッケージの発芽種子数を同じ色で表し、3つの種子パッケージをそれぞれ赤、青、緑で色分けした。図中の線は90%信頼区間を表し、各温度における合計9回の試験の平均値を赤丸で示した。

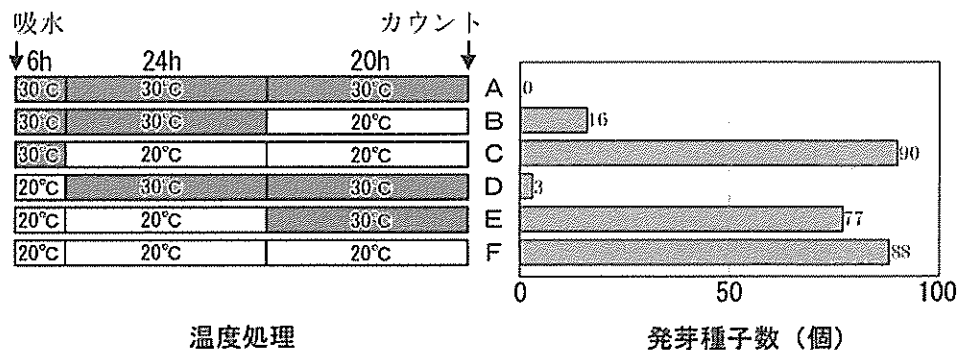


図2 発芽率に対する温度変化の影響

A~Fの実験区について、左側に温度変化を、右側に発芽種子数を示した。



### 発芽率に対する光照射の影響（実験3）

図3のように、30℃で24時間→20℃で40時間の暗室保存のみで発芽率を50%前後にコントロールできた。R光の照射での発芽率は90%となり、R光→FR光の照射での発芽率は71%となった。FRの光照射での発芽率は64%となり、FR光→R光の照射での発芽率は95%となった。対照と比較してFR光の照射の発芽率が高くなった。

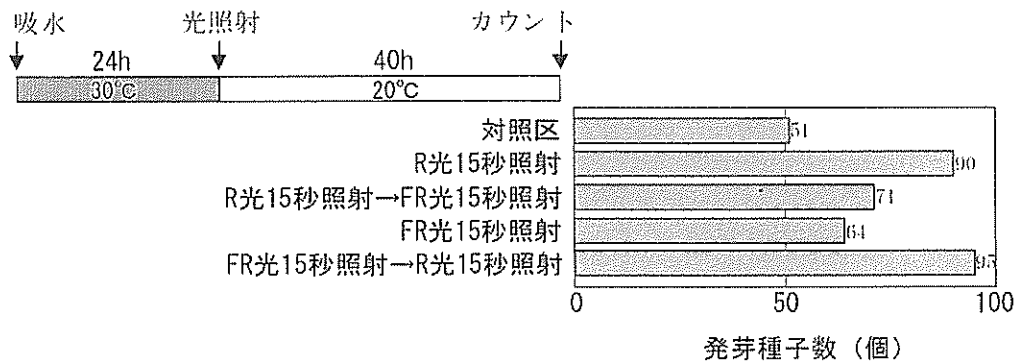


図3 発芽率に対する光照射の影響

吸水開始後30℃で24時間培養した後、20℃で40時間培養したときの発芽種子数を示した。

### 発芽率に対するFR光照射の影響（実験4）

図4のように、0.3秒（フラッシュ）照射での発芽率は79%となった。3秒照射での発芽率は75%となった。10秒照射での発芽率は70%となった。30秒照射での発芽率は66%となった。300秒照射での発芽率は63%となった。実験3と同様に、対照と比較してFR光の照射の発芽率が若干高くなった。

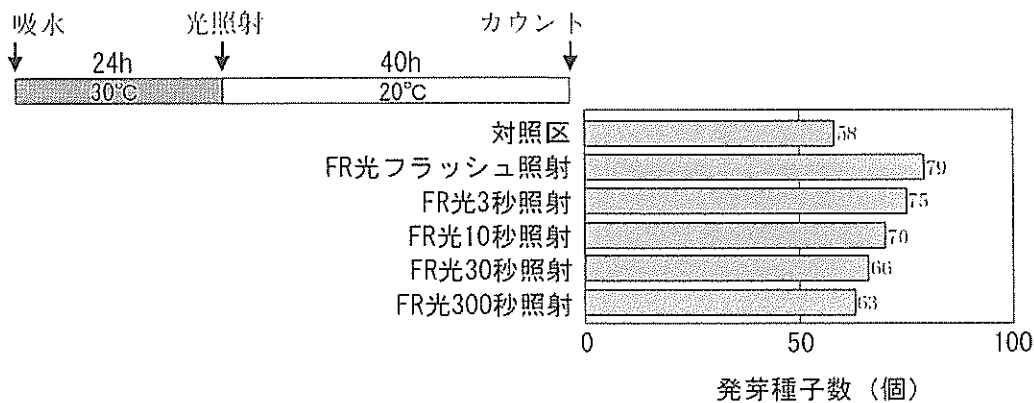


図4 発芽率に対するFR光照射の影響

吸水開始後30℃で24時間培養した後、20℃で24時間培養したときの発芽種子数を示した。

## 4 考察

### パッケージごとの発芽率

市販の種子のパッケージごとの発芽率に差は見られず、どの袋も条件としては均一であることが分かった。そのため、これ以降の実験ではパッケージごとの条件は考えないことにした。

### 発芽率に対する温度の影響

発芽率に対する温度の影響（実験1）を行った結果、25℃における発芽率は32%から85%までとばらつきが大きくなったことから、光発芽種子の暗黒下における実験の温度条件として25℃では、±1℃のわずかな温度の変化によって発芽率が実験ごとに変化してしまうため不適であると言える。また、20℃での発芽率はほとんど93.1%に、30℃ではほとんど0%となってしまうため、フィトクロムの可逆反応を検証するような光照射の実験では暗黒下での発芽率を50%前後にコントロールする必要がある。そのため発芽率に対する温度変化の実験（実験2）を行い、発芽率のコントロールが可能であるかを高校生活の中で設定できる時間的条件のもとで確かめた。

その結果、30℃と20℃の温度区分で保存時間を変化させることで種子の発芽率をコントロールできることが分かった。また、同様に高校生活の中で設定できる温度条件として、30℃で24時間→20℃で40時間の条件で暗室保存することで発芽率を50%前後にコントロールできた。30℃で24時間→20℃で40時間暗室保存することで、光照射の実験の条件がそろったため、この条件を用いて発芽率に対する光照射の実験（実験3）を行った。

### 発芽率に対する光照射の影響

発芽率に対する光照射の実験（実験3）を行った結果、R光→FR光の照射で発芽抑制反応、FR光→R光の照射で発芽促進反応が見られ、光可逆反応を示したことが分かった。このことから、光発芽の反応にはフィトクロムが関わっており、その反応は低光量反応であることが分かった。今回はレタス種子（ちりめんちしゃ）のフィトクロムの低光量反応に限定して実験を行ったため、今後は高照射反応の検証を行うことが課題である。

フィトクロムの可逆反応は確認されたが、FR光の照射での発芽率が対照と比較して高くなっていた。そのため、発芽率に対するFR光照射の影響（実験4）を行い、対照と比較してFR光の照射には発芽抑制効果はあるのかを確かめた。

### 発芽率に対するFR光照射の影響

発芽率に対するFR光照射の影響（実験4）を行った結果、FR光の発芽抑制反応が存在することが分かった。しかし実験3と同様に、対照と比較してFR光の照射の発芽率が若干高くなった。実験3、4に共通してFR光の照射における若干の発芽促進反応が見られたことに関して、光照射の操作時に混入した周囲の微量な光によってわずかに発芽が促進されたことが原因ではないか

と考えた。そのため今後は、光照射実験の操作時には対照の種子についても一度アルミホイルの開封を行うなど、その他の光照射と対照の基礎条件を同様にすると考えた。

## 5 参考文献

「発芽生物学 ～種子発芽の生理・生態・分子機構～」 種子生物学会 編 吉岡俊人・清和研二  
「植物生理学」 L. テイツ/E. サイガー編 西谷和彦/島崎研一郎 監訳

# 音の音色の違いについて

工藤香菜

仙台第三高等学校

概要

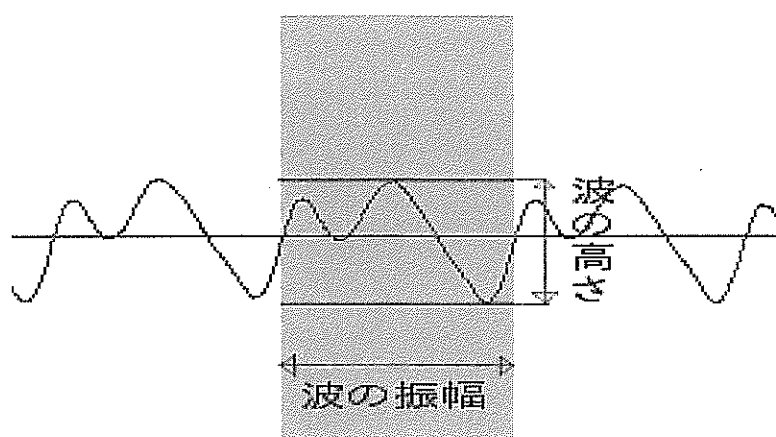
音の3大要素のうち「音色」について、その違いを観察する実験を行った。音色の違いは波形の違いとして目で観察することができ、波形の違いは倍音の構成の違いとして観察することができることが分かった。また、音を録音したときに音が割れてしまった場合にはどのような変化が起きているのかも確かめた。

## はじめに

なぜ人は音の違いを聞き分けられるのか疑問に思い、研究に取り組んだ。しかし音と言っても様々な要素で成り立っていることを知り、今回は音の音色に関する3種類の実験を行った。

## 1. 音の3大要素

音は“音の3大要素”と呼ばれる3つの要素からなる。それは音の大きさ、音の高さ、音の音色である。音が出るときに起こる振動を電子化し、グラフとして表すと図1のようになるが、この図で音の大きさは波の高さ(大きな音であれば高さはより高くなる)、音の高さは波の振幅(波の振幅が小さいほど音は高音になる)、音の音色は波形(波の形)とそれぞれ関連付けられる。音の波形の図で、特に色が濃くなっている部分はその音の1周期を表している。



(図1) 人の声(上下に動いてできた形が音の波形)

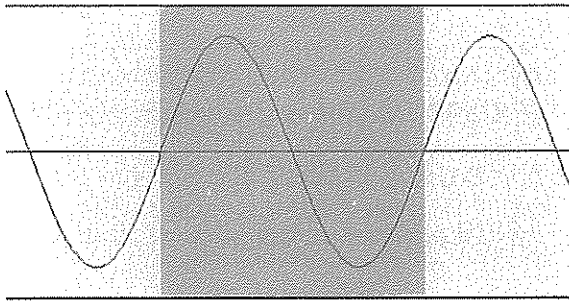
音の波形は三角関数の和で表すことができる。代表的な波形を3種類挙げると、それぞれ以下

の図のようになる。

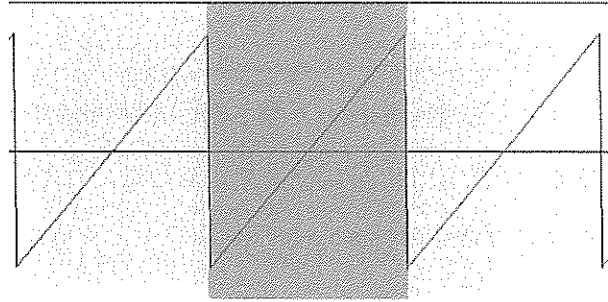
・ sin 波  $f(x)=\sin x$  (図 2)

・ ノコギリ波  $f(x)=\sin x+\frac{1}{2}\sin 2x+\frac{1}{3}\sin 3x+\dots+\frac{1}{N}\sin Nx+\dots$  (図 3)

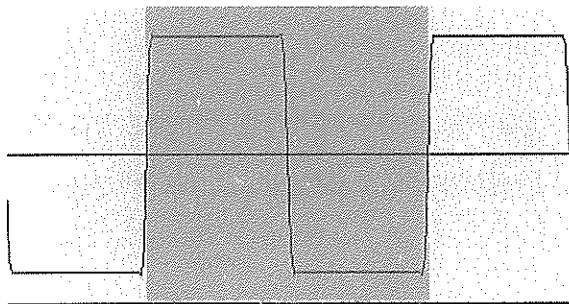
・ 短形波  $f(x)=\sin x+\frac{1}{3}\sin 3x+\frac{1}{5}\sin 5x+\dots+\frac{1}{2N-1}\sin(2N-1)x+\dots$  (図 4)



(図 2)sin 波



(図 3)ノコギリ波



(図 4)短形波

$\sin x$  に対し  $\sin Nx$  は元の周波数の  $N$  倍の音に対応し、 $N$  倍音と呼ばれる。倍音がどのように含まれているかの違いが波形の違いとなって現れているのが分かる。

## 2. 楽器による音色の違い [実験 1]

### 2-1 目的と方法

**目的** 音色の違いを目で確かめる。

**方法** 楽器の音などをレコーダーで録音する。そして録った音をパソコンに取り込み、音声加工ソフトである Audacity を用いて音の波形、倍音の構成について解析する。なお使用した音源は以下の 12 種類である。

・ 弦楽器 (エレキギター, バイオリン)

- ・金管楽器（トランペット，トロンボーン，ホルン，ユーフォニウム）
- ・木管楽器（サクソ，バスクラリネット，オーボエ，クラリネット，ファゴット）
- ・人の声

音叉を鳴らし，その音と同じ高さ（約 440Hz）を出してもらいそれを録音した。（一部の楽器はオクターブ下の 220Hz で録音した。）

使用したもの ・レコーダー TASCAM DR-07mk2

- ・音声合成ソフト Audacity ver.1.3.13
- ・楽器

※ギターに関してはただ弦を弾いただけのものとディストーション(音を歪ませるエフェクター)をかけたものの2種類の音を用意した。ただ弾いただけのものを clean ギター，ディストーションをかけたものは distortion ギターとする。なお，音の解析を行った範囲については音のぶれの少ない箇所を選んだ。

## 2-2 結果と考察

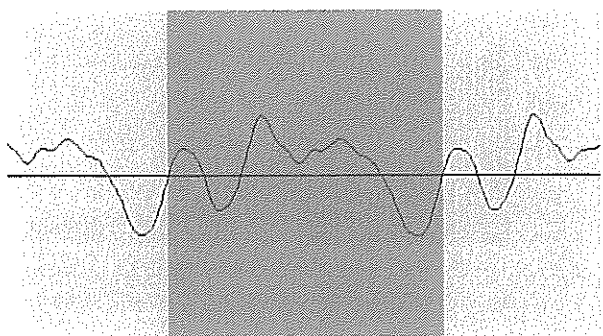
倍音は元の音の周波数（今回は約 440Hz とする）を 1 としてその何倍かを表したもの。また，倍音の構成のグラフはそれをグラフ化したもので，横軸は何倍か，縦軸は大きさ(dB)を表している。

clean ギターと distortion ギターを比較した結果，音の波形に関しては大きな違いが見られた。clean ギターに関しては全体的に角がなく，丸みを帯びているが，distortion ギターは全体的に鋭さがあるのが見られ，これは聴いた時に受ける印象に似た傾向がある。またそれぞれの音に含まれる倍音の構成を見ても clean ギターに比べて distortion ギターの方が高い音まで多く含まれているのが分かる。

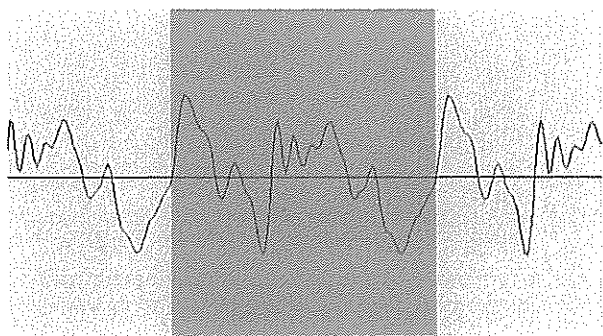
また木管楽器であるサクソと金管楽器であるホルンの音の波形を比べてみるとよく似ていることが分かる。それぞれの倍音の構成をみてもおおよその割合が等しいことが見られる。そしてこれらのことから音の波形と倍音の構成は関係していること，金管楽器や木管楽器だからと言って全く違った波形になるとは限らないことが分かる。

また倍音の構成のグラフで所々の音が不自然にあがったりしているのは録音環境が整っておらず(普通の教室で録音した)，雑音が入ってしまったためである可能性がある。

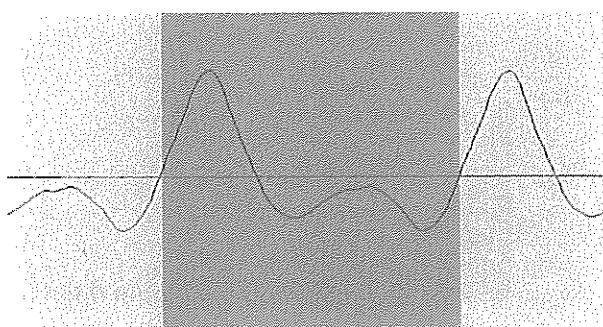
実験1:音の波形



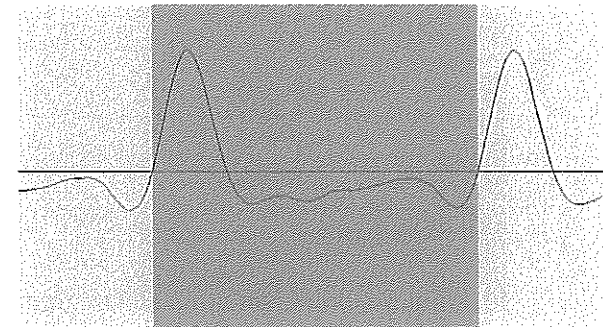
(図 5)clean ギター



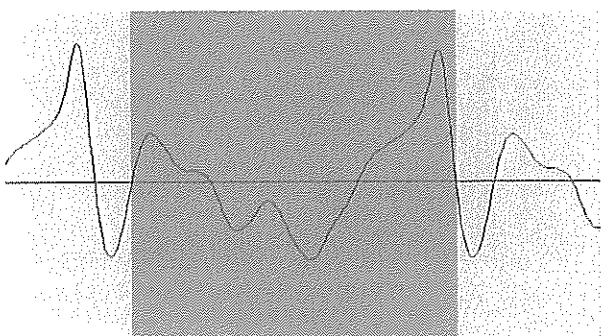
(図 6)distortion ギター



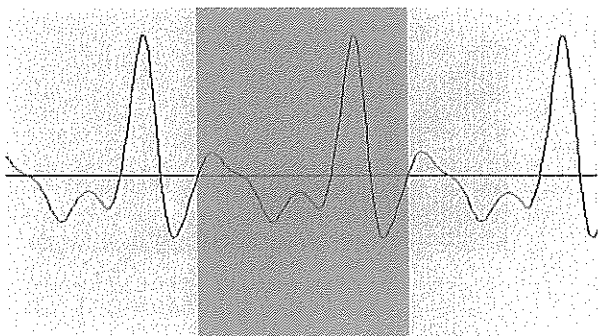
(図 7)サクソ(木管楽器)



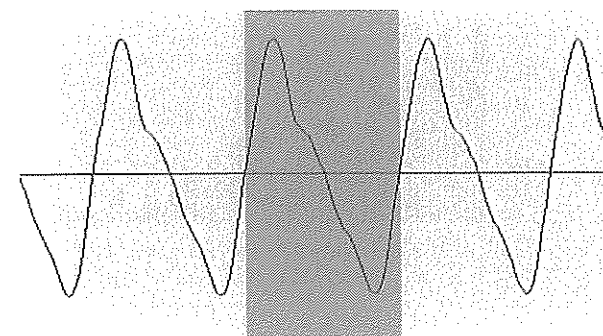
(図 8)ホルン(金管楽器)



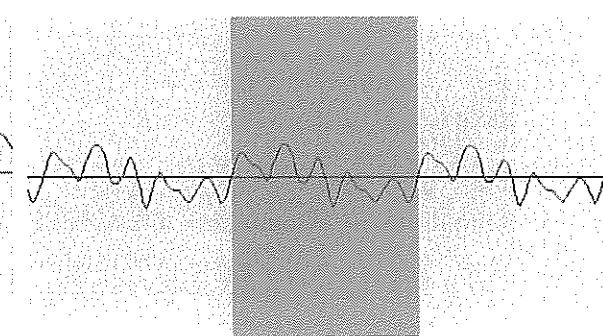
(図 9)トランペット(金管楽器)



(図 10)トロンボーン(金管楽器)

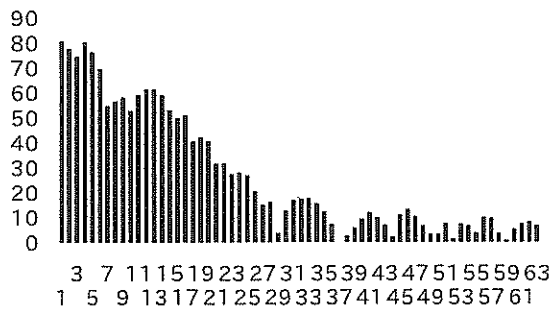


(図 11)クラリネット(木管楽器)

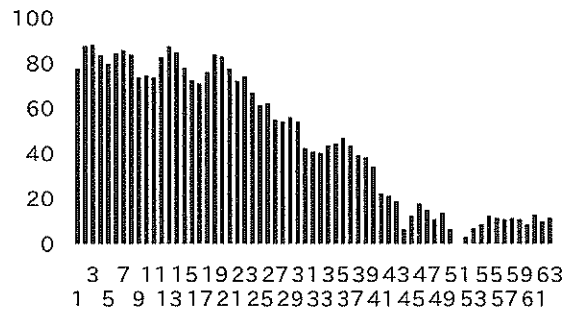


(図 12)バイオリン(弦楽器)

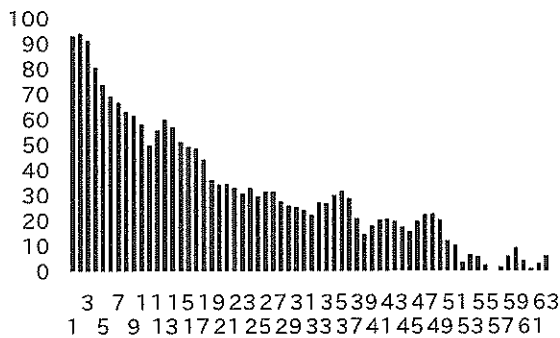
実験1:音の倍音の構成のグラフ



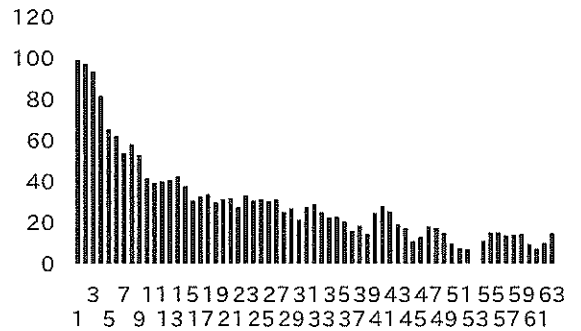
(図13)clean ギター



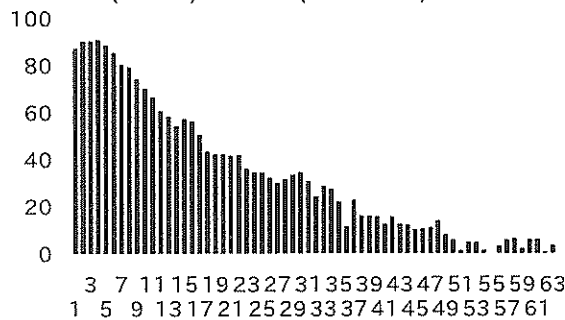
(図14)distortion ギター



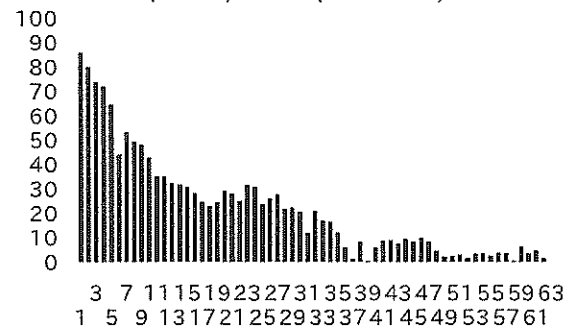
(図15)サクソ(木管楽器)



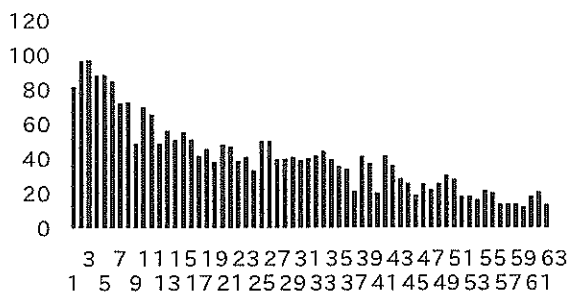
(図16)ホルン(金管楽器)



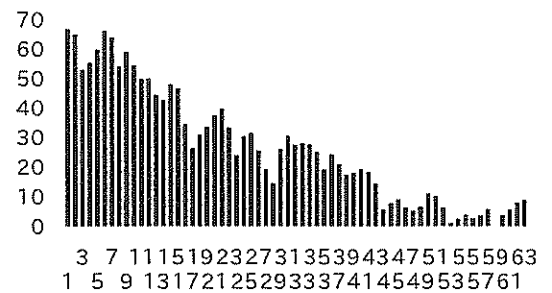
(図17)トランペット(金管楽器)



(図18)トロンボーン(金管楽器)



(図19)クラリネット(木管楽器)



(図20)バイオリン(弦楽器)



### 3. 正弦波の合成 [実験 2]

#### 3-1 目的と方法

**目的** 実際に正弦波を合成して1つの音を作ってみることで、音は基本となる正弦波から成り立っていることを確かめる。

**方法** Audacityの音声合成機能を用いて  $f(x) = \frac{1}{N} \times \sin Nx$  の式に

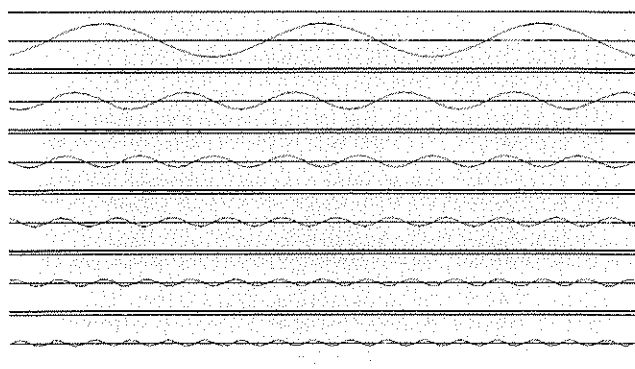
N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8をそれぞれ代入した場合の波形を作った。ここではN=1のとき440Hzとなるようにした。そのようにしてできた音の波形を合成し、できた音の波形の倍音の構成について解析する。

**使用したもの** ・音声合成ソフト Audacity ver.1.3.13

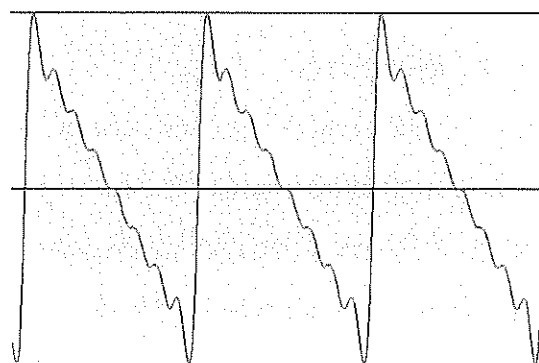
#### 3-2 結果と考察

8つの音を合成してできた音の波形については計算通りに作ることができた(図22)。しかし、できた音の倍音の構成を解析すると9以上の倍音が含まれているのが見られた(図23)。本来ならば8までの倍音のみが含まれるはずである。Audacityの特性により、そのような誤差が起こってしまったのではないかと考えられる。

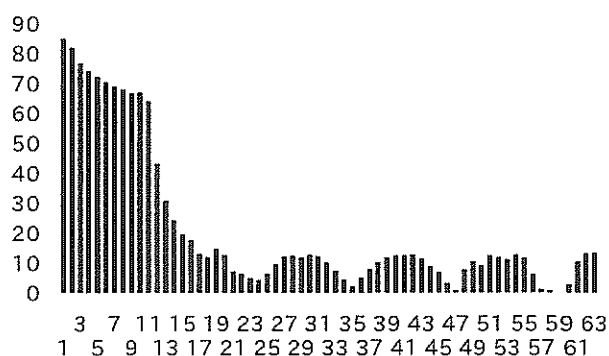
#### 実験 2: 音の波形と倍音の構成



(図 21)合成前の8つの音の波形



(図 22)合成後の音の波形



(図 23)合成後の音の倍音の構成のグラフ

#### 4. 録音によって音が割れた場合の変化 [実験 3]

##### 4-1 目的と方法

**目的** 音の大きさがレコーダーの録音できる最大音量を超えると音は割れて記録される。このとき、どのように変化しているのか確かめる。

**方法** 音叉の音を録音する際、何もせずに録音したものとわざと音が割れるように録音したものの二種類に分かれるようにする。そしてそれらの音の波形と倍音の構成について解析する。

**使用したもの** ・音叉

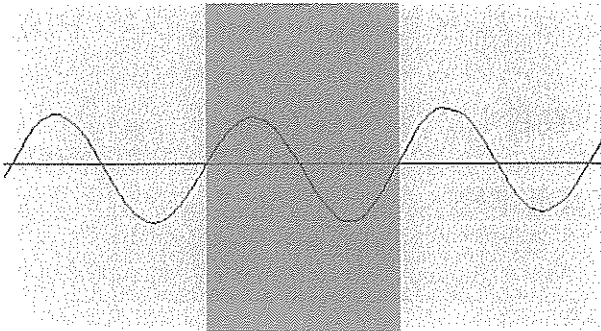
・レコーダー TASCAM DR-07mk2

・音声合成ソフト Audacity ver.1.3.13

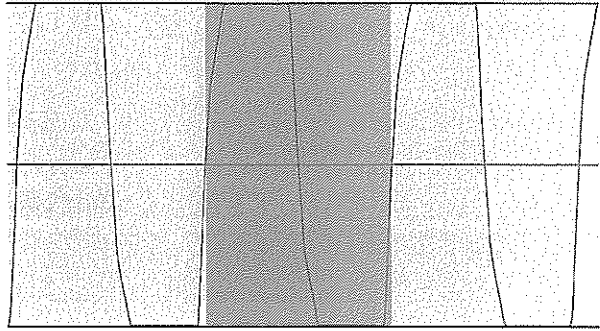
##### 4-2 結果と考察

正常な音叉の波形ではきれいな sin 波のグラフがみられた。しかし、割れさせた音叉の波形は短形波に近い形になっていた。また、倍音の構成をみても正常な音叉より音の割れた音叉の方が高い倍音まで含まれていることが分かった。聞いてみても、音が割れた音叉の音は耳に痛かったが正常な音叉の音は心地よく響いた。またそのことにより音の波形と倍音の構成には関係性があることが考えられる。

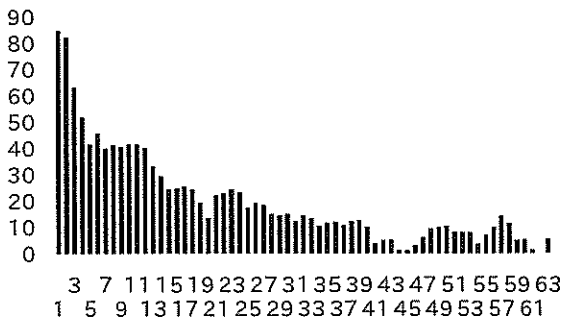
実験3：音が割れた場合の波形の変化



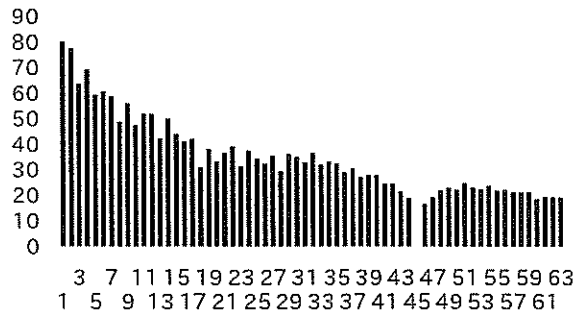
(図 24)普通の音叉の波形



(図 25)音の割れた音叉の波形



(図 26)普通の音叉の倍音の構成



(図 27)音が割れた音叉の倍音の構成

今後の課題

- ・ 実験2の結果で倍音の構成が9以上の倍音が含まれてしまった原因の究明.
- ・ 実験1, 3では録音する際に雑音が入ってしまい, 正確なデータが取れなかった可能性がある  
ので, 録音環境を整えて再度実験してみることに.

参考文献

[1] 音楽心理学 (BGMの心理) <http://www.otokan.com/musicpsychology/>,  
(accessed 2012-2-10)

# 素数の「周期」に基づいたフェルマー数の素因数の判別

安部 民将

仙台第三高等学校

## 概要

素数の「周期」というものを定義することによって、 $n^2 + 1$  の形の整数（ひいてはフェルマー数  $F_n = 2^{2^n} + 1$ ）が素数かどうかの判別の手間を減らすことができなにかについて考察した。周期について成り立つと思われるいくつかの性質が分かったが、数学的な証明を得ること、そして素数かどうかの判別に実際に応用できるかどうかの検証までには至らなかった。

## はじめに

$n$  を自然数としたとき、「 $n^2 + 1$  の形の素数は無限に存在するか」というのは未解決問題である。 $n$  が奇数のときは明らかに偶数であり、 $n = 1$  のときを除けばすべて素数ではない。よって、 $n$  が偶数のときだけを考えれば良いが、全ての偶数を一度に考えるのは難しいため、2 のべき乗について考えていく。このとき、 $n = 2^m$  とすると  $n^2 + 1 = 2^{2m} + 1$  であるから、実質的に  $2^n + 1$  の形の素数について考察することになる。

## 1 方法

以下、自然数全体の集合を  $\mathbb{N}$  と書く。

- $2^n + 1$  ( $n \in \mathbb{N}$ ) について、 $n$  がどのような場合に非素数となるかを調べる。
- 特定の素因数がどのような  $n$  のとき含まれるのかを調べる。
- $n = 2^m$  のとき、 $2^n + 1$  の素因数であるような素数を調べ、フェルマー数  $F_n = 2^{2^n} + 1$  との関連について調べる。

## 2 $2^n + 1$ が素数となる場合

数列  $\{2^n + 1\}$  について、 $n = 1, 2, 3, \dots$  の場合を書いていくと、

$$\{2^n + 1\} : 3, 5, 9, 17, 33, \dots$$

以下、1つおきに3の倍数が現れる。

このことは数学的帰納法により証明できる。

$$2^1 + 1 = 3$$

$$2^3 + 2^2 = 3 \cdot 2^2$$

$$2^3 + 1 = 3 \cdot 2^2 - 2^2 + 1 = 3 \cdot 2^2 - (2^1 - 1)(2^1 + 1)$$

$2^n + 1 = 3x$  ( $x \in \mathbb{N}$ ) のとき、

$$2^{n+2} + 2^2 = 3x \cdot 2^2$$

$$2^{n+2} + 1 = 3x \cdot 2^2 - (2^1 - 1)(2^1 + 1) = 3(2^2x - 2^1 + 1)$$

よって、 $1 + 2p = n$  ( $p \in \mathbb{N}$ ) のとき、 $2^n + 1$  は3の倍数となる。

これを一般化すると、 $m + 2mp = n$  すなわち  $m(1 + 2p) = n$  ( $p \in \mathbb{N}$ ) のとき、 $2^m + 1$  の倍数となる。

$m$  は任意の整数、 $1 + 2p$  はすべての奇数なので、 $n$  が2のべき乗のときのみ  $2^n + 1$  は素数である可能性がある。

### 3 素数の周期

ここで、ある素数が  $2^n + 1$  の、 $n$  がいくらのときに初めて現れる素因数であるかを調べる。

例えば、7について合同式をたてる。

$$2^0 \equiv 1 \pmod{7}$$

$$2^1 \equiv 2 \pmod{7}$$

$$2^2 \equiv 4 \pmod{7}$$

$$2^3 = 8 \equiv 1 \pmod{7}$$

よって、 $2^3$  のとき1にもどる。このことから、7は  $2^n + 1$  の素因数でないことが分かる。

また、3について、

$$2^0 \equiv 1 \pmod{3}$$

$$2^1 = 2 \equiv -1 \pmod{3}$$

$$2^2 \equiv 1 \pmod{3}$$

であるため、 $2^1 + 1 = 3$  である。また、 $2^2$  のとき1にもどる。

このような処理をしたとき、1にもどるときの  $2^n$  の指数  $n$  のうち最小のものを素数  $p$  の周期と呼ぶことにする。

例 上の例より 7 の周期は 3, 3 の周期は 2 である. 同様に, 5 の周期は 4 となる.

この周期  $n$  が偶数  $2m$  であるときのみ, その周期をもつ数は  $2^m + 1$  の素因数である可能性をもつ.

ここで, 次のようなことを考えた.

Step 1 周期のこの定義は次の形に言い換えることができる.

ある素数  $a$  の周期が  $2m$  であるとは,

$$a = \frac{2^{2m} - 1}{x} = \frac{(2^m - 1)(2^m + 1)}{x}$$

が成り立つことである.

Step 2 ここで,  $a$  が  $2^m - 1$  の素因数であるとする, 周期は  $m$  になるはずなので,  $a$  は  $2^{2m} - 1$  と等しいか,  $2^m + 1$  の素因数である. (ただし, 指数が素数でないため,  $a$  が素数であるという仮定に反する.)

Step 3 よって, 周期が 2 のべき乗であるような素数が存在すれば, フェルマー数の素因数であるといえる. すなわち,

$$p < F_{n+1} \text{ かつ } (p \text{ の周期}) = 2^n \text{ である素数 } p \text{ が存在する} \iff F_{n+1} \text{ は合成数である} \quad \dots(1)$$

が成り立つ.

Step 4 よって, 任意の素数について周期を知る, あるいは任意の周期から素数を得る事ができれば, フェルマー数が素数かどうかの判別が比較的容易になる可能性がある.

しかし, 残念ながら Step 3 の (1) に反例 ( $n = 1, p = 3$  や  $n = 2, p = 5$ ) があることが分かるなど, この方向でうまく議論を組み立てることが出来なかった. これについては今後検証が必要である.

## 4 素数の周期の性質

以下, 周期に関して成り立つと予想される性質を以下に述べる.

予想 1  $p^a$  の周期は  $(p \text{ の周期}) \times p^{a-1}$  となる. (例として, 表 1, 表 2)

$p^a$	$p^a$ の周期
3	2
9	6
27	18
⋮	⋮

表 1  $p = 3$  の場合

$p^a$	$p^a$ の周期
5	4
25	20
125	100
⋮	⋮

表 2  $p = 5$  の場合

予想 1 が正しいければ「フェルマー数は平方因子を持たない」ということが言える可能性がある。

予想 2 ある素数  $p$  の周期は、 $(p-1)/x$  である。 ( $p-1$  をある整数  $x$  で割ったものである。) すなわち、ある周期  $a$  をもつ素数  $p$  は、

$$p = an + 1$$

である。

これは、すでにオイラーによって知られている「 $F_n$  の素因数は  $k \cdot 2^{n+1} + 1$  である」という事実と合致する。

これらについては、今後検証が必要である。

## 参考文献

- [1] Wilfrid Keller. *Fermat factoring status*, <http://www.prothsearch.net/fermat.html>, (accessed 2012-2-21).

# 黄金比とフィボナッチ数列

安孫子 健一

仙台第三高等学校

## 概要

人が見たとき最も美しいと感じる長方形の比は黄金比と呼ばれ、その比は、 $(1 + \sqrt{5})/2 : 1$  となることが知られており、この比は日常の様々な場所に現れる。また、 $F_{n+2} = F_{n+1} + F_n$  という漸化式に  $F_1 = 1, F_2 = 1$  という条件を付けた数列はフィボナッチ数列と呼ばれ、その一般項は  $F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left\{ \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right\}$  という不思議な形になることを確かめた。フィボナッチ数列に関しては、色々な性質が知られているが、その中のいくつかの定理についてリュカ数列も利用することで証明した。

## はじめに

数学の有名な問題である黄金比について理解を深めるため、その過程で必要なフィボナッチ数列とともに調べた。

### 1. ユークリッドによる黄金比問題[1]

ユークリッドはユークリッドによる黄金比問題の中で次のような問題を提起している。

線分を二つに分ち、小さいほうの線分と全体とでできる長方形の面積と、大きいほうの線分でできる正方形の面積が等しくなるように分けよ。

#### 【解法】

長さが  $a, b$  ( $0 < a < b$ ) の 2 つの線分を用いると、正方形の面積は  $b^2$ 、長方形の面積は  $a(a + b)$  とあらわせる。

この 2 つが等しくなればいいのだから  $b^2 = a(a + b)$  これを整理して  $b^2 - ab - a^2 = 0$

$$\text{両辺を } a^2 \text{ で割って } \left( \frac{b}{a} \right)^2 - \frac{b}{a} - 1 = 0 \quad \therefore \quad \frac{b}{a} = \frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}$$

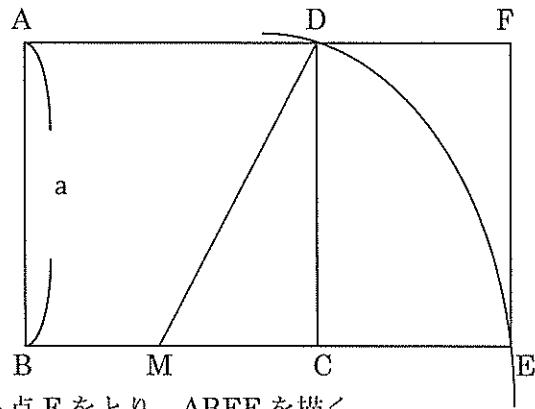
$$0 < a < b \text{ より } \frac{b}{a} > 0 \text{ なので } \frac{b}{a} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \quad \therefore \quad a : b = 1 : \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$$



## 2. 黄金比の作図と証明

黄金比の作図と証明方法はたくさんあるが、その中の一つを証明する。

- 正方形 ABCD をつくり、その一辺の長さを  $a$  とする。
- BC の中点を M とし、D と M を結ぶ。
- M を中心に半径 DM の円を描く。
- BC の延長線との交点を E とし、AD の延長線上の点 D に近いほうに  $CE=DF$  となる点 F をとり、ABEF を描く、それが黄金比を持つ四角形である。



### 【証明】

$\triangle MDC$  について  $MC = \frac{1}{2}a$ ,  $CD = a$  であるから、ピタゴラスの定理より

$$MD = \sqrt{CD^2 + MC^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}a\right)^2 + a^2} = \frac{\sqrt{5}}{2}a \quad \text{となる.}$$

したがって、 $BE = BM + ME = BM + MD = \frac{1+\sqrt{5}}{2}a$

よって、 $AB : BE = a : \frac{1+\sqrt{5}}{2}a = 1 : \frac{1+\sqrt{5}}{2}$

## 3. フィボナッチ数列

### 3-1 フィボナッチ数列とは

フィボナッチ数列とは、

$$1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, \dots$$

と続く数列のこと、要するに前の2つの項を足すと、次の項になる数列のことである。

(ただし初項と第2項は1である.)

### 3-2 フィボナッチ数列の一般項

まず、フィボナッチ数列  $\{F_n\}$  は、次の漸化式で得られる。

$$F_1 = 1, F_2 = 1, F_{n+2} = F_{n+1} + F_n \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$F_{n+2} - F_{n+1} - F_n = 0$  と変形し、実数の組  $(\alpha, \beta)$  を用いて、 $F_{n+2} - (\alpha + \beta)F_{n+1} + \alpha\beta F_n = 0$

とすると,

$$\alpha + \beta = 1 \quad , \quad \alpha\beta = -1$$

$\alpha, \beta$  は方程式  $x^2 - (\alpha + \beta)x + \alpha\beta = 0$  の解なので,

$$(\alpha, \beta) = \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2}, \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right), \quad \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2}, \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)$$

↳(1) ↳(2)

$$(1) \text{ のとき, } F_{n+2} - \frac{1+\sqrt{5}}{2}F_{n+1} = \frac{1-\sqrt{5}}{2} \left( F_{n+1} - \frac{1+\sqrt{5}}{2}F_n \right)$$

数列  $\left\{ F_{n+1} - \frac{1+\sqrt{5}}{2}F_n \right\}$  は公比  $\frac{1-\sqrt{5}}{2}$  初項  $\frac{1-\sqrt{5}}{2}$  の等比数列である.

$$\text{したがって, 一般項は } \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right) \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{n-1} = \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \dots (3)$$

(2) のときも同様に, 数列  $\left\{ F_{n+1} - \frac{1-\sqrt{5}}{2}F_n \right\}$  は公比  $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$  初項  $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$  の等比数列である.

$$\text{したがって, 一般項は } \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right) \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{n-1} = \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n \dots (4)$$

(4) - (3) を計算することで

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left\{ \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right\}$$

という一般項が求まる.

### 3-3 確認

$$n = 1 \text{ のとき } F_1 = \frac{1}{\sqrt{5}} \left\{ \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right) - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right) \right\} = \frac{1}{\sqrt{5}} \times \sqrt{5} = 1$$

$$n = 2 \text{ のとき } F_2 = \frac{1}{\sqrt{5}} \left\{ \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^2 - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^2 \right\} = \frac{1}{\sqrt{5}} \left\{ \frac{1+2\sqrt{5}+5 - (1-2\sqrt{5}+5)}{4} \right\} = \frac{1}{\sqrt{5}} \times \sqrt{5} = 1$$

$$n = 3 \text{ のとき } F_3 = \frac{1}{\sqrt{5}} \left\{ \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^3 - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^3 \right\} = \frac{1}{\sqrt{5}} \left\{ \frac{1+3\sqrt{5}+15+5\sqrt{5} - (1-3\sqrt{5}+15-5\sqrt{5})}{8} \right\} = \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \frac{16\sqrt{5}}{8} \right) = 2$$

## 4. フィボナッチ数列のさまざまな性質

### 4-1 フィボナッチ数列の基本的な定理

ここでは、「フィボナッチ数列の小宇宙」(中村[2])で述べられているフィボナッチ数列の基本的な性質を証明していく.

※以下, 特に断りがない限り,  $n = 1, 2, 3, \dots$  とする.

**定理1**  $F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + F_4^2 + \dots + F_n^2 = F_n \times F_{n+1} \dots \textcircled{1}$

【証明】  $n$  のついでに数学的帰納法で示す。

I.  $n=1$  のとき

$$(\text{左辺}) = 1, (\text{右辺}) = 1 \times 1 = 1$$

よって、 $n=1$  のとき $\textcircled{1}$ が成り立つ。

II.  $n=k$  のとき、 $\textcircled{1}$ が成り立つと仮定すると

$$1+1+4+9+\dots+F_k^2 = F_k \times F_{k+1} \dots (5)$$

$n=k+1$  のとき、 $\textcircled{1}$ の左辺を、(5)を用いて変形すると

$$1+1+4+9+\dots+F_k^2+F_{k+1}^2 = F_k \times F_{k+1} + F_{k+1}^2$$

$$(\text{右辺}) = F_{k+1}(F_k + F_{k+1}) = F_{k+1} \times F_{k+2}$$

したがって、 $n=k+1$  のときも $\textcircled{1}$ は成り立つ。

I, IIにより、 $\textcircled{1}$ の等式は証明された。

**定理2**  $F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + \dots + F_n = F_{n+2} - 1 \dots \textcircled{2}$

【証明】 フィボナッチ数列の漸化式より、

$$F_1 = F_3 - F_2$$

$$F_2 = F_4 - F_3$$

$$F_3 = F_5 - F_4$$

⋮

$$F_n = F_{n+2} - F_{n+1}$$

これらを辺々加えると、 $F_3$ から $F_{n+1}$ までがすべて打ち消しあうので残るものは、

$F_{n+2} - F_2$ という簡単な式になる。

$$\text{これを計算すると } (\text{右辺}) = F_{n+2} - F_2 = F_{n+2} - 1 = (\text{左辺})$$

**定理3**  $F_{2n}^2 - 5F_n^4 = F_n^2 \times 4(-1)^n \dots \textcircled{3}$

このまま証明するのは困難なので、新たにリュカ数列というものを導入して証明の手助けにする。

リュカ数列は、フィボナッチ数列と同じ漸化式で得られるが、初項と第2項が、1, 3で始まる点異なる。(初項と第2項を特に定めのないものを一般フィボナッチ数列と呼ぶ。)

一般項は、リュカ数列を $\{L_n\}$ として、

$$L_n = \left\{ \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n + \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right\}$$

となる。

【定理3の証明】

以下断りがない限り、 $\frac{1+\sqrt{5}}{2} = \alpha$ 、 $\frac{1-\sqrt{5}}{2} = \beta$ とする。

まず、 $L_n^2 = (\alpha^n + \beta^n)^2 = (\alpha^n - \beta^n)^2 + 4(\alpha\beta)^n = (F_n \times \sqrt{5})^2 + 4(-1)^n = 5F_n^2 + 4(-1)^n$

※ $\alpha\beta = -1$ である。

$$\begin{aligned} \text{この式を整理して } 5F_n^2 &= L_n^2 - 4(-1)^n \quad \text{両辺に } F_n^2 \text{ をかけて } 5F_n^4 = F_n^2 \times \{L_n^2 - 4(-1)^n\} \\ &= (F_n L_n)^2 - 4(-1)^2 \times F_n^2 \end{aligned}$$

ここで  $F_n L_n = \frac{1}{\sqrt{5}}(\alpha^n - \beta^n)(\alpha^n + \beta^n) = \frac{1}{\sqrt{5}}(\alpha^{2n} - \beta^{2n}) = F_{2n}$

よって  $5F_n^4 = F_{2n}^2 - 4(-1)^2 \times F_n^2$  この式を変形すると③が得られる。

#### 4-2 フィボナッチ数列の加法定理

$F_{n+k}$  を  $F_{n+1}$  と  $F_n$  で表すことを考える。ただし  $k \geq 2$  とする。

最初は定義より  $F_{n+2} = F_{n+1} + F_n$

次は、 $F_{n+3} = F_{n+2} + F_{n+1} = (F_{n+1} + F_n) + F_{n+1} = 2F_{n+1} + F_n$

以下同様に、 $F_{n+4} = F_{n+3} + F_{n+2} = (2F_{n+1} + F_n) + (F_{n+1} + F_n) = 3F_{n+1} + 2F_n$

$$F_{n+5} = F_{n+4} + F_{n+3} = (3F_{n+1} + 2F_n) + (2F_{n+1} + F_n) = 5F_{n+1} + 3F_n$$

$$F_{n+6} = F_{n+5} + F_{n+4} = (5F_{n+1} + 3F_n) + (3F_{n+1} + 2F_n) = 8F_{n+1} + 5F_n$$

$$F_{n+7} = F_{n+6} + F_{n+5} = (8F_{n+1} + 5F_n) + (5F_{n+1} + 3F_n) = 13F_{n+1} + 8F_n$$

ここまで計算すると  $F_{n+1}$  と  $F_n$  の係数がフィボナッチ数列になっているのだろうと予想できる。これを一般化したのが次の定理である。

定理4

$$F_{n+m} = F_m F_{n+1} + F_{m-1} F_n \quad \cdots \textcircled{4}$$

【証明】  $m$  についての数学的帰納法で証明する.

$m$  を自然数として

I.  $m = 2, 3$  のとき④は成り立つ

II.  $m = r, m = r - 1$  のとき④が成り立つと仮定すると, ただし  $r$  は 3 以上の自然数とする.

$$F_{n+r} = F_r F_{n+1} + F_{r-1} F_n \quad F_{n+(r-1)} = F_{r-1} F_{n+1} + F_{r-2} F_n \text{ となり}$$

これら 2 式の辺々を足すと,

$$\begin{aligned} (\text{左辺}) &= F_{n+r} + F_{n+(r-1)} = F_{n+(r+1)} \\ (\text{右辺}) &= (F_r F_{n+1} + F_{r-1} F_n) + (F_{r-1} F_{n+1} + F_{r-2} F_n) \\ &= F_n (F_{r-1} + F_{r-2}) + F_{n+1} (F_r + F_{r-1}) = F_n F_r + F_{n+1} F_r \end{aligned}$$

よって,  $F_{n+(r+1)} = F_n F_r + F_{n+1} F_r$  となり  $m = r + 1$  のときも④は成り立つことが示せた.

III. フィボナッチ数列の漸化式を書き直すと  $F_n = F_{n+2} - F_{n+1}$  となり,

$n$  に 0 を代入すると,  $F_0 = F_2 - F_1 = 1 - 1 = 0$  この操作を繰り返すことで  $n$  が 0 以下のときも  $F_n$  を定義することができる.

$$m = 1 \text{ のとき } (\text{左辺}) = F_{n+1}, \quad (\text{右辺}) = F_1 F_{n+1} + F_0 F_n = F_{n+1}$$

したがって,  $m=1$  のときも④は成り立つ.

I, II, III より④の等式は証明された.

定理 4 の等式をフィボナッチ数列の加法定理と呼ぶ.

定理 5  $F_n^2 + F_{n+1}^2 = F_{2n+1} \dots$  ⑤

【証明】  $F_{2n+1}$  を  $F_{n+(n+1)}$  とみると加法定理が使える.

$$(\text{右辺}) = F_{n+(n+1)} = F_{n+1} F_{n+1} + F_n F_n = F_{n+1}^2 + F_n^2 = (\text{左辺})$$

(右辺) = (左辺) なので等式は証明された.

定理6

$$F_{3n}/F_n = L_{2n} + (-1)^n = 5F_n^2 + 3(-1)^n \dots \textcircled{6}$$

【証明】

$$\begin{aligned} & \downarrow (\alpha^n)^3 - (\beta^n)^3 = (\alpha^n - \beta^n)((\alpha^n)^2 + (\alpha\beta)^n + (\beta^n)^2) \\ \text{フィボナッチ数列の一般項より } \frac{F_{3n}}{F_n} &= \frac{1}{\sqrt{5}} \times \sqrt{5} \times \frac{\alpha^{3n} - \beta^{3n}}{\alpha^n - \beta^n} = \alpha^{2n} + (\alpha\beta)^n + \beta^{2n} \dots (1) \end{aligned}$$

さらにリュカ数列の一般項を用いると(1)は  $L_{2n} + (-1)^n \dots (2)$

$$\text{ここで } L_{2n} = \overset{\downarrow \alpha^{2n} + 2(\alpha\beta)^n + \beta^{2n}}{(\alpha^n + \beta^n)^2} - 2(\alpha\beta)^n = L_n^2 - 2(-1)^n \dots (3)$$

$$\diamond L_n^2 = (\alpha^n + \beta^n)^2 = \overset{\downarrow \alpha^{2n} - 2(\alpha\beta)^n + \beta^{2n}}{(\alpha^n - \beta^n)^2} + 4(\alpha\beta)^n = (\alpha^n - \beta^n)^2 + 4(-1)^n$$

$$\diamond (\alpha^n - \beta^n) = \sqrt{5} \times \frac{1}{\sqrt{5}} (\alpha^n - \beta^n) = \sqrt{5}F_n$$

上の2式を(3)に代入すると  $L_{2n} = (\sqrt{5}F_n)^2 + 4(-1)^n - 2(-1)^n = 5F_n^2 + 2(-1)^n \dots (4)$

(4)を(2)に代入すると、 $L_{2n} + (-1)^n = 5F_n^2 + 3(-1)^n = F_{3n}/F_n$

よって等式は証明された。

4-3 フィボナッチ数列の母関数 (結城[3])

関数  $f(x)$ を  $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$  の形に表すことをベキ級数展開という。数列の母関数(生成関数)とは、ベキ級数展開したときの係数が与えられた数列と一致する関数のことで、数列と母関数の対応を簡単に表すと、

数列 $\{a_n\}$	$\longleftrightarrow$	母関数 $f(x)$
$\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 \dots\}$	$\longleftrightarrow$	$a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + \dots$

フィボナッチ数列の母関数  $f(x)$  を簡単に表す式を考える。

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} F_n x^n = (0x^0) + x + x^2 + 2x^3 + 3x^4 + 5x^5 + 8x^6 + 13x^7 + \dots \text{とする.}$$

$$f(x) = 0 + x + \sum_{n=2}^{\infty} F_n x^n \dots (1)$$

$$(1) \times x \quad f(x) \times x = \sum_{n=0}^{\infty} F_n x^{n+1} = \sum_{n=1}^{\infty} F_{n-1} x^n = 0 + \sum_{n=2}^{\infty} F_{n-1} x^n \dots (2)$$

$$(1) \times x^2 \quad f(x) \times x^2 = \sum_{n=0}^{\infty} F_n x^{n+2} = \sum_{n=2}^{\infty} F_{n-2} x^n \dots (3)$$

$$(2) + (3) \quad f(x) \times (x + x^2) = \sum_{n=2}^{\infty} F_{n-1} x^n + \sum_{n=2}^{\infty} F_{n-2} x^n = \sum_{n=2}^{\infty} F_n x^n \dots (4)$$

$$(1) - (4) \quad f(x) \times (1 - x - x^2) = x + \sum_{n=2}^{\infty} F_n x^n - \sum_{n=2}^{\infty} F_n x^n \quad \therefore f(x) = \frac{x}{1 - x - x^2}$$

ここからさらに発展させるとフィボナッチ数列の一般項を求めることができる。

このように母関数とは数列を研究する際に非常に有効な手段である。

## まとめ

見ての通り黄金比よりフィボナッチ数列がメインになってしまった。そしてその2つの関係性についてうまくまとめるまではいかなかった。実は「隣り合うフィボナッチ数の比は  $n \rightarrow \infty$  で  $\alpha = (1 + \sqrt{5})/2$  に収束する。」ということが分かっているが、それは今後の課題にしたい。なぜ母関数が数列を扱う上で有用なのかという数列に関数の知識を持ちこんで色々できるからなのだが、それにはまだまだ学ぶべきことが多いので後々取り組もうと思う。

## 参考文献

- [1] 黄金比いろいろ <http://gakuen.gifu-net.ed.jp/~contents/museum/golden/page62.html>,  
(accessed 2012-2-6)
- [2] 中村滋 《改訂版》フィボナッチ数列の小宇宙/フィボナッチ数, リュカ数, 黄金分割, 日本評論社  
2008年 p. 29-42 ISBN978-4-535-78492
- [3] 結城浩 数学ガール ソフトバンククリエイティブ株式会社 2009年 p. 57-76  
ISBN978-4-7973-4137-9

# 白神山地の地滑りについての考察

宇佐見茜，工藤香菜，小梨晶子

宮城県仙台第三高等学校

## 前書き

宮城県仙台第三高等学校はSSH（スーパーサイエンスハイスクール）に指定されており、本校のSSH行事の1つに白神山地でのフィールドワークがある。今回、私たち3人はこの白神山地のフィールドワークに参加した。そして私たちはこの行事の中で、弘前大学農学生命科学部教授である檜垣大助教授から、江戸時代に大地震がありその大地震によって白神山地で地滑りが起こっていたことを聞いた。またその地滑りによって、白神山地にある追良瀬川上流で川がせき止められていたということが分かった。

そこで私たちは檜垣大助教授の協力のもと、地震発生当時に追良瀬川がどのようにせき止められ、地滑りからどれほどの日数で決壊に至ったかを調査した。また、当時追良瀬川下流付近に村があり、その村人が地震発生当時の追良瀬川の様子を記した日記を残していたというのを聞き、私たちの調査結果と当時の日記を比べ、白神山地に実際に何が起こったかを考察した。

今回の研究では、地滑りが起こってから決壊に至る日数を、川幅・流速の測定から計算により求め、その結果を日記と比較し、白神山地の地形状況から過去に起こった災害を調査することが可能か検証することが目的である。

## 材料と方法

追良瀬川の地形状況を調査し、計測したデータをもとに計算する。そしてその計算結果を地震発生当時の日記と照らし合わせてみる。

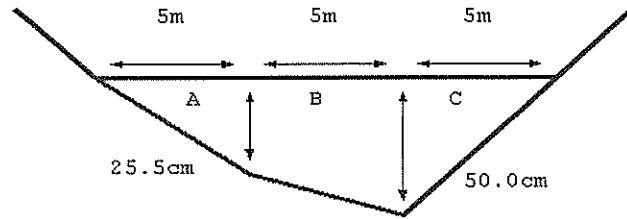
追良瀬川で地滑りが起きたというのは、過去の文献と地質調査によって確定できた。地質調査では、川の1箇所だけ地層の重なりかたが他と違うことと、その地層から横倒しになった木などがむき出しになっていたことで、地滑りの起こった場所を確定することができた。

またその地質調査で、当時地滑りによって土砂が標高150mの高さまで積み重なったことが分かった。そこで私たちは今回の川の決壊について、当時水は150mの高さ



まで溜まったものとし、溜まった水量が150mを越えた時点で限界量に達し決壊とするとして研究を進めた。

追良瀬川の地形状況は川の幅、深さ、流速を計測する。岸から岸までの幅を川の幅とし、メジャーで計測すると15mだった。川の深さは、川の底は平らでは



ないので川の幅とし、メジャーで計測すると15mだった。川の深さは、川の底は平らではないので川の幅を3等分し、等間隔で2ヶ所計測する。計測結果は図のように25.5cmと50.0cmとなった。流速は上流から下流へ20m空のペットボトルを流し、ストップウォッチで20m下流へ到達するのにかかった時間を計測する。それによって1秒あたりの流速が求められる。

計測したデータをもとに、決壊に至った日数を求める。おおまかな計算法は追良瀬川の断面積を求め、1秒あたりに流れる水量を計算する。またそのデータを用い1日あたりに追良瀬川に流れる水量を求める。その後白地図を使い、当時水がどれくらい溜まったかを計算した。最初に地滑りの起こった地点から上流へ、150mの範囲を囲みその面積を求める。その際、計算しやすいように範囲を直線化して考える。次に川の断面積を利用し、水の溜まった領域の断面積を求める。その後150mの範囲の面積と断面積を使い、当時水の溜まった領域を求める。つまりそれは溜まった水の量なので、この計算により当時どれくらいの量の水が溜まったかが分かる。当時どれくらい水がたまったか計算すると、追良瀬川の1日あたりに流れる水量を使い、いったいどれほどの日数で限界量に達したかを求める。

地震発生当時、追良瀬川の下流にあった村の住人が、地震発生から川の土砂が決壊するまでを日記に記していた。よって私たちが出した計算結果と当時の日記を比較し、この計算結果がどこまで実際の地滑りに近いかを調べる。

## 結果

まず1秒あたりの流速を求める。20mを12秒で流れたので、流速は0.6m/秒となる。これより、幅・深さ・流速のデータを元に川の断面積を求める。

図より、

$$A \quad 5 \times 0.255 \div 2 = 0.6375$$

$$B \quad 5 (0.255 + 0.5) \div 2 = 1.8875$$

$$C \quad 5 \times 0.5 \div 2 = 1.25$$

$$A+B+C \quad 0.6375 + 1.8875 + 1.25 = 3.775 \text{m}^2$$

・ m/秒あたりに流れる水量

$$\text{断面積} \times \text{流速} \quad 3.775 \times 0.6 = 2.265 \text{m}^3/\text{秒}$$

・ 1日あたりに流れる水量

1日は86400秒なので

$$\text{m}^3/\text{秒} \times 86400 \quad 2.265 \times 86400 = 195696 \text{m}^3/\text{日}$$

$$\text{水の溜まった量} \div 195696 \approx 11$$

当時の日記→14日

## 考察

当時の日記と私たちの計算では3日の誤差が出た。その原因として流速や川の断面積を計測する際に誤差が生じたこと、及び地震発生当時が現在の西暦で2月だったため、寒さで川の水が凍ってしまい川の水が実際の水量より少なかったことの2つが考えられる。

本研究では、現在の地滑り地帯の調査から過去に起きた決壊の日数などを知ることが出来ると分かった。今後は流速を正確に測定すること、及び川の地形状況を更に詳しく調べることによって誤差はさらに縮まると考えられる。

# 江戸時代の地震による地滑り 白神山地の地形変化

宮城県仙台第三高等学校 小梨晶子・宇佐見茜・工藤香菜

## 研究動機

宮城県仙台第三高等学校ではSSH行事の1つに白神山地でのフィールドワークがある。今回私たちはこの白神山地のフィールドワークに参加した。そしてその中で弘前大学農学生命科学部教授である楡垣大助教授から、江戸時代に起こった大地震により白神山地に地滑りがあったことを聞いた。さらにその地滑りによって、白神山地にある追良瀬川上流で川がせき止められていたことが分かった。

そこで私たちは楡垣大助教授の協力ののもと、川がどのようなようにせき止められ、どれほどで谷壘に至ったかを調査した。また、地震発生当時の日記と照らし合わせることで白神山地に実際に何が起こったか調査した。

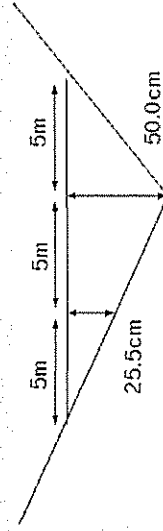
## 調査方法

- 1) 実際に地滑りが起こった場所での追良瀬川の幅、深さ、流速を計測する
  - ・幅 岸から岸までを計測する
  - ・深さ 川の深さは一定ではないため、川の幅を3等分し等間隔で2ヶ所計測する。
  - ・流速 川の上流から下流へ、空のペットボトルを20m流し速さを計測する。そこから流速を求める。
- 2) 1で計測したデータを元に計測する
  - ・計測した川の幅、深さから川の断面積を求める。また、断面積と流速のデータを用いて、毎秒あたりに流れる水量を計算する。さらに1日あたりに流れる水量も計算する。
- 3) 当時溜まった水量を計算する
  - ・土砂崩れが起こった当時、川がせき止められたことにより水がどれくらいい溜まったかを計算し、2で計算した1日の水量を利用して何日で水が溜まったかを計算する
- 4) 計算結果を当時の日記と照らし合わせてみる

## 計算及び調査結果 1

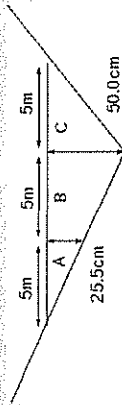
- 1) 追良瀬川の幅、深さ、流速を測定する

- ・幅 約15m
- ・深さ 約0.255m 約0.500m
- ・流速 0.6m/秒



## 計算及び調査結果 2

2) 1で計算したデータを元に計算する  
川の断面積を求める



A  $5 \times 0.255 \div 2 = 0.6375$   
 B  $5 (0.255 + 0.5) \div 2 = 1.8875$   
 C  $5 \times 0.5 \div 2 = 1.25$   
 A+B+C  $0.6375 + 1.8875 + 1.25 = 3.775 \text{ m}^2$

- ・ m/秒あたりに流れる水量  
断面積 × 流速  $3.775 \times 0.6 = 2.265 \text{ m}^3/\text{秒}$
- ・ 1日あたりに流れる水量  
1日は86400秒なので  
 $\text{m}^3/\text{秒} \times 86400$   $2.265 \times 86400 = 195696 \text{ m}^3/\text{日}$

## 計算及び調査結果 4

4) 当時の日記と照らし合わせてみる

和暦年月日	西暦年月日	天気	詳細	追風川「水道」記帳
寛政4年12月28日	1793/02/08	曇	昨夜少々雪今日時々雪、未結凍地帯減少、四割通過時々地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯。	松原村領で沢々降々「水道」になる
寛政4年12月29日	1793/02/09	曇	昨夜少々雪今日時々雪、未結凍地帯減少、四割通過時々地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯。	
寛政4年12月30日	1793/02/10	曇	昨夜少々雪今日時々雪、未結凍地帯減少、四割通過時々地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯。	
寛政5年1月1日	1793/02/11	晴	昨日より雪、昨夜中より今日時々地帯、未結凍減少、四割通過時々地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯。	
寛政5年1月2日	1793/02/12	曇	昨日より雪、昨夜中より今日時々地帯、未結凍減少、四割通過時々地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯。	
寛政5年1月3日	1793/02/13	曇	昨日より雪、昨夜中より今日時々地帯、未結凍減少、四割通過時々地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯。	
寛政5年1月4日	1793/02/14	曇	昨日より雪、昨夜中より今日時々地帯、未結凍減少、四割通過時々地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯。	
寛政5年1月5日	1793/02/15	曇	昨日より雪、昨夜中より今日時々地帯、未結凍減少、四割通過時々地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯。	
寛政5年1月6日	1793/02/16	曇	昨日より雪、昨夜中より今日時々地帯、未結凍減少、四割通過時々地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯。	
寛政5年1月7日	1793/02/17	曇	昨日より雪、昨夜中より今日時々地帯、未結凍減少、四割通過時々地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯。	
寛政5年1月8日	1793/02/18	曇	昨夜少々雪、今朝霧結凍地帯、今日四ノ割地帯、昨夜時々地帯、今日四ノ割地帯、昨夜時々地帯、今日四ノ割地帯。	
寛政5年1月9日	1793/02/19	晴	昨夜少々雪、今朝霧結凍地帯、今日四ノ割地帯、昨夜時々地帯、今日四ノ割地帯、昨夜時々地帯、今日四ノ割地帯。	
寛政5年1月10日	1793/02/20	晴	昨夜少々雪、今朝霧結凍地帯、今日四ノ割地帯、昨夜時々地帯、今日四ノ割地帯、昨夜時々地帯、今日四ノ割地帯。	
寛政5年1月11日	1793/02/21	曇	昨夜少々雪、今朝霧結凍地帯、今日四ノ割地帯、昨夜時々地帯、今日四ノ割地帯、昨夜時々地帯、今日四ノ割地帯。	
寛政5年1月12日	1793/02/22	曇	昨夜中雨、今日風立、申刻頃地帯、四割通過時々地帯、昨夜時々地帯、今日未結凍地帯。	「水道」押し殺れ、洪水になる

## 計算及び調査結果 3

3)

当時たまった水量を計算する  
 ・地滑り発生当時、川がせき止められたことにより150mの高さまで水が溜まったことが管理大助教授の調べで分かっていた。  
 よって地形図を利用して、地滑りで川がせき止められた場所から上流へ等高線150mの線をたどり、水の溜まった範囲を求め、また溜まった水量を求めた。

- ・ 1日の水量を利用して何日で水が溜まったかを計算する  
範囲から水の溜まった量 ÷ 1日あたり流れる水の量 = 11

よって計算の結果では11日で決壊に至ると予想した。

## 計算及び調査結果 4

- ・ 当時の日記の結果 → 14日で決壊に至った

上記のことから計算結果はほぼ正しいと言える。  
 3日間の違いが出てしまったのは、完璧なデータを測定しなかったため正確な計算ができなかったことと、地震及び地滑りの発生が冬場だったため川の氷が凍ってしまい、1日あたりに流れる川の水量が少なかったため、決壊に必要な水量が溜まるのが遅かったことこの2点が考えられる。

## 結論

今回の調査により、現在の白神山地の地形から過去に起こった災害の状況を調べる  
ことができた。事前調査することどこかで地滑りが起きた場合にもどれほど  
この日数で決断するかを予測することができると分かった。地震などの災害が無く今、  
この様な結果を利用していけないだろうか。

これからはさらに細かいデータを利用して、どこまで正確な日数を導き出せるかな  
ど更なる課題を解決していきたいと思う。

## 協力

弘前大学農学生命科学学部教授 楢垣大助教授

SSH関係者の方々

宮城県仙台第三高等学校 理数科の先生の方々

# ルミノール反応とケミカルライトの混合

自然科学部化学班

川森弘晶 佐藤瑞貴 佐久間航

## 要約

私たちはルミノール反応とケミカルライトを混合させると、それぞれを単独で発光させるより発光が強まったことに疑問を抱いた。そのため、ルミノール反応の溶液を A 液, B 液に、ケミカルライトの溶液を C 液, D 液に分け、混合する溶液を変えることによって、発光の強さがどのように変化するか実験して確認した。結果として、ルミノール反応とケミカルライトを混合すると、それぞれが個々で発光し光が重複し、単独で発光させるよりも混合溶液全体の発光が強くなった。また、ケミカルライトが通常の反応よりも強い発光を示した。ケミカルライトの発光が強まった原因としては、ケミカルライトは塩基性水溶液を加えることによって、反応が促進され、発光が強化されることが明らかになった。

## 1 動機

私たち自然科学部員は、休日に小・中学校へ出向き、顧問とともに科学教室を開催している。その際、好評である化学発光に関して、より強く発光させる方法を追究しようと考えた。そこで、化学発光を示すルミノール反応とケミカルライトの反応を同時に行うことにより、強い発光が生じるのではないかと考え、実験によって確かめようとした。

## 2 発光の原理

電子のエネルギーが最も低い状態にあることを「基底状態」といい、電子のエネルギーが高くなった状態にあることを「励起状態」という。「励起状態」では不安定なエネルギーを捨てることにより安定な「基底状態」に戻ろうとするが、そのときのエネルギーは光として放出される。化学発光においては、酸化反応によってエネルギーが与えられている。

### <ルミノール反応>

ルミノール反応は、ルミノールが過酸化水素により酸化されて 3-アミノフタル酸ができる反応である。ルミノールが酸化されると、途中に 3-アミノフタル酸の励起状態ができる。この励起状態から安定な基底状態になるときに青色に発光する。発光時間は薬品の濃度などによって、10 秒ほどであったり、5 分ほど発光したりする。

### <ケミカルライト>

ケミカルライトは、シュウ酸エステルと蛍光色素との混合物に過酸化水素を混ぜると、シュウ酸エステルが酸化され、1,2-ジオキセタンジオンになる反応である。これが分解されるときに蛍

光色素にエネルギーを与えて励起させ、励起された蛍光色素は基底状態に戻るときにエネルギーを光として放出する。発光時間は、ルミノール反応と比較して非常に長く、8時間ほど発光するものもある。蛍光色素を励起させ発光させるため、光の色は蛍光色素の種類によって様々である。

### 3 材料

#### <ルミノール反応>

**A液** ルミノール (0.010 g) 蒸留水 (9.0mL) 10%水酸化ナトリウム水溶液 (1.0mL)

**B液** 3.0%過酸化水素水 (2.0mL) 蒸留水 (18mL)

ヘキサシアノ鉄酸(III)カリウム (0.060 g)

#### <ケミカルライト>(市販)

**C液** フタル酸ジブチル (44%) 蛍光物質 脂肪酸アルコール (7.0%) シュウ酸ピス

**D液** フタル酸ジメチル (44%) サリチル酸ナトリウム 過酸化水素水 (4.0%)

### 4 実験

以下のように溶液を反応させ、発光を観察した。

- ① (A液+B液)+(C液+D液)
- ② (C液+D液)+蒸留水
- ③ A液+C液, A液+D液, B液+C液, B液+D液
- ④ (A液+B液)+C液, (A液+B液)+D液
- ⑤ (C液+D液)+A液, (C液+D液)+B液
- ⑥ (C液+D液)+塩基性水溶液[水酸化ナトリウム, バリウム, カルシウム アンモニア水]
- ⑦ (A液+B液) [触媒であるヘキサシアノ鉄酸(III)カリウムの質量2倍]+(C液+D液)

当初は、ルクス計を用いて発光の強さを比較しようと考えていたが、ルクス計で数値を測ることができない強い発光ではなく、比較できなかった。そのため、デジタルカメラでの写り方の違いによって比較した。

### 5 結果と考察

#### 実験①

ルミノール反応の溶液とケミカルライトの溶液を混合した。

結果、ケミカルライトは水に溶けづらいため、ケミカルライトはルミノール反応における水溶液と分離して、図3・図4のように丸くまとまってしまった。また、分離したケミカルライトの発光が通常より強くなり、少なくとも2時間は発光するはずが、15分前後で発光しなくなった。ルミノールは発光していたものの、ケミカルライトの発光が強く、目立たなくなっていた。

この結果から、私たちはケミカルライトの発光の強さが変わったことに疑問を持ち、以降の実験により、この反応の原因について追究することにした。

#### 実験②

丸くまとまったことが発光に影響があるのか調べるため、ケミカルライトに蒸留水を混合した。結果、実験①と同じように、ケミカルライトは丸くまとまったが、発光に変化はなく、通常の発光を示した。

この結果から、ケミカルライトは丸くまとまったことによって強く発光して見えたのではないことが明らかになった。また、水は発光の強さに影響はないと推測した。

#### 実験③

ルミノール反応とケミカルライトに使用した薬品が、それぞれの反応に影響しているのか調べるため、実験③～⑤を行った。実験③ではそれぞれの反応に使用した薬品を、片方ずつ混合した。実験③ではどれも発光しなかった。

この結果から、それぞれの溶液を片方ずつ混ぜても反応しないことが明らかになった。

#### 実験④

ルミノール反応の溶液にケミカルライトの溶液を片方ずつ混合した。

結果、(A液+B液)+D液はルミノールが通常の反応よりもわずかに強く発光した。

この結果から、D液中の過酸化水素が反応してルミノール反応がより強く発光したと推測される。

#### 実験⑤

ケミカルライトの溶液にルミノール反応の溶液を片方ずつ混合した。

結果、(C液+D液)+A液は実験①と同じようにケミカルライトが強く発光し、発光時間は短くなった。

この結果から、A液がケミカルライトを強く発光させ、発光時間を短くしていると推測される。

#### 実験⑥

実験⑥では、ケミカルライトのC液+D液に水酸化ナトリウムを加え、反応を観察した。その後、水酸化ナトリウムを、水酸化バリウム、水酸化カルシウム、アンモニア水などの別の塩基性水溶液に変えて実験した。

結果、ケミカルライトは実験①同様に強く発光したが、発光時間は短くなった。

この結果から、ケミカルライトは塩基性の溶液中で反応が促進され、強く発光するが発光時間は短くなることが明らかになった。

#### 実験⑦

ルミノール反応とケミカルライトの混合溶液全体の発光には、ルミノール反応の発光も加わっていることを確認するため、ルミノール反応の発光の強さを変えた実験を行った。実験⑦では、ルミノール反応の触媒であるヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウムの質量を2倍にした。



結果、ルミノール反応の発光が強くなることで、実験①より混合溶液全体の発光が強くなった。また、ケミカルライトのみの発光は実験①と変わらなかった。

この結果から、ルミノール反応の発光が強くなると、混合溶液全体の発光が強くなると推測される。

## 6 まとめ

ルミノール反応とケミカルライトを混合したとき、ルミノール反応の溶液中の水酸化ナトリウムにより、ケミカルライトが強く発光する。また、それぞれが個々で発光するため、単独で発光させるより、混合溶液全体の発光は強くなる。

## 7 今後の課題

- ・発光の強さを数値で示す。
- ・ルミノール反応の発光時間を長くする。
- ・ルミノールとケミカルライトを分離させずに、発光させる。
- ・3種類以上の発光反応を同時に行い、今回と同様に発光が重複するのか調査する。

## 参考文献

- ・「化学発光」光る原理  
[http://mumeiyamibito.hp2.jp/hakko\\_file/why.htm](http://mumeiyamibito.hp2.jp/hakko_file/why.htm)
- ・ルミノールの化学発光反応  
[http://www.center.spec.ed.jp/c/ce/ce32/img\\_ce32/science/chemi/215.pdf](http://www.center.spec.ed.jp/c/ce/ce32/img_ce32/science/chemi/215.pdf)
- ・サイリウム  
<http://www.chem.kindai.ac.jp/kaken/study/08stdata/08st04.html>

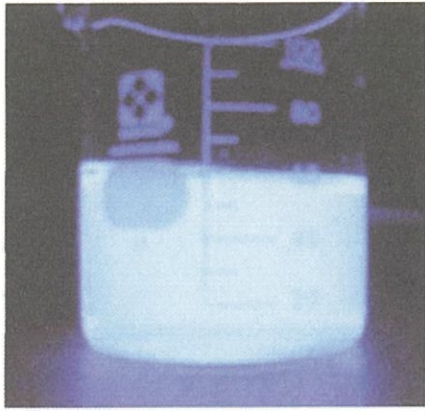


図1:ルミノール反応

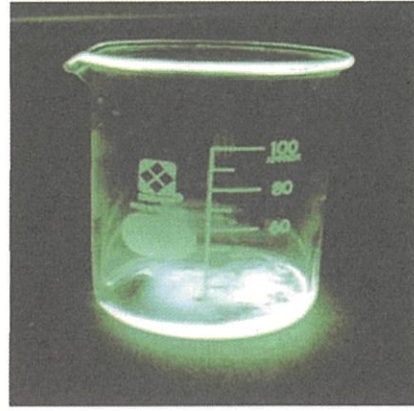


図2:ケミカルライト

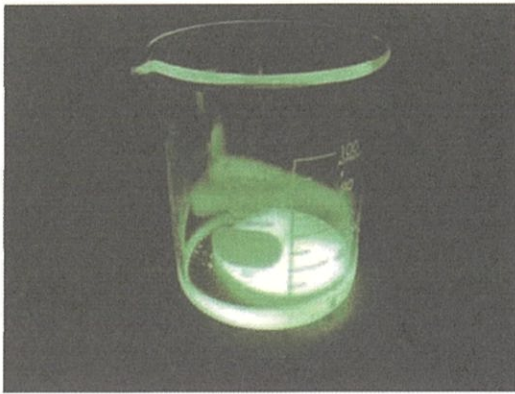


図3

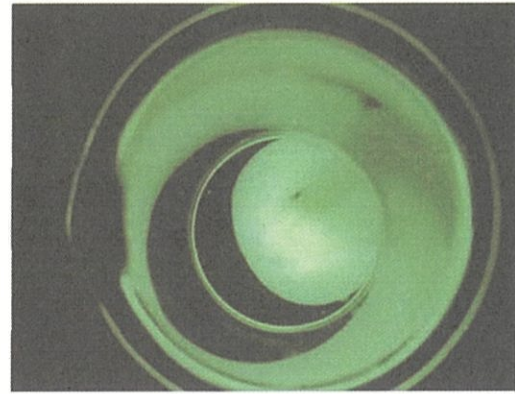


図4

# マウスとヒトの赤血球の食塩濃度による形態変化

木下理子

宮城県仙台第三高等学校 自然科学部生物班

浸透圧による赤血球の形態変化のようすを調べるために、0.0%~1.2%の食塩水中のマウスとヒトの赤血球を、直径と形状の変化に注目して実験・観察した。マウス赤血球とヒト赤血球では直径・形状の変化傾向が異なっているということ、赤血球は食塩濃度に応じて形態変化を起こすわけではなく、マウス赤血球の場合、濃度の変化があっても直径の変化はほとんどないこと、形状の変化は濃度が高いほど棘をもつ赤血球が増加し、時間が経過するほど、また温度が高いほど円形から他の形へ変化する数が多いということがわかった。ヒト赤血球の場合は、0.4%~0.9%の食塩水中にあるとき、1.0%~1.2%の食塩水中にあるときの、どちらの場合でもその食塩濃度間での直径の変化はほとんど見られないが、両群の間では大きさの差がはっきりと見られること、形状は温度、時間、環境に影響されず、どの条件でも形状の割合がほぼ一定に保たれているということがわかった。

## はじめに

高校生物 I の教科書は、動物細胞の中からヒト赤血球を例に挙げ、「ヒト赤血球は水のような低張液中にあると、吸水・膨張し、やがて溶血をおこし、高張液中にあると細胞内の水が細胞外に移動し、収縮する。」と解説している。

しかし、浸透圧による形態変化が単純に収縮と膨張という大きさの変化なのか、それとも形状変化もともなうのか、については詳しい説明はない。

そこで、「赤血球は低張液中では丸く大きく膨張し、高張液中ではコンペイトウ状になり、形状は変化せずに収縮する。」という仮説を立て、さまざまな食塩水中でのマウス (*Mus musculus*) とヒト (*Homo sapiens sapiens*) の赤血球の大きさの計測と形状ごとの計数をおこない、径の変化と形状の変化を調べることにした。

## 材料と方法

0.0%~1.2%の 0.1%ずつ異なる 13 種類の食塩水を調製した。血液は、ヒト (57 歳, 男性) は、左手指先をカミソリでわずかに傷つけ、出血したところをマイクロピペットで採取した。マウス (slc:ddY, 週令 20~24 週, ♂) は、尾側静脈をカミソリで小さく傷つけ、出血したところをマイクロピペットで採取した。

10mm 四方の製氷皿に各食塩水 1mL を入れ、採血した血液を 1 滴滴下し、その 30 分後、検鏡・写真撮影をおこなった。撮影した写真は A4 サイズに印刷し、無作為に選んだ赤血球の直径を紙

面上でノギスを用いて計測した。同様の方法で撮影した対物マイクロメータもノギスで計測し、赤血球の実径に換算した。なお、食塩水と血液の混合液を移動する際に使用したパスツールピペットには、血液の凝固を防ぐためにヘパリンを通した。

各食塩水中で形状が変化した赤血球について、その形状ごとの細胞計数は、10mm 四方の製氷皿に各食塩水 0.5mL を入れ、10  $\mu$ L の血液を混合した後、改良ノイバウエル型血球計算板を使用し、60 分間、15 分ごとに、1) 計算板に入れたまま室温放置 (20°C)、2) 計算板に入れたまま保温 (35°C~40°C)、3) 製氷皿に静置 (35°C~40°C) の各条件で写真撮影し、その後計数を行った。なお、使用した血球計算板は、写真撮影中に乾燥しないようセロハンテープで封じる処置を取った。また、食塩水と血液の混合液を移動する際に使用したパスツールピペットには、血液の凝固を防ぐために、ヘパリンを通した。

## 結果

マウス赤血球の直径の計測の際には、0.7%、0.9%、1.0%、1.2%の濃度で赤血球の大きさと形状に偏りがあり、大小 2 グループが見られたため、2 つに分けて計測した。図 1 はマウス赤血球の食塩濃度による直径変化をあらわしたものであり、0.4%以下の濃度ではほぼすべての赤血球が溶血を起こしていること、食塩濃度が径の変化に影響している群と、どの濃度においてもほぼ一定の大きさを保っている群があることがわかる。標準偏差を表すエラーバーでわかるように、0.7%~1.2%にかけては、赤血球の大きさに偏りが大きく、個々の赤血球に「細胞差」があることがわかる。逆に 0.5%、0.6%食塩水中では、その径の偏りが少ない。

ヒト赤血球では 0.4%、1.0%の濃度でその大きさと形状に偏りがあり、大小 2 グループが見られたため、2 つに分けて計測した。図 2 はヒト赤血球の食塩濃度による直径変化をあらわしたものであり、0.3%以下の濃度ではほぼすべての赤血球が溶血を起こしていること、0.4%から 0.9%にかけての群と、1.0%から 1.2%にかけての群を比較すると、径が大きく異なっていること、0.7%の濃度で径の大きさがピークになり、それ以下の濃度の液中では大きさが小さくなっていることがわかる。また、どの濃度においてもエラーバーでわかるように偏りが大きく、個々の赤血球において細胞差が大きいことがわかる。

マウスとヒト赤血球を比較すると、マウス赤血球は等張液中で約 5  $\mu$ m、ヒト赤血球は約 8  $\mu$ m と異なっている。

図 4 は各濃度の食塩水中でマウス赤血球数がどのように変化するかを表したものであり、図 5 はマウス赤血球の場合の図 4 と同様に、ヒト赤血球数の経時変化を表している。マウス赤血球、ヒト赤血球ともに、60 分の観察時間内に細胞数が大きく変化することはなかった。

図1・2のように、赤血球径に大きな偏りが見られた食塩濃度において、大小2グループに分けて計測した。2グループに分ける判断基準として、形状の違いを考慮したため、赤血球の形状の変化を経時観察することにした。マウスについては0.7%、0.9%、1.2%、ヒトは0.4%、0.5%、1.0%食塩水を用いた。赤血球の形は図6のように、1) 円形型、2) 歪み型、3) ワンタン型、4) コンペイトウ型、5) 楕円形型、と5つに分類し計数を行った。

マウス赤血球の場合、0.7%の低張液中では時間が経過するにつれてワンタン型が増加、高張液中ではコンペイトウ型が増加した。図7と図8を比較すると、図8のほうがどの濃度においても円形型の割合が減り、温度が高いほど円形型からの変化が大きいのことがわかる。図9のように、製氷皿に静置したものはとりわけ変化が大きいの結果になった。

ヒト赤血球の場合、どの条件においても、高張液中ではコンペイトウ型と歪み型の赤血球が増加した。図10から図12のグラフで、条件が変化しても形状1から形状5はその割合を一定に保っていることがわかり時間、温度、計測環境にほとんど影響されないという結果になった。

マウス赤血球・ヒト赤血球に共通して、どの食塩濃度でも2種類以上の形状が見られた。また、円形の赤血球がどの条件においても多くの割合を占めている。

## 考察

低張液中のマウス赤血球は、図7・図8に示したように、0.7%食塩水中0分のときには円形型と歪み型のみであったが時間の経過につれてワンタン型が増えていくことから、食塩濃度に応じて単純に丸く膨張するわけではなく、歪み型からワンタン型に変化するということがわかった。ヒト赤血球の場合、図10から図12に示したように、0.4%食塩水中0分において、円形型と歪み型が存在していることから、楕円形に膨張するが、図2の0.4%の場合より、その大きさが等張液中のときと変わらないものや、それよりも小型のものがあるということがわかった。マウス赤血球・ヒト赤血球ともに同じ食塩濃度の溶液中でも、その径に偏りが見られ、異なる複数の形状が含まれていた。これは、赤血球間に、いわば個体差に相当する「細胞差」が存在することを意味している。また、マウス赤血球とヒト赤血球は直径変化・形状の変化傾向に次のような違いがあるということがわかった。マウス赤血球の場合、直径変化については、食塩濃度が影響している群と大きさが一定に保たれている群があり(図1)、形の変化については、時間が経過するほど、温度が高いほど変化が大きくなっている(図7、図8)。ヒト赤血球の場合、直径の変化については大きな偏りがなく(図2)、形状変化は時間、温度、環境に影響されないことがわかった。(図7、図8、図9)。

なお、製氷皿に静置していたマウス赤血球はその形状を激しく変化させていたが(図9)、その

理由は不明である。少なくとも温度条件は血球計算板と変わらないので、影響を及ぼした要因として考えられるのは、ピペッティングによるストレス、空気との接触、静置していた際の血液の沈殿である。

一般に、溶血の程度は、分光学的にヘモグロビン量を計測することで判定する<sup>1)</sup>。しかし、今回の実験では赤血球径の測定や形状の変化を見るため、溶血の有無は顕微鏡による観察で判断した。そのためか、溶血を起こす食塩濃度については Matsuzawa ら<sup>2)</sup>、田中ら<sup>3)</sup>による分光学的な方法での結果とは異なるものとなった。マウス赤血球は分光学的な測定だと、0.4%食塩水で約50%の溶血というものであったが、今回の実験ではすべてが溶血していた。ヒト赤血球は分光学的な測定だと、0.1%食塩水で約30%の溶血というものであったが、今回の実験では0.3%食塩水ですべて溶血を起こしていた。

今後の課題として、溶血前の食塩濃度で直径の平均値が下がる理由について今後追及していきたい(図1, 図2)。現時点では、1) 赤血球の寿命が関係している(マウス赤血球の場合40日、ヒト赤血球の場合は120日である。) 2) 溶血のしかたが関係している(現時点では完全に形態が見えなくなった状態を溶血とした。しかし、低張液中で見られた赤血球の場合、形態は見えたと、溶血の途中であった可能性がある。その際のヘモグロビン流出が関わっているのかもしれない。) という予想を立てている。

同じ濃度の食塩水中にあっても、いくつかの形状が存在しているということが、今回の実験でわかった。この細胞差はなぜ生じるのかについて調べていきたい。

今回は教科書の検証ということで食塩を用いて濃度調節をおこなったが、食塩ではなく、エネルギー源であるグルコースで実験したらどうなるのかということ、赤血球以外の細胞ではどのような変化を起こすのか、ということについても実験していきたい。

## 結論

マウス赤血球・ヒト赤血球ともに、食塩濃度に応じて単純にその径や形状が変化するわけではなく、マウス赤血球は食塩濃度の変化があっても径はほとんど変わらず、その形状は高張液であるほどコンペイトウ型が増加し、低張液であるほどワントン型になる数が増え、温度が高く、時間が経過するほど円形の赤血球が占める割合が減り、他の形状に変化する数が増える。ヒト赤血球は0.4%から0.9%にかけての群と、1.0%から1.2%にかけての群を比較すると、径が大きく異なっている。また、その形状は高張液であるほどコンペイトウ型と歪み型が増加し、低張液であるほど楕円形に膨張する。また、今回実験した条件中ではマウス赤血球と異なり、各形状の割合に変化は見られず一定であった。一方、マウス赤血球・ヒト赤血球ともに高張液中や、60分経過した中でも通常の形状のままの赤血球も存在していて「細胞差」が見られる。マウス赤血球では0.4%、ヒト赤血球では0.3%以下の食塩濃度になると、ほとんどが溶血を起こす。

参考文献

- (1) Suess, J. Limentani, D. Dameshek, W. and Dolloff, M.J.A Quantitative Method for the Determination and Charting of the Erythrocyte Hypotonic fragility. Blood. Vol.3, 1948, p.1290-1303.
- (2) Matsuzawa, T. and Ikarashi, Y. Haemolysis of various mammalian erythrocytes in sodium chloride, glucose and phosphate-buffer solutions. Laboratory Animals. 1979, vol.13, p.329-331.
- (3) 田中礼子, 中井健五. 注射剤による溶血と赤血球の形態変化. The Journal of Toxicological Sciences. 1977, vol.2, no.4, p.391-403

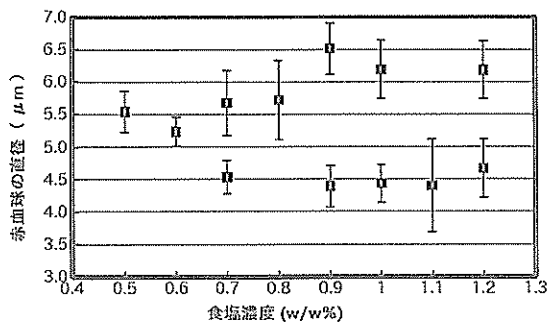


図1 マウス赤血球の食塩濃度による直径変化  
エラーバーは標準偏差 各濃度の標本数は200

0.0%~1.2%食塩水中でのマウス赤血球の直径変化をあらわしたグラフである。エラーバーは標準偏差をあらわしており、エラーバーの幅が大きいほど、その濃度において径の大きさに偏りがあるということになる。0.4%以下の濃度ではほぼすべての赤血球が溶血している。0.4%~1.2%にかけて大きさの変化はほとんど見られない。

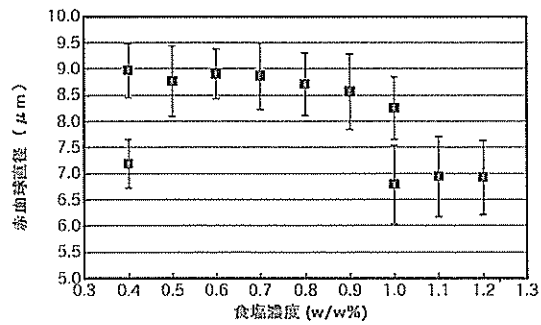


図2 ヒト赤血球の食塩濃度による直径変化  
エラーバーは標準偏差 各濃度の標本数は50

0.0%~1.2%食塩水中でのヒト赤血球の直径変化をあらわしたグラフである。エラーバー標準偏差をあらわしており、エラーバーの幅が大きいほど、その濃度において径の大きさに偏りがあるということになる。0.3%以下の濃度ではほぼすべての赤血球が溶血している。0.3%~0.9%の群と1.0%~1.2%の群の間で径が大きく異なっている。また、0.7%をピークにそれ以下の濃度では小さくなっていく。

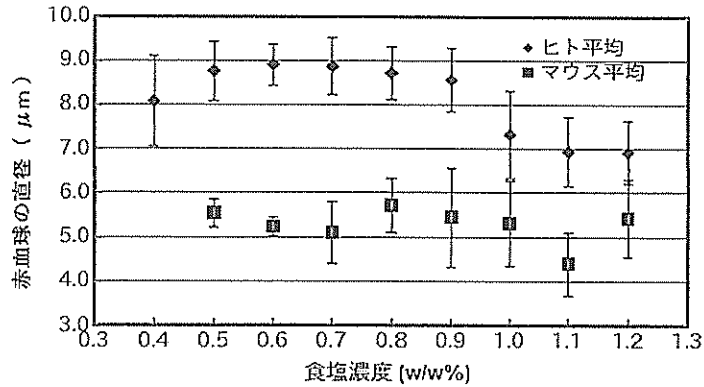


図3 マウス・ヒト赤血球の直径比較

エラーバーは標準偏差

0.0%~1.2%食塩水中でのマウス赤血球とヒト赤血球の直径比較をしたグラフである。エラーバーは標準偏差を表しており、エラーバーの幅が大きいほど、その濃度において径の大きさに偏りがあるということになる。等張液中のマウス赤血球径は約5μm、ヒト赤血球は約8μmであり、両者で径の大きさが異なっており、濃度の変化における径の変化傾向も異なっている。

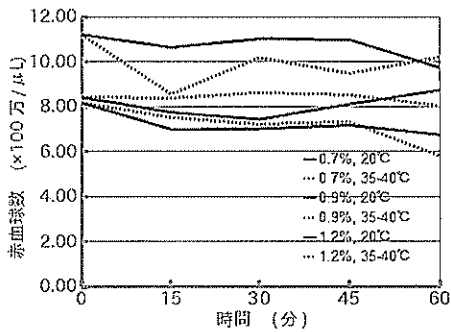


図4 マウス赤血球総数の経時変化

0.7%, 0.9%, 1.2%食塩水中にマウス赤血球を静置し、60分間の血球数の変化をあらわしたグラフである。低張液中においても血球数の大きな変化は見られない。

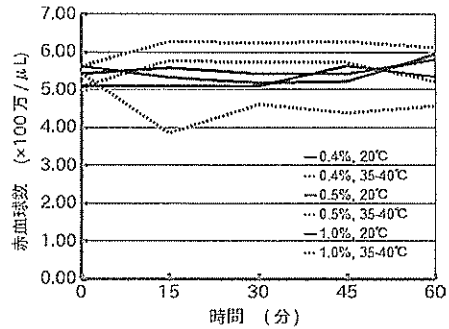


図5 ヒト赤血球総数の経時変化

0.4%, 0.5%, 1.0%食塩水中にヒト赤血球を静置し、60分間における血球数の変化をあらわしたグラフである。低張液中においても血球数の大きな変化は見られない。

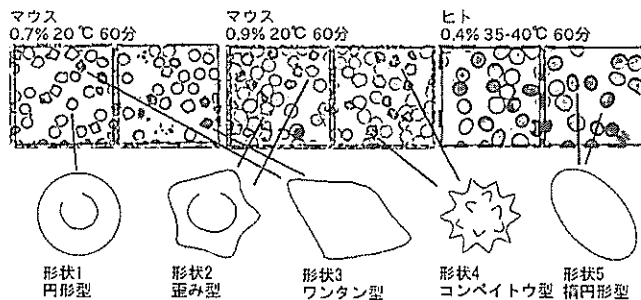


図6 きまざまな形状の赤血球

0.0%~1.2%食塩水において見られたマウス赤血球とヒト赤血球の形状を、円形型、歪み型、ワンタン型、コンペイトウ型、楕円形型の5種類に分類した。



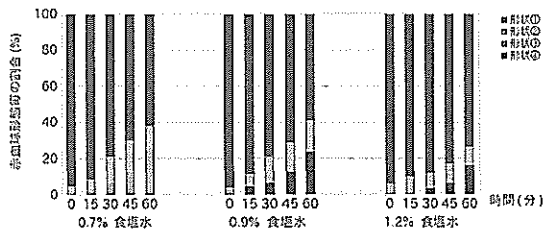


図7 マウス赤血球形態の経時変化 20°C

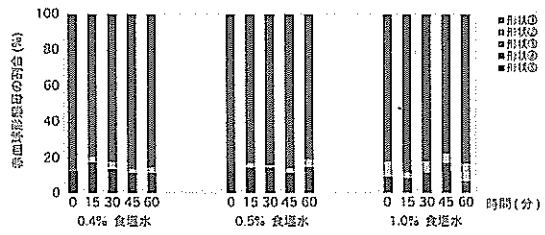


図10 ヒト赤血球形態の経時変化 20°C

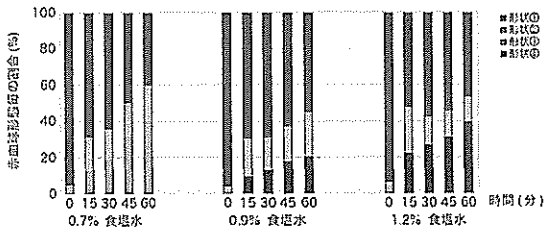


図8 マウス赤血球形態の経時変化 35-40°C

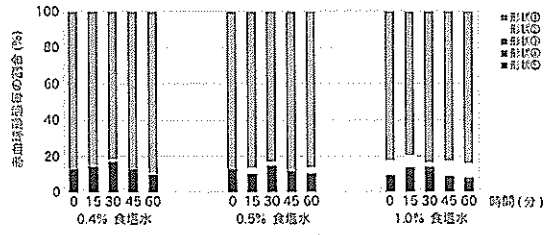


図11 ヒト赤血球形態の経時変化 35-40°C

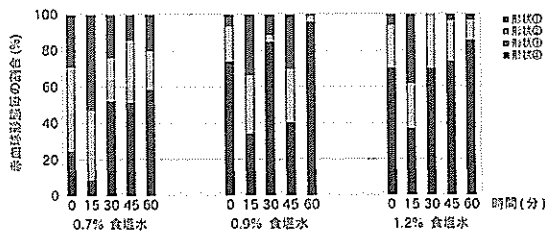


図9 マウス赤血球形態の経時変化 35-40°C のトレーに放置

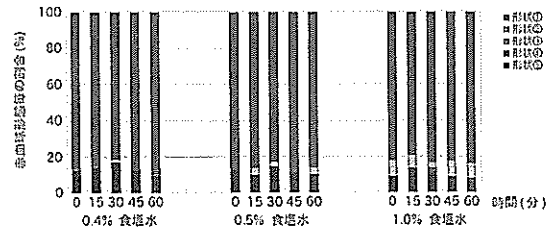


図12 ヒト赤血球形態の経時変化 35-40°C のトレーに放置

図7は20°Cに静置, 図8は35°Cから40°Cに保温して静置, 図9は35°Cから40°Cに保温した製氷皿に静置し, 0.7%, 0.9%, 1.2%食塩水中に60分間静置したマウス赤血球の形態の推移をあらわしたグラフである。図7と図8では, 時間が経過するにつれて円形型の赤血球が減少し, 他の形状に変化する赤血球が増加する。図7と図8を比較すると温度が高いほどその割合が増える。図9では0分の計測においても円形型の赤血球が占める割合が少ないなど, 円形型からの形状の変化が大きい。

図10は20°Cに静置, 図11は35°Cから40°Cに保温して静置, 図12は35°Cから40°Cに保温した製氷皿に静置し, 0.4%, 0.5%, 1.0%食塩水中に60分間静置したヒト赤血球の形状の推移をあらわしたグラフである。どの条件においても各形状の占める割合はほぼ一定である。

# 魚類視交叉の左右非対称性

工藤俊樹

宮城県仙台第三高等学校 自然科学部生物班

異体類の視交叉左右非対称性は種によって決まっているが、それ以外の魚類では個体によって異なるという。一方、異体類以外でも左右非対称性が決まっている種があるという報告もあり、イワシ類などを使用し、視交叉左右非対称性の決定の有無を調べることにした。その結果、マイワシ、サンマは個体によって異なるが、マアジ、マガレイは右眼由来の視神経が腹側を通り、ウルメイワシは背側を通ることがわかった。また、カタクチイワシは視神経が数本の視神経束に分かれる型であり、視神経束の本数は一定ではなかった。

## はじめに

左右の眼球から脳に伸びる視神経は、脊椎動物の場合左右交叉して脳に入る。これを視交叉という。田村<sup>①</sup>によれば、背側を通る視神経が左右どちらの眼球に由来するかという視交叉の左右非対称性は、カレイ・ヒラメといった異体類では種によって決まっているが、それ以外の種では個体によって異なり、それぞれほぼ同じ割合で存在するという。一方、茂木ら<sup>②</sup>によれば異体類以外でも、左右非対称性が決まっている種があるという。そこで、身近で入手しやすい硬骨魚類のイワシ類などを使用し、視交叉左右非対称性の決定の有無を調べることにした。

## 材料と方法

仙台市内のスーパーマーケットで購入した、マイワシ(*Sardinops melanostictus*)6個体、カタクチイワシ(*Engraulis japonicas*)21個体、ウルメイワシ(*Etumens teres*)3個体、マアジ(*Trachurus japonicas*)5個体、サンマ(*Cololabis saira*)5個体、マガレイ(*Pleuronectes herzensteini*)2個体、合計6種42個体を使用した。これらの

魚を下顎側から解剖していき、視交叉が見える状態にし、実体顕微鏡を用いて観察・撮影した。視交叉のパターンは、茂木らの分類方法に従った。図1のように、視交叉を下顎側から見たときに Type1 は右眼由来の視神経が手前、すなわち腹側を通るもの、Type2 は左眼由来の視神経が腹側を通るもの、Type3 は視神経がいくつ

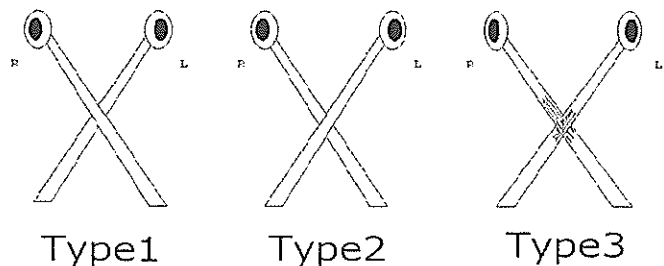


図1 視交叉分類パターン

Type1 は右眼由来の視神経が腹側を通るもの。Type2 は左眼由来の視神経が腹側を通るもの。Type3 は視神経がいくつかの視神経束に分かれて交叉しているものである。

かの視神経束に分かれて交叉するものである。

## 結果

マイワシ、サンマは Type1, 2 の両方があり、マアジとマガレイは Type1 のみ、ウルメイワシは Type2 のみ、カタクチイワシは Type3 のみが見られた。茂木らによればマアジには Type1, 2 があるということであるが、今回は観察できなかった。

表 1 観察個体の種類別の視交叉パターン

マイワシ、サンマは Type1, 2 の両方があり、マアジとマガレイは Type1 のみ、ウルメイワシは Type2 のみ、カタクチイワシは Type3 のみが見られた。

	Type1	Type2	Type3
マイワシ	2	4	0
カタクチイワシ	0	0	21
ウルメイワシ	0	3	0
マアジ	5	0	0
サンマ	3	2	0
マガレイ	2	0	0

表 2 カタクチイワシの左右の視神経束

視神経束の本数はほとんどが 8 本ないし 9 本だったが、それより少ない個体や多い個体も見られ、右眼由来の視神経束が腹側を通る個体が多かった。

視神経束本数			最腹側通過視神経束が 左右どちらの眼球に由来するか		観察個体数計
左眼由来	右眼由来	計	左眼由来	右眼由来	
3	3	6	1	0	1
3	4 <sup>※</sup>	7	1	0	1
4	3	7	0	2	2
4	4	8	2	3	5
4	5	9	0	4	4
5	4	9	5	0	5
5 <sup>※</sup>	5	10	0	2	2
5	6	11	0	1	1
6	5	11	0	0	0
合計			9	12	21

※ 図 2 のように視神経束が 2 つに分かれずに交叉しているもの

カタクチイワシは Type3 のみであるが、左右それぞれの視神経が何本かの視神経束に分かれているかを調べると、表 2 の結果となった。視神経束の本数はほとんどが 8 本ないし 9 本だったが、

それより少ない個体や多い個体も見られ、右眼由来の視神経束が腹側を通る個体が多かった。また、一部の個体において図2のように視神経束が2つに分かれずに交叉している箇所があった。

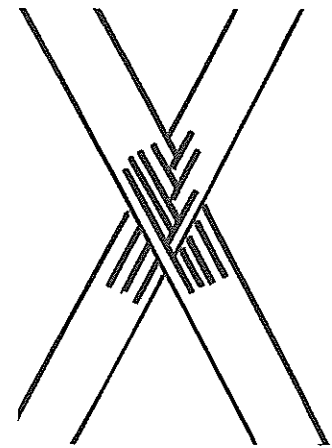


図2 カタクチイワシの視神経束視神経束が2つに分かれずに交叉している箇所があった。

### 考察

ウルメイワシは右眼由来の視神経が背側を通る Type2 のみが見られ、種として交叉のパターンが決定されていた。茂木らによるとニシン目ニシン科のキビナゴは右眼由来の視神経が腹側を通る Type1 で、カタクチイワシ、ニシンは視神経が数本の視神経束に分かれる Type3 だという。つまり、同じ科でも視交叉パターンが種によって異なっている。同じニシン目ではあるが、科が異なるカタクチイワシは Type3 であるという。今回の観察でも、茂木らの報告と同じ結果となった。

一方、マアジについては、茂木らは Type1, 2 があるということだが、今回の観察結果では、Type1 のみが見られ異なる結果となった。しかし、これは観察個体数が不十分であることが原因として考えられる。

Type3 のカタクチイワシにおいて、視神経束の本数はほとんどが8本ないし9本だったが、それより少ない個体や多い個体も見られ、右眼由来の視神経束が腹側を通る個体が多かった。単純な視交叉の全交叉でさえ、その発生過程には興味を覚えるが、カタクチイワシのように複数の視神経束が、手の指を組んだような状態で形成される過程については、ぜひ今後の研究テーマとして追及していきたいと考えている。これには、同じく Type3 の視交叉を持つゼブラフィッシュを材料として検討しているところである。また、視交叉の左右非対称性だけでなく、魚類の体に左右非対称な構造を見出し、視交叉との関連があるのかも検討していきたい。

### 参考文献

- 1) 田村宏治. (2005). 初期発生における視交叉の左右性形成に対する発生学的アプローチ. Nippon Suisan Gakkaishi. 71(6) : 1004-1005.
- 2) Mogi K, . et al. (2009). Optic chiasm in the species of order Clupeiformes, family Clupeidae: optic chiasm of *Spratelloides gracilis* shows an opposite laterality to that of *Etrumeus teres*. Laterality 14: 495-514.

# マウスとハムスターのバランス能力と尾の役割

坂本滉平

宮城県仙台第三高等学校自然科学部生物班

マウス(*Mus musculus*)の尾の役割について調べるため、マウスとゴールデンハムスター(*Mesocricetus auratus*)のバランス能力について、「綱渡り」の可否によって調べた。二つの木製台間に渡した木製棒の歩行回数を調べたところ、マウスの尾はバランス能力に深く関係していることが分かった。

## はじめに

Hanson<sup>(1)</sup>によればマウスは綱渡りができるという。実際にマウスは細い物の上を歩行することができるのか。できる場合、どのようにしてバランスをとっているのかを実験で確かめることにした。また、マウスを観察すると、尾をバランスをとるために動かしているように見える。この尾がバランスを取る上で重要な役割を担っていると考え、尾の短いハムスターと比較し、実際に棒を渡らせ、その時の尾や体の動き、実験結果からそれぞれのバランス能力と尾の役割について調べることにした。

## 材料と方法

材料として週齢約 12 週のマウス(*Mus musculus*)の雄と雌を、ハムスターは週齢約 96 週と 14 週のゴールデンハムスター(*Mesocricetus auratus*)の雌、週齢約 10 週のキンクマ(*Mesocricetus auratus*)の雌を使用した。

また、実際に実験動物に棒を渡らせるため、図 1 のような装置を用意した。実験動物が下に降りられないような I 字の木製台 2 つの間に、実験動物が渡る直径 5, 8, 12 mm の丸棒と、横幅 4 mm の角棒を組み合わせて作成した 4, 8, 12 mm の角棒を「綱渡り」の綱の代わりに渡した。

## 実験 1

図 1 の装置において、1 分間で実験動物が一方の台から向かい側の台まで歩行可能か調べた。この時、自発的に渡ろうとしなかった場合は餌で誘導する、あるいは後から押すなどして渡らせた。それでも渡らない場合があったので、1 分間と時間を定め時間を超過した場合も落下と同じく失敗とした。また、結果は、(1)バランスを崩さず問題なく渡った、(2)バランスを崩したが姿勢を立て直しその後問題なく渡った、(3)バランスを崩し体を棒に対して横にしたまま渡った、(4) 時間経過または地面に落下した、の 4 つのパターンに分類した。

## 実験 2

実験 1 では安定した台の上から渡らせたので、不安定な場所から渡らせた場合を調べるため、図 1 の 2 つの台の間隔を 2 倍にし、木製棒の中間地点(250 mm地点)に実験動物を乗せ、一分間で左右どちらかの台まで歩行可能か調べた。

## 実験 3

マウスが実際に尾を使ってバランスを取っているのかを調べるため、マウスの尾の先端をテープで根元に固定、またはマウスの尾とほぼ同じ直径(約 4 mm)のストロー(長さ 100 mm)をはめ、実験 1 と同条件で歩行可能か調べた。

## 結果

実験 1~3 の結果をそれぞれ 4 つのパターンに分類し、表 1~3 としてまとめた。

### 実験 1

表 1 に示したように、マウスはすべての棒を渡れたが、ハムスターは個体によって丸棒を渡れる、渡れないといった個体差が見られ、両者の間に大きな違いが見られた。これは実験に使用したハムスター個体間の週齢に大きな違いがあり、若いハムスターの方は動きが機敏だったことが影響していると考えられる。また、棒を歩行中に、マウスは尾を振る行動を見せたり、バランスを崩した時に棒に巻きつけるなどの行動が見られたが、ハムスターは尾がきわめて短いため特に尾を使う様子は見られなかった。

### 実験 2

表 2 で示したように、マウスは実験 1 と同じくすべての棒を渡れた。しかし、ハムスターは実験 1 では渡れていたすべての棒で成功回数が減少し、唯一渡れた 12 mmの角棒でも成功回数は 1 回だった。これは安定した台の上から渡らせたのではなく、不安定な棒の中間から渡らせたためだと考えられる。

### 実験 3

表 3 より、ストローをはめて実験したものでは、さほど実験 1 と結果に違いが見られなかった。しかし、尾を根元に固定したものでは 5 mmの丸棒が渡れなくなり、4 mmの角棒も 1 回しか渡れず、成功回数が大きく減少するという結果になった。また、どちらの条件でも、マウスは尾の動きを制限することを嫌がり、実験中にバランスを崩す回数が増加した。

## 考察

すべての実験で、マウスは前後の足を前後にして棒の上に乗せるか、棒を前後の足で挟んで渡っていた。しかし、ハムスターは後ろ足を棒の上で前後にして乗せることはせず、後ろ足で棒を

挟む場合は上手く棒を挟めずバランスを崩すことも多かった。ハムスターが幅の小さい棒を渡れなかったのはこのこと原因だと考えられる。また、実験3でマウスの尾の動きを制限すると、成功回数が減少したことや、棒を歩行中に尾を振る、尾を棒に巻きつけて体勢を立て直すといったことから、やはりマウスの尾はマウスがバランスをとる上で重要な役割を果たしていると考えられる。マウスとハムスターでは同じ結果でもマウスの方がハムスターと比べ自発的に渡ろうとし、動きが機敏であった。このことはマウスの元となったハツカネズミが田畑、草原、家屋などに生息しているのに対し、ハムスターはもともと土の中に穴を掘って生活しており、細い棒のようなものなどを渡る機会が少ないためであると考えられる。

今後は、マウスの尾が確かにバランスをとる上で重要であることをさらに明確に示す実験方法の検討を進めていきたい。

## 参考文献

(1) Hanson, Anne. "The Rat's Tail." Rat behavior and biology. 29 Aug. 2011.

<http://www.ratbehavior.org/history.htm>, (accessed 2011-10-8)

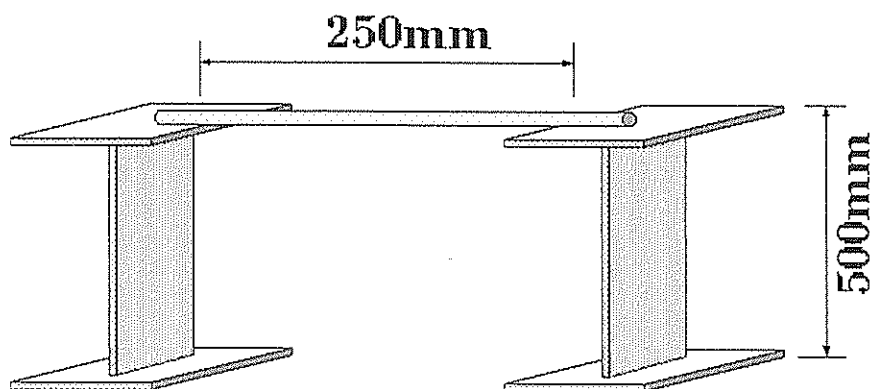


図1 実験1の実験装置

高さ 500 mm の木製台間に 250 mm の間隔になるように直径 5, 8, 12 mm の丸棒と横幅 4 の角棒を組み合わせて作成した 4, 8, 12 mm の角棒を渡し、取り外し可能なようにガムテープで固定した。

表 1 実験 1 での歩行成功回数

マウスはすべての棒で安定して成功しているが、ハムスターは幅の狭いもの、特に丸棒での成功回数が少ない。また、ハムスターは同じ種でも個体によって回数に差が出ている。  
(表内の数字は、左から順にパターン 1~4 の結果になった回数を示している)

	マウス♂	マウス♀	ゴールデン (週96)	ゴールデン (週14)	キンクマ
丸5mm	20/0/0/0	3/0/0/0	0/0/0/3	0/5/4/11	0/0/0/3
丸8mm	18/1/0/1	3/0/0/0	0/0/0/3	0/7/1/12	0/0/0/3
丸12mm	19/1/0/0	3/0/0/0	0/0/0/3	3/2/1/14	0/0/0/3
角4mm	20/0/0/0	3/0/0/0	1/0/0/3	0/15/1/4	0/0/0/3
角8mm	20/0/0/0	3/0/0/0	3/0/0/0	14/5/0/1	3/0/0/0
角12mm	20/0/0/0	3/0/0/0	3/0/0/0	18/2/0/0	3/0/0/0

表 2 実験 2 での歩行成功回数

マウスはすべての棒で安定して成功しているが、ハムスターは実験 1 では渡れていたすべての棒で成功回数が減少している。

(表内の数字は、左から順にパターン 1~4 の結果になった回数を示している)

	マウス♂	マウス♀	ゴールデン (週96)	キンクマ
丸5mm	10/0/0/0	10/0/0/0	0/0/0/10	0/0/0/10
丸8mm		10/0/0/0	0/0/0/10	0/0/0/10
丸12mm	10/0/0/0	10/0/0/0		0/0/0/10
角4mm		10/0/0/0		0/0/0/10
角8mm		10/0/0/0		0/0/0/10
角12mm		10/0/0/0		1/0/0/9

表 3 実験 3 での歩行成功回数

ストローを尾に嵌めたものでは実験 1, 2 と、さほど違いは見られなかったが、テープで尾を固定したものは 5 mm の丸棒や、4 mm の角棒で成功回数が減少した。

(表内の数字は、左から順にパターン 1~4 の結果になった回数を示している)

	マウス♀(テープ)	マウス♀(ストロー)
丸5mm	0/0/0/3	2/0/0/1
丸8mm	2/0/0/1	3/0/0/0
丸12mm	3/0/0/0	3/0/0/0
角4mm	1/0/0/2	3/0/0/0
角8mm	3/0/0/0	3/0/0/0
角12mm	3/0/0/0	3/0/0/0



# 酵素活性による魚類の体温の推定

梅津亮汰

宮城県仙台第三高等学校 自然科学部生物班

魚類の体内温度を調べるために、サンマ (*Cololabis saira*) とカツオ (*Katsuwonis pelamis*) , のカタラーゼ活性, サンマの酸性フォスファターゼ活性を調べたところ, カタラーゼ活性の最適温度はそれぞれ 35℃付近, 30℃付近にあり, 酸性フォスファターゼ活性は 25℃, 30℃, 35℃, 40℃の測定域では上がり続けた.

## はじめに

中学校の教科書には「変温動物はまわりの温度の変化にともなって体温も変化する。」と書かれているため, 変温動物の体温は周囲の温度とまったく同じと思われがちであるが, 周囲の温度よりも体温が高い変温動物もいる. マグロ (*Thunnus sp.*) やカツオなどは熱交換器によって筋肉を周囲の温度より高く保ち, 冷水の中でも速く泳ぐことができる<sup>1)</sup>.

一般に水生生物における熱の貯蔵は熱貯蔵量=熱発生量-伝導と対流による熱交換と表される<sup>1)</sup>. サンマの体は体積が小さく相対的に表面積が大きくなり, マグロやカツオの成体と比較して熱の損失量が大きくなると考えられる. 孵化してから約半年で 25cm になるほどサンマは成長が速い<sup>2)</sup>.

実際に解剖してみたところ, 寒流域で漁獲される個体は脂肪を大量に保有しており, アザラシやクジラの皮下脂肪の例があるように脂肪は熱伝導度が小さい<sup>1)</sup>. 急速な成長には活発な代謝が必要であり, 代謝の速度は酵素の反応速度に依存すると考えられる. そこで成長速度の速さと大量の脂肪からサンマは寒流域で体内温度を水温より高く保っているのではないかと考えた. しかしサンマの代謝量や熱交換器の有無については情報が無い. まずは代謝の適温を間接的に推定しようと考え, 肝臓から得られる酵素の中で活性を測定しやすいカタラーゼ, 酸性フォスファターゼについて最適温度を調べることにした.

## 材料と方法

### 材料

カタラーゼ活性の測定では、生のサンマ及びカツオの肝臓を使用し、酸性フォスファターゼ活性の測定では、サンマの肝臓をフリーザーで冷凍したものを解凍して使用した。

### カタラーゼ活性の測定

サンマ、カツオの肝臓 1g に対して 20ml の純水を加えて、ジューサーにかけたものを遠心分離機 (5000rpm) で 5 分間遠心し、その上澄みを酵素抽出液として用いた。酵素抽出液 1ml と少量の家庭用液体洗剤を加えた 3% の過酸化水素水溶液 2ml を 25°C, 30°C, 35°C, 40°C の各温度に設定したウォーターバス内の試験管で反応させ泡の高さが 20mm になるまでにかかる時間を計測し、1 秒あたりの泡発生体積を反応速度とした。

### 酸性フォスファターゼの測定

酸性フォスファターゼは *p*-ニトロフェニルリン酸を *p*-ニトロフェノールとリン酸に分解する反応を触媒する酵素であり、動物の様々な組織に存在する。

サンマの肝臓 1g に対して 20ml の 100mM 酢酸緩衝液 (pH4. 8) を加えてジューサーにかけたものを遠心分離機 (5000rpm) で 5 分遠心し、その上澄みを緩衝液で 200 倍に希釈したものを酵素液として用いた。酵素液 1ml と 2mM の *p*-ニトロフェニルリン酸ナトリウム 5ml をウォーターバス内の試験管で 25°C, 30°C, 35°C, 40°C の各温度で反応させ 5 分, 10 分, 15 分, 20 分の時に 1ml 取り出し、1 N の水酸化ナトリウム 1ml に混ぜて、反応を停止させた。その後、分光光度計(日立製作所, U-1100)を用い、420nm における吸光度を測定し、反応液中の生成物である *p*-ニトロフェノール濃度を求めた。1 分あたりの生成物濃度の増加率を反応速度とした。

## 結果

### 肝臓の酵素活性と温度

図 1A に示されているように、サンマのカタラーゼでは 35°C が最も反応速度が最も速くなり、次に 40°C, 35°C となった。一方、図 1B に示されているように、カツオのカタラーゼでは 30°C で反応速度が最も速くなった。さらに、図 2 に示されているように、サンマの酸性フォスファターゼの活性は 40°C まで上がった。

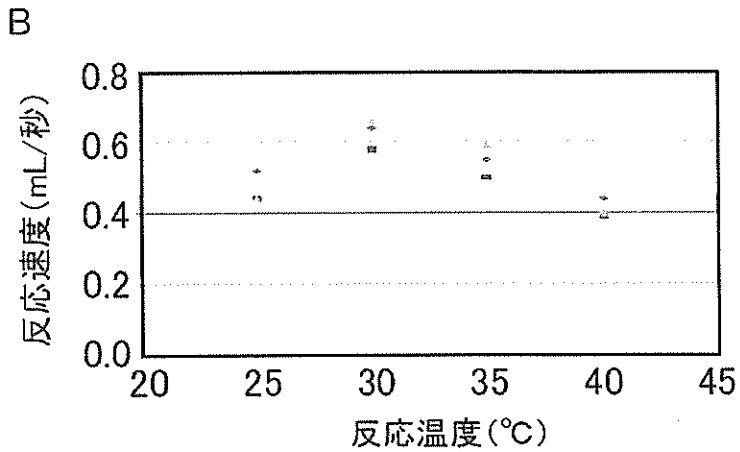
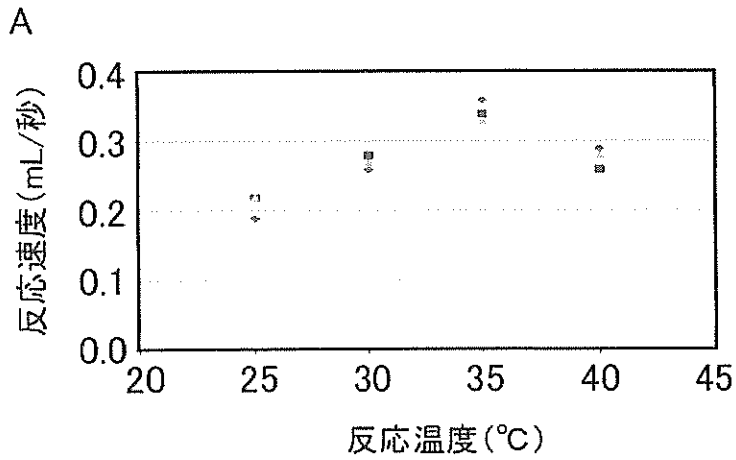


図1 カタラーゼの反応速度と反応温度

A はサンマ B はカツオの肝臓から抽出したカタラーゼの反応速度と温度の関係を示している。□、◇、△はそれぞれ独立して行われた実験データを示す。

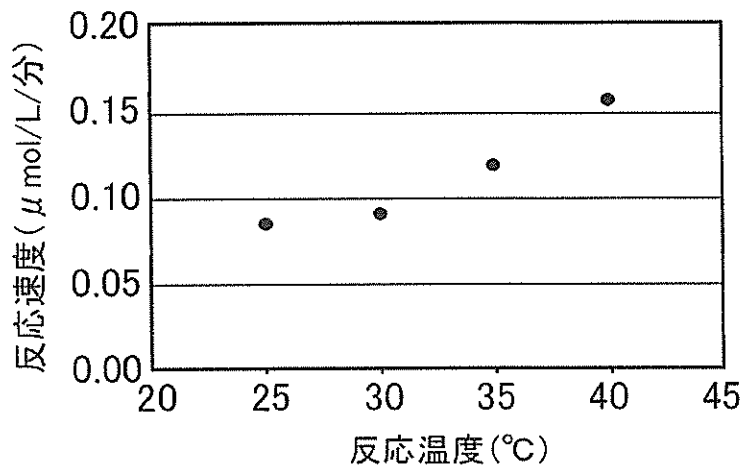


図2 サンマの酸性フォスファターゼの反応速度と反応温度

## 考察

### サンマとカツオの酵素活性の比較

実験の結果から、サンマ肝臓のカタラーゼは 35°C 付近に最適温度があると考えられる。一方、カツオ肝臓のカタラーゼは 30°C 付近に最適温度があると考えられる。また、カツオとの比較はできなかったが、サンマの酸性フォスファターゼ活性は、実験を行った 25°C から 40°C までの間で次第に高くなり、最適温度が少なくとも 40°C 以上になると考えられる。

これらのことから、肝臓から抽出された酵素の最適温度が、そのまま肝臓の温度を示すものではないとしても、肝臓の発熱量はカツオよりサンマの方が高い可能性が考えられる。

もしサンマの体内温度が周りの水温よりも高く維持されているならば、脂肪の蓄積によって高い断熱性を持っている、あるいはマグロやカツオのように何らかの熱交換のしくみを備えている可能性がある。

### サンマに熱交換器はあるか

マグロには奇網と呼ばれる血管のネットワークがあり、動脈が逆方向に走る静脈との間で密に絡まりあってよりをかけたような構造をとり、効率のよい熱交換を行っている。速い成長には活発な代謝が必要であり、肝臓や消化管の温度を高く保つことは重要であると考えられる。サンマが高い代謝活性を維持するとすれば、マグロやカツオより細長く小さい体からの熱損失を抑える何らかのしくみがあるだろう。動脈と静脈が絡み合った対抗流熱交換器がサンマにも存在するかどうか、組織切片を作成して調べていくとともに、血管モデルを作りシュミレーションしていきたい。

## 謝辞

カツオの肝臓を無償提供して下さったつかさ屋仙台東店さんに厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) クヌート・シュミット＝ニールセン. 動物生理学原書第 5 版
- 2) 巢山哲. サンマの成熟過程の解明：飼育実験の果たす役割. 水産総合研究センター研究報告別冊第 4 号：173-180

## ロピタルの定理

木村 昇太

宮城県仙台第三高等学校 数学部

### 1 ロピタルの定理とは

$p > 0$  として,  $[\alpha - p, \alpha + p]$  において連続であり,  $(\alpha - p, \alpha + p)$  において微分可能な関数  $f(x)$ ,  $g(x)$  がある.

$g(x) \neq 0$ ,  $g'(x) \neq 0$ ,  $f(a) = g(a) = 0$  であるとき,

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)} = \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} \text{ である.}$$

以上がロピタルの定理である. 極限をとると,  $\frac{0}{0}$ ,  $\frac{\infty}{\infty}$  の形になる場合に有効である. 以下で, ロピタルの定理を証明する.

#### 2-1 ロピタルの定理の証明 ( $x \rightarrow \alpha$ のとき)

関数  $f(x)$ ,  $g(x)$  はともに  $[x, \alpha]$  で連続であり,  $(x, \alpha)$  において微分可能であり,  $g'(x) \neq 0$  とする.

$\alpha - p < x < \alpha$  の任意の  $x$  について,

$f(a) = g(a) = 0$  のとき, 平均値の定理より

$$\frac{f(x) - f(a)}{g(x) - g(a)} = \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f'(c)}{g'(c)}$$

となる  $c$  が  $x < c < \alpha$  の区間に存在することになる.

$x \rightarrow a - 0$  のとき, はさみうちの原理で  $c \rightarrow a - 0$  なので,

$$\lim_{x \rightarrow a - 0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{c \rightarrow a - 0} \frac{f'(c)}{g'(c)} = \lim_{x \rightarrow a - 0} \frac{f'(x)}{g'(x)} \dots\dots \textcircled{1}$$

また, 関数  $f(x)$ ,  $g(x)$  はともに  $[\alpha, x]$  で連続であり,  $(\alpha, x)$  において微分可能であり,  $g'(x) \neq 0$  とする.

$\alpha < x < \alpha + p$  の任意の  $x$  について,

$f(a) = g(a) = 0$  のとき, 平均値の定理より

$$\frac{f(x) - f(a)}{g(x) - g(a)} = \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f'(c)}{g'(c)}$$

となる  $c$  が  $\alpha < c < x$  の区間に存在することになる.

$x \rightarrow a+0$  のとき, はさみうちの原理で  $c \rightarrow a+0$  なので,

$$\lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{c \rightarrow a+0} \frac{f'(c)}{g'(c)} = \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f'(x)}{g'(x)} \quad \dots\dots ②$$

①②より

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)} = \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} \quad \text{[証明終わり]}$$

## 2-2 ロピタルの定理の証明 ( $x \rightarrow \infty$ のとき)

関数  $f(x)$ ,  $g(x)$  はともに  $[x, p]$  で連続であり,  $(x, p)$  において微分可能であり,  
 $g'(x) \neq 0$  とする.

平均値の定理より

$$\frac{f(x) - f(p)}{g(x) - g(p)} = \frac{f'(c)}{g'(c)}$$

となる  $c$  が  $x < c < p$  の区間で存在する.

ここで  $p \rightarrow \infty$ ,  $x \rightarrow \infty$  のとき, はさみうちの原理で  $c \rightarrow \infty$  である.

$\lim_{p \rightarrow \infty} f(x) = \lim_{p \rightarrow \infty} g(x) = 0$  であるとき,

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left\{ \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x) - f(p)}{g(x) - g(p)} \right\} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{c \rightarrow \infty} \frac{f'(c)}{g'(c)} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f'(x)}{g'(x)}$$

である.

$x \rightarrow -\infty$  のときも同様にして求める. [証明終わり]

※注 ロピタルの定理は, 高校教科書の範囲外なので, 大学入試において記述式的答案で「ロピタルの定理より」と示して定理をそのまま使用すると減点される可能性があります.

## 確率と期待値

及川 翔太

宮城県仙台第三高等学校 数学部

### 1 はじめに

試 行…一般に繰り返すことが可能で、その結果が偶然によって決まる実験や観測など

事 象……試行の結果として起こる事柄

全事象……起こりうる事象全体の集合

### 2 期待値について

一般に期待値は次のように定義される.

ある試行の全事象の部分集合として  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  があり、今それらが起こる確率をそれぞれ  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$  として、 $p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n = 1$  が成り立つとする. そして、 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  が起こればある変数  $x$  がそれぞれ  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  という値をとるとき、 $x_1p_1 + x_2p_2 + x_3p_3 + \dots + x_np_n$  を変数  $x$  の期待値という.

【表1】のような宝くじがあったとする.

【表1】

	賞金	本数
1等	1,000円	1本
2等	300円	2本
3等	100円	3本
はずれ	0円	4本

このくじを1本引いて得られる賞金の平均値は、

$$\frac{1000 \times 1 + 300 \times 2 + 100 \times 3}{10} = 190 \text{ (円)} \quad \dots\dots \textcircled{1}$$

となる. ①の式の左辺は、

$$\begin{aligned} & 1000 \times \frac{1}{10} + 300 \times \frac{2}{10} + 100 \times \frac{3}{10} \\ & = (\text{1等の賞金} \times \text{1等を引く確率}) + (\text{2等の賞金} \times \text{2等を引く確率}) \\ & \quad + (\text{3等の賞金} \times \text{3等を引く確率}) \end{aligned}$$

と表せる. これはくじ1本を引いたときの賞金の期待値である. この宝くじの例では賞金に変数になっている.

### 3 期待値を用いた分析

例) スーパーマーケットでの加工食品の仕入れを考える.

仮定) ・仕入れ個数は20個単位

・売れたときの利益は1個につき400円

・売れなかったときの損失は1個につき900円

・過去のデータから【表2】のような統計的データが算出された

【表2】

売れる個数	151~170	171~190	191~210	211~230	231~250
その確率(%)	5	30	40	20	5

【表2】を便宜上【表3】に置き換えてみる.

【表3】

売れる個数	160	180	200	220	240
その確率(%)	5	30	40	20	5

【表3】をもとにして、160個、180個、200個、220個、240個仕入れる場合について利益の期待値を求める。この例では、売れる個数が変数である。

(1) 160個仕入れる場合

→【表3】から160個以上売れる確率は100%なので、売れ残りなし。

$$400 \times 160 = 64000 \quad (\text{円})$$

(2) 180個仕入れる場合

→20個売れ残る確率が5%

$$(160\text{個売れる場合の利益}) \times \frac{5}{100} + (180\text{個売れる場合の利益}) \times \frac{95}{100}$$

$$= (-900 \times 20 + 400 \times 160) \times \frac{5}{100} + 400 \times 180 \times \frac{95}{100} = 70700 \quad (\text{円})$$

(3) 200個仕入れる場合

→40個売れ残る確率が5%、20個売れ残る確率が30%

$$(160\text{個売れる場合の利益}) \times \frac{5}{100} + (180\text{個売れる場合の利益}) \times \frac{30}{100}$$

$$+ (200\text{個売れる場合の利益}) \times \frac{65}{100}$$



$$=(-900 \times 40 + 400 \times 160) \times \frac{5}{100} + (-900 \times 20 + 400 \times 180) \times \frac{30}{100} + 400 \times 200 \times \frac{65}{100} = 699600 \quad (\text{円})$$

(4) 220 個仕入れる場合

→60 個売れ残る確率が 5%, 40 個売れ残る確率が 30%, 20 個売れ残る確率が 40%

$$\begin{aligned} & (160 \text{ 個売れる場合の利益}) \times \frac{5}{100} + (180 \text{ 個売れる場合の利益}) \times \frac{30}{100} \\ & + (200 \text{ 個売れる場合の利益}) \times \frac{65}{100} + (220 \text{ 個売れる場合の利益}) \times \frac{25}{100} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & = (-900 \times 60 + 400 \times 160) \times \frac{5}{100} \\ & + (-900 \times 40 + 400 \times 180) \times \frac{30}{100} \\ & + (-900 \times 20 + 400 \times 200) \times \frac{40}{100} + 400 \times 220 \times \frac{25}{100} \\ & = 58100 \quad (\text{円}) \end{aligned}$$

(5) 240 個を仕入れるのは明らかに不利なので検討しない

以上から 180 個仕入れるのがよい。

# 決定理論

大山 達也

宮城県仙台第三高等学校 数学部

## 1 はじめに

数学と論理学は還元可能な関係を持っているという事実に興味を持ち、この度決定理論を題材に用いて、もっとこの分野の理解を深めていこうというのがこのレポートの目的である。

## 2 決定理論とは

決定理論とは個別の意志決定について価値、不確かさといった事柄を数学的かつ統計的に確定し、それによって「最善の意志決定」を導き出す理論である。ゲーム理論へ応用されることの多い理論である。簡単に言えば、高等数学Aの期待値のことである。

ちょっとした具体例をあげてみる。

参加料100円でさいころを1回投げてそれぞれの目に応じた金額が支払われるゲームがあると  
する。

金額は1:20円, 2:50円, 3:100円, 4:100円, 5:150円, 6:150円とする。この場合、  
あなたがこのゲームに参加した方が得かどうかということを数学的思考から行動を決めるという  
のが決定理論の考え方だ。

実際にこの問題を解いてみよう。支払われる金額の期待値は、

$$E = 20 \times \frac{1}{6} + 50 \times \frac{1}{6} + 100 \times \frac{1}{6} + 100 \times \frac{1}{6} + 150 \times \frac{1}{6} + 150 \times \frac{1}{6} = 95$$

である。

よって、参加料100円と支払われる金額の期待値95円を比較すれば、得をする場合もあるが、  
平均的に考えれば損をする可能性の方が高い。したがって、参加しない方がよいという結論が出  
される。

このように、決定理論は損得勘定で最善の行動を決めようとするのが目的である。

ここで、この理論を使った有名な賭けの話を紹介しよう。

## 3 パスカルの賭け

「人間は考える葦である」というパスカルのフレーズは聞いたことがあるだろう。数学者でもあ  
ったパスカルは決定理論を用いた有名な思考実験をしている。このパスカルが著した「パンセ」の

中に以下の賭けについて論じている。

「神様は信じた方がよいか、信じない方がよいか」ということである。以下パスカルの「パンセ」の引用である。

「神は存在するか、しないか。君はどちらに賭ける？」

いや、どちらかを選べということがまちがっている。正しいのは賭けないことだ。そう。だが、賭けなければならない。君は船に乗り込んでいるのだから。」  
すでにこの世に生きている以上、この勝負を降りることはできない。  
賭けないということ自体が、結果的に一つの選択となるからだ。掛け金は自分の人生である。

神が存在するという方に賭けたとしよう。勝てば君は永遠の生命と無限に続く喜びを得ることになる。

しかも、君の人生は意味あるものとなるだろう。賭けに負けたとしても、失うものは何もない。

反対に、神は存在しないという方に賭けたとしよう。

その場合、たとえ賭けに勝っても、君の賭けは現世の幸福だけである。

死後は虚無とみなすわけだから、そこで得るものは何もない。逆に負けたとき、損失はあまりに大きい。

来世の幸福をすべて失うことになるからである。

以下、その思考実験の過程を数学に表してみる。

神様がいる確率を  $a$  とおく。よって、余事象から神様がいない確率は  $(1 - a)$ 。

期待値を考えてみる。

神様がいない場合は有限の幸福であるので

$$a \times \text{有限の幸福} = \text{有限の幸福} \quad \cdots \cdots \textcircled{1}$$

神様がいる場合は無限の幸福であるので

$$(1 - a) \times \infty = \infty \quad \cdots \cdots \textcircled{2}$$

したがって、 $\textcircled{1}$ と $\textcircled{2}$ を比較して

$$\text{有限の幸福} < \text{無限の幸福}$$

よって、パスカルはこの理論から「神様は信じた方が得である」という結果を導き出した。そして、パスカルはキリスト教を信じることにしたという。

しかし、この結論にはある欠陥がある。この世界のあらゆる宗教上の神様の性質をすべて考慮していない点に無理があるということらしい。また批判がある思考実験でもある。

#### 4 決定理論、パスカルの賭けへの個人的な感想

決定理論とは、「ある状況の行動の選択肢から最善の選択肢を選ぶこと」が目的であった。また、この理論への一般的な批判には「予測可能な範囲でない事象に関しては考慮していない」ということらしい。

ただ、この決定理論から

「私はあなたに無限の幸福を与えることのできる者です。あなたは信じますか？信じれば救われますよ！」

という命題を勝手に作った場合。もし信じないとすると、本当に幸福を与える者であった場合、一時の懐疑心を持ったという苦悩が残るだけであり、信じた方が得であるという結論になるのは「パスカルの賭け」の例と同じような理論になる。

しかし、こういう考え方から、様々なこじつけも可能になるようにも思える。選択肢において、見晴らしがよくなるような解決できないジレンマがあるのだろうか。パスカルの思考実験で行った「神を信じるか信じないか」といった一種の生き方への選択という抽象的な問題についての結論を考えるとちよつと釈然としない気持ちも出てくる。すべてに関してこの理論が完璧適応するというわけではないというのは一般的な批判もあるように自明なことであるが、数学を用いた理論で様々なことが証明されたり、問題提起するような内容もあるということは数学的思考による論理学への魅力にさらに感じるようになった。

#### 参考

図解雑学 パラドクス（図解雑学シリーズ）富永 裕久

# 世代を超えて親しめる数学

## ～確率編～

本郷 忍

宮城県仙台第三高等学校 数学部

最近、巷では「数学ブーム」が起きているようです。算数・数学はとても「苦い」経験のある人が多いかもしれませんが、実はとても身近で楽しい話題がたくさんあります。今回は「確率」にテーマを絞って、大人から子供まで楽しめる話題を提供しようと思います。

### 1 「どっちだ!？」

小さい頃「どっちだ!？」と言って遊んだことはないですか？右手か左手のどちらかに「あめ」などの小さなものを持ち、両手を握った状態でどちらにあめが入っているかを当ててもらう遊びです。

このとき、選択肢は「右手」か「左手」しかありませんので、当たるか外れるかは五分五分……つまり50%の確率であめの入っている方を言い当てることができるはずですが、これを中学校では確率  $1/2$  とあらわします。

次の表は、実際にこの遊びを10回やってみた結果です。「○」はあめの入っている方を当てたことを表し、「×」は外れたことを表しています。

実験 被験者：Hさん(2歳6ヶ月)

回数	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
結果	○	×	○	○	○	×	×	○	×	○

この場合、10回のうち6回当たったので、正解率は60%ということになります。前述の「あたりの確率は50%」という事実を上回る結果となりました。これはなぜでしょうか？

そもそも確率が「50%」であるというのは、どういうことでしょうか。「同じことを何度も繰り返し行ったときに、確率が50%に近づく」というのがこの場合の「50%」の意味であって、「どっちだ」の遊びを100回、1000回、……と何度も繰り返しやっていくと、あめを当てる確率が50%に近づいていくということを表しているのです。

このことを数学では「大数(たいすう)の法則」といいます。

## 2 必ず「1の目」が出る！？

以前、こんな問題を出したことがあります。

さいころを1回投げると1の目が出る確率は1/6です。これは「6回さいころを投げたとき、1回は1の目が出る」ということを意味しています。

さいころを5回投げた結果を下の表に示しました。

回数	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目
結果	○	×	○	○	○	×

今から6回目のさいころを投げますが、さて出る目は何でしょうか？

おわかりでしょうか？実際、この問題に対して「1の目が出る」と答えた人は少なくありませんでした。「大数の法則」を考えてもらえれば正解が何であるかはすぐにわかると思います。

## 3 最も身近！？な確率～降水確率

### (1) 降水確率のイメージ

天気予報を目にしない日はありません。その中に「降水確率」が出てきます。さて、みなさんは次の3つの場合について翌日どのような行動をしますか？

- A：明日の降水確率は10%です。  
B：明日の降水確率は40%です。  
C：明日の降水確率は70%です。

こんなイメージを持っているのではないのでしょうか。

A：降水確率は10%だから、明日は雨は降らないだろう。降っても少量だから傘は持って行かなくても大丈夫。

C：降水確率は70%だから、明日は雨が降りそうだ。しかも確率が高いから雨も多く降りそうだ。傘は持っていこう。

このイメージの中にも実は間違いが含まれています。降水確率というのはその地域に1mm以上の雨が降る確率を表したものです。だから、雨が降る量とは全く関係がありません。降水確率10%でどしゃ降り、70%で小雨……なんてことも当然あるわけです。

## (2) 降水確率の出し方

降水確率はわかりやすくいえば次のようにして算出しています。

まず、翌日の天気図と同じような気圧配置の天気図を過去のデータから100日分探し出します。そのうち、40日分で雨が降っていれば「降水確率は40%」となります。つまり、降水確率は今までの経験に基づいて算出しているということになります。

## (3) 降水確率40%をどう考えるか。

さて、判断に困るのは「B」の「降水確率40%」のときではないでしょうか。自転車通学の人にとっては、バスにしようか、自転車にしようか……迷うところです。

そこで、次のように考えてみます。わかりやすく、金額を用いて表してみます。

傘を持ち歩く労力・・・250円

雨に濡れて受ける損失・・・800円(教科書が濡れる, 服が濡れる等)

降水確率40%の予報が10回出たとします。そのうち4回は雨が降ることになります。

(ア) 降水確率40%の予報を信じる人

10回とも傘を持ち歩くので、その労力は250円×10回=2500円

(イ) 降水確率40%の予報を信じない人

傘を持ち歩く労力はないが、その分4回は雨に濡れて損失を受けるので、

800円×4回=3200円の損失

この2つの例でいえば、40%は「信じた方が得」ということになります。もちろん、人によって労力や損失の金額が異なりますので、自分なりの計算をしてみてください。

## 4 そもそも～確率の起源とは～

そもそも、なぜ「確率」という考え方が出てきたのか。前出の「降水確率」で考えたように、基本的に人は「損」をしたくありません。できれば「得」をしたい。でも、私たちの直感というのは意外と当たりません。

確率の有名な話題として「40人のクラスの中に誕生日が同じ人がいる確率は何%か」というものがあります。私たちの感覚としては「1年は365日もあるから、誕生日が同じになる確率はかなり低い」と思いますが、実は計算すると「約90%」の確率でクラス内の誰かと誰かは誕生日が同じ

になっています。

確率論の歴史的発端は、パスカルとその友人メレとの間の議論だといわれています。

ある日、メレは賭博に関する疑問を友人であるパスカルに相談したといえます。そのときの問題とは次のようなものです。

AとBとの間であるゲームをしていた。そのゲームは勝った方が全ての賭け金をもらえるゲームである。もしも、このゲームを途中で止めたとき、それまでの途中経過を見て賭け金をどのように配分すればよいのだろうか。

漠然としているので、具体的なゲームで考えます。前出の「どっちだ!？」ゲームで賭けをしていたとしましょう。お互いに10万円を出し合って、先に3勝した方が勝ちとします。(つまり、20万円を得られます。)

ところが、Aが2勝、Bが1勝したところでゲームが中断されました。このとき、賭け金であった20万円をどのように2人で分けたらよいでしょうか。

#### 【考え方①】

3勝した人が賞金をもらえるという約束なので、まだどちらも3勝していないから勝負はついていない。10万円ずつ、A、Bそれぞれに戻す。

→でも、2勝しているAが不満を言いそう……

#### 【考え方②】

Aが2勝、Bが1勝しているので、2:1でお金を分ける。

→仮にBが0勝だったとき、Bの分け前が0になってしまうので不公平感が出そう……

いずれも、途中で終わったことによる「何となく釈然としない感じ」が残りそうです。そこで、パスカルはよい解決方法として次のように考えたといえます。

#### 【パスカルの考え方】

まず、このゲーム1回でお互いが勝つ確率はそれぞれ1/2です。今3回ゲームをしてAが2勝1敗の状態です。Aが3勝して20万円を手にするには次の2つの方法があります。

- ・4回目のゲームでAが勝って3勝1敗になる

→このようになる確率は1/2

- ・4回目のゲームでBが勝って2勝2敗になり、5回目のゲームでAが勝って3勝2敗となる

→このようになる確率は $1/2 \times 1/2 = 1/4$

よって、この先Aが3勝する確率は $1/2 + 1/4 = 3/4$

つまり、このままゲームを続けた場合、Aが20万円を手にする確率は3/4でBが20万円を手



にする確率は1/4となる。だから、中絶した時点での賞金の分配は、

$$A : 20 \text{ 万円} \times 3/4 = 15 \text{ 万円} \quad B : 20 \text{ 万円} \times 1/4 = 5 \text{ 万円}$$

とするのが妥当である。

このあたりの話は、高校生であれば「排反」「期待値」といったことがわかっているならば理解できると思います。

いずれにせよ、確率論の発展の背後には「損をしたくない」という人間の心理が潜んでいたことになります。

## 5 宝くじは損だ…でも

宝くじを買うことは損であることは、確率を考えるまでもなく経験上わかっていることだと思います。それでも、世の大人は夢を求めて買ってしまうのです。

1枚300円の宝くじを購入すると、平均で何円当たるのでしょうか？それを計算してみましょう。

宝くじの裏面には、1ユニット（1000万枚）あたりの当選本数が記されています。平成22年の年末ジャンボ宝くじをもとに下の表を作ってみました。

等級	当選金	本数	当選金 × 確率	
1等	2億円	1	200,000,000 ×	1/10,000,000 = 20
1等前後賞	5000万円	2	50,000,000 ×	2/10,000,000 = 10
1等組違い賞	10万円	99	100,000 ×	99/10,000,000 = 0.99
2等	1億円	5	100,000,000 ×	5/10,000,000 = 50
3等	100万円	100	1,000,000 ×	100/10,000,000 = 10
4等	1万円	10,000	10,000 ×	10,000/10,000,000 = 10
5等	3000円	30,000	3,000 ×	30,000/10,000,000 = 9
6等	300円	1,000,000	300 ×	1,000,000/10,000,000 = 30
年忘れラッキー賞	3万円	1,000	30,000 ×	1,000/10,000,000 = 3

平均は、各等級の「(当選金) × (確率)」の和で求めることができるので、計算すると「142.99円」……

つまり、1枚300円で宝くじを購入すると、平均で「143円」当選することができる。計算上も確実に損をすることがわかります……でもつい買ってしまうのはやはり当選金額の大きさなのでしょう。

## 6 モンティ・ホール問題

最後に、先日NHKの「ためしてガッテン」という番組で取り上げられていた確率に関する話題を紹介します。

ちなみに、「ためしてガッテン」といえば、昨年の三高祭で番組制作に携わっている方から記念講演をしていただきました。「死んだアサリは開かない?」といったテーマでした。

では、問題です。これは「モンティ・ホール問題」と呼ばれ、数学者をも悩ませた問題とのことです。あなたならドアを変えますか? 変えませんか?

3つのドアのうち、1つに車が隠れています。どのドアに車が隠れているかを当てるとその車がもらえるというゲームです。

あなたは、車が隠れていると思うドアを1つ選びました。すると正解を知っている司会者は、すぐに答えを発表せず、はずれのドアを1つ開けて見せました。

残ったドアは2つです。司会者は「あなたがさっき選んだドアを変えてもいいですよ」といいました。

さて、このときドアを変えた方がよいですか、それとも変えない方がよいですか?

※司会者は、あなたが最初に選んだドアが当たっていても、はずれていても、残ったドアのうちどちらか1つを開けて、必ず2択にします。

## 7 あとがき

数学には、たくさんのおもしろいエピソードがあります。自分にあった好きな分野が見つければ数学はとても楽しいものです。

そんな数学の楽しさを少しでも体感してもらえたら幸いです。そして、もっとおもしろいものを探したいあなたは、是非来年は数学部へ。

### 参考文献

- ・ためしてガッテンホームページ「数字トリック見破り術」
- ・中学・高校数学のほんとうの使い道 (実業之日本社: 京極一樹 著)
- ・Wikipedia「降水確率」

平成24年3月31日発行

宮城県仙台第三高等学校

SSH委員会

理数科部

〒983-0824

宮城県仙台市宮城野区鶴ヶ谷一丁目19番地

TEL 022-251-1246

FAX 022-251-1247

E-Mail [chief@sensan.myswan.ne.jp](mailto:chief@sensan.myswan.ne.jp)

URL <http://ssh-sensan.myswan.ne.jp/>

<http://sensan.myswan.ne.jp/>

印刷 創文印刷出版株式会社

