

平成27年度

理数科課題研究報告書

岡山県立津山高等学校理数科

# 目 次

## [ 物理分野 ]

- 排水管の要素が排水音に及ぼす影響の考察……………1  
古田 美穂／家喜 翔太郎／植田 達也
- 溶液の屈折率の依存性……………6  
高崎 亮助／上原 基希／筒塩 奨／眞柴 将
- 摩擦の法則の検証とそのメカニズムの考察……………9  
竹内 亮人／近藤 真由／中島 こころ／坂 孝太
- 粉粒体の粒径がブラジルナッツ効果に与える影響についての基礎的研究……………13  
□元 健太郎／坂本 歩夢／武村 知樹／山本 康平／竹之内 彩音
- 光の干渉実験を利用した微細物質の大きさの測定……………18  
後藤 昂／池田 遥香／友末 千尋

## [ 化学分野 ]

- 炭素電池の内部抵抗の低減の研究……………21  
小椋 夏樹／青田 隼祐／一柳 累／藤田 優真／田淵 陽香
- 備前焼の特性に関する研究……………25  
都井 里奈／右近 拓也／岡田 拓歩／岡本 さつき
- ムクロジサポニンの抽出と洗浄効果についての研究……………27  
芦田 真奈／竹元 結麻／都守 俊太／仲矢 和生／美若 正育

## [ 生物分野 ]

- アルカロイドに対する粘菌の走性について……………31  
角南 柚香里／多胡 果純／高井 祐哉
- 真性粘菌モジホコリカビの光走性に関する研究……………34  
藤本 雅子／平 しほり／池田 夢乃

- [ 巻末図 ] ……………37

本年度も課題研究を進めるにあたり、多くの外部指導者の方々にご指導・ご助言をいただきました。ご多忙のところ、快くご指導をいただき、充実した研究を行うことができました。教員・生徒一同より厚く感謝を申し上げます。

|       |            |                     |
|-------|------------|---------------------|
| 研究指導  | 津山工業高等専門学校 | 佐藤 紳二 教授            |
|       | 津山工業高等専門学校 | 藪木 登 教授             |
|       | 美作大学短期大学部  | 桑守 正範 教授            |
|       | 美作大学短期大学部  | 栗脇 淳一 准教授           |
|       | 中部大学       | 福田 良輔 客員教授          |
|       | 科学部非常勤講師   | 村上 安弘 様             |
| 外国語指導 | 本校 GSO     | 江原 Martina 様        |
|       | 本校 GSO     | 有本 茂 様, 有本 Ursula 様 |
|       | 本校 GSO     | Stephen Hemsley 様   |
|       | 本校 GSO     | Olivier Charles 様   |
| 指導助言  | 福山大学       | 秦野 琢之 教授            |
|       | 鳥取大学大学院    | 安東 孝止 特任教授          |

# 排水管の要素が排水音に及ぼす影響の考察

研究者 古田 美穂, 家喜 翔太郎, 植田 達也

指導者 佐藤 紳二 藪木 登

## 1. 研究の概要

浴槽や洗面台で多量の水を流したとき、流れる途中や流れ終わるときに、音になる(これを排水音と呼ぶ)。本研究は、この排水音と排水管の長さ・太さといった要素との関係性を明らかにしようと試みた。また再現実験を繰り返し行い、音になる経緯について分析した。結果として、管が長くなるほど、太くなるほど、排水音は大きくなった。

We drained much water out into an outlet of a bath tub and a washstand. Then, while it flows through a drainpipe or when it finishes flowing, we can hear a noise. We tried to reveal the relationship between this noise and factors such as the length and the diameter of drainpipes in this study. And we generated the same noise many times, then we analyzed how the noise occurred. As a result, the longer or thicker the pipe is, the louder the drain noise is happened.

## 2. 研究内容

私たちは、排水音について調べる中で、排水音になる原因を以下のように考えた。

排水管には、下水からの悪臭を防止したり、ネズミなどの害獣が侵入するのを防ぐために、図1のような排水トラップがある。流す水が多いとき、水が管の断面を満たした状態で、トラップの水ごと管内の空気をつれて流れていく。そのため、水が流れ終わったとき、管の中が負圧になる。この中に空気が入り、圧力が戻るときにS字トラップ部の空気が振動し、排水音がする。

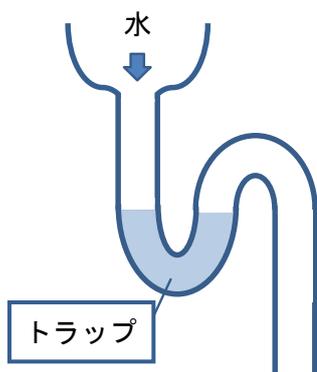


図1：排水音の発生原理

そして、この原理を元に、負圧状態を再現できる装置を製作した。図2は装置の模式図である。この装置の管を水で満たしたうえで、漏斗に水を一

定量入れてから管内に水を流す。漏斗と管についてその断面積を比較すると、管の方が大きいため漏斗から管内に流れ込む水量よりも、管から排出される水量の方が大きくなる。よって、管内に負圧の部分が生じ、その後管内に空気が入ることでS字トラップと同じように管内に入った空気が振動し排水音が聞こえる。

実際にこの装置で排水音と同じ音が聞こえたため、この装置は実際の排水音のなる状態を正しく再現できているとした。

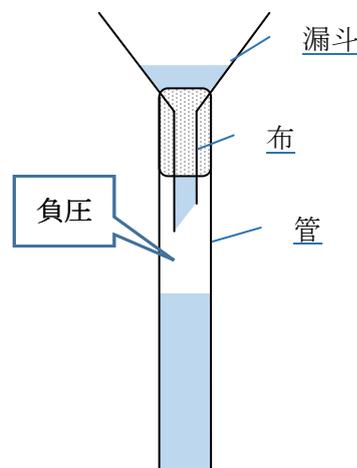


図2：実験装置の模式図

### 3. 実験方法

図2の装置を用いて、以下①～③の手順で発生する排水音の大きさを測定した。

- ① 漏斗の口に布を巻き管にさす。
- ② 手で管の出口を塞ぎ、漏斗の2/3の高さまで水をためる。
- ③ 手を外し、水を流す。

※1つの条件に対して、5回ずつ実験を行い、平均値をとる。

さらに、より正確に排水音を測定するために以下の点について改良を行った。

- ・漏斗と管の隙間に布を入れることで、空気・水漏れを防いだ。
- ・水の落下点にスポンジをおくことで、落水音を軽減させた。

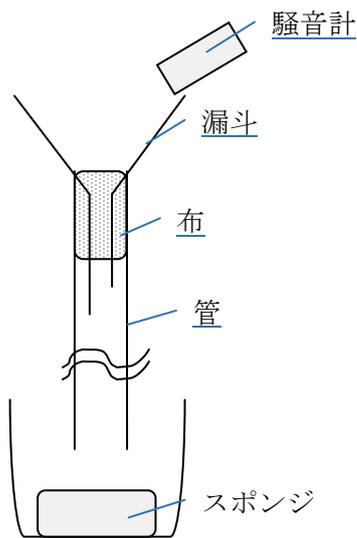


図3：測定方法

### 4. 予備実験

今回の実験方法では、管の長さ・太さにもなつて水量（管の体積）が変化してしまう。そこで水量（管の体積）が同じ、管の長さ・太さが異なる2本の管を用意し、それぞれ実験を行った。

結果として、2本の管で排水音の大きさは異なつた。よって、管の長さ・太さは、排水音の大きさに関係する要素であるといえる。

### 5. 排水音発生時の管内の観察

排水音が発生する際の管内の様子について観察を行った。その結果、水の流れ方・音のなるタイミングに3種類の状況があることが分かつた。

#### 状況①

漏斗内の水が、漏斗の先まで流れ終わったとき、音が発生した。

→漏斗の上から空気が入つたと考えられる。

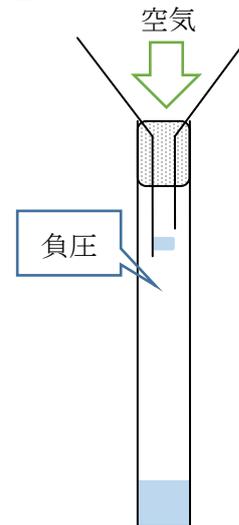


図4：状況①の模式図

#### 状況②

漏斗内の水が渦を巻きながら流れていき、水が流れ終わるより前に、音がした。

→渦の間から空気が入つたと考えられる。

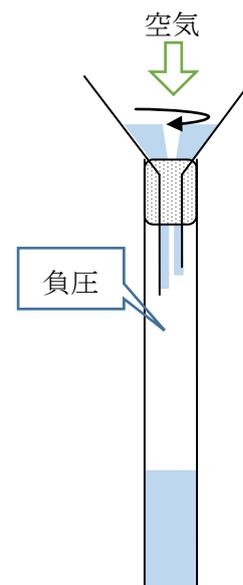


図5：状況②の模式図

状況③

太い管のとき、渦は巻いていないが、水が流れ終わるより前に、音がした。

→水が断面を満たさなくなったとき、管の下から空気が入ったと考えられる。

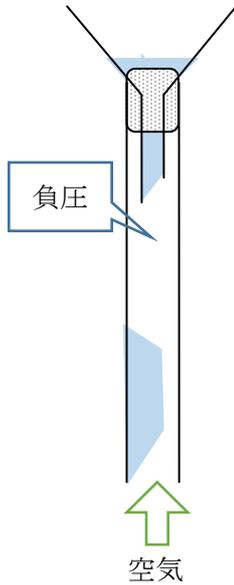


図 6：状況③の模式図

6-1. 実験 (1)：管の太さと音の大きさの関係

次に、管の長さを一定、管の内径を変数として、発生する音の大きさを測定した。図 7 に結果のグラフをあらわす。

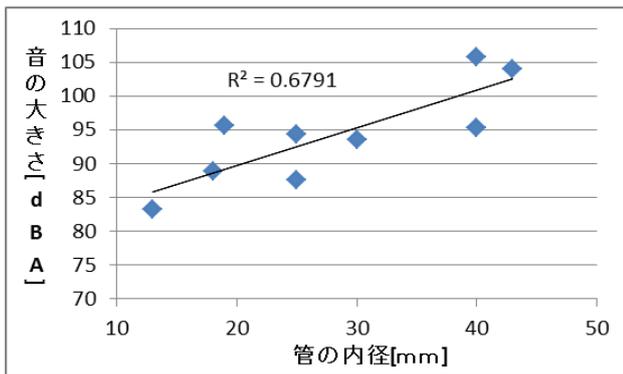


図 7：管の内径と音の大きさの関係

6-2. 実験 (1) 結果・考察

グラフより、管の内径が大きくなる（管が太くなる）ほど、排水音は大きくなった。これは管の断面積が大きいとき、空気の振動する断面積が大きくなるため、音が増大するためであると思われる。

7-1. 実験 (2)：管の長さと言の大きさの関係

第 2 に、管の内径を一定、管の長さを変数として、発生する音の大きさを測定した。5種類の管で、それぞれ管を切ることで長さを変えながら発生する排水音を測定した。

|     | 内径 (mm) | 長さの区間 (mm)          | 切る間隔 (mm) |
|-----|---------|---------------------|-----------|
| 管 A | 18      | 1000~300            | 50        |
| 管 X | 19      | 1550~700<br>650~175 | 150<br>25 |
| 管 B | 25      | 1000~250            | 50        |
| 管 C | 30      | 1000~300            | 50        |
| 管 D | 40      | 1000~450            | 50        |

7-2. 実験 (2) 結果・考察

結果を図 8~図 12 のグラフに表す。

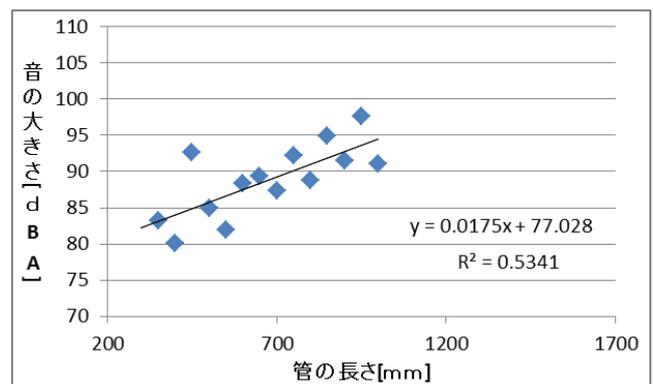


図 8：管 A (内径：18mm) のとき

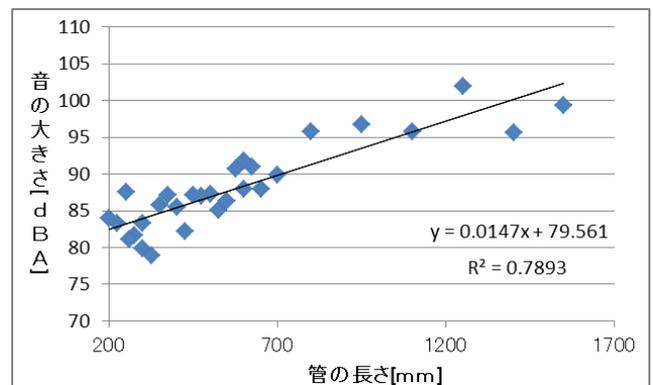


図 9：管 X (内径：19mm) のとき

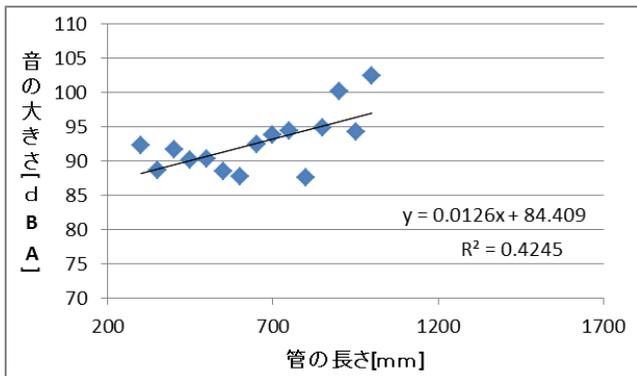


図 10 : 管 B (内径 : 25mm) のとき

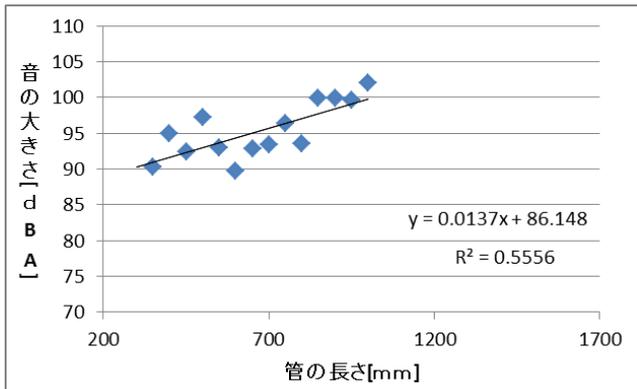


図 11 : 管 C (内径 : 30mm) のとき

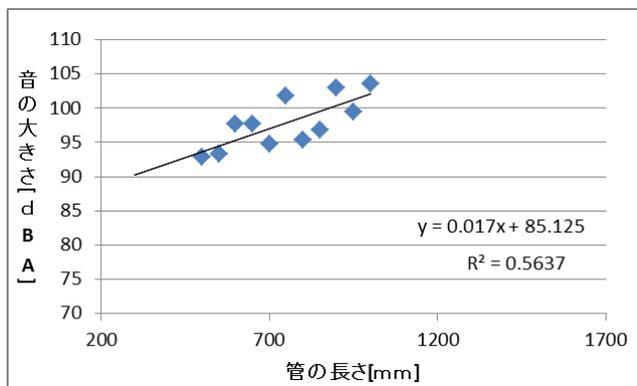


図 12 : 管 D (内径 : 40mm) のとき

そしてグラフより次の特徴が見られた。

- いずれの管でも管が長くなるほど、排水音は大きくなった。
- 管が短すぎると、音はならなくなった。以下に各管で音ならなくなった長さを記す。  
X : 175mm、A : 300mm、B : 250mm、  
C : 300mm、D : 450mm

さらに、これらの特徴についてベルヌーイの定理をもとに管の上部と下部を比較した。

ベルヌーイの定理について以下に記す。

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho g z = \text{constant}$$

$$\left[ \begin{array}{l} \rho : \text{流体密度} \quad v : \text{流速} \quad p : \text{圧力} \\ g : \text{重力加速度} \quad z : \text{基準面からの高さ} \end{array} \right]$$

今回、 $\rho \cdot g$  は一定で、また  $v$  もほぼ一定であると考えた。その時、管の上部では、 $z$  が大きくなるため、 $p$  が小さくなる。よって、管が長いほど、管の上部と下部の空気の圧力差がさらに大きくなることで、振動が増大され、音が大きくなると考えられる。

最後に図 8~図 12 で示したグラフの近似曲線(直線)を一つのグラフにまとめ、比較した。

< 近似曲線の式 >

A:  $y=0.0175x+77.028$  ( $R^2=0.5341$ )

X:  $y=0.0147x+79.561$  ( $R^2=0.7893$ )

B:  $y=0.0126x+84.409$  ( $R^2=0.4245$ )

C:  $y=0.0137x+86.148$  ( $R^2=0.5556$ )

D:  $y=0.017x+85.125$  ( $R^2=0.5637$ )

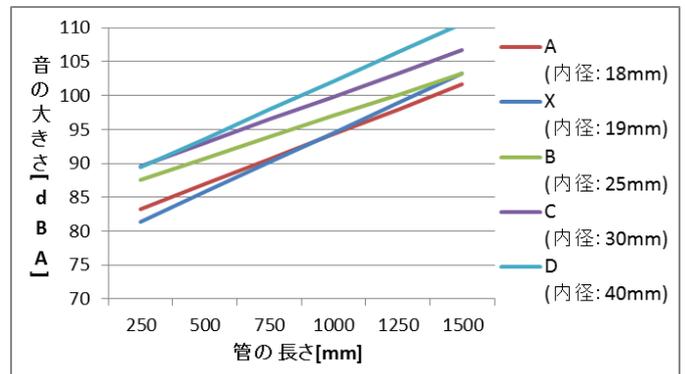


図 13 : 図 8~図 12 の近似曲線の比較

(巻末にカラー図を掲載)

グラフの傾きについて、管の太さの違いによる差異はほとんどなかった。よって、管が長くなることによる排水音の増加量は内径によらず一定であると言える。

また、管の内径が大きいほど、 $y$  切片が大きくなっていることから、管の長さが同じであれば、必ず管が太いほど、音が大きくなる傾向があるとわかった。

その他には、実験回数の多い管Xだけが、 $R^2$ が大きいことから、管A・B・C・Dでも実験回数を増やせば、より近似曲線に近い結果が得られると思われる。

## 8. 結論

以上の研究より、排水管から発生する排水音の特徴として、排水管の太さや長さといった要素が関係しており、排水管の内径が大きく管が長い方が排水音が大きくなることがわかった。

## 9. 今後の展望

排水音の発生するパターンが複数あることもわかり、その制御を行うことでより正確なデータ収集を行いたい。

## 10. 参考文献

集合住宅の排水立て管騒音に関する研究  
(嶋田泰・安岡博人・塚本幸助)

<http://u-need.ocnk.net/page/153>

## 11. 謝辞

本研究のご指導をしてくださった津山工業高等専門学校  
の佐藤紳二先生、藪木登先生にお礼を申し上げます。

# 溶液の屈折率の依存性

研究者 高崎 亮助 上原 基希 眞柴 将 筒塩 奨  
指導者 蒲生 信博

## 1. 研究の概要

屈折率の依存性を調べるために、5種類の溶液を用いて、密度などの条件の変化による屈折率の変化を調べた。その結果、屈折率と溶液の中の粒子の数と関係があることが分かった。

To examine the refractive index dependency, we checked the change of the refractive index by the change of conditions such as the density, using five kinds of solutions. As a result, we found out that the refractive index and the number of particles in solutions have a relationship.

## 2. 動機・目的

我々は曇気楼について興味を持ち調べた。曇気楼は光の屈折率が大きく関係しており、曇気楼を分析するためには、まず屈折率について調べる必要があることが分かった。そこで変数の制御しやすい液体の屈折率についてまず調べ、そこから曇気楼について研究しようと考えた。本研究は液体の屈折率について報告する。

まず、溶液の屈折率を調べるための装置を開発する。次に5種類の溶液を用いて、溶液の屈折率はどのような条件に依存し、どのような規則性があるかを調べる。

## 3. 定義

屈折率とは光が異なる媒質を通過するときの光の速さの比であり、真空を基準とする絶対屈折率と、相対的な相対屈折率がある。ふつう屈折率というときは絶対屈折率をさす。

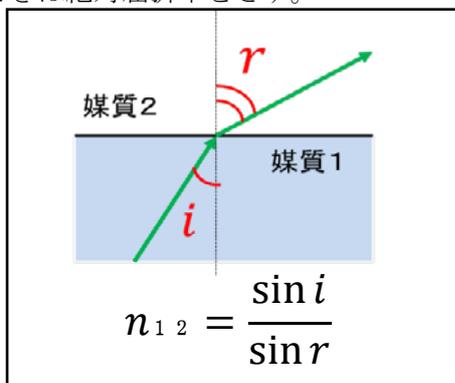


図1 2媒質間の屈折と屈折率の式

媒質1に対する媒質2の相対屈折率 $n_{12}$ は図1で求められる。絶対屈折率の場合、媒質1は真空となる。

## 4. 実験方法

I 溶液を入れた容器で光が屈折し、入射角が変化することを防ぐことができる実験装置を創作した(図2)。この装置で入射角を一定にすることができる。完成した装置が図3である。

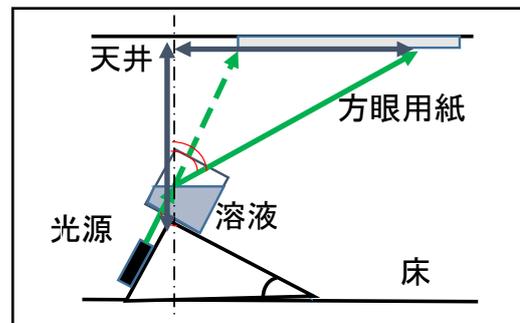


図2 実験装置の模式図



図3 実験装置

II 食塩、シヨ糖、硫酸アンモニウム、塩化アンモニウム、塩化カリウムの5種類を溶質とした体積一定の水溶液を用意。

III 図3の実験装置を用いて、溶液の温度、密度、溶質のモル濃度、溶質の溶液中に占める体積の条件を変えて実験し、天井に貼った方眼用紙の目盛りを読み取り、屈折角を計算する。

IV IIIで求めた結果をもとに、三角関数を用いて屈折率を計算する。

溶液の屈折率を求めるために、実験では溶液から空気に光が入射しているが、図4のように、空気が溶液に光が入射していると考えられる。

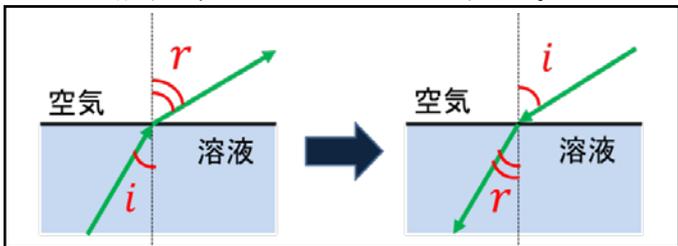


図4 光が進む向きについて

また、空気の屈折率は真空とほとんど変わらない(真空:1 空気(0℃、1気圧):1.0003)ため、空気に対する溶液の屈折率は溶液の絶対屈折率とほぼ同じとみなす。

### 5. 実験結果・考察

#### ① 溶液の温度

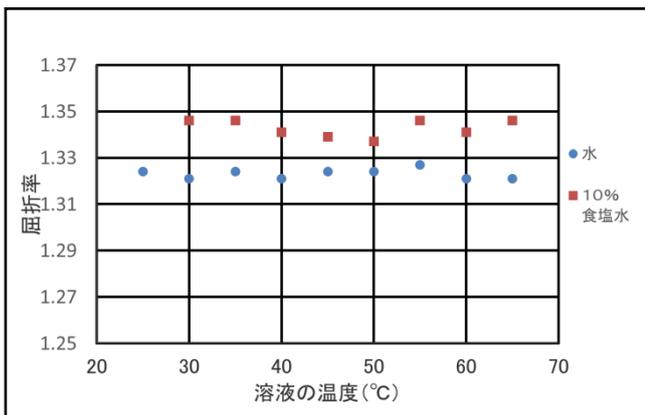


図5 溶液の温度と屈折率のグラフ

考察 溶液の温度には屈折率の依存性は見られない。また、水の屈折率は文献値で1.33である。実験結果との誤差について、屈折率は

光の波長と関係があり、文献値を算出した光源と今回用いた光源の波長が異なるため、誤差が生じたと考えられる。

#### ② 溶液の密度

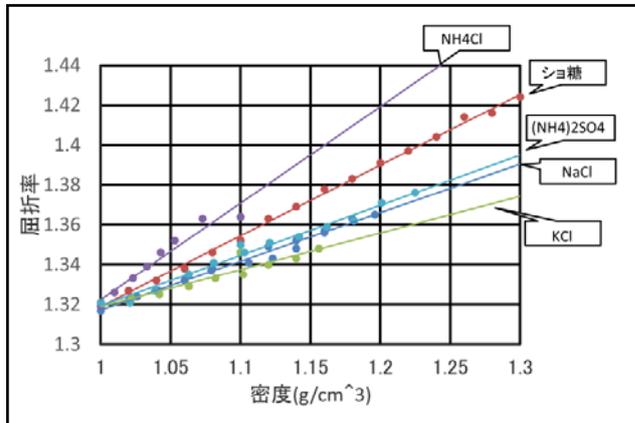


図6 溶液の密度と屈折率のグラフ

考察 どの溶質でも屈折率と溶液の密度は比例関係が見られる。ここから溶質の量が増えると屈折率も大きくなるといえるが、溶質の量とは溶質の粒子の数か、溶質の占める体積か、の2通りが考えられる。そこで、③溶質のモル濃度、④溶質の溶液中に占める体積の2つの条件と屈折率の関係について実験した。

#### ③ 溶質のモル濃度

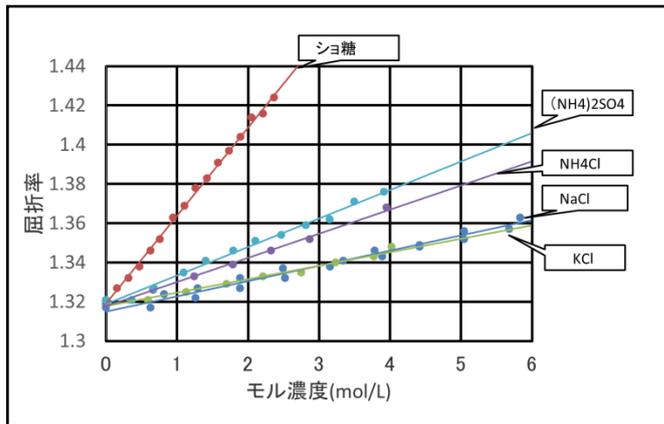


図7 モル濃度と屈折率のグラフ

考察 ②の条件と同様に溶質のモル濃度と屈折率は比例するが、シヨ糖の値が著しく大きくなる。シヨ糖溶液の屈折率の値が大きくなる

っている理由について、ショ糖分子は原子を多く含む（図8）ことから溶質の原子の数に関係していると考えた。

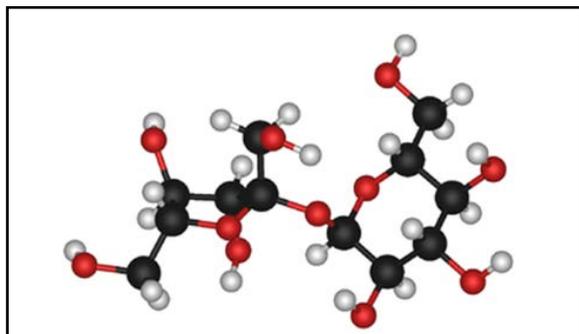


図8 ショ糖分子の構造

図7のグラフで屈折率の値が大きい溶質の順と含む原子の数が多い溶質の順は一致する。

#### ④ 溶質の溶液中に占める体積

溶質の体積について、電解質は電離したイオンを球と考えて体積を求め、ショ糖は結晶時の値から参考値として求めた。

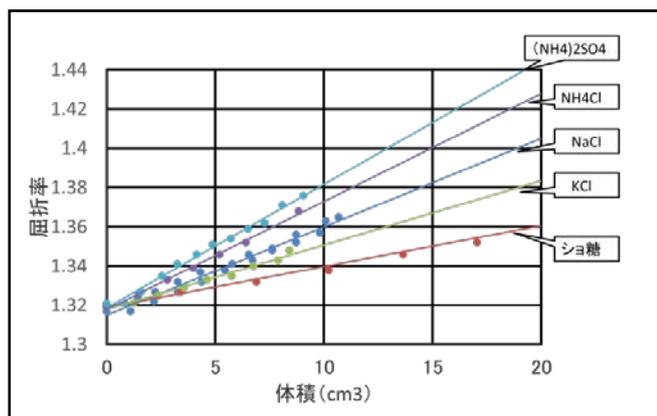


図9 溶質の体積と屈折率のグラフ

考察 ②、③の条件と同じく溶質の体積と屈折率は比例するが、③の条件と異なりショ糖の値は小さい。また、③の条件では値の違いのみられないNaClとKClに違いがみられる。ショ糖の体積の変化による屈折率の変化を考えてみると、ショ糖以外の溶質はすべて電離してイオンになるので、イオンに屈折率を大きくする効果があると考えた。NaClとKClについて、2つの屈折率の違いは電離したNa<sup>+</sup>イオンとK<sup>+</sup>イオンにあると考えた。

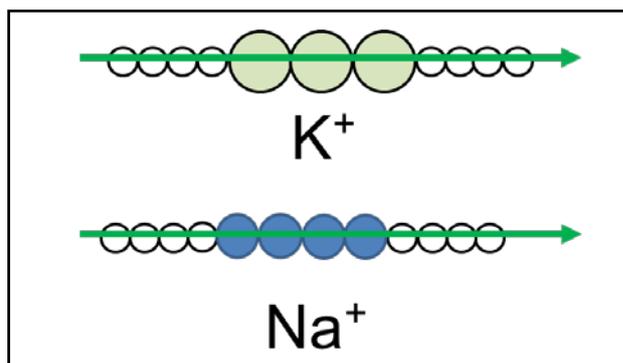


図10 溶液の通過時に光が衝突する粒子

K<sup>+</sup>イオンはNa<sup>+</sup>イオンより大きいいため、溶質の溶液中に占める体積が同じとき、図10のように光が溶液を通過する際に衝突する粒子数はNaCl溶液のほうが多くなる。このことにより、光がより多くの粒子に衝突するほど屈折率は大きくなるといえる。

## 6. 結論

実験①～③から、溶液の屈折率について

- ・溶液の温度には依存しない。
- ・溶液の密度に比例する。
- ・溶質の量（物質量、体積）に比例する。

ことが分かった。また、実験③、④から

- ・イオンには屈折率を大きくする効果がある。
- ・溶液中を光が通過する際、より多くの粒子に衝突するほど屈折率は大きくなる。

と結論付ける。

屈折率を応用したものとして糖度計や塩分計などが存在する。研究結果から粒子数が大きくなると屈折率も大きくなるといえるため、水質調査にも応用できるのではないかと考える。また、温度などの条件を安定して制御できる方法があれば蟹気楼についても研究できると考えられる。

## 7. 参考文献

- ・「屈折率標準液について」

<https://www.nmij.jp/~nmijclub/fluidp/docimgs/6-o.pdf>

- ・ファインマン物理学Ⅱ 岩波書店

# 摩擦の法則の検証とそのメカニズムの考察

研究者 竹内 亮人, 坂 孝太, 近藤 真由, 中島 こころ  
指導者 坪井 民夫

## 1. 研究の概要

私たちは摩擦の法則の検証とそのメカニズムを考察するため、①見かけの接触面積と静止摩擦係数、②垂直抗力と真実接触面積、③動摩擦係数と真実接触面積、④接触時間と静止摩擦係数のそれぞれの関係性を、実験を行い調査した。そしてそれらをもとにして、オリジナルの摩擦の現象モデルの作成と、接触時間と静止摩擦係数の関係の定式化に成功した。

## 2. 序論

摩擦は表面のミクロな形状やその変形も含んだ複雑な現象のように見えるのに対し、教科書に示されている式は経験則である。そこでこれらの経験則はどこまで正確なのか、ズレが生じるとすれば、それはどのようなメカニズムによるのかを実験によって確かめ、接触面で生じるミクロな変化を解明し、摩擦係数を理論的に導くことのできる式を作成する。

## 3. 研究内容

### 実験①

〈目的〉見かけの接触面積と静止摩擦係数の関係の解明する。

〈仮説〉見かけの接触面積の変化は静止摩擦係数と関係がある。

〈方法〉物体の底面に張り付けた紙やすりの粗さを変えることで、見かけの接触面積を変化させ、摩擦角を計測した。紙やすりの目が粗いほど、見かけの接点が少なく、見かけの接触面積が小さいものとした。

### 【実験方法】

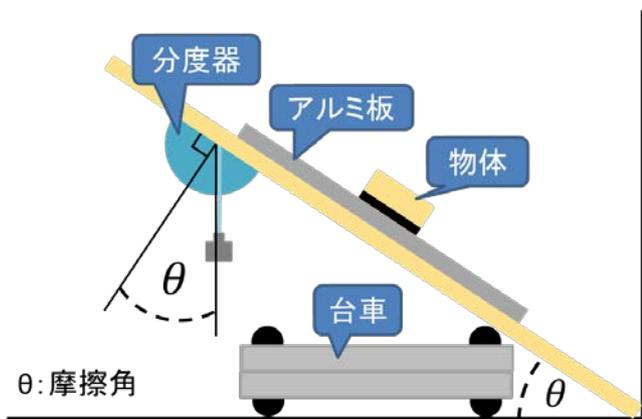


図 1

下端を固定した板の上にアルミ板を敷き、その上に下面に紙やすりを貼った物体をおく。板の傾斜を徐々に大きくし、摩擦角を計測する。

(図 1 参照)

〈結果〉

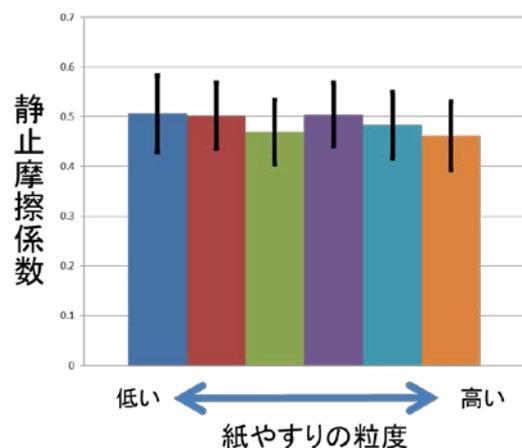


図 2

図 2 のように紙やすりの粗さによる有意な違いは見られなかった。したがって見かけの接触面積と静止摩擦係数は関係がないことがわかった。

〈考察〉 それでは何が摩擦係数に関係するのかを考えたところ、

文献に  $F=AS$  とあり、摩擦力が真実接触面積に比例し、そして真実接触面積は見かけの接触面積よりもかなり小さいことがわかった。

(F:摩擦力 A:凝着力 S:真実接触面積)

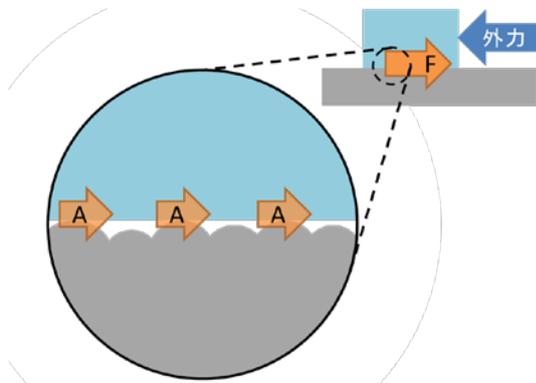


図 3

したがって  $F=\mu N$  より  $AS=\mu N$  となるので、真実接触面積は垂直抗力に比例するのだろうか。

### 実験②

〈目的〉 垂直抗力と真実接触面積が比例関係かどうかを検証する。

〈仮説〉 上記の式の通り真実接触面積は垂直抗力に比例する。

〈方法〉

#### 【真実接触面積の変化の測り方】

2枚のアルミ板の間に導電紙を挟み、電極を両側のアルミ板につなげてテスターで電流を測定する。抵抗率の式から求めた下記の式から、電流の変化の仕方は真実接触面積の変化の仕方と同じであるとわかるので、これを利用し真実接触面積を測定する。

$$I = \frac{V}{\rho l} S$$

(I:電流 V:電圧  $\rho$ :抵抗率 l:長さ S:真実接触面積)

#### 【実験方法】

おもりをアルミ板上に置くことで垂直抗力の大きさを変え、おもりの質量の合計を変数として、図3の装置で電流の変化を測定した。

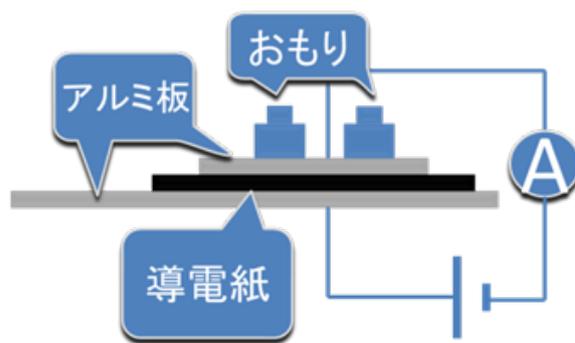


図 4

〈結果〉 電流の値がおもりの質量の合計に比例していることから、垂直抗力は真実接触面積に比例していることが判明した。(図4参照)

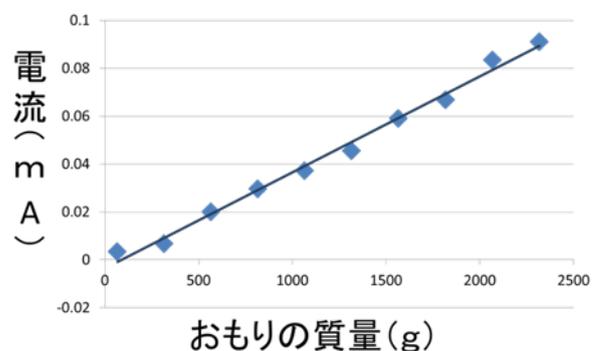


図 5

〈考察〉 以上の結果から次式を導くことができる。

$$N=PS \quad (P: \text{真実接触圧力} \quad N: \text{垂直抗力})$$

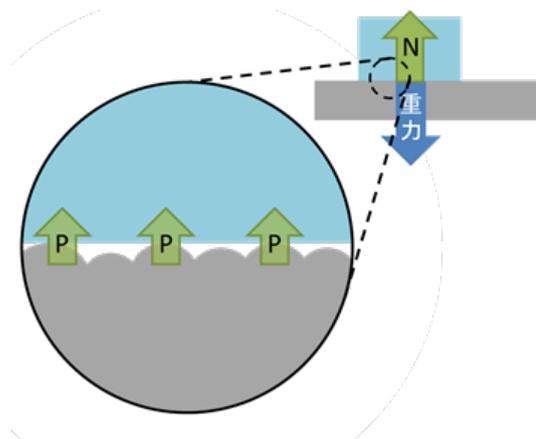


図 6

$\mu=F/N$ に  $N=PS$   $F=AS$  を代入して、

$$\mu = \frac{A}{P} \dots(1)$$

実験③

〈目的〉滑走中の物体の動摩擦係数が微小速度でも一定かどうかの検証と真実接触面積の変化を解明する。

〈仮説〉動摩擦係数は一定で、真実接触面積は滑走中には減少するのではないか。

〈方法〉導電紙をおもりとつないで運動させ、その運動とテスターが示す電流の値を同時にスロームービーで撮影し、流れる電流の大きさの変化と導電紙の速度を測定する。(図7参照)

そしてデータを取り速度と時間の関係のグラフと電流と時間の関係のグラフを作成した。

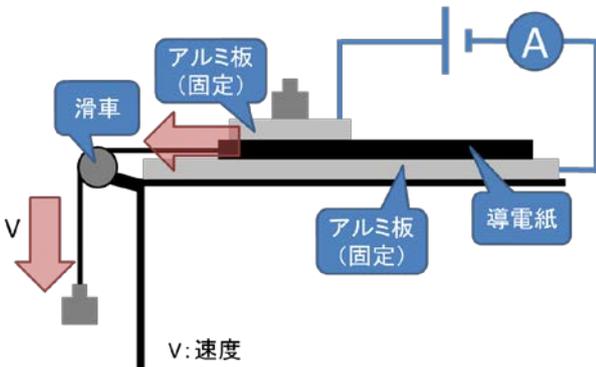


図7

〈結果①〉速度と時間 (横軸は時間)

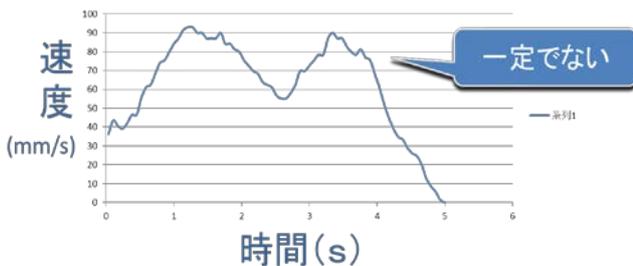


図8

このグラフから加速度は細かく変動していることがわかる。従って運動方程式から、動摩擦力は微小速度において一定でなく、すなわち動摩擦係数が一定でないことが分かった。ゆえに動摩擦において(1)の式は適用できない。

〈結果②〉電流と時間

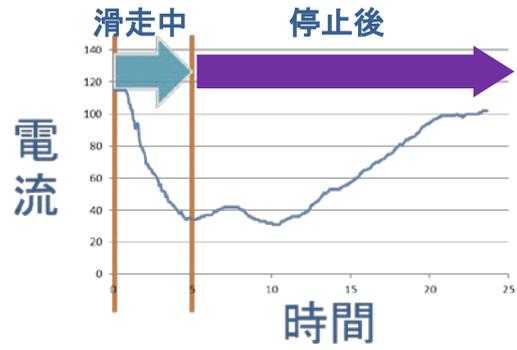


図9

滑走中は真実接触面積が減少しており、停止後徐々に増加して、一定値に収束した。

〈考察〉時間との関係が見られたため、 $S(t), P(t)$ とおける。

$$\therefore N = P(t)S(t)$$

十分な時間経過を  $t_0$  とおくと(1)の式より

$t_0$  経過後は  $0 \leq t < t_0$  の時は

$$\mu = \frac{A}{P_0} \quad \mu = \frac{A}{P(t)} \dots (2)$$

実験④

〈目的〉物体の放置時間と静止摩擦係数の関係を調べ、(2)の式が成り立つかどうか調べる。

〈仮説〉静止摩擦係数は時間とともに増加するのではないか。

〈方法〉実験①と同様の装置を使い、物体を斜面に放置する時間を変化させ、それぞれの時間で摩擦角を計測する。(図1参照)

〈結果〉物体の放置時間に伴い、静止摩擦係数が一定値まで増加した。(図10参照)

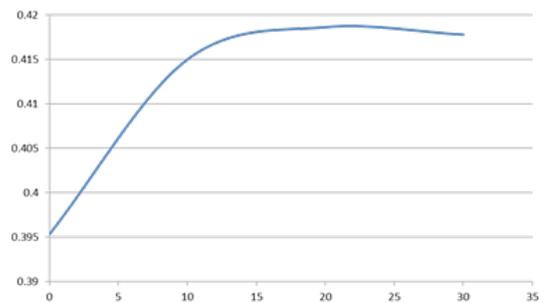


図10

〈考察〉結果から、(2)の式が成り立つと言える。

#### 4. 結論

〈モデルの考察〉以上の実験から、物体の表面のマイクロな凹凸が時間経過に伴い一定値に向かって、つぶれるように変形しているというモデルを考えた。(図11参照)

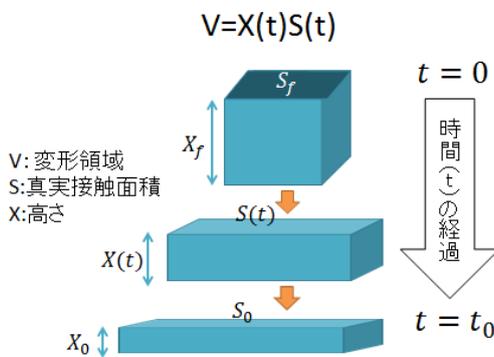


図11

〈 $\mu$ の定式化〉現象モデルから、  
 $V$ :変形領域  $X$ :変形領域の高さを定義し、 $V=X(t)S(t)$  と仮定した。

$$N=P(t)S(t)\dots① \quad V=X(t)S(t)\dots②$$

① / ② をして式を整理すると

$$P(t) = \frac{NX(t)}{V} \dots③$$

③より、 $X(t)$ を定式化すれば $\mu$ の定式化が可能であることがわかる。

$X(t)$ は、現象モデルから次の二つの性質を持つと考えた。

A. 十分時間が経過した( $t_0$ )ならば  $X_0$ に収束する

B. 毎秒一定の割合で減少していく

A、Bを考慮して

$$X(t) = X_0 + (X_f - X_0)a^t$$

$a$ : 単位時間あたりの非変形領域の割合

$X_f$ : 接触前の変形領域の高さ

そして、今までの式を整理して、

$$\mu = \frac{VA}{N\{X_0 + (X_f - X_0)a^t\}}$$

という式が導ける。

#### 〈理論と現象の比較〉

導いた式からグラフを作成すると、次のようになった。

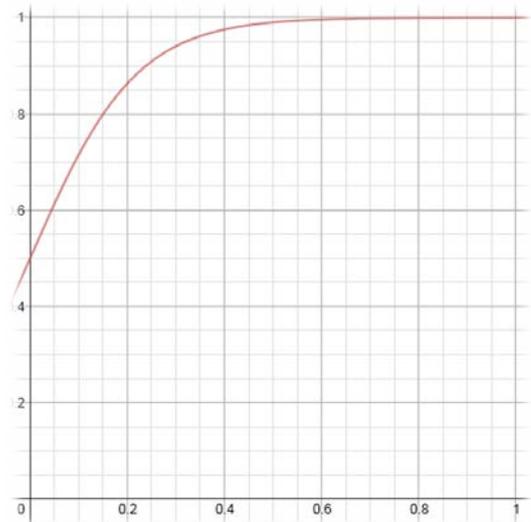


図12

図10と図12を比較すると、形がほぼ同じであることがわかる。このことから、私たちが考案した接触面で生じる変形現象のモデルと、それに基づいて導き出した静止摩擦係数を導く式が、実際の摩擦現象を適切に表していると考えられる。

#### 5. 参考文献

数研出版 「物理基礎」

マイクロトライボロジーとは

<http://www.tuat.ac.jp/~yando/lab/Lecture.html>

# 粉粒体の粒径がブラジルナッツ効果に与える影響についての基礎的研究

研究者 □元健太郎 武村知樹 竹之内彩音 坂本歩夢 山本康平

指導者 津田拓郎

## 1. 研究の概要

身の回りには、粉粒体と呼ばれる、固体と液体の間の振る舞いを示す物体が多く存在する。粉粒体特有の現象に、異なる大きさの粒を容器に入れて振動を与えると大きな粒が上昇し小さな粒は沈む、というものがありブラジルナッツ効果と呼ばれている（以下 BN 効果と表記）。本研究は1年時の iP からの継続研究であり、粒の粒径の差が大きいほど BN 効果が強く働くことを明らかにした。また、粉粒体内の大きな粒の割合によって BN 効果の発生要因が異なることがわかった。

## Research Outline

There are a lot of objects which called Particulate around us. They show behaviors between liquid and solid. When the particles of various sizes in a container are vibrated, the bigger ones rise and smaller ones sink. This is the phenomenon characteristic of particulate, which is called the Brazil Nuts Effect. We discovered that the bigger the ratio of the size of small particles to that of large ones is, the stronger the BN effect becomes. And the cause of Brazil Nuts Effect changes according to the portion of bigger particulates.

## 2. 動機

私たちは身の回りにある砂粒などの粉粒体の振る舞いは現在もまだ完全には解明されていないと知り、衝撃を受けた。中でも BN 効果に興味を持ち、BN 効果の発生する原因は何かを突き止めたいと考えた。

## 3. 研究の流れと目標

最終目標⇒BN 効果の発生のメカニズムの解明



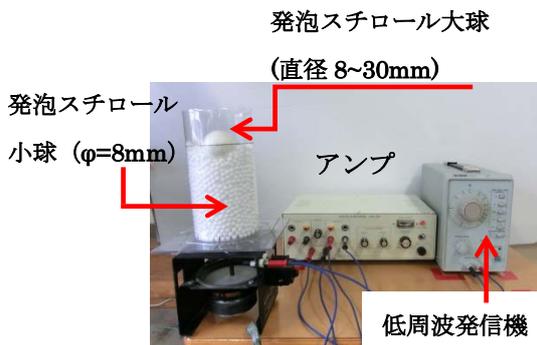
## 4. 研究内容

### A: BN 効果の再現

はじめに手近な道具で BN 効果を再現しようと試みた。容器内にある球で、直径の大きなほうを大球、小さなほうを小球と呼ぶこととする。

#### A-1 実験機材と準備

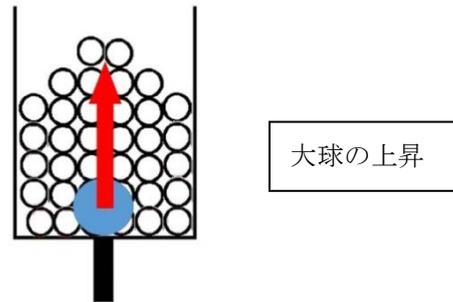
- ・発泡スチロール小球 直径 8 mm
  - ・発泡スチロール大球 直径 8 ~ 30 mm
  - ・スピーカー
  - ・アンプ
  - ・低周波発信機
  - ・ペットボトル容器
  - ・針金 ・クランプ
  - ・アクリル板
- 振動装置
- 振動容器



まず、この実験装置に多数の直径 8mm 球と一つの大球を入れて振動を与え、BN 効果を再現した。しかし数十秒で BN 効果はみられなくなった。観察してみると球同士がこすれることで静電気が発生し、発泡スチロール球が容器の内壁に引っ付いていた。そこで球同士の摩擦を減らして静電気を発生させないようにするため、ベビーパウダーを小さな球に塗付した。初めの数回の実験では静電気は発生せず BN 効果がみられたが、実験を繰り返すうちに再び BN 効果が発生しなくなった。これは小さな球に塗付したベビーパウダーが大きな球と容器の両方につき、容器の内壁と球との摩擦力が小さくなったためだと考えられる。次に、球と容器の摩擦力を残したままで静電気を起こさないようにするために、静電気防止スプレーを球に塗布して実験を行った。その結果、静電気は見られず、BN 効果の継続的な発生が確認された。

さらに、容器の中心部では球が上昇し側面で下降する、対流現象のようなものが見られた。そこで、この対流現象は、上昇する大球によって小球が押し上げられて発生するのか、それとも上昇する小球によって大球が押し上げられて発生するのかを確かめようと考えた。

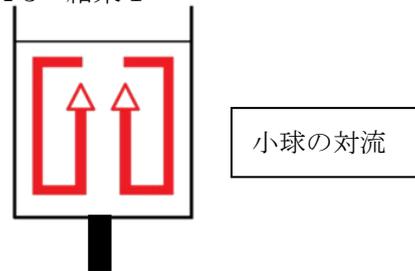
なお、BN 効果の再現を繰り返していくなかで振動数 30Hz の振動を与えると数分以内に球が上昇してくることが分かったため、実験における振動数を 30 Hz で固定とした。



#### A-2 実験 1

直径 8 mm 発泡スチロール球のみを容器に入れて振動を与え、BN 効果の様子を観察する。

#### A-3 結果 1

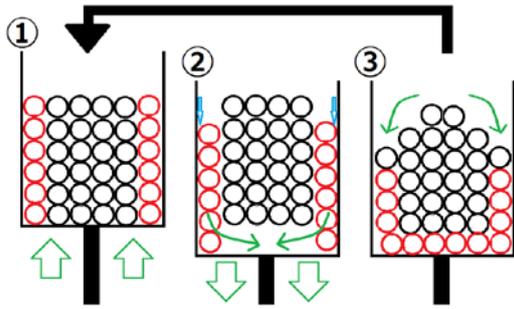


小球のみでも、容器の中心部の球が上昇し側面に沈み込んでいく対流現象が見られた。

#### A-4 考察 1

この小球の対流は、以下のメカニズムで発生すると考えられる。

- ① 振動によって容器が鉛直上向きに動き、小球全体がわずかに浮き上がる
- ② 容器の側面に触れている小球(図中の赤い球)が、容器の下降時に下向きの摩擦力を受けて下に落ち、容器の底にたまる。一方で、容器中心部の球(図中の黒い球)は何も力を受けないので中空に浮いたままである。(巻末にカラー図を掲載)



③ 再び振動を加えられて、①に戻る。  
 BN 効果において大球が上昇するのは、大球が小球の対流によって上に押し上げられるからだと考えられる。したがって、大球と小球の接点が多いほど大球は小球の対流の影響を受けやすくなり、BN 効果が強く働くと考え、次のような仮説を立てた。

### B:大球 1 個での BN 効果

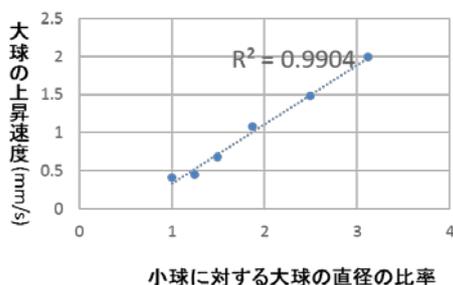
仮説 A

「小球に対する大球の直径の比と、BN 効果の強さには正の相関関係がある。ただし BN 効果の強さは大球の上昇速度とする」

実験 2

- ① 球を容器の底面中央に置き、その上から小球を容器の高さ 13cm の線まで入れる。
- ②大球が底面から 13cm 上昇するまでの時間を計測。
- ④ 小球の直径を 8mm で固定し、大球の直径を 40,30,25,20,15,12,10,8mm と変化させ、上昇時間をそれぞれの大球について 3 回ずつ測定して平均値をとる。
- ④ (大球の中心が上昇した距離) ÷ (上昇した時間) を計算しグラフを描く。

結果 2



グラフより、小球に対する大球の直径の比と、大球の上昇速度には正の相関関係があるといえる。

次に、大球が複数個ある場合においても、BN 効果の強さは大球と小球の直径の比によって変化するのではないかと考え、実験を行った。

ただし「BN 効果の強さ」は、「上昇する可能性があった大球の個数に対する、振動によって上昇した大球の個数の割合」とする。

### C:大球複数での BN 個効果

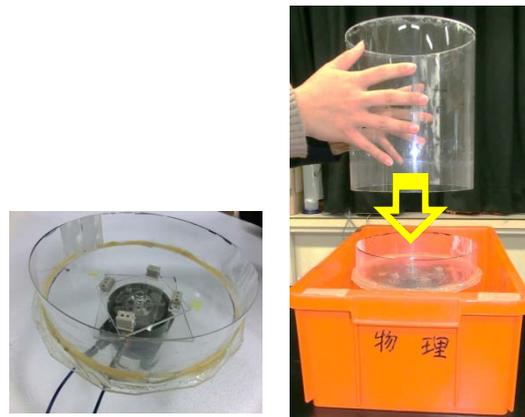
仮説 B

「大球が複数個の場合も、小球の直径に対する大球の直径の比と BN 効果の強さには正の相関関係がある」

実験 3 準備物

- ・高専からお借りした振動装置
- ・発泡スチロール小球 直径 8,5,2mm
- ・発泡スチロール大球 直径 25,20,15,10mm (球はそれぞれ直径 19cm 高さ 4cm の円柱容器と同じ体積だけ個数を数えて用意する)
- ・振動装置と直径 19cm 高さ 4cm のアクリル円柱容器をつなげたもの (左下写真)
- ・直径 19cm 高さ 15cm の円筒型アクリル板

右下写真のように組み合わせて使う



## 装置全体図



## ⑤容器より上に上がった大球を数える



## 実験3 方法

- ① 振動容器に球を大球小球の順番で入れる
- ② 振動容器に 30 秒間振動を与える
- ③ 円筒型アクリル板をそっと抜き取り、高さ 4cm 円柱容器からはみ出た球をすりきる
- ④ すりきって落ちた球に含まれる大球の個数を数える
- ⑤ 後述の BN 効果の強さの計算式に従って BN 効果の強さを計算し、小球と大球の直径の比との関係を調べる

以下は実験の様子を示している。

### ①大球を投入



### ②小球を投入



### ③30秒間振動させる ④上半分をすりきる

振動後の様子



## 計算式

## BN効果の強さ

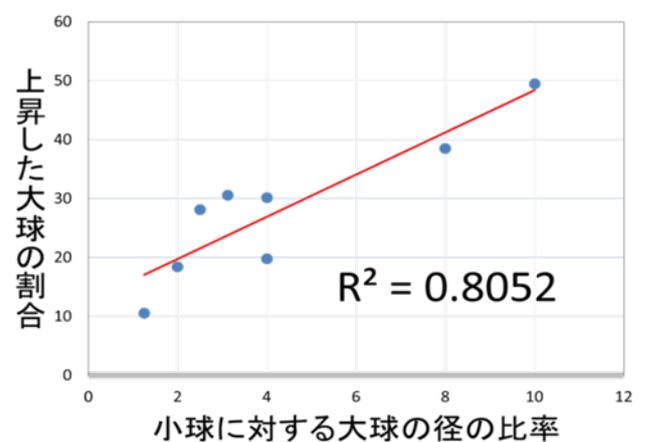
= (振動で上昇した大球の割合)

$$= \frac{\text{振動によって上昇した大球の個数}}{\text{振動前に容器の上面より下にあった大球の個数}} \times 100$$

※振動によって上昇した大球の個数

= (容器上面より上に上がった大球) - (振動前に容器上面より上にあった大球)

## 実験3 結果



散布図は上グラフのようになった。なお外れ値一つを除いている。

## 考察

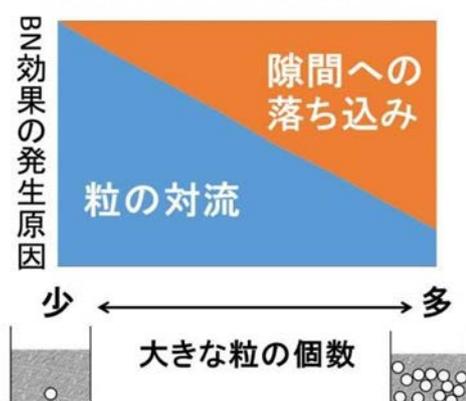
- ・ 小球に対する大球の直径の比と、BN 効果の強さには正の相関関係がみられる。
- ・ 振動の様子を観察で、小球が大球の間に生じる隙間に落ち込む現象が見られた

## D: 要因の考察

実験2 実験3の結果および観察から BN 効果の発生原因は大球の個数により変化すると考えられる。

大球の数が少ない場合の BN 効果の発生原因は小球の対流である。大球の個数が多い場合、小球の対流現象に、小球の大球間への隙間へ落ち込みが加わる。

この二種類の発生原因は、下図のように変化すると考えられる。



## 5. 結論

以上の研究から、粒の粒径の比が大きいほど BN 効果が強く働くこと、そして大球の数によって BN 効果の発生要因が変化することを明らかにした。

BN 効果の研究を進めることで、薬品等の工業製品の混合の効率化や、惑星調査等への応用が期待できる。

## 6. 今後の展望

今回明らかにした二つの発生要因について、それぞれ解析すると同時に、実際の BN 効果においてどちらが強く作用しているのかを調べたい。

## 7. 参考文献

渋滞学 (新潮選書) – 2006/9/21 西成 活裕

## 6. 謝辞

最後になりましたが、振動装置を貸してくださった津山高等専門学校 佐藤紳二先生、研究のご指導をくださった津田拓郎先生をはじめとする先生方ありがとうございました。

# 光の干渉実験を利用した微細物質の大きさの測定

研究者 後藤昴、池田遥香、友末千尋

指導者 津田拓郎

## 1. 研究の概要

本研究は目に見えないほどの微細物質を簡単に測定する方法はないのかと疑問に思った。例えば身近にある微細な物質として、DVDやCDディスクのピットがある。これらのディスクにあるピット間の距離を直接求めるのは大変困難である。本研究は、分光の仕組みを利用し、光を当てることで虹を発生させ、ディスクと虹の距離や虹の半径からピット間の大きさを求めることを目的とした。そして、今回の手法を用いて、ピット間程度の微細物質の大きさを測定することができないか、応用性について考察を行った。

## 2. 研究内容

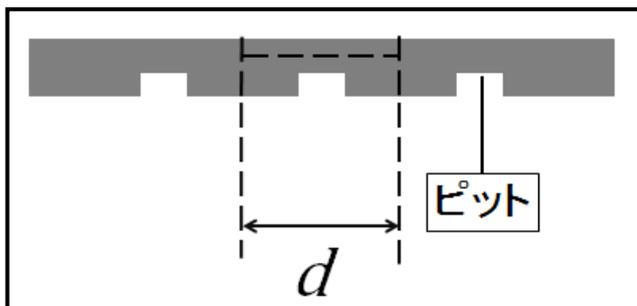


図1：ピット簡略図

ピットとは、CDやDVDにある、ごく微小なくぼみ部分のことだ。今回の実験では、ピットを挟んだ平らな部分の中心から中心までの距離をピット間の距離とし、以後ピット間の距離を  $d$  とおく。

### 《実験装置》

図のように光源、DVDまたはCDディスク、発泡スチロール板をスタンドで設置する。

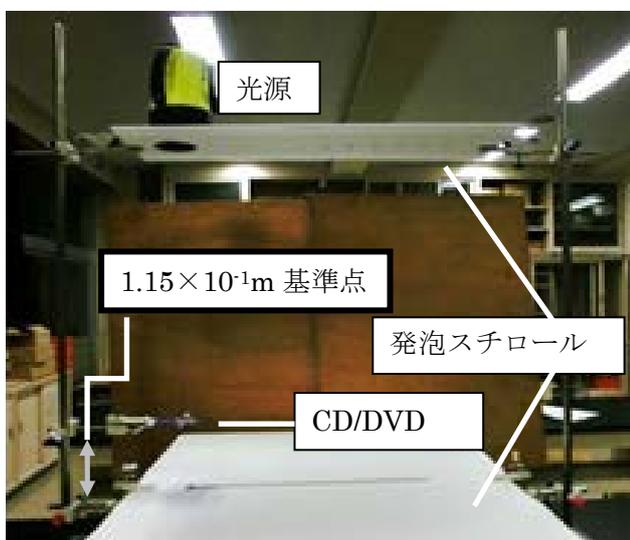


図2：実験装置（巻末にカラー写真を掲載）

### 《実験方法》

光をDVD・CDにあてて、上下の発泡スチロール板に虹を発生させる。DVD・CDから上下の発泡スチロールまでの距離と、発泡スチロールに映った虹の中心から赤色・青色の中心までの距離をそれぞれ計測する。計測毎に、DVDもしくはCDを基準点から5cmずつ光源の方へずらすこの作業を5回繰り返す。

### 《公式の導き方》

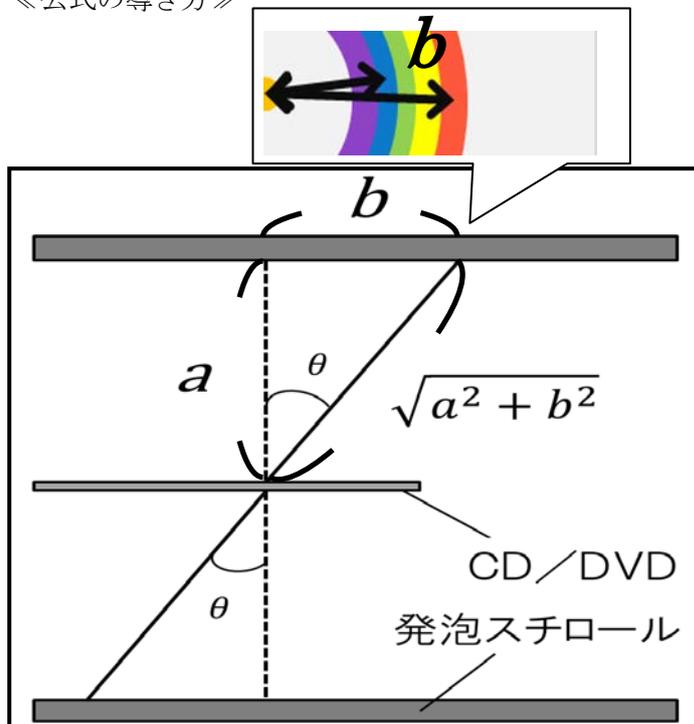


図3：文字の定義(巻末にカラー図を掲載)

上下の発泡スチロールからDVDまたはCDのデ

ディスクまでの距離を  $a$  [m]、虹の中心から、赤・青の中心までの距離を  $b$  [m] とする。また、ディスクから虹の赤・青を結ぶ直線と、 $a$  とのなす角を  $\theta$  とする。

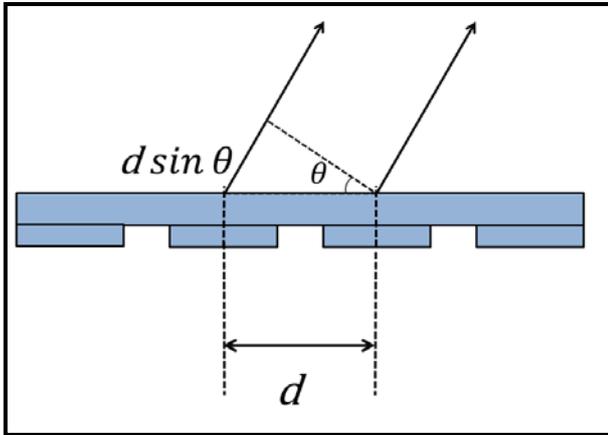


図 4：干渉条件の仕組み

今回測定する虹は隣り合うピット間で反射・屈折した方が干渉して、強め合う結果、干渉条件の式より、 $d \sin \theta = m\lambda$  ( $m = 0, 1, 2, 3 \dots$ ) という式を得ることができる。今回の実験は  $m=1$  の場合で行ったため、 $m$  は消去される。

この式を  $d$  についての式に変形していくと、

$$d = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{b} \times \lambda$$

という式になる。

CD・DVD～発泡スチロールの距離  $a$  [m]  
 虹の中心～色の距離  $b$  [m]  
 ピット間の大きさ  $d$  [m]  
 光の波長  $\lambda$  [m]

$$d = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{b} \times \lambda$$

図 5：公式

この公式に、測定した  $a$ 、 $b$  の値を代入する。また、ピット間の距離、波長については、図 7 の値を使用する。また、ピット間の距離の値を公式から導いた値と比較する。

| ピット間の大きさ |                           |
|----------|---------------------------|
| CD       | $1.60 \times 10^{-6}$ (m) |
| DVD      | $7.40 \times 10^{-7}$ (m) |
| 波長       |                           |
| 赤        | $6.1 \times 10^{-7}$ (m)  |
| 青        | $4.4 \times 10^{-7}$ (m)  |

図 6：文献値

その後、出た値をグラフ化する。

### 3. 結果・考察

縦軸：求めたピット間( $d$ )の値

横軸：5回ずつ測定した時の回数

#### ① CDの実験結果

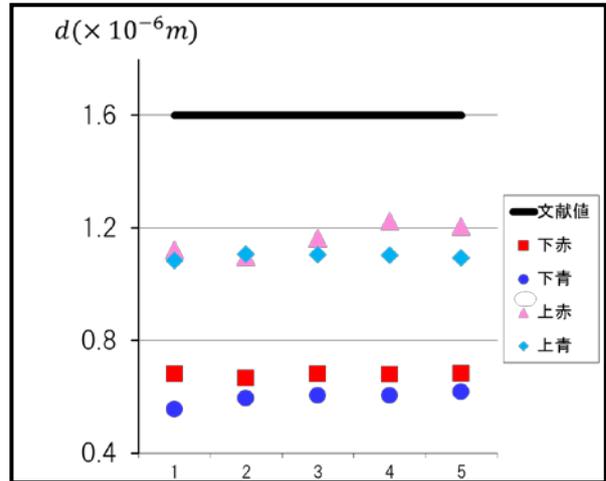


図 7：CDの実験値及び文献値

・文献値と比較すると、大きくずれている。

#### ② DVDの実験結果

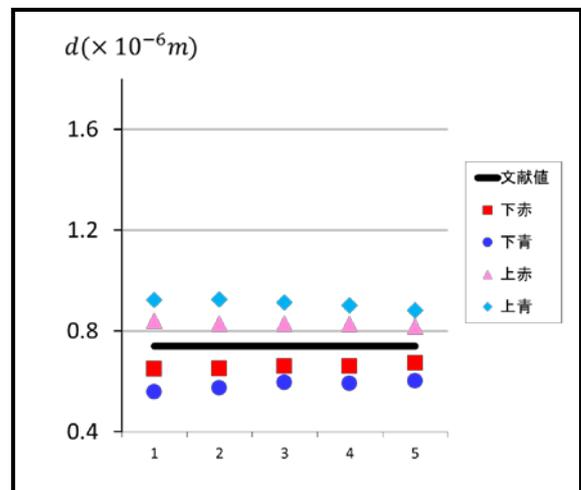


図 8：DVDの実験値及び文献値

・CDの結果と比べ文献値にかなり近い値が出た。

①、②の結果から、CDの精度よりDVDの誤差が小さいことが分かる。DVDのピットの間隔はCDのピットの間隔よりもより小さいので、より微細な間隔の方が精度が高くなると考えた。また、CD・DVDに共通して青の精度よりも赤の精度の

方が高いことが分かった。このことから、CD・DVD のピット間の距離であれば、赤の波長のほうが適していると考えた。

#### 4. 結論

今回の手法は、より微細である DVD のピット間の距離の測定に適していることが明らかになった。また、DVD ディスクのピット間の距離程の微細物質であれば、大きさの測定を行うことができるのではないかと期待できる。

#### 5. 今後の課題

こうした微細物質について、実際に大きさの測定を行うことで、本研究の手法の改良を行い、さらに精度を上げていきたいと考えている。

#### 6. 参考文献

理科年表

「青の波長の文献値・赤の波長の文献値」

# 炭素電池の内部抵抗の低減の研究

研究者 青田 隼祐, 一柳 累, 藤田 優真, 小椋 夏樹, 田淵 陽香  
指導者 福田 良輔 (中部大学客員教授)

## 1. 研究の概要

炭素電池は両極に炭, 電解質には塩化アンモニウムを用いた二次電池であり, 電極や活物質に重金属を含まないため環境への負担が小さく, 廃棄物問題の解決につながると考えられている。しかし, 内部抵抗が大きいため実用化が難しい。今回私たちは, 炭素棒を 2 本に増やすという方法で内部抵抗を 30% 低減することに成功した。

## Abstract

Carbon batteries are secondary cells that use carbon as electrodes and ammonium chloride as electrolyte. They are environmentally friendly because they are made of natural ingredients. They don't include heavy metals. However, it is not practical because its internal resistance is so large. Therefore, in the experiments we used two carbon sticks as electrodes. As a result the internal resistance was 30% less than when we used one carbon stick. That is because two carbon sticks have a larger contact surface with carbon than one does.

## 2. 序論

炭素電池は両極に炭, 電解質には塩化アンモニウム水溶液を用いた二次電池である。先行研究では, 炭素電池は電解液の電気分解によって発生した気体が炭の空孔にたまり充電されるという化学電池の原理と, 充電によって炭に電荷が蓄えられるコンデンサーの原理の 2 つが合わさったものであるとされ, また, 炭素電池の内部抵抗は 2~5  $\Omega$  という結果が得られた。内部抵抗とは, 電池そのものが示す電気抵抗で, この電値抵抗が大きくなることで充電や放電の効率が悪くなる。そこで私たちは, 炭素電池の実用化に向け, 内部抵抗を低減することを目的とした。

## 3. 研究内容

### 炭素電池の構造と作製方法

電極には鳥取大学工学系研究科の安東孝止教授から提供された炭を使用した。また, 次の構造を基本構造とする。

#### <構造>

- ・炭 10 g × 2
- ・炭素棒 1 本 × 2
- ・半透膜 (セロハン)
- ・15%塩化アンモニウム水溶液

#### <作成方法>

1. 炭に電動ドリルで直径 5 mm 程度の穴をあけ, 炭素棒を差し込んだ電極を 2 個製作した。(図 1)
2. 2 つの電極の間をセロハンで仕切り, 塩化アンモニウム水溶液中に置いた。(図 2)



図 1 電極

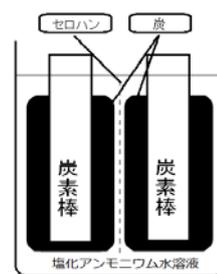
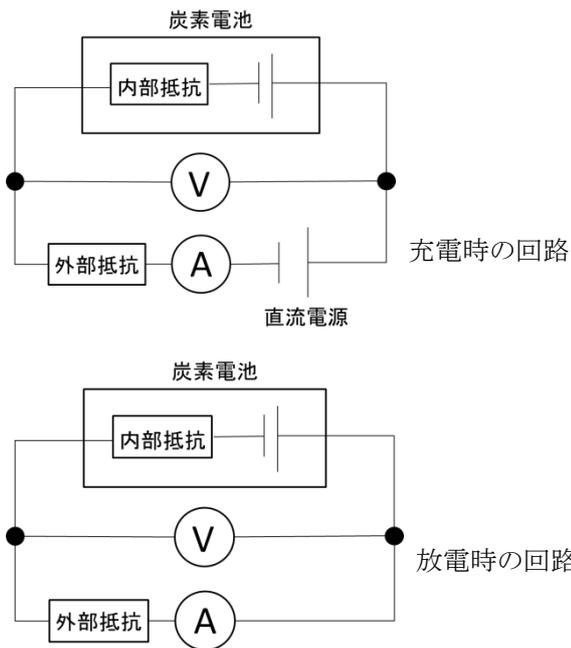


図 2 基本構造

<回路図>



3-1 基本構造の内部抵抗を求める

<実験>

- 炭素電池を充電時の回路につなぎ、定電圧で炭素電池を充電した。
- 充電した炭素電池を放電時の回路につなぎ、5分ごとに電流、電圧、解放電圧を測定した。
- 得られた数値を①に代入した。

内部抵抗の式  $r = R(E_0/E) - R \dots \textcircled{1}$

$r$ : 内部抵抗 (求める値)

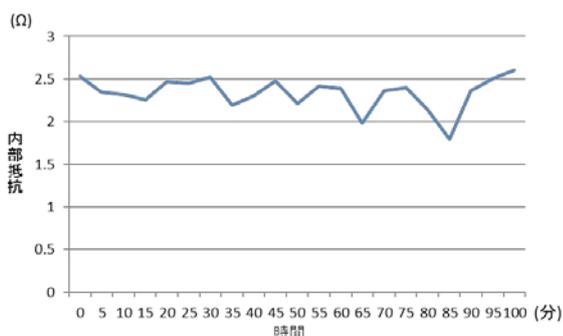
$R$ : 外部抵抗 (一定)

$E_0$ : 解放電圧 (実験値)

$E$ : 電圧 (実験値)

<結果>

図3に基本構造の内部抵抗を示す。



(図3) 基本構造の内部抵抗

測定した時間内の基本構造の内部抵抗は平均  $2.4 \Omega$  であった。

<考察>

炭素電池の内部抵抗が大きい理由には、炭と炭素棒との間の接触面積の大きさ、水溶液と炭との間の接触面積の大きさの2点が炭素電池の内部抵抗に関係あるのではないかと考えられた。理由は、炭は構造上壁面に隙間が多いためと、炭が大きいほど水溶液と接触する面積が大きくなりイオンをより多く得ることができるからである。

3-2 炭素棒を2本にする

<目的>

炭に差し込む炭素棒を増やすことで炭との接触面積が増すと考え、このことが内部抵抗に影響を与えるか調べた。

<実験>

- 炭に電動ドリルで穴をあけるときに穴を2個開けた。
- 炭素棒を2本差し込んだ電極を2個作製した。(図4)

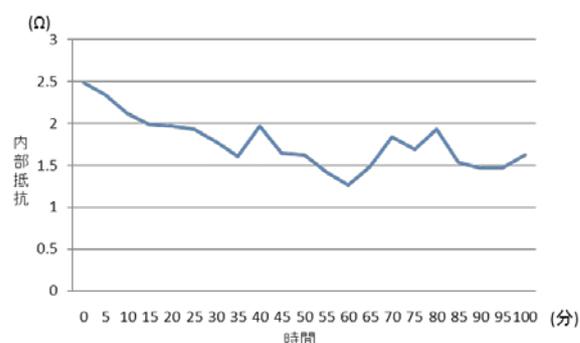


図4 炭素棒2本の電極

- 実験1と同様に内部抵抗を求めた。

<結果>

図5に炭素棒を2本にした時の内部抵抗を示す。



(図5) 炭素棒を2本にした時の内部抵抗

測定した時間内の炭素棒を 2 本にしたときの内部抵抗は平均  $1.6 \Omega$  になり、基本構造と比べると内部抵抗は約 30% 減少した。

#### <考察>

炭素棒を 2 本にすることで炭との接触面積が増え、電子が通りやすくなり内部抵抗が減少した。

このことから炭と炭素棒との間の接触面積は炭素電池の内部抵抗が大きい要因の 1 つであることがわかった。

### 3-3 炭の質量を 1/2 倍にする

#### <目的>

炭を大きくすることで水溶液との接触面積や電気容量が増え、内部抵抗が減るのではないかと考えた。そこで炭の質量と内部抵抗の関係を調べた。当初は炭の質量を 2 倍にして実験を行った。しかし、炭の質量を 2 倍にすると電気容量も 2 倍になり、充電時間が長くなりすぎて実験が困難だったため、質量を 1/2 倍にして実験を行った。つまり、実際に求めたい結果は、炭の質量を 1/2 倍にした実験で得られた結果の逆の傾向になるのではないかと考えられる。

#### <実験>

1. 炭の質量を 5 g にした。
2. 炭素棒を差し込んだ電極を 2 個製作した。

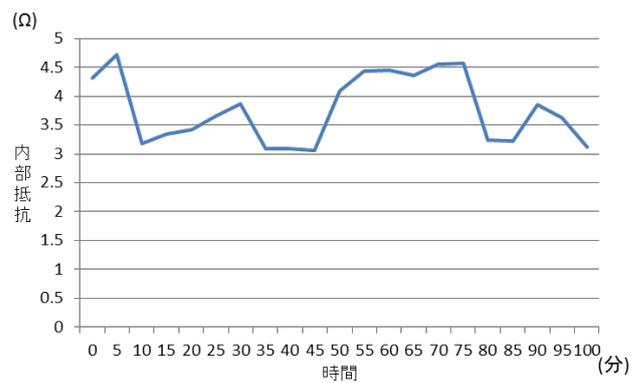


図 6 電極の比較

3. 実験 1 と同様に内部抵抗を求めた。

#### <結果>

図 7 に炭を 1/2 倍したときの内部抵抗を示した。



(図 7) 炭の質量を 1/2 倍にした時の内部抵抗

測定した時間内では炭の質量を 1/2 倍したときの内部抵抗は平均  $3.6 \Omega$  になり、基本構造と比べると内部抵抗は 50% 増加した。

#### <考察>

炭の質量を 1/2 倍にすることで電気容量が減り、少ない電流を流そうとするため内部抵抗が高くなった。炭の質量を 1/2 倍にすると内部抵抗が増加したため、炭素電池の内部抵抗を減らすためには炭の質量を大きくすることが有効ではないのかと考えることができる。

### 4. 結論

今回の実験で、内部抵抗を低減する条件として炭と炭素棒との間の接触面積を大きくする、炭の質量を大きくすればいいのではないかという 2 点がわかった。接触面積を大きくした実験では内部抵抗を  $1.6 \Omega$  低減することに成功した。しかし、市販の乾電池の内部抵抗は  $0.1 \Omega$  程度であり、炭素電池の内部抵抗は大きい。今現在の内部抵抗は大きく、実用化は困難であるので、更なる内部抵抗の低減を目指すために改良を加えなければならない。今後は、さらに内部抵抗を低減するために炭素棒の本数をさらに増やしての実験を行いたい。また、炭の質量を 1/2 倍したときの実験では、電気容量が小さすぎたため安定した電圧下で安定した測定値を得ることが困難であったので、炭の質量を 2 倍にし、実験を行い、内部抵抗が低減されるのかを

調べていく予定である。また一度炭を粉状にすることで炭の表面積を増やし炭と炭素棒との間の接触面積を大きくさせるなど新たな方法で内部抵抗を低減させることができないか調べていきたい。

## 5. 謝辞

今回ご指導を頂きました中部大学客員教授の福田 良輔先生，実験にご協力して下さった鳥取大学工学系研究科の安東 孝止教授，貴志 貫先生に深く感謝いたします。

## 6. 参考文献

- ・平成 26 年度 津山高校理数科課題研究報告書  
『炭素電池の研究』

# 備前焼の特性に関する研究

研究者 右近拓也 岡田拓歩 岡本さつき 都井里奈

指導者 貴志貴

## 1. 研究の概要

私たちは、よく耳にする備前焼に関する特性を検証するために、備前焼と一般的な陶器を用いて比較実験を行った。今回の実験からは、水温変化、水溶液中のイオン吸着について明らかな差異は認められなかったが、水の腐りにくさに何らかの影響を及ぼしている可能性があると感じた。

This paper aims to identify some specific properties of *Bizen Ware* (a type of pottery). It is said to keep water clean and cool, however, these properties haven't proven scientifically. Therefore the authors compared a Bizen Ware with a general pottery to prove the existence of its properties. This research suggested the possibility that BizenWare prevents bacteria from growing, albeit there was not much positive proof. The study concludes that Bizen Ware can keep water clean.

## 2. 序論

備前焼は備前地方で採れる粘土を原料とする、釉薬を用いずに作られる陶器である。高温で長時間焼くために、投げても割れないといわれるほどの強度を持つ。そして備前焼には普通の陶器には見られない様々な特性があると言われている。しかし、それらの特性は科学的な立証がされていない。そこで私たちは備前焼の特性を、釉薬を用いて作られた一般的な陶器と備前焼で比較実験を行うことで解明しようと試みた。

今回検証した特性は、備前焼は保冷性に優れる、備前焼に入れた水は腐りにくくなる、備前焼に入れた水はまるやかになる、というものである。「腐りにくくなる」ことは菌が繁殖しにくいということ、「水がまるやかになる」ことは水の硬度が変化することと予想し、実験を行った。

## 3. 研究内容

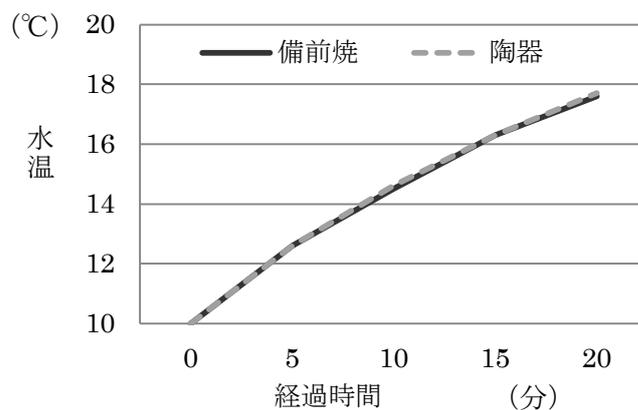
実験① 保冷性に優れるという特性の有無を検証する。

<方法>

- 備前焼と陶器に0℃の水を50mLずつ入れた。
- 水温が10℃になった時点からそれぞれ5分おきに温度を計測した。なお、この時の室温は24℃だった。

<結果>

結果はグラフ1の通りで、備前焼と陶器の間で顕著な差は見られなかった。



グラフ1 水温の上昇速度

実験② 水の腐りにくさを菌の繁殖速度から検証する。

<方法>

1. 備前焼と陶器に入れるカビの量を等しくするために、リンゴジュースを常温で放置し、カビを生やした。
2. カビの生えたリンゴジュースをろ過して攪拌したのち、両方の容器に同量入れた。この時、リンゴジュースを含めたすべての実験器具は、滅菌処理をした。

<結果>

実験開始 9 日後に、陶器に入れたリンゴジュースに写真 1 のようにカビが確認された。このとき備前焼のほうにはカビが見られなかったため陶器の方がより速くカビが生えたと言える。しかし、明確な基準を決めずに目測で判断したため、この結果には誤差が生じた可能性がある。



写真 1

実験③ 水の硬度を水中の特定のイオン濃度変化を検証

<方法>

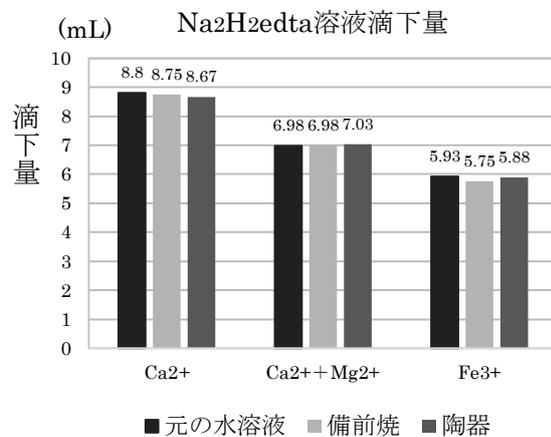
1. 適当な濃度の塩化カルシウム水溶液をつくり、 $\text{Na}_2\text{H}_2\text{edta}$ 溶液(0.010 mol/L)を用いてキレート滴定を行った。緩衝液として、1 mol/LのKOH水溶液を 2 mL加えpHを約 13 とした。指示薬には NN指示薬 (2-ヒドロキシ-1-(2-ヒドロキシ-4-スルホ-1-ナフチルアゾ)-3-ナフチル酸の硫酸カリウム粉末希釈(1:100)) を用いた。
2. 備前焼と陶器に 1 の塩化カルシウム水溶液を同体積入れ、一定時間置いた後で 1 と同様にキレ

ート滴定を行った。

3. その滴定で得られた値と、1 の値を比較した。
4. 1~3 と同様の操作を、塩化マグネシウム水溶液と塩化カルシウム水溶液の混合水溶液について、BT 指示薬 (エリオクロムブラック T) を用いて pH10 程度で行った (全硬度)。また、塩化鉄(III)水溶液でも同様の操作を行い、鉄(III)イオンの濃度変化を調べた。このとき、2%サリチル酸エタノール溶液を指示薬として pH 2~3 で行った。

<結果>

結果はグラフ 2 の通りになった。今回検証したイオンについては $\text{Na}_2\text{H}_2\text{edta}$ 溶液の滴下量に明確な違いが見られたものはなかった。



グラフ 2 イオン濃度の測定

#### 4. まとめ

実験①、③の結果より保冷性、金属イオン濃度の変化においては顕著な差は見られなかった。実験②ではカビの発生に違いが生じ、菌の繁殖速度については備前焼の方が繁殖しにくい可能性が示された。今後の予定として、差が生じたカビの繁殖の実験を、寒天培地を用いる方法で再試行する。実験③の調べるイオンとしてその他のイオンについて引き続き検証する。

# ムクロジサポニンの抽出と 洗浄効果についての研究

研究者 芦田 真奈, 都守 俊太, 仲矢 和生, 美若 正育, 竹元 結麻  
指導者 貴志 貫

## 1. 研究の概要

私たちは、津山周辺でよく採れるムクロジが天然の石鹸として使われていることを知り、興味を持った。そこで、私たちはムクロジから洗浄効果のある成分を抽出し、実際にどのような洗浄効果があるのかを検証しようと考えた。

実験の結果、ムクロジには界面活性効果があり、油汚れを落とす効果があることと、酸による漂白効果もあることが分かった。さらに、加熱することにより、界面活性効果は大きくなる一方で、有機酸の物質量は減少することが分かった。

今後の展望としては、最も効率的なムクロジサポニンの抽出法の検討と界面活性効果による洗浄力の比較の実験を重ねていきたいと考えている。

## Abstract

We heard that soapberry has been used as soap since ancient times. It includes saponin, which shows the surfactant effect. We tried to find the efficient way how to extract soapberry saponin and verified its detergency. First of all, we extracted the components and made aqueous solution. It showed weak acid. Second, we measured the surface tension of soapberry solution. All surface tension of it became weaker than that of water. Third, we compared the detergency of the soapberry solution with that of a market-bought soap by using various dirt. Finally, we compared the way of extraction to extract detergent components efficiently. As conclusion, soapberry has a surfactant effect and a bleaching effect of acid. And soapberry solution extracted without heating has larger bleaching effect of acid than that with heating. And the solution extracted with heating has larger surfactant effect than that without heating. We're going to find the most efficient way of extraction of soapberry and verify the detergency due to surfactant effect accurately.

## 2. 研究内容

### 実験1 ムクロジサポニンの抽出

#### <目的>

ムクロジから洗浄力のある物質を抽出する。

#### <方法>

1. 細かく刻んだムクロジの果皮に水を加えた。
2. 溶液を加熱して沸騰させた後、さらに5分間加熱した。
3. 溶液を吸引ろ過し、ろ液のpHを測定した。

#### <結果>

ムクロジ溶液のpHは4~5の弱酸性となった。また、ムクロジ特有のにおいが薄くなり、手につけてこすると泡が立った。

### 実験2 ムクロジサポニンの性質の検証

#### <目的>

界面活性剤には水の表面張力を小さくするという性質があることを利用して、ムクロジ溶液の表

面張力の測定を行い、界面活性効果があることの確認をする。

<方法>

1. ムクロジ溶液 4 種類、水、薄めた合成洗剤を用意した。このときムクロジ溶液は、ムクロジの果皮の質量を 5 g で固定し、水の量を 25 mL、50 mL、100 mL、150 mL と変数にして作成した。
2. ジョリーのばね秤を参考にして装置を作成し、これらの溶液の表面張力を測定した。  
方法としては、図 1 の様に iPad を 2 つ用いてばねの伸びと膜の高さをそれぞれ撮影し、測定した。



図 1 表面張力測定の実験装置

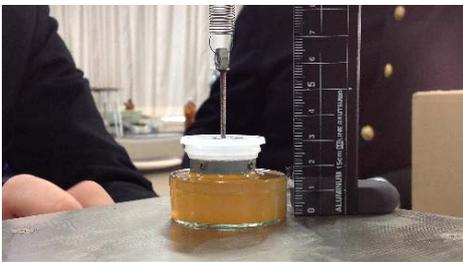


図 2 膜の高さの測定

3. その結果を以下の計算式に当てはめて表面張力を求めた。

$$\gamma = \frac{f}{\pi(D_1 + D_2)} - \frac{1}{2}\rho gh d$$

$\gamma$  … 表面張力 [m・N/m]

$f$  … ばねの力 [N]

$$f = \frac{mgx}{x_0}$$

$m$  … おもりの質量 0.00555 [kg]

$x$  … ばねの伸び [m]

$x_0$  … おもりをつるした時のばねの伸び

0.063 [m]

$D_1$  … リングの外形 0.0258 [m]

$D_2$  … リングの内径 0.0201 [m]

$d$  … リングの厚さ 0.00285 [m]

$\rho$  … 水、水溶液の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  … 重力加速度 9.79737 [m/s<sup>2</sup>]

$h$  … 膜の高さ [m]

<結果>

ムクロジ溶液 4 種類全てが水よりも表面張力が小さくなった (図 3)。

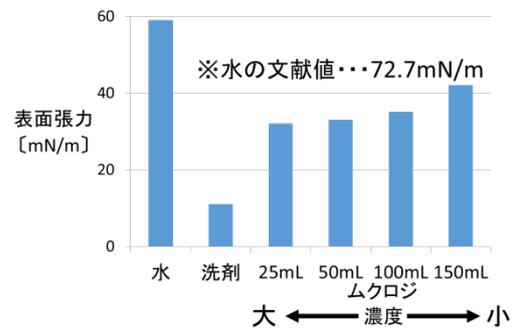


図 3 水と各水溶液の表面張力

<考察>

ムクロジの水溶液には界面活性効果があった。グラフから分かるように、ムクロジ溶液の濃度が大きいほど表面張力も小さくなる傾向が見られた。よって、濃度を大きくするほどムクロジ溶液の界面活性効果が大きくなることが分かった。

### 実験 3 洗浄力の比較①

<目的>

界面活性効果が実際にあるのかを確認するために、油汚れを落とすのかどうかを検証する。

<方法>

油絵の具を測定したい溶液の入った試験管に入れて、30 秒間振り混ぜて放置した。(測定した溶液：ムクロジ溶液、水、薄めた合成洗剤)

<結果>

図 4 の様に、ムクロジ溶液と薄めた合成洗剤では油絵の具が乳化した。

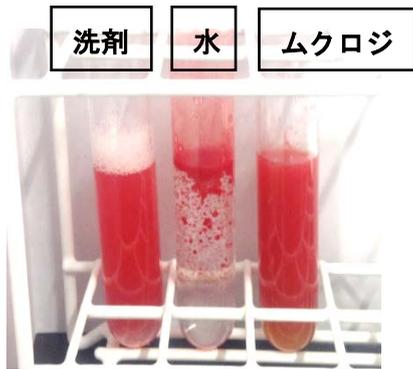


図4 ムクロジ溶液が油絵の具を乳化させた様子

<考察>

ムクロジの水溶液には、実際に界面活性効果による油汚れを落とす効果があることが確認された。

実験4 洗浄力の比較②

<目的>

ムクロジが油汚れ以外の汚れを落とすのか調べる。

<方法>

ろ紙にアクリル絵の具を水に溶いたものをつけて、測定したい溶液につけた。(測定した溶液:水、薄めた合成洗剤、ムクロジ溶液)そして、それらを2時間放置した。

<結果>

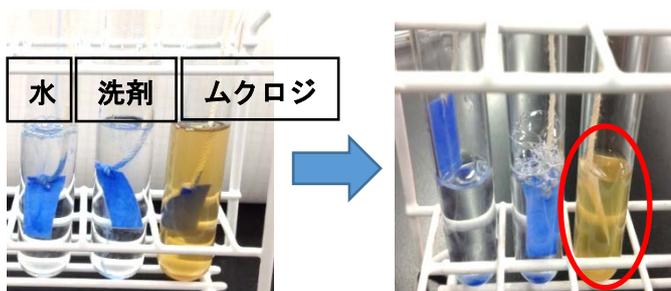


図5 ムクロジ溶液の漂白効果

様々な色のアクリル絵の具で試したところ、ムクロジ溶液が青色絵の具の色自体を消した(図5)。ほかの溶液、青色以外の色では変化が起きなかった。

<考察>

この比較を行った後に青色絵の具をムクロジ溶液よりもpHの小さい塩酸と食酢につけてみたところ脱色し、また、青色絵の具の成分(ウルトラマ

リン)は酸に弱いことから、ムクロジが青色を消したのは酸が原因だと考えられた。したがって、ムクロジには油汚れを落とす効果に加え、酸による漂白効果もあることが分かった。

実験5 抽出法による性質変化

<目的>

より効率的なサポニンの抽出法を調べる。

(評価ポイント)

- ・水の温度による抽出速度
- ・水の温度による成分の性質変化の有無

(定義)

細かく刻んだムクロジの果皮 5 g を常温の水 100 mL につけて約1日放置し、吸引ろ過によってろ液を得た。これを以下「水出し」と呼ぶ。また、実験1の要領で作成した同じ濃度(ムクロジの果皮 5 g, 水 100 mL)の溶液を以下「煮出し」と呼ぶ。

<方法>

(I) 水の温度による抽出速度についての実験

1. 水出し、煮出しそれぞれの溶液の表面張力を測定した。

(II) 水の温度による成分の性質変化の有無についての実験

1. 水出しの溶液の表面張力の測定と中和滴定を行った。
2. 1で用いた溶液を加熱して沸騰させた後、さらに5分間加熱したものを同様に表面張力の測定と中和滴定を行った。

<結果>

抽出方法の違いにおける表面張力の差を図6に示す。煮出した溶液の方が水出しよりも表面張力が小さくなった。加熱による溶液の表面張力の変化を図7に示す。加熱後の方が加熱前よりも表面張力が小さくなった。

加熱による有機酸の物質量的変化を図8に示す。加熱後の方が加熱前よりも約8.5%有機酸の物質量が減少した。

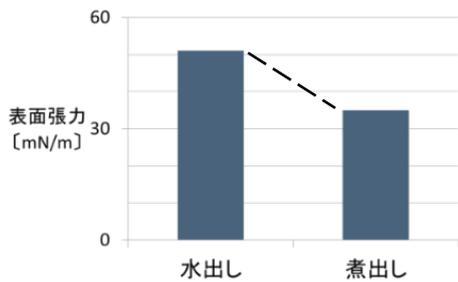


図6 抽出方法の違いにおけるムクロジ溶液の表面張力の差

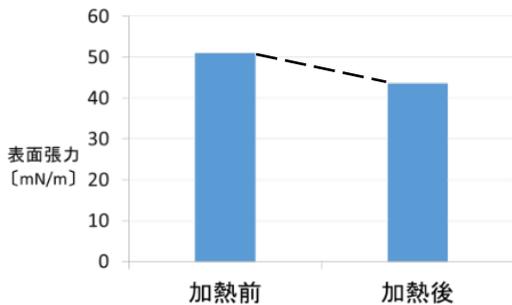


図7 加熱によるムクロジ溶液の表面張力の変化

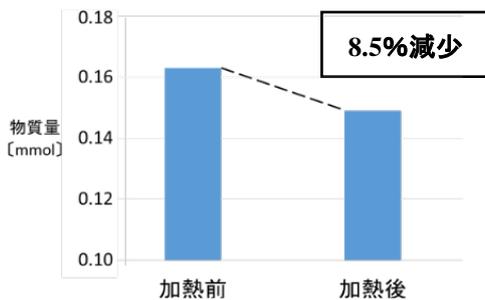


図8 加熱によるムクロジ溶液に含まれる有機酸の物質量の変化

#### <考察>

ムクロジに含まれる成分には個体差があるため、同一の実で作成した溶液を用いて測定した。

界面活性効果は加熱することにより大きくなる一方で、有機酸の物質量は加熱することにより減少することが分かった。有機酸の物質量が減少した原因は揮発性成分に若干量の有機酸を含んでいるからではないかと考えた。

### 3. 結論

ムクロジには界面活性効果と酸による漂白効果があることが分かった。また、水出しと煮出しし

たムクロジ溶液の比較として、水出しするとより酸性成分による漂白効果が大きくなり、煮出しするとより界面活性効果が大きくなる。今後の展望として、最も効率的な抽出法の検討と界面活性効果による洗浄力の比較の実験を重ねていきたいと考えている。

### 4. 謝辞

村上安弘先生を始めとする協力してくださった先生方にお礼申し上げます。

### 5. 参考文献

ジョリーのばね秤による表面張力の測定

<http://www.osakakyoiku.ac.jp/~masako/exp/joly/jyoli.htm>

# アルカロイドに対する粘菌の走性について

研究者 角南 柚香里, 多胡 果純, 高井 祐哉

指導者 國定 義憲

## 1. 研究の概要

先行研究より粘菌という生物を知り、興味がわいた。粘菌はキニーネを忌避することが分かっている。キニーネはヒトにとって苦味を感じる物質である。私たちは、味覚器を持たない粘菌でもヒトと同様に苦味を忌避するのか疑問に思った。そこで、ヒトが苦味を感じるものを粘菌に与えた。その結果、粘菌はアルカロイドを忌避するのではないか、という仮説が浮上したので、様々なアルカロイドを与えたところ、忌避した。よって、粘菌は苦味を持つアルカロイドに忌避反応を示すと結論付けた。

We were interested in slime molds. It is known that slime molds avoid quinine. Quinine tastes bitter. Then, we wondered whether slime molds, which do not have sensory organs for taste, avoid bitterness as human often do. We gave a sample of slime mold some bitter foods. As a result of this experiment, we were able to hypothesize that slime molds may avoid alkaloids. We tasted this hypothesis and alkaloids to another sample of slime mold moved away from the alkaloids. For this, concluded that slime molds avoid alkaloids which are bitter.

## 2. 序論

そこで粘菌について調べてみると、特定の物質に忌避反応を示すことを知った。本研究は、粘菌が何に対して忌避反応を示すのかを解明することを目的とした。粘菌には大きく分けて、真正粘菌と細胞性粘菌が存在するが、本研究では、真正粘菌であるモジホコリを用いた。

## 3. 研究内容

### <実験方法>

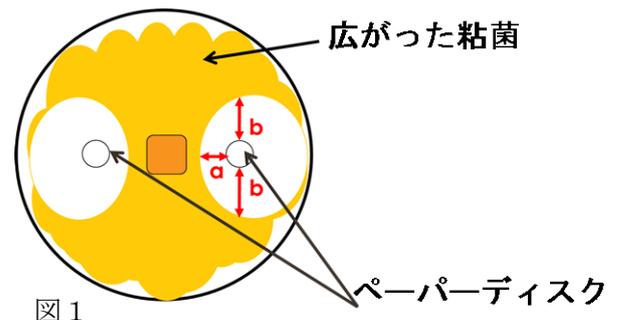
- 1, シャーレの寒天培地の中央に粘菌を置き、その近くに試薬を含ませたペーパーディスクを設置する。
- 2, 二日間 18℃ のインキュベーターの中で培養後、写真を撮って反応を記録する。
- 3, 粘菌が塩酸キニーネ 0.1mol/L を忌避した度合を基準に、各物質に対する粘菌の忌避性を測定する。
- 4, 忌避性については、ペーパーディスクからの距離を測定して比較を行う。

### <判定方法>

各試薬に対し、粘菌が忌避を示した距離を a と b とに分けて測定しそれぞれでのその値を平均化し、各試薬での忌避度とした。(図 1 参照)

参考文献より、粘菌がキニーネを忌避することが分かっていたため、キニーネでの忌避度を基準とし、各試薬での忌避度がこれを超えたものに忌避性がある、と判断した。

- a シャーレ中心から広がった粘菌とペーパーディスクの距離
- b シャーレ中心とペーパーディスク中心を結ぶ線に直交する直線上でのペーパーディスクの左右の距離の平均値



<目的 1>

粘菌がシャーレ内で溶媒となる物質を忌避せず広がるか確認する。

与えた物質

精製水 エタノール 98%

<結果 1>

精製水、エタノール共に粘菌は忌避を見せず、シャーレ内に広がる事が確認できた。

<予備実験 2>

<目的 2>

キニーネでの粘菌の忌避度を調べる。

与えた物質

塩酸キニーネ水溶液

<結果>

|   | 0.1mol/L | 0.15mol/L | 0.2mol/L |
|---|----------|-----------|----------|
| a | 0.73     | 3.35      | 1.55     |
| b | 1.78     | 18.3      | 3.75     |

単位：mm

他の薬品と濃度を統一するため、この後の実験では塩酸キニーネ水溶液 0.1mol/L での値を基準とする忌避度として用いた。

<実験 1>

<目的 1>

ヒトが普段口にする食品に対する粘菌の忌避性の有無を調べる。

与えた物質

キュウリ ゴーヤー アロエ ピーマン コーヒー 茶葉

キュウリ、ゴーヤー、アロエ、ピーマンはすりつぶした後、ガーゼを用いてしぼり、そのしぼった液を使用した。

コーヒー、茶葉は飽和するまで水に溶かした飽和溶液を使用した。

<仮説 1>

粘菌は苦味を持つ食品に対し忌避性を持つ。

<結果 1>

|     |      |      |      |
|-----|------|------|------|
| 食品  | キュウリ | ゴーヤー | アロエ  |
| 忌避性 | なし   | なし   | なし   |
| 食品  | ピーマン | コーヒー | 茶葉   |
| 忌避性 | なし   | あり   | 測定不能 |

茶葉ではシャーレ内にカビが繁殖してしまい、測定ができなかった。

キュウリ、ゴーヤー、アロエ、ピーマンでは忌避性を示さなかった。

コーヒーに忌避性を示した。

コーヒー：a 4.50 /b 6.36 (mm)

<考察>

コーヒーの苦味成分であるカフェインはアルカロイドの一種であり、また塩酸キニーネもアルカロイドの一種であることから、粘菌はアルカロイドを忌避しているのではないかと考えた。

<実験 2>

<目的 2>

様々なアルカロイドでの忌避度を求め、粘菌がアルカロイドに対し忌避性を持つか確認する。

与えた物質

カフェイン水和物水溶液(0.1mol/L)

カプサイシン溶液(0.1mol/L)

ピペリン溶液(0.1mol/L)

水溶性のものは水に溶かして与え、水に溶けないものはアルコールに溶かしてから希釈して与えた。

<仮説 2>

粘菌はアルカロイドに対して忌避性を持つ。

<結果 2> (図 2 参照)

| 試薬  | カフェイン | カプサイシン | ピペリン |
|-----|-------|--------|------|
| A   | 1.81  | 0.00   | 0.00 |
| B   | 6.34  | 0.44   | 4.43 |
| 忌避性 | あり    | なし     | 判断不能 |

単位：mm

カフェインに対し忌避性を示した。

ピペリンでは b の忌避度はキニーネを超えているが、a の忌避度が超えていなかったため判断ができなかった。



カフェイン カプサイシン ピペリン

図2(巻末にカラー写真掲載)

#### <考察2>

粘菌がカフェインに対し忌避性を持っていたことから、カフェインは苦味を持つアルカロイドであり、キニーネもまた苦味を持つアルカロイドであるため、粘菌は苦味を持つアルカロイドに対し忌避性を持つと考えた。

#### 4. 結論

上記の実験より、苦味を持つアルカロイドに対し粘菌は忌避性を持つことがわかった。

また、文献を調べるとカフェインはアデノシン受容体に作用している。カフェインの分子構造がアデノシンによく似ていること、キニーネの分子は比較的小さいこと、さらに、カプサイシンやピペリンは温度受容体に反応することがわかった。粘菌がカフェインを忌避したことから、アデノシン受容体を持っていることが考えられる。キニーネはその分子の小ささから、カフェインは分子構造がアデノシンに似ていることから、アデノシン受容体の活性部位に結合するのではないかと考えられる。実験の結果とこれらのことから、粘菌は辛味よりも苦味を感知し生きていると考えられる。さらに多くの毒物が苦いことから、カフェインやキニーネなどの苦味を毒物と考えると、粘菌が苦みのあるアルカロイドを忌避したとも考えられる。今後の展望として、粘菌が苦味に忌避性をみせることから、粘菌は苦みのあるアルカロイドを感知する苦味センサーとしての利用も可能であると考えられる。

#### 謝辞

この研究をするにあたり、ご指導頂いた美作大学の栗脇先生、桑守先生、両先生には感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 中垣俊之：粘菌～その驚くべき知性～  
文春新書
- 2) 中垣俊之：粘菌～偉大なる単細胞が人類を救う～  
文春新書

# 真性粘菌モジホコリカビの光走性に関する研究

研究者 藤本 雅子, 池田 夢乃, 平 しまり  
指導者 宮脇 良太

## 1. 研究の概要

粘菌には2箇所の餌を最短距離で結ぶ性質があり、さらに粘菌は光に対して負の走性を示す性質がある。しかしながら、どのような波長の光に対して負の走性を示すのかは明らかになっていない。そこで、粘菌にさまざまな波長の光を照射し、粘菌の負の走性を確認した。その結果、青色光に対して最も強い走性が確認され、次に緑色光、最も弱い走性を示した光は赤色光であった。粘菌がこれらの光に負の走性を示すのは、細胞内で発生する活性酸素と深い関係があることが推測される。

### Abstract

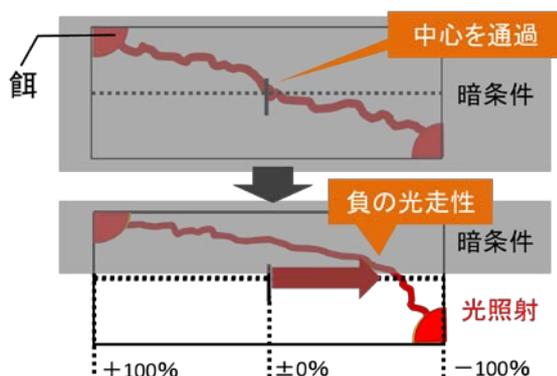
Physarum have nature that connects the two points of the feed at the shortest distance and nature that indicates negative phototaxis. However, the light-length that physarum most hates is unknown. Therefore, we irradiated lights of various light-length for physarum and confirmed negative phototaxis for each lights. As a result, each light-length gave the influence as negative phototaxis for physarum in order to blue, green, and red. We guessed that the strength of negative physarum and the quantity of outbreak of reactive oxygen is associated with each other.

## 2. 研究方法

### ① 負の光走性の確認

長方形の培地の対角線上に餌を置くと、中心点を通過して最短経路を形成すると考えられる。図1のように下半分にのみ光を照射すると、粘菌は光を避けて、最短経路を形成すると仮説をたて、中心より通過点が移動すると負の光走性を示したと判断した。

図1 光走性の確認方法



### ② 実験1 白色光における負の光走性の確認

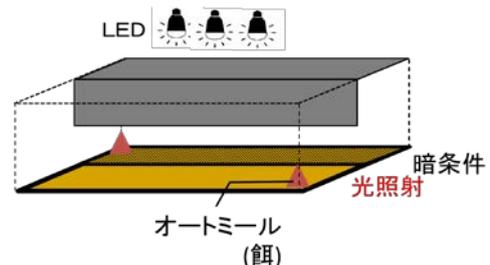
<目的> 粘菌の白色光に対する負の走性を確認する。

<仮説> 光に対して負の走性を示すと、中心と交点は右にずれる。

<方法> 図2のような装置で実験を行う。

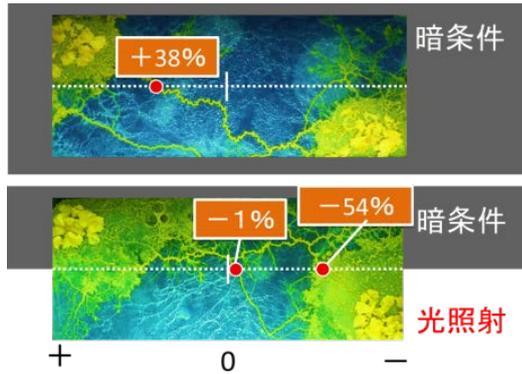
1. 四角形の培地に粘菌を培養し、対角線上に2箇所餌を置く。
2. 培地反面に白色光を24時間照射する。

図2 実験1 装置(巻末にカラー写真掲載)



<結果> 図3のような反応を示した。

図3 暗条件（上）、半面に光照射（下）  
（巻末にカラー写真掲載）



粘菌の白色光に対する負の走性が確認された。

### ③ 実験2 5種類の波長の光における忌避性の確認

<目的> 5種類の波長の光から忌避性を示す波長を絞り込む。

<仮説> 特に強い忌避性を示す波長の光の照射領域から粘菌が忌避する。

<方法> 粘菌が繁茂した培地に、赤外線、赤色光、緑色光、青色光、紫外線の5種類の波長の光を照射し、(図4参照) 実験前と24時間後の様子を比較する。

<結果> 図4のような反応を示した。

図4 実験2比較（巻末にカラー写真掲載）



紫外線や青色のような短波長の光照射領域に特に強い忌避性を示した。

### ④ 実験3 可視光領域での忌避度の測定

<目的> 可視光領域の光に対する忌避度を比較する。

<仮説> 粘菌が忌避を示す波長の光が照射された領域の増殖率は低くなる。

<方法> 使用するLEDの波長を可視光領域に限定し、実験2と同様の実験を行う。また、忌避性の強さを比較するため、

実験結果を忌避度として数値化する。  
(増殖率の逆数を忌避度とする)

1. 粘菌が繁茂した培地に、青色光、緑色光、赤色光を24時間照射する。
2. 実験前後の培地を厚紙に印刷して、粘菌領域を切り出して重さを計測し、実験前後での増殖率を求め、この値から忌避度を確認する。

<結果> 粘菌は、図5のような反応を示した。写真を印刷した厚紙の粘菌領域を切り出すと図6のようになった。粘菌の増殖率から求めた忌避度は、青が最も高く、次に緑、赤に対する忌避度が最も低かった。(図7)

図5 実験3 結果（巻末にカラー写真掲載）

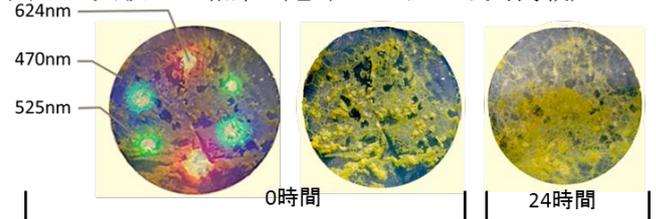


図6 切り出した粘菌領域

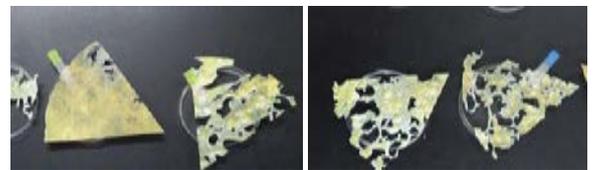
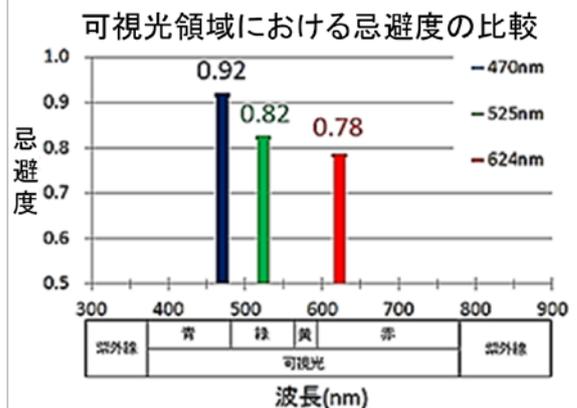


図7 忌避度の比較

| 領域名   | 粘菌領域(mg) |       | 増殖量 (mg) | 増殖率 (倍) | 忌避度         |
|-------|----------|-------|----------|---------|-------------|
|       | 0時間      | 24時間後 |          |         |             |
| 赤色光領域 | 3086     | 3949  | 863      | 1.28    | <b>0.78</b> |
| 緑色光領域 | 3503     | 4269  | 766      | 1.22    | <b>0.82</b> |
| 青色光領域 | 4383     | 4790  | 407      | 1.09    | <b>0.92</b> |



### ⑤ 実験4 可視光領域での負の光走性の確認

<目的> 実験3で忌避度を確認した波長の光を用いて、負の光走性を詳細に確認する。

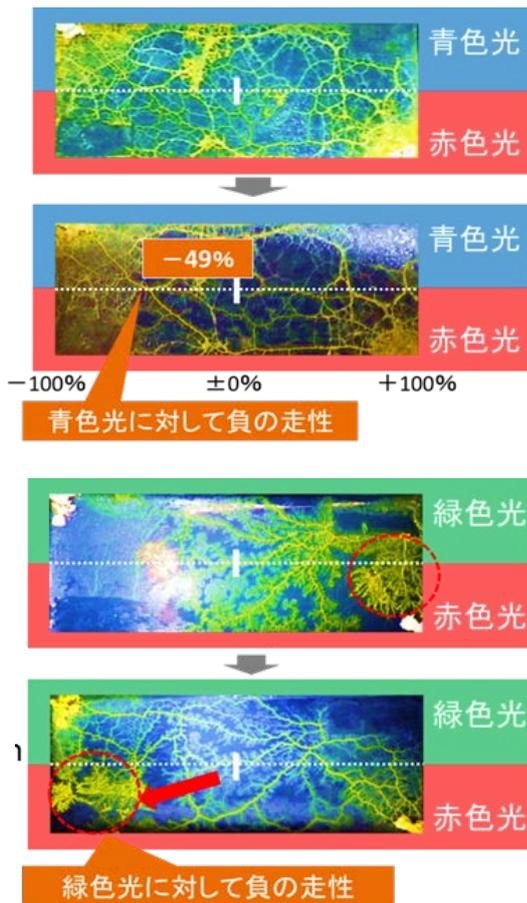
<仮説> 粘菌は青色光に対して最も強い負の光走性を示す。また赤色光に対して、最も弱い負の光走性を示す。

<方法> 2ヶ所の餌を最短距離で結ぶ性質を利用して、青色と赤色、緑色と赤色の組み合わせでの粘菌の負の光走性を確認する。

1. 四角形の培地に粘菌を培養し、対角線上に2ヶ所餌を置く。
2. 青色光と赤色光を半面ずつ24時間照射する。また、緑色光と赤色光でも同様な実験を行う。

<結果> 図8のような反応を示した。

図8 実験4の結果(巻末にカラー写真を掲載)



粘菌は、赤色光よりも青色光に対して負の光走性を示し、また赤色光よりも緑色光に対して負の光走性を示した。

### 3. 結論

図9と実験の結果より、粘菌は照射する光の波長が短いほど負の走性を強く示すことが確認された。

図9 実験の結果と波長と活性酸素発生量

| 色       | 紫外線            | 可視光  |           |            | 赤外線 |
|---------|----------------|------|-----------|------------|-----|
|         |                | 青    | 緑         | 赤          |     |
| 波長(nm)  | 392.5          | 470  | 525       | 624        | 850 |
| 忌避度     | 未測定<br>(忌避性あり) | 0.92 | 0.82      | 0.78       | 未測定 |
| 負の走性    | 未測定            | 最も強い | あり        | あり         | 未測定 |
| 活性酸素発生量 | 極めて多い          | 多い   | 比較的<br>多い | 比較的<br>少ない | 少ない |

この結果から、粘菌の負の光走性に関して考察するにあたり、藤井氏の報告(参考文献3)を参考にした。

人工的に作成した腐植水(有機物を含む水溶液)に様々な波長の光による溶液中の活性酸素発生量の測定において、短波長の光ほど活性酸素発生量は多くなることが明らかになっている。

このデータより、照射する光の波長と活性酸素発生量の関係と、粘菌の負の光走性の強弱には深い関係があるように考えられる。粘菌が負の光走性を示す要因は、照射された光による細胞内での活性酸素発生を防ぐ反応であると推測される。

### 謝辞

お世話になりました桑守先生、栗脇先生に厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1)中垣 俊之:粘菌～その驚くべき知性～
- 2)中垣 俊之:粘菌～偉大なる単細胞が人類を救う～
- 3)藤井 学:湖沼水中における活性酸素種の化学的動態の解明

— 巻 末 図 —

〔排水管の要素が排水音に及ぼす影響の考察〕

〔粉粒体の粒径がブラジルナッツ効果に与える

影響についての基礎的研究〕

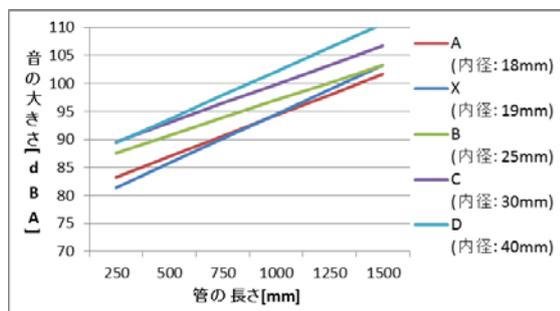
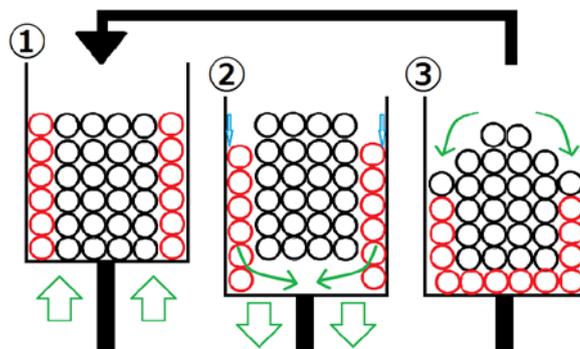


図 13 : 図 8～図 12 の近似曲線の比較



〔光の干渉実験を利用した微細物質の大きさの測定〕

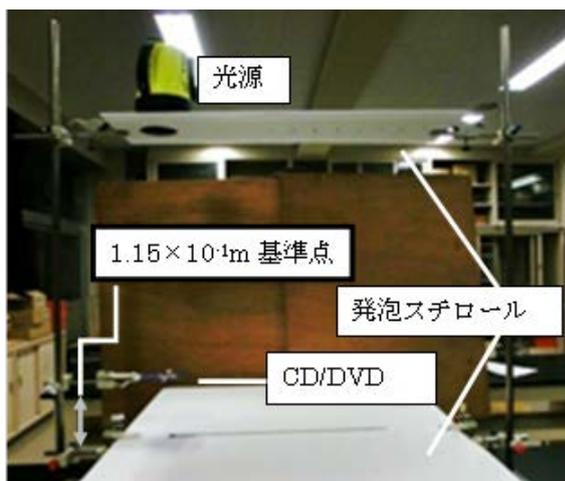


図 2 : 実験装置

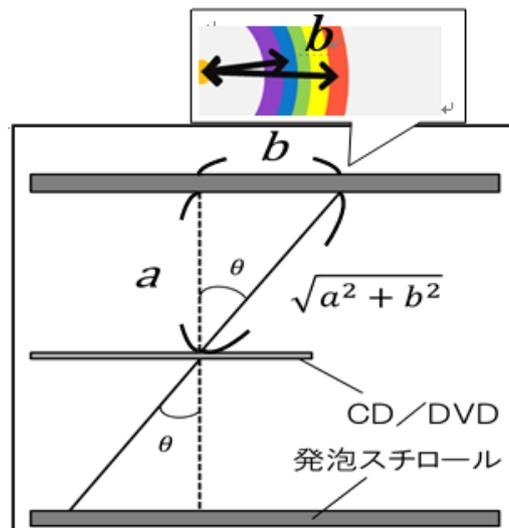


図 3 : 文字の定義

〔アルカロイドに対する粘菌の走性について〕



図 2

〔真性粘菌モジホコリカビの光走性に関する研究〕

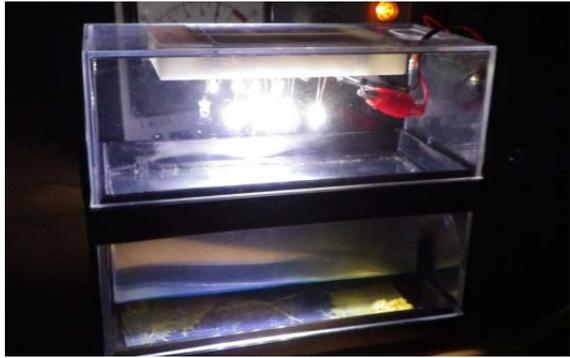


図 2 : 実験 1 装置

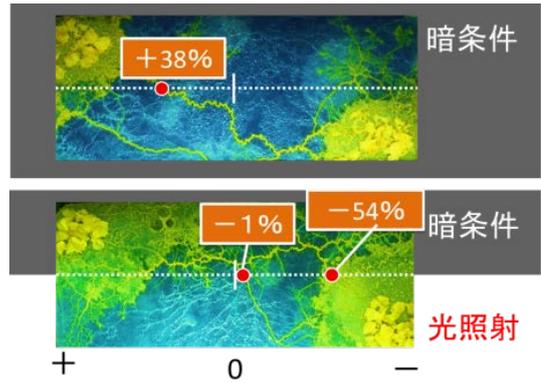


図 3 : 暗条件 (上)、半面に光照射 (下)

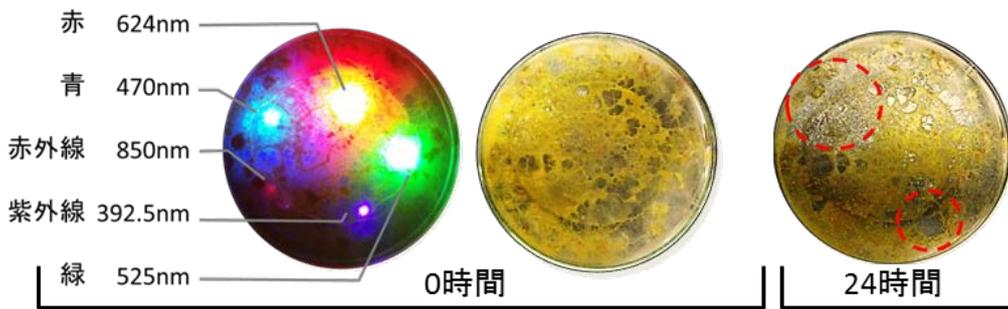


図 4 : 実験 2 比較

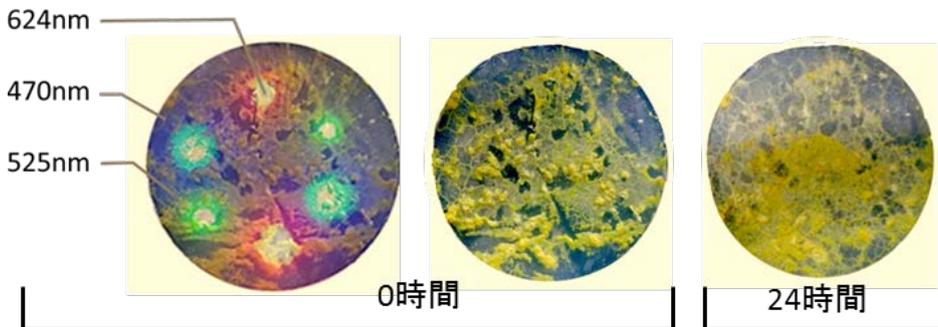


図 5 実験 3 結果

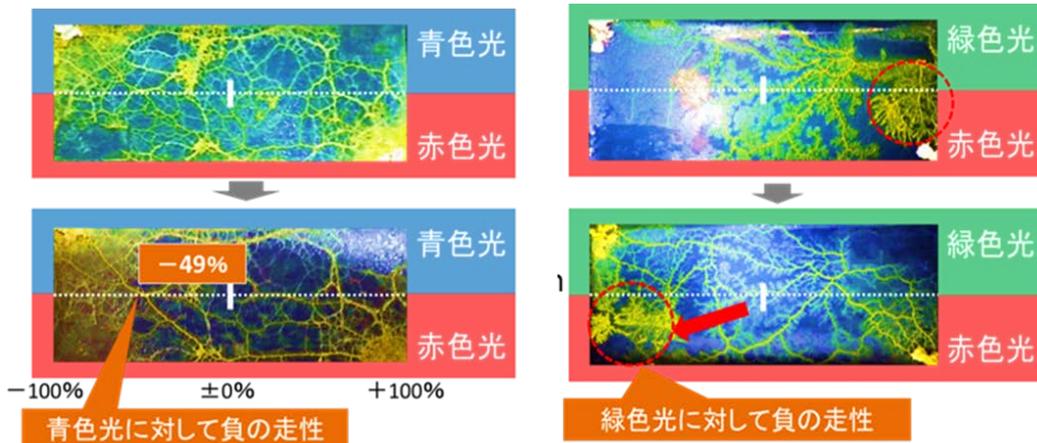


図 8 実験 4 の結果