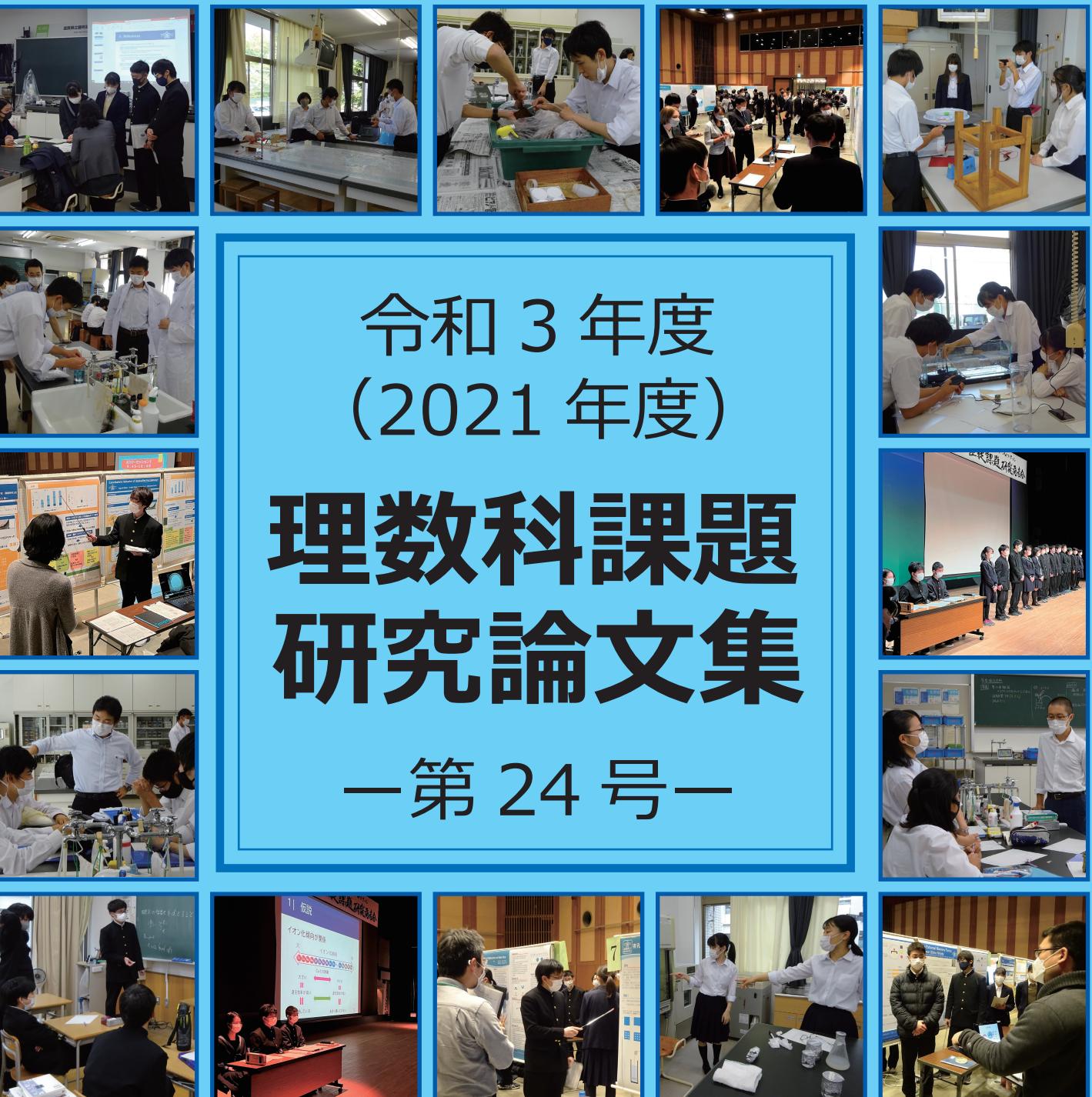


滋賀県立膳所高等学校

滋賀県立膳所高等学校

令和三年度 理数科課題研究論文集 文部科学省指定スーパーサイエンスハイスクール事業



文部科学省指定スーパーサイエンスハイスクール事業

滋賀県立膳所高等学校

令和3年度 理数科課題研究論文集

令和4年3月31日 発行

発行者 滋賀県立膳所高等学校

〒520-0815 滋賀県大津市膳所二丁目11-1

TEL 077-523-2304 FAX 077-526-1086

## 理数科25年の成果を生かすために

滋賀県立膳所高等学校

校長 富江 宏

今年度、膳所高等学校に理数科が設置されて25周年という記念すべき年を迎えるました。本校理数科は、平成9年(1997年)4月1日に、本県で2番目の理数科として、我が国の数学、科学、工学、科学技術等の理数分野の将来を担う人材の育成を目的として開設され、課題研究や京都大学、滋賀医科大学をはじめとする大学との連携に力を入れてまいりました。

平成18年(2005年)には文部科学省からスーパーサイエンス・ハイスクールに指定され、理数科はその取組の中核として位置づけられ、課題研究については学校設定科目「探究」「探究S」を設定し、課題設定能力の向上や、探究活動の評価方法等について研究を積み重ねてきたところです。こうした3期15年の取組が評価され、令和3年度(2021年度)から新たにSSH第4期5年の指定をいただきました。また、同時に科学技術人材育成重点枠にも再指定していただくことができました。

令和4年度入学生から実施される新学習指導要領においては、「探究」が一つのキーワードとして重視されているところですが、本校は早くから「探究」に取り組んできたパイオニア校として、これまでの25年の探究活動の実践の成果を、本県はもとより全国の高等学校に広く紹介し、今後各校が探究に取り組んでいかれる際の一つの参考としていただきたいと考えております。

特に、令和3年度からのSSH重点枠においては、研究テーマとしまして、「AI×専門分野のダブルメジャーを目指した次世代型課題研究プログラムの開発」を掲げ、大学や県内外高等学校と連携して、より質の高い先進的な課題研究の開発・実践に取り組んでいるところです。

その初年度の取組の発表として、令和4年2月18日に大津市民会館にて、課題研究発表会を行いました。午前中には、ポスターセッションで、英語と日本語によるプレゼンテーションを行い、午後は3つの班が代表してステージで発表しました。大学教員、ALT、若手研究者などに審査員として参加いただき、専門的な見地から質問や指導助言をいただきました。

その後、基調講演として、東京大学名誉教授でマンチェスター大学情報学研究科教授および国立研究開発法人産業技術総合研究所人工知能研究センター長の辻井潤一先生から、「人工知能研究の先駆者・長尾眞先生の思い出」との演題で御講演いただきました。

辻井先生の師でいらっしゃる長尾眞先生は、膳所高校の卒業生で、自動翻訳やAIにつながる原理を開発された情報工学者として世界的に著名であり、京都大学総長や国立国会図書館長、国際高等研究所長などを歴任され、平成30年(2018年)には文化勲章を受章されています。

御講演では、機械翻訳や人工知能の研究の歴史と現状の概説を踏まえた上で、長尾先生が研究される動機として「知的探究心」と「社会的使命感」をお持ちであったことや、バブル狂乱の前から、ものや財を浪費する世界は続かないと喝破され、持続可能な世界を創らなければいけないと話されていたことなど、今日に通じる先見性をお持ちであった長尾先生の透徹した思考力、世界・歴史観などについてお話しいただき、長尾先生の後輩である本校生徒が今後の人生を歩む上で、多くの示唆に富んだ内容がありました。御講演から学ばせていただいたことを、本校における今後の先進的な課題研究の開発・実践においても、しっかりと生かしていきたく存じます。

最後になりましたが、本校のSSH事業に御指導、御支援をいただいている運営指導委員の先生方、滋賀県教育委員会および国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の関係者はじめ多くの皆様に心から感謝申しあげます。

## 目 次

理数科 25 年の成果を生かすために

滋賀県立膳所高等学校 校長 富江 宏 ..... 1

### 論文集

真正粘菌の外部記憶因子について	3
The External Memory Factor of True Slime Molds	
中村 康臣 久家 悠睦 平尾 奈那 山田 光葵	
ヤマトシロアリの共喰い行動について	7
Cannibalistic Behavior of <i>Reticulitermes speratus</i>	
田口 真帆 田中 遥成 古家 世渚 水上 航一	
ゼラチンを用いた電池の半固体化について	11
Semi-solidification of Batteries Using Gelatin	
伊東 佑真 岡田 卓也 中西 彦斗 福島 風太	
金属粉末を用いた $\text{NO}_3^-$ 還元の最適化	15
Optimization of $\text{NO}_3^-$ Reduction Using Metal Powder	
川口 友維 吉岡 優莉 西村 春人 笹沼 亮太	
酸化チタン(IV)の光触媒効果による水の電気分解の効率化	23
Improving the efficiency of water electrolysis using photolysis of titanium dioxide (IV)	
岡田 大知 高見 涼介 平川 直 山西 瑛太	
障害物が水流に与える影響	25
Effect of Obstructions on Water Flow	
大野 友樺 鍵井 華 大久保 翔馬 中澤 悠來	
有孔ボードの水中移動時の揺動について	29
Rocking of the Perforated Board When Moving in Water	
扇 幸太郎 岡室 翼颯 傍士 陽輝 安田 岳叶	
回転系における独楽の回転	33
Rotation of Spinning Tops in a Rotating System	
植木 想奈 大井 悠生 野田 雛乃 川口 謙真	
石の回転が水切りに及ぼす影響	37
The Effect of Rotation of a Stone on Stone Skipping	
林 駿佑 水谷 匠寿 屋鋪 樹希 丹羽 琴美	
円分多項式の一般化とそれに基づく円分体の性質の研究	41
The Study about Properties of the Cyclotomic Field Based on Generalization of the Cyclotomic Polynomials	
田辺 隆晟 時田 真之介 宮田 航平 村木 智直	
発表ポスター集（日本語）	53
発表ポスター集（英語）	73
パワーポイント集	93
講評	132
付 錄	
生徒課題研究発表会口頭発表要旨	137
1年普通科探究テーマ一覧 ポスター（抜粋）	141
2年普通科探究テーマ一覧 論文（抜粋）	144
1年理数科探究Sポスター フォーマット	151
ルーブリック（理数科、普通科、科学的・数学的探究）	159
令和3年度 SSH 生徒研究発表会生徒投票賞受賞ポスター	163
膳所高校課題研究論文フォーマット	165

# 論 文 集



# 真正粘菌の外部記憶因子について

## The External Memory Factor of True Slime Molds

中村康臣 久家悠睦 平尾奈那 山田光葵  
Yasuomi Nakamura, Haruchika Kuga, Nana Hirao, Mitsuki Yamada

### 要約

真正粘菌は一度通った場所を記憶し重複して通らないようにする性質を持つ。先行研究により、粘菌が分泌する粘液鞘が塗布された場所を粘菌が認識し、再び通らないようにすることが分かっている。私たちは粘液鞘中に、粘菌に粘液鞘を認識させる物質が存在すると考え、その物質を外部記憶因子 X と定義し、X の特定を目的として実験を行った。今回の研究の結果より、この働きに粘液鞘中の K(カリウム) がかかわっている可能性が示唆された。

### ABSTRACT

Authentic slime molds has the property of memorizing a place it has passed once and avoiding passing through that place again. Previous studies have shown that the mucus sheath secreted by mucus-secreting fungi recognizes where it has been applied and prevents it from passing through. We hypothesized that there is a substance in the mucus sheath that is recognized by the mucus, and defined it as external memory factor X. We conducted experiments to identify X. We found that X is a factor that is present in the mucus sheath, but is not present in the mucus. The present study suggests that potassium in the mucus sheath may be involved in this function.

キーワード: 真正粘菌

## 1. はじめに

### 1. 1 真正粘菌について

真正粘菌(以下粘菌)は、アメーバゾア アメーバ動物門 コノーサ亜門 変形菌綱に属する原生生物である。多核の単細胞生物、すなわち細胞内にいくつもの核をもつ生物で、形を自在に変えながら移動するため、変形菌とも呼ばれる。主に朽ち木や落ち葉のバクテリアを食べて成長する。

下図の図 1 は、本実験で用いた真性粘菌の一種であるモジホコリ (*Physarum polycephalum*) である。



図 1: 自然界でのモジホコリ(左)と培養中のモジホコリ(右)

また、粘菌は高度な知能を有しているとされる。例えば、図 2 のような迷路の一面に粘菌を置き、スタート地点とゴール地点に餌を置いてしばらくすると、粘菌は餌と餌を結ぶ最短経路上に移動し、そうでないところにはいなくなる。このように、粘菌は餌等の目的の場所への最短経路を導くことが知られている。<sup>(1)</sup>



図 2: 粘菌が最短経路を導く様子

粘菌は、餌と餌の間を最も効率良く結ぶネットワークを形成することができる。寒天のプレート上に関東地方の地図を描き、主要都市に相当する場所に餌を置いて、山間部や河川、海洋がある部分には粘菌が嫌う光を当てておく。東京駅にあたる位置に粘菌を移植すると、粘菌は首都圏の JR 路線図とよく似たネットワークを形成した。<sup>(1)</sup>

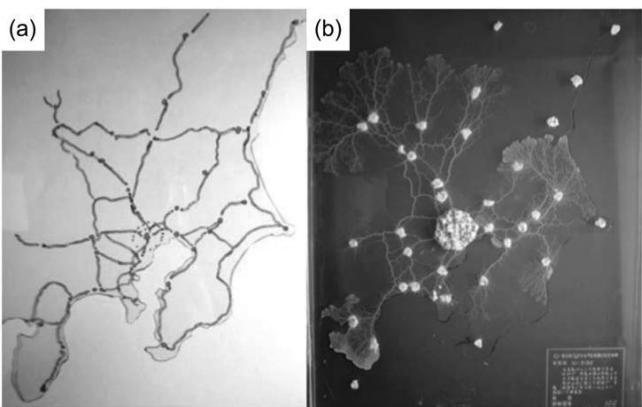


図3：実際のJRの路線ネットワーク(a)と粘菌が形成したネットワーク(b)

## 1. 2 本研究の目的

先行研究から、粘菌は移動した跡に粘液鞘を残すことで一度通った場所を記憶し、粘液鞘が残っている限り同じ場所を重複して通らないことが判明している。しかし、詳しい仕組みについては解明が進んでいない。

本研究では、粘液鞘中には、粘菌が通過した場所を記憶させる物質が含まれていると仮定した。この物質を外部記憶因子Xと定義し、これを特定することを本研究の目的とした。

## 1. 3 先行研究<sup>(2)</sup>について

何も塗布していない培地と、粘液鞘をあらかじめ塗布した培地を用意し、それぞれの培地上に粘菌と餌を置き、その間に障害物を置いて粘菌の行動を観察した。何も塗布していない培地上では、粘菌は障害物を避けて餌までの最短経路を導き出した。それに対して、粘液鞘をあらかじめ塗布した培地上では、粘菌は一度通った場所の見分けがつかず、餌までの最短経路を特定できた個体数が減少し、特定にかかる平均時間も増加した。このことから、粘液鞘が粘菌の外部記憶因子として働くとされる。

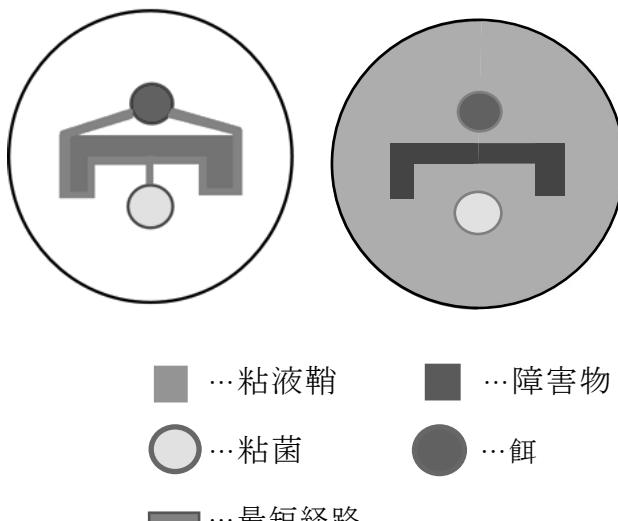


図4：先行研究<sup>(2)</sup>の実験の様子

## 1. 4 仮説

私たちは、粘液鞘は粘菌が摂取した物質から生産されていると考えた。

先行研究並びに本研究では、粘菌に餌としてオートミールを与えており、図5はオートミール100g当たりの成分を表しているが、その構成元素はP(リン), K(カリウム)が多く含まれている。

また、自然界において、粘菌は土壤中で生活しており、分解者である微生物(細菌や酵母)を餌として与えている。土壤中の元素は図5のようにSi(ケイ素), Al(アルミニウム), Fe(鉄), Ca(カルシウム), K(カリウム), Na(ナトリウム), Mg(マグネシウム)の順で多く含まれていて、その他にMn(マンガン), P(リン), S(硫黄), Ti(チタン)を含めて土壤中の主な成分となっている。なお、この他にC(炭素), H(水素), O(酸素)も含まれているが、これらは除いて表示している。

のことから、私たちはオートミールと土壤中に共通して共通して多く含まれているK、またはPがXであると仮定した。

オートミール100 g当たりの含有量(mg)

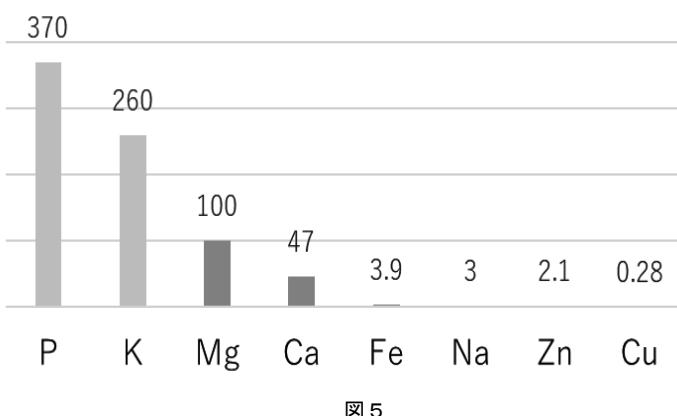


図5

土壤の元素含有率(%)

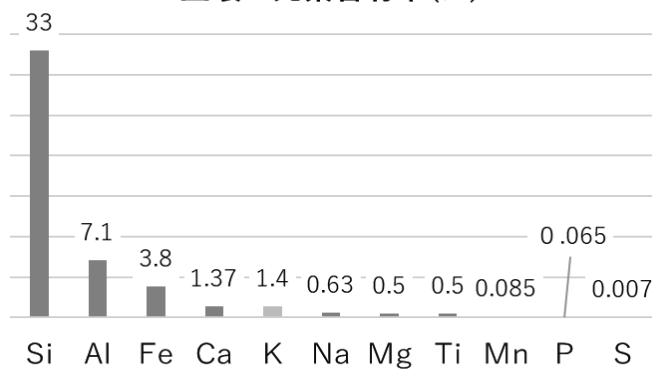


図6

## 2. 実験

### 2. 1 実験方法

図7のような実験装置を用意し、粘菌の行動を72時間観察する実験を行った。試行回数とは、粘菌が餌に向かって進んだ個体数、成功回数とは、そのうち粘菌が水溶液の塗布された半面を通らなかった個体数を指す。

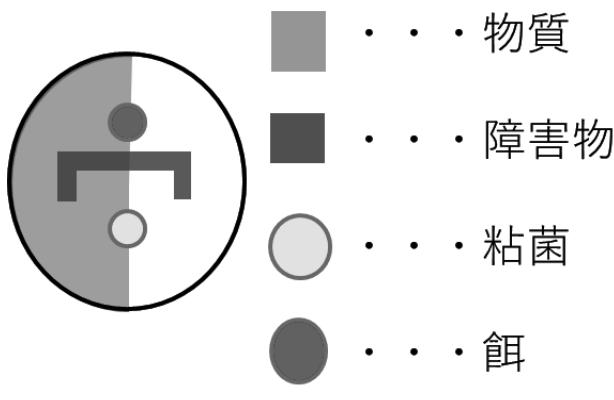


図7：実験装置

### 3. 2 予備実験

予備実験では、図7における物質として寒天培地の左半面に粘液鞘を塗布し、粘菌、餌（オートミール）、粘菌の忌避物質である酢酸を塗ったアセテートシートの障害物を設置した。そして、その様子を72時間観察した。

その結果、粘菌は粘液鞘を塗布した半面を避けるように寒天培地の右半面を通り、餌に向かった。

### 2. 3 対照実験

対照実験では、寒天培地に何も塗布せずに粘菌、餌、障害物を図8の様に設置し、実験を行った。その結果、粘菌は障害物を避け、両側から餌に向かった。

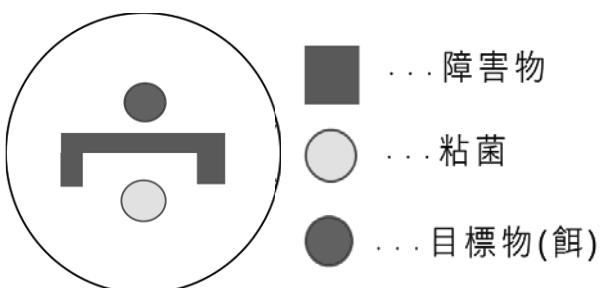


図8：対照実験の様子

### 2. 4 本実験(1)

実験の行いやすさなどの観点から、Kについて実験を行った。

また、粘菌はpHが4～7以外の物質を忌避することから、使用した物質が粘菌の忌避物質である可能性を

できるだけ排除するため、水溶液のpHが4～7の範囲であるKNO<sub>3</sub>（硝酸カリウム）を使用して実験を行った。<sup>(4)</sup>

### 【実験方法】

予備実験と同様にシャーレ上に障害物、粘菌、目標物質であるオートミールを設置して実験を行った。予備実験と異なり、シャーレの左半分に粘液鞘ではなく硝酸カリウムを塗布した。

### 【結果】

表1より、KNO<sub>3</sub> 0.1mol/Lでは2個、0.3mol/Lでは3個、0.5mol/Lでは6個、成功した個体が認められた。グラフ1より、濃度が上がるごとに、成功回数が増加していることがわかる。

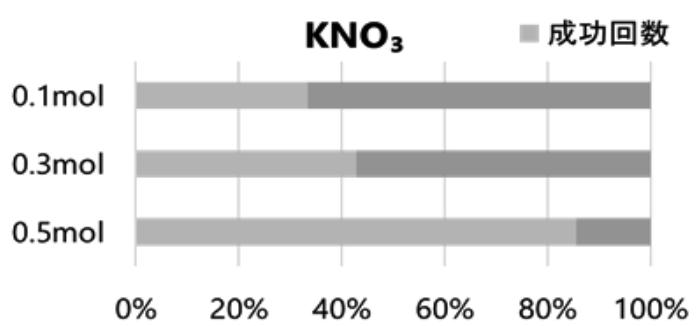
表1

KNO <sub>3</sub>	0.1mol/L	0.3mol/L	0.5mol/L
実験回数	6	7	7
成功回数	2	3	6
確率(%)	33.3	42.9	85.7

実験回数：粘菌が餌に向かって進んだ回数

成功回数：粘菌が物質を避けた回数

グラフ1



### 2. 4 本実験(2)

### 【実験方法】

カリウムは外部記憶因子Xである可能性が浮上したため、この結果をさらに確かなものにするために、私たちはKを含む別の物質であるKCl（塩化カリウム）で実験を行った。KNO<sub>3</sub>と同様、水溶液のpHは4～7である。

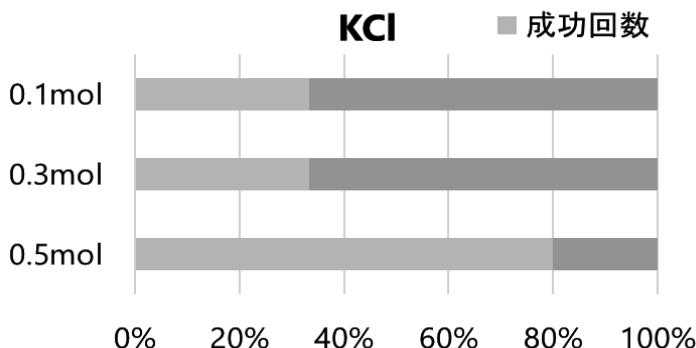
## 【結果】

KCl では、0.1mol/L では 2 個、0.3mol/L では 2 個、0.5mol/L では 4 個、成功した個体が認められた。グラフ 2 より、グラフ 1 と同様に、濃度が上がるごとに、成功回数が増加していることがわかる。

表 2

KCl	0.1mol/L	0.3mol/L	0.5mol/L
実験回数	6	6	5
成功回数	2	2	4
確率(%)	33.3	33.3	80.0

グラフ 2



## 2. 6 考察

2 種類の実験の結果から、外部記憶因子 X はカリウムである可能性は十分にあると考えられる。

また、濃度について、粘菌鞘に含まれている X の濃度は 0.5mol/L に近い、またはさらに高い濃度であると考えられるほか、外部記憶因子 X 以外の物質でも高濃度であれば粘菌が忌避反応を示す可能性が考えられる。

## 3. 今後の展望

粘液鞘中にカリウムが存在することを直接特定すると共に、0.5mol/L より高いモル濃度の硝酸カリウム、塩化カリウム水溶液や、今回実験できなかったリンについても実験を行いたい。X の濃度についても、更なる検証が必要であると考えられる。

さらに、対照実験として、外部記憶因子であると予想していない NaCl (塩化ナトリウム) などのほかの物質についても濃度別に実験を行っていきたい。

## 4. 引用文献・資料

(1)中垣俊之(2016) 粘菌に「知性」はあるか—. 単細胞生物に「人間らしさ」の起源を探る、孤高の研究  
<http://shochou-kaigi.org/>

(2)Chris R.Reid et al.(2012) Slime Molds uses an externalized spatial “memory” to negative in complex environments

(3)高橋和成(2012) 粘菌変形体の化学走性を利用した高校生物実験の開発

# ヤマトシロアリの共喰い行動について

## Cannibalistic Behavior of *Reticulitermes speratus*

田口 真帆 田中 遥成 古家 世渚 水上 航一

Maho Taguchi Yosei Tanaka Sena Furuya Koichi Mizukami

### 要約

私たちはヤマトシロアリの共喰い行動について興味を持った。その共喰い行動が、外傷個体がいることと飢餓が原因であることに着目して、飢餓状態が長く続ければ続くほど外傷個体に対する共喰いは起こりやすくなるという仮説を立て、実験を行った。その結果、飢餓状態が続いた日数が長くなるにつれて、共喰いが起こる割合が上昇した。

### ABSTRACT

We were interested in the cannibalistic behavior of *Reticulitermes speratus*. Cannibalism is caused by existence of injured termites or by starvation environment. Therefore, we think the longer they starve, the more they eat a termite which has a scar on the body, and we conducted experiments. As a result, the rate of cannibalism increased as number of days of starvation environment increased.

キーワード：ヤマトシロアリ、真社会性昆虫、共喰い、外傷、飢餓

### 1. はじめに

#### 1. 1. ヤマトシロアリについて

ヤマトシロアリ (*Reticulitermes speratus*)

(以下シロアリ) は高度に発達した社会構造を持つ真社会性昆虫である。真社会性昆虫は集団から階級を作り出し、各個体が分業を行うことによって成立しており、集団はクイーン（女王蟻）、ワーカー（職蟻）、ソルジャー（兵蟻）などからなる。また、シロアリは木材などのセルロースを栄養源にしている昆虫であり、共喰いを行うことが確認されている。共喰いには、特定の階級に対する共喰い行動、体表面に傷がある個体への共喰い行動、飢餓条件下で外傷のない個体に対する共喰い行動の3つのタイプがあることが分かっている。また、体表面に傷がある個体への共喰い行動については、傷口から出た体液に含まれるヘモリンフという物質によって共喰いは誘発されると考えられている。



図1：ヤマトシロアリ（ワーカー）

1mm

#### 1. 2. 先行研究について

シロアリ類はすべて真社会性昆虫であることから、コロニー内の個体間相互行動の解明は、社会生物学

のみならずその防除に関連する技術においても重要なとされている。

異なる体の部位を、傷つけた個体への共喰い行動を観察する研究（山中, 2019）では、胸部または腹部に傷を負っている個体は、高い確率で共喰いを誘起することが示されている<sup>[1]</sup>。

そこで、私たちは、この先行研究を参考にし、本研究の実験を計画した。

### 1. 3. 本研究の目的・仮説

私たちは飢餓状態が長く続ければ続くほど外傷個体に対する共喰いは起こりやすくなるという仮説を立て、飢餓という観点から、シロアリの共喰い行動を分析していくことを目的に本研究を行った。なお、本研究で使用したヤマトシロアリは許可を取ったうえで近江神宮の裏山に行き採取したものである。

### 2. 実験

#### 2. 1. 実験1

外傷個体がない場合、共喰いが起こるかを調べる。

##### 【実験方法】

〈使用した器具〉

ガラスシャーレ、ガラス繊維ろ紙 (\*1)、インキュベーター

\*1 一般的なろ紙はシロアリの主食であるセルロースでできているため、シロアリが食べることのないガラス繊維ろ紙を使用した。

#### 〈方法〉

ガラスシャーレの中に 20 匹の個体を入れる。水のみを与えた状態で、26°C前後に設定したインキュベーター内で 4 日間飼育した。

#### 【結果】

飢餓条件下すべての個体が 4 日間生存し、共喰いは起こらなかった。

## 2. 2. 実験 2

飢餓状態が続いた日数による共喰い行動を調べる。

#### 【実験方法】

##### 〈使用した器具〉

ガラスシャーレ、ガラス繊維ろ紙、ピンセット、インキュベーター、バターミルクペイント(\*2)

\*2 ミルクカゼインと天然の素材からなる自然塗料。シロアリが食べても害がないと考え、本研究ではこれを使用した。

#### 〈方法〉

- ① シロアリ（ワーカー）20 匹を 4 セット用意する。シロアリは 20 匹ずつ、湿らせたガラス繊維ろ紙を敷いたシャーレの中に入れる。これら 4 つのシャーレをそれぞれ実験区 0, 1, 2, 3 とする。
- ② 実験区 0 のシャーレ内の 1 匹の頭部にピンセットの先端を押し当てて傷をつけ、その個体を見分けるために黒色のバターミルクペイントで着色する。
- ③ 全シャーレを 26°C前後のインキュベーター内に置き、飼育する。
- ④ 1 日後、実験区 1 のシャーレの 1 匹に②と同様の操作を行う。
- ⑤ 2 日後、実験区 2 のシャーレの 1 匹に②と同様の操作を行う。
- ⑥ 3 日後、実験区 3 のシャーレの 1 匹に②と同様の操作を行う。
- ⑦ それぞれ傷をつけた 1 日後に生存個体数を数え、共喰いの有無を確かめた。
- ⑧ 実験区は、傷をつけるまでの飼育日数であり、これを飢餓日数とする。

\* 使用した個体は、階級を統一するためワーカーだけを集めた。ワーカーは、先行研究で使用されている階級であり、最も個体数の多い階級でもある。

実験の流れを図 2 に示す。

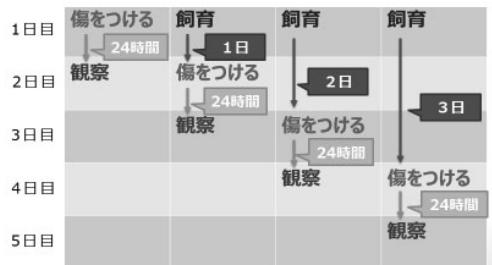


図 2 : 実験の流れ



図 3 : 1 匹の個体に傷をつけてペイントをつけたシャーレ

#### 【結果】

24 時間後の生存個体数から、共喰いされた個体数を求め、表 1 にまとめた。

表 1 : 24 時間以内に共喰いが起こった個体数

	飢餓日数			
	0 日	1 日	2 日	3 日
0 匹	3	2	0	0
1 匹	3	5	6	5
2 匹	0	1	1	1

\*データは実験回数を示す。

表 1 をもとに共喰いが起こった割合を図 4 に示す。

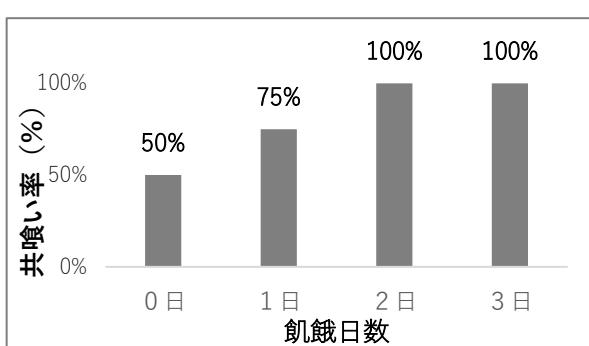


図 4 : 共喰いが確認された割合

生存個体数が減少したとき、いずれの場合も外傷個体は含まれておらず、外傷個体に対して共喰いが行われたことがわかる。

飢餓状態が長いほど共喰いが起こる割合は上昇し、飢餓状態で2日以上過ごして、外傷個体がいる場合、必ず共喰い行動を行うことがわかる。

また、2匹の個体が共喰いされた割合を図5に示す。

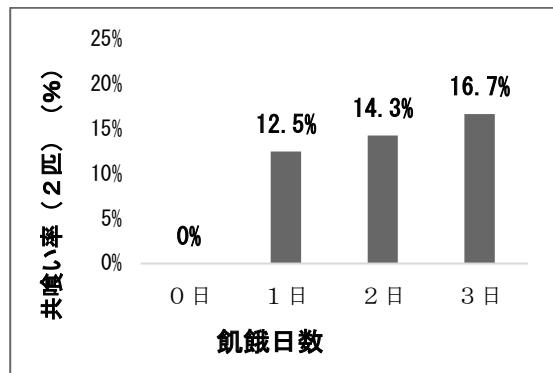


図5：2匹の個体に対して共喰いが行われた割合

飢餓日数が経過するとともに2匹の個体に対する共喰いの割合も上昇した。

### 【考察】

飢餓日数が経過するとともに、2匹の個体が共喰いされる割合も上昇した。これは、外傷個体を共喰いしている際に、その個体の体液が付着し、共喰いされた個体がいたと考えられる。割合が上昇しているのは、飢餓が長く続くことが共喰いをさらに激化させているためだと考えられる。

実験1より、外傷個体がない場合、飢餓条件下でも少なくとも4日間は共喰いが起こらなかった。先行研究においても、無傷のシロアリ間での共喰いはめったに観察されないことが明らかにされている。このことから、実験2におけるシロアリの共喰い行動は、外傷個体がいたことが要因になっていると考えられる。

### 2. 3. 実験3

バターミルクペイントがヤマトシロアリの共喰いを誘発するかを確かめる。

#### 【実験方法】

〈使用した器具〉

ガラスシャーレ、ガラス繊維ろ紙、インキュベーター、バターミルクペイント

〈方法〉

実験2の対照実験を行う。この対照実験では、個体を飢餓状態で飼育した後、1匹の個体に傷はつけずペイントのみを着色した。

### 【結果】

それぞれの実験区で4回実験を行い、共喰い率を求めた（図6）。実験区1（飢餓日数1日）で、共喰いが1回確認されたのを除き、いずれの飢餓日数でも、共喰いは確認されなかった。

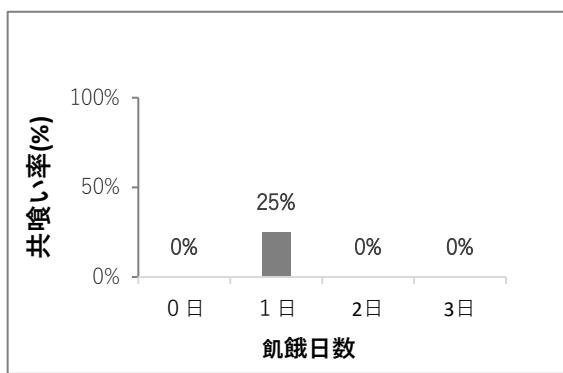


図6：共喰いが確認された割合（ペイントのみを着色した場合）

### 【考察】

飢餓日数が長くなても、共喰いが確認されなかったことから、バターミルクペイントは共喰いを誘発しないと考えられる。しかし、実験区1（飢餓日数1日）で共喰いが確認されているのは、シロアリを巣からシャーレに移す時、もしくはシロアリにペイントを付ける時に傷をつけてしまった可能性が高い。

### 3. 展望

実験2では、外傷個体の周囲に他個体が近づき、共喰いを行う様子は観察されたが、すべての個体が共喰いに関与していたかは確認できなかった。飢餓日数による共喰いに関与する個体数の変化を調べたい。

今回は外傷個体を1匹にして実験を行ったが、外傷個体が複数いた場合、共喰いされる個体数は飢餓日数によって変化するのかを調べたい。

今回、湿度を一定に保つことに考えが及ばなかつたので、ろ紙が乾燥して水が十分に供給できなかつたことがあった。このことが共喰い行動に影響を及ぼした可能性がある。湿度を一定に管理した上の実験を行いたい。

本研究では温度を26°C前後の環境で実験を行っていたが、温度の条件を変えて同様の実験を行うことで、共喰い行動の実態をより明らかにしていきたい。

#### **4. 謝辞**

本研究を進めるにあたり、京都大学大学院農学研究科教授の松浦健二先生をはじめ、多くの方々に助言を承りましたことに厚く御礼申し上げます。ありがとうございました。

#### **5. 参考文献**

- [1] 山中康如, ヤマトシロアリにおける人為的外傷に起因する共喰い行動の解析, 日本大学大学院 生物資源科学研究科, 2019, 3
- [2] 吉村剛, 板倉修司, 岩田隆太郎, 大村和香子, 杉尾幸司, 竹松葉子, 徳田岳, 松浦健二, 三浦徹, シロアリの事典, 海青社, 2012, 12

# ゼラチンを用いた電池の半固体化について Semi-solidification of Batteries Using Gelatin

伊東佑真 岡田卓也 中西彦斗 福島颯太

Yuma Ito Okada Takuya Gento Nakanishi Sota Fukushima

## 要約

本研究では、ゼラチンを用いた半固体電池の電流値の増加を目的とした。実験は2通り行った。実験1ではゼラチンの量を変化させ、電解液の流动性と電流値がどのように変わるか調べた。実験2では、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>のモル濃度を変化させ、電池の固まり方と電流値の関係を調べた。その結果、1.0gのゼラチンを添加したとき、定義された半固体状を維持しながら最も高い電流値が取り出せることができることが分かった。今後は、より最適な半固体電池を目指して研究を進めようと思う。

## ABSTRACT

Our experiment was aimed at increasing the current of a battery using gelatin. We performed two experiments. In Experiment1, we varied the amount of gelatin and investigated the relationship between the flowability of the electrolyte and the current value. In Experiment2, we varied the concentration of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> investigated how the gelatin solidified and the current value. As a result, the highest current value was extracted when 1.0 gram of gelatin was added, while maintaining the defined semi-particular shape. In the future, we would like to experiment with the goal of creating a more optimal battery.

キーワード：半固体電池、ボルタ電池、ゼラチン

## 1. はじめに

今日、電池はさまざまな分野で活用されている。それらの電池は電解液に液体が用いられているものもある。しかし、電解液が液体状であると液漏れなどの危険性があり、安全面において問題点がある。そこで、私たちは電解液を半固体状にすることでこの問題点を解決できるのではないかと考え、半固体電池の実用化を最終目標として研究を始めた。

## 2. 予備実験

### 2.1 予備実験 1

#### 2.1.1 概要

スライムに銅板と亜鉛板を差すと、電流を取り出すことができるということが知られている。スライムとは、洗濯のりに含まれるPVA(ポリビニルアルコール)の直線状に結び付いた長い糸のような構造をした分子にホウ砂水溶液を混ぜたとき、ホウ砂がPVAの糸の間をつなぎ網目状の構造(架橋構造)に変えることで半固体状になったもので、玩具や教材として用いられている。スライムは半固体状の物質であるため、スライム電池は半固体電池であるといえる。そして、強電解質である塩化ナトリウムを加えることにより、先行研究よりも大きな電流値を取り出せる半固体電池を作ることができると考え、予備実験1を行った。

#### 2.1.2 目的

加える塩化ナトリウムの量を変化させることによって、取り出せる電流値がどのように変化するかを調べる。

#### 2.1.3 使用物

PVA(50.0g), 9.1%ホウ砂水溶液(27.5g), 水(50.0g), 電極(銅板, 亜鉛板), 塩化ナトリウム(0.10mol/L~1.00mol/L)(0.10mol/L刻み), 電流計, 導線

#### 2.1.4 方法

- ①10個のビーカー(A~J)を用意し、それぞれにホウ砂水溶液を入れ、各量の塩化ナトリウムを溶かす。
- ②それぞれのビーカーにPVAを入れ、かき混ぜる。
- ③電極を差し、電流値を測定する。

#### 2.1.5 結果

塩化ナトリウムを0.70g加えた場合、最も大きい電流値を取り出すことができ、その値は27mAであった。0.80g以上の塩化ナトリウムを加えた場合、塩析(コロイド溶液に無機塩類を加えて高分子化合物が析出する現象(写真1))が起こり、半固体化はしなかった。また、スライムは酸に弱いため、電解液に強酸を加えることができない。



(写真1) 塩析したスライム

## 2.2 予備実験 2

### 2.2.1 概要

そこで、予備実験 2 として、HM ペクチンとゼラチンを用いてボルタ電池を半固体化させることを行った。ペクチンとは、柑橘類やりんごに含まれる食物繊維の一種で、ゼリー化特性を持つ天然の多糖類として知られる(2)。ゲル化するという性質を利用して、ジャム、マーマレード、ゼリーなどの製造が行われている(3)。ペクチンには HM ペクチンと LM ペクチンとがあり、これらはゲル化する条

件によって分けられている。私たちが使用した HM ペクチンは高糖度、低 pH という条件の下で、水素結合によってゲル化する。また特徴として熱不可逆性のゲルを形成する点がある(4)。また、ゼラチンはコラーゲンを加熱し、構造を分解することにより変化させた溶けやすい水溶性のタンパク質である。ゼラチンは温めると溶け、冷やすと固まる「ゾル化、ゲル化」を可逆的に行えることが特徴である(5)。私たちは HM ペクチンとゼラチンのゲル化という性質に着目し、ボルタ電池の半固体化、つまり、硫酸をゲル化させることができると考え、次の予備実験を行った。本実験において、半固体化とは、100mL ビーカーに溶液を 30mL 入れ 90° 傾けた時に、溶液がこぼれないものを半固体化したという。

### 2.2.2 目的

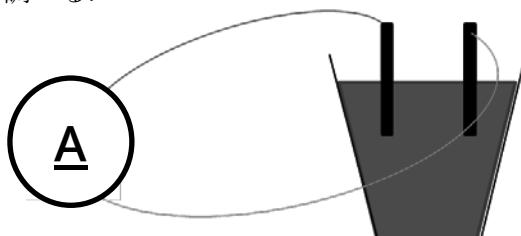
硫酸のモル濃度を変化させ、HM ペクチン、ゼラチンを加えた時の硫酸の固まり方や取り出せる電流値の変化を調べる。

### 2.2.3 使用物

ゼラチン、HM ペクチン、硫酸  
(0.10mol/L, 0.50mol/L, 1.0mol/L), ガスバーナー,  
ビーカー、電極（銅板、亜鉛板）、電流計、導線

### 2.2.4 実験方法

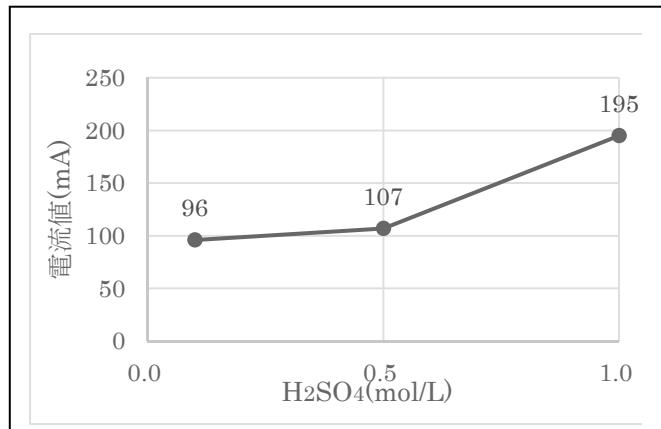
- ① ビーカーを 6 つ(A, B, C, D, E, F)用意し、それぞれに加えた純水(30mL)を 90°C まで加熱し、A, B, C には HM ペクチン 5g とスクロース 30g, D, E, F にはゼラチン 5g を加える。
- ② 硫酸(0.10mol/L)30mL を A, D に、硫酸(0.50mol/L)を B, E に、硫酸(1.0mol/L)30mL を C, G に入れ、混ぜる。
- ③ ② の溶液を氷水に入れて冷やし、固める。
- ④ 電極に銅板、亜鉛版を用い、それぞれの電流値を調べる。



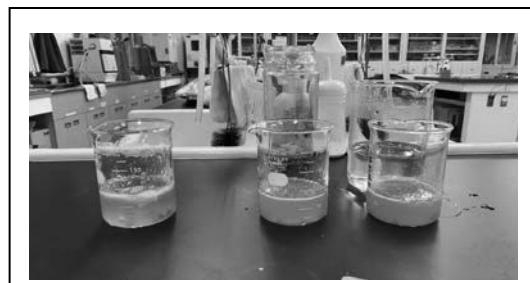
(図 2) 実験 1 ③の模式図

### 2.2.5 結果

HM ペクチン(0.1mol/L)のとき電流値は約 90mA 取り出せた(図 1)。しかし、HM ペクチンを用いた場合、硫酸が液体状のままであり(写真 2)、本研究の目的である電池の半固体化に適していないため、今回はゼラチンを用いて研究することにした。



(図 1) 硫酸のモル濃度と取り出せた電流値の関係  
(HM ペクチン 5g)



(写真 2) HM ペクチンを用いたときの様子

## 3. 実験 1

### 3.1 目的

ボルタ電池に加えるゼラチンの量を変化させ、電解液の流動性と取り出せる電流値の関係について調べる。

### 3.2 使用物

ゼラチン(0.0g, 0.5g, 1.0g, 1.5g, 2.0g), 硫酸 1.0mol/L(30mL), ガスバーナー, ビーカー, 電流計, 電極(銅板, 亜鉛板), 導線

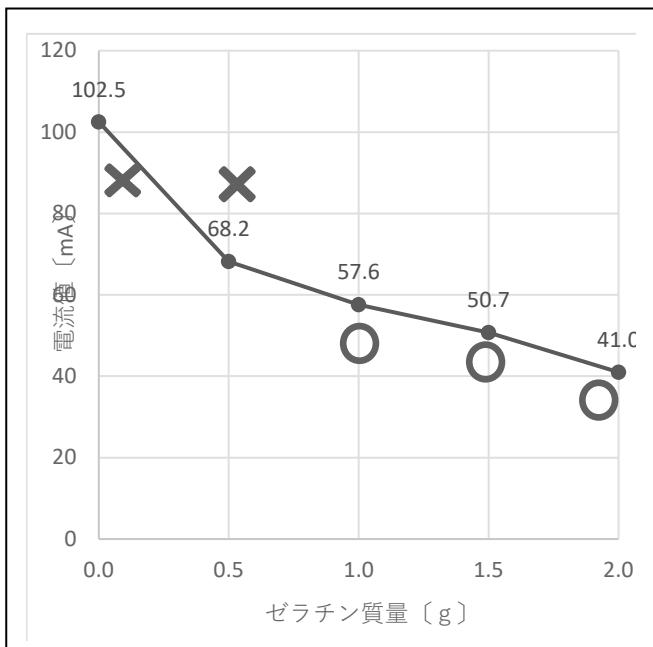
### 3.3 実験方法

- ① 硫酸(30mL)をガスバーナーで 40°C まで加熱し、質量の異なるゼラチン(0.0g, 0.5g, 1.0g, 1.5g, 2.0g)を加え、溶かす。
- ② ① の溶液を氷水で冷やし、固める。
- ③ 電極に銅板、亜鉛版を用い、それぞれの電流値を調べる(図 2)

## 4. 結果 1

ゼラチンの質量を増やすにつれ粘度が増し、電流値が低くなった(図 3)

実験 1 より、硫酸が半固体化し、かつ取り出せた電流値が最も大きかったのは、ゼラチンを 1.0g 加えたときだった。このことより、実験 2 では 1.0g のゼラチンを使用して行った。



(図 3) 加えたゼラチンの質量と取り出せた電流値の関係(○: 半固体化した ×: 液体のまま)

## 4. 実験 2

### 4.1 目的

ボルタ電池における硫酸のモル濃度を変化させ、ゼラチンによる硫酸の固まり方や電流値を調べることで、大きい電流値を取り出せる半固体状の硫酸のモル濃度を探す。

### 4.2 使用物

ゼラチン(1.0g), 硫酸

(0.0mol/L, 0.5mol/L, 1.0mol/L, 1.5mol/L, 2.0mol/L)(30mL), ガスバーナー, ビーカー, 電流計, 電極(銅板, 亜鉛板), 導線

### 4.3 方法

- ① ビーカーを 6 つ用意し、モル濃度が 0.5mol/L ずつ異なる硫酸(0.0mol/L, 0.5mol/L, 1.0mol/L, 1.5mol/L, 2.0mol/L)(30mL)をガスバーナーで 40℃までそれぞれ加熱し、ゼラチン(1.0g)を加えて溶かす。
- ② ①の液体を氷水で冷やし固める。
- ③ 電極に銅板、亜鉛板を用い、それぞれの電流値を調べる。

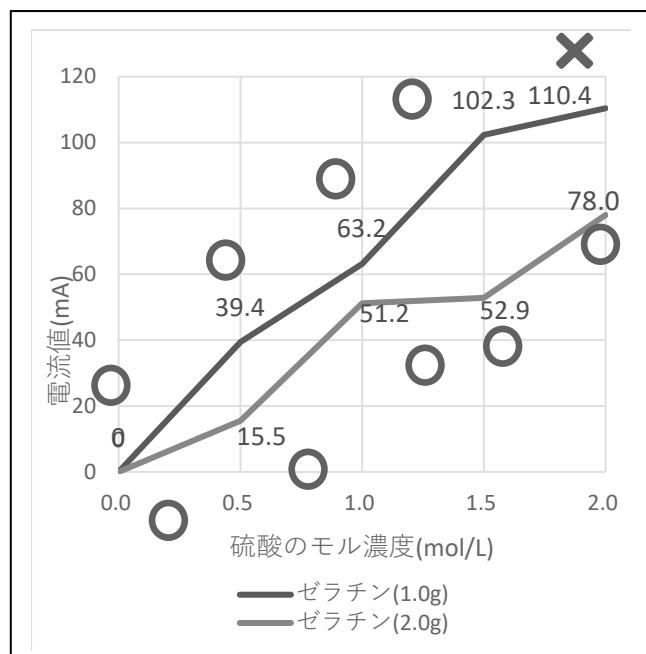
また、対照実験としてゼラチンの量を 1.0g から 2.0g に変え、硫酸のモル濃度の増やし方と極板などの条件は同じにして実験し、様々なモル濃度の状況下でより電流値が高くなる場合を調べた。

## 5. 結果 2

実験 2 でゼラチン 1.0g のとき硫酸のモル濃度が高くなるにつれて、電解液の流動性が高くなり、1.5mol/L までは半固体状であったが、2.0mol/L では半固体状にならず液体のままであった。硫酸がゼラチンの構造を壊したためと考えられる。また、硫酸のモル濃度が高くなるにつれて電流値も大きくなつた(図 4)。

また、ゼラチン 2.0g のとき硫酸のモル濃度が 2.0mol/L まで硫酸は半固体状になった。電流値はゼラチン 1.0g のときと同様に硫酸のモル濃度が高くなるにつれて大きくなつた。

さらに、ゼラチンを 1.0g 加えたときは、全体としてゼラチンを 2.0g 加えたときと比べて大きな電流値を取り出すことができた。



(図 4) 硫酸のモル濃度と取り出せた電流値の関係  
○: 半固体化した ×: 液体のまま)

## 6. 考察

実験 1において、定義された半固体状を保ちつつ、最も高い電流を取り出せたのはゼラチンを 1.0g 加えたときであったため、本実験の半固体電池において最も理想的な電池であると考えられる。

実験 2では、硫酸のモル濃度が上がったためか、または硫酸でゼラチンの構造が壊れて流動性が増したためにより硫酸濃度上昇に伴い電流値が高くなったと考えられる。

## 7. 今後の展望

実験1より、加えるゼラチンの量を増やしていくごとにビーカー内の溶液の流動性は小さくなっています。1.0g 加えたときには完全な固体となり流動性は全くなかった。この状態であると低い電流値しか取り出せなかつたため、適度な固さとなるゼラチンの量を探していきたい。

また、今回の研究全体を通して、溶液の温度を一定に保つという操作をしていなかったため、実験を行った日の気温や冷却時間などにより、溶液の温度が一定に保たれず、測定値に誤差が生じてしまった可能性があり、一定温度で測定できるようにしていきたい。さらに、今回用いたゼラチン以外にも酸性溶液を固める物質やほかの異なる価数の酸性溶液などを検討し、同様の実験をおこないより高い電流値を得られるようにしていきたい。そして、半固体化した硫酸の濃度を数値化することで取り出せる電流値との関係を調べたい。

## 8. 参考文献

- (1) 『リンゴペクチン』 Unicook
- (2) 『スライム』 川端晶子
- (3) 『食品開発ラボ ゼラチンとは～基礎から徹底解説～』 ユニテックフーズ株式会社
- (4) 『ゼラチンって何?』 日本ゼラチン・コラーゲン工業組合
- (5) 『スライム電池を用いて化学エネルギーを取り出す』 野々口勝美
- (6) 『ペクチンの性状とゲル化』 三浦洋
- (7) 『国立大学55工学系学部ホームページ』

# 金属粉末を用いた $\text{NO}_3^-$ 還元の最適化 Optimization of $\text{NO}_3^-$ Reduction Using Metal Powder

川口友維 吉岡優莉 西村春人 笹沼亮太  
Kawaguchi Yui Yoshioka Yuri Nishimura Haruto Sasanuma Ryota

## 要約

近年、各種排水に含まれる溶存態窒素により、自然水の汚染が深刻化している。そこで、銅担持鉄粉により  $\text{NO}_3^-$  が  $\text{NH}_4^+$  に還元されるという反応に着目し、改良を目指した。実験の結果、担持される金属のイオン化傾向が大きいほど、還元効率がよいことがわかった。また、スズや鉄は、 $\text{NO}_3^-$  が  $\text{NO}_2^-$  を経由せず  $\text{NH}_4^+$  へ直接還元される反応が、相対的に多く発生している可能性が示された。

## ABSTRACT

In recent years, nitrogen (mainly  $\text{NO}_3^-$ ) in various types of wastewater has been causing serious pollution of natural waters. In this study, copper and various kinds of metal powders were used to reduce  $\text{NO}_2^-$  to  $\text{NH}_4^+$ , which can be easily removed. As a result of the experiment, it was found that the larger the difference in potential between the copper and the iron, the higher the reduction efficiency. In addition, we consider that  $\text{NO}_3^-$  was relatively often reduced to  $\text{NH}_4^+$  without passing through  $\text{NO}_2^-$  when we use Sn and Fe.

キーワード： 硝酸イオン 亜硝酸イオン アンモニウムイオン 銅担持 還元

## 1. はじめに

私たちは、硝酸イオン(以下  $\text{NO}_3^-$ )による自然水の汚染に着目し研究を行った。各環境問題の限界値をしみす、プラネタリー・バウンダリー(図1)を見ると、窒素による環境破壊が危機的な状況にあることがわかる<sup>[1]</sup>。

$\text{NO}_3^-$  は生活排水や農業排水に豊富に含まれており、この量は人口の増加に伴い今後さらに増加していくと予測されるため<sup>[2-5]</sup>、本研究では、 $\text{NO}_3^-$  をより除去の容易なアンモニウムイオン(以下  $\text{NH}_4^+$ )へ還元する既知の方法を改良することを目的とした。

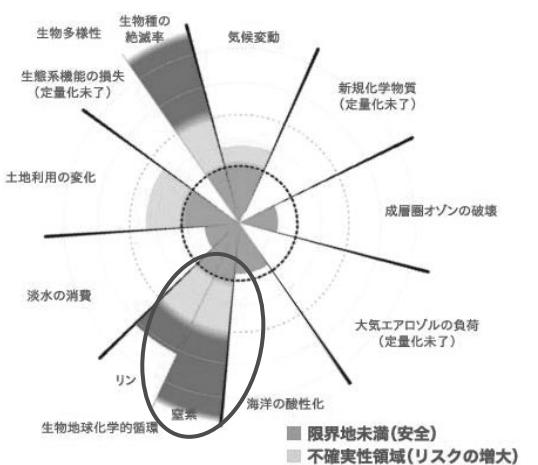


図1. プラネタリー・バウンダリー 2014年版

## 2. 仮説

先行研究では、 $\text{NO}_3^-$  が含まれる水溶液中に、銅を担持した鉄粉(銅が表面に付着した状態の鉄粉)を加えることで、水溶液中の  $\text{NO}_3^-$  が  $\text{NH}_4^+$  へ還元されることが確認されている<sup>[6,7]</sup>。私たちは、鉄粉をよりイオン化傾向の大きい金属粉末に変えることで、銅担持鉄粉を利

用するよりも、より短時間に多くの還元反応(以下効率の良い還元反応)をおこせるのではないか、という仮説をたて、次の実験を行った。

## 3. 実験①

3. 1 事前調査
3. 1. 1 実験方法

銅担持鉄粉による  $\text{NO}_3^-$  の還元反応を確認するため、先行研究の再現として、以下の手順で実験を行った。

- ① 鉄粉 4.00 g を  $1 \text{ mol L}^{-1}$  の塩酸に浸し、表面の酸化物を除去した。
- ② これを  $0.75 \text{ mol L}^{-1}$  硫酸銅(II)水溶液に 5 分間浸し、表面に銅を担持させた。その後、純水で数回表面を洗浄した。
- ③  $0.04 \text{ mol L}^{-1}$  の硝酸ナトリウム水溶液 200 mL に②で調製した銅担持鉄粉を加え、同濃度の硝酸ナトリウム水溶液とともにマグネチックスターラーを用いておよそ 8 時間攪拌放置した。
- ④ ③をろ過し、ろ過して得た水溶液の吸光度を、分光光度計(日立ハイテクサイエンス:U-1900 形レシオビーム分光光度計)を用いて計測した。  
(注: 本研究で使用した分光光度計は全て上の機種である。)

### 3. 1. 2 結果

以下に事前調査の結果を示す。(図2)

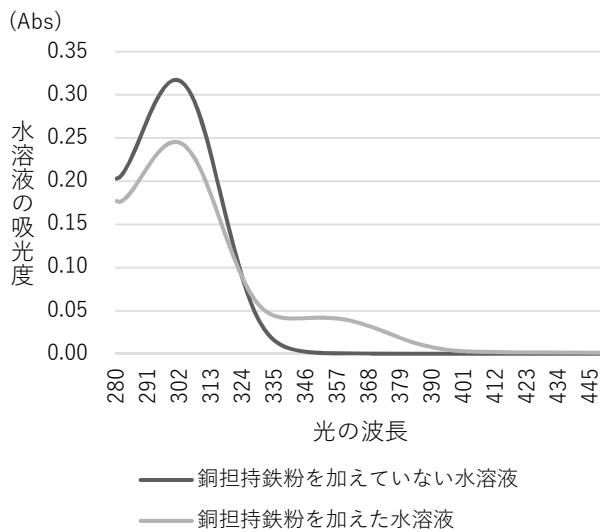


図2. 事前調査 各水溶液の吸光度

### 3. 1. 3 考察

結果より、銅担持鉄粉を加えることで、300 nm付近の吸光度は減少し、350 nm付近の吸光度は増加することが分かった。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>は300 nm付近の波長の光をよく吸収し、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>からNH<sub>4</sub><sup>+</sup>への還元の中間で生成されると考えられる亜硝酸イオン(以下NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)は、300 nm付近の波長の光をよく吸収するということが分かっている。このことから、銅担持鉄粉によるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の還元反応を確認できたと考えられる。

## 3. 2 実験①

### 3. 2. 1 実験方法

以下の手順で実験を3回行った。ただし1回目の実験では薬品の都合上、スズの実験区および、手順⑦のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度の測定は行わなかった。また3回目の実験では、一部の操作を誤り、スズの実験区のデータを得られなかった。

- ① 鉄粉を4.00 gと、それと物質量が一致するよう 亜鉛粉末を4.68 g、マグネシウム粉末を1.74 g、スズ粉末を8.50 g用意した。
- ② それぞれを1 mol L<sup>-1</sup>塩酸に5分間浸し、表面の酸化物を除去した。その後純水で数回表面を洗浄した。
- ③ それぞれを0.75 mol L<sup>-1</sup>硫酸銅(II)水溶液に5分間 浸し、表面に銅を担持させた。その後、純水で数回表面を洗浄した。
- ④ 4.00 × 10<sup>-2</sup> mol L<sup>-1</sup>硝酸ナトリウム水溶液を1000 mL調製し、200 mLずつ5つに分割した。うち4つに手順③で調製した金属粉末をそれぞれ加え、1つを対照実験区とした。
- ⑤ マグネチックスターラーを用いて、それぞれを同じ条件下でおよそ1日攪拌放置した。

- ⑥ ⑤をろ過して得た水溶液の吸光度を、分光光度計を用いて計測した。計測した吸光度から、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>の濃度を計算した。(詳しい算出方法は8. 2を参照)

- ⑦ インドフェノール青吸光光度法を用いて NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の濃度を算出した。(詳しい実験手順は8. 3を参照)

### 3. 2. 2 結果

全ての実験で対照区に反応は見られなかった。

(イオン化傾向はSn<Fe<Zn<Mgの順)

以下に実験①の結果を示す。(図3-5、表1-3)

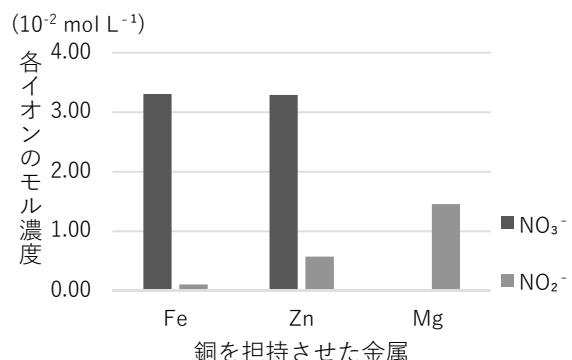


図3. 実験①-1 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>のモル濃度

表1. 実験①-1 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>のモル濃度(10<sup>-2</sup> mol L<sup>-1</sup>)

	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
Fe	3.31	0.11
Zn	3.29	0.58
Mg	0.003	1.46

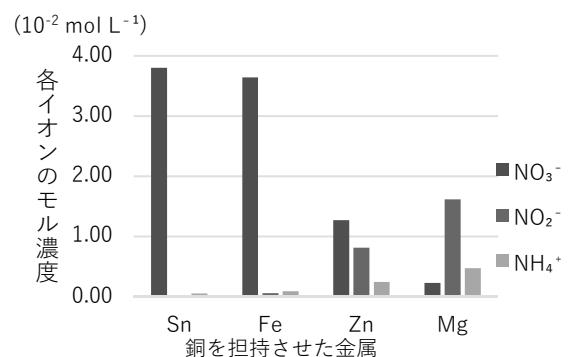


図4. 実験①-2 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>のモル濃度

表2. 実験①-2 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>のモル濃度 (10<sup>-2</sup> mol L<sup>-1</sup>)

	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Sn	3.80	0.01	0.05
Fe	3.64	0.06	0.09
Zn	1.27	0.82	0.24
Mg	0.23	1.61	0.47

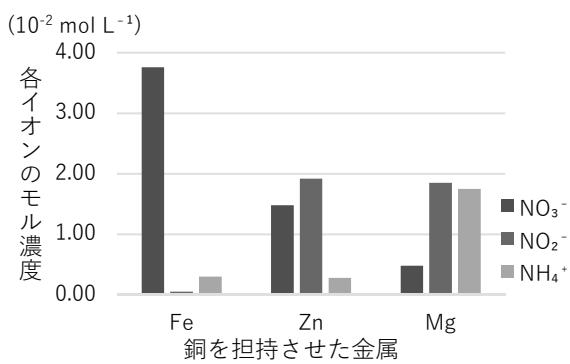


図5. 実験①-3  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ のモル濃度

表3. 実験①-3  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ のモル濃度 ( $10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$ )

	$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_2^-$	$\text{NH}_4^+$
Fe	3.76	0.05	0.30
Zn	1.48	1.92	0.28
Mg	0.48	1.85	1.75

### 3. 3 考察

結果より、イオン化傾向が大きい金属を用いた方が、水溶液中の $\text{NO}_3^-$ の、 $\text{NO}_2^-$ および $\text{NH}_4^+$ への還元率が高いことが確認された。このことから、仮説どおり、イオン化傾向の大きい金属を用いた方が、効率的に還元反応を起こせるということが考えられる。

一方で、マグネシウムや亜鉛を用いると、 $\text{NH}_4^+$ への還元途中の物質だと考えられる  $\text{NO}_2^-$ の量も多くなることが分かった。

$\text{NO}_2^-$ は  $\text{NO}_3^-$ と比較して毒性が強く、 $\text{NO}_3^-$ と同様に除去が容易ではないため、私たちは、還元効率だけでなく、 $\text{NO}_2^-$ を発生させないことも重要であると考えた。そこで、鉄やスズは  $\text{NH}_4^+$ の発生量と比較して、 $\text{NO}_2^-$ の発生量が少なかったことから、何か理由があるのではないかと考え、次の実験を行なった。

## 4. 実験②

### 4. 1 事前調査

#### 4. 1. 1 方法

実験①で得られたデータを用いて、それぞれの反応次数が1であると仮定して、それぞれの反応速度定数( $k_1$ ,  $k_2$ )を求めた。この際、pHは影響しないと仮定した。

$\text{NO}_3^-$ が  $\text{NO}_2^-$ に還元される反応速度 :  $k_1[\text{NO}_3^-]$

$\text{NO}_2^-$ が  $\text{NH}_4^+$ に還元される反応速度 :  $k_2[\text{NO}_2^-]$

(詳しい計算方法は8. 4を参照)

### 4. 1. 2 結果

以下に事前調査の結果を示す。(図6, 表4)

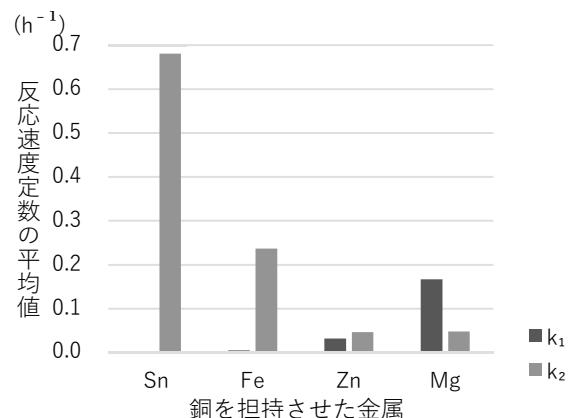


表4. 算出した  $k_1 k_2$  の値 ( $\text{h}^{-1}$ )

$\text{h}^{-1}$	$k_1$	$k_2$
Mg 1回目	0.29	0.05
Mg 2回目	0.12	0.05
Mg 3回目	0.09	0.04
Zn 1回目	0.01	0.02
Zn 2回目	0.05	0.10
Zn 3回目	0.04	0.02
Fe 1回目	0.01	0.25
Fe 2回目	0.004	0.25
Fe 3回目	0.003	0.21
Sn 2回目	0.002	0.68

### 4. 2 実験②

#### 4. 2. 1 実験方法

$4.00 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$ の硝酸ナトリウム水溶液を同濃度の亜硝酸ナトリウムに変更し、実験①と同様の手順で実験を行った。

#### 4. 2. 2 結果

以下に実験②の結果を示す。(図7, 表5)

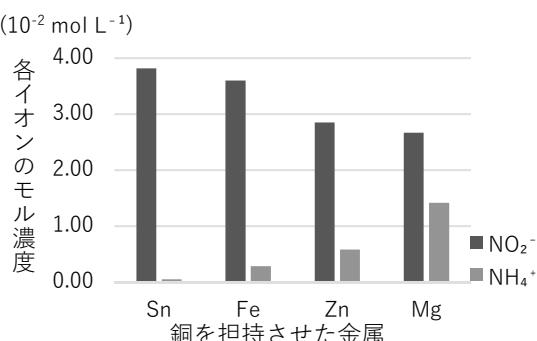


表 5. 実験②  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ のモル濃度 ( $10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$ )

	$\text{NO}_2^-$	$\text{NH}_4^+$
Sn	3.82	0.05
Fe	3.60	0.29
Zn	2.85	0.58
Mg	2.67	1.41

#### 4. 3 考察

実験①の結果から  $\text{NO}_2^-$  から  $\text{NH}_4^+$ への反応速度定数を求めると、イオン化傾向が小さいほど値が大きいという結果が得られた。一方で実験②では、 $\text{NO}_2^-$  から  $\text{NH}_4^+$ への還元効率は、イオン化傾向が大きいほど高いという、事前調査とは相反する結果が得られた。

のことから、私たちは、鉄やスズは、 $\text{NO}_3^-$  の還元において、 $\text{NO}_2^-$  を経由せずに  $\text{NH}_4^+$  へ直接還元する反応が比較的多く起きている可能性があるのではないかと考えた。

#### 5. 結論

実験①より、還元効率の面では、マグネシウムなどのイオン化傾向の大きい金属が圧倒的に優位であるが、実験②より、環境への負担の面を考慮すると、鉄やスズなどにも優れた点があると考えられる。

#### 6. 展望

- ・還元効率がよく、環境への負担が小さい還元方法を模索する
- ・ $\text{NO}_2^-$  を経由しない  $\text{NH}_4^+$ への還元が実際に行われているのか確かめる
- ・実用化に向けてより多くの観点から考察する

#### 7. 謝辞

今回の研究に進めるにあたり、京都大学大学院農学研究科応用生命科学専攻生体機能化学研究室助教授の北隅先生、宋和先生、同教授の白井先生をはじめ、多くの方に多大なるご指導、ご助力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

#### 8. 参考資料

##### 8. 1 用いた金属の毒性について

今回用いた金属粉末について、各イオンの経口投与でのラットの半数致死量は以下の通りである<sup>[8]</sup>。

$\text{Mg}^{2+}$  :  $40 \text{ mmol kg}^{-1}$

$\text{Sn}^{2+}$  :  $14 \text{ mmol kg}^{-1}$

$\text{Fe}^{3+}$  :  $18 \text{ mmol kg}^{-1}$

$\text{Zn}^{2+}$  :  $8.1 \text{ mmol kg}^{-1}$

##### 8. 2 $\text{NO}_3^-$ 濃度、 $\text{NO}_2^-$ 濃度の測定方法について

X の濃度が  $c_X \text{ mol L}^{-1}$  水溶液の a nm における吸光度を  $A_{(X,c_X,a)}$  とおく。ここで、X の濃度を  $c_X$  で表す。

X の a nm におけるモル吸光定数を  $\varepsilon_{(X,a)}$ 、セル長を

$l$  とおくと、Lambert-Beer の法則<sup>[9]</sup> より

$$A_{(X,c_X,a)} = \varepsilon_{(X,a)} l c_X$$

ここで、 $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$  の吸光度は無視できるものとする。また、使用した金属粉末から生じると考えられるイオンを  $M^{n+}$  とおく。試料の a nm における吸光度を  $A_{(a)}$  とすると、試料の吸光度は各成分の足し合合わせであると考えることができるから

$$\begin{aligned} A_{(a)} &= A_{(NO_3^-, c_{NO_3^-}, a)} + A_{(NO_2^-, c_{NO_2^-}, a)} + A_{(M^{n+}, c_{M^{n+}}, a)} \\ &= \varepsilon_{(NO_3^-, a)} l c_{NO_3^-} + \varepsilon_{(NO_2^-, a)} l c_{NO_2^-} + \varepsilon_{(M^{n+}, a)} l c_{M^{n+}} \quad \dots ① \end{aligned}$$

ここで、 $M^{n+}$  にあたるのは、鉄を用いた場合  $\text{Fe}^{3+}$ 、スズを用いた場合  $\text{Sn}^{2+}$ 、マグネシウムを用いた場合  $\text{Mg}^{2+}$  であるが、亜鉛を用いた場合、主に  $\text{Zn}^{2+}$  と  $[\text{Zn(OH)}_4]^{2-}$  であると考えられるため以下のようになると考えられる。

$$\begin{aligned} A_{(a)} &= \varepsilon_{(NO_3^-, a)} l c_{NO_3^-} + \varepsilon_{(NO_2^-, a)} l c_{NO_2^-} + \varepsilon_{(Zn^{2+}, a)} l c_{Zn^{2+}} \\ &\quad + \varepsilon_{([Zn(OH)}_4]^{2-}, a) l c_{[Zn(OH)}_4]^{2-} \end{aligned}$$

ここで、まず  $X=\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{SnCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{Na}_2[\text{Zn(OH)}_4]$ ,  $c_X=0.01 \text{ mol L}^{-1}$  の、 $280 \text{ nm} \leq a \text{ nm} \leq 415 \text{ nm}$  における 1 nm ずつの  $A_{(X,c_X,a)}$  を、分光光度計を用いて測定し、その値から  $\varepsilon_{(X,a)} l$  の値を求めた。

(注：スズを用いた場合、 $\text{Sn}^{4+}$  も生じると考えられるが、実験の都合上  $\text{Sn}^{4+}$  を用いた場合の  $A_{(X,c_X,a)}$  の値を測定出来なかったため、今回は考慮しなかった。)

次に、 $A_{(a)}$  の値を  $280 \text{ nm} \leq a \text{ nm} \leq 415 \text{ nm}$  において 1 nm ずつ、分光光度計を用いて測定した。

①を変形すると

$$A_{(a)} - \varepsilon_{(NO_3^-, a)} l c_{NO_3^-} - \varepsilon_{(NO_2^-, a)} l c_{NO_2^-} - \varepsilon_{(M^{n+}, a)} l c_{M^{n+}} = 0$$

$$0 \leq (A_{(a)} - \varepsilon_{(NO_3^-, a)} l c_{NO_3^-} - \varepsilon_{(NO_2^-, a)} l c_{NO_2^-} - \varepsilon_{(M^{n+}, a)} l c_{M^{n+}})^2 = 0$$

故に

$$0 \leq \sum_{280 \leq a \leq 415} (A_{(a)} - \varepsilon_{(NO_3^-, a)} l c_{NO_3^-} - \varepsilon_{(NO_2^-, a)} l c_{NO_2^-} - \varepsilon_{(M^{n+}, a)} l c_{M^{n+}})^2 = 0$$

(但し、 $a$  の単位は nm である。)

よって、 $A_{(a)}$ ,  $\varepsilon_{(NO_3^-, a)} l$ ,  $\varepsilon_{(M^{n+}, a)} l$  の値を上の式に代入し、第 2 遅が 0 に近づくような  $c_{NO_3^-}$ ,  $c_{NO_2^-}$ ,  $c_{M^{n+}}$  を計算すれば、 $[\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{NO}_2^-]$  を求めることができる。この計算には Excel を用いた。

但し、亜鉛を用いた場合、

$$\sum_{280 \leq a \leq 415} (A_{(a)} - \varepsilon_{(NO_3^-, a)}lc_{NO_3^-} - \varepsilon_{(NO_2^-, a)}lc_{NO_2^-} - \varepsilon_{(Zn^{2+}, a)}lc_{Zn^{2+}} - \varepsilon_{((Zn(OH)_4)^{2-}, a)}lc_{(Zn(OH)_4)^{2-}})^2 = 0$$

となる。

ここで、計算した  $c_{NO_3^-}$ ,  $c_{NO_2^-}$ ,  $c_{M^{n+}}$  を用いて、a と a の関数  $\varepsilon_{(NO_3^-, a)}lc_{NO_3^-} + \varepsilon_{(NO_2^-, a)}lc_{NO_2^-} + \varepsilon_{(M^{n+}, a)}lc_{M^{n+}}$  で表されるグラフを合成グラフとする。図8は、実験①-1、マグネシウムを用いた場合の実測したグラフと合成グラフを照合したものだが、確かによく一致していることが分かる。

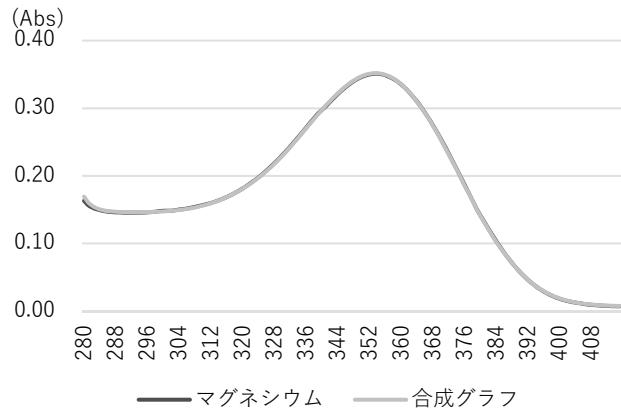


図8. 実測値によるグラフと計算によるグラフの照合

### 8. 3 インドフェノール青吸光光度法について

$NH_4^+$  は次亜塩素酸イオンの存在下フェノールと Berthelot 反応を起こし、インドフェノールを生じる。(図9)

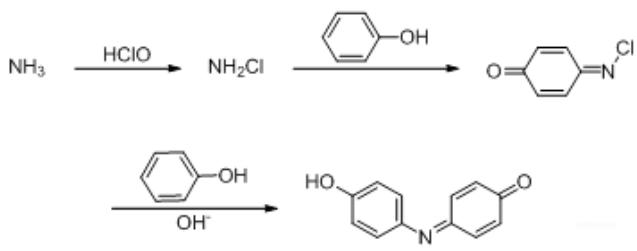


図9. Berthelot反応<sup>[10]</sup>

インドフェノールは、 $NH_4^+$ 量に応じた青色となるため、630 nm の吸光度を測定し、検量線から濃度を求めることができる。(図10)



図10：右から Zn, Sn, Mg, Fe の銅担持粉末を反応させた液体を処理したもの

以下、本実験での具体的な手順を説明する。なお、

実験手順を考えるにあたり、JIS K 0102 を参考にした<sup>[11,12]</sup>。

#### (1)前処理について

鉄、亜鉛、スズを用いた液体の場合、サンプル 100 mL に硫酸亜鉛溶液(硫酸亜鉛七水和物 10 g を水で 100 mL としたもの)を 1 mL を加えた後、よくかき混ぜてから水酸化ナトリウム-炭酸ナトリウム溶液(水酸化ナトリウム 30 g と無水炭酸ナトリウム 25 g を水で 200 mL としたもの)を 0.5 mL 程度加えて、再びよくかき混ぜ、しばらく放置した。上澄み液を濾過し、初めの濾液約 25mL は捨て、残りの濾液 10 mL を 100 mL に希釈して使用した。

マグネシウムを用いた液体の場合、サンプル 100 mL に上記の水酸化ナトリウム-炭酸ナトリウム溶液のみを 1.5 mL 加え、よくかき混ぜ、しばらく放置した。濾過し、初めの濾液約 25mL は捨て、残りの濾液 10 mL を 100 mL に希釈して使用した。

#### (2)1%次亜塩素酸ナトリウム溶液の調製について

本測定に用いた次亜塩素酸ナトリウム溶液は分解しやすいので、測定の都度以下の方法で調製した。

次亜塩素酸ナトリウム溶液（有効塩素 7~12%）10 mL を全量、フラスコ 250 mL にとり、水を標線まで加えた。この 10 mL を共栓三角フラスコ 300 mL にとり、水を加えて約 100 mL とした。よう化カリウム 1 g 及び酢酸溶液（酢酸の体積 1 と水の体積 1 とを混合したもの）6 mL を加えて密栓し、よく振り混ぜて約 5 分間放置した後、チオ硫酸ナトリウム溶液(チオ硫酸ナトリウム五水和物 6.30 g と無水炭酸ナトリウム 0.20 g を、メスフラスコを用いて水で 1 L に希釈したもの)で滴定した。溶液の黄色が薄くなったら、指示薬としてでんぶん溶液 ( $10\text{ g L}^{-1}$ ) 1 mL を加え、生じたよう素でんぶんの青い色が消えるまで滴定した。次の式によって有効塩素量  $N$  を算出した。

$$N[\text{w/v } \%] = a \times 0.000887 \times \frac{250}{10} \times \frac{100}{10}$$

$a$  : 滴定量 [mL]

0.000887: チオ硫酸ナトリウム溶液 1 mL の塩素相当量 [g]

$\frac{250}{10}$ : 10 mL を 25 倍に希釈

$\frac{100}{10}$ : 次亜塩素酸ナトリウム溶液 10 mL を 100 mL に換算

但し、1 w/v % は 100 mL 中に 1 g の意味である。

そして、次亜塩素酸ナトリウム溶液  $\frac{100}{N}$  mL を 100 mL メスフラスコに加え、標線までメスアップし、1%次亜塩素酸ナトリウム溶液を調製した。

#### (3)本操作について

(1)の前処理を行った試料 25 mL を 100 mL 三角フラスコにとり、EDTA 溶液(エチレンジアミン四酢酸二水素二ナトリウム二水和物 5 g を水に溶かして 100 mL にしたもの)を 1 mL とナトリウムフェノキシド溶液(水酸化ナトリウム 11 g を水で溶かして 55 mL にした

後、ホットプレートで融解させたフェノール 25 g を加え、溶解させて、放冷し、アセトン 6 mL を加え、水で 200 mL としたものを 10 mL 加えてよく混ぜた。次に、(2)で調製した次亜塩素酸ナトリウム溶液 5 mL を加え、水を加えて 50 mL にした後、栓をしてよく混ぜた。そして、約 30 分間放置し、これらの溶液の一部を吸収セルに移し、波長 630 nm 付近の吸光度を、分光光度計を用いて測定した。

#### (4) 検量線について

空試験として水 25 mL をとり、本操作と同様の操作を行って波長 630 nm 付近の吸光度を測定した。また、 $\text{NH}_4^+$ 標準液(塩化アンモニウム 2.97 g を、メスフラスコを用いて水で 1 L とし、この液体 10 mL を、メスフラスコを用いて 1 L に希釈したもの)10 mL, 5 mL, 2 mL, 1 mL をそれぞれ水で 25 mL に希釈し、本操作と同様の操作を行い、吸光度を測定した。(注:  $\text{NH}_4^+$ 標準液 1 mL 当たり  $\text{NH}_4^+$ は 0.01 mg 含まれる)

使用した  $\text{NH}_4^+$ 標準液の体積と 630 nm における吸光度の値は直線関係を示すため、Excel を使用して回帰計算を実行し、近似式を得た。

#### (5) $\text{NH}_4^+$ 濃度の算出について

(4)で得た近似式を用いて、本操作で得た液体の吸光度からサンプル 2.5 mL 当たりの  $\text{NH}_4^+$ 量を求め、以下の式を用いて試料中の  $\text{NH}_4^+$ のモル濃度( $10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$ )を算出した。

$$\begin{aligned} & \text{NH}_4^+ \text{濃度} [10^{-2} \text{ mol L}^{-1}] \\ &= (\text{吸光度より求めた } \text{NH}_4^+ \text{量} [\text{mg}]) \times \frac{1000}{2.5} \times \frac{1}{18.04} \times 10^{-3} \times 10^2 \\ & \frac{1000}{2.5} : \text{サンプル } 2.5 \text{ mL を } 1 \text{ L に換算} \\ & \frac{1}{18.04} : \text{NH}_4^+ \text{に関して mg を mmol に換算} \\ & 10^{-3} : \text{mmol を mol に換算} \end{aligned}$$

### 8. 4 反応速度定数の計算方法について

$\text{NO}_3^-$ が  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ の順に還元され、それぞれの反応次数が一次であると仮定すると、定数  $k_1$ ,  $k_2$ を用いて、 $\text{NO}_3^-$ が  $\text{NO}_2^-$ に還元される反応速度は  $k_1[\text{NO}_3^-]$ ,  $\text{NO}_2^-$ が  $\text{NH}_4^+$ に還元される反応速度は  $k_2[\text{NO}_2^-]$ と表せるから、各イオンの濃度変化は以下の 3 式のように表せる<sup>[3,9,13]</sup>。

$$\begin{cases} \frac{d[\text{NO}_3^-]}{dt} = -k_1[\text{NO}_3^-] \\ \frac{d[\text{NO}_2^-]}{dt} = k_1[\text{NO}_3^-] - k_2[\text{NO}_2^-] \\ \frac{d[\text{NH}_4^+]}{dt} = k_2[\text{NO}_2^-] \end{cases}$$

上の微分方程式を解き、初期条件( $t = 0$ において、 $[\text{NO}_2^-] = [\text{NH}_4^+] = 0$ であり、 $[\text{NO}_3^-] = [\text{NO}_3^-]_0$ とする)を代入すると、以下のようなになる。

$$[\text{NO}_3^-] = [\text{NO}_3^-]_0 e^{-k_1 t} \quad \dots (2)$$

$$\begin{cases} [\text{NO}_2^-] = [\text{NO}_3^-]_0 \frac{k_1}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) \quad \dots (3) \\ [\text{NH}_4^+] = [\text{NO}_3^-]_0 \left( 1 - \frac{k_2 e^{-k_1 t} - k_1 e^{-k_2 t}}{k_2 - k_1} \right) \end{cases}$$

(2), (3)式を変形して下の 2 式を得る。

$$k_1 = -\frac{1}{t} \ln \left( \frac{[\text{NO}_3^-]}{[\text{NO}_3^-]_0} \right) \quad \dots (4)$$

$$\frac{[\text{NO}_3^-]}{[\text{NO}_3^-]_0} + \left( 1 - \frac{k_2}{k_1} \right) \frac{[\text{NO}_2^-]}{[\text{NO}_3^-]_0} - e^{-k_2 t} = 0 \quad \dots (5)$$

実験①におけるデータを(4), (5)式にそれぞれ代入し、方程式を解くことで  $k_1$ ,  $k_2$ を得た。この計算には Excel を使用した。(但し、 $t = 24 \text{ h}$ ,  $[\text{NO}_3^-]_0 = 4.00 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$  であり、 $[\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{NO}_2^-]$ は、 $t = 24 \text{ h}$ における  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ の濃度である。)

### 8. 5 $\text{NO}_3^-$ が $\text{NH}_4^+$ へ直接還元される反応を考慮した場合の反応速度定数(参考)

$\text{NO}_3^-$ が  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ の順に還元される反応と、 $\text{NO}_3^-$ が  $\text{NH}_4^+$ へ直接還元される反応が並行して起こり、それぞれの反応次数が一次であると仮定すると、定数  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ を用いて、 $\text{NO}_3^-$ が  $\text{NO}_2^-$ に還元される反応速度は  $k_1[\text{NO}_3^-]$ ,  $\text{NO}_2^-$ が  $\text{NH}_4^+$ に還元される反応速度は  $k_2[\text{NO}_2^-]$ ,  $\text{NO}_3^-$ が  $\text{NH}_4^+$ に直接還元される反応速度は  $k_3[\text{NO}_3^-]$ と表せる。ここで、 $k_2$ を実験 2 のデータから計算した場合の  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ を算出してみる。それぞれのイオンの濃度変化は以下の 3 式のように表せる。

$$\begin{cases} \frac{d[\text{NO}_3^-]}{dt} = -(k_1 + k_3)[\text{NO}_3^-] \\ \frac{d[\text{NO}_2^-]}{dt} = k_1[\text{NO}_3^-] - k_2[\text{NO}_2^-] \\ \frac{d[\text{NH}_4^+]}{dt} = k_2[\text{NO}_2^-] + k_3[\text{NO}_3^-] \end{cases}$$

上の微分方程式を解き、初期条件( $t = 0$ において、 $[\text{NO}_2^-] = [\text{NH}_4^+] = 0$ であり、 $[\text{NO}_3^-] = [\text{NO}_3^-]_0$ とする)を代入すると、以下のようなになる。

$$[\text{NO}_3^-] = [\text{NO}_3^-]_0 e^{-(k_1+k_3)t} \quad \dots (6)$$

$$\begin{cases} [\text{NO}_2^-] = [\text{NO}_3^-]_0 \frac{k_1}{k_2 - k_1 - k_3} (e^{-(k_1+k_3)t} - e^{-k_2 t}) \quad \dots (7) \\ [\text{NH}_4^+] = [\text{NO}_3^-]_0 \left( 1 - \frac{k_2 e^{-(k_1+k_3)t} - (k_1 + k_3)e^{-k_2 t}}{k_2 - k_1 - k_3} \right) \end{cases}$$

以下に結果を示す。(図 10, 表 6)

実験②における  $\text{NO}_2^-$  濃度を  $[\text{NO}_2^-]'$  とすると、 $\text{NO}_3^-$  濃度は 0 であるから、 $[\text{NO}_2^-]'$  の変化は以下の式で表せる。

$$\frac{d[\text{NO}_2^-]'}{dt} = -k_2[\text{NO}_2^-]'$$

上の微分方程式を解き、初期条件( $t = 0$ において、 $[\text{NO}_2^-]' = [\text{NO}_2^-]'_0$ とする)を代入すると、以下のようになる。

$$[\text{NO}_2^-]' = [\text{NO}_2^-]'_0 e^{-k_2 t} \quad \dots \text{⑧}$$

今回、実験 2 のデータを使うにあたり、 $\text{NO}_2^-$  濃度よりも  $\text{NH}_4^+$  濃度のデータを使用する方が正確であると判断したため、 $[\text{NO}_2^-]' + [\text{NH}_4^+]' = [\text{NO}_2^-]'_0$  を用いて⑧式から⑨式に変形した。但し、 $[\text{NH}_4^+]'$  は実験②における  $\text{NH}_4^+$  濃度である。

$$[\text{NO}_2^-]'_0 - [\text{NH}_4^+]' = [\text{NO}_2^-]'_0 e^{-k_2 t} \quad \dots \text{⑨}$$

$t = 24 \text{ h}$ ,  $[\text{NO}_3^-]_0 = [\text{NO}_2^-]'_0 = 4.00 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$  とし、まず⑨式から⑩式を得る。

$$k_2 = -\frac{1}{t} \ln \left( \frac{[\text{NO}_3^-]_0 - [\text{NH}_4^+]'}{[\text{NO}_3^-]_0} \right) \quad \dots \text{⑩}$$

但し、 $[\text{NH}_4^+]'$  は実験②において、 $t = 24 \text{ h}$  における  $\text{NH}_4^+$  の濃度である。

次に⑥, ⑦式から⑪, ⑫式を得る

$$\begin{cases} k_1 + k_3 = -\frac{1}{t} \ln \left( \frac{[\text{NO}_3^-]}{[\text{NO}_3^-]_0} \right) \quad \dots \text{⑪} \\ k_1 = \frac{1}{t} \left( \frac{[\text{NO}_2^-]}{[\text{NO}_3^-]_0 - [\text{NH}_4^+]' - [\text{NO}_3^-]} \right) \ln \left( \frac{[\text{NO}_3^-]_0 - [\text{NH}_4^+]'}{[\text{NO}_3^-]} \right) \quad \dots \text{⑫} \end{cases}$$

但し、 $[\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{NO}_2^-]$  はそれぞれ、実験①において、 $t = 24 \text{ h}$  における  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  の濃度である。

⑩, ⑪, ⑫式に実験①, ②のデータを代入し、 $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  を計算した。

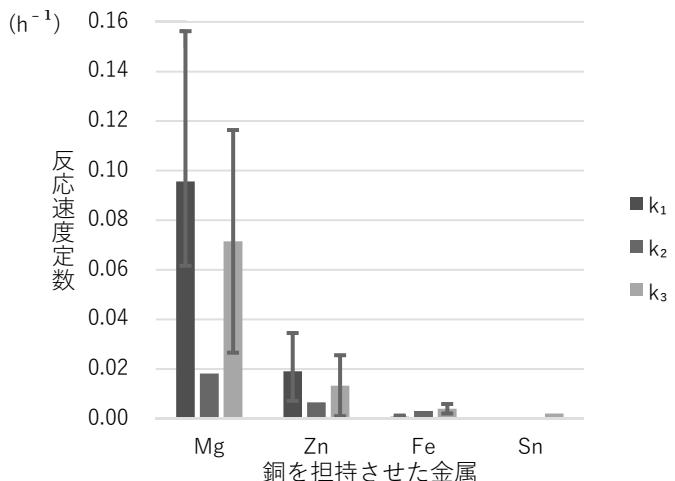


図 11. 実験①, ②の結果から算出した反応速度定数

表 6. (参考) 算出した  $k_1$   $k_2$   $k_3$  の値 ( $\text{h}^{-1}$ )

$\text{h}^{-1}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$
Mg 1回目	0.156	0.018	0.138
Mg 2回目	0.069	0.018	0.050
Mg 3回目	0.062	0.018	0.027
Zn 1回目	0.007	0.007	0.001
Zn 2回目	0.016	0.007	0.032
Zn 3回目	0.035	0.007	0.007
Fe 1回目	0.001	0.003	0.007
Fe 2回目	0.001	0.003	0.003
Fe 3回目	0.001	0.003	0.002
Sn 2回目	0.0001	0.001	0.002

実験によって値が大きく変動しているが、大まかな傾向として、 $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  全てにおいてイオン化傾向が大きいほど反応速度定数が大きいことが分かる。また鉄、スズにおいて、 $k_1$  に比べて相対的に  $k_3$  が大きいことが分かる。

## 9. 参考文献

- [1] Johan Rockström, Mattias Klum (著) ; 武内和彦, 石井菜穂子 (監修) ; 谷淳也, 森秀行ほか (訳) ; 「小さな地球の大きな世界; プラネタリー・バウンダリーと持続可能な開発」丸善出版 (2019)
- [2] 木下實, 大野公一ほか17名 ; 「化学基礎 ; 新訂版」実教出版 (2021)
- [3] 木下實, 大野公一ほか18名 ; 「化学 ; 新訂版」実教出版 (2021)
- [4] 数研出版編集部(編) ; 「フォトサイエンス ; 化学図録」数研出版 (2017)
- [5] 理化学研究所 : 温和な環境で働く人工脱窒触媒—微生物の仕組みに学ぶ環境浄化技術— ; 2018-03-29 ; [https://www.riken.jp/press/2018/20180329\\_2/](https://www.riken.jp/press/2018/20180329_2/)

(参照2021-6-21)

- [6] 岡倉慎司, 朝倉祝治;「中性溶液中における銅担持鉄粉を用いたNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の還元」電気化学および)工業物理化学62巻 4号 pp.354-355 (1994)
- [7] 日本原子力研究所;「硝酸態窒素による地下水汚染とその対策法」JAERI-Review-2003-007
- [8] 山本玲子;「生体為害性金属元素と材料」までりあ43巻 8号 pp. 639-642 (2004)
- [9] P. W. Atkins, J. de Paula (著);千原秀昭, 稲葉章, 鈴木晴(訳);「アトキンス 物理化学要論 第7版」東京化学同人 (2020)
- [10] clinisciences : Blood Ammonia Colorimetric Assay Kit ; <https://www.clinisciences.com/kit-de-dosage-ammonium-2644/blood-ammonia-colorimetric-assay-174582657.html> (参照2022-3-14)
- [11] 化学実験テキスト研究会(編);「環境化学」産業図書 (1998)
- [12] JISK0102:2019 工場排水試験方法 - Kikakurui <https://www.kikakurui.com/k0/K0102-2019-01.html> (参照 2021-7-19)
- [13] ト部吉庸;「化学の新研究;改訂版」三省堂 (2019)

# 酸化チタン(IV)の光触媒効果による水の電気分解の効率化

## Improving the Efficiency of Water Electrolysis Using Photolysis of Titanium Dioxide (IV)

岡田大知 高見涼介 平川直 山西瑛太  
Okada Daichi Takami Ryosuke Hirakawa Nao Yamanishi Eita

### 要約

チタン板に陽極酸化を行うことで酸化膜を形成し、メチレンブルーを用いた実験を行うことで酸化膜が形成されていることを確認できた。酸化時間の異なるチタン板を用いて水の電気分解に必要な最低電圧の比較を試みたが、確実な結果をえられなかった。

### ABSTRACT

An oxide film was formed on the titanium plate by anodic oxidation, and it was confirmed that an oxide film was formed by conducting an experiment using methylene blue. We attempted to compare the minimum voltage required for water electrolysis using titanium plates with different oxidation times, but were unable to obtain reliable results.

## 1. はじめに

- 研究の動機・「本多・藤嶋効果」について  
酸化チタン(IV)による光触媒反応に興味を持ち、その代表例である「本多・藤嶋効果」について調べることにした。本多・藤嶋効果とは酸化チタン(IV)に紫外線を照射することで光分解を起こし、水を酸素と水素に分ける反応のことである。当初 1972 年に発見された反応では、水の電気分解には本来 1.23V の電圧を加える必要があるが、陽極に酸化チタン(IV)を用い電気分解を行うことで、約 0.5V の電圧をかけるだけで水の電気分解が起こる。そこで、酸化チタン(IV)板の酸化度合いによって本多・藤嶋効果の効率が変化するのかを調べることが本研究の目的である。水の電気分解がより低い電圧で起こった時、効果の効率が高いとみなす。

## 2. 予備実験

### 2.1 実験内容

0.1mol/L の硫酸水溶液に、陽極にチタン板、陰極に白金板を入れ、電気分解を行った。この操作により酸化チタン(IV)板を作成した。酸化膜が張れているかを検証するため、メチレンブルーを用いて以下の実験を行った。

酸化チタン板は陽極酸化を行う時間を 30 分、45 分、60 分に分けた計三つを用意した。

メチレンブルーは太陽光によって分解されるが、酸化チタンにはその作用を高める効果があることが知られている。水 200mL にメチレンブルー水溶液を 6 滴加えた水溶液を等分し 4 つにはそれぞれ陽極酸化の時間を変えた酸化チタン(IV)板を加え、のこり 1 つには何も加えず、日光下に 3 時間放置した後、水溶

液の吸光度を測定、比較した。(写真 1)

### 2.2 吸光度について

吸光度とは、特定の波長の光（単色光）を溶液試料に当てた際、通過した光の強さを測定することで求められる、試料が吸収した光の強さの度合いことである。本実験の場合、メチレンブルーが少ないほど光が通りやすくなるため、吸光度は小さくなる。

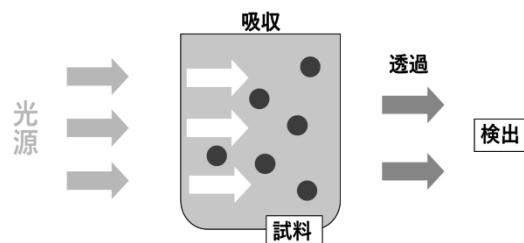


表 1 放置時の状態と吸光度の値の関係

No.	酸化チタン(IV)	太陽光	酸化時間	吸光度
①	×	×	—	0.652
②	×	○	—	0.369
③	○	○	30 分	0.378
④	○	○	45 分	0.331
⑤	○	○	60 分	0.308

### 2.3 予備実験の結果

結果は表1のようになった。酸化チタン(IV)板を加えて放置したもののはうが、加えていないものより吸光度の値が下がっていたため、酸化チタン(IV)板がメチレンブルーの光分解を促進したと言え、チタン板に酸化膜が張れていることが分かった。また、陽極酸化を長く行った酸化チタン(IV)板ほどメチレンブルーを多く分解したことが分かった。

## 3. 本実験

### 3.1 実験について

1. 0.01mol/L の水酸化ナトリウム水溶液中で、両極に白金電極を用いて水の電気分解を行った。

2. 1と同濃度の水酸化ナトリウム水溶液中で、陽極に酸化チタン(IV)板、陰極に白金電極を用いて水の電気分解を行った。なお、酸化チタン(IV)板には陽極酸化を50分間行つたものと100分間行つたものを使用した。本多藤嶋効果によって発生する気体の体積を比較することは難しいため、水の電気分解に必要な最低限度の電圧を調べることで比較することにした。それぞれの電極の距離は1cmに保ったまま、0.05Vずつ加える電圧を上げていき、水の電気分解が起こる最低の電圧を目視で確認した。

なお陽極酸化を50分行つたものは正確なデータが得られなかった。

### 3.2 結果

結果は表2のようになった。私たちで酸化膜を作成したチタン板を用いて実験を行ったとき、白金電極を用いた時よりも低い電圧で水の電気分解を行うことができた。そのため、酸化チタン(IV)板の効果が確認できた。

表2

+電極	-電極	最低電圧(V)
白金	白金	1.7
酸化チタン(IV) (100分)	白金	1.3
酸化チタン(IV) (50分)	白金	

### 3.3 反省

本実験における反省点としてまだ試行回数が少なく、また、目視でしか反応の有無が確認できていないため、確実なデータを得られないことが挙げられる。

50分間陽極酸化して作成した酸化チタン(IV)板と100分間陽極酸化して、作成した酸化チタン(IV)の比較ができるだけの十分なデータを得られていない。

### 4. まとめ

酸化チタン(IV)板作成の際の酸化時間を変えることにより、有機物の分解作用のより強い酸化チタン(IV)を得た。

そして、それらの酸化時間を変えた酸化チタン(IV)板を陽極に用いて水の電気分解を行うことで、「酸化チタン(IV)板を陽極に用いることで水の電気分解に必要な最低限度の電圧が低下する」ことを確認できた。しかし、まだ確証をもって結論付けることができるほど実験ができていないため、同じ条件下で繰り返し実験を行っていきたい。

### 5. 今後の展望

実験の試行回数が非常に少なく、実験結果の確実性に欠けるため、試行回数を増やして確かなデータを得て、考察したい。

また、酸化チタン(IV)板を作成する際の電気分解に有した時間と、水の電気分解をする際に必要な電圧には相関関係があるのかを明らかにしていきたい。

### 6. 参考文献

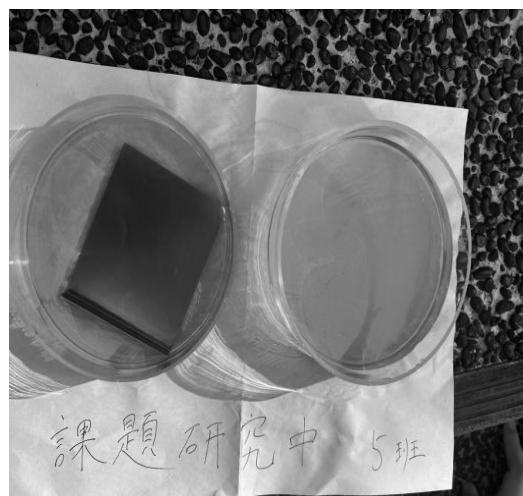
酸化チタンによる水の光分解－本多・藤嶋効果：藤嶋昭：2003年

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/electrochemistry/71/7/71\\_568/\\_article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/electrochemistry/71/7/71_568/_article/-char/ja)

陽極酸化による二酸化チタン光触媒の創製：水越克彰・正橋直哉：2010年

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/materia/49/2/49\\_55/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/materia/49/2/49_55/_pdf)

(写真1) 実際の予備実験の様子



# 障害物が水流に与える影響

## Effect of Obstructions on Water Flow

大野友樺 鍵井華 大久保翔馬 中澤悠來

Yuka Ono Hana Kagii Syoma Okubo Yura Nakazawa

### 要約

水流の中に置かれた障害物が水流にどのような影響を及ぼすのかについて興味を持ち、模式的な実験器具を作成し障害物が複数の形状になるよう配置して実験を行った。その結果、障害物は水流を一部分に集中させる効果や水流の速さを遅くする効果があり、その傾向を数値によるシミュレーションを用いて説明できる可能性があることが分かった。

### ABSTRACT

We were interested in how obstacles in water affect the water flow. We created a schematic experimental apparatus and did experiments with several shapes of obstacles. As a result, we found that obstacles have the effect of concentrating the water flow in a certain direction and slowing down the speed of the water flow. In addition, we considered how to simulate it using numerical.

## 1.はじめに

アマミホシゾラフグは、海底に砂による障害物を形成し、水流から産卵場所を守っているという説がある。

そこで、水中において障害物が水流に与える影響について興味を持った。

本研究では、様々な形状の障害物がある一点における水流の速さにどのような影響を与えるのかを調べることとする。また、その影響を数値的に考察し、一般的に成り立つかどうか、また、その影響はどのような要因によるものなのかを調べることとする。

## 2. 目的

障害物と水流の速さの関係を模式的な実験によって数値的に明らかにし、さらに、単純な形の障害物から複雑な形の障害物へと応用することを本研究の目的とする。

## 3. 予備実験

### 3-1. 目的

障害物とターゲットとしてのビー玉間の距離の違いによって、水流の遮蔽効果にどのような影響が現れるかについて調べる。

### 3-2. 方法

準備物：水槽（厚さ5mm 容積59.5×19.5×24mm）

水流発生装置（180L/h）

障害物【ナット（M5）、寸切ボルト（M5）

蝶番（40mm×90mm）】

- 1 水路に障害物とビー玉を置いた後、水流を発生させる。
- 2 ビー玉の動きを、スローモーションカメラで撮影する。
- 3 ビー玉の移動する速さを計算し、障害物が、ビー玉の位置（ターゲット位置）の水流に及ぼす影響の大きさ（水流に対する障害物の遮蔽効果）を調べる。

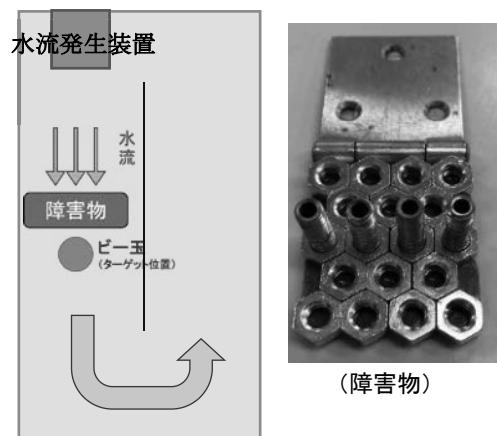


図1. 実験装置

### 3-3. 結果

横一列の障害物  
(右図) A~E 列のどこに配置しても、ターゲット位置の水流の速さには顕著な変化は確認できなかった。

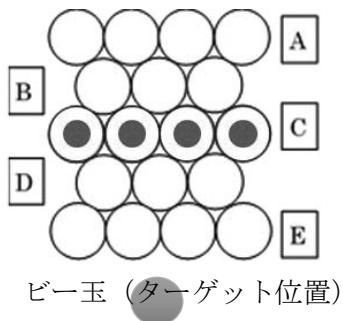


図2. 予備実験

## 4. 実験 I

### 4-1. 目的

障害物の密度の影響を調べることを目的とする。

### 4-2. 方法

障害物としてボルトをさす幅を三列と決め様々なパターンで障害物を設置し実験を行った。

### 4-3. 障害物の形状パターン

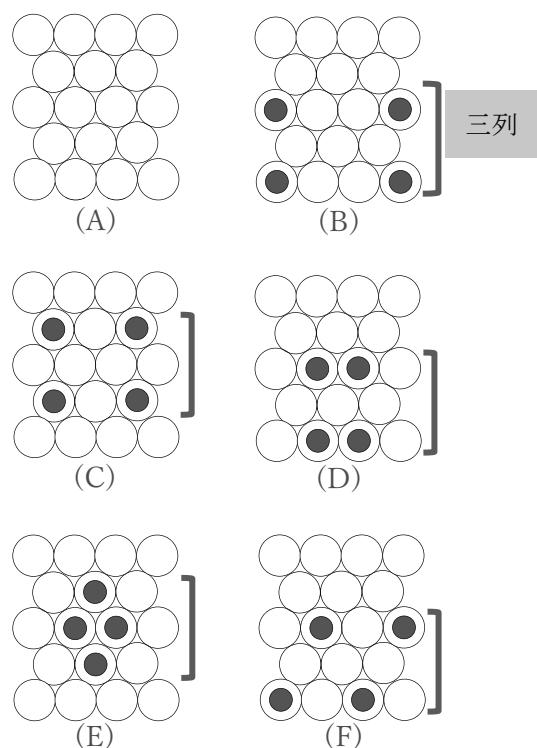


図3. 障害物パターン I

### 4-4. 結果

結果は以下のグラフのようになった。

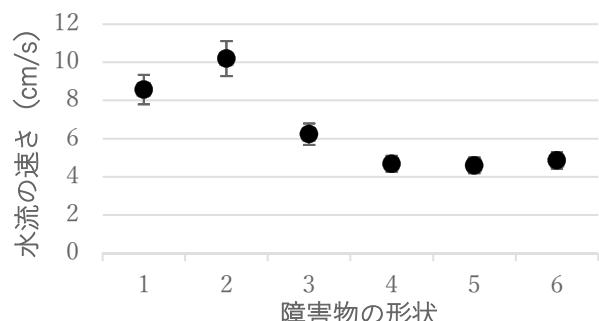


図4. 実験 I 結果

### 4-5. 考察

ボルトが中心にあるほど、障害物としての効果が高い。障害物 2 により水流が中央部に集中したため、水流が速くなった。

障害物としての効果は、ビー玉側から見た障害物の面積に関係する。

ボルトがずれて設置されている場合、障害物としての効果は高まる。

## 6. 実験 II

### 6-1. 目的

障害物の配置の水流に及ぼす影響をあきらかにするために、遮蔽面積が同じで、障害物の配置のみ異なる場合の障害物と水流の速さの関係を調べることである。

### 6-2. 方法

使用する幅は水流方向の 2 列分のみと固定し、水流の速さは予備実験と同様に測定を行った。用いた二つの障害物はそれぞれ凹型、凸型とよぶこととする。

### 6-3. 障害物の形状パターン

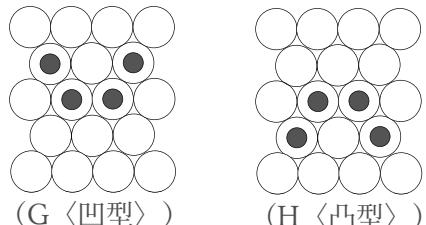


図5. 障害物パターン II

#### 6-4. 結果

実験 I と同様に水流の速さ (cm/s) を縦軸にとり, 障害物の形状を横軸においてグラフを作成した。

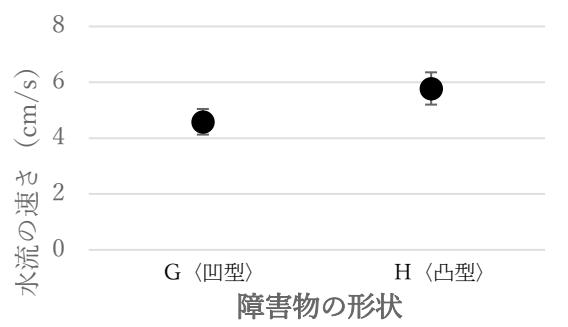


図 6. 実験 II 結果

凹型の配置より, 凸型の配置の方が水流は早くなった。

### 7. 考察

#### 7-1. 方法

障害物パターンの違いと水流変化を調べるために, 以下の条件に基づくシミュレーションを Excel を用いて行った。

#### 【条件 1】

障害物に当たった水流は, 左右均等に分かれ, その後直進すると仮定する。障害物の後ろの水流は, 暫定的に 0 とする。さらに, 斜め方向の水流や, 亂流の影響を加味するため, 流速のばらつき ( $\sigma$ ) を加えて評価した。

#### 【条件 2】

ターゲット (ビー玉) への影響指標として, 中央 3 列分の合計流速 ( $v$ ) を, 中央 5 列分の流速ばらつき ( $\sigma$ ) で割った値 ( $v/\sigma$ ) を用いた。初期流速 (障害物の手前) は, 水路の幅に対して均一ではないため, 実測した流速をもとにした相対値を入力した。

※  $\sigma$  は中央 5 列分の水流の速さの標準偏差である。E の場合を例に挙げると, 障害物の後ろの水流は暫定 0 としたが, 実際は隣の列の水流の回り込みや斜めの水流が発生していると考えられる。そこで, 中央 5 列分の標準偏差で水流の速さの値を割ることによって, 水流の速さの極端な偏りを解消しようと試みた。

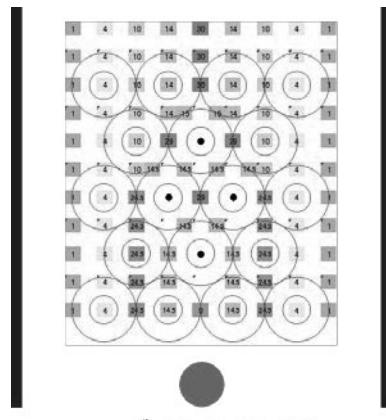


図 7. シミュレーション概要

#### 7-2. シミュレーション結果

シミュレーションの結果は以下のようになつた。

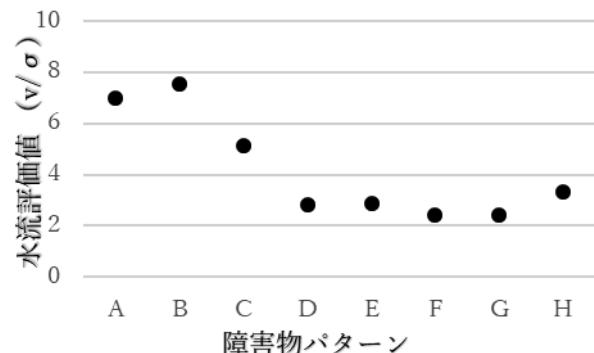


図 8. シミュレーション結果

実験 1 の結果のグラフと比較すると, シミュレーション結果は実験した際の結果と概ね一致している。

したがって, 今回行ったシミュレーション方法は, 障害物と水流の関係を考察するのに十分有効であると考えられる。

### 8. 今後の展望

考察したシミュレーション方法を用いて, フグの巣のような複雑な障害物についても, 水流に与える影響を評価していきたい。

また, 川の流れの研究などにも応用し, 現在使用されているコンクリートブロックなどに工夫を加えて, 災害の発生数や被害の減少に生かす可能性について探っていきたい。

## 9. 参考文献

アマミホシゾラフグが描く不思議なサークル

<https://nature-andscience.jp/pufferfish/#page-3>

(2020)

CROWN English Communication II New Edition

Lesson 3 Optional Reading Pufferfish in Love

発行者 株式会社 三省堂

国土交通省 東北地方整備局

人口工作物による危険個所

<http://www.mlit.go.jp/bumon/b00037/k0029>  
[0/river-hp/kasen/study/fieldnote/kiken2.html](http://river-hp/kasen/study/fieldnote/kiken2.html)

# 有孔ボードの水中移動時の揺動について Rocking of the Perforated Board When Moving in Water

扇幸太郎 岡室翼颯 傍士陽輝 安田岳叶  
Ogi Kotaro Okamuro Tsubasa Hoji Haruki Yasuda Gakuto

## 要約

ボード回りの乱流によって引き起こされる「揺れ」がボードの穴の有無に影響されるのかに興味を持った。形状を変えたボードで実験を行い、速度、揺れの大きさ、レイノルズ数について調べた。その結果、最も安定して揺動を抑制できたのは6穴のボードで、低速度帯では4穴が、高速度帯では8穴が最も揺動を抑制できると分かった。

## ABSTRACT

We were interested in whether the turbulence-induced shaking around the board was affected by the presence or absence of holes in the board. We conducted experiments with boards of different shapes and investigated the velocity, the magnitude of the shaking, and the Reynolds number.

As a result, we found that the board with 6 holes suppressed the swaying most stably, the board with 4 holes inhibited it best in the low velocity zone, and the board with 8 holes abrogated it best in the high velocity zone.

キーワード：揺動、レイノルズ数、穴の数

## 1. はじめに

水流の様子は様々な条件によって変動する。このうち、早い水流は物体に衝突したり管内を流れたりするときに流れの様子が大きく乱れ、乱流という状態になる。この乱流を抑制する方法として、穴の開いた平板を乱流の中に垂直に設置するという方法があるとわかっている。

また、平板を水中で地面に対して平行な状態で鉛直方向に動かすと、ある一定の速さを超えると、平板はその平行な状態を保たずに進行方向に対して垂直な向きに揺れだす。

以上の二点を受けて、本研究では、この平板の揺れが平板の周囲に流れる水流が乱流となることにより起こり、平板に穴を開けることで周囲の乱流が抑制され、平板の揺れが抑制されると仮説を立て、これを検証することを目的とする。

## 2. 実験 1

### 2. 1 目的

仮説をもとに、穴の開いていない平板と穴の開いている平板を、面を進行方向に向けて動かした際の進行の様子を記録し、穴の有無によりその挙動にどのような違いが出るか確認する。また平板自体の形状を変え、同様に平板の挙動を確認する。

### 2. 2 実験方法

#### 2. 2. 1 準備物

アクリル板（3mm厚、比重1.19）、釣り糸（蛍光ナイロン）、重り

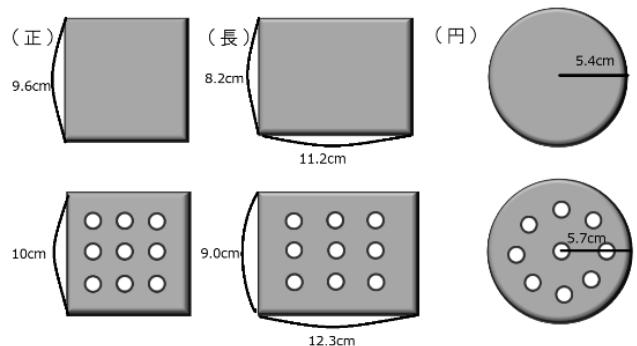


図 1

アクリル板は正方形、長方形、円の三種で、それぞれ穴有りのものと穴無しのものの二種を用意し、計6枚用意する。穴の開け方は図1の通りで、穴の直径は1cmとする。アクリル板の端の均等な4か所に極小の穴をあけ、そこに釣り糸を通してアクリル板の重心から高さ5cmの点で1本にまとめる。

なお、4枚の板の上面の面積は、全てほぼ同じに統一している。これには板の重量を揃えて物理条件を揃える目的がある。

#### 2. 2. 2 手順

スタンド、棒、滑車を用いて作成した図2のような装置を用いて、水中に沈めたアクリル板を一定の力で引き上げ、上昇中にアクリル板が揺れない重りの限界重量を測定し、その時に底から水面に上がるまでに要した時間から、上昇における平板の平均速度を算定する。

なお本実験では膳所高校のプール(水深 1.3m)にアクリル板を沈めて実験を行った。

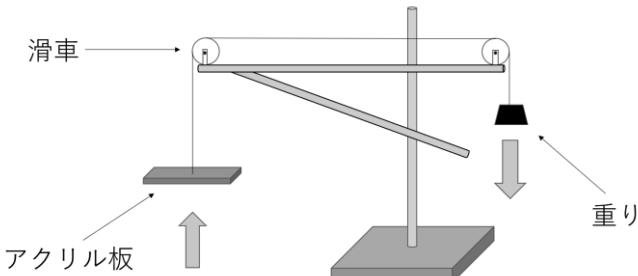


図 2

### 2.2.3 補足

本研究において、アクリル板が「揺れない」というのは、それが傾くことなく地面に対して平行を保ったまま上昇することを指し、これに対して左右に動く、地面に対して平行を保たずに上昇することを、「揺れる」と定義する。

また、水中にある物体周りの水流の様子を考える上で重要な値としてレイノルズ数(Re)がある。この値は次の式で定義される。

本研究ではこの値を参考にして水流の様子とア

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu}$$

$Re$  = (レイノルズ数)  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] = (流体の密度)  
 $v$  [m/s] = (代表流速)  
 $l$  [m] = (代表長さ)  
 $\mu$  [Pa · s] = (流体の粘性係数)  
 $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] = (流体の動粘性係数)

クリル板の揺れの関係を考察する。

### 2.3 実験結果と考察

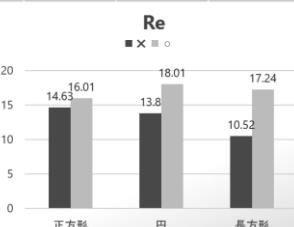
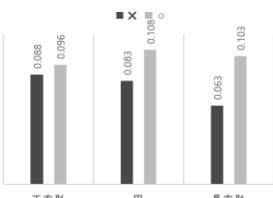
\*レイノルズ数の算出においては、 $l$ をアクリル板の厚みの 0.003m に、流体の密度を 1000kg/m<sup>3</sup> に、流体の粘性係数を参考資料④を利用してそれぞれ設定した。

表 1

#### 【揺れの境界値】

アクリル板	穴なし 正方形	穴あり 正方形	穴なし 長方形	穴あり 長方形	穴なし 円	穴あり 円
おもりの質量 [g]	14.0	16.5	14.5	17.3	13.0	19.5

速度[M/S]



実験結果より、穴ありのアクリル板は穴なしのアクリル板に比べて周囲の流速が大きい状態でも揺れることなく上昇することがわかる。また、平板自体の形状によっても揺れ始める速度は変化しているが、いずれにおいても同形状のものを比べると穴ありのアクリル板の方が揺れない限界速度は大きくなっていることがわかる。したがって穴を開けることでアクリル板の揺動は抑制されると考えられる。

また一般に、レイノルズ数が極めて大きくなるまでは、その値が大きくなるほど物体の周囲の乱流は起こりやすくなる。

したがって、穴ありのアクリル板は穴無しのアクリル板に比べてよりレイノルズ数の大きい、つまり乱流の起こりやすい環境においても揺れづらくなっていると考えられる。

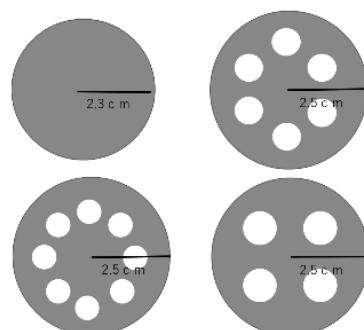
### 3. 実験 2

#### 3.1 目的

実験 1 を受けて、次に、穴の数を変化させた状態での平板が水中を上昇する様子を観察することで、穴の数の変化によって穴の揺動の抑制効果にどのような変化があるかを考察する。

#### 3.2 実験方法

##### 3.2.1 準備物



4穴 穴半径0.5cm  
6穴 穴半径0.41cm  
8穴 穴半径0.35cm

図3

2.2.1 と同様の方法で、図 3 のように穴の開けていない板、4つ、6つ、8つの穴を開けた板の計4枚の円形の平板を作成する。ただし、釣り糸を結ぶ高さは 2.5cm とする。

なお、これら4枚の板の穴の総面積及び上面の面積はすべて統一している。また以降これら4枚の板をそれぞれ0穴、4穴、6穴、8穴の板と呼称する。

### 3. 2. 2 手順

実験1と同様にして、アクリル板を引き上げ、横からその上昇の様子を撮影し、その動画を基に板の水平方向の揺れ幅、揺れの回数、水面到達までの時間を計測する。また重りの重量を変えた場合の様子も記録する。

なお、実験2では底面が一辺20cmの正方形で高さ65cmの水槽を用いた。

### 3. 3 実験結果と考察

\*レイノルズ数の算出は実験1と同様に行った。ただし流体の密度については999kg/m<sup>3</sup>に設定した。グラフの横軸は重りの個数であり、重りは一個0.28gである。

各データについては7の付録に掲載している。

Re

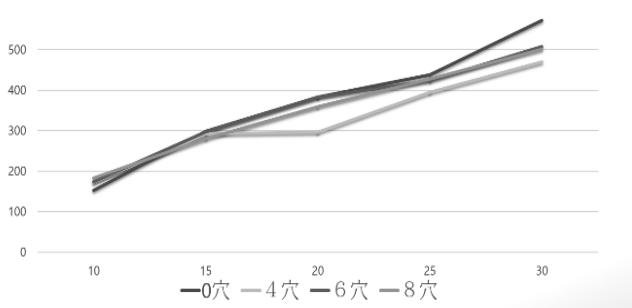
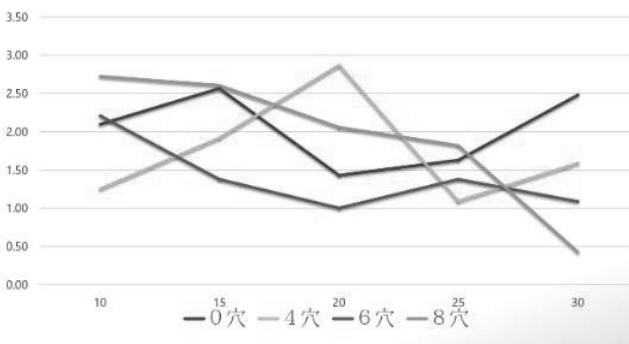
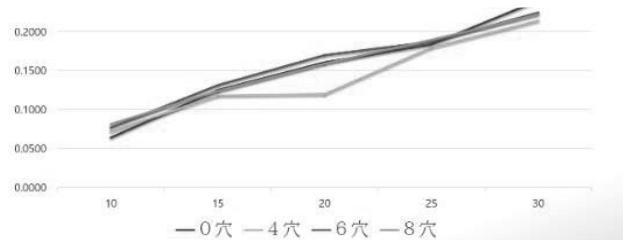


図4  
揺れ幅平均【cm】



速度【m/s】

図5



実験結果より、各板の速度は重りの重量が上がるにつれて大きくなっていたが、各重量での速度の差は大きくなかった。また0穴の板は揺れ幅の変動が大きかったが全体として揺れ幅は大きかった。

加えて6穴、8穴については重りの重量が大きくなるにつれて、その揺れ幅は小さくなっている。6穴はほとんどの重量でほかの板よりも揺れ幅が最も小さく、全体として最も揺れ幅を抑制できていたと考えられる。8穴は低速度の間は揺れ幅が大きかったものの高速度になるとかなり揺れの抑制効果が高くなっていた。対して4穴は低速度帯で揺れ幅が小さくなっていた。

またレイノルズ数自体については、重りの重量が小さい間は各板にほとんど差がみられないが、重りの重量が大きくなるとその差が大きくなっていた。

したがって今回の実験の中では、最も安定して揺動を抑制できたのは6穴の板であったと考えられ、低速度帯では4穴が、高速度帯では8穴が最も揺動を抑制できたと考えられる。

### 4. 結論

実験結果より穴ありの平板と穴なしの平板が水中を上昇する際、穴ありの平板の方が穴なしの平板に比べて揺動が小さくなることがわかり、穴をあけることで水中を移動する平板の揺動を抑制できるとわかった。

また穴の総面積が等しくても穴の数が変化すると穴の揺動の抑制効果は変動し、本研究では6つの穴を開けたものが安定して最もその効果を高められると考えられる。

また速度の変化によってもその抑制効果は変動し、低速度帯で最も揺動を抑制できるのは4穴であり、高速度帯で最も揺動を抑制できるのは8穴であると考えられる。

### 5. 今後の課題

実験2において4穴の実験結果のみがほかの穴の空いた板と異なる値の変化をしていた。この要因については追加実験などを通して考察していくたい。

また、現状では穴を開けることで揺動を抑制できるということは示せているものの、そのメカニズムや乱流と揺動の詳しい関係については示せていない。

今後はこれらのことについて、上昇中のアクリル板周りの水流の様子を可視化して観察する実験などを通して揺動の様子と乱流について考察していく。



# 回転系における独楽の回転

## Rotation of Spinning Tops in a Rotating System

植木想奈 大井悠生 野田雛乃 川口諒真  
Sona Ueki Yuki Oi Hinano Noda Ryoma Kawaguchi

### 要約

回転座標系で進行する物体にコリオリの力がはたらくことが分かっている。この研究において地球の自転によるコリオリの力は独楽の回転時間にほとんど影響を与えないが、より角速度の大きい回転系ではコリオリの力が少し影響を与えることが明らかになった。また、独楽の回転速度が遅いほど系の回転による差が大きいということが分かった。加えて、独楽が斜面上で回転するときは自転方向と公転方向が違ったが、平面上で回転するときは自転方向と公転方向が一致することが判明した。

### ABSTRACT

It is known that the Coriolis force acts on an object traveling in a rotating coordinate system. In this study, the Coriolis force due to the earth's rotation has little effect on the rotation time of the tops of the top, while the Coriolis force has a small effect for tachometers with larger angular velocities. It was also found that the slower the rotation speed of the piece, the greater the difference due to rotation of the system. In addition, it was found that when the piece rotated on a slope, the direction of rotation and orbit were different, but when the piece rotated on a plane, the direction of rotation and orbit coincided.

キーワード:コリオリの力、独楽

## 1. はじめに

一般的に回転系で物体が進行するとき、系の自転により北半球では進行方向に対して右向きに、逆に南半球では進行方向に対して左向きにコリオリの力がはたらくことが知られている。コリオリの力とは、回転座標系上で移動した際に移動方向と垂直な方向に移動速度に比例した大きさで受ける慣性力の一種である。この力が回転体の運動にどのような影響を及ぼすのか興味を持ち、その一つとして独楽を対象として研究を行った。

また、ここで今回用いるコリオリの力について説明する。コリオリの力の公式は以下の通りである。

$$F=2mv\Omega \sin \phi$$

$m$ は運動をしている物体の質量、 $v$ は運動をしている物体の速度、 $\Omega$ は回転座標系の角速度(この中で物体が運動している)、 $\Phi$ は回転座標系の回転軸に対する接平面の角度を表している。本実験において運動している物体とは独楽を指す。

## 2. 実験 1

### 2. 1 目的

独楽自身の回転方向が独楽の回転時間にどれほどの影響を与えるかを調べ、地球の自転が独楽の回転に及ぼす影響について調べることを目的としている。

### 2. 2 実験装置

独楽を一定の速度で回転させるために装置を作成した。プラスチック製の筒の中にモーターが中央に位置するように発砲スチロールを使って固定する。また、そのモーターには真ん中に小さな穴が空いた円盤を取り付けている。この穴に独楽の上部の先端をはめることでモーターの回転を利用し、独楽を回転させることができる。

また、この実験で用いた台を台 A とする。

### 2. 3 方法

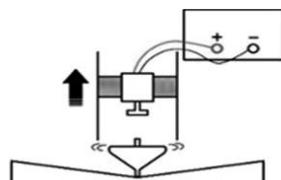


図 1 実験装置

- ①電源装置に繋ぎ、モーターを回す。
- ②筒を真上に上げ、時間の計測を始める。
- ③独楽の側面が台 A につくと計測を止める。

### 2. 4 結果



図 2 独楽の回転方向と回転時間の関係  
独楽の回転時間は時計回り、反時計回り共に平均 2 分 6 秒だった。

## 2.5 考察

コリオリの力の大きさを計算する。

地球の自転の角速度:  $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$

独楽の質量:  $m = 0.015 \text{ kg}$

日本の緯度:  $\phi \approx 37^\circ$

独楽の速度:  $v \approx 0.3 \text{ m/s}$

としてコリオリの力の公式に代入すると  $F = 3.95 \times 10^{-7} \text{ [N]}$  という結果が得られた。

コリオリの力を計算した結果、地球からはたらくなべてコリオリの力はとても小さく、実験結果にはほとんど影響を与えていなかったと考えられる。

## 3. 実験 2

### 3.1 目的

実験 1 の考察からわかるように、コリオリの力を小さくしている主な要因は地球の角速度によるものだと考えられるので、電動回転台の上にのせて角速度を大きくし、コリオリの力による影響を調べる。

### 3.2 方法

実験 1 と同様の装置を電動回転台の上に乗せ、電動回転台の角速度を一定にして、独楽の回転方向を変えて独楽の回転時間を計測した。

### 3.3 結果

結果は、図 3 のようになった。回転時間の平均は、時計回りが 2 分 3 秒、反時計回りが 2 分 2 秒だった。中心から回転を始めた独楽は最初、台 A の外側を回りやがて中心に収束する。

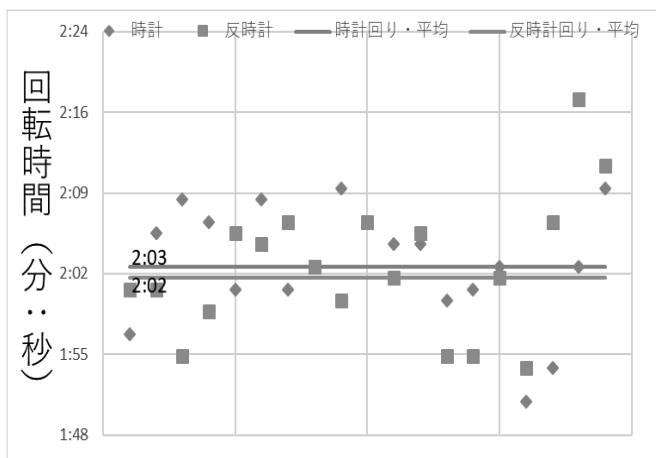


図 3 独楽の回転方向と回転時間の関係

ここで考察 1 と同じようにコリオリの力を計算した。本実験において接平面とは電動回転台の円盤を指す。

独楽の質量:  $m = 0.015 \text{ kg}$

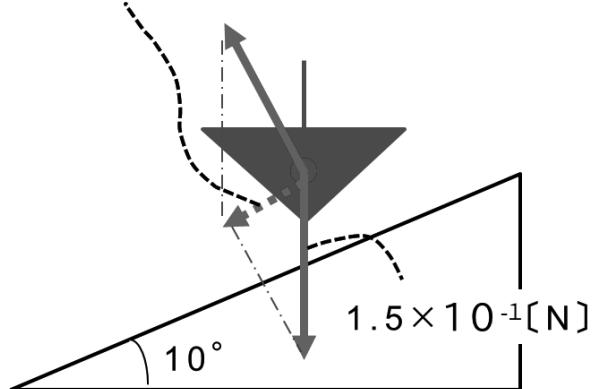
独楽の速度:  $v \approx 0.3 \text{ m/s}$

電動回転台の角速度:  $\Omega = 0.46 \text{ rad/s}$

電動回転台における回転軸に対する円盤の角度  
:  $\Phi = 90^\circ$

としてコリオリの力の公式に代入すると  $F = 4.14 \times 10^{-3} \text{ [N]}$  という結果が得られた。

$2.6 \times 10^{-2} \text{ [N]}$



コリオリの力 :  $F = 4.14 \times 10^{-3} \text{ [N]}$

図 4

斜面上で独楽に働く重力の斜面に平行下向きの力を計算したところ  $2.6 \times 10^{-2} \text{ [N]}$  という結果が得られた。このことより、コリオリの力はこの力の  $1/6$  の大きさであることがわかった。

また、斜面上で独楽が反時計回りに自転するときは時計回りで公転し（図 5），反対に時計回りに自転するときは反時計回りで公転するということが分かった。

### 3.4 考察

独楽が反時計回りに自転する時、台 A の上を時計回りに公転するので、コリオリの力は常に中心方向にかかることとなり台 A の中心に早く収束すると考えられる。独楽が時計回りに回る時はその逆であると考えられる。

独楽が止まるのは空気抵抗や台 A との間に生じる摩擦力が主な要因である。しかし、独楽の断面積が小さいため空気抵抗はほとんど作用しない。故に独楽が回転を停止する最大の要因は台 A との間に生じる摩擦力である。

摩擦力は垂直抗力に比例する。平面上で独楽にはたらくなべて垂直抗力は、斜面上で独楽にはたらくなべて垂直抗力よりも大きいため、独楽がほぼ平面である台 A の中心で回転するときのほうが大きな摩擦力がかかる。早く中心に収束する反時計回りに自転する独楽のほうが早い段階からより大きな摩擦を受け始め止まるまでの時間が短くなる。

以上より回転台の回転によるコリオリの力により反時計回りに自転する独楽は回転時間が短くなると考えられる。

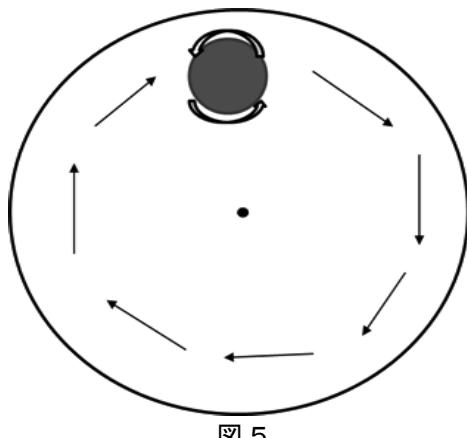


図 5

## 4. 実験 3

### 4. 1 目的

台 A を外していくつかの条件で独楽を回すと電動回転台から落ちる時と落ちない時があった。先行研究によると電動回転台上で一定の条件でボールを転がすとボールが電動回転台から落ちずその場で回り続ける場合がある。そこで電動回転台の角速度と独楽の回転数の関係を調べることとした。

先行研究から独楽の公転の速度と電動回転台の角速度が同じくらいになったときに電動回転台上で回転している時間が最も長くなると考えられる。

### 4. 2 方法

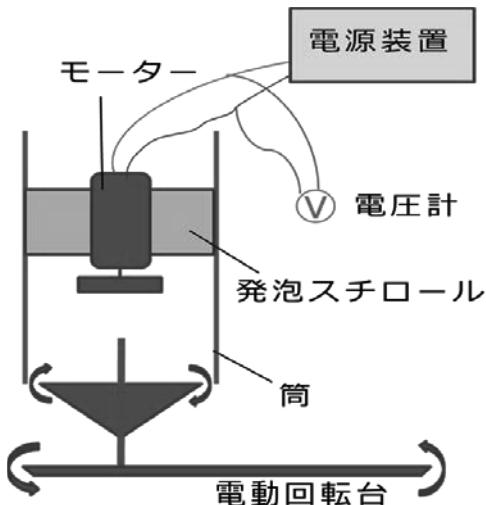


図 6

実験 2 と同様の操作を、台 A を取り除いて電動回転台上で直接独楽を回して行う。電動回転台の角速度と電源装置の電圧を変化させ独楽が電動回転台上から落ちるまでの時間を計測する。

## 4. 3 結果

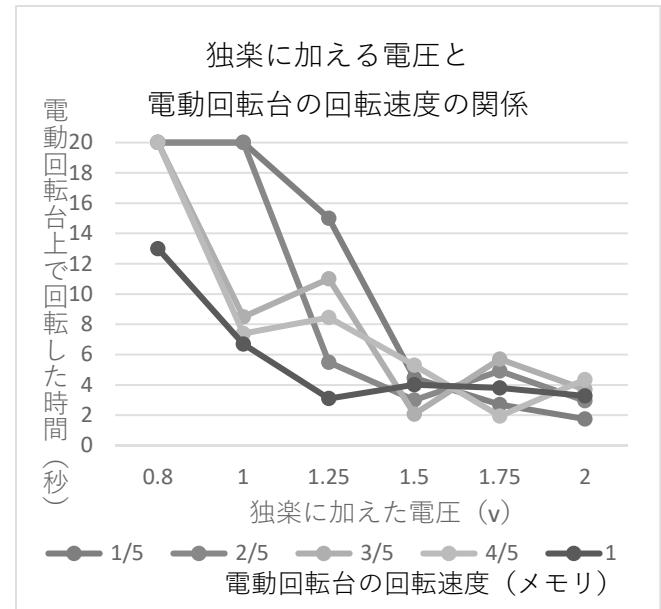


図 7

上のグラフにおいて電動回転台上から独楽が落ちなかつた場合はグラフの見やすさのため 20 秒としてグラフを作成した。尚、回転時間は 2 回計測した値の平均値とした。

また、本実験とは直接関係はないが平面で独楽を回したときは斜面で回した時と違い自転の向きと公転の向きが一致した。

### 4. 4 考察

電動回転台の回転速度に関わらず電圧が小さいまま独楽の回転速度が小さい程、電動回転台上で回り続けた時間が長い傾向にある。また、電圧が大きいつまり独楽の回転速度が大きい程、電動回転台上で回り続けた時間が短い傾向にある。これらのことより、独楽に加えた電圧が小さいほど電動回転台上で回転し続けた時間が長くなると考えられる。そのため、さらに回転速度を小さくすると電動回転台の回転との調和がとれる値が存在すると考えられる。

## 5. 今後の展望

- ・装置を改良してより正確な実験を行う。
- ・実験 2、実験 3 の試行回数を増やしより正確な実験結果を得る。
- ・ハイスピードカメラを用いて独楽の速度を計測し、コリオリの力をより正確に計算する。
- ・回転時間以外の指標（独楽の角速度の変化など）を用いてコリオリの力の影響を考察する。

・平面と斜面では独楽の公転の方向が逆になった。この現象について我々はジャイロ効果が深く関わっていると考えている。このことについて考察していく。

## 6. 参考文献

- ・基礎物理学シリーズ 副島雄児 杉山忠男
- ・ゼロから学ぶ力学 都築卓司
- ・大津市科学館 〈スピンドィスク〉  
[http://www.otsu.ed.jp/kagaku/02\\_exhibition/index.html](http://www.otsu.ed.jp/kagaku/02_exhibition/index.html)

# 石の回転が水切りに及ぼす影響

## The Effect of Rotation of a Stone on Stone Skipping

林駿佑 水谷匡寿 屋舗樹希 丹羽琴美

Syunsuke Hayashi Masatoshi Mizutani Isuki Yashiki Kotomi Niwa

### 要約

石の回転が水切りにどのような影響を及ぼすのかに興味を持ち、石を回転させながら発射する装置を作成して実験を行った。跳ねた回数の実験、縦回転の回数の実験、一度跳ねた後の距離の実験、一度跳ねた後の距離の実験についての結果から、回転数を上げると石の軌道が安定し、石が水の影響を受けにくくなり、跳ねやすくなることがわかった。

### ABSTRACT

We were interested in how the rotation of the stone skipping, so we created a device to launch the stone while rotating it and conducted experiments. According to the results of the experiments on the number of skips, the number of vertical rotations, the distance after the stone skips, and the distance after it skips, we succeeded in demonstrating the effects of two major types of stone rotation on stone skipping using actual measurements: the trajectory of the stone becomes more stable when the rotation speed is increased, and the stone becomes less affected by water.

キーワード：水切り、石の回転、水への影響

## 1. はじめに

水切りの仕組みや投げ方と跳ねる回数の関係に興味を持ち、過去の課題研究を調べたところ、石を斜面に沿って滑らせる実験を行っていたが、思ったような結果は得られていなかった。そこで、石の回転が水切りにおける重要な要素であると考え、石を回転させながら発射する装置の作成を試みた。

過去の他の研究によって、石が最もよく跳ねるための角度は、石と水面の角度が約20度になるときであり、石の形状は理論上レンズ型や平型が良いとされることがわかっている。しかし、石の回転との具体的な関係性についてはまだわかっていない。

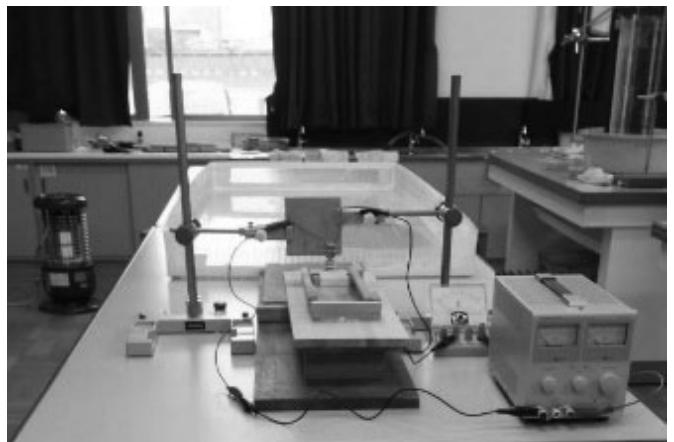
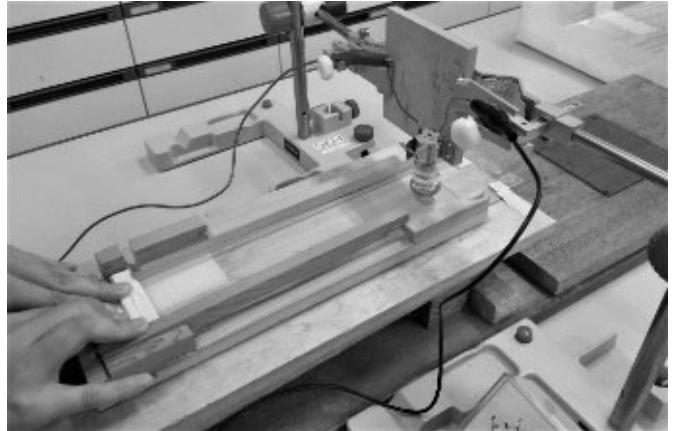
よって本研究は、石の回転が水切りにどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験方法

### 2.1 装置

写真のような装置を作成した。モーターに磁石を取り付けた石を、ゴムの張られた木の板を引いて手を離すことでの押し出す仕組みになっている。

セメントを固めて磁石を貼り付け、石のモデルを作成した。石の直径は約3cm。





## 2. 2 定義

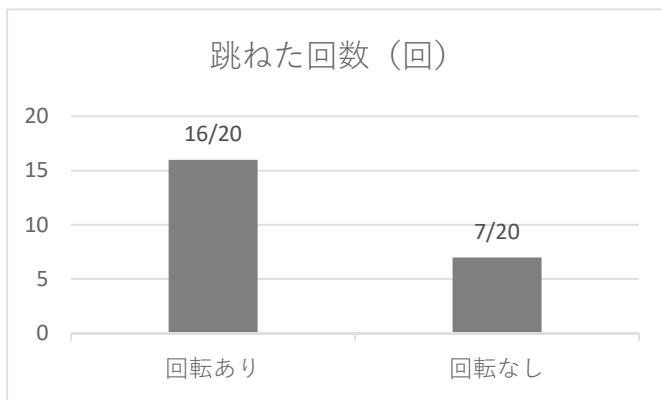
本研究では、発射された石が一度着水したあと、少しでも水面から離れた状態を石が「跳ねた」と定義する。

## 2. 3 実験(1)

石を回転させた場合と回転させない場合に分け、それぞれ20回ずつ試行を行い、石が跳ねる割合（20回中何回跳ねたか）（以下、跳ねた回数とする）を測定した。なお、石を回転させる場合、回転数を30回/sとした。また、それぞれの場合においてスローモーション動画の撮影を行った。

## 2. 4 結果(1)

グラフ1



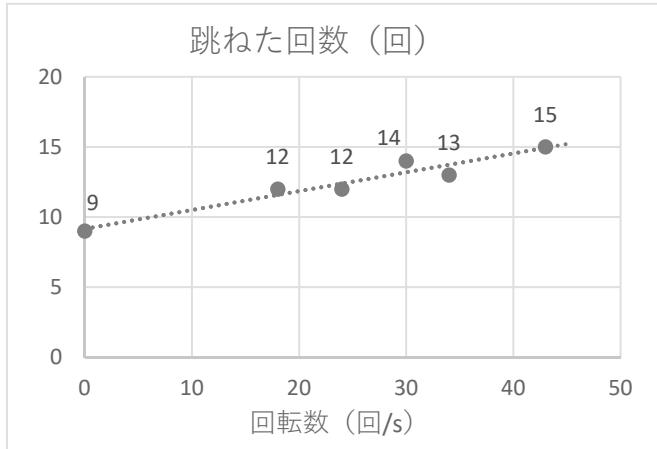
スローモーション動画の観察によって回転ありのほうが回転軸が安定することが分かった。

## 2. 5 実験(2)

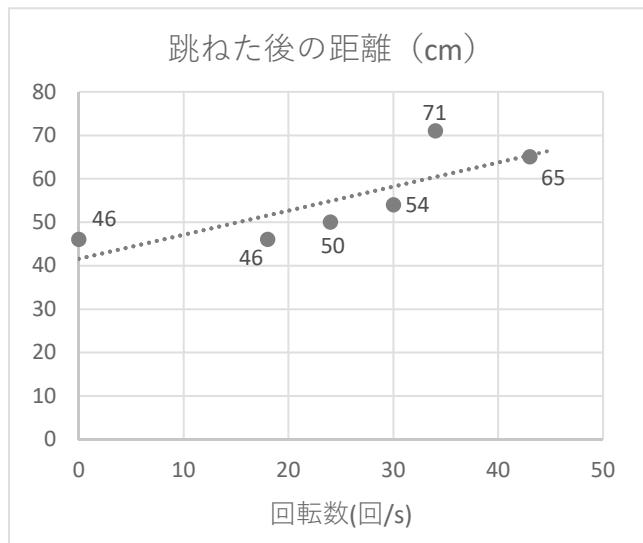
石の回転なし、回転あり（回転数は18回/s、24回/s、30回/s、34回/s、43回/s）の場合においてそれぞれ20回ずつ試行を行い、石が跳ねた回数、石が跳ねた場合の石が最初に着水した位置と次に着水した位置との距離（以下跳ねた後の距離とする）及び最初に着水し、次に着水するまでの石の縦回転の回数を測定した。

## 2. 5 結果(2)

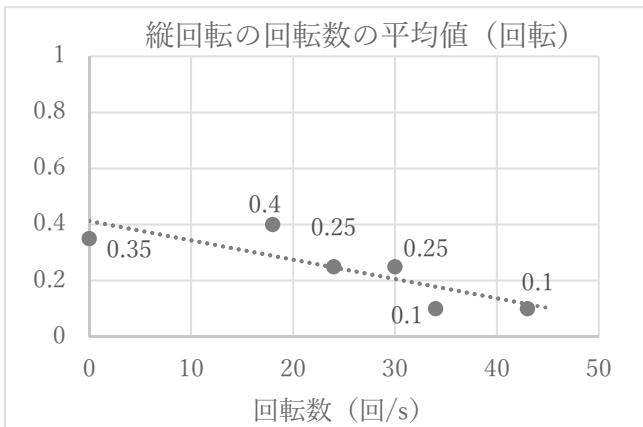
グラフ2



グラフ3



グラフ4



## 3. 実験結果と考察

### 3. 1 実験(1)について

グラフ1のように、回転させた石のほうが回転させていない石の2倍以上の確率で跳ねるという結果が得られた。

この結果について、回転によって軸が安定し跳ねやすくなっているのではないかと考察した。

### 3. 2 実験(2)について

#### 3. 2-1 石が跳ねた回数に関して

実験①の結果を受け、石の跳ねる割合と軸の安定の関連性を調べた。

グラフ2から、石の回転数と石が跳ねる割合について一定の関連性があることがわかる。回転数が上がるほど石の軸の安定性は上がるため、それによって跳ねる割合も上がったと考えられる。

#### 3. 2-2 石の縦回転に関して

水面に当たって跳ね上がった後も縦回転が起こりにくくなっているため、回転数が多いほど、着水後の軌道も安定していることがわかる。

#### 3. 2-3 石が跳ねた後の距離に関して

石が着水した瞬間にはたらく力は、図1における $F_{\perp}$ ,  $F_{//}$ の2つである。（石は図1のような理想的な物体とし、空気抵抗は無視する。さらに、水を摩擦のある水平面と仮定する。）

回転数を上げると、跳ねた後の距離が大きくなっているので水が $F_{//}$ によって石に及ぼす影響が小さくなり水平方向の速さの減少率が減ったと考えた。（ $F_{\perp}$ は回転数の変化に依存しないと考えた。）

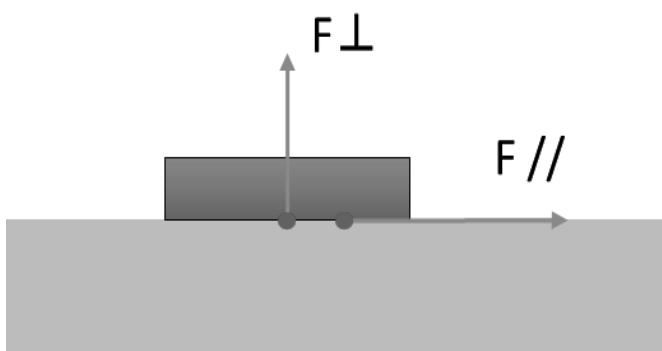
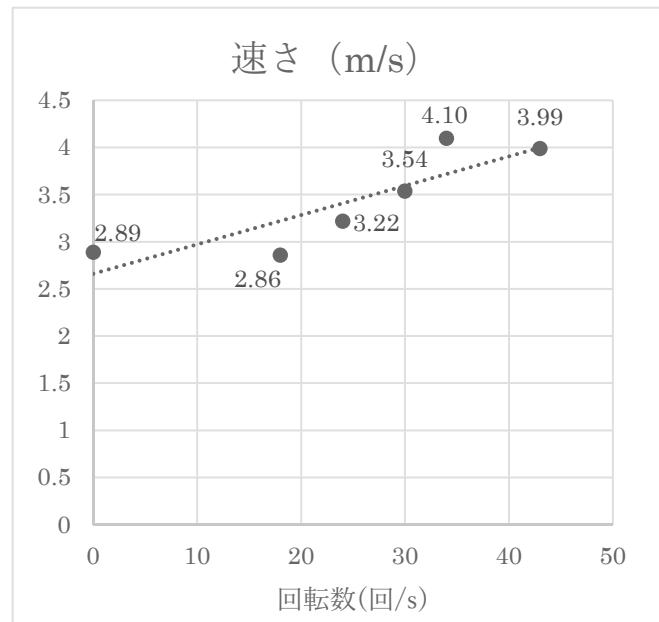


図1：進行方向は左

以上の実験を踏まえて、石が跳ねた後の距離に関する考察を示すため、回転数を変え、着水後の水平方向の速さを計測した。

グラフ5



石の初速を算出すると7.99m/sであった。グラフ5より、確かに回転数を上げると着水後の水平方向の速さは速くなると考えられる。

## 4. 結論

以上の実験より回転数を上げると、スローモーション動画の観察及び、縦回転の回数の測定により、石の回転軸は安定したことが分かった。さらに、跳ねた後の距離及び着水後の石の水平方向の速さの測定により、石が水の影響を受けにくくなったことが分かった。その結果、石が跳ねやすくなったと結論付けた。

（水の影響とは、水が $F_{//}$ によって石の水平方向の速さを遅くする、いわば、ブレーキのような効果のことである。）

## 5. 成果

石の回転が水切りに及ぼす影響について、結論にある、大きく分けて二つの要素を実際に測定したデータを用いて、示した点がこの研究の最大の成果である。

## 6. 今後の課題・展望

今回の実験では、装置において石を押し出すときのゴムを手動で伸ばして離していたため、今後は装置の自動化を目指していきたい。また、試行回数を増やし、より信頼性の高いデータを得ることも必要である。

## 7. 参考文献

[1] 2014年度膳所高校理数科課題研究

「水切りの跳躍距離における最適条件」

[2] 「Theoretical and Numerical Approach to “Magic

Angle” of Stone Skipping」

[https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRev](https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.94.174501)

Lett.94.174501

## 8. 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導いただいた立命館大

学理工学部 機械工学科の山末英嗣教授、一般財団法

人 電力研究所 環境科学研究所の西野圭佑氏に、厚

く感謝を申し上げます。

# 円分多項式の一般化とそれに基づく円分体の性質の研究

The Study about Properties of the Cyclotomic Field  
Based on Generalization of the Cyclotomic Polynomials

10 班

田辺 隆晟 時田 真之介 宮田 航平 村木 智直  
Ryusei Tanabe Shinnosuke Tokita Kohei Miyata Tomonao Muraki

## 要約

有理数体に複素数平面上の単位円の等分点を添加することで得られる円分体は代数学において重要な概念であり、円分多項式はその性質を表す。我々はこの円分多項式を代数学的な側面から一般化し、それに基づいて円分体の中間体の性質について研究を行った。

## ABSTRACT

Cyclotomic field, which is obtained by adjoining the points dividing the unit circle on the complex plane into equal parts to a rational number field, is an important concept in algebra, and cyclotomic polynomials expresses its properties. We generalized the cyclotomic polynomial from an algebraic point of view and studied the properties of the intermediate of the cyclotomic field on the basis of the generalization.

## 1 導入

この章では、本研究で必要となる概念の定義し、その基本的な既存性質に解説を与える。この章の内容とその前提となる抽象代数の基本理論は [2][4] を参考とした。

**定義 1.1.** 正の整数  $n$  について  $\zeta_n = \exp(2\pi\sqrt{-1}/n)$  とおく。

- (1)  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  という形の体を**円分体**という。
- (2) 以下のように定義される多項式  $\Phi_n(x)$  を**円分多項式**という。

$$\Phi_n(x) = \prod_{\substack{1 \leq k \leq n \\ \gcd(k, n) = 1}} (x - \zeta_n^k)$$

上で定義した  $\zeta_n$  は  $x^n - 1$  の根の一つであり、その根の集合は  $1, \zeta_n, \dots, \zeta_n^{n-1}$  と表される。これらは**1 の  $n$  乗根**と呼ばれるものであり、またその中で円分多項式の根であるものは**1 の原始  $n$  乗根**と呼ばれる。**1 の  $n$  乗根**なる最も簡潔ともいえる多項式に基づく数を有理数体に添加することで得られる円分体は、ある意味では最も簡潔な性質を持つ代数体である。また、体論や代数的整数論において多くの議論に必要となる特別な性質を持つ概念であることも知られる。円分多項式はその性質を示す基礎となる概念である。先ず、これらの基本的な性質を示す。

**命題 1.2.** 以下が成立する.

- (1) Euler の totient 関数  $\varphi(n)$  を,  $\varphi(n) = |(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times|$  と定義すると,  $\Phi_n(x)$  は  $\varphi(n)$  次の多項式である.
- (2) 多項式  $x^n - 1$  は, 次のように因数分解される.

$$x^n - 1 = \prod_{d|n} \Phi_d(x)$$

(3)  $\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$  は Galois 拡大である.

(4)  $\Phi_n(x) \in \mathbb{Z}[x]$ .

**例 1.3.** 円分多項式の例

$$\begin{aligned}\Phi_1(x) &= x - 1 \\ \Phi_2(x) &= x + 1 \\ \Phi_3(x) &= x^2 + x + 1 \\ \Phi_4(x) &= x^2 + 1 \\ \Phi_5(x) &= x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 \\ \Phi_6(x) &= x^2 - x + 1 \\ \Phi_7(x) &= x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 \\ \Phi_8(x) &= x^4 + 1 \\ \Phi_9(x) &= x^6 + x^3 + 1 \\ \Phi_{10}(x) &= x^4 - x^3 + x^2 - x + 1\end{aligned}$$

例 1.3. のような円分多項式の具体的な計算は命題 1.2.(2) 等を用いて行うことが可能である. 命題 1.2.(4) は興味深い性質であるが, 例 1.3. により部分的には確かに  $\mathbb{Z}$  係数であることが判る. 円分多項式はそれ自体としても興味深い性質を持つ. 以下の命題は円分多項式と円分体との関係性という点で重要である.

**命題 1.4.**  $\Phi_n(x)$  は,  $\zeta_n$  の  $\mathbb{Q}$  上の最小多項式である. よって  $\mathbb{Q}$  上既約である.

**系 1.5.** 命題 1.3. より以下が成立する.

- (1)  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  は  $\mathbb{Q}$  の  $\varphi(n)$  次拡大体である.
- (2)  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}) \simeq (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  の同型が成立する. また, この同型において  $i + n\mathbb{Z}$  に対応する  $\sigma \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$  を  $\sigma_i$  とすると  $\sigma_i(\zeta_n) = \zeta_n^i$  となる.

以下 2 つの命題もよく知られる.

**命題 1.6.**  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の整数環は  $\mathbb{Z}[\zeta_n]$  である.

**定理 1.7.** 任意の  $\mathbb{Q}$  の有限次 Abel 拡大体について,  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  がそれを含むような正整数  $n$  が存在する.

整数環を求ることは一般には難しいが、円分体の整数環は命題 1.6. のように驚く程簡潔に記述される。定理 1.7. は Kronecker-Weber の定理と呼ばれるもので、そのレベルは本論文を超えるが、円分体が如何に中心的かを示すために紹介した。更にこの定理から  $\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$  の中間体を研究することの一般性も判る。本研究はこの円分体の中間体についてその性質を解明するとともに、その過程で必要となる多項式を円分多項式の一般化として定義し、その性質についても研究を進めることを目的としたものである。

## 2 円分多項式の一般化

本章では、円分多項式の一般化となる多項式を定義しその性質について述べる。

**定義 2.1.**  $n$  を正の整数、 $H$  を  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$  の部分群、 $\tau \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$  とするとき、多項式  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  を次のように定義する。

$$\Psi_{(n,\tau H)}(x) = \prod_{\sigma \in \tau H} (x - \sigma(\zeta_n))$$

**命題 2.2**  $\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$  の Galois 対応において  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$  の部分群  $H$  に対応する  $\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$  の中間体を  $M_{(n,H)}$  とすると  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  は  $\tau(\zeta_n)$  の  $M_{(n,H)}$  上の最小多項式である。

**証明.** 集合  $\{\sigma(\zeta_n) | \sigma \in \tau H\}$  を  $Z_{(n,\tau H)}$  とすると、 $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  の任意の係数は  $Z_{(n,\tau H)}$  の基本対称式で表せる。 $\sigma'$  を  $H$  の任意の元として  $\sigma'$  による  $Z_{(n,\tau H)}$  への作用を考えると

$$\begin{aligned} \sigma' Z_{(n,\tau H)} &= \{\sigma' \sigma(\zeta_n) | \sigma \in \tau H\} \\ &= \{\sigma(\zeta_n) | \sigma \in \tau H\} \\ &= Z_{(n,\tau H)} \end{aligned}$$

より、 $H$  の任意の元で  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  の係数は不变であり、 $\Psi_{(n,\tau H)}(x) \in M_{(n,H)}[x]$  となる。

また、 $h = |H|$  とすると定理 1.5 より  $[\mathbb{Q}(\zeta_n) : M_{(n,H)}] = h$  となり、 $\mathbb{Q}(\zeta_n) = M_{(n,H)}(\zeta_n)$  であるから  $\zeta_n$  の  $M_{(n,H)}$  上の最小多項式は  $h$  次である。ここで  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  は  $\zeta_n$  を根に持つ  $M_{(n,H)}$  上の  $h$  次多項式であるので、これが  $\zeta_n$  の  $M_{(n,H)}$  上の最小多項式である。他の  $\tau$  に対しても同様に示される。□

$H = \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$  のとき  $M_{(n,H)} = \mathbb{Q}$ 、 $\Psi_{(n,H)}(x) = \Phi_n(x)$  であり、 $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  は  $\Phi_n(x)$  の持つ命題 1.4. の性質において  $\mathbb{Q}$  を代数体  $M_{(n,H)}$  に一般化した性質を持つ多項式であると解釈することが可能である。即ち、 $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  は円分多項式の一般化であると捉えられる。以下の命題で実際に示すが、 $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  は、それが円分多項式の一般化であるが故に、円分多項式の持つ性質をその類似として保存している。

**命題 2.3.**  $M_{(n,H)}$  の整数環を  $\mathfrak{S}_{(n,H)}$  とすると  $\Psi_{(n,\tau H)}(x) \in \mathfrak{S}_{(n,H)}[x]$  である。

**証明.** 命題 1.6. より  $\mathfrak{S}_{(n,H)} = \mathbb{Z}[\zeta_n] \cap M_{(n,H)}$  であるので  $\Psi_{(n,\tau H)}(x) \in \mathbb{Z}[\zeta_n]$  かつ  $\Psi_{(n,\tau H)}(x) \in M_{(n,H)}$  を示せばよい。前者については  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  の係数が  $\zeta_n$  の和と積からなることから明らかであり、後者については命題 2.2. で既に示したので主張が従う。□

続いて  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  の別の表し方を考える. 先ず指標を定義する.

**定義 2.4.** (1) 乗法群  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  を定義域とした  $\mathbb{C}^\times$  への写像  $\chi$  であって, 任意の  $a, b \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  に対して  $\chi(a)\chi(b) = \chi(ab)$  を満たすものを  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  の指標という.

(2)  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  の指標  $\chi$  に対して

$$g_n(\chi) = \sum_{k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times} \chi(k) \zeta_n^k$$

を  $\chi$  の Gauss 和という.

**命題 2.5.** 任意の部分群  $H \subset \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$  と  $\tau \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$  に対して, ある  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  の指標  $\chi$  と正整数  $m$  が存在して

$$\Psi_{(n,\tau H)}(x) = \prod_{\chi(k) = \zeta_{\varphi(n)}^m} (x - \zeta_n^k)$$

となる. 特に  $\tau \in H$  即ち  $\tau H = H$  のとき  $\varphi(n)|m$  となるように取れる.

**証明.** 先ず任意の  $\chi$  と  $k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  について正整数  $m$  が存在して  $\chi(k) = \zeta_{\varphi(n)}^m$  となることを示す. Euler の定理より  $k^{\varphi(n)} = 1$  なので  $\chi(k)^{\varphi(n)} = \chi(k^{\varphi(n)}) = \chi(1) = 1$  となる. ただし  $\chi(1) = 1$  は  $\chi(1)\chi(1) = \chi(1)$  より従う. よって  $\chi(k)$  は 1 の  $\varphi(n)$  乗根であり, ある正整数  $m$  が存在して  $\chi(k) = \zeta_{\varphi(n)}^m$  となることが示された. 以降  $\chi$  の核を  $\text{Ker}(\chi)$  として  $\text{Ker}(\chi) \simeq H$  なる  $\chi$  を取れば条件を満たすことを示す.  $\chi$  は準同型写像なので  $\text{Ker}(\chi)$  は  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  の部分群であり,  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}) \simeq (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  なのでそのような  $\chi$  は確かに取れる.  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  の根の一つとして  $\sigma_k(\zeta_n) = \zeta_n^k$  を取る. ここで  $\chi(k) = z$  としたとき  $\Psi_{(n,\tau H)}(\zeta_n^{k'}) = 0 \iff \chi(k') = z$  を示せばよい.  $\zeta_n^{k'}$  が  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  の根であるとき  $\sigma_k$  と  $\sigma_{k'}$  は同じ剰余類に属するので  $kk'^{-1} \in H$  と同値.  $H = \text{Ker}(\chi)$  であるのでこれは  $\chi(kk'^{-1}) = 1$  と同値となり,  $\chi(k)\chi(k')^{-1} = 1 \iff \chi(k') = z$  より示された.  $\sigma_k \in H$  のとき  $\chi(k) = 1$  であり  $\varphi(n)|m$  となるのは明らかである.  $\square$

$n$  が素数幂  $p^e$  のときは  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}) \simeq (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times \simeq \mathbb{Z}/p^{e-1}(p-1)\mathbb{Z}$  は巡回群であり, 原始根が存在する. 原始根を  $r$  とすると任意の  $k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  は  $l \in \mathbb{Z}/p^{e-1}(p-1)\mathbb{Z}$  を用いて  $k = r^l$  と表せる.  $\chi(k) = \chi(r)^l$  より  $\chi$  の像  $\text{Im}(\chi)$  も巡回群であり準同型定理  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times/\text{Ker}(\chi) \simeq \text{Im}(\chi)$  から  $H$  の位数を  $h$  指数を  $d$  とすると  $\text{Ker}(\chi) \simeq \mathbb{Z}/h\mathbb{Z}$ ,  $\text{Im}(\chi) \simeq \mathbb{Z}/d\mathbb{Z}$  となる.  $\text{Im}(\chi)$  については  $\mathbb{C}$  の部分群なので  $\text{Im}(\chi) = \{\zeta_d^s \mid s \in \mathbb{Z}/d\mathbb{Z}\}$  となる.  $\text{Ker}(\chi)$  については位数が  $h$  なのでその元  $k$  に対して  $r^{lh} = k^h = 1$  となり  $\varphi(n)|lh$ ,  $d|l$  となる. よって  $\text{Ker}(\chi) = \{r^l \mid l \in \mathbb{Z}/\varphi(n)\mathbb{Z}, d|l\}$  となる. また  $\tau \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$  が  $\tau(\zeta_n) = \zeta_n^t$  を満たすとき  $\tau = \sigma_t = \sigma_{r^u}$  とおくと,  $\tau H = \{\sigma_{r^u} \circ \sigma_{r^l} \mid \sigma_{r^l} \in H\} = \{\sigma_{r^{u+l}} \mid l \in \mathbb{Z}/\varphi(n)\mathbb{Z}, d|l\} = \{\sigma_{r^v} \mid l \in \mathbb{Z}/\varphi(n)\mathbb{Z}, v \equiv u \pmod{d}\}$  となる.

Gauss 和と  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  については以下が成り立つ.

**命題 2.6.**  $n$  を素数幂, 部分群  $H \subset \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$  の指数を  $d$  とする.  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  の指標  $\chi$  であって,  $\text{Ker}(\chi)$  が  $H$  と同型である  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  の部分群を含むものは  $d$  個存在し,  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  の係数はその  $d$  個の  $\chi$  の Gauss 和  $g_n(\chi)$  と  $\zeta_d$  を用いて表せる.

**証明.** 先ず前半の主張を示す.  $r$  を  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  の原始根として任意の  $k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  を  $k = r^l$  と表すと  $\chi(K) = \chi(r)^l$  であるので  $\chi(r)$  が一つ定まれば  $\chi$  は一意に定まる.  $\chi(r)$  の値がある正整数  $m$  を用いて  $\zeta_{\varphi(n)}^m$  と表せることは命題 2.5. で示したが、どの  $m$  を選んでも  $\chi$  が定義できるので、 $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  の指標は  $\varphi(n)$  個存在することが判る. その中で  $\text{Ker}(\chi)$  が  $H$  と同型である  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  の部分群を含むものの個数を考える.  $H$  と同型な  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  の部分群は  $\{r^l \mid l \in \mathbb{Z}/\varphi(n)\mathbb{Z}, d|l\}$  であるのでこの群の任意の元についてその  $\chi$  による像が 1 と等しくなる  $\chi$  を考えればよい.  $\chi(r) = \zeta_{\varphi(n)}^m$  とおくと  $\chi(r^l) = \chi(r)^l = \zeta_{\varphi(n)}^{lm} = 1$  が任意の  $d$  の倍数  $l$  について成立する. よって  $\gcd(\varphi(n), l) = d$  なる  $l$  を取ると  $\varphi(n)|lm$  より  $h|m$ .  $m \in \mathbb{Z}/\varphi(n)\mathbb{Z}$  で考えるとそのような  $m$  は  $\varphi(n)/h = d$  個存在するので示された. 次に後半の主張を示す.

$$\alpha_{(n,\tau H)} = \sum_{\sigma \in \tau H} \sigma(\zeta_n)$$

とおくと解と係数の関係より  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  の  $x^{h-1}$  の係数が  $-\alpha_{(n,\tau H)}$  であることは明らかである.  $\chi(r) = \zeta_d^m$  なる  $\chi$  を  $\chi_m$  とし  $g_n(\chi_m)$  を計算する.

$$\begin{aligned} g_n(\chi_m) &= \sum_{k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times} \chi(k) \sigma_k(\zeta_n) \\ &= \sum_{l \in \mathbb{Z}/\varphi(n)\mathbb{Z}} \chi(r)^l \sigma_{r^l}(\zeta_n) \\ &= \sum_{l \in \mathbb{Z}/\varphi(n)\mathbb{Z}} \zeta_d^{ml} \sigma_{r^l}(\zeta_n) \\ &= \sum_{u=0}^{d-1} \sum_{l'=0}^{h-1} \zeta_d^{m(dl'+u)} \sigma_{r^{dl'+u}}(\zeta_n) \\ &= \sum_{u=0}^{d-1} \zeta_d^{mu} \sum_{\sigma \in \sigma_{r^u} H} \sigma(\zeta_n) \\ &= \sum_{u=0}^{d-1} \zeta_d^{mu} \alpha_{(n, \sigma_{r^u} H)} \end{aligned}$$

となる. これを  $m = 0, \dots, d-1$  まで動かすと変数を  $\alpha_{(n, \sigma_{r^u} H)}(u = 0, \dots, d-1)$  とする  $d$  元連立方程式とみなせる. 係数行列を  $M_{(n,d)} = (\zeta^{mu})_{m,u}$  とすると  $\det(M_{(n,d)})$  は Vandermonde の行列式であり,

$$\det(M_{(n,d)}) = \prod_{i < j} (\zeta_d^i - \zeta_d^j) \neq 0$$

なので  $\alpha_{(n, \sigma_{r^u} H)}(u = 0, \dots, d-1)$  は  $g_n(\chi_m)(m = 0, \dots, d-1)$  と  $\zeta_d$  により表せる. よって  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  の係数が  $\alpha_{(n, \sigma_{r^u} H)}(u = 0, \dots, d-1)$  で表せることを示せばよい. ここで  $Z_{(n,\tau H)}$  の  $i$  乗和を  $s_i$ ,  $i$  次基本対称式を  $f_i$  (ただし  $f_0 = 1$ ) とすると簡単な計算により

$$f_e = \frac{1}{e} \sum_{i=1}^e s_i f_{e-i} (-1)^{i+1}$$

が判る. よって  $f_e$  は  $s_i$  で表せるが、 $\zeta_n^{k_1}$  と  $\zeta_n^{k_2}$  が属する  $H$  の剰余類が同じとき  $\zeta_n^{ik_1}$  と  $\zeta_n^{ik_2}$  が属する  $H$  の剰余類も同じなので  $s_i$  は  $\alpha_{(n, \sigma_{r^u} H)}(u = 0, \dots, d-1)$  のいずれかと等しく、 $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  の  $x^{h-e}$  係数は解と係数の関係より  $(-1)^e f_e$  に等しいので、 $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  の係数は  $\alpha_{(n, \sigma_{r^u} H)}(u = 0, \dots, d-1)$  で表せる.  $\square$

$\Psi_{(n,H)}(x)$  は  $\Phi_n(x)$  の因子を  $H$  による剩余類によって分割して得られる多項式であるが、指標  $\chi$  によって分割しても同様に定義できる、ということを命題 2.5. は示している。また命題 2.6. は  $\Psi_{(n,H)}(x)$  の係数に現れる和が Gauss 和と関係することを示すが、それは  $\Psi_{(n,H)}(x)$  が  $\chi$  の値で定まることから感覚的にも分かる。

以降は  $d = 2$  とした具体的な場合を見てみる。

**命題 2.7.** 以下が成立する。

(1)  $n$  が奇素数のとき  $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^\times$  の部分群として  $\text{Ker}(\chi)$  の指数  $d = 2$  であるような指標  $\chi$  は以下に定義する Legendre 記号で定まる写像を  $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^\times$  に制限したもの 1 個のみである。

$$\left(\frac{k}{p}\right) = \begin{cases} 1 & (k \text{ が } \text{mod } p \text{ の平方剰余}) \\ -1 & (k \text{ が } \text{mod } p \text{ の非平方剰余}) \\ 0 & (k \text{ が } p \text{ の倍数}) \end{cases}$$

(2)  $p^* = (-1)^{\frac{p-1}{2}} p$  と置くと (1) の  $\chi$  の Gauss 和について、

$$g_p(\chi) = \sqrt{p^*}$$

が成立する。

既存の有名事実であるので証明は省略する。(3) 参照)  $d = 2$  で  $n$  が素数  $p$  のときは  $\text{Im}(\chi) = \{1, -1\}$ ,  $\text{Ker}(\chi) = \{r^l \mid l \in \mathbb{Z}/\varphi(n)\mathbb{Z}, 2|l\}$  である。 $H' = H - \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$  は  $H$  による剩余類の元であり  $\alpha_p = \alpha_{(p,H)}$ ,  $\alpha'_p = \alpha_{(p,H')}$  とすると、このとき命題 2.6. の後半にある連立方程式は

$$\begin{cases} \alpha_p + \alpha'_p = -1 \\ \alpha_p - \alpha'_p = \sqrt{p^*} \end{cases}$$

である。これを解くと

$$\alpha_p = \frac{-1 + \sqrt{p^*}}{2}, \alpha'_p = \frac{-1 - \sqrt{p^*}}{2}$$

となる。ここで  $M_{(n,H)}$  は 2 次体であるが  $\sqrt{p^*}$  を含むので  $\mathbb{Q}(\sqrt{p^*})$  である。更に  $\mathbb{Q}(\sqrt{p^*})$  の整数環を考えると  $p^*$  は常に  $p^* \equiv 1 \pmod{4}$  を満たすのでこれは  $\mathbb{Z}[\alpha_p]$  となる。よって命題 2.3.(1) より  $\Psi_{(p,H)}(x), \Psi_{(p,H')}(x)$  は  $\mathbb{Z}[\alpha_p]$  上の多項式となる。これは興味深い結果であるが  $d > 3$  でも同様の性質が存在するか否かは不明である。

最後に一つ応用例として平方剰余の相互法則の第 2 補充法則を証明する。

**命題 2.8.** 奇素数  $p$  に対して以下が成立する。

$$\left(\frac{2}{p}\right) = (-1)^{\frac{p^2-1}{8}}$$

**証明.**  $p = 3$  のときは明らかなので  $p \geq 5$  のときを考える。 $\Psi_{(p,H)}$  の  $x^{\frac{p^2-5}{2}}$  の係数は  $f_2$  に等しく  $\mathbb{Z}[\alpha_p]$  に含まれる。

$$s_2 = \sum_{\left(\frac{k}{p}\right)=1} \zeta_p^{2k}$$

であるので、

(i)  $(\frac{2}{p}) = 1$  のとき,  $s_2 = \alpha_p$  であり,

$$\begin{aligned} f_2 &= \frac{1}{2}(s_1^2 - s_2) \\ &= \frac{1}{2}(\alpha_p^2 - \alpha_p) \\ &= \frac{1}{2}\left(\left(\frac{-1 + \sqrt{p^*}}{2}\right)^2 - \frac{-1 + \sqrt{p^*}}{2}\right) \\ &= \frac{1}{2}\left(\frac{p^* + 3}{4} - \sqrt{p^*}\right) \end{aligned}$$

より  $(p^* + 3)/4$  は奇数であり  $p^* \equiv 1 \pmod{8}$  となるので,  $p \equiv 1, 7 \pmod{8}$ .

(ii)  $(\frac{2}{p}) = -1$  のとき,  $s_2 = \alpha'_p$  であり,

$$\begin{aligned} f_2 &= \frac{1}{2}(s_1^2 - s_2) \\ &= \frac{1}{2}(\alpha_p^2 - \alpha'_p) \\ &= \frac{1}{2}\left(\left(\frac{-1 + \sqrt{p^*}}{2}\right)^2 - \frac{-1 - \sqrt{p^*}}{2}\right) \\ &= \frac{p^* + 3}{8} \end{aligned}$$

より  $(p^* + 3)/8$  は整数であり  $p^* \equiv 5 \pmod{8}$  となるので,  $p \equiv 3, 5 \pmod{8}$ .

(i)(ii) より示された.  $\square$

### 3 円分体の中間体の性質

本章では円分多項式の一般化を用いながら  $\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$  の中間体を  $M_{(n,H)}$  を決定しその性質を示す. 先ず中間体の絡む拡大の性質について考える.

**命題 3.1.** 以下が成立する.

- (1)  $\mathbb{Q}(\zeta_n)/M_{(n,H)}$  は Galois 拡大であり  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/M_{(n,H)}) \simeq H$ .
- (2)  $M_{(n,H)}/\mathbb{Q}$  は Galois 拡大であり  $\text{Gal}(M_{(n,H)}/\mathbb{Q}) \simeq \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})/H$ .

**証明.** (1)  $\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$  は分離拡大なので  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の任意の元は  $\mathbb{Q}$  上分離的であるから  $M_{(n,H)}$  上でも分離的. よって  $\mathbb{Q}(\zeta_n)/M_{(n,H)}$  は分離拡大である. また,  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  は  $\zeta_n$  の  $M_{(n,H)}$  上の共役をすべて含むので正規拡大もある. 従って  $\mathbb{Q}(\zeta_n)/M_{(n,H)}$  は Galois 拡大である. 次に Galois 群を考える.  $\mathbb{Q}(\zeta_n) = M_{(n,H)}(\zeta_n)$  より  $\zeta_n$  のその共役への写像全体が Galois 群となる.  $\zeta_n$  の  $M_{(n,H)}$  上の最小多項式は  $\Psi_{(n,H)}(x)$  であり共役への写像は  $H$  の元と同一であるので  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/M_{(n,H)}) \simeq H$  となる.

(2)  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n))$  は可換であり任意の部分群が正規部分群であるので  $H$  も正規部分群である. よって Galois の基本定理より  $M_{(n,H)}/\mathbb{Q}$  は Galois 拡大であり  $\text{Gal}(M_{(n,H)}/\mathbb{Q}) \simeq \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})/H$  となる.  $\square$

ここから  $M_{(n,H)}$  を決定するための準備をする.

**定義 3.2.** 以下を定義する.

$$(1) \xi_n = \sum_{rad(n)|m|n} \zeta_m$$

$$(2) \beta_{(n, \tau H)} = \sum_{\sigma \in \tau H} \sigma(\xi_n)$$

$$(3) \Omega_{(n, H)}(x) = \prod_{\tau H \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})/H} (x - \beta_{(n, \tau H)})$$

ただし (1)において  $rad(n)$  は正整数  $n$  の互いに異なる素因数の積を表し,  $rad(n)|m|n$  は  $rad(n)$  の倍数かつ  $n$  の約数である正整数  $m$  すべてについて和を取ることを表す.

何故このような  $\xi_n$  の定義をするのかは後に解る. 先ずは  $\Omega_{(n, H)}(x)$  の基本性質から始める.

**命題 3.3.**  $\Omega_{(n, H)}(x) \in \mathbb{Z}[x]$  である.

**証明.** 命題 2.2. の証明と同様にして  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$  の任意の元で  $\Omega_{(n, H)}(x)$  の係数は不変であることが判るので,  $\Omega_{(n, H)}(x) \in \mathbb{Q}[x]$ . また,  $\Omega_{(n, H)}(x)$  の係数は  $\zeta_n$  の和積からなるので  $\Omega_{(n, H)}(x) \in \mathbb{Z}[\zeta_n][x]$ . よって  $\mathbb{Q} \cap \mathbb{Z}[\zeta_n] = \mathbb{Z}$  を示せばよい.  $r \in \mathbb{Q} - \mathbb{Z}$  が  $\mathbb{Z}[\zeta_n]$  に含まれると仮定する.  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の  $\mathbb{Q}$  上の基底は  $\{1, \zeta_n, \dots, \zeta_n^{\varphi(n)-1}\}$  で取れるので,  $a_0, a_1, \dots, a_{\varphi(n)-1} \in \mathbb{Q}$  を用いて

$$r = \sum_{i=0}^{\varphi(n)-1} a_i \zeta_n^i$$

と一意に表される.  $a_0 = r, a_1 = \dots = a_{\varphi(n)-1} = 0$  とすると明らかに表示できるが  $r \in \mathbb{Z}[\zeta_n]$  より  $a_0, a_1, \dots, a_{\varphi(n)-1} \in \mathbb{Z}$  であり矛盾する. 従って  $\mathbb{Q} \cap \mathbb{Z}[\zeta_n] = \mathbb{Z}$  となる.  $\square$

以下の命題が  $\xi_n$  を定義する理由である.

**命題 3.4.**  $\{\sigma(\xi_n) \mid \sigma \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})\}$  は  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の  $\mathbb{Q}$  上の基底である.

この命題の証明のために以下の 2 つの補題を証明する.

**補題 3.5.**  $\mu$  を Möbius 関数とすると,  $\sum_{k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times} \zeta_n^k = \mu(n)$  となる.

**証明.**  $S(n) = \sum_{k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times} \zeta_n^k$  とする. 先ず  $n$  が平方因子を持つときを考える. 根が一致することから  $\Phi_n(x) = \Phi_{rad(n)}(x^{n/rad(n)})$  であることが容易に示せる.  $\Phi_n(x)$  の  $x^{\varphi(n)-1}$  の係数が  $-S(n)$  であるので  $n/rad(n) > 1$  から  $S(n) = 0$  となる. 次に  $n$  が平方因子を持たないときを考える.  $S(1) = 1$  は明らかであるので, 正整数  $t$  と相異なる素数  $p_1, \dots, p_t$  を用いて  $n = \prod_{i=1}^t p_i$  と表せるとき  $S(n) = (-1)^t$  であることを示せばよい. 以下  $t$  に関する数学的帰納法で示す.

$t = 1$  のとき,  $\Phi_n(x) = \sum_{k=0}^{p-1} x^k$  より  $x^{p-2}$  の係数から  $S(n) = -1$ .

$t \leq s$  のとき  $S(n) = (-1)^t$  であると仮定して,  $t = s + 1$  のとき  $S(n) = (-1)^{s+1}$  であることを示す. 先ず

$$\sum_{d|n} S(d) = \sum_{k=0}^{n-1} \zeta_n^k = 0$$

が成立する. また  $S(d)$  それぞれの値について考えると,  $S(d) = (-1)^j$  なる  $n$  の約数  $d$  は素因数を  $j$  個持つので  $s+1C_j$  個存在する. よって,

$$\begin{aligned} \sum_{d|n} S(d) &= \sum_{j=0}^s s+1C_j + S(n) \\ &= \sum_{j=0}^{s+1} s+1C_j + S(n) - (-1)^{s+1} \\ &= (1-1)^{s+1} + S(n) - (-1)^{s+1} \\ &= S(n) - (-1)^{s+1} \end{aligned}$$

となるので  $S(n) = (-1)^{s+1}$  が成立する. 従って  $n$  が平方因子を持つときも示されたので任意の正整数  $n$  で  $S(n) = \mu(n)$  となる.  $\square$

**補題 3.6.**  $n$  が平方因子を持たないとき  $\{\sigma(\zeta_n) | \sigma \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})\}$  は  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の  $\mathbb{Q}$  上の基底である.

**証明.**  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の任意の元が  $\{\sigma(\zeta_n) | \sigma \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})\}$  の一次結合で表せることを示せばこの集合の濃度  $\varphi(n)$  は  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の  $\mathbb{Q}$  上のベクトル空間としての次元, 即ち  $\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$  の拡大次数に等しいのでこれが基底であることが示せる. よって  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の任意の元が  $\{\zeta_n^k | k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times\}$  の一次結合で表せることを示せばよい. 以下このことを表現可能であるという.  $\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$  の基底  $\{1, \zeta_n, \dots, \zeta_n^{\varphi(n)-1}\}$  がすべて表現可能であることを示せば十分である. 補題 3.5. より

$$\sum_{k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times} \zeta_n^k = \mu(n)$$

なので 1 は表現可能である. また明らかに  $\gcd(l, n) = 1$  なる  $\zeta_n^l$  も表現可能である.  $\gcd(l, n) = g > 1$  のとき  $n = gn'$ ,  $l = gl'$  とすると,

$$\begin{aligned} \zeta_n^l &= \zeta_{n'}^{l'} = \mu(g)\zeta_{n'}^{l'} \sum_{s \in (\mathbb{Z}/g\mathbb{Z})^\times} \zeta_g^s \\ &= \mu(g) \sum_{s \in (\mathbb{Z}/g\mathbb{Z})^\times} \zeta_n^{gl'+sn'} \end{aligned}$$

となるが,  $n'$  と  $g$  は互いに素であり,  $n$  が平方因子を持たないことから  $n'$  と  $g$  も互いに素であるので  $gl' + sn'$  は  $n$  と互いに素となる. よって上式は  $\{\zeta_n^k | k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times\}$  の一次結合の表現となっており, 基底  $\{1, \zeta_n, \dots, \zeta_n^{\varphi(n)-1}\}$  はすべて表現可能であるので主張が従う.  $\square$

**命題 3.4. の証明.** 命題 3.6. と同様に  $\{\sigma(\xi_n) | \sigma \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\xi_n)/\mathbb{Q})\}$  が  $\mathbb{Q}(\xi_n)$  を生成することを示す. 基底  $\{1, \zeta_n, \dots, \zeta_n^{\varphi(n)-1}\}$  が表現可能であることを示せば十分であり,  $\gcd(n, l) = g$ ,  $n = n'g$ ,  $l = l'g$  とすると  $\zeta_n^l = \zeta_{n'}^{l'}$  なので任意の  $n$  の約数  $n'$  とそれと互いに素な  $l'$  について  $\zeta_{n'}^{l'}$  が表現可能であることを示せばよい.

$\text{rad}(n)$  と互いに素な  $r$  について  $k \equiv r \pmod{\text{rad}(n)}$  なる  $k$  は常に  $n$  と互いに素なので,

$$\begin{aligned} \sum_{k \equiv r \pmod{\text{rad}(n)}} \sigma_k(\zeta_n) &= \sum_{k \equiv r \pmod{\text{rad}(n)}} \sum_{\text{rad}(n) | m | n} \zeta_m^k \\ &= \sum_{\text{rad}(n) | m | n} \zeta_m^r \left( \sum_{j=0}^{n/\text{rad}(n)-1} \zeta_m^{j\text{rad}(n)} \right) \\ &= \sum_{\text{rad}(n) | m | n} \zeta_m^r \left( \frac{n}{m} \sum_{j=0}^{m/\text{rad}(n)-1} \zeta_{\frac{m}{\text{rad}(n)}}^j \right) \\ &= \frac{n}{\text{rad}(n)} \zeta_{\text{rad}(n)}^r \end{aligned}$$

となり  $n' = \text{rad}(n)$  のときは表現可能である。また、補題 3.6. より  $n'$  が  $\text{rad}(n)$  の約数のものもすべて表現可能であることが判る。更に同様にして  $n'$  が  $\text{rad}(n)|n'|n$  を満たすとき、

$$\sum_{k \equiv r \pmod{n'}} \sigma_k(\zeta_n) = \frac{n}{n'} \sum_{\text{rad}(n) | m | n'} \zeta_m^r$$

となるので  $n'/\text{rad}(n)$  の約数が少ない方から帰納的に表現可能である。あとは  $n'$  が  $\text{rad}(n)$  の倍数でない場合を示せばよい。 $\text{rad}(n)$  の素因数であって  $n'$  と互いに素であるものが存在するので、それらの積を  $q$  とすると、

$$\begin{aligned} \zeta_{n'}^{l'} &= \mu(q) \zeta_{n'}^{l'} \sum_{s \in (\mathbb{Z}/q\mathbb{Z})^\times} \zeta_q^s \\ &= \mu(q) \sum_{s \in (\mathbb{Z}/q\mathbb{Z})^\times} \zeta_{n'q}^{ql'+sn'} \end{aligned}$$

$ql' + sn'$  は  $n'q$  と互いに素であり  $\text{rad}(n)|n'q$  なので  $n'$  が  $\text{rad}(n)$  の倍数でない場合も表現可能である。従つて主張は示された。□

更に命題 3.4. を中間体に適用する。

**命題 3.7.**  $\{\beta_{(n,\tau H)} \mid \tau H \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})/H\}$  は  $M_{(n,H)}$  の  $\mathbb{Q}$  上の基底である。

**証明.** 命題 3.4. より,  $\{\sigma_k(\xi_n) \mid k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times\}$  は  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の  $\mathbb{Q}$  上の基底として取れる。よって  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の任意の元  $b$  は  $\mathbb{Q}$  の元の集合  $\{a_k \mid k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times\}$  を用いて

$$b = \sum_{k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times} a_k \sigma_k(\xi_n)$$

と一意に表現できる。このとき,  $b$  が  $M_{(n,H)}$  に含まれる条件を考えると、

$$\begin{aligned}
b \in M_{(n,H)} &\iff \forall \sigma_l \in H, \sigma_l(b) = b \\
&\iff \forall \sigma_l \in H, \sigma_l \left( \sum_{k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times} a_k \sigma_k(\xi_n) \right) = \sum_{k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times} a_k \sigma_k(\xi_n) \\
&\iff \forall \sigma_l \in H, \sum_{k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times} a_k \sigma_{kl}(\xi_n) = \sum_{k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times} a_{kl} \sigma_{kl}(\xi_n) \\
&\iff \forall \sigma_l \in H, \sum_{k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times} (a_k - a_{kl}) \sigma_{kl}(\xi_n) \\
&\iff \forall \sigma_l \in H, \forall k \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times, a_k = a_{kl}
\end{aligned}$$

となるので  $\sigma_k$  と  $\sigma_{k'}$  が同じ  $H$  による剰余類に属するとき  $a_k = a_{k'}$  となる。よって  $\{\beta_{(n,\tau H)} \mid \tau H \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})/H\}$  は  $M_{(n,H)}$  を生成するので、補題 3.6. で用いた基底の個数の議論と同様にしてこれが基底となることが示される。□

$n$  が平方因子を持たないとき  $\beta_{(n,\tau H)} = \alpha_{(n,\tau H)}$  であり、 $\{\alpha_{(n,\tau H)} \mid \tau H \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})/H\}$  が  $M_{(n,H)}$  の  $\mathbb{Q}$  上の基底となる。これは  $\{\sigma(\zeta_n) \mid \sigma \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})\}$  が  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の  $\mathbb{Q}$  上の基底であるためである。 $n$  が平方因子を持たないとき  $S(n) = \mu(n) = 0$  なので、 $\{\sigma(\zeta_n) \mid \sigma \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})\}$  は一次従属で基底にならない。そこで  $\{\sigma(x) \mid \sigma \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})\}$  が基底になるような  $x \in \mathbb{Q}(\zeta_n)$  を考えて  $xi_n$  を定義したということである。こうすることで  $M_{(n,H)}$  を求めることができた。以下更にここまで命題を準備として  $M_{(n,H)}$  を明示的に表す。

**命題 3.8.**  $M_{(n,H)} = \mathbb{Q}(\beta_{(n,H)})$  である。

**証明.** 先ず  $\Omega_{(n,H)}(x)$  が  $\beta_{(n,H)}$  の  $\mathbb{Q}$  上の最小多項式であることを示す。 $\beta_{(n,H)}$  の  $\mathbb{Q}$  上の最小多項式を  $f(x)$  とすると、最小多項式の性質から  $f(x)|\Omega_{(n,H)}(x)$  となる。 $\text{Gal}(M_{(n,H)}/\mathbb{Q}) \simeq \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})/H$  の同型において  $\tau H \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})/H$  に対応する  $\text{Gal}(M_{(n,H)}/\mathbb{Q})$  の元を  $\tau$  とすると、 $\beta_{(n,\tau H)} = \tau(\beta_{(n,H)})$  となるので任意の  $\beta_{(n,\tau H)}$  は  $\beta_{(n,H)}$  の  $\mathbb{Q}$  上の共役であり、 $\Omega_{(n,H)}(x)$  の任意の根は  $f(x)$  の根である。異なる  $\tau_1, \tau_2 \in \text{Gal}(M_{(n,H)}/\mathbb{Q})$  が  $\beta_{(n,\tau_1 H)} = \beta_{(n,\tau_2 H)}$  を満たすと仮定すると、命題 3.7. より  $\{\beta_{(n,\tau H)} \mid \tau H \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})/H\}$  が基底で一次独立であることに矛盾するので  $\{\beta_{(n,\tau H)} \mid \tau H \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})/H\}$  は相異なる。よって  $f(x) = \Omega_{(n,H)}(x)$  となり、 $\Omega_{(n,H)}(x)$  は  $\beta_{(n,H)}$  の  $\mathbb{Q}$  上の最小多項式となることが示された。ここで  $\Omega_{(n,H)}(x)$  は  $d$  次多項式であるので、 $\mathbb{Q}(\beta_{(n,H)})$  は  $d$  次体である。また  $\beta_{(n,H)}$  は  $H$  の元で不変であるので、 $\mathbb{Q}(\beta_{(n,H)})$  の任意の元は  $H$  の元で不変、 $\mathbb{Q}(\beta_{(n,H)}) \subset M_{(n,H)}$  となる。よって  $\mathbb{Q}(\beta_{(n,H)})$  も  $M_{(n,H)}$  も  $d$  次体なので  $M_{(n,H)} = \mathbb{Q}(\beta_{(n,H)})$  となる。□

最後に  $M_{(n,H)}$  の整数環についての性質を示す。

**命題 3.9.**  $\{\alpha_{(n,\tau H)} \mid \tau H \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})/H\}$  は  $M_{(n,H)}$  の  $\mathbb{Z}$  上の整基底である。

**証明.** 補題 3.6. より  $n$  が平方因子を持たないとき  $\{\sigma(\zeta_n) \mid \sigma \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})\}$  は  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の  $\mathbb{Q}$  上の基底であるので  $\mathbb{Q}$  上一次独立であり  $\mathbb{Z}$  上でも一次独立となる。また  $\{\sigma(\zeta_n) \mid \sigma \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})\}$  は  $\mathbb{Z}[\zeta_n]$  の部分集合であり、再び補題 3.6. より  $\mathbb{Z}[\zeta_n]$  を生成するときの表現がすべて  $\mathbb{Z}[\zeta_n]$  に含まれることが判る。よって  $\{\sigma(\zeta_n) \mid \sigma \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})\}$  は  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の整数環  $\mathbb{Z}[\zeta_n]$  の  $\mathbb{Z}$  上の基底である。あとは命題 3.7. と同様にして示される。□

$n$  が平方因子を持たないときは簡潔に整数環を記述できる。 $n$  が平方因子を持つときも同様の主張が成立するように一見思えるが、 $\mathbb{Z}[\zeta_n]$  を生成するとき  $\mathbb{Z}[\zeta_n]$  上で表現できないのでそれは偽である。

## 4 今後の展望

今後更に研究を進める上で以下のことを解明を目指す。

- ・ $\Psi_{(n,\tau H)}$  の係数に関して何らかの規則性が存在するか。
- ・一般の  $n$  において  $M_{(n,H)}$  の整数環はどのように表せるか。
- ・ $M_{(n,H)}$  のイデアル類群や単数群等、より進んだ代数的整数上の性質にはどのようなものがあるか。

## 5 謝辞

本研究を進めるに当たり、滋賀大学教育学部准教授の長谷川武博先生、長浜バイオ大学フロンティアバイオサイエンス学科教授の西郷甲矢人先生に、多大なる助言を頂いたことを感謝申し上げます。

## 6 参考文献

- [1] 雪江明彦 『代数学 1 群論入門』 日本評論社
- [2] 雪江明彦 『代数学 2 環と体とガロア理論』 日本評論社
- [3] 青木昇 『素数と 2 次体の整数論』 共立出版
- [4] J.Neukirch 『Algebraische Zahlentheorie』

# **発表示ポスター集（日本語）**



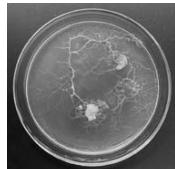
# 真正粘菌の外部記憶因子について



生物1班 中村康臣 久家悠睦 平尾奈那 山田光葵

## ○要旨

真正粘菌は一度通った場所を記憶し重複して通らないようにする性質がある。これには粘菌が分泌する粘液鞘が関与していることがわかっている。今回の研究で、この働きは粘液鞘中のカリウムが関わっている可能性が示唆された。



## 1 序論

粘菌は移動した跡に粘液鞘を残すことで一度通った場所を記憶している。粘菌に通過した場所を記憶させる粘液鞘中の成分を**外部記憶因子X**と定義する。**Xを特定することが本研究の目的である。**

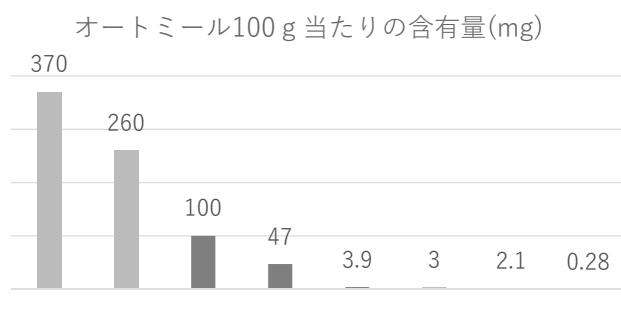
### <仮説>

粘液鞘は粘菌が摂取した物質から生産されていると考えられる。右のグラフ1,2より、KまたはPがXであると仮定した。

### <先行研究>

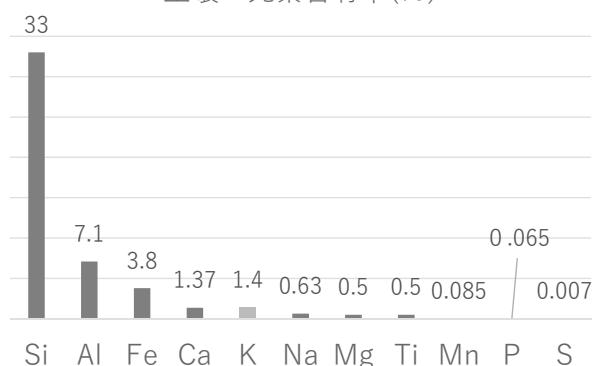
粘液鞘は粘菌の外部記憶因子として働くとされている。粘液鞘をあらかじめ培地上に塗布すると、餌までの最短経路を特定できた個体数が減少した。(中垣、2016年)

また、粘菌は、pHが4～7でない物質を避けるとされる。(Chris R.Reid、2012年)



グラフ1・2

土壌の元素含有率(%)



## 2 実験

水溶液のpHや物質の入手のしやすさの観点から、Kについて実験・検証を行った。

### <実験方法>

寒天培地の半面に物質(粘液鞘または $\text{KNO}_3 \cdot \text{KCl}$ 水溶液)を塗布した。図のように実験装置を設置して、72時間観察した。使用した粘菌は、モジホコリ(*Physarum polycephalum*)である。

### <予備実験>

寒天培地の半面に粘液鞘を塗布し、実験を行った。その結果、粘液鞘が塗布された部分を通らずに餌に辿り着く傾向がみられた。

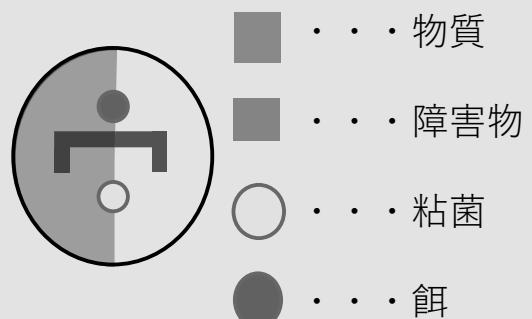


図1

### <対照実験>

寒天培地に物質を何も塗布せずに実験を行った。その結果、障害物を避けるように移動し、餌に辿り着く様子が確認できた。

### <本実験>

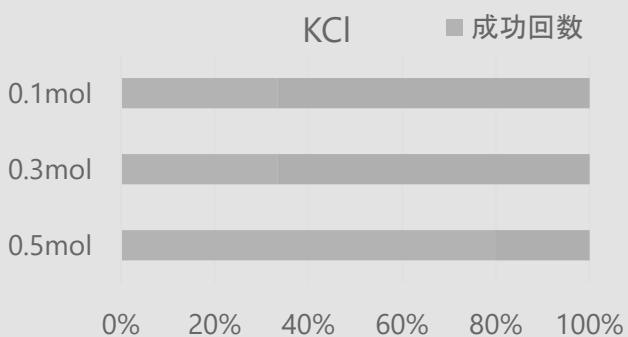
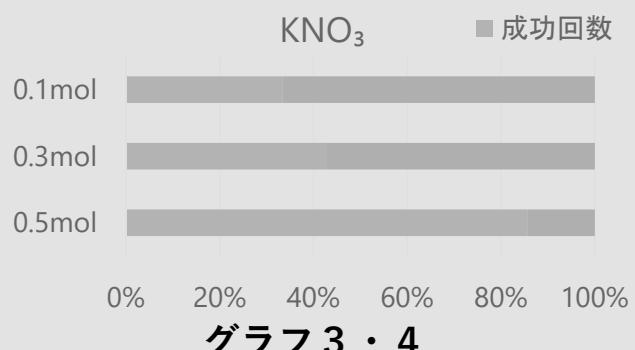
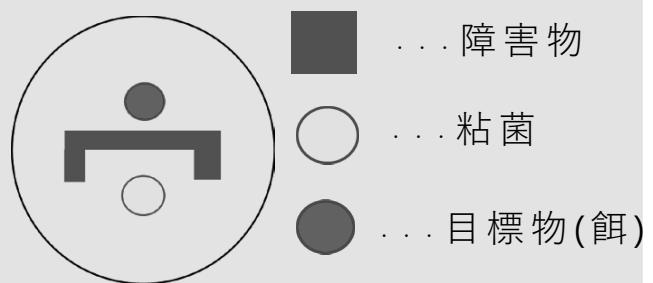
Kを含む物質として、水溶液のpHが4～7である硝酸カリウム ( $\text{KNO}_3$ )、塩化カリウム (KCl) を塗布して実験を行った。

### <結果>

$\text{KNO}_3$	0.1mol/L	0.3mol/L	0.5mol/L
試行回数	6	7	7
成功回数	2	3	6
成功確率	33.3	42.9	85.7

表1・2

KCl	0.1mol/L	0.3mol/L	0.5mol/L
試行回数	6	6	5
成功回数	2	2	4
成功確率	33.3	33.3	80.0



粘菌が物質の塗布された半面を通らず餌の方向に進んだ場合を「実験が成功した」と定義する

### 3 考察

- ・XがKである可能性は十分に考えられる
- ・粘液鞘に含まれているXの濃度は0.5mol/Lに近い、またはさらに高い

### 4 今後の展望・課題

- ・粘液鞘中の成分を直接特定する
- ・0.5mol/L以上の濃度や外部記憶因子Xではないと思われる高濃度物質でも実験を行い、濃度の影響について検証する
- ・Pについても実験を行う

#### 参考文献

- ・中垣俊之（2016）粘菌に「知性」はあるか—。単細胞生物に「人間らしさ」の起源を探る、孤高の研究 <https://shochou-kaigi.org/>
- ・Chris R.Reid et al.(2012) Slime Molds uses an externalized spatial “memory” to negative in complex environments
- ・高橋和成（2012）粘菌変形体の化学走性を利用した高校生物実験の開発

# ヤマトシロアリの共喰い行動について



滋賀県立膳所高等学校 課題研究2班

田口 真帆 田中 遥成 古家 世渚 水上 航一

## 要約

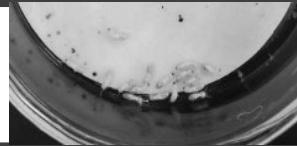
シロアリは社会性昆虫であり先行研究によって共喰いを行うことが明らかにされている。私たちは飢餓状態が長く続くほど外傷個体に対する共喰いは起こりやすくなるという仮説を立て検証し、この仮説が成り立つことが証明された。

## ヤマトシロアリとは

学名：*Reticulitermes speratus*

社会性昆虫 → 共喰い行動

- ①特定の階級
- ②外傷個体
- ③飢餓条件下



## 実験1

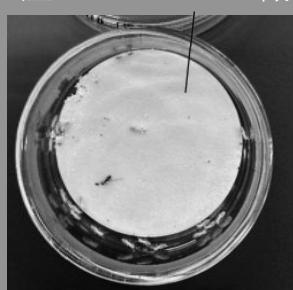
何も手を加えず飢餓条件下で飼育 → 4日間共喰いは起きなかった

## 結果

## 飢餓状態が続いた日数による共喰い行動の変化を調べる

## 実験2

湿らせたガラス繊維ろ紙



頭部に傷



ワーカーを20匹集める×4シャーレ分

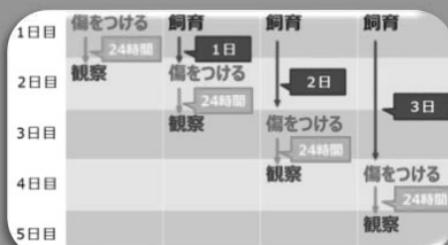
飢餓度

- ①飢餓にさせない
- ②1日飢餓状態で飼育
- ③2日飢餓状態で飼育
- ④3日飢餓状態で飼育

シャーレの中から無作為に取り出した1匹の頭部に傷をつけて、ペイントする

すべてのシャーレをインキュベーターの中で飼育

外傷個体が共喰いされたか確認

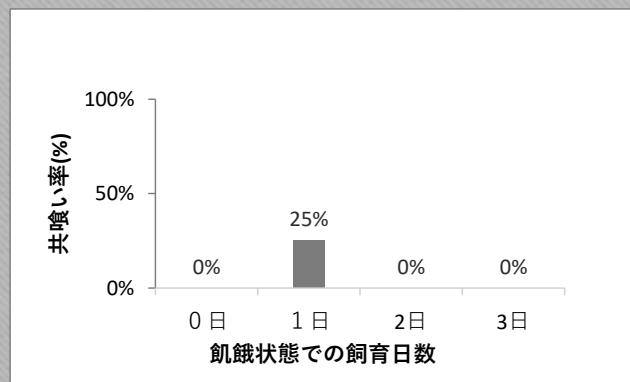
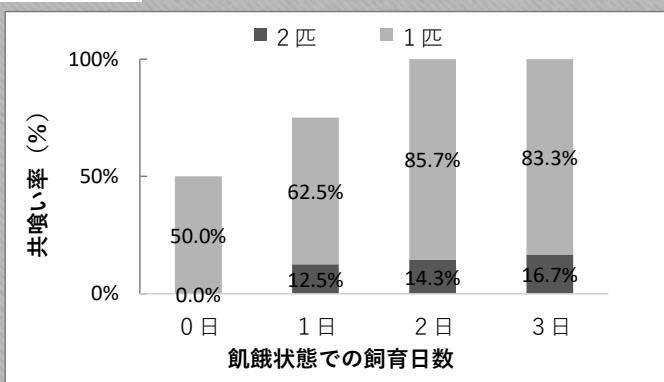


## 実験3

傷をつけずペイントのみで実験2と同様に行う

バターミルクペイントが共喰いを引き起こしていないか確認

## 結果



## 考察

### 実験2

餓状態が経過とともに  
2匹の個体が共喰いされる確率も上昇

外傷個体から漏れ出た体液が付着し  
共喰いされた個体がいた

餓状態が長く続くことが  
共喰いをさらに激化させているため

### 今後の展望

すべての個体が  
共喰いに関与しているか  
不明

共喰いに関与した個体数  
と餓状態の関係を  
調べる

1匹の外傷個体  
で実験

複数の場合の  
実験

湿度管理が  
不安定

湿度を一定に  
保つ方法を模索

温度によって  
行動が変化する  
可能性

温度の条件を  
変えて実験

### 実験1: 何も手を加えず餓状態で飼育

外傷個体がない場合、餓状態下でも  
最低4日間は共喰いが起こらない

共喰い行動は外傷個体がいたことが要因

### 実験3: 傷はつけずペイントのみ

1回だけ共喰いが確認された

実験中に誤って傷をつけた可能性

## 参考文献

ヤマトシロアリにおける人為的外傷に起因する共喰い行動の解析

日本大学大学院生物資源科学研究所 山中康如

シロアリの事典

吉村剛・板倉修司・岩田隆太郎・大村和香子・杉尾幸司・竹松葉子・徳田岳・松浦健二・三浦徹 編

# ゼラチンを用いた電池の半固体化について

3班 伊東佑真 岡田卓也 中西彦斗 福島颯太

## 導入

先行研究でゲル化剤の一つであるスライムに電極を指すと電流が発生することがわかっている。しかし、この電流は極めて小さいものであり、電解液に強酸が使用できない。そこで、スライムに比べ酸に強く、ゼラチンを用いて半固体電池についての実験を始めた。

## 予備実験

目的 | 硫酸の濃度を変え、ペクチンやゼラチンのHMの固まり方と現在値を確認する。

方法 | ①水(30)mLを90°Cまで加熱しHMペクチン(g)またはゼラチン(g)を加える。  
②モル濃度の異なる硫酸(0.10mol/L, 0.50mol/L, 1.00mol/L)を①に加える。  
③②の液体を氷水で冷やす。  
④電極に銅板、亜鉛版を用い、それぞれの電流値を調べる。

結果 | HMペクチンを用いた場合、電解液が液体状のままであり、本研究の目的であるボルタ電池の半固体化に適していないため、半固体化に成功したゼラチンを用いて、研究を進めることにした。

## 実験1

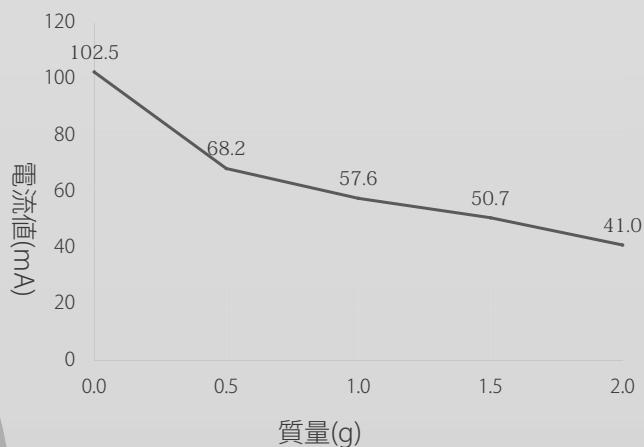
目的 | ゼラチンの量を変化させ電解液の流動性と電流値の関係について調べる。

使用物 | ゼラチン(0.0g, 0.5g, 1.0g, 1.5g, 2.0g), 硫酸1.0mol/L(30ml), ガスバーナー, ピーカー, 電流計, 電極(亜鉛板, 銅板), 導線

方法 | ①硫酸30mlをガスバーナーで40°Cまで加熱し、質量の異なるゼラチン(0.0g, 0.5g, 1.0g, 1.5g, 2.0g)を加え、溶かす。  
②①の液体を氷水で冷やし固める。  
③電極に銅板、亜鉛版を用い、それぞれの電流値を調べる。(図1)

## 結果1

ゼラチンの質量を増やすにつれ粘度が増し、電流値が低くなった(図2)



(図2) 加えたゼラチンの質量と取り出せた電流値の関係

(図1) 実験の模式図

## 実験2

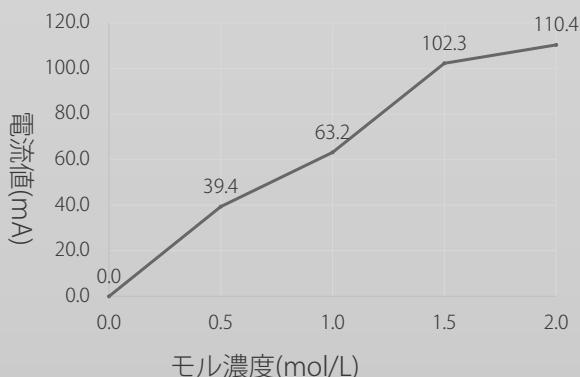
目的 | 硫酸の濃度を変化させ、ゼラチンの固まり方や電流値を調べる。

使用物 | ゼラチン (1.0g) 硫酸 (0.0mol/L, 0.5mol/L, 1.0mol/L, 1.5mol/L, 2.0mol/L) (30ml) 、ガスバーナー、ビーカー、電流計、電極（亜鉛板、銅板）、導線

方法 | ①モル濃度の異なる硫酸 (0.0mol/L, 0.5mol/L, 1.0mol/L, 1.5mol/L, 2.0mol/L) 30mlをガスバーナーで40°Cまで加熱し、ゼラチン1.0gを加え、溶かす。  
②①の液体を氷水で冷やし固める。  
③電極に銅板、亜鉛版を用い、それぞれの電流値を調べる。

## 結果

実験2で、硫酸のモル濃度が高くなるにつれて、電解液の流動性が高くなり、2.0mol/Lでは液体のままであった。硫酸がゼラチンの構造を壊したためと考えられる。また、硫酸のモル濃度が高くなるにつれて電流値も大きくなつた。(図3)



(図3) 加えた硫酸のモル濃度と取り出せた電流値の関係

## 考察

- 定義された半固体状を保ちつつ、最も高い電流を取り出せたのはゼラチンを1.0g加えたときであったため、本実験の半固体電池において最も理想的な電池であると考えられる。
- 実験2では、硫酸のモル濃度が上がったためか、または硫酸でゼラチンの構造が壊れて流動性が増したためにより電流値が高くなつたと考えられる。

## 今後の課題

- 硫酸だとゼラチンの構造を壊すため、硫酸以外の電解液を用いた場合の電流の変化を調べる。
- 実験2で電流値が上がった原因是硫酸のモル濃度が上がったためか、硫酸でゼラチンの構造が壊れて流動性が増したためか、どちらの要素が強いか確かめる。
- ゼラチンより酸に強い、電解液をゲル化できる物質を探し、検証する。
- 粘度を具体的に表し、電流値との関係性を調べる。



(写真) 左から0.5g, 0.0g, 1.0g, 1.5g, 2.0gのゼラチンを加えたもの

## 参考文献

- 『スマイル電池を用いて化学エネルギーを取り出す』野々口勝美
- 『ペクチンの性状とゲル化』三浦洋
- 『国立大学55工学系学部ホームページ』
- 『食品開発ラボ ゼラチンとは～基礎から徹底解説～』ユニテック

フーズ株式会社

# 金属粉末を用いた $\text{NO}_3^-$ 還元の最適化

4班 川口 友維 吉岡 優莉 西村 春人 笹沼 亮太 二高二

## 要約

近年、各種排水に含まれる溶存態窒素により、自然水の汚染が深刻化している。そこで、銅担持鉄粉により $\text{NO}_3^-$ が $\text{NH}_4^+$ に還元されるという反応に着目し、改良を目指した。実験の結果、担持される金属のイオン化傾向が大きいほど、還元効率がよいことがわかった。また、スズや鉄は、 $\text{NO}_3^-$ が $\text{NO}_2^-$ を経由せず $\text{NH}_4^+$ へ直接還元される反応が、相対的に多く発生している可能性が示された。

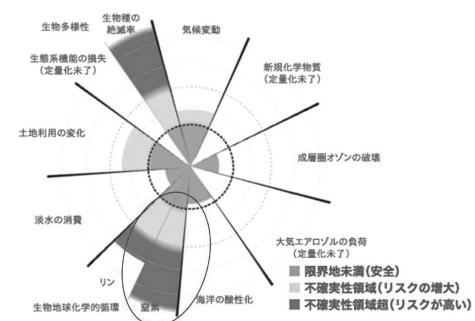
## 動機・目的

窒素による環境破壊が深刻化

→  $\text{NO}_3^-$ は生活排水や農業排水に豊富に含まれている



$\text{NO}_3^-$ をより除去の容易な $\text{NH}_4^+$ へと  
還元する既知の方法の改良



## 先行研究

$\text{NO}_3^-$ が含まれる水溶液中に、銅担持鉄粉（銅が表面に付着した状態の鉄粉）を加える  
→ 水溶液中の $\text{NO}_3^-$ が $\text{NH}_4^+$ へ還元される

## 仮説

鉄粉を、よりイオン化傾向の大きい金属粉に  
変えることで、短時間に多くの還元反応  
(効率の良い還元反応)を起こすことが出来る

## 実験①

- ① Fe, Zn, Mg, Snを1 mol/L塩酸に5分間浸す  
→ 表面の酸化物を除去
- ② 金属粉末に0.75 mol/L硫酸銅(II)水溶液を加える  
→ 表面に銅を析出させて粉末を調製



- ③ ②の粉末をろ過  
 $4.00 \times 10^{-2}$  mol/Lの  
硝酸ナトリウム水溶液200 mLに加える

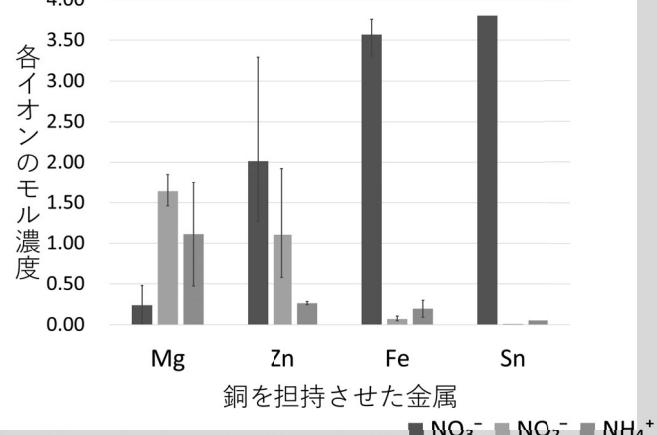


- ④ ③をおよそ一日攪拌放置  
ろ過し、吸光度を測定  
→  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ の濃度を計算
- ⑤ インドフェノール青吸光  
光度法を用いて、 $\text{NH}_4^+$ の濃度を測定

## 結果①

実験は3回行った  
1回目の実験…薬品の都合上Snは未使用  
 $\text{NH}_4^+$ 濃度は未測定  
3回目の実験…操作を誤り、Snのデータは  
得られなかった

( $10^{-2}$  mol/L)  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ のモル濃度の平均値



## 考察①

- イオン化傾向が大きい金属…水溶液中の $\text{NO}_3^-$ の $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ への還元率が高い  
→イオン化傾向の大きい金属を用いた方が、効率的
- マグネシウムや亜鉛… $\text{NH}_4^+$ への還元途中の物質だと考えられる $\text{NO}_2^-$ の量が多い  
 $\text{NO}_2^-$ は $\text{NO}_3^-$ と比較して毒性が強く、 $\text{NO}_3^-$ と同様に除去が容易ではない  
→還元効率だけでなく、 $\text{NO}_2^-$ を発生させないことも重要
- 鉄やスズは $\text{NO}_2^-$ の発生量が少ない

## 実験②

### 事前調査

実験①のデータを用いてそれぞれの反応速度定数( $k_1$ 、 $k_2$ )を求めた

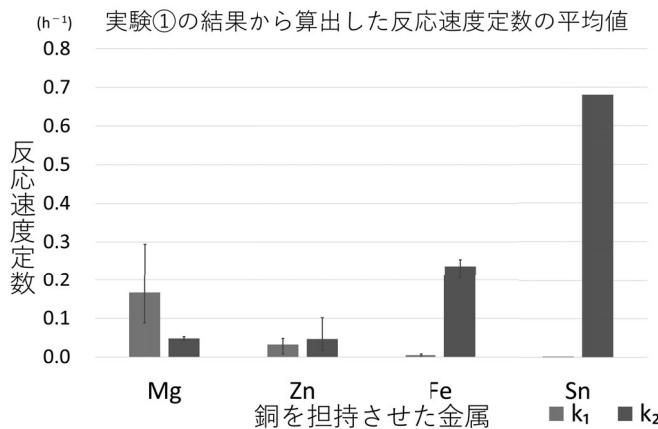
$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$ の反応速度 :  $k_1[\text{NO}_3^-]$

$\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$ の反応速度 :  $k_2[\text{NO}_2^-]$

pHは影響しない と仮定

## 結果②

### 事前調査



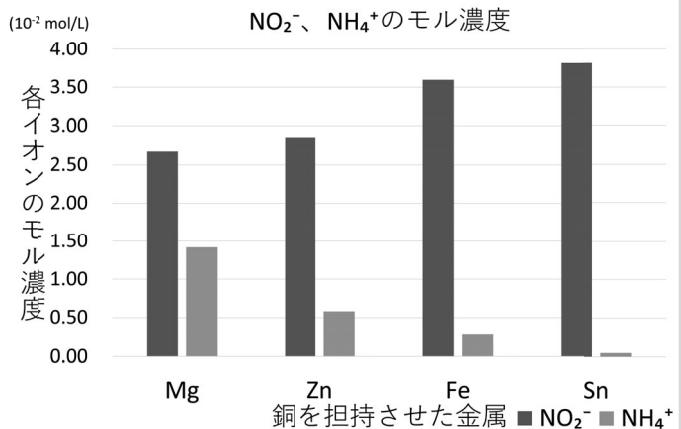
### 考察②

事前調査 → イオン化傾向が小さいほど $\text{NO}_2^-$ から $\text{NH}_4^+$ への還元効率は良い

### 実験方法

- 実験①と同様の方法で $\text{Fe}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Sn}$ の粉末を調製し、 $4.00 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 亜硝酸ナトリウム水溶液に加える
- 吸光度を調べ、 $\text{NO}_2^-$ のモル濃度を算出
- インドフェノール青吸光光度法によって $\text{NH}_4^+$ のモル濃度を算出

### 実験



実験 → イオン化傾向が大きいほど $\text{NO}_2^-$ から $\text{NH}_4^+$ への還元効率は良い

→ FeやSnを用いた場合 $\text{NO}_3^-$ が $\text{NO}_2^-$ を経由せず $\text{NH}_4^+$ へと還元される割合が相対的に多い

### 結論

- 還元効率の面では、マグネシウムを用いる場合が適している
- 環境への負担の面を考慮すると、鉄やスズを用いる場合が適している

### 課題と展望

- 還元効率がよく、環境への負担が小さい還元方法を模索する
- $\text{NO}_2^-$ を経由しない $\text{NH}_4^+$ への還元が実際に行われているのか確かめる
- 実用化に向けてより多くの観点から考察する

#### 参考文献

- 岡倉慎司、朝倉祝治；「中性溶液中における銅担持鉄粉を用いた $\text{NO}_3^-$ の還元」電気化学および工業物理化学62巻4号 pp.354-355 (1994)
- 日本原子力研究所；「硝酸態窒素による地下水汚染とその対策法」JAERI-Review-2003-007
- 理化学研究所；「温湿な環境で働く人工脱窒触媒 - 微生物の仕組みに学ぶ環境浄化技術 -」、2018-03-29 [https://www.riken.jp/press/2018/20180329\\_2/](https://www.riken.jp/press/2018/20180329_2/)
- ト部吉庸；「化学の新研究；改訂版」三省堂 (2019)
- Johan Rockström, Mattias Klum (著) ; 武内和彦、石井菜穂子 (監修) ; 谷淳也 森秀行ほか (訳) ; 「小さな地球の大きな世界；プラネタリー・バウンダリーと持続可能な開発」丸善出版 (2019)
- 木下實、大野公一ほか17名；「化学基礎；新訂版」実教出版 (2021)
- 木下實、大野公一ほか18名；「化学；新訂版」実教出版 (2021)
- 数研出版編集部(編)；「フォトサイエンス；化学図録」数研出版 (2017)
- 山本玲子；「生体為害性金属元素と材料」までりあ43巻8号 pp. 639-642 (2004)
- 化学実験テキスト研究会(編)；「環境化学」産業図書 (1998)

# 酸化チタン(IV)の光分解を用いた、 水の電気分解の効率化

化学5班 岡田大知 高見涼介 平川直 山西瑛太

## 1. はじめに

酸化チタン(IV)による光触媒反応に興味を持ち、その代表例である「本多・藤嶋効果」について調べることにした。

本多・藤嶋効果とは酸化チタン(IV)に紫外線を照射することで光分解を起こし、水を酸素と水素に分ける反応のことである。

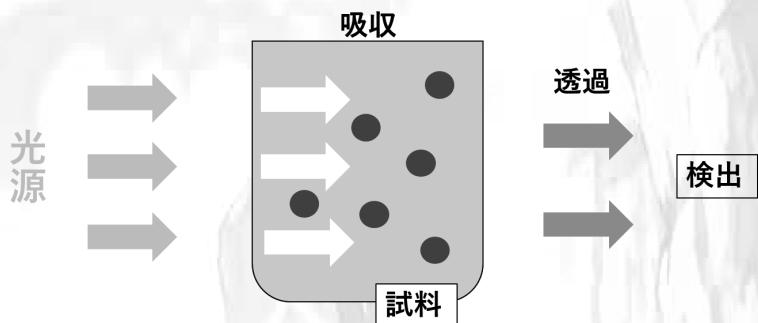
当初1972年に発見された反応では、水の電気分解には本来1.23Vの電圧を加える必要があるが、陽極に酸化チタン(IV)を用い電気分解を行うことで、約0.5Vの電圧をかけるだけで水の電気分解が起こる。

そこで、酸化チタン(IV)板の酸化度合いによって本多・藤嶋効果の効率が変化するのかを調べる。

※水の電気分解がより低い電圧で起こった時、効果の効率が高いとみなす

・吸光度

…特定の波長の光（単色光）を溶液試料に当てた際、通過した光の量を測定し、試料が吸収した光



本実験の場合、メチレンブルーが少ないほど光が通りやすくなるため、吸光度は小さくなる

放置時の状態	吸光度
初期状態	0.652
酸化チタン(IV)なし 太陽光照射	0.369
酸化チタン(IV)あり 太陽光照射酸化時間30分	0.378
酸化チタン(IV)あり 太陽光照射酸化時間45分	0.331
酸化チタン(IV)あり 太陽光照射酸化時間60分	0.308

## 2. 準備実験

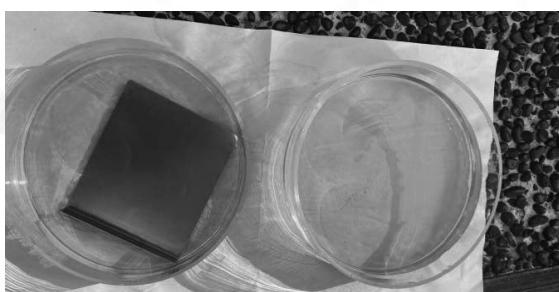
0.1mol/Lの硫酸水溶液に、陽極にチタン板、陰極に白金板を入れ、電気分解を行った。この操作により酸化チタン(IV)板を作成した。

酸化膜が張れているかを検証するため、メチレンブルーを用いて以下の実験を行った。

水200mLにメチレンブルー6滴加えた水溶液を等分したものの、片方に事前に用意した酸化チタン(IV)板を加え、もう片方には何も加えず、日光下に3時間放置した後(写真1)、水溶液の吸光度を測定、比較した。

酸化チタン(IV)板を加えて放置したものの方が、加えていないものより吸光度の値が下がっていたため、酸化チタン(IV)板がメチレンブルーを光分解したと言え、チタン板に酸化膜が張れていることが分かった。

また、太陽光をより長い時間照射した酸化チタン(IV)板ほどメチレンブルーをより分解したことが分かった。



(写真1)

## 4. 本実験

1. 0.1mol/Lの水酸化ナトリウム水溶液中で、両極に白金電極を用いて水の電気分解を行う。
2. 1と同濃度の水酸化ナトリウム水溶液中で、陽極に酸化チタン(IV)板、陰極に白金電極を用いて水の電気分解を行う。なお、酸化チタン(IV)板には紫外線を50分間照射したものと100分間照射したものを使用する。

それぞれの電極の距離は1cmに保ったまま、0.5Vずつ加える電圧を上げていき、水の電気分解が起こる最低の電圧を目視で確認する。

+ 電極	- 電極	最低電圧(V)
白金	白金	1.7
酸化チタン(IV) (100分)	白金	1.3
酸化チタン(IV) (50分)	白金	

私たちで酸化膜を作成したチタン板を用いて実験を行ったとき、白金電極を用いた時よりも低い電圧で水の電気分解を行うことができた。そのため、酸化チタン(IV)板の効果が確認できた。

### ・本実験における反省点

まだ試行回数が少なく、また、目視でしか反応の有無が確認できていないため、確実なデータを得られていない。

50分間陽極酸化して作成した酸化チタン(IV)板と100分間陽極酸化して、作成した酸化チタン(IV)の比較ができるだけの十分なデータを得られていない。

## 6. まとめ

本多藤嶋効果によって発生する気体の体積を比較することは難しいため、水の電気分解に必要な最低限度の電圧を調べることで比較することにした。

また、酸化チタン(IV)板作成の際の酸化時間を変えることにより、有機物の分解作用のより強い酸化チタン(IV)を得た。

そして、それらの酸化時間を変えた酸化チタン(IV)板を陽極に用いて水の電気分解を行うことで、「酸化チタン(IV)板を陽極に用いることで水の電気分解に必要な最低限度の電圧が低下する」ことを確認できた。しかし、まだ確証をもって結論付けることができるほど実験ができていないため、同じ条件下で繰り返し実験を行っていきたい。

## 7. これからの課題

- ・実験の試行回数が非常に少なく、実験結果の確実性に欠ける
- ・そのため、試行回数を増やして確かなデータを得、考察したい
- ・酸化チタン(IV)板を作成する際の電気分解に有した時間と、水の電気分解をする際に必要な電圧には相関関係があるのかを明らかにする

## 8. 参考文献

Fujishima A

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/electrochemistry/71/7/71\\_568/\\_article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/electrochemistry/71/7/71_568/_article/-char/ja)

Mizugoe K, Masahashi n

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/materia/49/2/49\\_55/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/materia/49/2/49_55/_pdf)

# 障害物が水流に与える影響

6班 大野 友樺 大久保 翔馬 鍵井 華 中澤 悠來

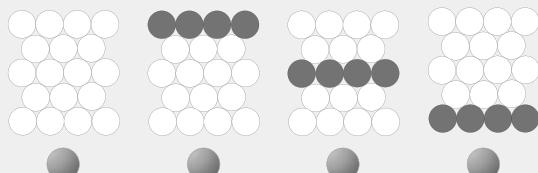
## 要約

水流の中に置かれた障害物が水流にどのような影響を及ぼすのかについて興味を持ち、模式的な実験器具を作成し複数の形状の障害物で実験を行った。その結果、障害物は水流を一部分に集中させる効果や水流の速さを遅くする効果があり、その傾向を数値によるシミュレーションを用いて説明できる可能性があることが分かった。

## 予備実験

目的 | 障害物とビー玉の距離と、水流の速さの関係を調べる。

方法 | A列、C列、E列にそれぞれ4つの障害物を挿入して実験を行った。

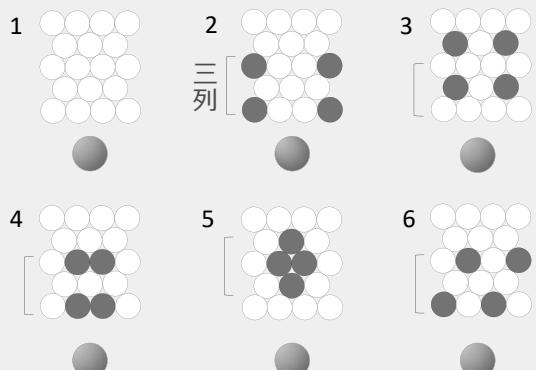


結果 | 障害物とビー玉の間の距離と、水流の速さとの関係は見られなかった。また、障害物を置くことで、水流の速さが遅くなることが確認できた。

これらの結果から、今回の実験装置では、A列からE列のどの列においてもビー玉と障害物との距離は障害物としての効果に関係がないとみなして実験を進めることとする。

## 実験 I

障害物の密集度と水流の大きさの関係を調べるために、使用的する幅は水流と垂直方向の3列分のみと固定し、水平方向の障害物同士の距離のみを変えて実験を行った。なお、対照実験を行うため、1はボルトなしの障害物を用いて実験を行った。

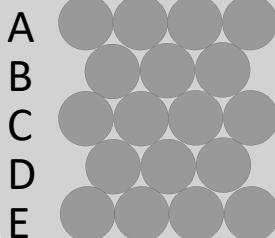


## 実験方法

水中ポンプによって水流が発生する水槽の中に、ビー玉、溝のある定規、障害物を入れる。常に一定の水流を発生させ、ビー玉が動く様子をタイマーと一緒にスローモーションカメラで撮影することによって、ビー玉の速度を求め、障害物と水流の関係を調べた。ビー玉は定規の溝の上に置くことによって、ビー玉の動く向きを縦一方向に限定した。またビー玉は始点を固定し、動き始める時に水流から受ける力を一定にした。

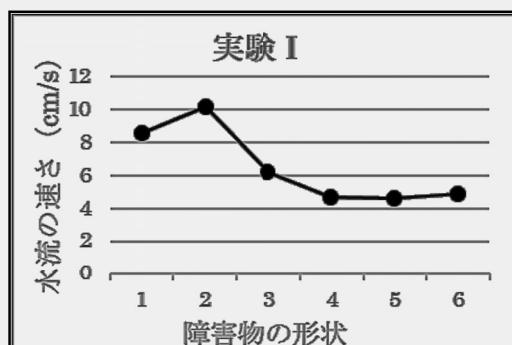
### ＜実験装置の図式化＞

### ＜障害物の図式化＞



## 結果 I

- 1よりも2のほうが水流の速さが速くなった。
- 2→3→4の順に水流の速さが遅くなった。
- 4と5の水流の速さはほぼ変わらなかった。
- 2と6を比較すると6の方が水流の速さが遅くなっている。



## 考察 I

1よりも2のほうが水流の速さが速くなったことから、2の障害物によって水流が一方向に整えられ、水流が速くなったと考えられる。

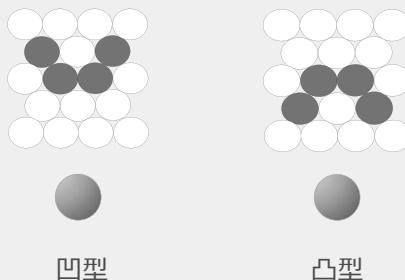
2→3→4の順に水流の速さが遅くなつたことから、障害物が中心にあるほど障害物としての効果が高くなつたといえる。

4と5の水流の速さは変わらなかつたことから、障害物としての効果はボルトの密集度に関係なく、ビー玉側から見た障害物の面積が影響していると考えられる。

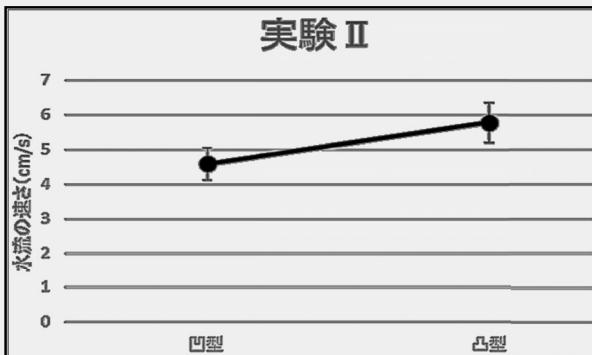
6に関しては、ボルトは密集していないが、4つのビー玉がずれて設置されているため、障害物としての効果が高くなつたと考えられる。

## 実験 II

使用する幅を水流と垂直方向の2列分のみと固定し、同様の実験を行つた。



## 結果 II

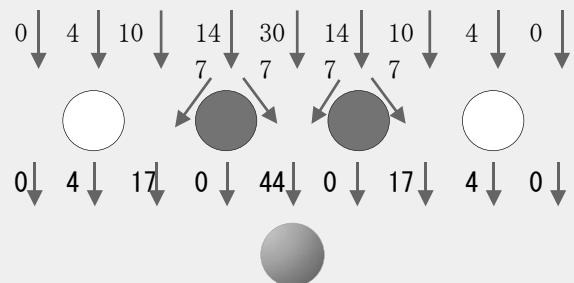


凹型の配置より凸型の配置の方が水流は速くなつた。

## 考察 II

実験 II の結果について考察するため、私たちは、次の条件を用いて水流を数値でシミュレーションした。

1. 水流ポンプが生み出す水流の速さを測定し、その相対値を下図のように定める
2. 障害物に衝突した障害物は左右に半分ずつ分かれる
3. 最終的に、中央を流れた水流の値の大きさによってビー玉への影響の大きさを評価する



## 結果

このシミュレーションを用いて比較したところ、凸型の障害物の場合はビー玉49に相当する水流、凹型の障害物の場合は44に相当する水流が到達していた。したがつて、凸型の障害物のほうがビー玉の速さが速かったことを説明できていると考えられる。

## まとめ

両端のみに障害物がある場合、水流は早められた。また、ビー玉から見て障害物がずれて置かれていると、障害物としての効果が高くなつた。数値を用いたシミュレーションは、凸型と凹型の障害物の結果を考察する際には当てはまつたが、一部、ほかの実験結果と矛盾する点もあり、改善が必要である。

考えられるシミュレーションの問題点として、  
①最初に設定した、水流の大きさを表す数値が適切な大きさでなかつた  
②ボルトの間隔が異なると、単純に水流が半分に分かれたり、まっすぐに進んだりしていると考えることができない等が考えられる。

## 今後の課題

実験 II の結果の考察の際に考えた数値によるシミュレーションは、結果と整合性が取れている点がある一方で、一部他の結果と矛盾する点もあつた。今後、より整合性のあるシミュレーション方法を考えていきたい。

## 参考文献

- 1)アマミホシゾラフグが描く不思議なサークル  
<https://nature-andscience.jp/pufferfish/#page-3> (2020)
- 2)CROWN English Communication II New Edition Lesson 3 Optional Reading Pufferfish in Love 発行者 株式会社 三省堂
- 3)瀬戸内町文化遺産活用実行委員会ホームページ「せとうちなんでも探検隊」  
<http://www.setouchi-bunkaisan.com/about>

# 有孔ボードの水中移動時の揺動

7班 扇 幸太郎 岡室 翼颯  
傍士 陽輝 安田 岳叶

## 要約

ボード回りの乱流によって引き起こされる「揺れ」がボードの穴の有無に影響されるかに興味を持った。形状を変えたボードで実験を行い、速度、揺れの大きさ、レイノルズ数について調べた。

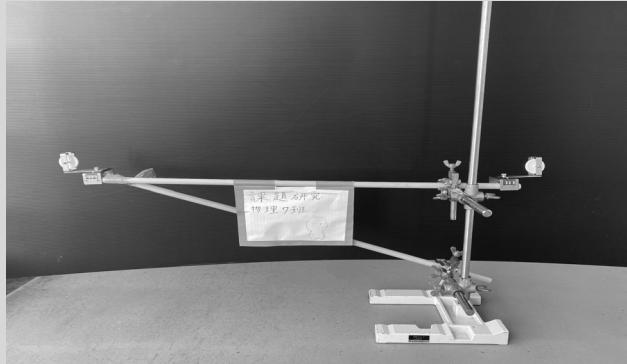
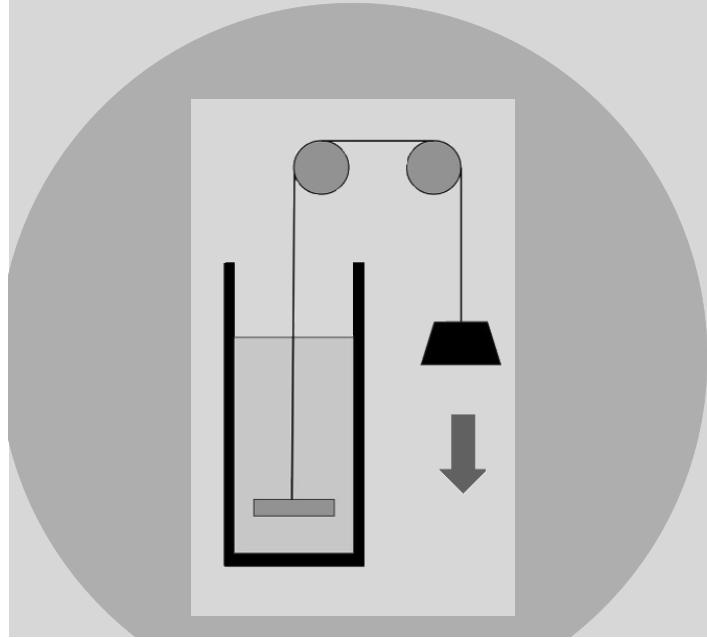
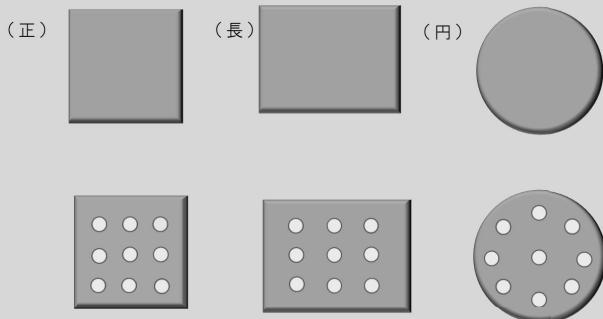
その結果、最も安定して揺動を抑制できたのは六穴のボードで、低速度帶では四穴が、高速度帶では八穴が最も揺動を抑制できた。

## 実験 I

目的 | • 揺動の有無の境界値の算出  
• 平板の形状による境界値の違い

### 方法 |

3枚のアクリル板（正方形、長方形、円）とそれぞれの穴ありのものを用いる（面積全て一定）



## 補足

【揺れなし】…鉛直方向に板が傾かずに上昇する

【揺れあり】…揺れなしの状態に対し、平板が左右に動いたり傾きながら上昇する

【レイノルズ数】

$l$  [m] = (代表長さ)

$v$  [m/s] = (代表流速)

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] = (流体の密度)

$\mu$  [Pa·s] = (流体の粘性係数)

$\nu$  [m<sup>2</sup>/s] = (動粘性係数)

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu}$$

## 結果

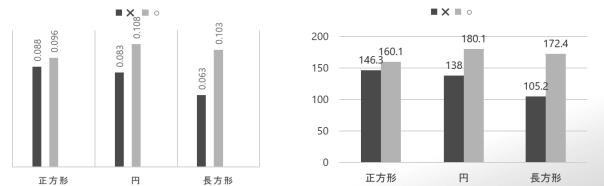
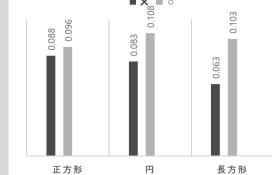
$$l = 0.003[\text{m}] \quad \rho = 1000[\text{kg}/\text{m}^3]$$

$\mu$  = (参考文献④を利用して設定)

### 【揺れの境界値】

アクリル板	穴なし 正方形	穴あり 正方形	穴なし 長方形	穴あり 長方形	穴なし 円	穴あり 円
グラム [g]	14.0	16.5	14.5	17.3	13.0	19.5

### 速度[M/S]

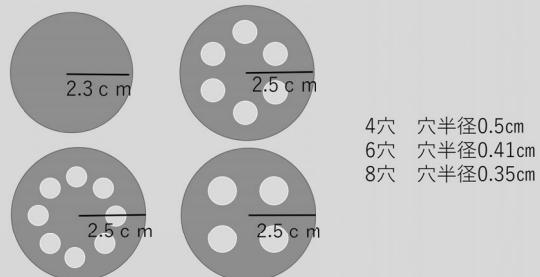


- 穴の開いている板の方が速度が大きくなっている
- 板の形状によって境界値に変化はあるが、いずれにおいても穴の開いている方が境界値が大きい  
→穴の開いている方がより揺れにくい

## 実験 II

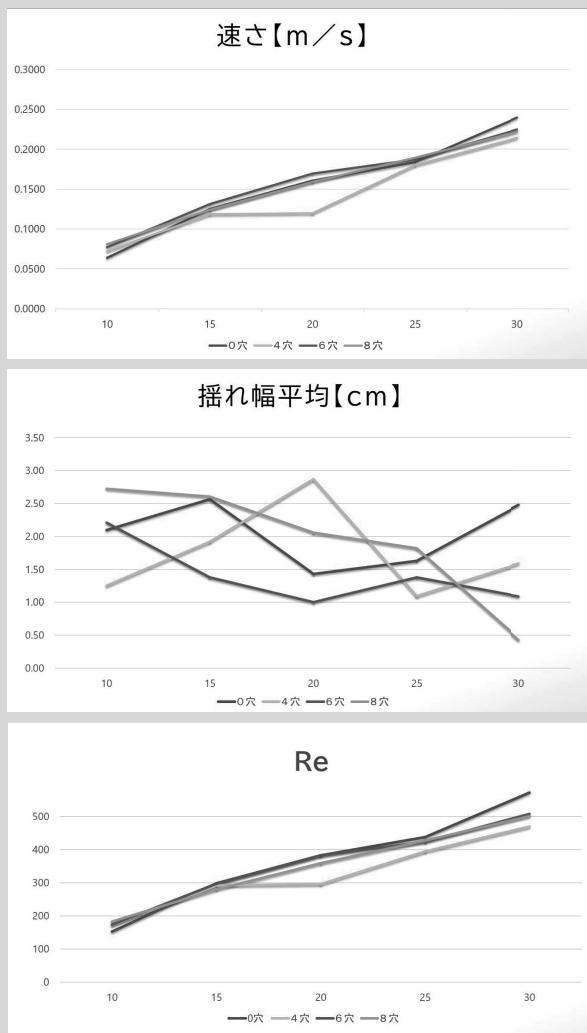
目的 | 穴の数の違いによる揺れの変化を調べる

方法 | 実験 I と同様に行う

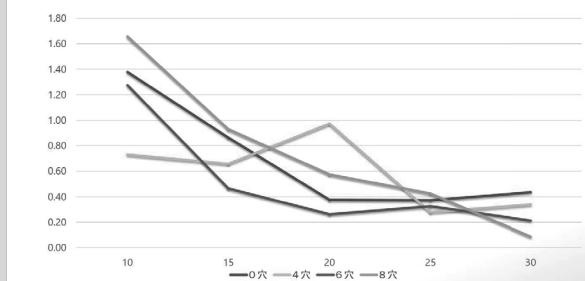


## 結果

横軸はおもりの個数 おもり一個=0.28[g]



(揺れ幅平均)×100/Re



- 各板の速度に大きな差異はなかった。
- 6穴、8穴はおもりが多くなるほど揺れ幅が小さくなつた。
- Reはおもりが少ない場合は各板の差は小さいが、多くなるとその差が大きくなつてゐる。
- おもりが10個の場合は4穴が、おもりが30個の場合は8穴がそれぞれほかの板に比べて揺れ幅平均が小さく、6穴は全重量を通して揺れ幅平均が比較的小さかつた。

## 考察

- 穴をあけることによって乱流が起きやすい状態での揺れを抑制できる。

- 穴の数や板の速度によって揺れの抑制効果は変化する。本研究では、低速度帶では4穴が、高速度帶では8穴が最もその効果が高く、6穴は広い速度範囲でその効果が高いと考えられる。

## 今後の課題

- 上昇中の平板周りの流れの様子の可視化
- 実験を重ねて試行回数を増やす

## 参考文献

- ①水中で動く物体にはたらく抵抗の測定 <http://hdl.handle.net/10105/4777>
- ②レイノルズ数 | 熱流体解析 | ソフトウェアクライドル <https://www.cradle.co.jp/calculation/03rn.html>
- ③多孔板の抵抗特性：第1報.抵抗係数 [https://www.istage.ist.go.jp/article/kikaib1979/50/455/50\\_455\\_1808/article/-char/ja/](https://www.istage.ist.go.jp/article/kikaib1979/50/455/50_455_1808/article/-char/ja/)
- ④4章：粘性係数と動粘性係数 [http://skomo.o.oo7.jp/f28/hp28\\_43.htm](http://skomo.o.oo7.jp/f28/hp28_43.htm)

# 「回転系における独楽の回転」

物理8班 植木想奈 大井悠生 川口諒真 野田雛乃

## ○要旨

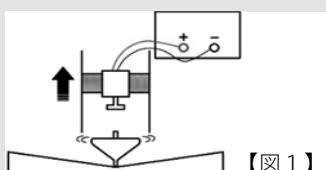
回転座標系で進行する物体にコリオリの力が働くことが分かっているが、この研究で独楽に少し影響を与えることが分かった。また、回転台の角速度に関わらず独楽の速度によって独楽の回転時間が決まることが分かった。

## ○研究動機・目的

一般的に回転系で物体が進行するとき、系の自転によりコリオリの力がはたらくということが知られている。この力が回転体の回転に影響を及ぼすのか興味を持ち、その一つとして独楽を対象として研究を行う。

## ○実験1

本実験では、独楽の回転方向が独楽の回転時間にどれほどの影響を与えるかを調べ、地球の自転が独楽の回転に及ぼす影響について調べることを目的としている。



【図1】

### 〈実験方法〉

- I、電源装置に繋ぎ、モーターを回す。
- II、筒を真上にあげ、時間の計測を始める。
- III、独楽の側面が台につくと計測を止める。

※中心から回転を始めた独楽は最初台の外側を回りやがて中心に収束する。

### 〈結果〉

右図のようになった。

—コリオリの力の公式—

$$F = 2mv\Omega \sin \phi$$

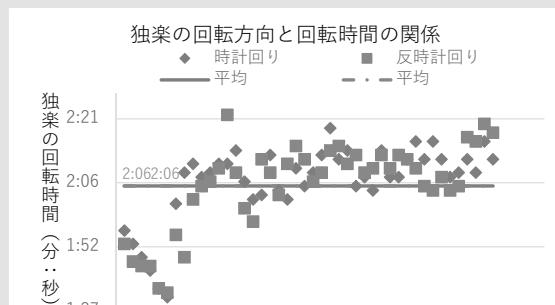
地球の自転の角速度:  $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$

質量:  $M = 0.015 \text{ kg}$  緯度:  $\Phi \approx 37^\circ$

独楽の速度:  $V \approx 0.3 \text{ m/s}$  (動画を用いて測定)

$$\Rightarrow F = 3.95 \times 10^{-7} \text{ [N]}$$

地球からはたらくコリオリの力はとても小さく、実験結果には影響を与えていなかったと考えられる。



【図2】

## ○実験2

コリオリの力を大きくするために、実験1で使った装置を回転する台の上に置いた。(角速度が大きくなる)

### 〈結果〉

右図のようになった。

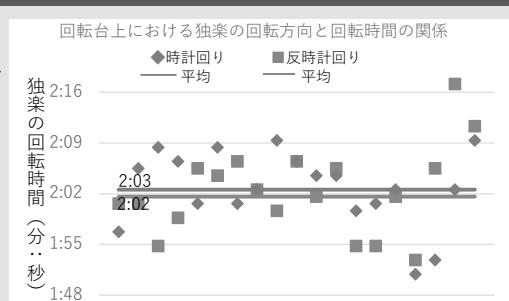
—コリオリの力の計算—

回転台の角速度:  $\Omega = 0.46 \text{ rad/s}$

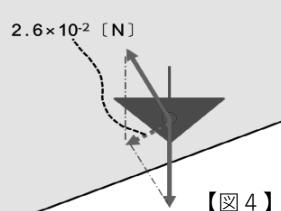
質量:  $M = 0.015 \text{ kg}$  独楽の速度:  $V \approx 0.3 \text{ m/s}$

回転軸に対する回転面の角度:  $\Phi = 90^\circ$

$$\Rightarrow F = 4.14 \times 10^{-3} \text{ [N]}$$



【図3】



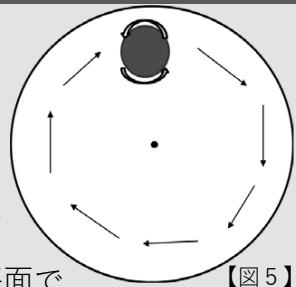
【図4】

斜面上で独楽に働く重力の斜面に平行な下向きの分力を計算したところ、 $2.6 \times 10^{-2} \text{ [N]}$  であった。これより、コリオリの力はこの力の  $1/6$  の大きさであることがわかった。

### 〈考察〉

独楽が反時計回りに自転する時、台の上を時計回りに公転し、コリオリの力は常に中心方向にかかるので台の中心に早く収束する。独楽が時計回りに回る時はその逆である。

独楽が止まるのは空気抵抗や台との摩擦が要因であるが独楽の断面積が小さいため空気抵抗はほとんど作用しない。故に独楽が止まる最大の要因は台との摩擦である。摩擦は垂直抗力に比例する。平面上で独楽にはたらく垂直抗力は斜面上で独楽にはたらく垂直抗力よりも大きいため独楽がほぼ平面である台の中心で回転するときのほうが大きな摩擦力がかかる。早く中心に収束する反時計回りに自転する独楽のほうが早い段階からより大きな摩擦を受け始め止まるまでの時間が短くなる。よって地球の自転により反時計回りに自転する独楽は回転時間が短くなると考えられる。



【図5】

## ○実験3

台を外していくつかの条件で独楽を回すと回転台から落ちる時と落ちない時があった。先行研究によると回転台上で一定の条件でボールを転がすとボールが台から落ちずその場で回り続ける場合がある。そこで回転台の角速度と独楽の回転数の関係を調べることとした。

### 〈実験方法〉

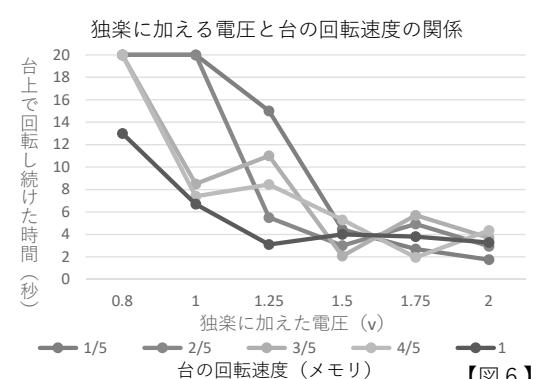
実験2と同様の操作を台を取り除いて回転台に直接独楽を回して行う。回転台の角速度と電源装置の電圧を変化させ独楽が台上から落ちるまでの時間を計測する。

### 〈結果〉

右図の通り

### 〈考察〉

独楽の回転速度が小さいほど独楽が台から落ちずに回りきる場合が多く、回転する時間も長くなった。また、電圧が小さい、つまり独楽の回転速度が小さいほど回転台の角速度による独楽が回転した時間の差が大きくなつた。そのため、さらに回転速度を小さくすると回転台の回転との調和がとれる値が存在する



上のグラフにおいて台上から独楽が落ちなかつた場合はグラフの見やすさのため20秒としてグラフを作成した。尚、回転時間は2回計測した値の平均値とした。

## ○まとめ

- ・ 地球の自転によるコリオリの力は小さく実験結果にほとんど影響を与えていない。
- ・ 斜面上で独楽に働く重力の斜面に平行な下向きの分力を計算したところ、コリオリの力の6倍の大きさであったため実験1と比べると影響があると考えられる。
- ・ 回転台の上で独楽を回すとき回転速度をさらに小さくすると独楽の回転と回転台の回転の調和がとれる点が存在すると考えられる。

## ○展望

- ・ 装置を改良してより正確な実験を行う。
- ・ ハイスピードカメラを用いて独楽の速度を計測し、コリオリの力をより正確に計算する。
- ・ 平面と斜面では独楽の公転の方向が逆になった。この現象について我々はジャイロ効果が深く関わっていると考えている。このことについて考察していく。
- ・ 回転時間以外の指標でコマの回転への影響を調べる。

## 参考文献

- ・ 基礎物理学シリーズ1 力学  
副島雄児 杉山忠男

- ・ ゼロから学ぶ力学 都築卓司
- ・ 大津市科学館〈スピンドィスク〉



# 石の回転が水切りに及ぼす影響

林 駿佑 水谷 匡寿 屋鋪 樹希 丹羽 琴美

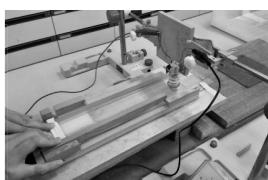
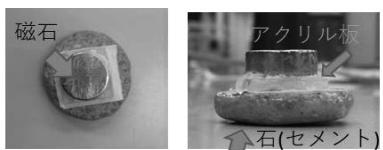
## 要約

石の回転が水切りにどのような影響を及ぼすのかに興味を持ち、石を回転させながら発射する装置を作成して実験を行った。その結果、回転数を上げると石の軌道は安定し、石が水の影響を受けにくくなるという大きく分けて二つの石の回転が水切りに及ぼす影響を実測値を用いて示すことに成功した。

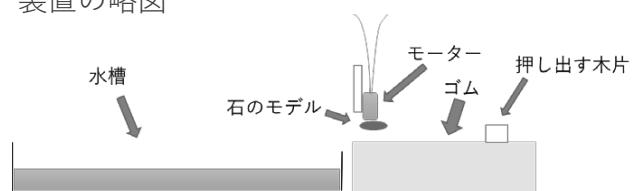
## 実験装置

モーターに磁石で取り付けた石を、ゴムの張られた木片を

引いて、手を離すことで押し出す仕組み



装置の略図



## 実験①

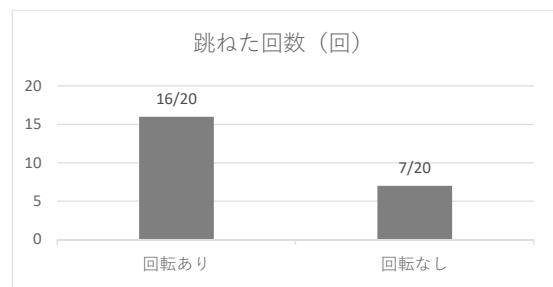
**目的**：石の回転は水切りの跳ねる割合に影響を与えるかを調べる

**方法**：石を回転させる場合、させない場合それぞれ20回ずつ石を発射し、跳ねる割合を測定

## 結果・考察①

**結果**：グラフ1から、回転している石の方が回転させていない石の2倍以上の確率で跳ねた

**考察**：回転が水面に影響を及ぼしているのではなく、回転によって石の軸が安定し跳ねやすくなっているのではないかと考察した



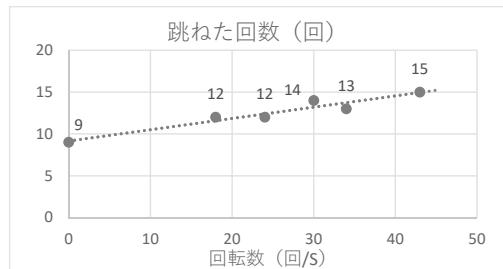
## 実験②

**目的**：石の跳ねる割合と軸の安定の関連性やほかの影響を調べる

**方法**：石の回転なし、回転あり（回転数18回/s、24回/s、30回/s、34回/s、43回/s）の場合について、それぞれ20回ずつ試行を行う

石が跳ねた回数、跳ねた後次に着水するまでの石の縦回転の回数、石が跳ねた場合、石が最初に着水した位置と次に着水した位置との距離(ランダムに10回分抽出)を測定

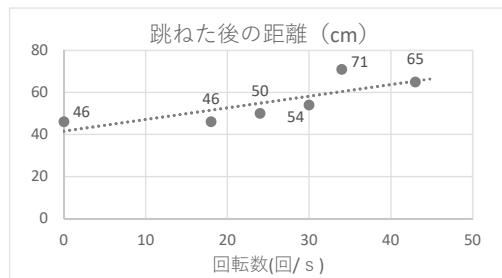
## 結果・考察②



グラフ2

### 石の跳ねた回数について！

グラフ2より、回転数が上がるほど石の軸の安定性が上がり、それによって跳ねる割合も上がったと考えられる。



グラフ4

### 石が跳ねた後の距離について！

石が着水した瞬間にはたらく力は、図1における $F_{\perp}$ 、 $F_{//}$ の2つである。回転数を上げると、跳ねた後の距離が大きくなっているので水が $F_{//}$ によって石に及ぼす影響が小さくなり水平方向の速さの減少率が減ったと考えた。

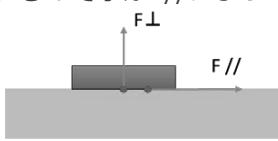
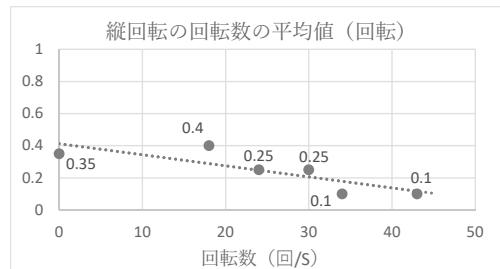


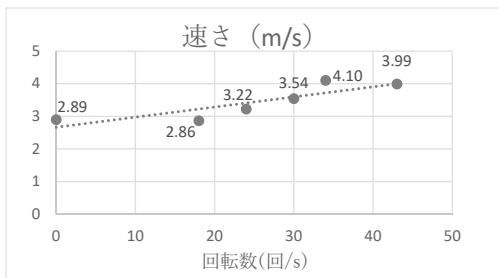
図1



グラフ3

### 縦回転について！

水面に当たって跳ね上がった後も縦回転が起こりにくくなっているため、回転数が多いほど、着水後の軌道も安定していることがわかる。



グラフ5

### 石が跳ねた後の水平方向の速さについて！

石が跳ねたのちの距離に関する考察を示すため、石の水平方向の速さを実際に計測した。その結果、グラフ5のように回転数が多いほど速さが速くなった。これは、回転数が多いほど石が水の影響（水が $F_{//}$ によって石の水平方向の速さを遅くする、いわば、ブレーキのような効果）を受けにくくなつたためであると考えた。

## 結論・成果

回転数を上げると石の回転軸が安定し、石が水の影響を受けにくくなつたことが分かった。

また、石の回転が水切りに及ぼす影響を実際に計測したデータを用いて示した点がこの研究の成果である。

## 今後の展望

- ・試行回数を増やし、結果の信頼性を高める
- ・手動で石を発射していたため、装置を自動化する
- ・石の回転が及ぼすほかの影響の考察

参考文献：<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.94.174501>  
「Theoretical and Numerical Approach to “Magic Angle” of Stone Skipping」



# 円分多項式の最小性に基づいた一般化

数学10班 田辺隆晟 時田真之介 宮田航平 村木智直

## 要約

円分多項式は有理数体上での $\zeta_n$ の最小多項式として知られている。我々は、より大きな数体系上での最小多項式を考えることで円分多項式を一般化し、それについても元の円分多項式と同様の性質があることを証明した。

## 導入: 1の n乗根と原始 n乗根

### 【1の n乗根】

方程式  $x^n - 1 = 0$  の解。

その一つは

$$\zeta_n = \cos \frac{2\pi}{n} + i \sin \frac{2\pi}{n}$$

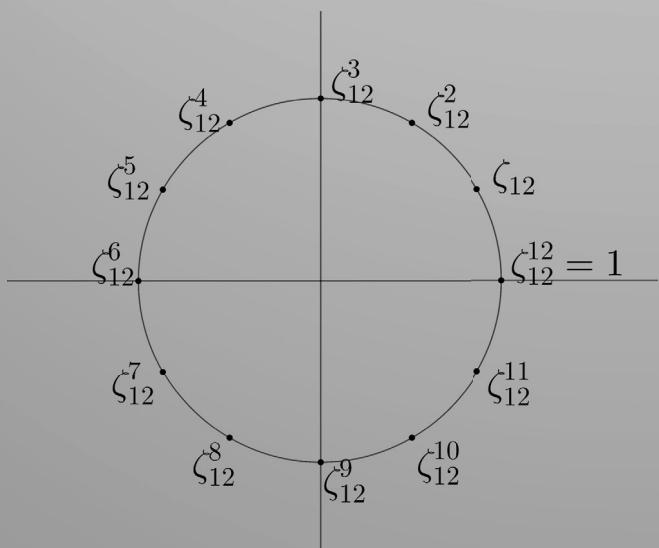
n個の解を、 $\zeta_n, \zeta_n^2, \dots, \zeta_n^n$  とおく。

### 【原始 n乗根】

n乗して初めて 1 になる。

<性質>

• n と k が互いに素  $\Leftrightarrow \zeta_n^k$  が原始n乗根



$\zeta_{12}^k$  ( $1 \leq k \leq 12$ ) を複素数平面上にあらわすと上のように単位円を等分する。

## 導入 : 円分多項式

### 【円分多項式】

円分多項式  $\Phi_n(x)$  は以下の式で定義される、原始n乗根を解にもつ多項式である。

$$\Phi_n(x) = \prod_{\substack{1 \leq k \leq n \\ \gcd(k, n) = 1}} (x - \zeta_n^k)$$

例: n = 12 のとき

$$x^{12} - 1 = (x - \zeta_{12})(x - \zeta_{12}^2) \cdots (x - \zeta_{12}^{12})$$

ここから原始12乗根のみを取り出した。

$$\begin{aligned} \Phi_{12}(x) &= (x - \zeta_{12})(x - \zeta_{12}^5)(x - \zeta_{12}^7)(x - \zeta_{12}^{11}) \\ &= x^4 - x^2 + 1 \end{aligned}$$

が n = 12 における円分多項式である。

### 【円分多項式の性質】

性質 1: 整数係数

$$\zeta_{12} = \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}i$$

のように、 $\zeta_n$  は複素数を用いて定義されるが、円分多項式は展開するとすべての項の係数が整数である。

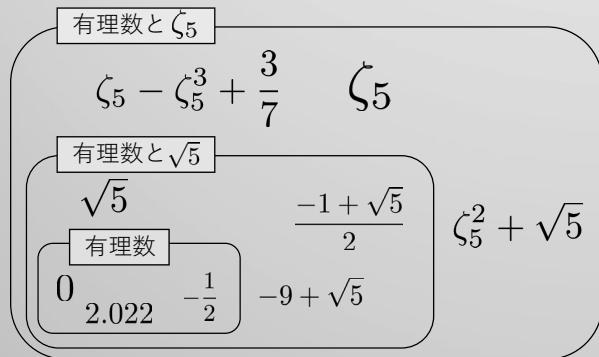
性質 2: 最小多項式

「有理数上での  $\alpha$  の最小多項式」とは、 $\alpha$  を解にもつ有理数係数の多項式で最も次数が低いものであるが、円分多項式は有理数上での  $\zeta_n$  の最小多項式である。

## 円分多項式の一般化

円分多項式は、 $\zeta_n$  の有理数上での最小多項式であるが、他の数体系上での最小多項式を考えた。

### 【数体系の拡大】 数体系の拡大の例



$$\text{※ } \sqrt{5} = \zeta_5 - \zeta_5^2 - \zeta_5^3 + \zeta_5^4$$

### 数体系の拡大と最小多項式

#### $\zeta_5$ の有理数上 の最小多項式

$$x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$$

#### 有理数と $\sqrt{5}$

$$x^2 - \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}x + 1$$

#### 有理数と $\zeta_5$

$$x - \zeta_5$$

※厳密には以下のように一般化した円分多項式は定義される。

$n$  を正の整数、 $H$ を  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$  の部分群、 $\tau \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$ とするとき、多項式  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$ を次のように定義する。

$$\Psi_{(n,\tau H)}(x) = \prod_{\sigma \in \tau H} (x - \sigma(\zeta_n))$$

$\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$  の Galois 対応において、 $H$  に対応する中間体を  $M$  とすると  $\Psi$  は  $\tau(\zeta_n)$  の  $M$  上の最小多項式であることが証明できるのでこの定義が円分多項式を一般化したものといえる。

## 一般化円分多項式の性質

### 【整数係数】

元の円分多項式は整数係数であるが、一般化した円分多項式も拡大した数体系上での整数係数であることを示した。

## 成果

・円分多項式をその性質のひとつを用いて一般化した。

・一般化した円分多項式には、元の円分多項式と同様の性質があることを証明した。

## 展望

・一般化した円分多項式の性質について研究をさらに深める。

・円分多項式において成り立つ定理が一般化した円分多項式においても成り立つか証明する。

## 参考文献

- ・雪江明彦 『代数学2 環と体とガロア理論』 日本評論社
- ・J.Neukirch 『Algebraische Zahlentheorie』

# **発表ポスター集（英語）**



# The External Memory Factor of True Slime Molds



Biology Group 1 Yasuomi Nakamura Haruchika Kuga Nana Hirao Mitsuki Yamada

## ○Summary

True slime molds (here after referred to as slime molds) have a nature of memorizing places they passed once. We know that this is due to the mucus secreted by slime molds. In this study, there is a good chance K in their mucus is involved the nature.



## 1 .Introduction

Slime molds memorize places they passed once before by leaving their mucus along the path they moved. In the study, we will define the component in their mucus that stores places they pathed as “**external memory factor**”, X. Our purpose is identifying X.

Figure 1,2

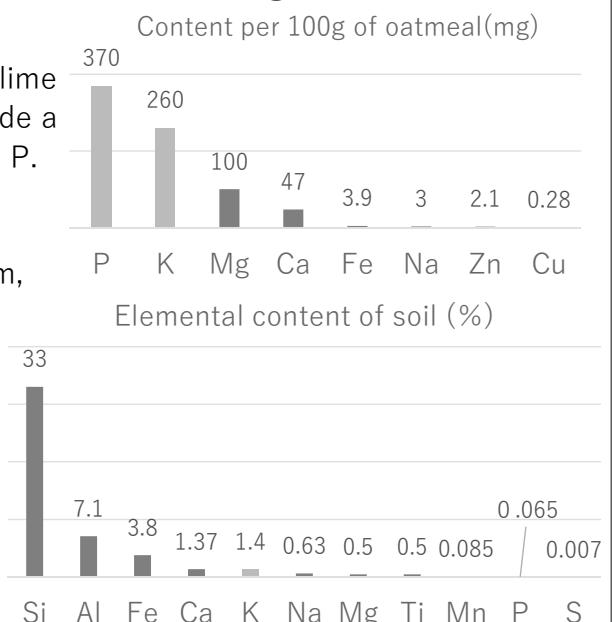
### <Hypothesis>

We thought their mucus should be made from what slime molds intake. From Figures 1 and 2 on the right, we made a hypothesis that X is either potassium, K or phosphorus, P.

### < Previous Study>

When slime molds spread mucus on a culture medium, they could not distinguish the places they passed before. Thus, the population of slime molds which could identify the shortest path decreased.  
(Nakagaki,2016)

Also, slime molds avoid aqueous solutions which are not between pH4 and pH7 . (Chris R.Reid,2012)

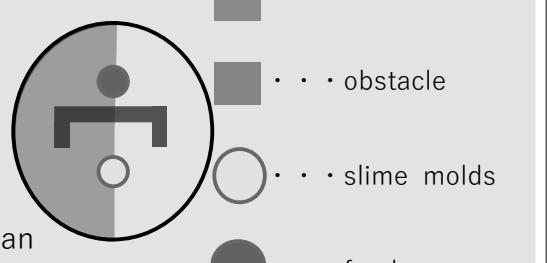


## 2 .Experiment

We experimented with only K because of the pH of aqueous solution and ease of the experiment.

### <Methods>

We spread a testing material (mucus,KNO<sub>3</sub> or KCl)on one half of the agar medium, We set up the experimental setup as shown in the Figure 3. After that, we observed their movement for 72 hours. We used Physarum polycephalum for our slime molds.



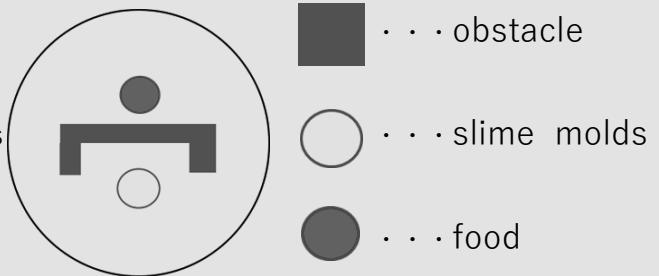
### <Preliminary Experiment>

We spread mucus on one side of an agar medium and did an experiment. As a result, our slime molds avoided the places where we spread mucus and reached the food.

Figure3

### <Control Experiment>

The experiment was conducted without applying any substance to this experimental agar medium. As a result, it was confirmed that the slime molds moved to avoid obstacles and reached the food.



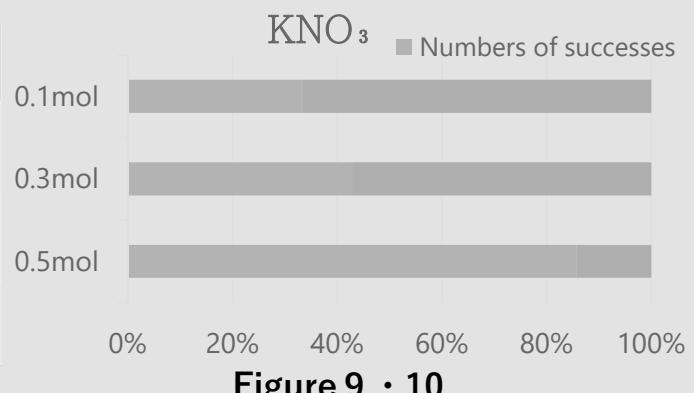
**Figure 6**

### <Formal Experiment>

Potassium nitrate ( $\text{KNO}_3$ ) and potassium chloride (KCl), which are neutral, were used as K-containing substances.

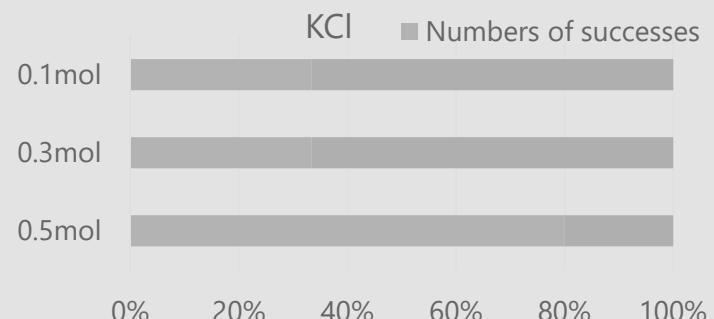
$\text{KNO}_3$	0.1mol/L	0.3mol/L	0.5mol/L
Number of trials	6	7	7
Number of successes	2	3	6
Probability of success(%)	33. 3	42. 9	85. 7

**Figure 7 • 8**



**Figure 9 • 10**

KCl	0.1mol/L	0.3mol/L	0.5mol/L
Number of trials	6	6	5
Number of successes	2	2	4
Probability of success(%)	33. 3	33. 3	80. 0



We define a "successful experiment" as one in which the slime mold does not pass through the half-surface to which the substance is applied, but moves in the direction of the food.

## 3 Discussion

- It is quite possible that X is K.
- It is considered that the concentration of X contained in the mucus is close to or even higher than 0.5mol/L.

## 4 Considerations

- We have to check the component of the mucus.
- We want to conduct experiments about P.
- We would like to conduct experiments with high-concentration substances which are not seemed to be X and with  $\text{KNO}_3$ , KCl and P over 0.5mol/L.

### References

- Nakagaki Toshiyuki (2016) Nenkin ni 「chisei」 haaruka. Tansaibouseibutsu ni 「ningenrasisa」 no kigen wo saguru, kokou no kenkyuu <https://shochou-kaigi.org/>
- Chris R.Reid et al.(2012) Slime Molds uses an externalized spatial “memory” to negative in complex environments
- Takahashi Kazunari(2012) nenkinhenkeitai no kagakusousei wo ryousita koukouseibutsujikken no kaihatsu

# Cannibalistic Behavior of *Reticulitermes speratus*



Taguchi Maho Tanaka Yosei Furuya Sena Mizukami Koichi

## Summary

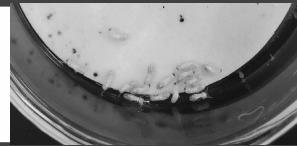
Termites are social insects, and, in the previous research, it has been found they feed on each other. We thought the longer they starve, the more they are likely to eat a termite which has a scar on the body, we proved this hypothesis.

### Termite

Scientific name : *Reticulitermes speratus*

↳ Social insect → Cannibalistic Behavior

- ① Classes
- ② Injured
- ③ Starvation



We keep them under starvation.

### RESULT

Cannibalism did not happen for 4 days.

We investigate changes in cannibalistic behavior over the number of days of starvation.



A wet glass fiber filter paper



Scar on its head



	injure	keep	keep	keep
Day 1	↓ 24h	1day		
Day 2	observe	injure	2day	3day
Day 3		24h		
Day 4		observe	injure	
Day 5			24h	observe

Prepare 20 workers × 4 sets

Keep under starvation condition

- ① for no day
- ② for 1 day
- ③ for 2 days
- ④ for 3 days

Injure and paint a termite in a petri dish

Keep them in a incubator

Check if cannibalism happens

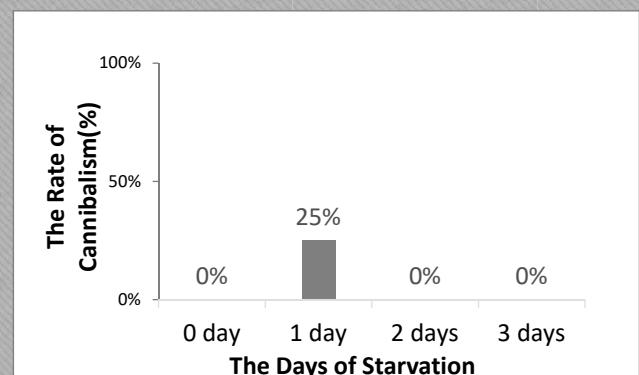


Check that butter milk paint does not induce cannibalism of termite.

## RESULT



Experiment.2



Experiment.3

## Conclusion

### Experiment.2

The rate that they eat two termites is also increased with the passage of days.

A termite was stained bodily fluids of injured one.

Keeping starvation condition made cannibalism radical.

### Future perspective

Unknown if all termites took part in cannibalism.

Research relation between the number of termites taking part in cannibalism and the number of days of starvation.

One injured termites.

Multiple injured termite.

Hard to control humidity.

Search the way we keep at a certain humidity.

The possibility of behavior changing with temperature.

Experiments with varying temperature condition.

### Experiment.1

In case that there is no injured they did not feed on each other for at least 4 days

Cannibalism was caused by exist of injured termites.

### Experiment.3

Cannibalism happened once.

Injured it mistakenly ?

## References

Cannibalism associated with artificial wounds on the bodies of Reticulitermes speratus workers and soldiers(Isoptera:Rhinotermitidae);College of Bioresource Sciences, Nihon University, Yasuyuki Yamanaka

シロアリの事典:Tsuyoshi Yoshimura, Shuji Itakura, Ryutaro Iwata, Wakako Omura, Koji Sugio, Yoko Takematsu, Gaku Tokuda, Kenji Matsuura, Toru Miura

# Semi-solidification of Batteries Using Gelatin

Chemistry Group 3 Ito Yuma Okada Takuya  
Nakanishi Gento Fukushima Sota

## Introduction

These days, batteries are used in various fields. Batteries that use a liquid electrolyte cannot be carried unless they are placed in a container, and there is a problem that liquid leakage . Therefore, we started research with the goal of making a semi-solidified voltaic battery and improving the safety of the voltaic battery.

## Preliminary Experiments

Purpose | To change the concentration of  $H_2SO_4$  and check how HM pectin and gelatin harden and the current value.

Method | ① We heated the Pure water(30mL) to 90°C, and added HM pectin( g) or gelatin( g)  
 ② We added  $H_2SO_4$  with different molar concentration(0.10mol/L, 0.50mol/L, 1.00mol/L).  
 ③ We cool the liquid of ② with ice water  
 ④ We use a copper plate and zinc plate as electrodes and examine the current values of each.

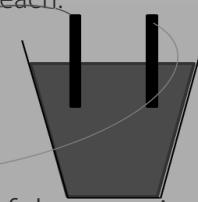
Result | When using HM pectin, the electrolyte remains in liquid form, which is not suitable for the semi-solid state of voltaic batteries, the purpose of this research, so we decided to use gelatin, which has been successfully converted to semi-solid state.

## Experiment1

Purpose | To study the relationship between the fluidity of the electrolyte and the current value by varying the amount of gelatin.

Use | Gelatin(0.0g, 0.5g, 1.0g, 1.5g, 2.0g),  $H_2SO_4$  1.0mol/L(30ml), A gas burner Beakers, An ammeter, Plates (copper and zinc), Lead wire

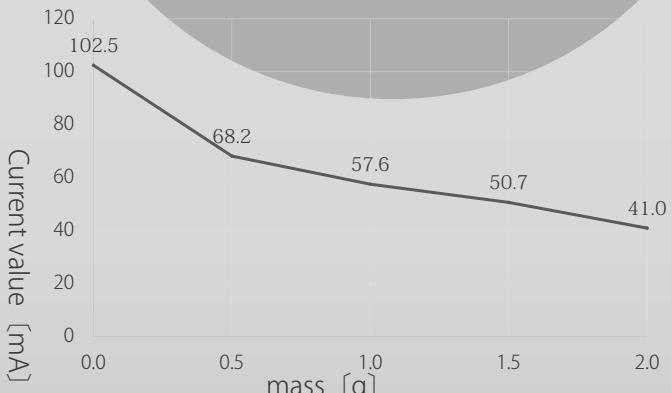
Method | ① We heated 30 ml of sulfuric acid to 40°C with a gas burner and add gelatin (0.0g, 0.5g, 1.0g, 1.5g, 2.0g).  
 ② We cooled and solidified the liquid in (1) in ice water.  
 ③ We used a copper plate and a zinc plate as electrodes, and investigated the current values of each.



(Figure1) Schematic of the experiment

## Result1

As the mass of gelatin was increased, the viscosity increased and the current value became lower.



(Figure2) The relationship between the molar concentration of  $H_2SO_4$  added and the current value extracted

## Experiment2

Purpose | Varying the concentration of sulfuric acid, examine the gelatin solidification and the current value.

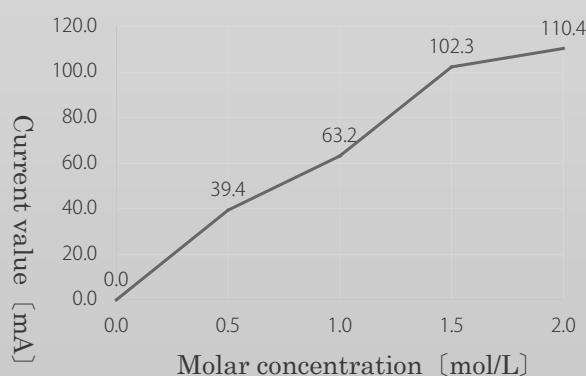
Use | Gelatin (1.0g), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0.0mol/L, 0.5mol/L, 1.0mol/L, 1.5mol/L, 2.0mol/L) (30ml), A gas burner, Beakers, An ammeter, Plates (zinc and copper), Lead wire

Method |

- ① We heated 30 ml of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0.0 mol/L, 0.5 mol/L, 1.0 mol/L, 1.5mol/L, 2.0mol/L) to 40°C with a gas burner, add 1.0 g of gelatin, and dissolve.
- ② We cooled and solidified the liquid in ① in ice water.
- ③ We used a copper plate and a zinc plate as electrodes., and check their current values.

## Result2

In Experiment 2, as the molar concentration of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> increased, the fluidity of the electrolyte increased, and at 2.0 mol/L, the electrolyte remained liquid. It is considered that the sulfuric acid destroyed the structure of gelatin. The current value also increased as the molar concentration of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> increased.



(Figure 2) Relationship between molar concentration of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and current value.

## Discussion

- Because the highest current was obtained when 1.0 g of gelatin was added, while maintaining the defined semi-solid state, we considered that it is the most ideal semi-solid-state battery for this experiment.
- In experiment 2, the current value was higher because the molar concentration of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> increased, or because the structure of gelatin was broken by H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, which increased its fluidity.

## Considerations

- Since H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destroys the structure of gelatin, we investigate the change in current when using electrolytes other than H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.
- In experiment 2, the current value increased because the molar concentration of sulfuric acid increased, or because the structure of gelatin was broken by H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, and the fluidity increased.
- We will search for and verify substances that are more resistant to acid than gelatin and can gel electrolyte.
- We will represent concretely, and investigate its relationship with current value.



(Picture) From left to right: 0.5g, 0.0g, 1.0g, 1.5g, and 2.0g of gelatin was added.

## References

- "Extracting chemical energy using slime batteries" Katsumi Nonoguchi
- "Pectin properties and gelation" Hiroshi Miura
- "National University 55 Faculty of Engineering Homepage"
- "Food Development Lab Gelatin-Thorough explanation from the basics-" Unitech Foods Co., Ltd.

# Optimization of $\text{NO}_3^-$ reduction Using Metal Powder



4th group Kawaguchi Yui Yoshioka Yuri Nishimura Haruto Sasanuma Ryota

## Summary

In recent years, nitrogen (mainly  $\text{NO}_3^-$ ) in various types of wastewater has been causing serious pollution of natural waters. In this study, copper and various kinds of metal powders were used to reduce  $\text{NO}_2^-$  to  $\text{NH}_4^+$ , which can be easily removed. As a result of the experiment, it was found that the larger the difference in potential between the copper and the iron, the higher the reduction efficiency. In addition, we consider that  $\text{NO}_3^-$  was relatively often reduced to  $\text{NH}_4^+$  without passing through  $\text{NO}_2^-$  when we use Sn and Fe.

## Introduction

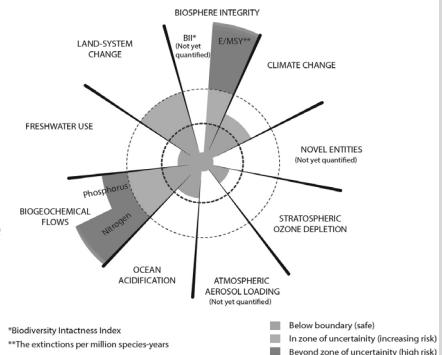
Environmental damage caused by nitrogen become more serious



$\text{NO}_3^-$  is contained in household drainage and agricultural drainage



Improved known method of reducing  $\text{NO}_3^-$  to more easily removable  $\text{NH}_4^+$



## Preliminary Experiment

Add copper-supported Fe powder (Fe powder with copper attached to its surface) to the aqueous solution containing  $\text{NO}_3^-$   
→ The reduction of  $\text{NO}_3^-$  to  $\text{NH}_4^+$  in the aqueous solution was confirmed

## Hypothesis

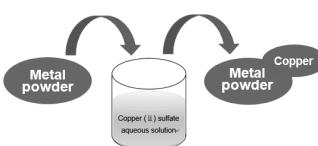
By changing the Fe powder used in the previous study to a metal powder with a higher ionization tendency, more reduction reactions (more efficient reduction reactions) can be carried out in a shorter time

## Main Experiment 1

1) Immerse iron powder in 1 mol/L hydrochloric acid for 5 minutes → Remove oxides

2) Add 0.75 mol/L copper(II) sulfate solution  
→ Precipitating copper on the iron surface

3) Filter the powder in 2)  
→ Wash with pure water  
→ Add to 200 mL of 0.04 mol/L sodium nitrate solution



4) Stir and leave 3) for about one day  
→ Filter them  
→ Measure absorbance  
→ Calculate molarity of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NO}_2^-$



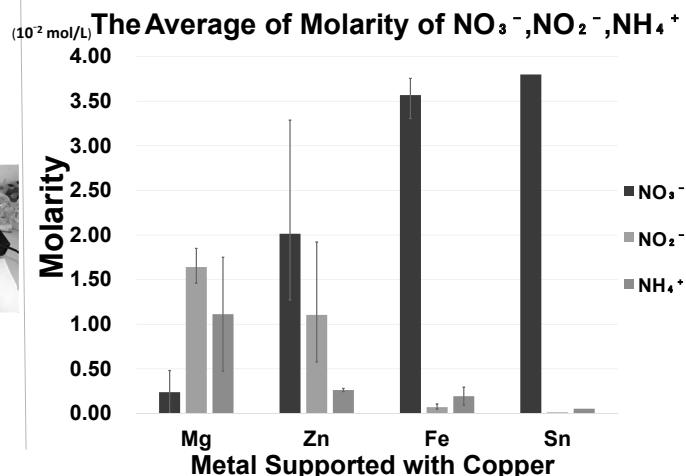
5) Measure the molarity of  $\text{NH}_4^+$  by indophenol blue absorptiometry

## Results 1

We did the experiment for three times

First experiment : Sn was not used and  $\text{NH}_4^+$  molarity was not measured due to the availability of chemicals

Third experiment : We made a mistake and did not obtain any data for Sn



## Consideration 1

Metal with a higher ionization tendency : The reduction rate of  $\text{NO}_3^-$  to  $\text{NO}_2^-$  and  $\text{NH}_4^+$  in the aqueous solution was high

→ We can reduce  $\text{NO}_3^-$  more efficiently by metals with higher ionization tendency

Mg or Zn: The amount of  $\text{NO}_2^-$ , which is considered to be a substance in the process of reduction to  $\text{NH}_4^+$ , will also be larger

$\text{NO}_2^-$  is more toxic than  $\text{NO}_3^-$  and is less easily removed as well as  $\text{NO}_3^-$

→ It is also important to avoid  $\text{NO}_2^-$  generation

Fe, Sn : The amount of  $\text{NO}_2^-$  generated is small

## Main Experiment 2

### Preliminary Investigation

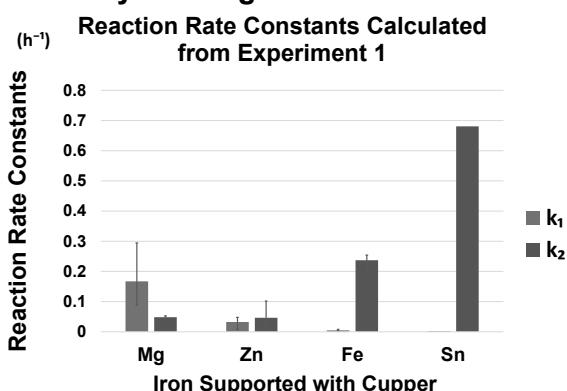
- Using the data from the experiment 1 , we calculated the rate constants for each reaction
- Reaction rate of  $\text{NO}_3^-$  to  $\text{NO}_2^-$  :  $k_1[\text{NO}_3^-]$
- Reaction rate of  $\text{NO}_2^-$  to  $\text{NH}_4^+$  :  $k_2[\text{NO}_2^-]$
- pH is not taken into consideration

### Experimental Method

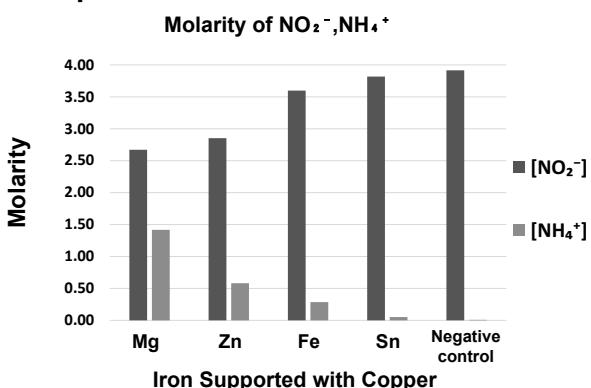
Prepare Fe, Zn, Mg, and Sn powders by the same method as in the previous study and add them into  $400 \times 10^{-2}$  mol/L sodium nitrite solution  
Examine the absorbance and calculate the molarity of  $\text{NO}_2^-$   
Calculate the molarity of  $\text{NH}_4^+$  by Indophenol blue absorption spectrophotometry

## Result 2

### Preliminary Investigation



### Main Experiment 2



## Consideration 2

### Preliminary Investigation

→ The smaller the ionization tendency, the more efficient the reduction of  $\text{NO}_2^-$  to  $\text{NH}_4^+$

### Main Experiment 2

→ The larger the ionization tendency, the more efficient the reduction of  $\text{NO}_2^-$  to  $\text{NH}_4^+$

In relatively more cases,  $\text{NO}_3^-$  is reduced to  $\text{NH}_4^+$  without going through  $\text{NO}_2^-$

## Conclusion

In terms of reduction efficiency, Mg is suitable

In terms of the burden on the environment, Fe and Sn are suitable

## Challenges and Prospects

- Search for a reduction method with high reduction efficiency and low environmental burden
- Confirm whether the reduction to  $\text{NH}_4^+$  without  $\text{NO}_2^-$  is really occurred in the reduction using Fe and Sn
- Consider from more perspective to make this study practical

### Reference

- 岡倉慎司、朝倉祝治；「中性溶液中における銅担持鉄粉を用いた $\text{NO}_3^-$ の還元」電気化学および工業物理化学62巻4号 pp354-355 (1994)
- 日本原子力研究所；「硝酸態窒素による地下水汚染とその対策法」JAERI-Review'2003-007
- 理化学研究所：温和な環境で働く人工脱窒触媒-微生物の仕組みに学ぶ環境浄化技術-、2018-03-29https://wwwrikenjp/press/2018/20180329\_2/
- ト部吉庸；「化学の新研究；改訂版」三省堂（2019）
- Johan Rockström、Mattias Klum（著）；武内和彦、石井菜穂子（監修）；谷淳也、森秀行ほか（訳）；「小さな地球の大きな世界；プラネットアリー・バウンダリーと持続可能な開発」丸善出版（2019）
- 木下實、大野公一ほか17名；「化学基礎；新訂版」実教出版（2021）
- 木下實、大野公一ほか18名；「化学；新訂版」実教出版（2021）
- 数研出版編集部(編)；「フォトサイエンス；化学図録」数研出版（2017）
- 山本玲子；「生体為害性金属元素と材料」までりあ43巻8号 pp 639-642 (2004)
- 化学実験テキスト研究会（編）；「環境化学」産業図書（1998）

# Improving the efficiency of water electrolysis using photolysis of titanium dioxide (IV)

Chemistry Group 5 Okada Daichi Takami Ryousuke Hirakawa Nao Yamanisi Eita

## 1

I was interested in photocatalytic reactions using titanium dioxide (IV), and decided to investigate the "Honda-Fujishima effect," which is a typical example.

The Honda-Fujishima effect is a reaction in which titanium dioxide (IV) is irradiated with ultraviolet light to cause photolysis and separate water into oxygen and hydrogen.

In this reaction, which was first discovered in 1972, water electrolysis requires a voltage of 1.23 V.

However, by using titanium dioxide (IV) as the anode, electrolysis of water can be carried out with a voltage of only about 0.5 V.

## 2. preparatory experiments

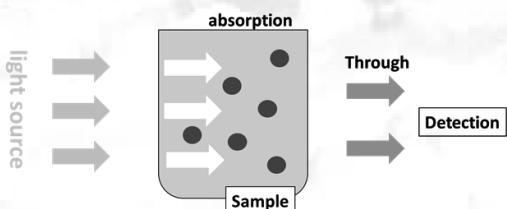
Electrolysis was carried out by placing a titanium plate as the anode and a platinum plate as the cathode in a 0.1 mol/L sulfuric acid solution.

Titanium dioxide (IV) plates were prepared by this operation.

The following experiments were conducted using methylene blue to verify whether the oxide film was stretched.

Six drops of methylene blue were added to 200 mL of water, and the solution was divided equally.

### • Absorbance

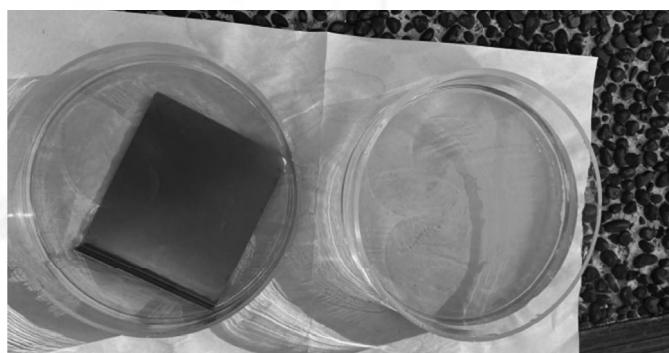


In this experiment, the lower the amount of methylene blue, the easier it is for light to pass through. In this experiment, the less methylene blue, the easier it is for light to pass through, and thus the smaller the absorbance.

State when left alone	absorbance
initial state	0.652
No titanium dioxide (IV) Sunlight exposure	0.369
Contains titanium dioxide (IV) Sunlight exposure 30 minutes	0.378
Contains titanium dioxide (IV) Sunlight exposure 45 minutes	0.331
Contains titanium dioxide (IV) Sunlight exposure 60 minutes	0.308

The absorbance values of the titanium dioxide (IV) plates left after the addition of the titanium dioxide (IV) plates were lower than those without the addition of the titanium dioxide (IV) plates, indicating that the titanium dioxide (IV) plates photodegraded methylene blue and that the titanium plates were covered with an oxide film.

The titanium dioxide (IV) plates that were exposed to sunlight for a longer period of time decomposed methylene blue more effectively.



#### 4. The main experiment

1. electrolysis of water in a 0.1 mol/L sodium hydroxide solution using platinum electrodes for both anodes.

2. electrolysis of water using a titanium dioxide (IV) plate as an anode and a platinum electrode as a cathode in a sodium hydroxide solution of the same concentration as in 1. The titanium dioxide (IV) plates are irradiated with ultraviolet rays for 50 minutes and 100 minutes, respectively.

The distance between the electrodes is kept at 1 cm, and the voltage applied is increased by 0.5 V. The minimum voltage at which water electrolysis occurs is visually confirmed.

When we conducted experiments using titanium plates with an oxide film created by us, we were able to perform water electrolysis at a lower voltage than when we used platinum electrodes. Therefore, the effect of the titanium(IV) oxide plate was confirmed

+electrode				-electrode	Minimum voltage (V)
platinum				platinum	1.7
Titanium dioxide (IV) (100 min)				platinum	1.3
Titanium dioxide (IV) (50 min)				platinum	

Reflection points in this experiment

Since the number of trials is still small and the presence or absence of a unique visual reaction has not yet been confirmed, we have not been able to obtain reliable data.

We have not obtained sufficient data to make a comparison between titanium dioxide (IV) plates prepared by anodizing for 50 minutes and titanium dioxide (IV) prepared by anodizing for 100 minutes.

#### 6. Summary

Since it is difficult to compare the volume of gas generated by the Honda-Toshima effect, we decided to compare it by examining the minimum voltage required for water electrolysis.

By changing the oxidation time of titanium dioxide (IV) plates, we obtained titanium dioxide (IV) with a stronger decomposition effect on organic matter.

By using these titanium dioxide (IV) plates with different oxidation times as anodes for water electrolysis, we were able to confirm that the minimum voltage required for water electrolysis was reduced by using titanium dioxide (IV) plates as anodes. However, we have not yet conducted enough experiments to be able to conclude this with certainty, so we would like to repeat the experiments under the same conditions.

#### 7. Future issues

The number of trials in the experiment was very small, and the results were not reliable.

Therefore, we would like to increase the number of trials to obtain reliable data for consideration.

Therefore, we would like to increase the number of trials to obtain reliable data for consideration.

Therefore, we would like to increase the number of trials to obtain reliable data and discuss the results. • We will clarify whether there is a correlation between the time required for electrolysis when making titanium dioxide (IV) plates and the voltage required for electrolysis of water.

#### 8. References

Fujishima A

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/electrochemistry/71/7/71\\_568/\\_article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/electrochemistry/71/7/71_568/_article/-char/ja)

Mizugoe K, Masahashi n

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/materia/49/2/49\\_55/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/materia/49/2/49_55/_pdf)

# Effect of Obstructions on Water Flow

6班

Ono Yuka Okubo Shoma  
Kagii Hana Nakazawa Yura

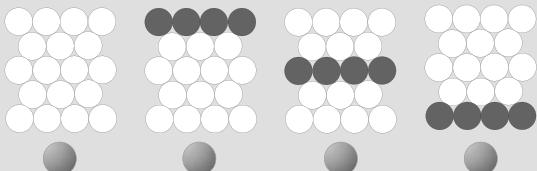
## Summary

We were interested in how obstacles placed in the water flow affect the water flow. We created a schematic experimental apparatus and conducted experiments with several shapes of obstacles. As a result, it was found that obstacles have the effect of concentrating the water flow in one part and slowing down the speed of the water flow, and that these tendencies could be explained using numerical simulations.

## Preliminary experiment

**Purpose** | Investigate the change in water flow when the distance between the obstacle and the marble is changed

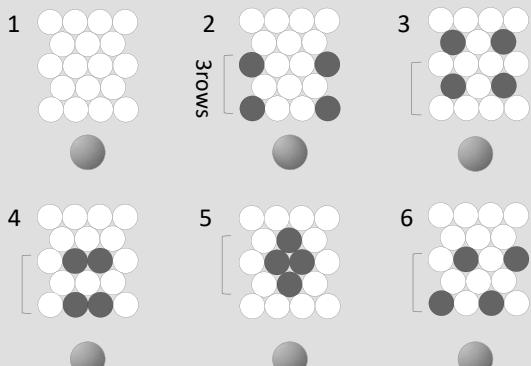
**Method** | Insert four bolts in either rows A, B, and C and did experiments



**Result** | Placing obstacles in any row does not affect the result.

## Experiment I

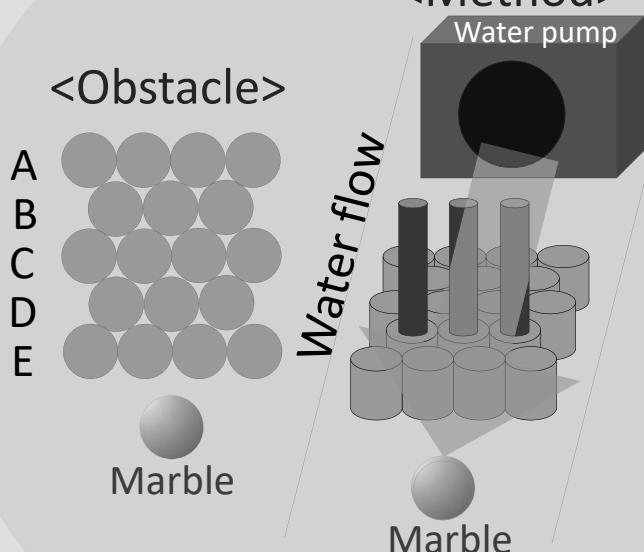
In order to investigate the relationship between the density of obstacles and the speed of water flow, we decided on a width of three rows, and set obstacles in various patterns as shown below and did experiments.



## Method

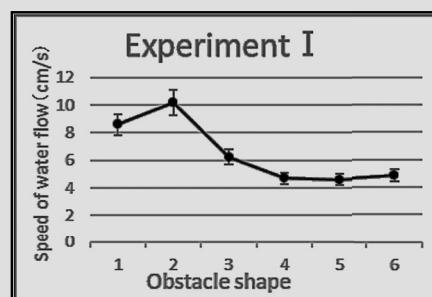
- Place a marble, a slotted ruler, and an obstacle in a water tank where water flow was generated by a water pump.
- Set the marble behind the obstacle to see how the water flow moves the marble.
- Generate a water current and film the marble moving with a slow motion camera and a timer.
- Determine the speed at which the marble moved, and therefore the speed of the water.

### <Method>



## Results I

- The water flow was faster in pattern 2 than in 1 even though 1 has no obstacles.
- The water flow for bolted obstacles decreased between patterns 2, 3, and 4.
- The speed of water flow for patterns 4 and 5 was almost the same.
- The water flow was faster in pattern 6 than in 2 even though they are similar.

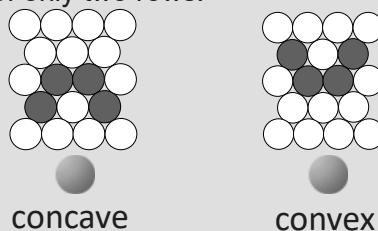


## Consideration

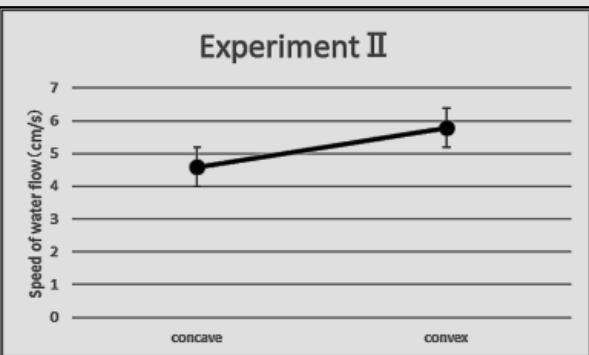
- 1→Obstacle 2 made the water flow in one direction, which made the water flow faster.
- 2→The more centered the bolts are, the more effective it is as an obstacle.
- 3→The effect as an obstacle is not related to the density of the bolts, but to the area of the obstacle as seen from the marble side.
- 4→The larger the obstacle as seen from the marble, the more effective it is as an obstacle.

## Experiment II

We conducted the same experiment with a width of only two rows.



## Results II

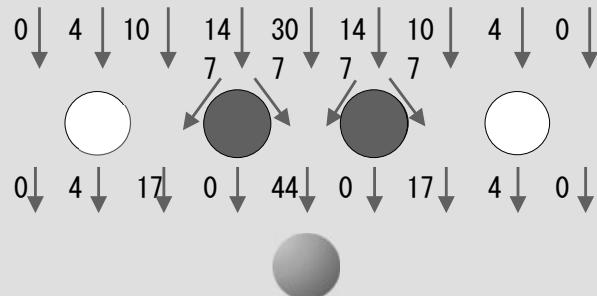


The water flow was faster in the convex pattern than in the concave pattern.

## Discussion II

To discuss the results of Experiment II, we simulated the water flow using the following conditions.

1. Measure the speed of the water flow produced by the water flow pump and determine its relative value.
2. After hitting an obstacle, the water flow is split in half or going straight.
3. Evaluate the magnitude of the impact on the marble according to the magnitude of the value of the water flow in the center.



## Results

When compared using this simulation, the water flow equivalent to 49 marbles reached the convex obstacle, while the water flow equivalent to 44 marbles reached the concave obstacle. Therefore, we believe that the convex obstacle explains why the marbles were faster.

## Conclusion

The water flow was accelerated when the obstacles were placed only on both sides.

Also, if the obstacle was placed off-center from the marble, it became more effective as an obstacle.

Although the numerical simulation was applicable when considering the results of the convex and concave obstacles, some of the results were inconsistent with other experimental results and need to be improved.

### Possible simulation problems

1. The initial value for the magnitude of the water flow was not the right size.
2. If the spacing between the bolts is different, it is not possible to simply assume that the water flow is split in half or going straight.

## Future prospective

The numerical simulation that we considered when discussing the results of Experiment II was consistent with some of the results, but also contradicted some of the other results. In the future, we would like to consider a more consistent simulation method.

## References

- 1) A mysterious circle drawn by Amamihoshizora puffer fish <https://nature-and-science.jp/pufferfish/#page-3> (2020)
- 2) CROWN English Communication II New Edition Lesson 3 Optional Reading Pufferfish in Love Publisher: Sanseido Co.
- 3) Setouchi Town Cultural Heritage Utilization Executive Committee Website "Setouchi Nandemo Tankentai" <http://www.setouchi-bunkaisan.com/about>

# Rocking of the Perforated Board When Moving in Water

Group7 Ogi Kotaro Okamuro Tsubasa  
Hoji Haruki Yasuda Gakuto

## Summary

We were interested in whether the turbulence-induced shaking around the board was affected by the presence or absence of holes in the board.

We conducted experiments with boards of different shapes and investigated the velocity, the magnitude of the shaking, and the Reynolds number.

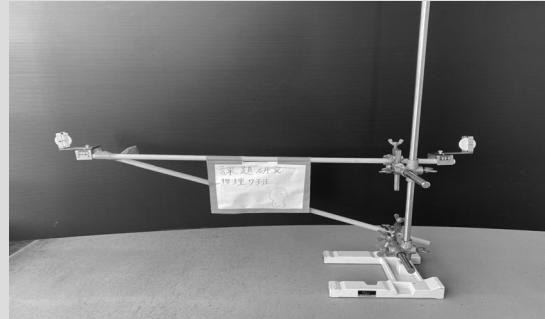
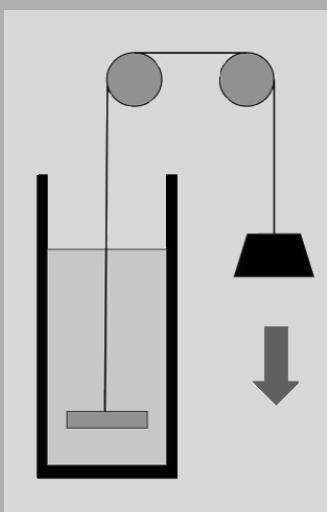
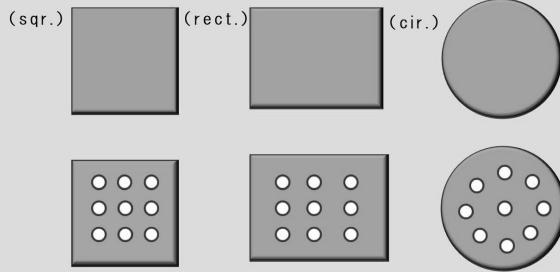
As a result, we found that the board with 6 holes suppressed the swaying most stably, the board with 4 holes inhibited it best in the low velocity zone, and the board with 8 holes abrogated it best in the high velocity zone.

## Experiment I

**Purpose** | Calculation of the boundary value with and without oscillation  
Difference in boundary values due to the shape of the flat plate

**Method** |

Use the six boards shown below.  
(All of them are almost equal in area.)



## Supplement

Not swing]: The plate rises without tilting in the vertical direction.

With swing]: The flat plate moves left and right or rises while tilting, compared to the state without shaking.

[Reynolds Number]

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu}$$

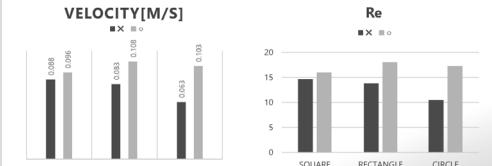
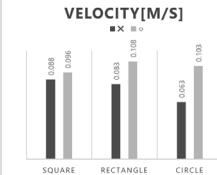
$l$  [m] is a characteristic linear dimension  
 $v$  [m/s] is the flow speed  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] is the density of the fluid  
 $\mu$  [Pa·s] is the dynamic viscosity of the fluid  
 $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] is the kinematic viscosity of the fluid

## Result

$l = 0.003$  [m]  $\rho = 1000$  [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\mu$  = (set using reference (4))

### 【boundary-value of swing】

Board	Square	Unperforated square	Rectangle	Unperforated rectangle	Circle	Unperforated circle
[g]	14.0	16.5	14.5	17.3	13.0	19.5



The velocity of the board with holes is higher than that of the board with holes.  
Although the boundary value varies depending on the shape of the plate.

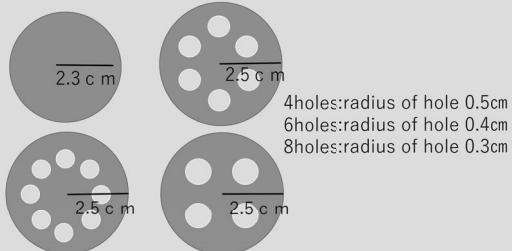
The boundary value changes depending on the shape of the board, but the boundary value with holes is larger in all cases.

→The boundary value with holes is larger in all cases.

## Experiment II

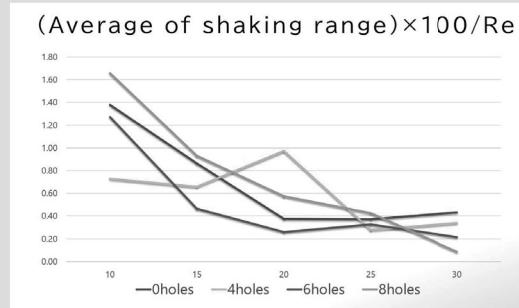
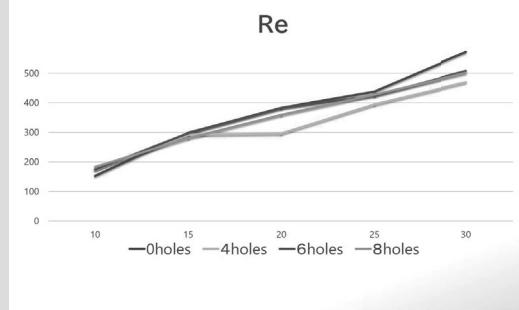
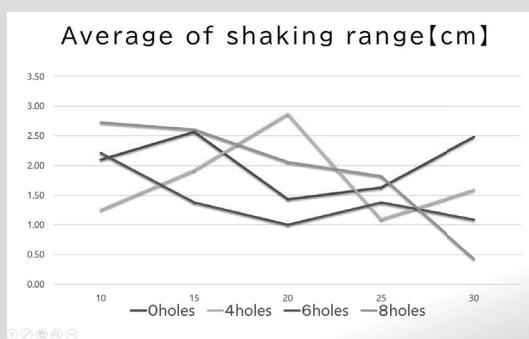
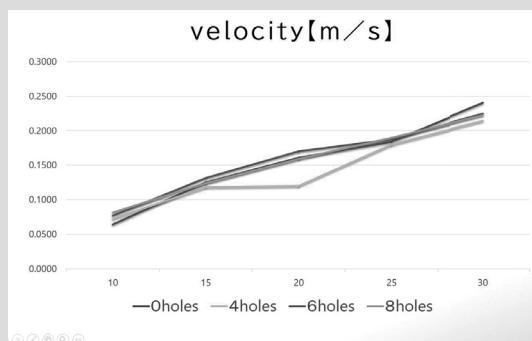
Purpose | Examining the change in shaking caused by different numbers of holes

Method | Do the same as Experiment I



## Result

Horizontal axis is the number of weights  
One weight = 0.28[g].



- There was no significant difference in the speed of each plate
- For the 6-hole and 8-hole, the more weights, the smaller the swing range
- For Re, the difference between each plate is small when the weight is small, but when the weight is large, the difference becomes large.
- In the case of 10 weights, the 4-hole board had a smaller average swing width than the other boards, and in the case of 30 weights, the 8-hole board had a smaller average swing width than the other boards, and the 6-hole board had a relatively small average swing width for all weights.

## Consideration

- By drilling a hole, turbulence is easily suppressed. The number of holes and the speed of the board will affect the suppression effect
- Depending on the number of holes and the speed of the board changes
- In this study, four holes were found to be most effective in the low speed zone, eight holes in the high speed zone, and six holes in the low speed zone

## Future Prospects

- Visualization of the flow around the ascending flat plate
- Increase the number of trials through repeated experiments

## Reference

- ①水中で動く物体にはたらく抵抗の測定  
<http://hdl.handle.net/10105/4777>
- ②レイノルズ数 | 熱流体解析 | ソフトウェアクライドル  
<https://www.cradle.co.jp/calculation/03rn.html>
- ③多孔板の抵抗特性：第1報、抵抗係数  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib1979/50/455/50\\_455\\_1808/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib1979/50/455/50_455_1808/_article/-char/ja/)
- ④4章：粘性係数と動粘性係数  
[http://skomo.oo7.jp/f28/hp28\\_43.htm](http://skomo.oo7.jp/f28/hp28_43.htm)

# Rotation of Spinning Tops in a Rotating System

## physics8 Ueki Sona Oi Yuki Kawaguchi Ryoma Noda Hinano

### ○Summary

It is known that the Coriolis force acts on a moving object in a rotating coordinate system, but in this study, we found that the Coriolis force has a small effect on the spinning top. It was also found that the rotation time of the top is determined by the velocity of the top, regardless of the angular velocity of the rotating table.

### ○Research motivation/purpose

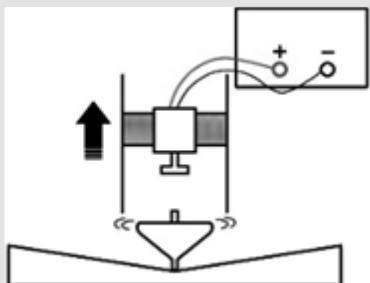
It is generally known that when an object moves in a rotating system, the Coriolis force is exerted due to the rotation of the system. We are interested in whether this force affects the rotation of a rotating object, and we will conduct research on one of these objects, tops.

### ○Experiment1

The purpose of this experiment was to investigate how much the direction of rotation of the top affects the rotation time of the top, and to study the effect of the rotation of the earth on the rotation of the top.

#### <Hypothesis>

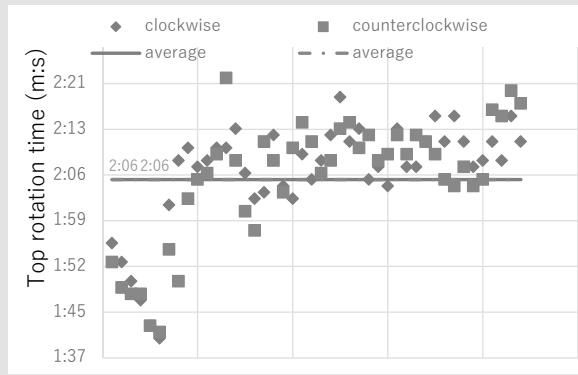
Since the Coriolis force acts counterclockwise, we think the counterclockwise rotation will be longer.



【figure1】

#### <Experimental Method>

- I. Connect to the power supply and turn the motor.
- II. Raise the tube straight up and start measuring the time.
- III. Stop the measurement when the side of the spinning top touches the table.



【 figure2 】

#### <Result>

The results are shown in figure2 on the right.

#### —Coriolis force formula—

$$F = 2mv\Omega \sin \phi$$

$m=0.015\text{kg}$  (mass of the spinning top)

$v=0.3\text{m/s}$  (velocity of the spinning top)

$\Omega=7.292 \times 10^{-5}\text{rad/s}$  (angular velocity of the earth)

$\Phi=37^\circ$  (latitude of Japan)

$$\Rightarrow F = 3.95 \times 10^{-7} \text{ [N]}$$

#### <Conclusion>

The Coriolis force from the earth is so small that it did not affect the results of the experiment.

### ○Experiment 2

In order to increase the Coriolis force, the device used in experiment 1 was placed on a rotating table. Therefore, the angular velocity became larger.

### <Consideration>

The results are shown in figure 3 on the right.

#### —Calculation of Coriolis force—

$$m=0.015\text{kg}(\text{mass of the spinning top})$$

$$v=0.3\text{m/s}(\text{velocity of the spinning top})$$

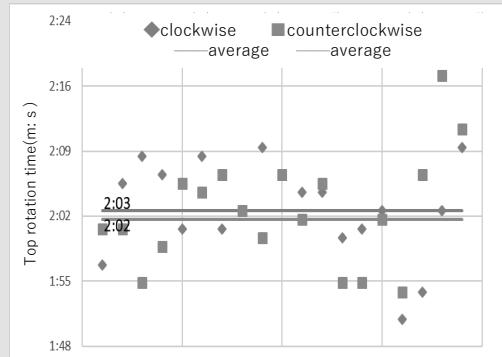
$$\Omega=0.46\text{rad/s}(\text{angular velocity of the rotating table})$$

$$\Phi=90^\circ \quad (\text{latitude})$$

$$\Rightarrow F=4.14 \times 10^{-3} [\text{N}].$$

### <Conclusion>

The downward force parallel to the slope was calculated to be  $2.6 \times 10^{-2}$  [N]. From this, we can conclude that the Coriolis force is 1/6 of this force.



【figure3】

## ○Experiment 3

When we removed the stand and spun the top under several conditions, the top sometimes fell off the stand and sometimes did not. According to a previous study, when a ball is rolled on a rotating table under certain conditions, the ball does not fall off the table but continues to rotate on the spot. Therefore, we decided to investigate the relationship between the angular velocity of the rotating table and the rotation speed of the top.

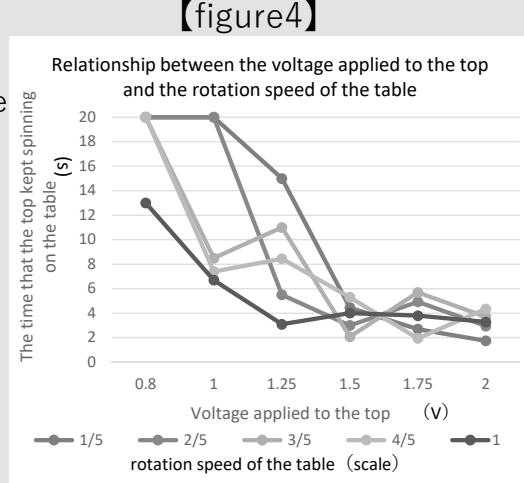
### <Experimental procedure>

The same operation as in Experiment 2 is performed with the top removed and the top spinning directly on the rotating table. The angular velocity of the rotating table and the voltage of the power supply are varied, and the time until the top falls off is measured.

### <Discussion>

Regardless of the rotation speed of the table, the smaller the voltage ,the longer the rotation time on the table.

The higher the voltage, or the greater the rotation speed of the top, the shorter the time the top continues to rotate.



In the graph in figure4, when the top did not fall off, the time was set to 20 seconds to make the graph easier to read . The rotation time was measured twice. The rotation time is the average of the two measurements.

## ○Outlook

- We found that the direction of the rotation of the spinning top was reversed between the plane and the slope. We believe that the gyroscopic effect is deeply involved in this phenomenon. We will discuss about this.
- We will examine the effect of the gyroscopic effect on the rotation of the frame using indices other than rotation time.

## References

Mechanics learned from scratch Takuji Tsuzuki

Basic Physics Series 1 Mechanics Yuji Soejima Tadao Sugiyama

Otsu City Science Museum Spin Disc



# The Effect of Rotation of a Stone on stone skipping

Zeze high school group 9

Hayashi Shunsuke Mizutani Masatoshi  
Yashiki Itsuki Niwa Kotomi

## Summary

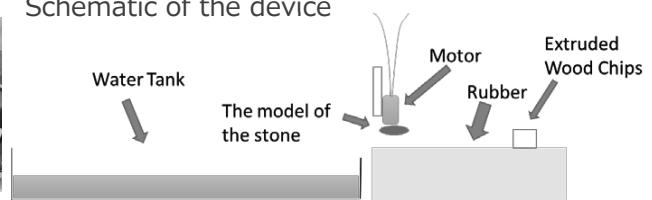
We were interested in how the rotation of the stone affects the stone skipping, so we created a device to launch the stone while rotating it and conducted experiments. As a outcome, we succeeded in demonstrating the effects of two major types of stone rotation on stone skipping using actual measurements: the trajectory of the stone becomes more stable when the rotation speed is increased, and the stone becomes less affected by water.

## Experimental Device

A stone attached to the motor with a magnet is pushed out by pulling a rubberized piece of wood and releasing the hand.



Schematic of the device



## Experiment 1

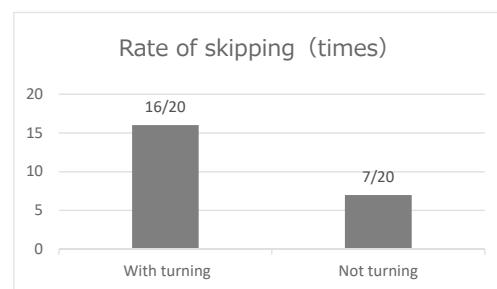
**Purpose :** Find out if the rotation of the stone affects the skip rate of the stone skipping.

**Method :** Fire stones 20 times each with and without rotation and measure the rate of skip.

## Result & Consideration 1

**Result :** From Graph 1, the rotated stone was more than twice as likely to skip as the unrotated stone.

**Consideration :** Rather than the rotation affecting the surface of the water, we thought that the rotation might stabilize the axis of the stone and make it easier to skip.



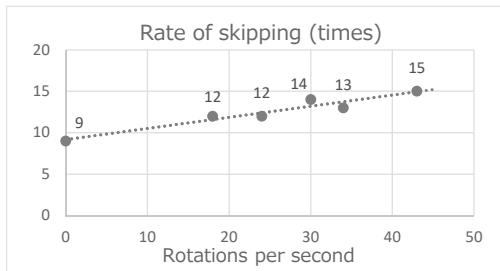
## Experiment 2

Graph1

**Purpose :** Investigate the relationship between the rate at which stones skip and the stability of the axis, as well as other influences.

**Method :** Perform 20 trials for each of the following cases: without rotation of the stone and with rotation (rotation speed of 18 times/s, 24 times/s, 30 times/s, 34 times/s, and 43 times/s). Measure the number of times the stone skipped, the number of times the stone rotated vertically after skipping until it landed on the water, and when the stone skipped, the distance between the position where the stone first landed on the water and the position where it second landed on the water (randomly selected for 10 trials).

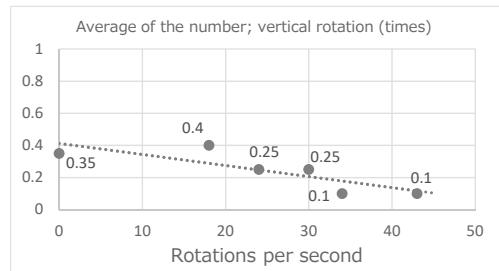
## Result & Consideration②



graph2

### About rate the stone skipping :

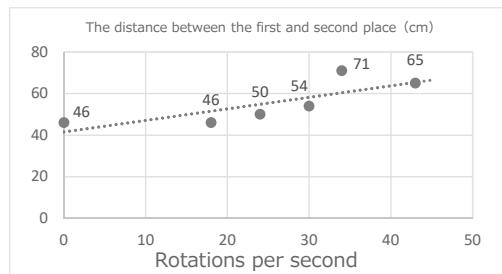
According to Graph 2, the stability of the stone shaft increased as the number of rotations increased, which in turn increased the rate of skipping.



graph3

### About vertical rotation :

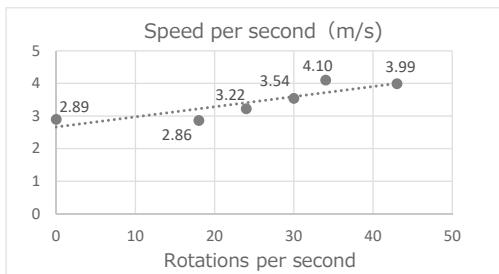
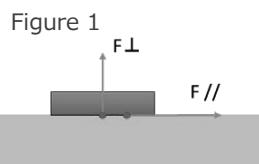
After hitting the water surface and skipping up, vertical rotation is less likely to occur, so the higher the number of rotations made the more stable the trajectory.



graph4

### About the distance after the stone skips :

The two forces that act on the stone at the moment it lands on the water are  $F_{\perp}$  and  $F_{//}$  in Figure 1. When the rotation speed is increased, the distance after the skip is larger, so the effect of water on the stone by  $F_{//}$  is smaller, and the rate of decrease of the horizontal velocity was considered to have decreased.



graph5

### About horizontal velocity of the stone :

We measured the horizontal speed of the stone to show the consideration of the distance after the stone bounced.

As a result, the speed increased with the number of rotations, according to Graph 5.

That is because that the fact that the stone was less susceptible to the effect of water (water slows down the horizontal speed of the stone due to  $F_{//}$ , so to speak, a kind of braking effect) as the number of rotations increased.

## Conclusion and Outcome

It was found that when the rotation speed was increased, the rotation axis of the stone became more stable and the stone was less affected by the water.

The outcome of this research is that the effect of the rotation of the stone on the stone skipping was shown using actual measured data.

### Future Prospects

- Increase the number of trials to improve the reliability of the results.
- Automate the device as the stones were being fired manually.
- Consider other effects of stone rotation.

References : <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.94.174501>  
「Theoretical and Numerical Approach to “Magic Angle” of Stone Skipping」



# Generalization of Cyclotomic Polynomials Based on Its Minimality

Group 10 Ryusei Tanabe, Shinnosuke Tokita,  
Kohei Miyata, Tomonao Muraki

## Summary

Cyclotomic polynomial is known as the minimal polynomial of over the rational numbers. We considered the minimal polynomials of over expanded number systems and generalized cyclotomic polynomials. We also proved that the polynomials have similar properties as the original cyclotomic polynomials.

## Primitive nth-Roots of Unity

### 【Definition: nth-Roots of Unity】

A number  $x$  satisfying the equation,

$$x^n - 1 = 0$$

let  $\zeta_n$  be  $\cos \frac{2\pi}{n} + i \sin \frac{2\pi}{n}$

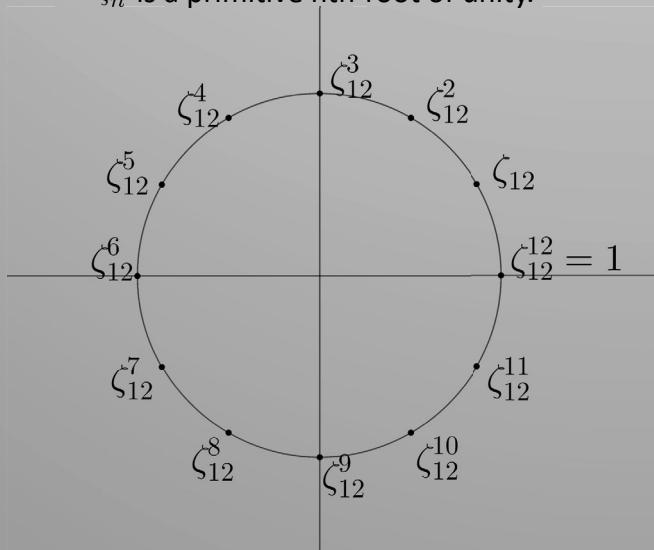
nth-roots of unity are  $\zeta_n, \zeta_n^2, \dots, \zeta_n^n$

### 【Definition: Primitive nth-roots of Unity】

If  $x$  is not an mth-root of unity for  $m < n$ ,  
 $x$  is a primitive nth-root of unity.

$k$  and  $n$  are coprime.

$\Leftrightarrow \zeta_n^k$  is a primitive nth-root of unity.



↑ The 12<sup>th</sup> roots of unity  $\zeta_{12}^k$  ( $1 \leq k \leq 12$ )  
in the complex plane.

They divide unit circle equally.

## Cyclotomic Polynomials

### 【Def. Cyclotomic Polynomials】

Cyclotomic polynomial is a polynomial whose roots are all primitive nth roots of unity.

They are defined as,

$$\Phi_n(x) = \prod_{\substack{1 \leq k \leq n \\ \gcd(k,n)=1}} (x - \zeta_n^k)$$

e.g. If  $n = 12$ ,

$$x^{12} - 1 = (x - \zeta_{12})(x - \zeta_{12}^2) \cdots (x - \zeta_{12}^{12})$$

extract the primitive nth roots of unity

$$\begin{aligned} \Phi_{12}(x) &= (x - \zeta_{12})(x - \zeta_{12}^5)(x - \zeta_{12}^7)(x - \zeta_{12}^{11}) \\ &= x^4 - x^2 + 1 \end{aligned}$$

is a 12<sup>th</sup> cyclotomic polynomial.

Property.1 : With integer coefficients

All coefficients in cyclotomic polynomials are integers.

Property.2 : Minimal polynomials

<Minimal polynomial over the rational numbers of  $\alpha$ >

Minimal polynomial of  $\alpha$  over the rational numbers is defined as the monic polynomial of least degree among all polynomials having  $\alpha$  as a root.

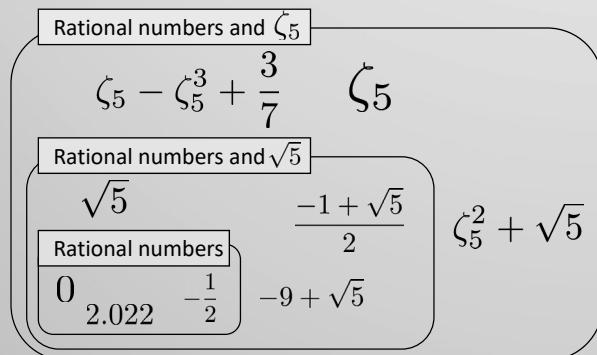
Cyclotomic polynomials are minimal polynomials of  $\zeta_n$  over the rational numbers.

## Generalization of $\Phi_n(x)$

Cyclotomic polynomial is the minimal polynomial of  $\zeta_n$  over the rational numbers.

We consider the minimal polynomial of  $\zeta_n$  over other number systems.

### 【Expansion of Number Systems】



$$* \sqrt{5} = \zeta_5 - \zeta_5^2 - \zeta_5^3 + \zeta_5^4$$

The minimal polynomial of  $\zeta_5$  over the rational numbers

$$x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$$

over the rational numbers and  $\sqrt{5}$

$$x^2 - \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}x + 1$$

over the rational numbers and  $\zeta_5$

$$x - \zeta_5$$

Def : Generalized Cyclotomic Polynomial

Suppose that  $n$  be a positive integer,  $H$  be a subgroup of  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$ ,  $\tau \in \text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$ , We defined the polynomial  $\Psi_{(n,\tau H)}(x)$  as the following.

$$\Psi_{(n,\tau H)}(x) = \prod_{\sigma \in \tau H} (x - \sigma(\zeta_n))$$

On the Galois correspondence of  $\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$ , let  $M$  be the intermediate corresponded to  $H$ , We proved that  $\Psi$  is the minimal polynomial of  $\tau(\zeta_n)$  over  $M$ . Thus we defined generalized cyclotomic polynomials sufficiently.

## Properties

The coefficients of generalized cyclotomic polynomials we defined are integers of expanded number systems.

## Conclusion

- We generalized cyclotomic polynomials by consideration one of properties of cyclotomic polynomials.
- We proved that generalized cyclotomic polynomials have same properties as original cyclotomic polynomials.

## Prospects

- We want to consider properties of generalized cyclotomic polynomials more.

## Reference

- 雪江明彦 『代数学2 環と体とガロア理論』 日本評論社
- J.Neukirch 『Algebraische Zahlentheorie』

# **パワーポイント集**



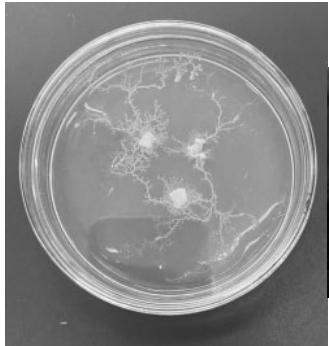
# 真正粘菌の外部記憶因子について

課題研究1班

中村康臣 久家悠睦

平尾奈那 山田光葵

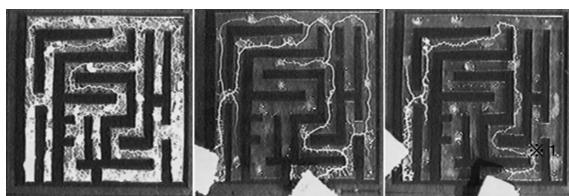
1 | はじめに



1 | はじめに



粘菌が迷路を解く様子



餌を置く前

4時間後

8時間後

餌と餌の最短距離を結んでいる

3

1 | はじめに



- ・粘菌は移動した跡に粘液鞘を残す
- ・粘液鞘を避けて通る
- ・粘液鞘中に粘菌が通った場所を記憶するための物質がある  
→外部記憶因子X
- 目的:Xを特定すること

4

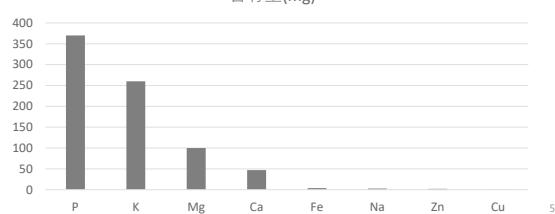
2 | 仮説



粘液鞘は粘菌が摂取した物質から生産されているのでは…

・オートミールの主成分

含有量(mg)

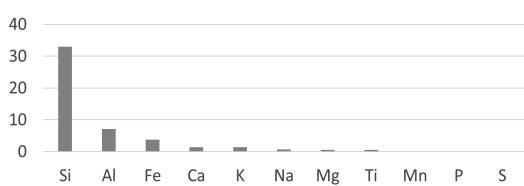


2 | 仮説



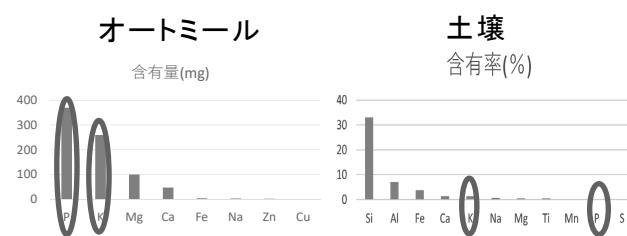
土壤の主成分

含有率(%)



6

## 2 | 仮説



→Xはカリウムかリン？

7

## 4 | 予備実験



- ... 粘液鞘
- ... 障害物
- ... 粘菌
- ... 目標物(餌)

9

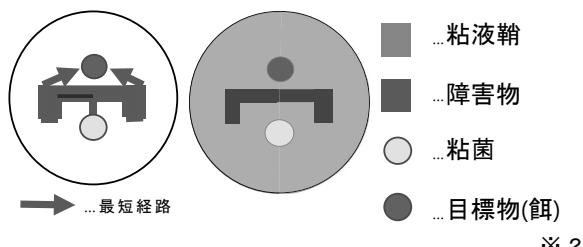
## 6 | 実験方法



- ...  $\text{KNO}_3$ または $\text{KCl}$
- ... 障害物
- ... 粘菌
- ... 目標物(餌)

11

## 3 | 先行研究

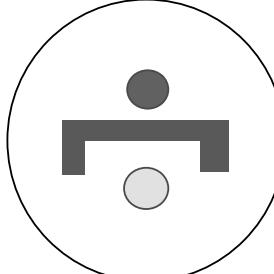


・粘菌は、pHが4から7でない物質を避ける

※ 2

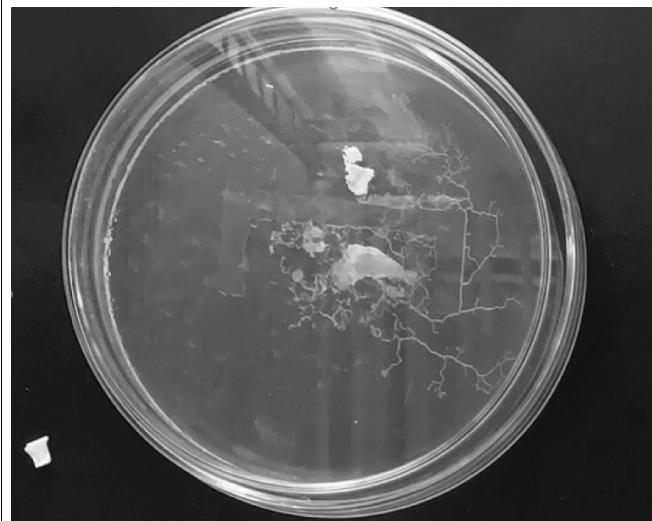
※ 3 8

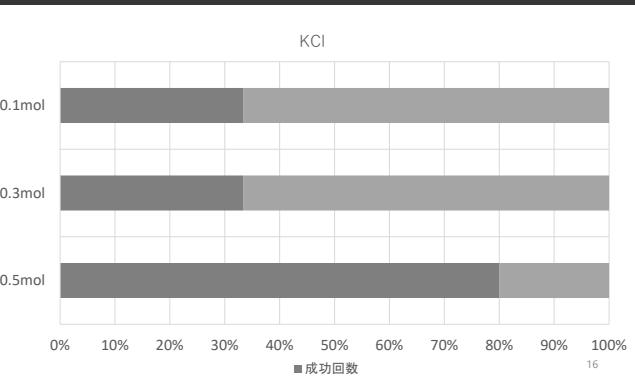
## 5 | 対照実験



- ... 障害物
- ... 粘菌
- ... 目標物(餌)

10



<h3>7   結果</h3> <p></p> <table border="1" data-bbox="158 977 801 1358"> <thead> <tr> <th></th> <th>0.1mol/L</th> <th>0.3mol/L</th> <th>0.5mol/L</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>KCl</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>試行回数</td> <td>6</td> <td>6</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>成功回数</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>成功確率</td> <td>33. 3</td> <td>33. 3</td> <td>80. 0<sub>15</sub></td> </tr> </tbody> </table>		0.1mol/L	0.3mol/L	0.5mol/L	KCl				試行回数	6	6	5	成功回数	2	2	4	成功確率	33. 3	33. 3	80. 0 <sub>15</sub>	<h3>7   結果</h3> <p></p>  <table border="1" data-bbox="833 1358 1468 1381"> <thead> <tr> <th>KCl</th> <th>0.1mol</th> <th>0.3mol</th> <th>0.5mol</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>試行回数</td> <td>6</td> <td>6</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>成功回数</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>成功確率</td> <td>33. 3</td> <td>33. 3</td> <td>80. 0<sub>15</sub></td> </tr> </tbody> </table>	KCl	0.1mol	0.3mol	0.5mol	試行回数	6	6	5	成功回数	2	2	4	成功確率	33. 3	33. 3	80. 0 <sub>15</sub>
	0.1mol/L	0.3mol/L	0.5mol/L																																		
KCl																																					
試行回数	6	6	5																																		
成功回数	2	2	4																																		
成功確率	33. 3	33. 3	80. 0 <sub>15</sub>																																		
KCl	0.1mol	0.3mol	0.5mol																																		
試行回数	6	6	5																																		
成功回数	2	2	4																																		
成功確率	33. 3	33. 3	80. 0 <sub>15</sub>																																		
<h3>8   考察</h3> <p></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>カリウムがXである可能性は十分にある</li> <li>粘液鞘に含まれているXの濃度は0.5mol/Lに近い、またはさらに高い</li> <li>粘菌が高濃度の水溶液を避ける反応を示す可能性がある</li> </ul> <p>→濃度に関してさらなる検証が必要</p>	<h3>9   今後の展望</h3> <p></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>粘液鞘中にカリウムが存在することを直接特定する必要がある</li> <li>0.5mol/Lより高いモル濃度のKNO<sub>3</sub>、KCl水溶液や、リンについても実験を行う</li> </ul>																																				

## 10 | 参考文献、先行研究

※ 1 中垣俊之(2016) 粘菌に「知性」はあるか—。単細胞生物に「人間らしさ」の起源を探る、孤高の研究

<http://shochou-kaigi.org/>

※ 2 Chris R.Reid…(2012) Slime Molds uses an externalized spatial “memory” to navigate in complex environments

※ 3 高橋和成(2012) 粘菌変形体の化学走性を利用した高校生物実験の開発

## ヤマトシロアリ (*Reticulitermes speratus*) の共喰い行動について

2年10組2班

田口 真帆  
田中 遥成  
古家 世渚  
水上 航一

1

## 1 | 研究テーマ



- ②体表面に傷がある個体への共喰い行動
- ③飢餓条件下で外傷のない個体に対する共喰い行動

### 仮説

飢餓状態が長く続くほど  
外傷個体に対する  
共喰いは起こりやすくなる

## 2 | 研究方法



5

## 1 | 研究テーマ

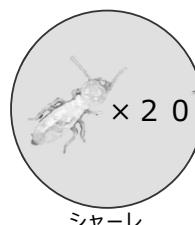


▶シロアリの共食い行動3パターン

- ①特定の階級に対する共喰い行動
- ②体表面に傷がある個体への共喰い行動
- ③飢餓条件下で外傷のない個体に対する共喰い行動

2

## 2 | 研究方法

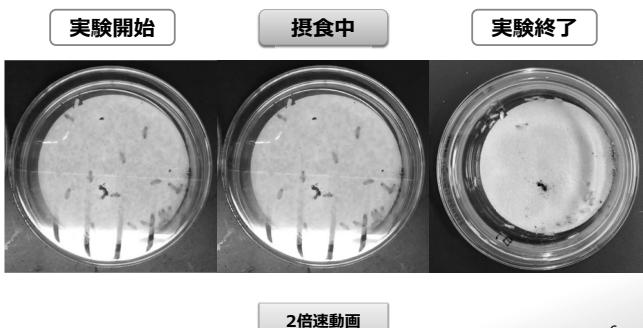


- ①シロアリの餌となるものを入れない
- ②水を与える



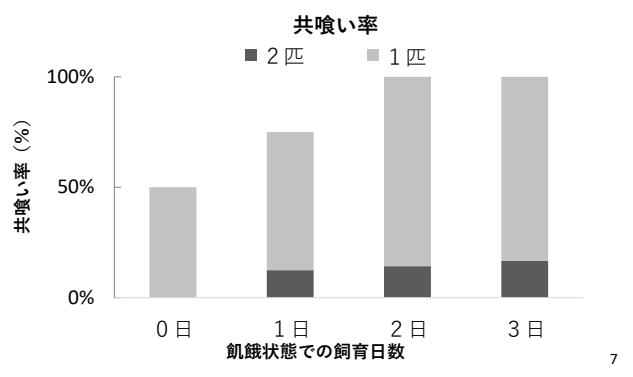
4

## 3 | 実験

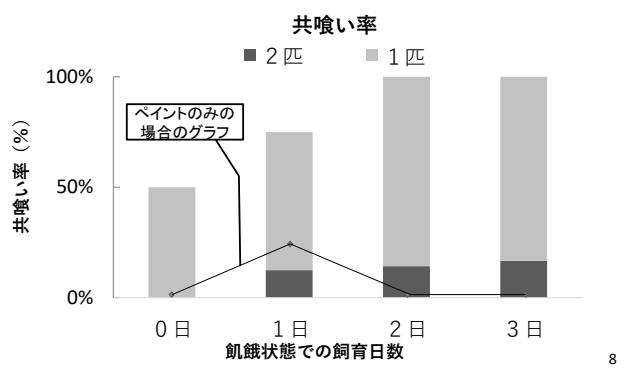


6

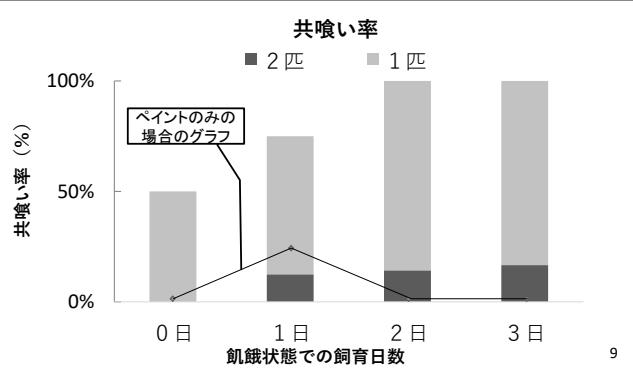
## 4 | 結果



## 4 | 結果



## 5 | 考察



## 6 | 今後の展望



すべての個体が共喰いに関わっていたか  
どうか確認できなかった

→共喰いに関与した個体数と飢餓  
日数の関係を調べる

外傷個体1匹で実験を行っていた

→外傷個体が複数いた場合はどうな  
るのか

10

## 6 | 今後の展望



湿度管理がうまくできなかった

→湿度を一定に保つ方法を模索

温度によって共喰い行動が変化する可能性

→温度の条件を変えて実験

11

## 7 | 参考文献



・『シロアリの事典』編集：松浦健二、吉村剛、板倉修司ら他 6 名

・『ヤマトシロアリにおける人為的外傷に起因する共  
喰い行動の解析』著：日本大学大学院生物資源  
科学研究科 山中康如

12

飢餓状態での 飼育日数	0日	1日	2日	3日
0匹	3 50.0%	2 25.0%	0 0.0%	0 0.0%
1匹	3 50.0%	5 62.5%	6 85.7%	5 83.3%
2匹	0 0.0%	1 12.5%	1 14.3%	1 16.7%
合計	6	8	7	6

13

2021年度課題研究発表会

## ゼラチンを用いた電池の半固体化について

2年10組 3班

中西 彦斗  
伊東 佑真  
岡田 卓也  
福島 順太

1

2

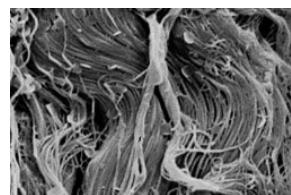
### 2|概要



#### ・ゼラチン

- ・主成分はタンパク質
- ・低温で凝固
- ・熱可逆性がある

写真 1



使用例) ゼリー、

マシュマロ

『食品開発ラボ ゼラチンとは  
～基礎から徹底解説～』より

3

4

### 3|仮説



ボルタ電池 (硫酸)



ボルタ電池の半固体化

### 4|実験1



#### 使用物

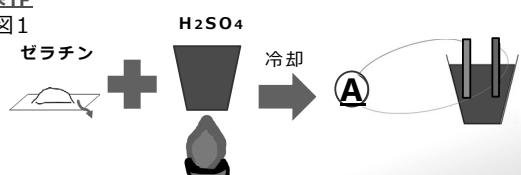
- ・ゼラチン (0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0g)
- ・H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(1.0mol/L,)30mL
- ・電極 (亜鉛板,銅板)

写真 2



#### 操作

図1



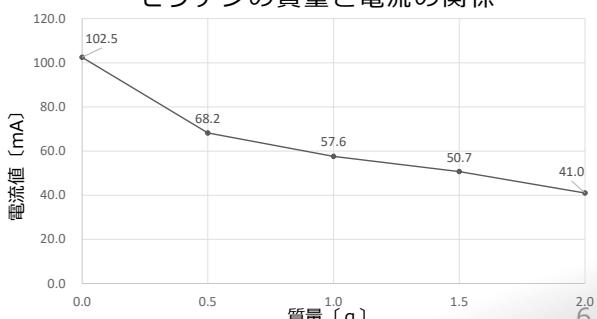
5

6

### 5|結果1



グラフ 1 ゼラチンの質量と電流の関係



## 5|結果1



- ・0.0g, 0.5g のとき  
液体のまま

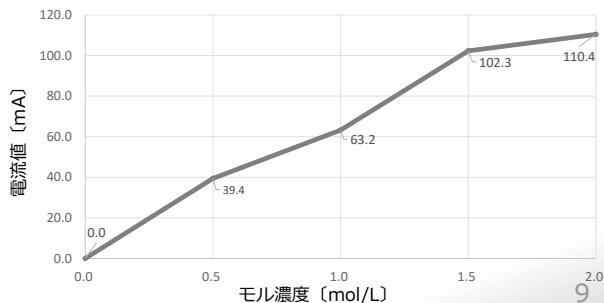
- ・1.0g以降  
半固体化

7

## 7|結果2



グラフ2 硫酸の濃度と電流の関係



## 6|実験2

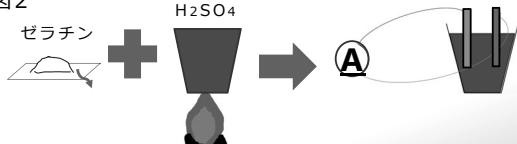


### 使用物

- ・ゼラチン (1.0g)
- ・H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mol/L,) 30mL
- ・電極 (亜鉛板, 銅板)

### 操作

図2



8

## 7|結果2



- ・硫酸のモル濃度が高くなるとそれに応じて電流値が増す
- ・硫酸のモル濃度が高くなるにつれて、電解液が固化しなくなっていき、2.0mol/Lの硫酸ではほとんど液体になった  
→硫酸がゼラチンの構造を壊したか

10

## 8|考察



- ・実験1：ゼラチンの割合増加  
流動性低下→電流値低下
- ・実験2：硫酸のモル濃度上昇、または、  
硫酸がゼラチンの構造を壊し流動性增加  
→電流値増加

11

## 9|今後の展望



- ・実験2の電流値増加の原因
- ・硫酸以外の電解液
- ・ゼラチンより酸に強いゲル化剤の使用
- ・ゼラチンの粘度の数値化  
→電流値との関係を調べる

12

## 10|参考文献



- ・『スライム電池を用いて化学エネルギーを取り出す』  
野々口勝美
- ・『ペクチンの性状とゲル化』 三浦洋
- ・『国立大学55工学系学部ホームページ』
- ・『食品開発ラボ ゼラチンとは～基礎から徹底解説』  
ユニテックフーズ株式会社

13

2021年度  
生徒課題研究発表会

# 金属粉末を用いた $\text{NO}_3^-$ 還元の最適化

2年10組 4班

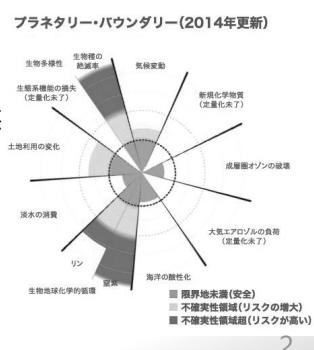
川口 友維  
吉岡 優莉  
西村 春人  
笹沼 亮太

1

## 1 | 研究の背景

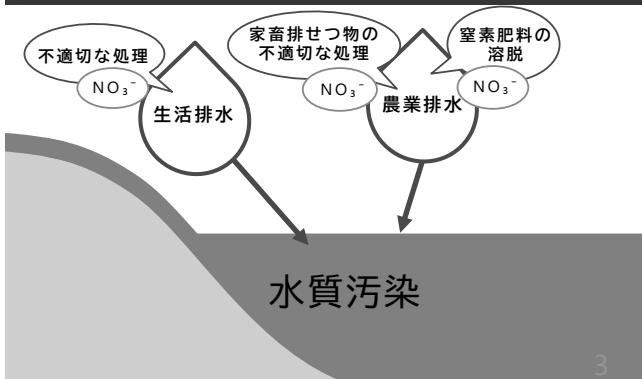


近年、各種排水に含  
まれる窒素による自然  
水の汚染が深刻化して  
いる



2

## 1 | 研究の背景



3

## 1 | 研究の背景



先行研究より銅を担持した鉄粉を用いた  
 $\text{NO}_3^-$ から $\text{NH}_4^+$ への還元反応が確認



4

## 1 | 研究の背景



鉄粉の他にも適した金属粉末はないだろうか

5

## 1 | 研究の背景



### 鉄粉を用いて行う還元の問題点

→効率が悪い:一定時間内の還元率が低い

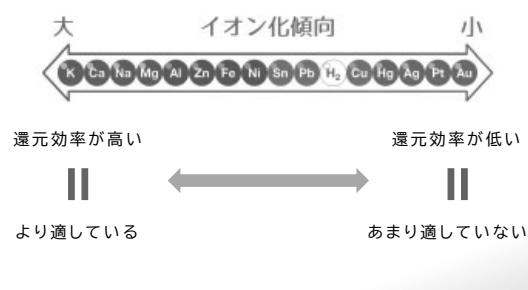
### 「適した金属粉末」の定義

→鉄粉に比べ一定時間内の還元率が高い

6

## 1 | 仮説

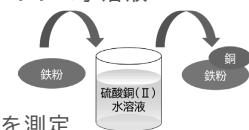
イオン化傾向が関係



## 2 | 事前調査



- ① 鉄粉を1 mol/L塩酸に5分間浸す→酸化物を除去
- ② 0.75 mol/L硫酸銅(Ⅱ)水溶液を加える  
→鉄表面に銅を析出させて粉末を調製
- ③ ②の粉末をろ過  
→純水で洗う  
→0.04 mol/Lの硝酸ナトリウム水溶液200 mLに加える
- ④ ③の溶液をろ過
- ⑤ ③の溶液と②を  
加えていない溶液の吸光度を測定

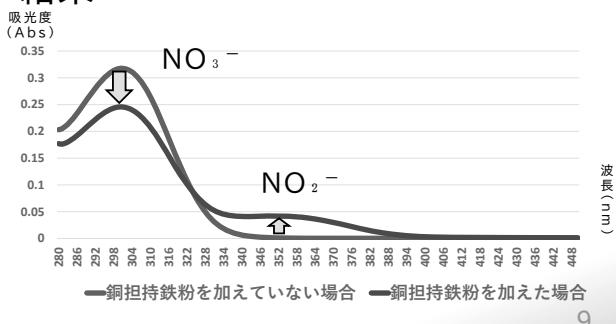


8

## 3 | 事前調査の結果・考察



### 結果



9

## 3 | 事前調査の結果・考察



### 考察

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (300 nm付近で吸光度) 低下  
NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (350 nm付近で吸光度) 増加



銅担持鉄粉により、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>がNO<sub>2</sub><sup>-</sup>に還元されることが確認された

10

## 4 | 実験①



- ・事前調査と同様の方法でFe, Zn, Mg, Snの粉末を調製し、4.00×10<sup>-2</sup> mol/L硝酸ナトリウム水溶液に加える
- ・吸光度を調べ、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>のモル濃度を算出
- ・インドフェノール青吸光光度法によってNH<sub>4</sub><sup>+</sup>のモル濃度を算出

11

## 4 | 実験方法



↑  
銅を担持させた金属粉末を硝酸ナトリウム水溶液に加えた  
(右からMg, Sr, Fe, Zn)  
↓  
1日攪拌させた



12

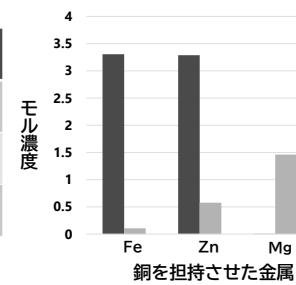
## 5 | 実験結果 1st



NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>のモル濃度

	10 <sup>-2</sup> mol	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
Fe		3.31	0.11
Zn		3.29	0.58
Mg		0.003	1.46

(10<sup>-2</sup>mol/L) NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>のモル濃度



13

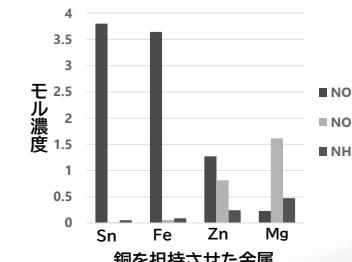
## 5 | 実験結果 2nd



NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>のモル濃度

	10 <sup>-2</sup> mol	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Sn		3.80	0.01	0.05
Fe		3.64	0.06	0.09
Zn		1.27	0.82	0.24
Mg		0.23	1.61	0.47

(10<sup>-2</sup>mol/L) NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>のモル濃度



14

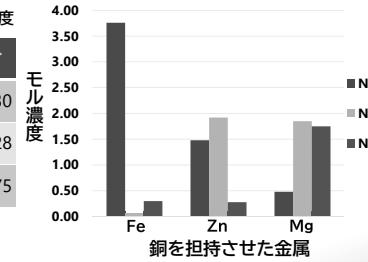
## 5 | 実験結果 3rd



NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>のモル濃度

	10 <sup>-2</sup> mol	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Fe		3.76	0.05	0.30
Zn		1.48	1.92	0.28
Mg		0.48	1.85	1.75

(10<sup>-2</sup>mol/L) NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>のモル濃度

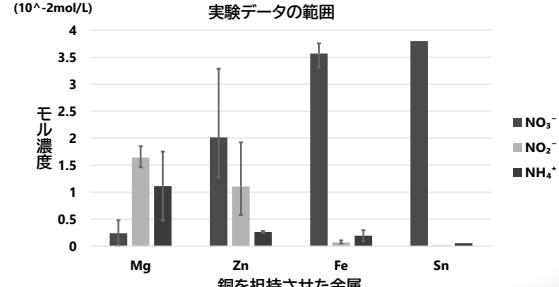


15

## 5 | データ範囲



実験データの範囲



16

## 6 | 考察



データの数値が安定しなかった原因

- 実験条件がそろっていなかった  
→季節による気温の差が影響した

17

## 6 | 考察



NO<sub>3</sub><sup>-</sup>のモル濃度が少なく、  
NO<sub>2</sub><sup>-</sup>のモル濃度が多いものを選ぶ

→Mg

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>への還元を最も促した金属

→Mg



最も適している金属はMg

18

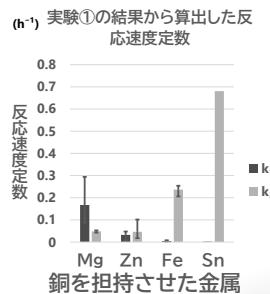
## 6 | 考察



$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$  の反応速度  
 $: k_1 [\text{NO}_3^-]$

$\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$  の反応速度  
 $: k_2 [\text{NO}_2^-]$

pH は影響しないと仮定



19

## 6 | 考察



右のグラフより

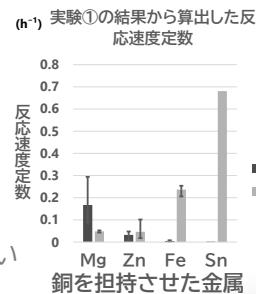
$\cdot \text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$

最も効率がいい: Mg

$\cdot \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$

効率がいい: Fe, Sn

→イオン化傾向に即していない



20

## 7 | $\text{NO}_2^-$ について

$\text{NO}_2^-$ : 毒性が強い

除去が容易ではない

→発生量を抑えるのが望ましい

21

## 8 | 実験②



- 事前調査と同様の方法で Fe, Zn, Mg, Sn の粉末を調製し、 $4.00 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$  亜硝酸ナトリウム水溶液に加える
- 吸光度を調べ、 $\text{NO}_2^-$  のモル濃度を算出
- インドフェノール青吸光光度法によって  $\text{NH}_4^+$  のモル濃度を算出

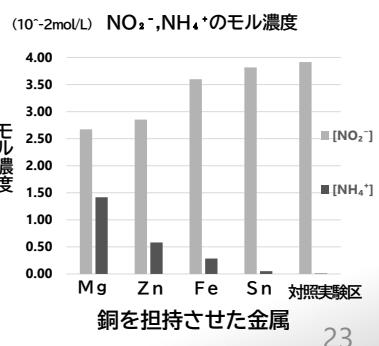
22

## 9 | 実験結果



$\text{NO}_3^-, \text{NH}_4^+$  のモル濃度

	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$
$10^{-2} \text{ mol}$		
Mg	2.67	1.42
Zn	2.85	0.58
Fe	3.60	0.29
Sn	3.82	0.05
対照実験区	3.92	0.01



23

## 10 | 考察



$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NH}_4^+$ 還元 (実験①)

$\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$

イオン化傾向に即していない

$\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$ 還元 (実験②)

$\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$

イオン化傾向に即している

Fe, Sn…あまり起こっていない

Mg, Zn…盛んに起こっている



$\text{NO}_3^-$  を用いた際に発生した  $\text{NH}_4^+$  はどのように還元されたか

24

## 10 | 考察



Fe,Sn : NO<sub>3</sub><sup>-</sup>がNO<sub>2</sub><sup>-</sup>を経由せず  
NH<sub>4</sub><sup>+</sup>へと還元される場合が  
相対的に多い

NO<sub>2</sub><sup>-</sup>は特に環境に悪影響を及ぼす

↓  
還元効率の良さ → Mg  
環境への負担のなさ → Fe,Sn

25

## 11 | 結論

還元効率の良さ → Mg

環境への負担のなさ → Fe,Sn

→ 場面に応じて選択が必要

26

## 11 | 参考



### 推薦される金属の生体的害の比較

Mg <sup>2+</sup> の半数致死量	40 mmol/kg
Sn <sup>2+</sup> の半数致死量	14 mmol/kg
Fe <sup>3+</sup> の半数致死量	18 mmol/kg
Zn <sup>2+</sup> の半数致死量	8.1 mmol/kg

### 危険性の比較

$$\text{Mg}^{2+} < \text{Fe}^{3+} < \text{Sn}^{2+} < \text{Zn}^{2+}$$

27

## 12 | 今後の展望



- ・同じ実験を複数回行いより正確なデータを取る
- ・還元効率がよく、環境に負担を与えない  
還元方法を模索する
- ・FeやSnを用いた還元において、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>を  
経由しないNH<sub>4</sub><sup>+</sup>への還元が実際に行われて  
いるのか確かめる
- ・実用化に向けてより多くの観点から考察する

28

## 参考文献

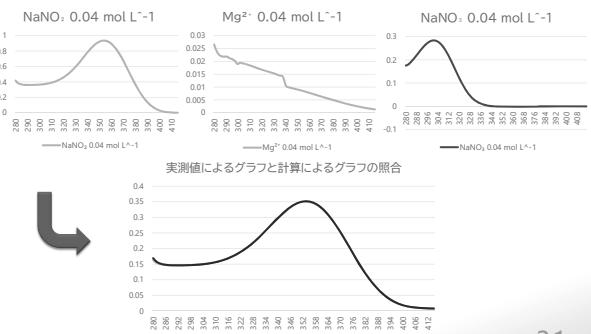
- 岡倉慎司、朝倉祝治：「中性溶液中における銅担持鉄粉を用いたNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の還元」電気化学および工業物理化学62巻4号 pp.354-355 (1994)
- 日本原子力研究所：「銅触媒による地下水汚染とその对策」JAERI-Review-2003-007
- 理化学研究所：温湿な環境で働く人工脱窒触媒－微生物の仕組みに基づく環境浄化技術－、2018-03-29、[https://www.riken.jp/press/2018/20180329\\_2/](https://www.riken.jp/press/2018/20180329_2/)
- Johan Rockström, Mattias Klum (著)；武内裕彦、石井栄穂子（監修）；谷淳也、森秀行ほか（訳）：「小さな地球の大きな世界：プラネタリー・パラメータと持続可能な開発」丸善出版 (2019)
- 木下貴、大野公一ほか17名：「化学基礎：新訂版」実教出版 (2021)
- 木下貴、大野公一ほか18名：「化学：新訂版」実教出版 (2021)
- 教研出版編集部(編)：「フォトタイエンス：化学図鑑」教研出版 (2017)
- ト部吉庸：「化学の新研究：改訂版」三省堂 (2019)
- 出典生体為害性金属元素フリー材料開発の現状と展望生体為害性金属元素と材料 山本玲子
- 化学実験テキスト研究会(編)：「環境化学 化学実験テキスト研究会」編

29

ご清聴ありがとうございました

30

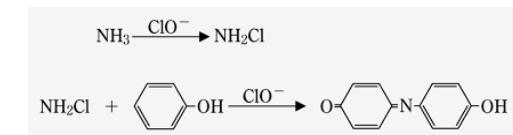
## (予備)濃度計算



31

## (予備)インドフェノール青法について

$\text{NH}_4^+$ イオンは $\text{ClO}^-$ の存在下でフェノールと反応し、 $\text{NH}_4^+$ イオン量に応じた青色を呈する



32

## (予備)インドフェノール青法について



図：右からZn、Sn、Mg、Feの銅担持粉末を反応させた液体を処理したもの

630 nmの吸光度を測定  
検量線から濃度を求める

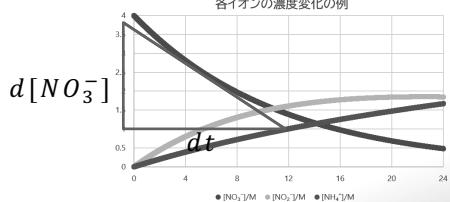
33

## (予備)反応速度の計算(1)

$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$ と反応が起こり、それぞれの反応次数が一次であると仮定

$$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \text{の反応速度: } k_1[\text{NO}_3^-]$$

$$\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+ \text{の反応速度: } k_2[\text{NO}_2^-]$$



34

## (予備)反応速度の計算(1)

$$\frac{d[\text{NO}_3^-]}{dt} = -k_1[\text{NO}_3^-]$$

$$\frac{d[\text{NO}_2^-]}{dt} = k_1[\text{NO}_3^-] - k_2[\text{NO}_2^-]$$

$$\frac{d[\text{NH}_4^+]}{dt} = k_2[\text{NO}_2^-]$$

$$[\text{NO}_3^-] = [\text{NO}_3^-]_0 e^{-k_1 t} \quad \dots \dots \textcircled{1}$$

$$[\text{NO}_2^-] = [\text{NO}_3^-]_0 \frac{k_1}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) \quad \dots \dots \textcircled{2}$$

$$[\text{NH}_4^+] = [\text{NO}_3^-]_0 \left( 1 - \frac{k_2 e^{-k_1 t} - k_1 e^{-k_2 t}}{k_2 - k_1} \right) \quad \text{35}$$

## (予備)反応速度の計算(1)

①、②式から

$$k_1 = -\frac{1}{t} \ln \left( \frac{[\text{NO}_3^-]}{[\text{NO}_3^-]_0} \right)$$

$$\frac{[\text{NO}_3^-]}{[\text{NO}_3^-]_0} + \left( 1 - \frac{k_2}{k_1} \right) \frac{[\text{NO}_2^-]}{[\text{NO}_3^-]_0} - e^{-k_2 t} = 0$$

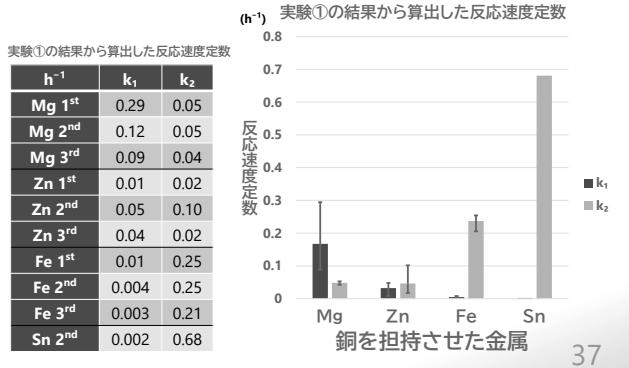
実験①におけるデータをそれぞれ代入

( $t = 24 \text{ h}$ 、 $[\text{NO}_3^-]_0 = 4.00 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ )

方程式を解いて $k_1$ 、 $k_2$ を得る

36

## (予備)反応速度の計算(1)



## (予備)反応速度の計算(2)



と反応が起こり、それぞれの反応次数が一次であると仮定

$$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \text{ の反応速度: } k_1[\text{NO}_3^-]$$

$$\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+ \text{ の反応速度: } k_2[\text{NO}_2^-]$$

$$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NH}_4^+ \text{ の反応速度: } k_3[\text{NO}_3^-]$$

38

## (予備)反応速度の計算(2)

$$\frac{d[\text{NO}_3^-]}{dt} = -(k_1 + k_3)[\text{NO}_3^-] \quad \dots \dots ③$$

$$\frac{d[\text{NO}_2^-]}{dt} = k_1[\text{NO}_3^-] - k_2[\text{NO}_2^-] \quad \dots \dots ④$$

$$\frac{d[\text{NH}_4^+]}{dt} = k_3[\text{NO}_3^-] + k_2[\text{NO}_2^-] \quad \dots \dots ⑤$$

$$[\text{NO}_3^-] = [\text{NO}_3^-]_0 e^{-(k_1+k_3)t} \quad \dots \dots ③$$

$$[\text{NO}_2^-] = [\text{NO}_3^-]_0 \frac{k_1}{k_2 - k_1 - k_3} (e^{-(k_1+k_3)t} - e^{-k_2 t}) \quad \dots \dots ④$$

$$[\text{NH}_4^+] = [\text{NO}_3^-]_0 \left( 1 - \frac{k_2 e^{-(k_1+k_3)t} - (k_1 + k_3)e^{-k_2 t}}{k_2 - k_1 - k_3} \right) \quad 39$$

## (予備)反応速度の計算(2)

実験②における $\text{NO}_2^-$ 濃度を $[\text{NO}_2^-]'$ とすると、 $\text{NO}_3^-$ 濃度は0であるから

$$\frac{d[\text{NO}_2^-]'}{dt} = -k_2[\text{NO}_2^-]'$$

$$[\text{NO}_2^-]' = [\text{NO}_2^-]'_0 e^{-k_2 t}$$

$$[\text{NO}_2^-]' + [\text{NH}_4^+]' = [\text{NO}_2^-]'_0 \text{ より}$$

$$[\text{NO}_2^-]'_0 - [\text{NH}_4^+]' = [\text{NO}_2^-]'_0 e^{-k_2 t} \quad \dots \dots ⑤$$

40

## (予備)反応速度の計算(2)

$$t = 24 \text{ h}, [\text{NO}_3^-]_0 = [\text{NO}_2^-]'_0 = 4.00 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$$

とし、まず⑤から⑥式を得る

$$k_2 = -\frac{1}{t} \ln \left( \frac{[\text{NO}_3^-]_0 - [\text{NH}_4^+]'}{[\text{NO}_3^-]_0} \right) \quad \dots \dots ⑥$$

次に③、④から⑦、⑧式を得る

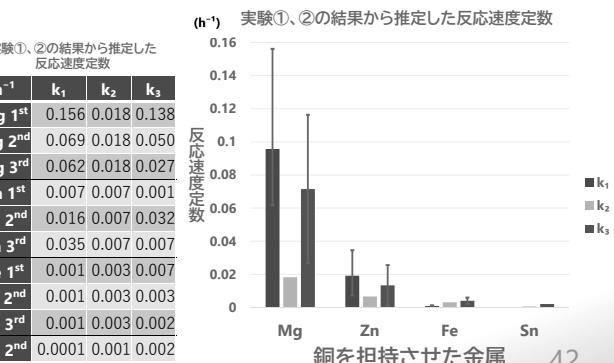
$$k_1 + k_3 = -\frac{1}{t} \ln \left( \frac{[\text{NO}_3^-]_0}{[\text{NO}_3^-]_0} \right) \quad \dots \dots ⑦$$

$$k_1 = \frac{1}{t} \left( \frac{[\text{NO}_3^-]_0}{[\text{NO}_3^-]_0 - [\text{NH}_4^+]' - [\text{NO}_3^-]} \right) \ln \left( \frac{[\text{NO}_3^-]_0 - [\text{NH}_4^+]'}{[\text{NO}_3^-]} \right) \quad \dots \dots ⑧$$

## (予備)反応速度の計算(2)

実験①、②の結果から推定した反応速度定数

	$k_1$	$k_2$	$k_3$
Mg 1 <sup>st</sup>	0.156	0.018	0.138
Mg 2 <sup>nd</sup>	0.069	0.018	0.050
Mg 3 <sup>rd</sup>	0.062	0.018	0.027
Zn 1 <sup>st</sup>	0.007	0.007	0.001
Zn 2 <sup>nd</sup>	0.016	0.007	0.032
Zn 3 <sup>rd</sup>	0.035	0.007	0.007
Fe 1 <sup>st</sup>	0.001	0.003	0.007
Fe 2 <sup>nd</sup>	0.001	0.003	0.003
Fe 3 <sup>rd</sup>	0.001	0.003	0.002
Sn 2 <sup>nd</sup>	0.0001	0.001	0.002



# 酸化チタン(IV)の光分解を用いた、水の電気分解の効率化

5班 岡田大知 高見涼介 平川直 山西瑛太

## 1 |先行研究



本多・藤嶋効果 1972年

光触媒反応の代表例

水の電気分解は本来1.23Vの電圧を加えないと起こらない



陽極に酸化チタン(IV)を用い、紫外線を照射することで約0.5Vの電圧で水の電気分解が起こる

## 2 |本研究の目的



酸化チタン(IV)板の酸化度合いによって本多・藤嶋効果の効率が変化するのかを調べる

※水の電気分解がより低い電圧で起こった時、効果の効率が高いとみなす

## 3 |準備実験



硫酸水溶液(0.1mol/L)に

陽極・チタン板 陰極・白金板

→電気分解を行い酸化チタン(IV)板を作成した

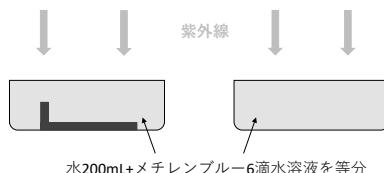
・酸化チタン(IV)板にはメチレンブルーが紫外線で分解される作用を促進する効果がある

・メチレンブルーが少ないほど光が通りやすくなる(吸光度が小さくなる)

## 3 |準備実験



- チタン板の表面が電気分解によって酸化しているかを確認する



三時間日光の下に置き、吸光度を測定した

## 3 |準備実験



放置時の状態	吸光度
初期状態	0.652
酸化チタンなし 太陽光照射	0.369
酸化チタン(IV) 太陽光照射 酸化時間30分	0.378
酸化チタン(IV) 太陽光照射 酸化時間45分	0.331
酸化チタン(IV) 太陽光照射 酸化時間60分	0.308

酸化チタン(IV)板を加えていない物より吸光度の値が下がっていた

→酸化チタン(IV)板がメチレンブルーを光分解したと言え、酸化膜が張れていることが分かった

より長い時間だけ陽極酸化した酸化チタン(IV)板を用いた時のほうが、よりメチレンブルーが分解されていた。

## 4 |本実験



### <実験方法>

- 0.1mol/L 水酸化ナトリウム水溶液に、  
①両極に白金電極  
②陽極に酸化チタン(IV)板、陰極に白金電極  
を加える

- ・それぞれの電極の距離は 1 cm に保つ
- ・電源装置を用いてかける電圧を変える  
→反応の起こる最低電圧を目視で確認する

## 4 |本実験



### <結果と考察>

+電極	-電極	最低電圧(V)
白金	白金	1.7
酸化チタン(IV) (100min)	白金	1.3
酸化チタン(IV) (50min)	白金	

酸化膜を作成したチタン板を用いて実験を行ったとき、白金電極を用いた時よりも低い電圧で水の電気分解を行うことができた。  
→酸化チタン(IV)板の効果あり

## 4 |本実験



### <反省>

- ・試行回数が少ない
- ・目視でしか反応の有無が確認できていないため、確実なデータを得られていない。
- ・50分間陽極酸化を行ったチタン板と100分間陽極酸化を行ったチタン(IV)板の比較ができるだけの十分なデータを得られていない。

## |今後の展望



- ・実験の回数が非常に少ないとため、確実性を高めるため試行回数を増やしたい
- ・試行回数を増やして得た確かなデータをもとに、再び考察したい

## |参考文献



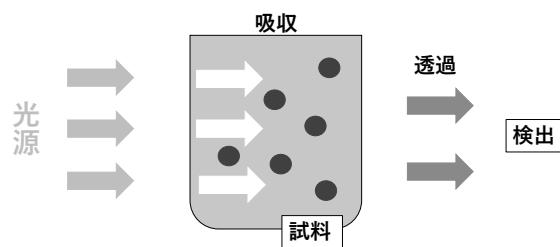
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/material/49/2/49\\_55/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/material/49/2/49_55/_pdf)

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/electrochemistry/71/7/71\\_568/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/electrochemistry/71/7/71_568/_pdf/-char/ja)

ご清聴ありがとうございました

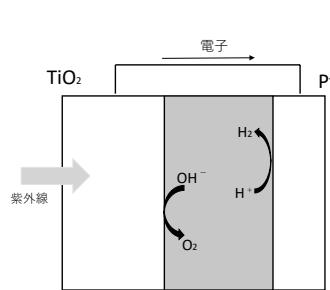
## 吸光度とは

特定の波長の光（単色光）を溶液試料に当てた際、通過した光の量を測定し、試料が吸収した光



→試料中に対象物質が多いほど、多量の光が吸収される

## 本多－藤嶋効果



酸化チタンが電解質水溶液に接触しバンドの曲がった領域が形成

紫外線照射により電子-正孔対ができる、電子はパルクへ正孔は表面へ分離

酸化チタン表面で水酸化物イオンが酸化して酸素発生、電子は導線を通って白金電極で水素イオンを還元し水素発生

# 2021年度 生徒課題研究最表会 障害物が水流に与える影響

2年10組 物理6班  
大野 友樺 大久保 翔馬 鍵井 華 中澤 悠來

## 1. 研究の目的



水流の中に置かれた障害物が  
水流に及ぼす影響を明らかにする

## 研究の動機



## 2. 実験方法



### ・実験道具



## 3. 実験方法



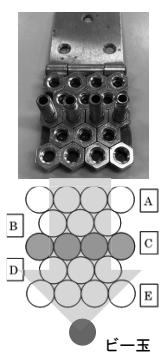
- 水流発生装置が作り出す水流の中に  
ビー玉と障害物を置く



- ビー玉をスローモーションカメラで撮影し、  
ビー玉のスピードを計算し、障害物が水流に  
及ぼす影響の大きさを調べる

5

## 3. 障害物について



- 障害物の形状はボルトを  
差し込む場所や数を変える  
ことによって変化させる。
- 左上のボルトをさした蝶番  
は左下のように図式化する  
とする。

6

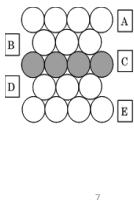
## 4. 予備実験



障害物とビー玉の間の距離と、水流の速さの関係について調べる予備実験を行った。

### 【結果】

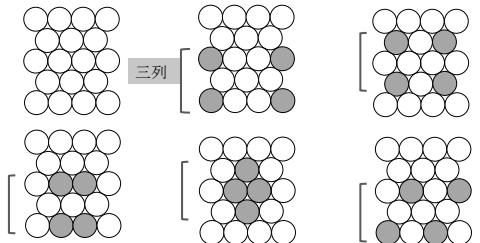
A列からE列のどこにボルトを設置した場合も、ビー玉と障害物の距離は水流にほとんど影響がないことが分かった。



## 5. 実験 I



障害物の密度の影響を調べるために、3列の幅を決め、様々なパターンで障害物を設置し実験を行った。



7

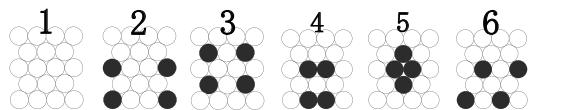
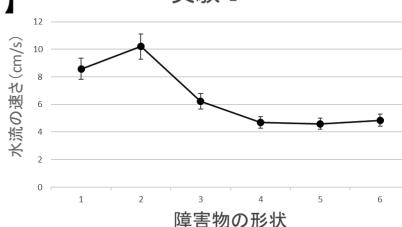
8

## 5. 実験 I



### 【結果】

実験 I



## 5. 実験 I の考察



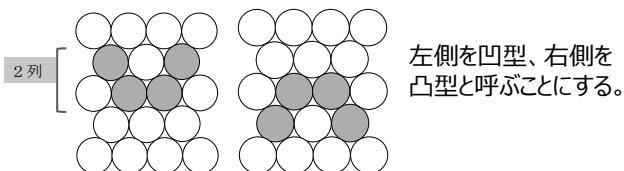
- ・障害物2により水の流れが一部分に集中したため、水流が速くなった。
- ・ボルトが中心にあるほど、障害物としての効果が高い。
- ・障害物としての効果は、ビー玉側から見た障害物の面積に関係する。
- ・ボルトがずれて設置されている場合、障害物としての効果は高まる。

10

## 5. 実験 II



使用する幅は水流と垂直方向の2列のみと固定し、同様の実験を行った。



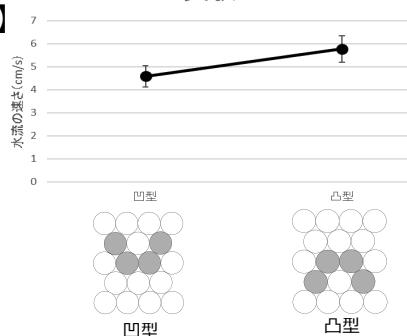
左側を凹型、右側を凸型と呼ぶことにする。

## 5. 実験 II



### 【結果】

実験 II



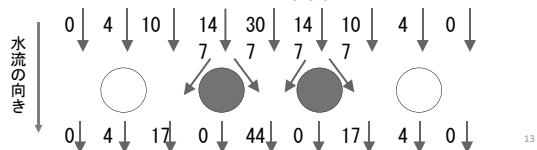
11

## 5. 実験Ⅱの考察



### <数値によるシミュレーション>

- 水流ポンプが生み出す水流の速さを測定し、その相対値を下図のように定める
- 障害物に衝突した水流は左右に半分ずつ分かれる
- 最終的に中央を流れた水流の値の大きさによってビー玉への影響の大きさを評価する



## 7. シミュレーションの結果



凸型の障害物: 49

凹型の障害物: 44

に相当する水流がビー玉に到達していた。



実験Ⅱに関しては、結果を説明できている

しかし!

他の実験結果とは矛盾する点もあった

14

## 7. シミュレーションの結果



### ・考えられる問題点

- 最初に設定した、水流の大きさを表す数値が適切な大きさでなかった
- ボルトの間隔が異なると、単純に水流が半分に分かれたり、まっすぐに進んだりしていると考えることができない

15

## 7. 今後の展望



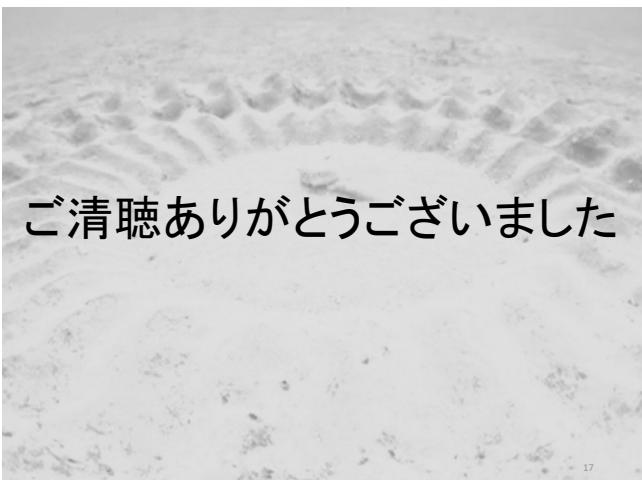
- 実験Ⅱの結果の考察の際に考えたシミュレーションは、結果と整合性が取れている点がある一方で、一部ほかの結果と矛盾する点もあった。



考察した改善点も踏まえ、より整合性のあるシミュレーション方法を考えていきたい。

16

ご清聴ありがとうございました



17

# 2021年度 生徒課題研究発表会

## 有孔ボードの水中移動時の 揺動について

2年10組 7班

扇 幸太郎

岡室 翼颯

傍士 陽輝

安田 岳叶

## 1 | 研究の背景



流体中の物体の速度変化により物体回りの乱流に変化が生じることが分かっている。

そこで、穴をあけることで、水中を動くボード周りの乱流によって起こる平板の揺動が抑制されると仮説を立て、これを立証する。

## 2 | 実験 I



アクリル板の揺れる境界値を求める

「揺れの定義」 . . .

全て目視での確認とする

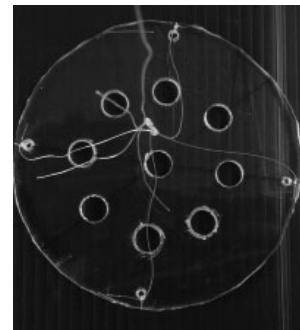
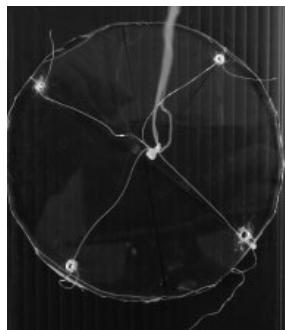
【揺れなし】：鉛直方向にアクリル板が傾くことなしに上昇する

【揺れあり】：揺れなしの状態に対し、アクリル板が左右に動いたり、傾きながら上昇する

## 3 | 実験用具 I



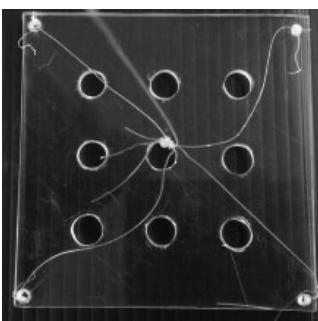
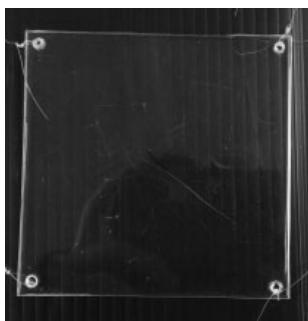
円



## 3 | 実験用具 I



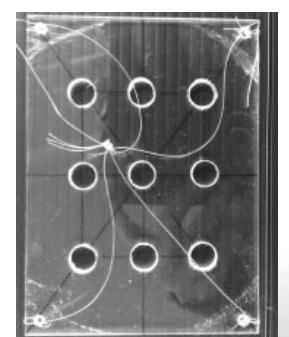
正方形



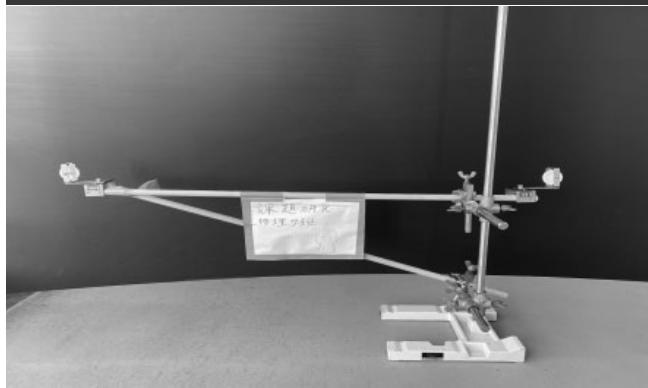
## 3 | 実験用具 I



長方形



## 4 | 実験装置



## 5 | 補足



レイノルズ数 (Re) について  
慣性力と粘性力の比をとった無次元数  
流体の乱流の起こりやすさの指標

$$l \text{ [m]} = (\text{代表長さ}) \\ v \text{ [m/s]} = (\text{代表流速}) \\ \rho \text{ [kg/m}^3\text{]} = (\text{流体の密度}) \\ \mu \text{ [Pa}\cdot\text{s]} = (\text{流体の粘性係数}) \\ \nu \text{ [m}^2/\text{s]} = (\text{動粘性係数})$$

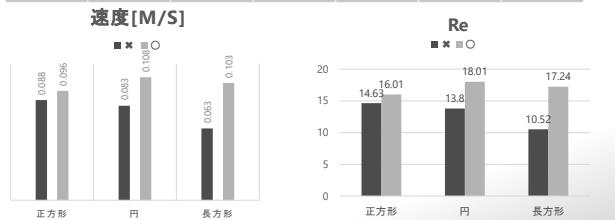
$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu}$$

## 6 | 結果 I



### 【揺れの境界値】

アクリル板	穴なし正方形	穴あり正方形	穴なし長方形	穴あり長方形	穴なし円	穴あり円
グラム [g]	14.0	16.5	14.5	17.3	13.0	19.5



## 7 | 考察 I



- ・穴の開いている板の速度の方が早くなっている
- ・板の形状による変化はみられるが、いずれも穴の開いているほうが境界値が大きい
- ・穴の開いている板の方が揺れにくい
- ・穴の開いている板の方がレイノルズ数が大きい

## 8 | 実験 II



実験 I の結果を受けて、穴の数の違いによる結果の変化について調べることにした。

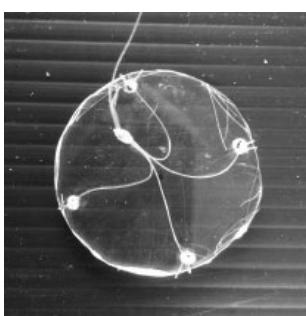
### (実験内容)

0穴、4穴、6穴、8穴の円形の板を用意し、それぞれの上昇の様子を撮影して、板の揺れの平均値、数、速度、レイノルズ数について考える。

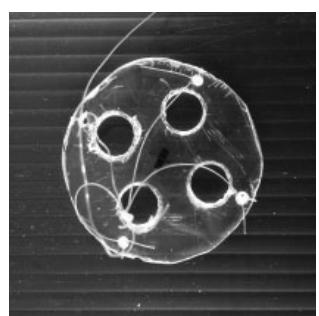
## 9 | 実験用具 II



0穴



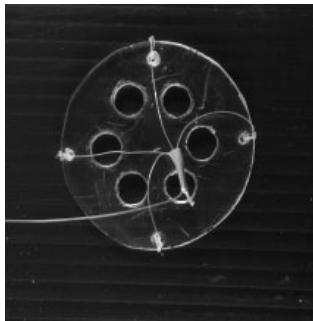
4穴



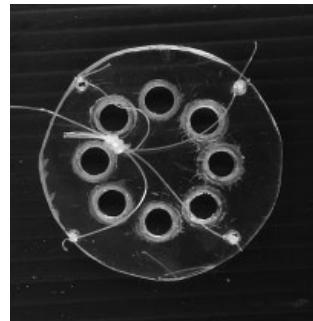
## 9 | 実験用具Ⅱ



6穴



8穴



## 動画(実験2)



【揺れあり】



## 動画(実験2)



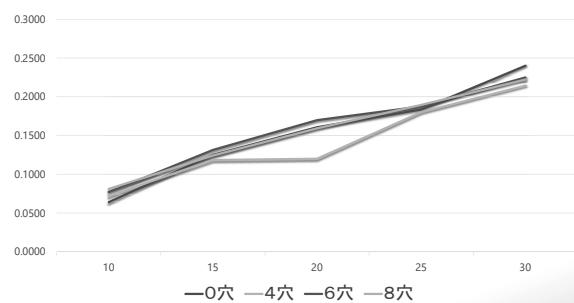
【揺れなし】



## 10 | 結果Ⅱ



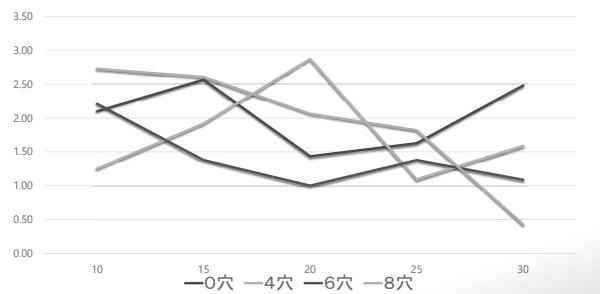
速さ【m/s】



## 10 | 結果Ⅱ



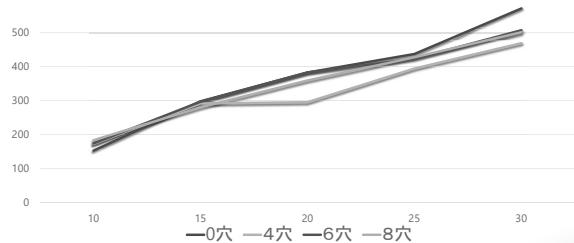
揺れ幅平均【cm】



## 10 | 結果Ⅱ



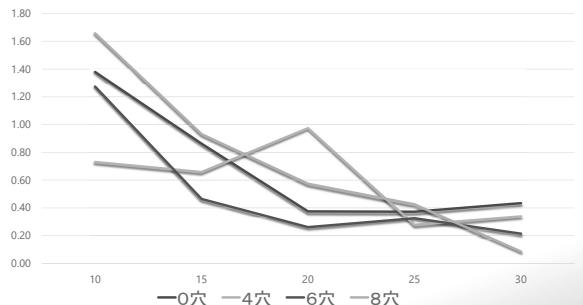
Re



## 10 | 結果Ⅱ



(揺れ幅平均)×100/Re



## 11 | 考察Ⅱ



- 各板の速度に大きな差異は見られなかった
- 6穴、8穴の板はおもりが多くなるほど、揺れ幅が小さくなつた
- Reはおもりが少ない場合は大きな差は見られないが、多くなるにつれてその差が大きくなる。
- 最も安定して揺れを抑制できるのは6穴で、低速度帶では4穴が、高速度帶では8穴がその効果が高い

## 12 | 結論



- 穴があることにより、乱流が起きやすい環境下での揺れの増加が抑制される
- 穴の数により、揺れの抑制の効果は変化するが、本実験においては6穴の板がどの速度帶でも安定して揺れの抑制効果が高いと考えられ、低速度帶では4穴が、高速度帶では8穴が最も揺れを抑制できると考えられる。

## 13 | 今後の展望



- 4穴の板の20gのグラフが他と比べて明らかに違いが大きい  
→その詳しい要因の考察
- 上昇中の平板周りの乱流の様子の可視化
- 試行回数を増やす

## 参考文献



- 水中で動く物体にはたらく抵抗の測定  
<http://hdl.handle.net/10105/4777>
- レイノルズ数 | 熱流体解析 | ソフトウェアクライドル  
<https://www.cradle.co.jp/calculation/03rn.html>
- 多孔板の抵抗特性：第1報, 抵抗係数  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib1979/50/4/55/50\\_455\\_1808/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaib1979/50/4/55/50_455_1808/_article/-char/ja/)
- 43章：粘性係数と動粘性係数  
[http://skomo.o.oo7.jp/f28/hp28\\_43.htm](http://skomo.o.oo7.jp/f28/hp28_43.htm)



## 回転系における独楽の動き

2年10組 物理8班

植木 想奈  
大井 悠生  
川口 謙真  
野田 雛乃

### 1 | 研究の背景



- 一般的に回転系で物体が進行するとき系の自転によりコリオリの力がはたらくことが知られている。
- この力が回転体の回転に影響を及ぼすのか興味を持ちその一つとして独楽を対象として研究を行う。

### 2 | 実験1



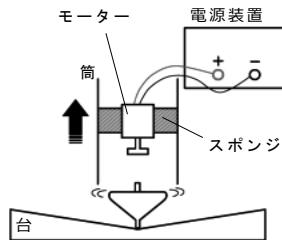
#### 〈目的〉

- 本実験では独楽の回転方向が独楽の回転時間にどれほどの影響を与えるかを調べ、地球の自転が独楽の回転に及ぼす影響について調べることを目的としている。

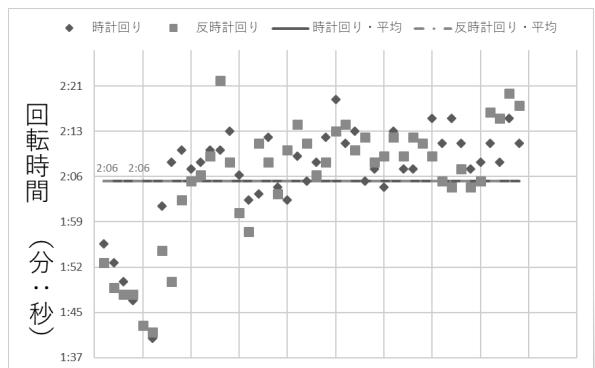
### 2 | 実験 1



#### 〈実験装置〉



### 3 | 結果 1



### 4 | 考察 1



$$\text{コリオリの力の公式: } F = 2mv\Omega \sin\phi$$

#### 〈コリオリの力の計算〉

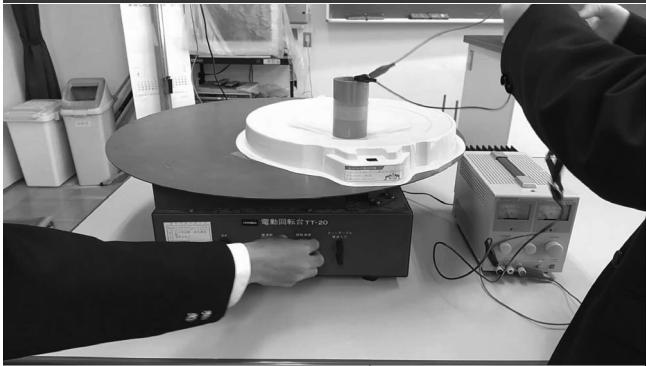
$$\text{角速度: } \Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

$$\text{質量: } m = 0.015 \text{ kg}$$

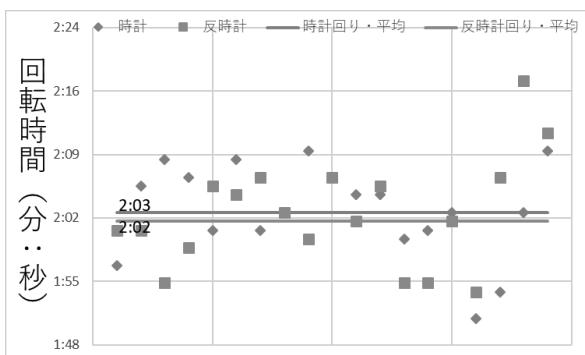
$$\text{緯度: } \phi \approx 37^\circ \quad \text{独楽の速度: } v \approx 0.3 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow F = 3.95 \times 10^{-7} \text{ [N]}$$

## 5 | 実験 2



## 6 | 結果 2



## 7 | 考察 2



〈コリオリの力の計算〉

$$\text{角速度: } \Omega = 0.46 \text{ rad/s}$$

$$\text{質量: } m = 0.015 \text{ kg}$$

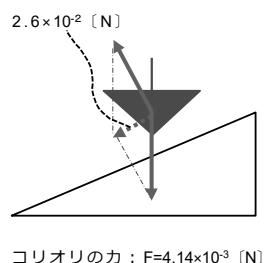
$$\text{緯度: } \Phi = 90^\circ \quad \text{独楽の速度: } v = 0.3 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow F = 4.14 \times 10^{-3} \text{ [N]}$$

斜面上で独楽に働く重力の斜面に平行な下向きの力  
=  $2.6 \times 10^{-2}$  [N]

⇒実験1と比べると影響があると考えられる。

## 7 | 考察 2



## 8 | 実験 3



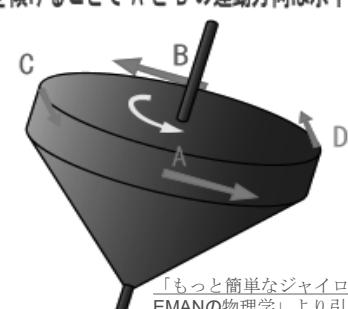
・独楽を平面で回してみると…

独楽の公転方向が自転の方向と一致

## 8 | 実験 3



軸を傾けることで A と B の運動方向は水平でなくなる



## 8 | 実験 3



- 回転台の上に台を乗せず回転台を回し  
その上で独楽を回してみると…  
落ちる時と落ちない時があった

## 8 | 実験 3



### 〈目的〉

先行研究より、一定の条件を満たす回転でボールを転がして置いた場合、ボールが外に飛び出さず、同じ場所でボールが回転しながら止まって見えるようになる。

独楽の回転速度と回転台の角速度との関係を調べる。

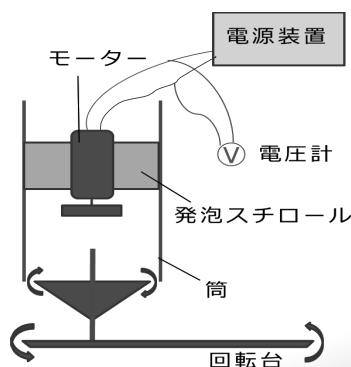
## 8 | 実験 3



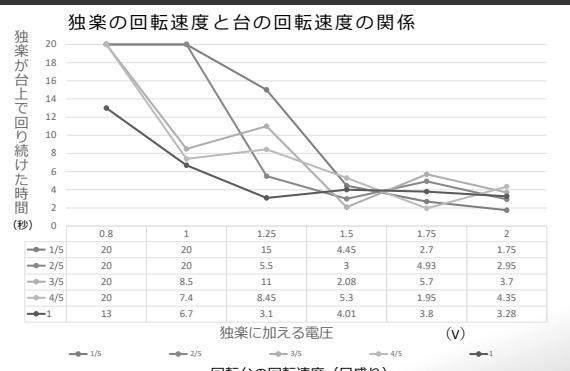
### 〈仮説〉

- 先行研究から独楽の公転の速度と台の角速度が同じくらいになったときに台上で回転している時間が最も長くなると考えられる。

## 8 | 実験 3



## 9 | 結果 3



## 10 | 考察 3



台の回転速度に関わらず

電圧が小さい=独楽の回転速度が小さい  
⇒台上で回り続けた時間が長い

電圧が大きい=独楽の回転速度が大きい  
⇒台上で回り続けた時間が短い

## 11 | 今後の展望



- ・装置を改良してより正確な実験を行う。
- ・ハイスピードカメラを用いて独楽の速度を計測し、コリオリの力をより正確に計算する。
- ・平面と斜面では独楽の公転の方向が逆になった。この現象について我々はジャイロ効果が関わっていると考えている。このことについて考察し、検証していく。
- ・回転時間以外の指標でコマの回転への影響を調べる。

## 12 | 参考文献



- ・ゼロから学ぶ力学 都築卓司
- ・基礎物理学シリーズ1 力学  
福島雄児 杉山忠男
- ・大津市科学館〈スピンドィスク〉  
([http://www.otsu.ed.jp/kagaku/02\\_exhibition/index.html](http://www.otsu.ed.jp/kagaku/02_exhibition/index.html))
- ・もっと簡単なジャイロ効果-力学-EMANの物理学  
(<https://eman-physics.net/dynamics/gyro.html>)

ご清聴ありがとうございました

## 石の回転が水切りに及ぼす影響

物理9班 林駿佑  
水谷匡寿  
屋舗樹希  
丹羽琴美

### 1 | 水切りとは



1

### 2 | 研究の動機と背景・目的



《動機》  
水切りの仕組みや投げ方と跳ねる回数の関係について興味を持った



過去の課題研究から、石の回転が重要な要素だと考え、石を回転させながら発射する装置の作成を試みた

《過去の課題研究》



### 2 | 研究の動機と背景・目的



《目的》  
石の回転が水切りにどのような影響を及ぼすかを明らかにする

#### 《仮説》

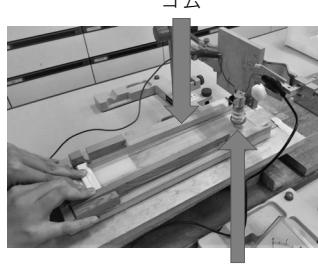
石の回転数を上げると、石の回転軸が安定するなど石に様々な影響を及ぼし、跳ねやすくなる

3

### 3 | 実験



#### 〈実験装置〉



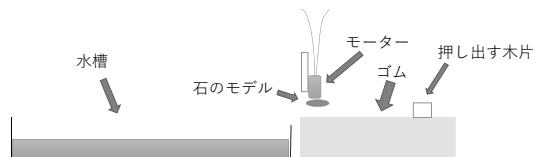
ゴムの張られた木を引き、手を放し発射を行う

4

### 3 | 実験



#### 〈実験装置〉

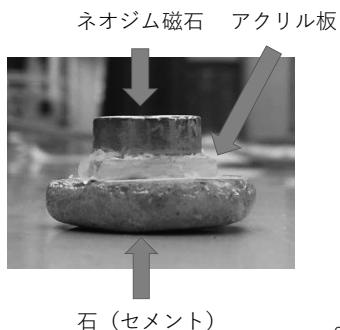
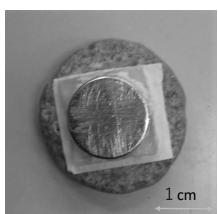


5

### 3 | 実験



〈石のモデル〉



6

### 3 | 実験



《定義》

石が着水後、少しでも水面から離れた状態

→ 「跳ねた」



7

### 3 | 実験・仮説



《実験①》

石を回す場合と回さない場合に分け、それ  
ぞれ20回ずつ発射し跳ねた割合（20回中何  
回跳ねたか）を測定

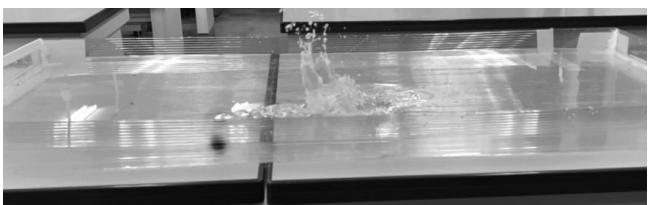
(石を回す場合の回転数は30回/sとした。)

《仮説》

経験的に、回転数を上げると回転軸がより  
安定するのでその結果、跳ねやすくなる

8

### 4 | 動画



回転なし（跳ねなかった場合）

9

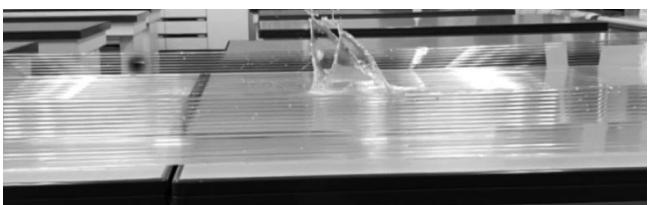
### 4 | 動画



回転なし（跳ねた場合）

10

### 4 | 動画



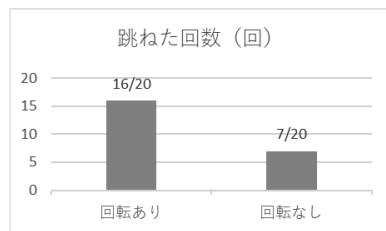
回転あり（跳ねた場合）

11

## 5 | 結果・考察①



〈グラフ①〉



回転ありが回転なしの2倍以上の確率で跳ねた  
→ 石の回転によって軸が安定し跳ねやすくなつたと考えた

1 2

## 6 | 実験②

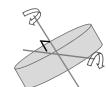


《実験②》

- ・回転なし
- ・回転あり(回転数18回/s、24回/s、30回/s、34回/s、43回/s)  
それぞれ20回ずつ試行を行う



- ・石が跳ねた割合 (20回中何回跳ねたか)
- ・石が跳ねた場合の石が最初に着水した位置と次に着水した位置との距離(ランダムに10回分抽出)
- ・縦回転の回数



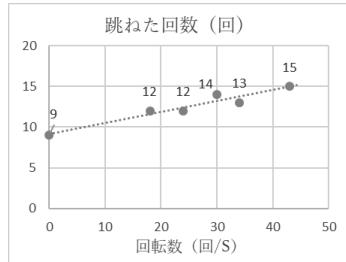
を測定

1 3

## 7 | 結果(跳ねた回数(20回中))



〈グラフ②〉



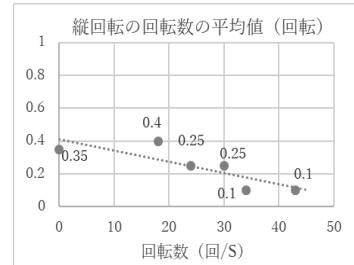
石の回転数と跳ねた回数に一定の関連性  
→ 考察①に沿つた結果が得られた

1 4

## 7 | 結果(縦回転の回数)



〈グラフ③〉



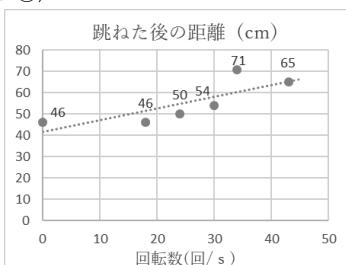
回転数が多いほど縦回転を起こしにくい  
→ 着水後の軌道が安定している

1 5

## 7 | 結果(跳ねた後の距離)



〈グラフ④〉



回転数を上げるほど石の着水地点間の距離が伸びている

1 6

## 7 | 結果・考察②



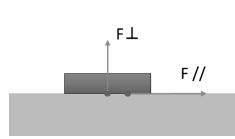
着水する前後で水平方向の速さが変化する



回転数を上げるほど  
石の着水地点間の距離が伸びている



回転によって水の影響を受けにくくなっている



水がF//によって石の水平方向の速さを遅くする、いわばブレーキのような効果

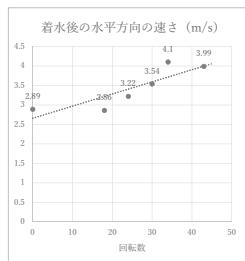
1 7

## 8 | 実験② 続き



考察②を確かめるため着水後の石の速さを計測した

〈グラフ⑤〉 (初速度7.99m/s)



回転数を上げる

↓  
着水後の石の水平方向の  
速さが速くなっている

↓  
考察②は正しい

18

## 9 | 動画



回転なし（画面上側）と回転あり  
(画面下側) の速さの違い

19

## 10 | 結論



《結論》

回転数を上げる



- 石の軌道が安定した (スローモーション動画の観察及び縦回転の回数の測定による)
- 石が水の影響を受けにくくなった (着水後の距離及び水平方向の速度の測定による)

➡ 回転数の変化が石の跳ねる確率に関連する

20

## 10 | 今後の展望



《現在の課題・展望》

- ・試行回数を増やす
- ・装置の自動化
- ・石の回転が及ぼすほかの影響の考察

21

## 11 | 参考文献



- ・「Theoretical and Numerical Approach to “Magic Angle” of Stone Skipping」  
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.94.174501>

- ・2014年度膳所高校理数科課題研究  
「水切りに跳躍距離における最適条件」

22

*Thank you for listening*

23

# 円分多項式の最小性 に基づいた一般化

Generalization of Cyclotomic Polynomials

数学10班 田辺隆暁 時田真之介 宮田航平 村木智直

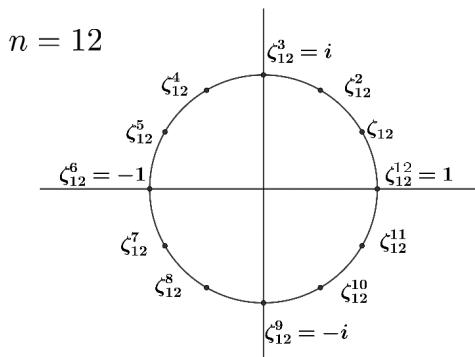
## 1.導入

### 1-1. 1のn乗根

【1のn乗根】方程式  $x^n - 1 = 0$  の解  
n個の解を、 $\zeta_n, \zeta_n^2, \dots, \zeta_n^n$  とおく

例 n=3のとき

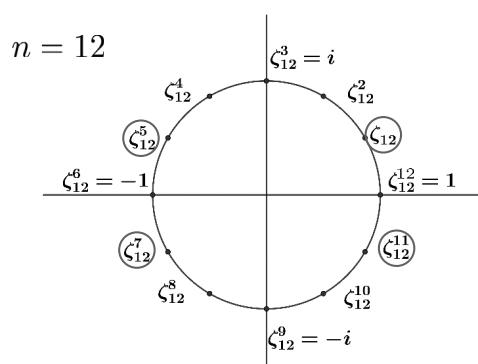
$$\zeta_3 = \frac{-1 + \sqrt{3}i}{2}, \quad \zeta_3^2 = \frac{-1 - \sqrt{3}i}{2}, \quad \zeta_3^3 = 1$$



### 1-2. 原始n乗根

【1のn乗根】方程式  $x^n - 1 = 0$  の解  
n個の解を、 $\zeta_n, \zeta_n^2, \dots, \zeta_n^n$  とおく

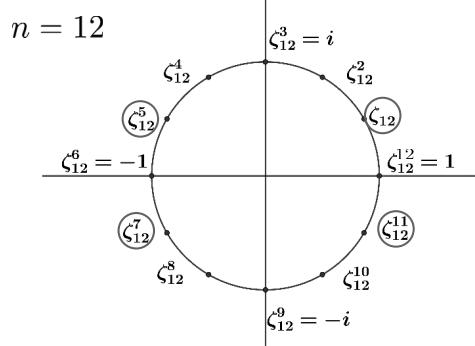
【原始 n 乗根】n乗して初めて 1 になる  
<性質>  
・nとkが互いに素  $\Leftrightarrow \zeta_n^k$  が原始n乗根



## 1-2. 原始n乗根

【1のn乗根】方程式  $x^n - 1 = 0$  の解  
n個の解を、 $\zeta_n, \zeta_n^2, \dots, \zeta_n^n$  とおく

【原始 n 乗根】n乗して初めて 1 になる  
<性質>  
• nとkが互いに素  $\Leftrightarrow \zeta_n^k$  が原始n乗根



## 1-3. 円分多項式

$$x^{12} - 1 = (x - \zeta_{12}^1)(x - \zeta_{12}^2) \cdots (x - \zeta_{12}^{11})(x - \zeta_{12}^{12})$$

原始12乗根だけ取り出す

$$\begin{aligned}\Phi_{12}(x) &= (x - \zeta_{12}^1)(x - \zeta_{12}^5)(x - \zeta_{12}^7)(x - \zeta_{12}^{11}) \\ &= x^4 - x^2 + 1\end{aligned}$$

### 性質 1：整数係数

- $\Phi_5(x)$  を例にとる

$$\begin{aligned}\Phi_5(x) &= (x - \zeta_5)(x - \zeta_5^2)(x - \zeta_5^3)(x - \zeta_5^4) \\ &= x^4 + x^3 + x^2 + x + 1\end{aligned}$$

$$\zeta_5 = \frac{-1 + \sqrt{5}}{4} + \frac{\sqrt{10 + 2\sqrt{5}}}{4}i$$

$$\begin{aligned}\Phi_1(x) &= x - 1 \\ \Phi_2(x) &= x + 1 \\ \Phi_3(x) &= x^2 + x + 1 \\ \Phi_4(x) &= x^2 + 1 \\ \Phi_5(x) &= x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 \\ \Phi_6(x) &= x^2 - x + 1 \\ \Phi_7(x) &= x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 \\ \Phi_8(x) &= x^4 + 1 \\ \Phi_9(x) &= x^6 + x^3 + 1 \\ \Phi_{10}(x) &= x^4 - x^3 + x^2 - x + 1\end{aligned}$$

### 性質 2：最小多項式

「有理数上での $\alpha$ の最小多項式」  
 $\alpha$ を解にもつ有理数係数の多項式で最も次数が低いもの

例:	$\sqrt{2}$	$\dots$	$\underline{x^2 - 2 = 0}$
	$i$	$\dots$	$\underline{x^2 + 1 = 0}$
	$\zeta_n$	$\dots$	$\underline{\Phi_n(x) = 0}$

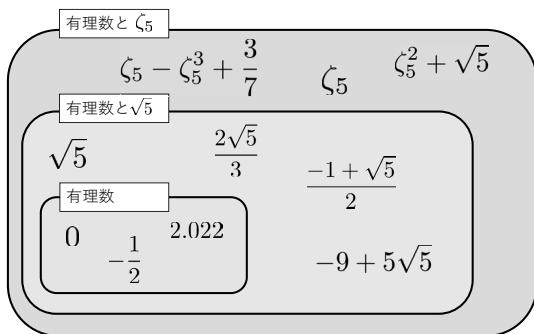
## 2.研究内容

### 2-1.円分多項式の一般化

円分多項式は,  $\zeta_n$  の 有理数上 の最小多項式



### 数体系の拡大の例

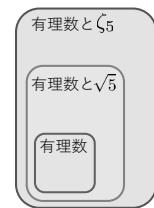


### 2-1.円分多項式の一般化

$\zeta_5$  の 有理数上 の最小多項式

$$x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 = (x - \zeta_5)(x - \zeta_5^2)(x - \zeta_5^3)(x - \zeta_5^4)$$

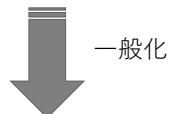
$$\begin{aligned} & \text{有理数と } \sqrt{5} \\ & x^2 - \frac{-1+\sqrt{5}}{2}x + 1 = (x - \zeta_5)(x - \zeta_5^4) \\ & \text{有理数と } \zeta_5 \\ & x - \zeta_5 = (x - \zeta_5) \end{aligned}$$



### 2-2.一般化円分多項式の性質

- 整数係数

$\Phi_n(x)$  は, 有理数における整数係数



一般化した円分多項式も  
拡大した数体系における整数係数

拡大した数体系における整数とは

最高次の係数が1である整数係数の多項式の解  
となる数

例

•	$\frac{-1+\sqrt{5}}{2}$
→	$x^2 + x - 1 = 0$ の解

•	$\zeta_5$
→	$x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 = 0$ の解

## 2-3.成果

- ・円分多項式をその性質のひとつを用いて一般化した。
- ・一般化円分多項式には、元の円分多項式と同様の性質があることを証明した。
- ・一般化円分多項式の性質から数体系とそれにおける整数について記述した。

## 3.今後の展望

- ・一般化円分多項式の性質について元の円分多項式との類似を考えながら研究をさらに深める。
- ・一般化円分多項式に関する拡大数体系の性質を調べる。

## 4.参考文献

- [1] 雪江明彦 『代数学1 群論入門』 日本評論社
- [2] 雪江明彦 『代数学2 環と体とガロア理論』 日本評論社
- [3] 青木昇 『素数と2次体の整数論』 共立出版
- [4] J.Neukirch 『Algebraische Zahlentheorie』



# 講評



# 令和3年度 膳所高校課題研究 講評

---

## 1班 真正粘菌の外部記憶因子について

### The External Memory Factor of True Slime Molds

---

昨年度の1つ上の学年が始めた材料である「真正粘菌」に興味を持つところから始まった。昨年のテーマをそのまま引き継がず自分たちでテーマを新たにやりながらアレンジする形で活動をスタートした。最初は先行研究や先輩の行っていた実験を追試験する形で過ごしていく、テーマ発表・中間発表とテーマの掘り下げが不十分であいまいな状態で発表を行っていた。しかし、自分たちで真正粘菌と向き合って、先行研究の調査を積極的に行い、実際に粘菌を扱って観察を続けていく中で、真正粘菌が培地などを移動した時に残る粘菌鞘に記憶に残る物質があるのではないかと仮説を立てた。その中で粘菌鞘に含まれる物質の元素(K)に注目した。培地の上に餌であるオートミールを置き、粘菌とオートミールの間に粘菌が通過できないようにした実験系を考案し、物質(硝酸カリウム)の濃度条件を変えて粘菌の移動の様子を観察したところ、確かにKを含む化合物の培地では粘菌の移動に差がでることが確認できた。

最終的な発表ではこの自分たちの研究の過程を分かりやすく説明し、評価の高いものであった。もう少し早くから実験を行い、サンプルの数もたくさん行えるとより良い成果が得られたかもしれない。今後はこの1年間で経験したことをこれからの活動に活かして欲しい。

---

## 2班 ヤマトシロアリの共喰い行動について

### Cannibalistic Behavior of *Reticulitermes Speratus*

---

ヤマトシロアリを用いて研究活動を行うとして、近江神宮の裏山に赴いて採取を行い、本校の実験室で飼育することとした。実際に野生に生息する個体を採取することにより、生息地の環境や生存の状況を知ることができ、研究においての個体の扱いについて理解が深まった。

当初に計画したテーマでの予備実験では、先行研究通りの結果が得られず、実験の継続は難しいと判断してテーマの変更が余儀なくされた。シロアリの共喰い行動に照準を定めてからは、計画的に実験を進めることができた。1回の実験結果を得るのに、連續した5日間の観察が必要となるため、実験の日程調整に苦労した。また、同一個体を連續して使用できないため、実験ごとに80匹の個体を確保する必要もあり、実験回数を重ねるのも苦労した。しかし、目的とする結果を得るために留まらず、対照実験を繰り返すことで仮説をより確固たるものにしようとする姿勢が見られた。

共喰いにおける「外傷個体」と「飢餓」という2つの要因について、ほぼ予想通りの結果が得られたが、観察をするうちに、共喰い時のシロアリの行動や、外傷のない個体への共喰い行動など、新たな気づきと共に疑問も芽生え、今後の研究テーマの広がりを感じることもできた。研究の難しさと共に楽しさも得られたことと思う。

---

### 3班 ゼラチンを用いた電池の半固体化について

#### Semi-solidification of Batteries Using Gelatin

---

化学分野での課題研究では、テーマ決定が最大の難関となる。2年生から学習し始める化学の知識ではなかなか先行研究の調査ができず、浅いものとなってしまいがちである。3班は当初、スライム（洗濯のり(PVA水溶液)にホウ砂水溶液を加えてゲル化させたもの）に2種の金属板を差し込むことで電池として働くことに興味を持って研究を始めたが、その原理の把握が十分にできず、取り出せる電流値の小ささを改善することができないまま、暗礁に乗り上げてしまった。

そこでスライムにこだわらずに、電池の電解液を半固体化する、という方針に切り替え、ボルタ電池を素材として研究することになった。その際、ゲル化剤の候補としてHMペクチンとゼラチンを取り上げ、比較検討できたことは良かった。結果、ゼラチンの質量と電流値の変化、硫酸濃度と電流値の変化について考察したが、硫酸濃度と電解液の流動性の2つの要因が考えられ、その有意差は判断できなかった。発表直前の追加実験により、ゼラチン量を増やしてよりゲル化させた方が、全体として得られる電流値が低いことが見出され、この研究にまとめができたと思われる。

この1年間の活動を通して、研究を進めていく際には複数の要因を考える必要があり、多面的な視点が必要となることを学ぶ機会にもなったことと思う。そして何か成果を得るために地道な努力と多くの時間が必要であることを経験できた機会として捉え、今後に生かしてもらいたい。

---

### 4班 金属粉末を用いた $\text{NO}_3^-$ 還元の最適化

#### Optimization of $\text{NO}_3^-$ Reduction Using Metal Powder

---

琵琶湖を抱く我々にとって、窒素の循環は、湖沼における富栄養化因子として重要である。溶存態の窒素はその酸化状態の違いによって、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ の形態で存在しており、自然においては硝化と脱窒のサイクルによってバランスが保たれている。しかし、人間が人工的に排出する排気ガスや肥料などの影響により窒素循環が乱れてしまい、中でも  $\text{NO}_3^-$  は水に溶けやすく化学的に安定なため、これを無害化する研究は本邦理化学研究所をはじめ各地で行われていることから、課題研究として非常に意義深いテーマ設定であった。

この研究班は、こうした研究の意義づけをはじめ、文献調査、仮設設定、実験、データ処理、考察、資料作成にいたるまで、メンバーそれぞれが持つ力を出し合うことで、質の高い研究活動を行うことができた。また、大学研究室とのディスカッションを行い外部の知見を取り入れることで、さらに研究レベルを引き上げようとする姿は、頼もしいものであった。それらの努力が結実し、生徒課題研究発表会や京都大学サイエンスフェスティバルなど、外部での発表機会にも恵まれたことは、かけがえのない財産であろう。今後のさらなる活躍を確信し、期待している。

---

## 5班 酸化チタン(IV)の光分解を用いた、水の電気分解の効率化

### Improving the Efficiency of Water Electrolysis Using Photolysis of Titanium Dioxide (IV)

---

近年、環境意識の高まりも相まって注目を集めている酸化チタン(IV)の光触媒作用について研究を行った。当初は粉末状の酸化チタン(IV)を電極に用いた電気分解を計画していたが、電極板として成形することが難しく、また手持ちの実験器具が本研究を進めるうえで適当なのかどうかの検証がうまくいかないなどして、テーマ設定に難航した。しかしその中でも、粘り強く文献調査を続けることで少しづつ方法を改善していき、最終的に実現可能なテーマにまでたどり着いたことは評価できる。

その後の研究では成果を十分にまとめるところまでいけなかったが、研究において新しい実験テーマを設定し実験方法を考案することの難しさや、正確なデータを得るために実験操作に求められる緻密さ、一つ一つのデータを集めるために必要な時間的な労力がどれほどか、を身をもって感じられたことは、今後、大学などの研究活動において大いにプラスになることだろう。この経験をぜひ生かしていってほしい。

本実験についても、試行回数や条件分けが不十分なまま終わってしまったため、本研究の今後の発展にも期待したい。

---

## 6班 障害物が水流に与える影響

### Effect of Obstructions on Water Flow

---

流体に関する実験は、定量的な実験結果を得ることが難しい。「水流」を比較するためにどのような実験をして、何を測定するか。これまでの授業における「実験」では、教師側が条件を設定し、「質量」「距離」など結果が得やすいものを測定し、結果について考察することがほとんどであった。そんな生徒たちが、初めて「測定」することの難しさに直面し、先行研究例や先生方からのアドバイスを基にして、少しづつ研究を進めていったこの1年は、苦労の多いものだったと思う。

まず安定した水流の発生方法が課題であった。研究当初はいかにも高校生らしく、「家庭用流しそうめん機」を改良し、水流を変化させて障害物の影響を調べたが、直線的な水流が得られず、小型ポンプを用いることにした。この頃すでに秋になっており、冷たい水の入った水槽に何度も何度もビー玉を置き、スマートフォンで撮影を続け、ひたすらビー玉の速さを測った。「障害物が水流に与える影響」があるのはわかってきたものの、そのメカニズムの解明にはなかなか至らない。そんな中、身近なソフトであるエクセルを用いてシミュレーションすることを思いつき、比較的単純な条件設定によって実験結果が再現できることに気付いたときには、ようやくこの1年間の研究が少しは形になってきたと安心したのではないだろうか。

協力して実験し、考察し、さらに条件を変えて実験し、また結果について意見を出し合う、そんな作業を何度も何度も繰り返し、やっと1つの結果らしきものにたどり着くことができる。場合によってはたどり着けないこともある。本研究での経験を忘れずに、次の一步を踏み出してほしい。

---

## 7班 有孔ボードの水中移動時の揺動について

### Rocking of the Perforated Board When Moving in Water

---

穴のあいた平板がもつ、水流の乱れを抑制する効果について研究を行った。実際には制御可能な水流の中に平板を置いて実験することができなかつたので、水中で平板を引いて移動させることで水流の代わりとして実験を行い、平板をより速い速度で引いても揺れることなく運動している平板がより水流の乱れを抑制している、として実験及び考察ができた。

平板を引く力を一定にするためにおもりを吊り下げる引く、平板の面積を統一して穴の有無の影響だけを調べる、水槽に比べ十分小さい平板を使うことで水槽の壁面との平板の衝突や壁面での水流の乱れの影響を小さくするなど、安定した結果を得るために様々な工夫を凝らしていた。

考察においては、平板に穴がある場合とない場合の比較、形状の異なる平板同士での比較、そして同じ面積・形状で穴の個数が異なる平板同士の結果の比較を行った。また、同じ速さにおける平板ごとの揺れの大きさの比較も行い、最も水流の乱れを抑制できる平板を探った。

実験の動画を撮影し、その様子を目視で確認することで実験結果を解析したため、解析に時間がかかり、試行回数を十分に取れなかった点は残念である。本研究が生徒らにとって、実験の工夫を多数習得し、また実験データの解析手法やその重要性を学ぶことができる機会となり、学んだ内容を今後の活動に活かしてくれることを期待する。

---

## 8班 回転系における独楽の回転

### Rotation of Spinning Tops in a Rotating System

---

独楽の回転時間に興味を持ち、回す条件を変えながら各種の実験を行った。当初は、独楽の「回転方向と回転時間の相関」を探り、その結果を地球場という『回転系』で働くコリオリの力の影響と関係させて考察することを目的としていた。安定した測定に踏み込むまでに課題が多かった。①コマをどんな場（ステージ）で回転させるのか。②どのようなコマを用いて測定するか。③毎回の測定において、回転を安定させて同じように回すにはどのような装置を用いればよいか。④測定時間を統一させるにはどこの時間を測定するか。など、多くの課題をクリアしてようやく測定に踏み切った。しかし、その結果は、時計回りと反時計回りで回転時間に有意な差が見られず、研究にブレーキがかかった。既知のコリオリの力を算出する公式に実験条件の値を代入すると、その力の大きさが非常に小さいことが分かった。他の手段で有意な差が出ないか検討を重ねたのち、独楽の回転させるステージを電動回転台に乗せることで、コリオリの力を算出する公式に代入する条件を変え、相關関係を探ることとなった。その結果は報告にある通りで、微小ではあるが有意な差異が見られ、その結果に対する考察も加えることができた。

今回の取り組みにおいて、独楽の自転方向と公転方向が逆になる等、発見した面白い観察結果に対する検討や考察が十分に行えていない部分はあるものの、この1年の試行錯誤によって見えてきた研究の難しさや奥深さを今後の活動に活かしてくれる信じている。

---

---

## 9班 石の回転が水切りに及ぼす影響

### The Effect of Rotation of a Stone on Stone Skippings

---

生徒たちも経験のある、水切りという遊びにおいて、石の運動のようすを詳しく分析することをテーマとした。石が回転していることが、水の上を跳ねるために必要な要素と考えられるため、石の回転数を変化させ、跳ねる確率や跳ねた後の飛距離などのデータをとった。回転数が大きくなるほど、跳ねる確率が上がることや跳ねた後の飛距離が伸びることは経験から考えられることであったが、それらの具体的な関係を、数値を用いて示すことができたことは成果として挙げられる。また、石の運動のようすを、スローモーションで撮影したものを観察することで、回転数が大きくなるほど、石の回転軸が安定していること、跳ねた後もその回転が保たれていることが分かり、石がよく跳ね、よく飛ぶ理由を、水面から受ける力という観点から考察することができた。

水切りを実験室で再現するために、石をモーターで回転させながら発射する装置を自作した。可能な限り実際の水切りのやり方に近くなるよう模索しながら作成を行ったことはメンバーにとって良い経験になったと思う。実験室で行えるようにしたため、繰り返しデータをとり、さまざまな観点から石の運動のようすを分析できた。今回の数値が、実際に人が水切りを行った場合と比べてどのようなものであるかということは分からなかったため、今後、物理現象を観察することについて、実際の現象と実験室での再現の差などにも注目していくことを期待する。

---

## 10班 円分多項式の最小性に基づいた一般化

### Generalization of Cyclotomic Polynomials Based on Its Minimality

---

1年を通して悩み続けた課題研究だったと思う。まず悩んだのがテーマ設定である。数論に精通した班員がいたためその生徒を中心に整数論について考え始めたが、なかなか方針が定まらない。そもそも大学数学レベルの話を入り口に研究を始めたため、4人全員が話を理解した上で研究を進めることができ難しかった。また、発表の「視覚化」を意識すると、なおのことテーマが決まらなかった。そのような状況の中で彼らは「円分多項式」というものに興味をもった。この話は、入り口は高校数学でも理解でき、さらにその性質に数学的な美しさがあった。方針が決まり軌道に乗るかと思われた研究だったが再び壁にぶつかることとなる。なかなか研究の発展性が見いだせないのである。そもそも数学という分野の特性上新規の発見をするのは至難の業だ。しかしそのような状況の中でも粘り強く考え方としてできたのが「円分多項式の最小性に基づいた一般化」である。

難しい課題研究であったが、一番良かったのは生徒が徐々に役割をもっていったということである。大学数学に精通している者、英語が堪能な者、リーダーとして班をまとめる者、それぞれ長所がありもちろん短所もあったが、能力を補い合って最後には非常に良いチームワークを発揮することができた。今後もそれぞれが自分の道で活躍してほしいと思う。

最後に、素晴らしい研究に立ち会うことができて感謝しています。ありがとうございました。

---



# 付 錄



# 金属粉末を用いた $\text{NO}_3^-$ 還元の最適化

化学4班 川口友維 吉岡優莉 西村春人 笹沼亮太

## 1. はじめに

私たちは、硝酸イオン(以下 $\text{NO}_3^-$ )による自然水の汚染に着目し研究を行った。各環境問題の限界値をしめす、プラネタリー・バウンダリーを見ると、窒素による環境破壊が危機的な状況にあることがわかる。 $\text{NO}_3^-$ は生活排水や農業排水に豊富に含まれており、この量は人口の増加に伴い今後さらに増加していくと予測されるため、本研究では、 $\text{NO}_3^-$ をより除去の容易なアンモニウムイオン(以下 $\text{NH}_4^+$ )へ還元する既知の方法を改良することを目的とした。

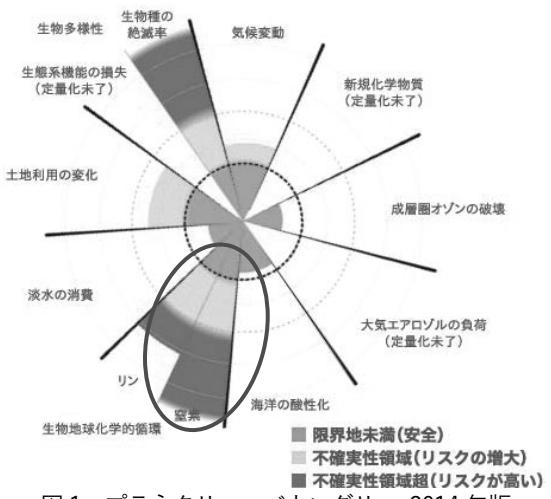


図1. プラネタリー・バウンダリー 2014年版

先行研究では、 $\text{NO}_3^-$ が含まれる水溶液中に、銅を担持した鉄粉(銅が表面に付着した状態の鉄粉)を加えることで、水溶液中の $\text{NO}_3^-$ が $\text{NH}_4^+$ へ還元されることが確認されている。私たちは、鉄粉をよりイオン化傾向の大きい金属粉末に変えることで、銅担持鉄粉を利用するよりも、より短時間に多くの還元反応(以下効率の良い還元反応)をおこせるのではないか、という仮説を立て、次の実験を行った。

## 2. 実験 1-3

### I. 実験方法

以下の手順で実験を3回行った。ただし実験1では薬品の都合上、スズの実験区および、手順⑦の $\text{NH}_4^+$ 濃度の測定は行わなかった。また実験3では、一部の操作を誤り、スズの実験区のデータを得られなかつた。

- ① 先行研究より、鉄粉を4.00 gと、それと物質量が一致するよう亜鉛粉末を4.68 g、マグネシウム粉末を1.74 g、スズ粉末を8.50 g用意した。
- ② それぞれを1 mol/L塩酸に5分間浸し、表面の酸化物を除去した。その後純水で数回表面を洗浄した。
- ③ それぞれを0.75 mol/L硫酸銅(II)水溶液に5分間浸し、表面に銅を担持させた。その後、純水で数回表面を洗浄した。
- ④  $4.00 \times 10^{-2}$  mol/L硝酸ナトリウム水溶液を1000 mL調製し、200 mLずつ5つに分割した。うち4つに手順③で調製した金属粉末をそれぞれ加え、1つを対照実験区とした。
- ⑤ マグネットスターラーを用いて、それぞれを同じ条件下およそ1日攪拌放置した。
- ⑥ ⑤をろ過して得た水溶液の吸光度を、吸光光度計を用いて

計測した。計測した吸光度から、 $\text{NO}_3^-$ 、亜硝酸イオン(以下 $\text{NO}_2^-$ )の濃度を計算した。

- ⑦ インドフェノール青吸光光度法を用いて $\text{NH}_4^+$ の濃度を測定した。



図2. 実験2において、攪拌放置している様子

## II. 結果1

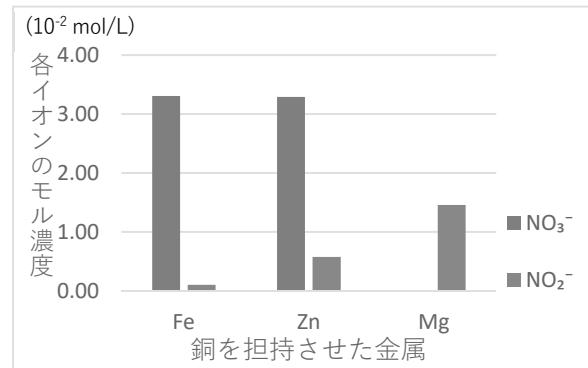


図3. 実験1  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  のモル濃度

表1. 実験1  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  のモル濃度 ( $10^{-2} \text{ mol/L}$ )

銅を担持させた金属	$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_2^-$
Fe	3.31	0.11
Zn	3.29	0.58
Mg	0.003	1.46

## III. 結果2

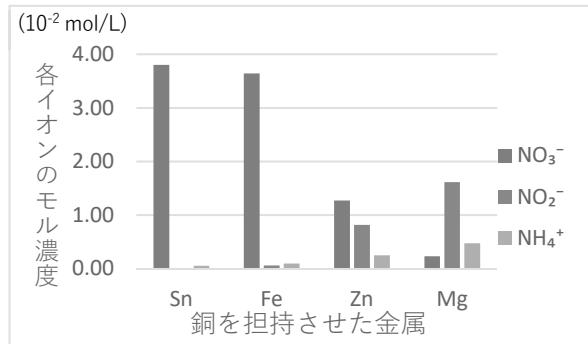


図4. 実験2  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  のモル濃度

表2. 実験2  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  のモル濃度 ( $10^{-2} \text{ mol/L}$ )

銅を担持させた金属	$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_2^-$	$\text{NH}_4^+$
Sn	3.80	0.01	0.05
Fe	3.64	0.06	0.09
Zn	1.27	0.82	0.24
Mg	0.23	1.61	0.47



## 「石の回転が水切りに及ぼす影響」

林駿佑 水谷匡寿 屋鋪樹希 丹羽琴美

### 1. はじめに

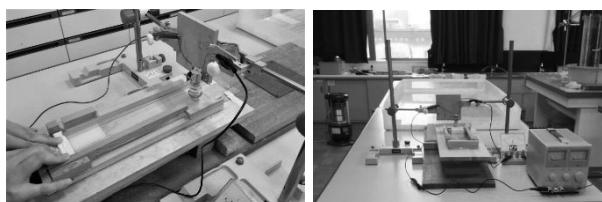
水切りの仕組みや投げ方と跳ねる回数の関係に興味を持ち、過去の課題研究を調べたところ、石を斜面に沿って滑らせる実験を行っていたが、思ったような結果は得られていなかった。そこで、石の回転が水切りにおける重要な要素であると考え、石を回転させながら発射する装置の作成を試みた。

過去の他の研究によって、石が最もよく跳ねるための角度は、石と水面の角度が約20度になるときであり、石の形状は理論上レンズ型や平型が良いとされることがわかっている。しかし、石の回転との具体的な関係性についてはまだわかっていない。

よって本研究は、石の回転が水切りにどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的とする。

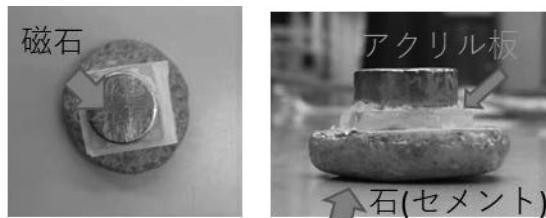
### 2. 実験方法

#### <装置>



写真のような装置を作成した。モーターに磁石を取り付けた石を、ゴムの張られた木の板を引いて手を離すことで押し出す仕組みになっている。

#### <石のモデル> (直径約3cm)



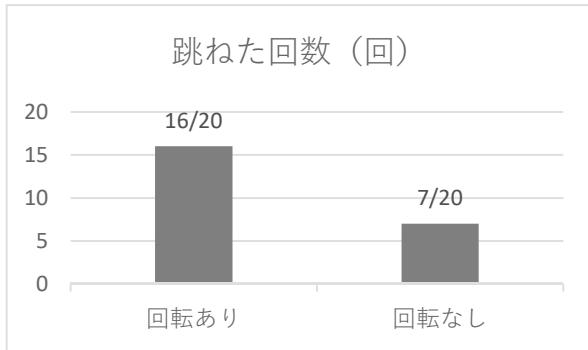
#### <定義>

本研究では、発射された石が一度着水したあと、少しでも水面から離れた状態を石が「跳ねた」と定義する。

#### <実験①>

石を回転させた場合と回転させない場合に分け、それぞれ20回ずつ試行を行い、石が跳ねる割合（20回中何回跳ねたか）（以下、跳ねた回数とする）を測定した。石を回転させる場合、回転数を30回/sとした。またそれの場合においてスローモーション動画の撮影を行った。

#### <結果①> グラフ1

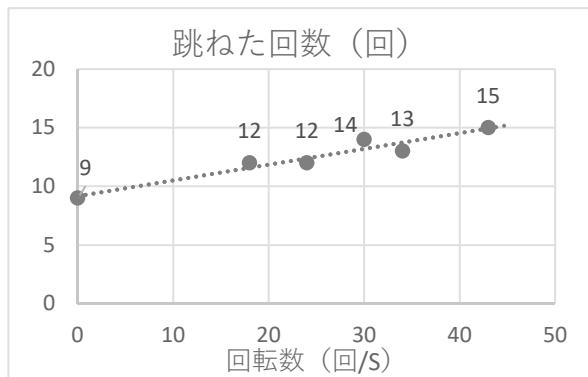


また、スローモーション動画の観察によって回転ありのほうが回転軸が安定することが分かった。

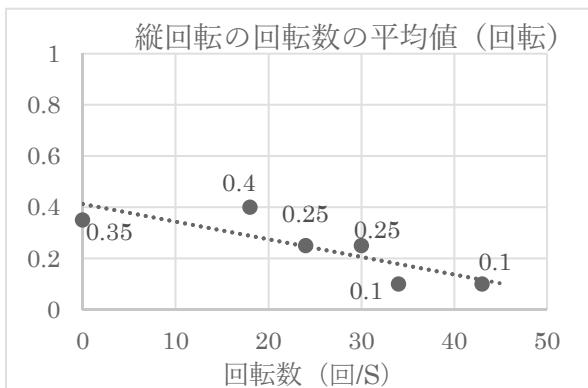
#### <実験②>

石の回転なし、回転あり（回転数18回/s、24回/s、30回/s、34回/s、43回/s）の場合において、それぞれ20回ずつ試行を行い、石が跳ねた回数、石が跳ねた場合の石が最初に着水した位置と次に着水した位置との距離（以下跳ねた後の距離とする。）及び、最初に着水し、次に着水するまでの石の総回転の回数を測定した。

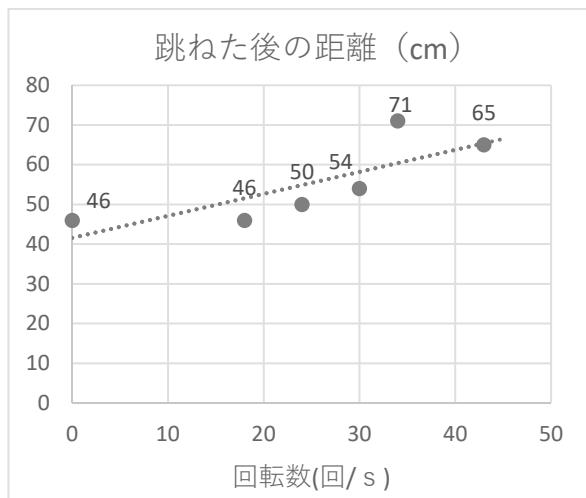
#### <結果②> グラフ2



#### グラフ3



グラフ4



### 3. 実験結果と考察

#### <実験①について>

グラフ1のように、回転させた石のほうが回転させていない石の2倍以上の確率で跳ねるという結果が得られた。

この結果について、回転によって軸が安定し跳ねやすくなっているのではないかと考察した。

#### <実験②について>

##### 【石が跳ねた回数に関する考察】

実験①の結果を受け、石の跳ねる割合と軸の安定の関連性を調べた。

グラフ2から、石の回転数と石が跳ねる割合について一定の関連性があることがわかる。

回転数が上がるほど石の軸の安定性は上がるため、それによって跳ねる割合も上がったと考えられる。

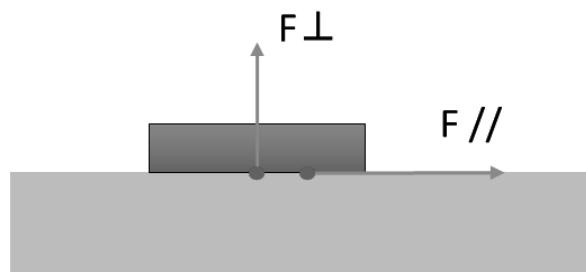
##### 【石の縦回転に関する考察】

水面に当たって跳ね上がった後も縦回転が起こりにくくなっているため、回転数が多いほど、着水後の軌道も安定していることがわかる。

##### 【石が跳ねた後の距離に関する考察】

石が着水した瞬間にはたらく力は、図1における $F_{\perp}$ 、 $F_{//}$ の2つである。（石は図1のような理想的な物体とし、空気抵抗は無視する。さらに、水を摩擦のある水平面と仮定する。）

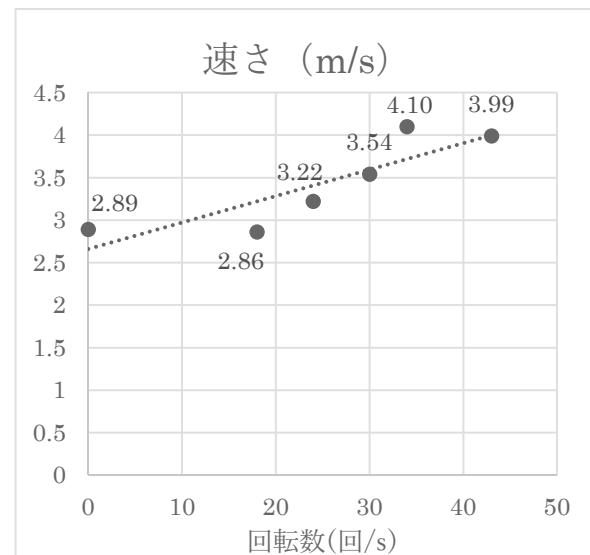
回転数を上げると、跳ねた後の距離が大きくなっているので水が $F_{//}$ によって石に及ぼす影響が小さくなり水平方向の速さの減少率が減ったと考えた。（ $F_{\perp}$ は回転数の変化に依存しないと考えた。）



<図1>（左向きを石が進む方向とする。）

以上の実験を踏まえて、石が跳ねた後の距離に関する考察を示すため、回転数を変え、それぞれの石の水平方向の速さを計測した。

グラフ5



石の初速を算出すると7.99m/sであった。グラフ5より、確かに回転数を上げると水平方向の速さは速くなると考えられる。

### 4. 結論

以上の実験より回転数を上げると、スローモーション動画の観察及び、縦回転の回数の測定により、石の軌道は安定したことが分かった。さらに、跳ねた後の距離及び着水後の石の水平方向の速さの測定により、石が水の影響を受けにくくなったことが分かった。その結果、石が跳ねやすくなったと結論付けた。（水の影響とは、水が $F_{//}$ によって石の水平方向の速さを遅くする、いわばブレーキのような効果のことである。）

### 5. 成果

石の回転が水切りに及ぼす結論にある大きく分けて二つの影響を実際に測定したデータを用いて、示した点がこの研究の最大の成果である。

### 6. 今後の課題・展望

#### <課題・展望>

今回の実験では、装置で石を押し出すときのゴムを手動で伸ばして離していたため、今後は装置の自動化を目指していきたい。また、試行回数を増やし、より信頼性の高いデータを得ることも必要である。

### 7. 参考文献

「Theoretical and Numerical Approach to “Magic Angle” of Stone Skipping」  
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.94.174501>

## 1年普通科探究テーマ一覧

1組	テーマ	5組	テーマ
1班	予告じやんけんによる勝率	1班	色判別能力と状態要因との関係性
2班	テレビ離れの実態	2班	恋愛ドラマ主体から社会派ドラマ主体に変化した理由
3班	ニホントカゲとヒガシニホントカゲの分布とその詳細	3班	コロナ禍でも教室をより速く、より涼しくする方法とは？
4班	食糧としての昆虫食の実用性	4班	紙飛行機における弾道型と飛行型の長距離飛行の条件の違い
5班	きのこの山vsたけのこの里	5班	紙飛行機の折り方と変位・飛行時間の関係
6班	長持ちするシャボン玉を作る方法	6班	じやんけんで一番強い手の出し方
7班	最も頑丈な橋の構造	7班	五味の感じやすさ
8班	花火の着火時間	8班	パンと強力粉の関係性について
2組	テーマ	6組	テーマ
1班	文房具と環境問題	1班	恋愛ドラマと社会の風潮の関係
2班	液垂れする場合としない場合の違い	2班	建築技術を使ったマシュマロチャレンジ
3班	色と記憶力の関係	3班	最もよく飛ぶ竹とんぼとは
4班	視覚と味覚の関係について	4班	琵琶湖の汚染の広がりについて
5班	揺れに強い構造を考える	5班	売れる漫画の大法則
6班	洗濯物の効率的な乾かし方	6班	人間が起きる最適な方法
7班	色の嗜好と年齢、ジェンダーの関係	7班	コロナ禍における日経平均株価の変動について
8班	ペットボトルフリップの成功率を上げるには	8班	エアガン百発百中
3組	テーマ	7組	テーマ
1班	ホットケーキの材料によるふくらみと味の変化について	1班	かざぐるまの羽根の枚数と回転効率の関係性
2班	打ち水の効果を最大限得る方法	2班	黄金比は本当に美しいのか
3班	水溶液の濃度変化に伴う氷の融解速度の変化	3班	世界の幸福度ランキングから見る日本の現状
4班	うちわの材質と風量の関係	4班	環境によって変化する集中力
5班	炭酸飲料の噴出を抑えるには	5班	近年のヒット曲の歌詞の共通点
6班	聞き取りやすさと母音	6班	様々な影響による植物への影響
7班	紙飛行機の発射角度と飛距離の相関関係	7班	琵琶湖の水を本当に止めたらどうなるのか
8班	校則からみる日本と欧米の違い	8班	宗教布教にみられるマーケティング方法について
4組	テーマ	8組	テーマ
1班	音楽のテンポと体感時間の関係	1班	テープによる粘着力の違い
2班	茶柱の立つ確率について、水、スポーツドリンク、紅茶、炭酸水、酢、牛乳の6種類で実験した。	2班	購買意欲を上昇させるために本屋が行う工夫について
3班	パン屋の構造	3班	消しゴムの材料や紙の種類による消しゴムの消しやすさの変化
4班	フードロス削減に向けて	4班	日本における男女の社会進出に関する法導入
5班	色彩認識と記憶量の変化	5班	味の認識
6班	記憶力とそれを取り巻く環境との関係	6班	割れにくいシャボン玉を作ろう
7班	ペットボトルキャップの形状と軌道の関係	7班	無人レジが従業員の方に与える影響について
8班	粘性のある液体の運動の様子	8班	運動と記憶の関係性

# 最も頑丈な橋の構造

滋賀県立膳所高等学校1年 1組 7班



角出結理 川口亜理可 境廣輝 鍋田祐也 西村和哉

## 要旨

橋の構造において、正三角形と長方形を基にした橋を作り、上から力を加えそれぞれの強度を調べたところ、正三角形型がより頑丈だった。さらに、三角形を基にした三種類の橋で調べたところ、これも正三角形型が最も頑丈だった。

## 動機・仮説・目的

橋の構造について、どのようなつくりの橋が最も頑丈か、ということに興味を持った。そこで、「ハウトラスが最も頑丈である」という仮説を立て、どのような構造が最も頑丈であるかを調べることが目的である。

## 研究方法

割り箸を切断・接着し、橋の模型を作った。高さや長さ等、形以外の条件をそろえて設計した。

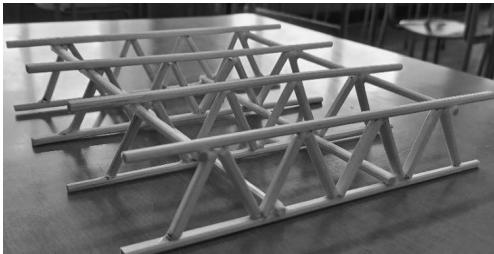
### 実験A

ここでは、①正三角形型と②長方形型のどちらがより頑丈なのかを調べた。辞書や教材を順に積み、崩れるまでの重さを量った。

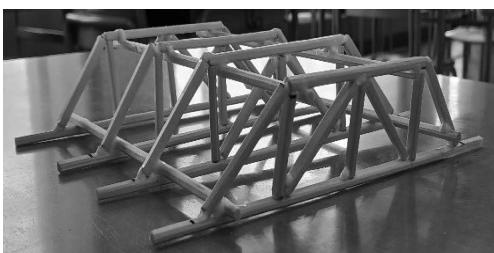
### 実験B

ここでは、三角形を基にした①-(i)正三角形型、①-(ii)ハウトラス、①-(iii)プラットトラスのどれが最も頑丈であるかを調べた。辞書や教材を順に積み、崩れるまでの重さを量った。(実験Aで正三角形型が頑丈だとわかったため。)

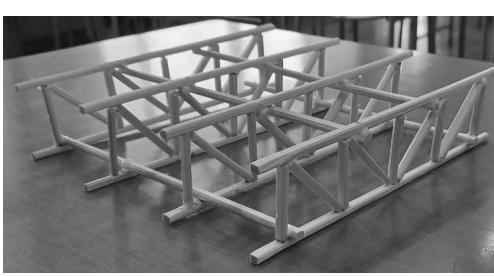
①-( i )  
正三角形型



①-( ii )  
ハウトラス



①-( iii )  
プラットトラス



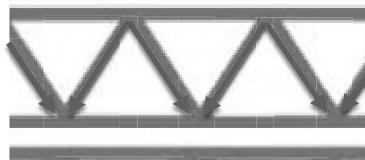
## 結果・考察

【実験 1】…「正三角形」>「長方形」

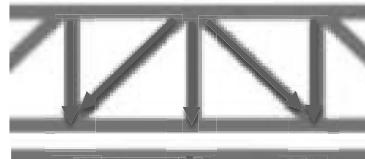
	正三角形型	長方形型
加重(g)	9,026	5,686

【実験 2】…「正三角形」>「ハウトラス」>  
「プラットトラス」

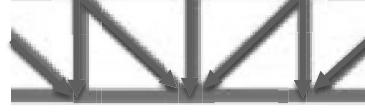
	プラット トラス型	ハウトラス 型	正三角形 型
加重(g)	2,707	4,445	9,026



正三角形型



ハウトラス



プラットトラス



接着部分に隙間ができる。

## 現段階での結論

実験A,Bより、正三角形型がもっとも頑丈であると分かった。実験Aでは、三角形の合同条件より3辺の長さが決まるとき、三角形がひとつに決定するので、正三角形型は変形しにくかったと考えられる。また、正三角形型はほとんどの点に等しく力がかかるため、崩れにくかったと考えられる。

## 課題・展望

実験結果の正確性が曖昧である。

## 参考文献

<http://kentiku-kouzou.jp>

# 揺れに強い構造を考える

滋賀県立膳所高等学校 1年 2組 5班  
多賀大喜 越後航 橋詰湧太 藤田紗弥子 道脇彩乃



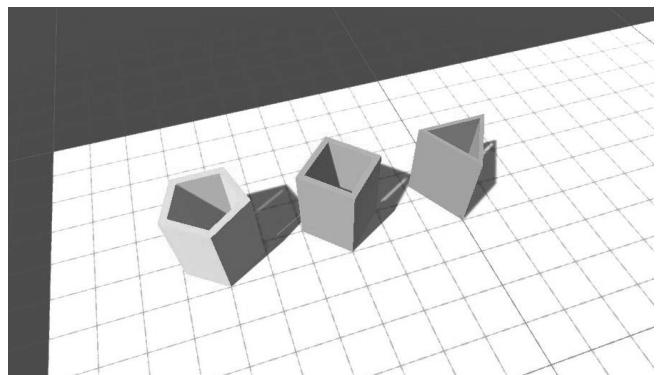
## 要旨

構造物の耐震性とその形状について関心を持ち、実験を行った。  
その結果、正n角柱のnがある程度まで大きくなると、一定に近づくと分かった。

## 動機・目的・仮説

- 様々な本や、インターネットを調べたが、構造物の形と揺れの耐震性の関係性は明示されていなかったので、研究によって明らかにしようと考えた。
- 正n角柱の中では、nが大きいほど耐震性が増すという仮説を立てた。

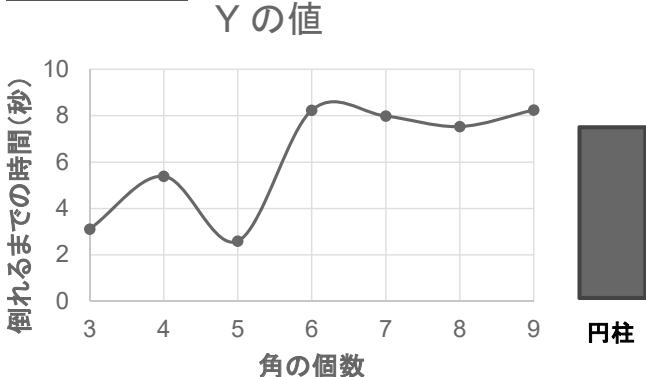
## 研究方法



- 上図のように、正三・四・五・六・七・八・九角柱と円柱を、物理エンジン内の床面を振動させ、倒れるまでにかかった時間を計測する。
- また、振動には、ランダム性を起こす「パーリンノイズ」という要素を導入することにより、実際の地震に条件を似せた。
- 揺れは、縦揺れを想定したものにした。

- 倒れるまでにかかった時間を10回計測して、その平均値を求める。
- (ii):(i)で求めた平均値によって、角の個数との耐震性の関係性を調べる。

## 結果・考察



- グラフより、角の個数に対しての耐震性は比較的早い段階で収束している。
- 正五角柱が正三角柱や正四角柱よりも早く倒れたのは、揺れの周期と特殊に関係性があるのではないか、と考えた。

## 現段階での結論

正n角柱はnの大きさが一定まで大きくなると、ある値に近づく。

## 課題・展望

- 「揺れ」という観点より、揺れによって生じる「衝撃」の観点で研究をすれば、構造物のどの部分が耐久に欠けているのか、複雑な形状の物体においても、考察することができる。
- 正五角柱がなぜ倒れやすかったのか、研究する必要がある。

## 参考文献・使用ソフト

- 物理エンジンソフト「Unity」

## 2年普通科探究テーマ一覧

A1分科会	P1分科会
チョコレートの成分とパウンドケーキの膨らみやすさ	溶けにくい氷を作る方法
マヨネーズを解凍しても分離させない方法	カッテージチーズと温度の関係
粉の成分から生地の膨らみの原因を探る	リンゴの変色とビタミンCの濃度の関係
麺が伸びるのを防ぐ方法	バナナの日焼けについて
pHと腐りやすさとの関係から菌の増殖について探る	チョコを溶けにくくする方法
A2分科会	P2分科会
平衡感覚と外界の影響	恋愛ソングと男女関係の変遷
明順応と視力の関係	新語・流行語と社会情勢の関係性
目覚めをよくする	組分けじゃんけんの掛け声の区分
野球における「流れ」を解明する	日本の同性婚に関する一提案
記憶の出力における区切りの有効性	マンガにおけるジェスチャーとその傾向
A3分科会	P3分科会
湖上交通拠点としての大津城	源氏物語からみる現代との恋愛観の違い
ジェンダー意識の変化とその原因	家庭の古紙回収率を向上させるには
日本と外国の電子マネーの普及の違い	ふるさと納税から見る滋賀県の活性化
どのようなゆるキャラが愛されるのか	災害に対する行政の仕組みから個人が取るべき行動を考える
大型小売店の出店戦略	ごみの分別とリサイクル率の関係
百均の立地と置いている商品の関係から需要の違いを探る	邦楽のクリスマスソングに見る時代の変化
A4分科会	P4分科会
家庭でできる食品ロス対策	自然災害に関する危機探知
多孔質材料と水の浄化	効率の良い換気
琵琶湖の全層循環のメカニズム	クロヤマアリの学習能力
レジ袋を紙袋に取りかえることで起こる問題	バナナの皮の状態による肥料としての効果の違い
防風壁の空隙率・形状が与える空気の軌道への影響	水草による浄化作用
A5分科会	P5分科会
家庭で作れる応急処置に最も適した冷却物	廃チヨークと卵殻の有効利用
周りの条件による輪ゴムの切れやすさ	洗濯機だけでいかに簡単に色移りを防げるか
環境にやさしいマスク	ポケット内の汚れの広がり方
水溶液と濃度による屈折率の変化	チヨークの再生方法
植物の乳液による生体防御の外来昆虫への有効性	洗濯で汚れをとるのに有効な物質
A6分科会	P6分科会
シャープペンシルの耐久性	ウォータークラウンと液体の関係
折れにくく消しやすい消しゴムの条件	こんにゃくと物理的現象
より風力が大きいうちわの形状	滑空に適した傘の形状
各面の面積が異なるサイコロの確率	輪ゴムの耐久性
太陽から熱を集めめる方法	身近な食材のダイラタンシー現象を探る
速く転がる球の条件	
A7分科会	
膳所高校における椅子の倒れる条件	
水の跳ね方を調べる	
風車の羽と回転の関係について	
空気砲で人を飛ばす方法	
ブルーギルに飲み込まれにくい釣り針の検証	
糸電話で音が伝わりやすくなる糸の条件の特定	

# 廃チョークと卵殻の有効利用

## How to use chalk powder and eggshell effectively

2年3組1班 渡辺春和 青山菜桜 岩崎佑也 中田涼葉 横口瑞妃  
Haruka Watanabe Nao Aoyama Yuya Iwasaki Suzuha Nakata Mizuki Higuchi

### 要旨

本研究では、独自のリサイクルチョークの作成とその使用実験を通じ、廃チョークと卵殻はリサイクルチョークとして個人レベルで利用可能かということを検証した。その結果廃チョークは黒板用チョークへの再利用が可能であり、卵殻は単体ではチョークとして成形できないものの廃チョークと混合することでチョークとしての成形が可能になるということが分かった。

キーワード：廃チョーク、卵殻、リサイクルチョーク、再生チョーク、卵殻チョーク、混合チョーク

### 1. 動機・背景・目的

#### 1-1. 動機

持続可能な社会に向けて我々高校生にできることを考えると、身近な廃棄物の排出量を削減することが重要になると感じられる。ここで我々は、毎日廃棄している、粉末状のチョークのごみ（以下、廃チョーク）と卵殻に着目した。企業などではなく個人のレベルでこれらをリサイクルする方法を見出すことでこれらの廃棄量を減らす糸口が見つかることを期待して研究を始めた。

#### 1-2. 背景

廃チョークのリサイクルについては、高校生による再生チョークとしての利用などがみられる[1]。また、卵殻のチョークへのリサイクルについては、企業レベルでは製品化に成功しており[2]、個人レベルでは小麦粉など、廃棄物ではないものを使用し卵殻粉末を「チョークとして成形」（以下、成形）する方法がみられる[3]。ただ、廃チョークと卵殻を合わせてリサイクルチョークを作る方法はみられていない。

#### 1-3. 目的

廃チョークと卵殻は炭酸カルシウムが主成分であり、1-2. 背景で述べた通りチョークへのリサイクルが可能である。我々は、現状の方法をさらに発展させ、工場などを要さない個人レベルかつ小麦粉などを使わないリサイクルチョークの製法を開発することを目的とした。

### 2. 実験 I

#### 2-1. 仮説

1-2. 背景より、卵殻粉末を成形するには卵殻以外の粉末を混合する必要があると考え、廃チョークと卵殻粉末を混ぜると成形が可能と仮説を立てた。

#### 2-2. 方法

独自のリサイクルチョークを4種類作成し、作成したチョークを観察・分析するという方法を取った。

リサイクルチョークは、粉末を水道水（以下水）で練って紙製の筒（ $\phi 1 \times 6\text{h/cm}$ 程度）に詰め、2日間乾燥させて作成した。各チョークの原料の割合は表1の通りである。ただし、廃チョークは学校の黒板消しクリーナーから採取し、卵殻は班員が各家庭で採取・洗浄し、卵殻膜を可能な限り除去して乾燥させたものを家庭用のすりこぎとすり鉢で粉碎して卵殻粉末とした。

表1：実験Iにおける原料の割合（体積比）

	廃チョーク：卵殻粉末	粉末の全量：水
A:再生チョーク	1 : 0	
B:卵殻チョーク	0 : 1	3 : 1
C:混合チョーク①		1 : 1
D:混合チョーク②		4 : 1

#### 2-3. 結果

作成したチョークは以下の図1のようになった。Aについては、黒板を傷つけずに使用可能であった。Bは成形できず、C・Dは卵殻粉末の粒径が大きすぎたために黒板に使用することができなかつた。

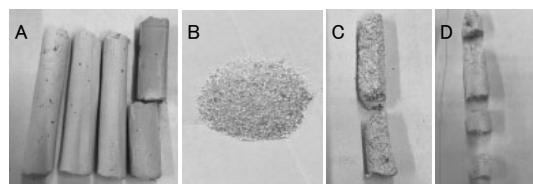


図1：実験Iにおける乾燥後のリサイクルチョーク

#### 2-4. 考察

C・Dが成形できたため、廃棄物と水のみでチョークを作ることができる可能性はあると考えられた。また、卵殻粉末を微細にすれば黒板にも使用可能になると考えた。

### 3. 実験Ⅱ

#### 3-1. 仮説

実験Ⅰを踏まえ、卵殻粉末をより微細にすれば、黒板に使用できる混合チョークを作ることができると考えた。また、卵殻粉末を微細にしても卵殻のみでは成形できないとも考えた。

#### 3-2. 前実験

本実験を行う前に前実験を行い、卵殻のみで成形は不可能という仮説を確かめることにした。

##### 3-2-1. 方法

実験Ⅰと同様の方法で採取・処理した卵殻を、より微細な卵殻粉末を得るために家庭用のスティックミキサーを用いて粉碎し、さらに家庭用の茶漉しで漉した。実験Ⅱにおいてこれを卵殻粉末と呼ぶ。これを用いて実験Ⅰと同様の方法で作成を行った。ただし粉末と水の割合は3:1とし、乾燥は5日間行った。

##### 3-2-2. 結果

ほとんど粉末のままで、やや固まった部分もすぐに崩れた。よって検証した仮説は立証されたと言える。

#### 3-3. 本実験

##### 3-3-1. 方法

前実験と同様の方法を用い、表2の設定で作成した。

表2：実験Ⅱにおける原料の割合（体積比）

	卵殻粉末：廃チョーク
A：再生チョーク	0 : 1
B：混合チョーク①（卵殻多め）	2 : 1
C：混合チョーク②（同量）	1 : 1
D：混合チョーク③（チョーク多め）	1 : 2

##### 3-3-2. 結果

失敗が2点発生した。まず、気温が低かったためか乾燥が実験Ⅰのように進まず、次に紙筒に使用した紙が実験Ⅰよりも薄く丈夫でないものだったためチョーク表面に紙が張り付いてしまった。

作成したチョークは図2のようになった。卵殻を含むB～Dは黒板を傷つけてしまう品質だった。ただ、C・Dは他と違つて割れることなく綺麗に成形できた。

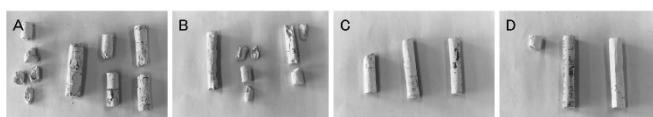


図2：実験Ⅱの乾燥後のリサイクルチョーク

##### 3-3-3. 考察

卵殻が粉末の半量以下ならば、混合チョークは成形可能であった。混合チョークを黒板に傷をつけない品質にすることは個人レベルでは難しいものの、路上用のチョークなどへの利用は可能と考えた。

### 4. 実験Ⅲ

#### 4-1. 目的

再生チョークは黒板を傷つけないが、日常的に使用できるかは不明なので、それを検証するために行った。

#### 4-2. 方法

教師3人と高2生徒22人の計25人を被験者とし、以下の手順で実験を行った。

- ①まず通常チョーク、次に実験Ⅰで作成した再生チョークの順で、黒板に「チョーク」と書いてもらう
- ②リサイクルチョークを以下の（ア）～（ウ）で評価

（ア）通常チョークとの書き味の違いが分からない  
（イ）通常チョークとの書き味の違いが分かり、より良く感じる  
（ウ）通常チョークとの書き味の違いが分かり、より悪く感じる  
※ただし、書き味に色は含まない

- ③感想を記述

#### 4-3. 結果

4-2.方法②の結果は図3の通りで、教師3人は全員別の回答であった。

感想には、「軽さ」「持ちやすさ」「自分の筆圧にとっての書きやすさ」「書き味のなめらかさ」「折れやすそうかどうか」などについて、それぞれ高評価と低評価の両方がみられた。

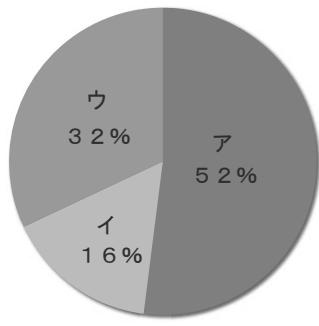


図3：再生チョークの評価の割合

#### 4-4. 考察

正反対の感想が多く見られたことは人により好みが違うことを意味すると考えたが、これは再生チョーク固有の問題ではない。これにア+イの割合は7割近くになることを合わせて、再生チョークは日常的に使用可能となる可能性が高いと考察した。また、持ちやすさへの低評価や実験Ⅱの失敗などは、乾燥容器の改良で対処できると考えられ、今後さらに実用性を向上させる余地が十分にあると思われる。

### 5. 今後の展望

今回の成果は、廃棄物を最大限活用する新たなリサイクル方法として発展できる可能性を秘めている。特に再生チョークは学校生活で使用可能と思われる所以、今後、「着色方法」や「より良い作成方法」、更には「廃チョークの廃棄量調査に基づく再生チョークの価値」などについての研究が行われることで、チョークを循環させるシステムの開発につなげられるのではないだろうか。

## 6. 参考文献

- [1]愛知県立刈谷高等学校 2016 「何度でも再生チョーク」 (最終閲覧日 2022.3.7)  
<http://www.kariya-h.aichi-c.ed.jp/school/ssh/ssh2/image/H281021-4.pdf>
- [2]日本白墨工業株式会社 ホームページ「グラウンド用品」 (最終閲覧日 2022.3.7)  
<https://www.tenjin-chalk.co.jp/chalk.html>
- [3]mamatasy 「捨ててたものでおもちゃが作れる！卵の殻で手作りチョークを作ろう♪」 (最終閲覧日 2022.3.7) <https://www.mamatasy.net/mag/2743/>

## 7. 謝辞

以下の先生方には、本研究の研究発表会の際にアドバイスをいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

京都大学大学院 薬学研究科 南條 肇 先生

京都大学大学院 地球環境学堂 雪岡 聖 先生

# 傘の大きさ・質量と降下速度の関係の研究

## Relationship among umbrella size / mass and decent speed

2年7組 北島 隼 奥村 亮友 石倉優衣 野田有紗 三ヶ尻真歩

### 要旨

私たちは日常的に使う雨傘を用いて滑空したいと考えた。そこで、落下傘をモデルとして、落とす高さなど諸条件を可能な限り固定し、表面積と質量に注目してそれぞれを変える2つの実験を行った。結果、それらの関係の定量化に成功した。

キーワード：落下傘、降下速度、表面積、質量

### 1. はじめに

私は、雨傘を差しているときに強風にあおられると、傘に引っ張られるような感覚を経験したことがあります。雨傘で滑空することに興味を持った。そこで、降下速度を6m/sに抑えて人が安全に滑空できる雨傘の条件を実験によって調べて、定量化することを試みた。今回の実験では、気温や湿度、気圧などの影響は無視できるものとした。また、落下傘は降下開始後すぐに終端速度に達したものとした。

### 2. 仮説

先行研究から以下の二つの仮説を立てた。

$$\text{①} \text{ 降下速度(m/s)} \propto \sqrt{\frac{1}{\text{表面積(m}^2\text{)}}}$$

$$\text{②} \text{ 降下速度(m/s)} \propto \text{質量(kg)}$$

- 手縫い糸(素材綿100% 太さ0.6mm)
- 油粘土
- ストップウォッチ

### 3. 3 方法

正八角形(半径2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20cm)に切り取ったポリエチレンの落下傘に、手縫い糸で10gの油粘土を吊り下げた(図1, 2)。この時、半径と糸の長



さの比が1:3となるようにした。この落下傘を2.5mの高さから落とし、降下にかかった時間をストップウォッチで計測した。これを20回繰り返した。

### 3. 実験①

#### 3. 1 目的

落下傘の面積の大きさと降下速度の関係を調べる。

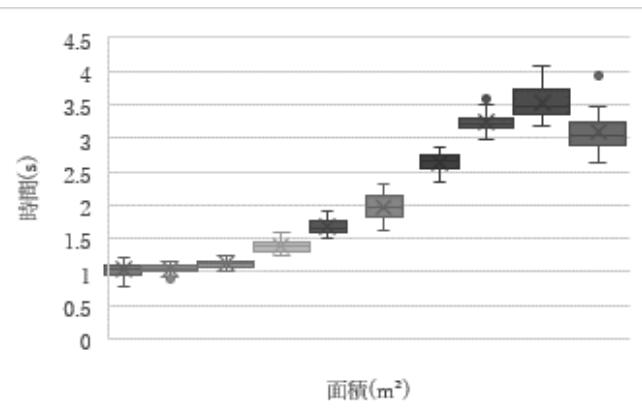
#### 3. 2 準備物

- ポリエチレンシート(厚さ0.06mm)

図1(左)：半径と糸の長さ 図2(右)：使用した落下傘

### 3. 4 結果

結果は次のようにになった。



グラフ 1：表面積と効果にかかった時間の関係

#### 4. 実験②

##### 4. 1 目的

落下傘全体の質量と降下速度の関係を調べる。

##### 4. 2 準備物

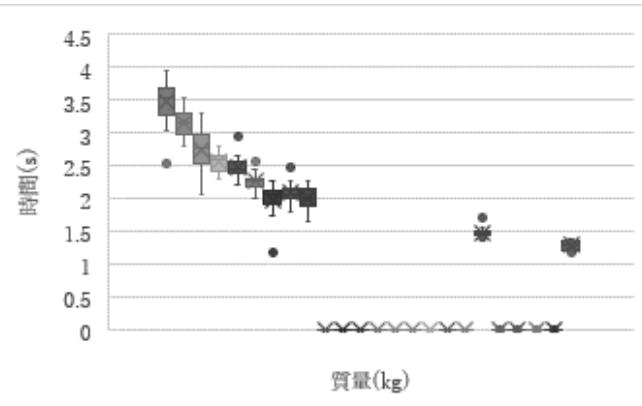
- ・ポリエチレンシート(厚さ 0.06mm)
- ・手縫い糸(素材綿 100% 太さ 0.6mm)
- ・油粘土
- ・トップウォッチ

##### 4. 3 方法

面積が 0.0648m<sup>2</sup>の正八角形のポリエチレンの落下傘に質量が 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21g の油粘土を手縫い糸で吊り下げて、2.5m の高さから落とし、降下にかかった時間を計測した。これを 20 回繰り返した。

##### 4. 4 結果

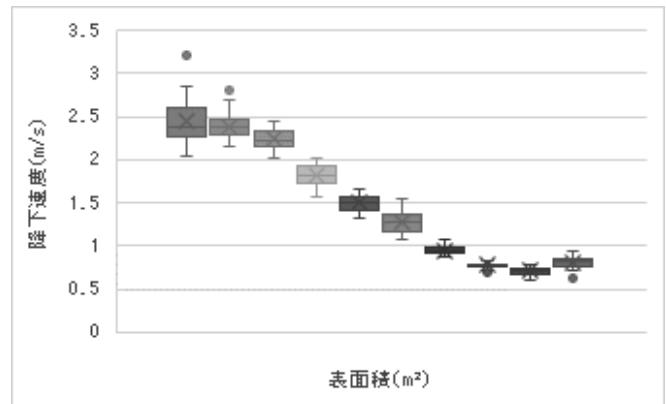
結果は次のようなになった。ただし、後日考察のために 40g と 50g の油粘土を吊り下げる追加の実験を行った。



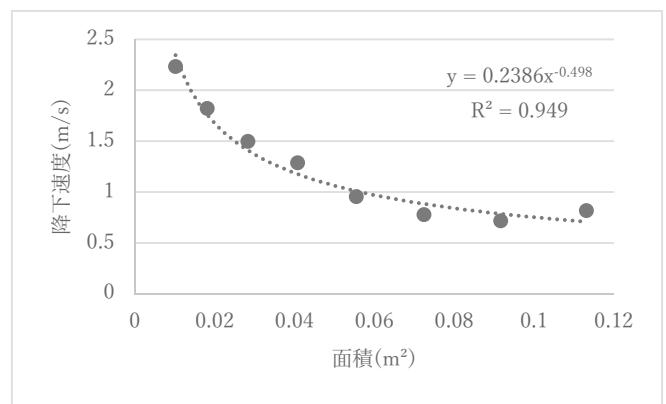
グラフ 2：質量と降下にかかった時間の関係

#### 5. 考察①

実験①の結果をもとに、縦軸を速さに変えたグラフを作成した。



グラフ 3：表面積と降下速度の関係



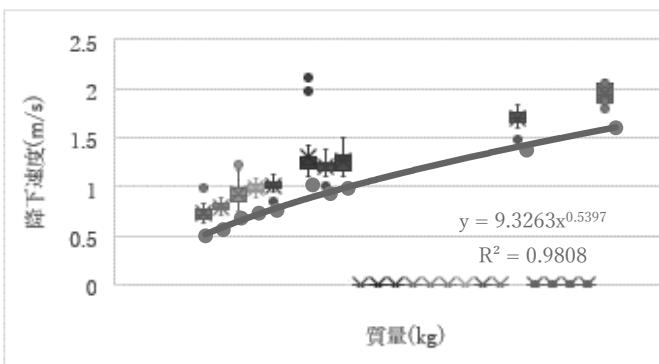
グラフ 4：近似曲線

グラフ 1 より面積がつるす物体の質量に対して大きすぎる場合、降下速度の減衰が小さくなってしまうことが分かった。また、グラフ 4 より、

$$\text{降下速度}(\text{m/s}) \propto \sqrt{\frac{1}{\text{表面積}(\text{m}^2)}} \text{ であることが分かった。}$$

#### 6. 考察②

実験②の結果をもとに、縦軸を速さに変えたグラフを作成した。



(<https://www.city.funabashi.lg.jp> > fil > chapter5  
2022.1.19)

・パラシュートの抵抗係数 | やまめ工房の日記 2010+  
 $\alpha$  - Ameba

(<https://ameblo.jp/yamamecoubou> > entry-10973276649 2022.1.19)

・飛ぶ ユーザーマニュアル  
([https://rikonet.com/contents/cp0020a/manual/index\\_3\\_s\\_02\\_2.html](https://rikonet.com/contents/cp0020a/manual/index_3_s_02_2.html) 2022.1.19)

グラフ 5：質量と降下速度の関係及び近似曲線

グラフ 2 より、吊るす物体の質量が軽すぎると、落下傘が不安定になることが分かった。また、グラフ 5 より

降下速度  $\propto \sqrt{\text{質量}}$  であることが分かった。

## 7. 結論

以上のことから降下速度と質量と表面積の関係は以下の通りである。

$$\text{降下速度(m/s)} = 2.305 \sqrt{\frac{\text{質量(kg)}}{\text{表面積(m}^2\text{)}}}$$

## 8. 今後の展望

- ・降下の安定化に向けて、落下傘に通気口を開ける実験を行う。
- ・実証実験を行う。

## 9. 参考文献

- ・気象～空気密度・動粘性-高精度計算サイト - Keisan  
(<https://keisan.casio.jp/exec/user/1474348018> 2021.7.12)
- ・空気抵抗のある自由落下運動の例  
(<https://kem3.com/esrp/lecture/Mech/Airfriction/airfriction.html> 2021.5.12)
- ・第 5 章 中学生・高校生調査の結果 - 船橋市

# ホソウリゴケによる水溶液のpHの調整



滋賀県立膳所高等学校 1年9組 探究S生物班

上坂太駆 小峠拓海 竹田京美 鶴薙優月 永里姫伽 仲宗根真生



## 要旨

ホソウリゴケのアルカリと酸に対するpHの調整能力を調査した結果、アルカリに対しては調整能力が認められた。

## 動機

- ・現在、酸性雨などによる水質汚染が問題になっている。
- ・そこで、身近な植物であるコケ植物に着目し、水のpHを中性に近づける働きがあるのか調べることにした。

## 目的

- ・ホソウリゴケが、水溶液のpHが中性に近づくように調整する能力を持つのか調べる。

## 仮説

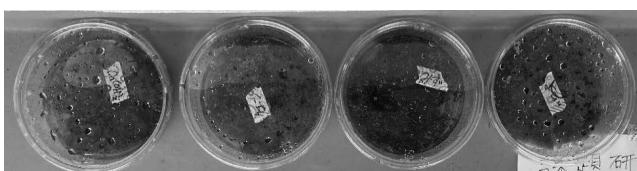
- ・先行研究より、コケ植物は鉛などの重金属イオンを吸着することが知られている。
- ・そのため、同様に水素イオン又は水酸化物イオンも吸着するのではないかと考えた。

## 研究方法

- ・以下の条件で実験・調査を行った。

### [実験区]

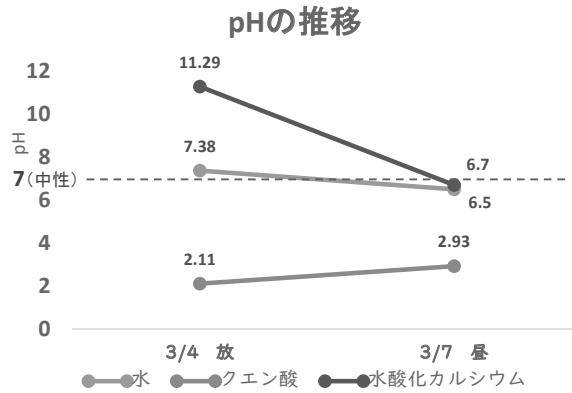
- ・クエン酸水溶液 0.16質量%
- ・水酸化カルシウム水溶液 18.30質量%
- ・水  
(いずれも80.5g)
- ・写真のようにプラスチックの容器に採取したホソウリゴケを50.0g入れ、上記の水溶液を加えた。
- ・3日間（3月4日放課後15:30～7日昼12:30）本校ベランダに置き、観察した。
- ・実験開始時と終了時にpH計で水溶液のpHを測定した。



実験の様子

## 結果・考察

- ・結果は以下の図の通りである。



クエン酸区・水酸化カルシウム区とともにpHの値が中性に近づいた。

- ・クエン酸区のコケでは変色があり、異臭が確認された。（下画像参照）



## 結論

- ・pHの値の変化より、コケにはアルカリ性から中性への調整能力があると考えられる。
- ・一方コケの状態から酸性から中性への調整能力があるとは本実験からは断定できない。

## 課題・今後の展望

- ・調査母数が少なく実験期間も十分ではない。
- ・コケ内部の水分などを考慮すると、厳密に条件が揃っていたとは言えない。
- ・クエン酸区では腐敗などの可能性がある。

## 参考文献

- ・北川尚史,2017年,「コケの生物学」,研成社
- ・大石善隆,2019年,「じっくり観察 特徴がわかるコケ図鑑」,ナツメ社
- ・野村俊尚ら,2014年,「植物の生物機能を用いた金属回収技術」
- ・秋山弘之,2004年,「苔の話」,中央公論新社

# pHがアカハライモリの体表面のTTXに及ぼす影響



滋賀県立膳所高等学校1年 9組 2班

岡柚月 小上馬良浩 柴田怜音 田中優菜 中山温人 山中俊輝

## 要旨

アカハライモリを2グループに分け、中性とアルカリ性の環境下で数日間飼育した結果、どちらのグループからもテトロドトキシンが検出されなかった。

## 動機・仮説

アカハライモリは外敵から身を守るために体表面に猛毒のテトロドトキシン（以下TTX）を有している。しかしTTXはアルカリによってすぐに分解される。彼らは農業用水の水路などに主に生息しているが、アルカリ性の農業肥料を用いて水をアルカリ性にし、その水により体表面のTTXが分解されることはないのだろうか？また、アカハライモリは外界のpHを感じて、自身のTTXの量を調節する機能を持つのだろうか？と疑問に思い、実験を行った。

## 結果・考察

中性の実験区のアカハライモリからもアルカリ性の実験区のアカハライモリからもTTXが検出されなかった。

このことから、

- 天敵の少ない冬の間、アカハライモリは毒腺を塞いで毒の分泌を止めていた。
- 毒を分泌するために特定の物質を摂取し続ける必要があり、水替えなどの影響でそれができなくなった（元々体表面に付着していたTTXは水に流れてしまった）。

などの可能性が考えられる。

## 研究方法

- アカハライモリを12匹用意し、綿棒を用いて体表面をこすり、TTXを採取する。
- ①の綿棒を1%酢酸溶液に浸けて保存しTTX量を調べる。
- 中性に整えた飼育装置と、有機石灰( $\text{CaCO}_3$ )を加えpHを8以上に調整した飼育装置を用意し、それぞれ6匹ずつアカハライモリを投入する。
- ③の環境で10日間(2/22~3/4)アカハライモリを飼育し、再度体表面からTTXを採取してTTX量を調べる。

※検体は1月に採取した。

※TTXのサンプルを京都大学にて、定量した。



## 結論

実験に使用したアカハライモリからTTXは検出されなかった。

## 今後の展望(と課題)

実験期間中5匹のアカハライモリが飼育装置から脱走したため、次回はリスク管理を徹底し、個体数をさらに増やして実験したい。

また、考察から時期や環境が作用した可能性が考えられるため、さらなる実験からその真偽を確かめたい。

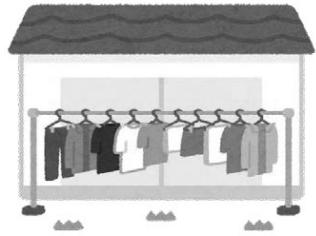
## 参考文献

<http://hdl.handle.net/10097/00122787>

## 謝辞

本研究を行うにあたって膳所高等学校の生物担当の先生方、及び京都大学農学部応用生命学科の方々にご協力いただきました。心より感謝申し上げます。

# 風速の観点で見た、気象条件と洗濯物の乾き方の関係



滋賀県立膳所高等学校1年 9組 3班

須山景哉 蟹谷唯斗 渡邊慶一 赤瀬川咲紀 岸川茉央

## 要旨

風速と洗濯物の乾きの関係について実験した結果、風速を上げるにつれて、洗濯物は一定の割合でよく乾くようになることがわかった。

## 動機・目的・仮説

洗濯指数というものがある。この指標は各気象条件から洗濯物の乾きやすさを数値化したものだが、この条件の中で風が及ぼす影響については、いまいち掴みにくいと感じた。

そこで、洗濯物の乾きやすさの点で風との関係に興味を持った。

洗濯物周辺に存在する湿った空気が風によって飛ばされるので、風があるほうが洗濯物が乾きやすいことは既に分かっている。しかし、風速と洗濯物の乾きやすさの関係の詳しい数値関係はあまり文献などにおいても見つけられなかった。

私たちは風速が速くなるほど洗濯物が速く乾き、その関係性はおよそ比例関係にあるという仮説を立てた。

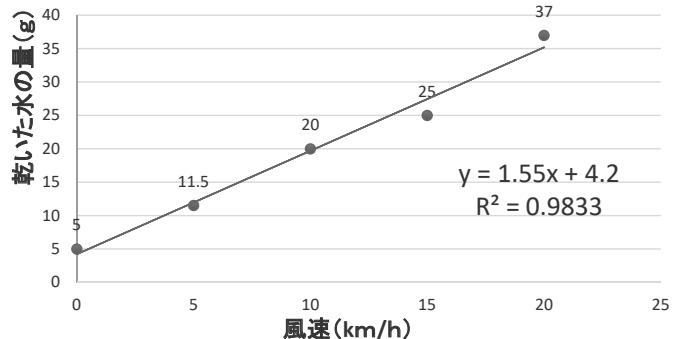
## 研究方法

洗濯物として20cm × 30cmで30gの雑巾を使い、水に濡らす。そこに風をあて、風速を変えていくことで乾き具合を調べた。

雑巾には最初100gの水を含ませ、130gとし、30分後の重さをはかりで計測した。検証後の雑巾の重さを130gから差し引き、出た値を乾いた水の量と定義する。

風は、各教室にある、サーチュレーターを用いて、人工的に風を起こし、風速計で測定した。実験時の室温は18°C、湿度は32%であった。なお、一般的な風速の値は、m/sが使われるが、便宜上、km/hで行う。風速は0km/h・5km/h・10km/h・15km/h・20km/hの五段階とし、それぞれ二回ずつ測定し、平均値をとる。

## 風速と乾いた水の量の関係



## 結果

相関係数( $R^2$ )の値が1にかなり近いので、非常に高い精度で風速が大きくなるほど乾く水の量が増え、その割合は一定である。

## 考察

水分子は、摩擦力によって、纖維にからまっている。風によって、その摩擦力を超える力が伝わることで、水分子が飛ばされる。風が強くなればなるほど、水分子が飛ばされるところが多くなり、よく乾いたと考えられる。

## 今後の展望と課題

- ・本来は、もっと様々な条件から洗濯物の乾きについて調べる予定だったので、ほかにも、気温、湿度、日射量などの条件との関係性を調べたい。
- ・もっと試行回数を増やしたい。
- ・別の材質でも成り立つか調べたい。

## 参考文献

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/senshoshi/58/10/58\\_802/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/senshoshi/58/10/58_802/_article/-char/ja/)



# QRコードを用いた出席記録の自動化・効率化

滋賀県立膳所高等学校1年 9組 4班

音居 大河 小島 康平 高塚 日和 田中 瑛太  
寺田 聰 藤田 仁菜 安井 真央



## 要約

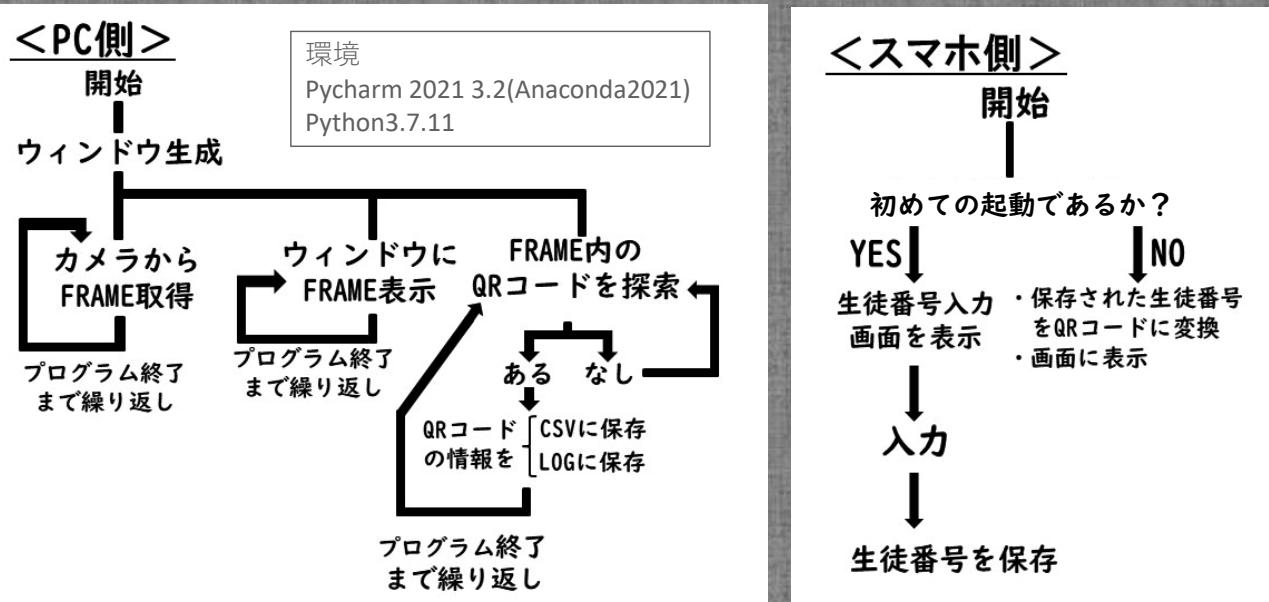
個人のスマートフォンに割り当てられたQRコードの読み取りによって、出席記録の効率化、自動化を行った。

## 動機

授業の始めに出席簿を記録するのが手間がかかる、先生の入れ違いによって出席簿が渡されなかつたために記録されなかつた、という声があり、出席記録を自動で記録するシステムに対して需要があると考えた。

## 目的

出席記録の自動化を行うことで、先生の負担を減らす。  
自動化を行うことで、出席記録の間違い(人違い・記録忘れ)などをなくす。



## 結果

QRコードを個人のスマートフォンに割り当て、パソコンで読み取ることで、出席状況を記録することができた。

## 今後の展望

現在のシステムでは、iPhone機種にしか対応できておらず、Android機種への対応が必要である。また、実用化のため出席記録を表にして自動でプリントアウトし、出席簿として使用できるようにしたい。ほかにも、QRコードを読み取りやすいように画面を明るくする機能を搭載したい。また、Bluetoothなどをを利用して、不正対策の機能を追加したい。

## 参考文献

- <https://qiita.com/hoshiume11/items/0f496fe80df84875c132>
- <https://qiita.com/TakaKun/items/c3ba4b00c2590548f383>
- <https://capibara1969.com/2531/>
- <https://qiita.com/SatoshiGachiFujimoto/items/94da93f88578b87f6a89>

# コイルの形状による抵抗値の変化

滋賀県立膳所高等学校1年 9組 5班



山田海聖 中西聖 中村燎 福山心結 佐藤葵 小早川恵琉

## 《要旨》

以前の研究の実験においてコイルの形状の変化が抵抗値の変化に影響を及ぼすことが分かった。

## 《動機》

同じ素材同じ太さのニクロム線コイルに電圧をえたとき、コイルを直線状にしたときと円状にしたときで流れる電流の値が変化することに気がついた。また、コイルを円状にしたときにコイルの半径が変化するとコイルの抵抗値が変化することに気づき、興味を持った。

## 《仮説》

- ・どのような半径のニクロム線コイルにおいてもコイルを円状にしたときのほうが抵抗値が大きい。
- ・ニクロム線コイルを円状にしたとき、コイルの半径が小さいほど抵抗値が大きい。

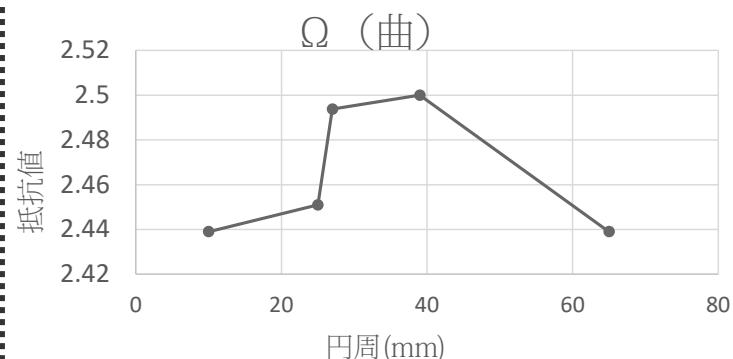
## 《準備物》

- ・電源(AC10V)
- ・ニクロム線 (40cm)
- ・電流計
- ・電圧計

## 《操作》

半径の違うニクロム線コイルで直線状、円状のものを作り、そこに電圧を加えることで流れる電流を計測する。

円周	電流(曲)	電流(直)	抵抗 (曲)	抵抗 (直)	曲/直
10mm	4.1	4.1	2.439024	2.439024	1
25mm	4.08	4.03	2.45098	2.48139	1.0124
27mm	4.01	4	2.493766	2.5	1.0025
39mm	4	3.95	2.5	2.531646	1.0127
65mm	4.1	4	2.439024	2.5	1.025



## 《結果・考察》

- ・どのような半径のニクロム線コイルにおいてもコイルを円状にした方がコイルを直線状にしたときより抵抗値が小さい。
- ・ニクロム線コイルを円状(曲)にしたとき、円周が大きいほどコイルを直線状から円状にしたときの電気抵抗の変化が大きい。
- ・コイルを円状(曲)にした時、コイルの半径が大きいほど抵抗が大きい。

## 《結論》

導線がニクロムのときは、コイルを円状にしたときの方が直線状のときより抵抗値が小さい。

## 《現状》

- ・コイルの形状の変化が抵抗値に影響することは確認できたが、なぜそのような現象が起きるのかは解明できていない。
- ・コイルの素材をニクロムに限定しているため、他の素材について先述の関係が存在するかについては確認できていない。

## 《今後の展望》

- ・ニクロム線コイルの半径のレパートリーを増やす。
- ・コイルにする導線の素材を変化させても同じ結果がえられるのかを確かめる。

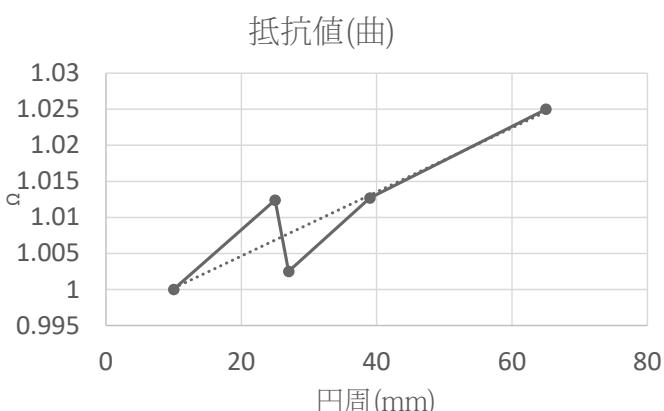
## 《参考文献》

電気学会雑誌 UDC 621. 365. 54

誘導加熱

正員 百田 恒夫 正員 北村 寛一

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejjournal1888/75/800/75\\_800\\_526/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejjournal1888/75/800/75_800_526/_pdf/-char/ja)



# ボタンの縫い方による強度の違い

滋賀県立膳所高等学校1年 9組 6班

羽賀 匠海 南祇 圭佑 川村 友洋 伊藤 慶幸 野澤 彰範



## 要旨

ボタンの縫い方においてかかる力に対して垂直方向に縫った場合と平行方向に縫った場合では糸を一本通した場合は平行の方が強度が高く、二本ではあまり差がなかった。

## 動機・目的・仮説

家庭科の授業でボタンをつける機会があり、その際にボタンの縫い方に様々なものがあると知った。また、ボタンはよくとれるなど学生にも身近な問題の原因になっている。そこで取れにくさを追求したボタンの縫い方の実現を最終目標に、既存のボタンの縫い方の強度を調べることを本研究の目的とした。

今回の実験では、縫い目を引っ張る力の方向に対して垂直にした場合と平行にした場合の2通りの実験を行った。今回、私たちは垂直方向に縫った場合のほうが強度が高いという仮説のもと本実験を行った。

## 研究方法

### 実験1

2枚の布を重ね、そこにボタンを縫い付け、その片方の布におもりをつけ、ボタンが外れるまでおもりの重さを増やしていく、ボタンが外れる重さを計測した。このとき、玉結びや玉止めが外れたり、糸が切れたことを「ボタンが外れた」とし、おもりは100グラムごとに増やした。また、おもりは10秒間つるした。

この条件下で、ボタンに一度糸を通して、布を引く方向に対して、垂直方向に縫い付けた場合と平行方向に縫い付けた場合の2通りを実験し、その結果を比べた。

### 実験2

実験1と同様の条件でボタンに2度糸を通して実験を行った



## 結果

※結果の重さはボタンが耐えた最大の重さである。

### 実験1

1本垂直		1本平行	
回数(回)	重さ(g)	回数(回)	重さ(g)
1	500	1	900
2	200	2	1300
3	100	3	1300
4	800	4	600
平均値	400	平均値	1025
中央値	350	中央値	1100

1本の場合、平均値・中央値のどちらを比べても明らかに平行の場合の方が強度が高い。

### 実験2

2本垂直		2本平行	
回数(回)	重さ(g)	回数(回)	重さ(g)
1	2200	1	1800
2	1600	2	1700
3	1600	3	2300
4	2500	4	1700
平均値	1975	平均値	1875
中央値	1900	中央値	1750

2本の場合、平均値と中央値のどちらを比べてもあまり差は見られなかった。

垂直も平行も1本よりも2本で縫ったものの方が強度が強いことが分かった。また、1本では垂直より平行の方が強かったが、2本では横と縦であり差がなかった。

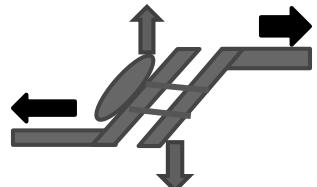
## 考察

実験1について、引っ張る方向におもり側（引っ張る方向に対して垂直）に対して垂直の場合の実験中の様子を比較すると、平行の場合（ボタンが浮き上がっていた（右図））。これにより、上方向と下方に向かって力が分散されていたため垂直よりも平行のほうがより強度が高くなったと考えられる。



おもり側（引っ張る方向に対して平行）

実験2については、垂直の場合も平行の場合も一本の平行の場合の図のようになるので、強度は同じくらいになった。



## 今後の展望

- 実験の回数を増やす
- 玉止めや玉結びの違いを統一し精度を上げる
- 重さを細分化しより細かいデータをとる

## 参考文献

特になし

# オイラらの*chou*多面体定理

7班 数学 塩貝晃司 嶋田洸三 田崎奏楽 中村俊貴 山口健登



## 動機

入浴中にオイラーの多面体定理を拡張したものが4次元において成り立つことを発見し、n次元におけるオイラーの多面体定理と同様の定理があるのか興味を持った。

## 要約

3次元空間において成り立つオイラーの多面体定理から、n次元空間において同様に成り立つ公式を仮定し、証明した。

## 定義

m次元超多面体: m-1次元超空間で表せない超多面体。m=2のときは多角形、m=3のときは多面体。穴の個数(種数)と空洞の個数は0とする。

$f_m(n)$ : m次元超多面体のn次元面(n次元の要素)の個数。

m次元単体: m-1次元の超平面にすべて同時に含まれることのないようなm+1個の点からなる集合の、それを含む最小の凸集合。m=1のときは線分、m=2のときは三角形、m=3のときは四面体。m=0のときは点を例外的に表す。

## オイラらの*chou*多面体定理

$$\chi(K) = \sum_{n=0}^m (-1)^n f_m(n) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n f_m(n) = 1$$

ただし、 $\chi(K)$ はm次元超多面体Kにおけるオイラー標数であり、これはすべての非負整数mについて成り立つ。以降これを(\*)とする。また、これはシュレーフリの定理

$$\sum_{n=0}^{m-1} (-1)^n f_m(n) = 1 - (-1)^m$$

を発展させたものである。

## 証明の概略

(補題)m次元単体で(\*)が成り立つ。

証明:  $f_m(n)=_{m+1}C_{n+1}$ だから

$$\chi(K)=_{m+1}C_{1-m+1}C_{2+...+(-1)^{m+1}m+1}C_{m+1}$$

$$= -\{(1-1)^{m+1}-m+1C_0\}$$

$$= 1 \quad (\text{終})$$

一般に、II次元超多面体はII次元単体に分割できる。

今、m+1次元超多面体Aはm+1次元単体Bとm+1次元超多面体Cが、m次元超断面Dを境にして構成されているとする。

一般にII次元空間にひとつのII-1次元面が加わると、II次元空間は2分されるから、オイラー標数を考えると相殺される。

よって、 $\chi(AUD) = \chi(A)$ またAUD=BUCなので、 $\chi(A) = \chi(BUC)$

ここで数学的帰納法を用いる。m次元超多面体で(\*)の成立を仮定すると、

$$\chi(A) = \chi(BUC)$$

$$= \chi(B) + \chi(C) - \chi(D) = 1 + \chi(C) - 1 = \chi(C)$$

この $\chi(C)$ を新たにAとみなすと、同じ作業を繰り返せるため、あるm+1次元単体Eで

$\chi(A) = \chi(E) = 1$ が成り立ち、m+1次元超多面体で(\*)の成立が示される。

またm=0のとき、0次元超多面体 $\omega$ は一つの点だから、 $\chi(\omega) = 1$ であり、成立している。

以上より、オイラらの*chou*多面体定理が示された。

(Q.E.D.)

## 今後の課題

Dがm次元未満の時も成立することを示す。 $\varphi$ のときの一般化。

## 参考文献

[https://researchmap.jp/cabinets/cabinet\\_files/download/474151/1eac07369c4cad0bbfd59562b0e416e4?frame\\_id=967210](https://researchmap.jp/cabinets/cabinet_files/download/474151/1eac07369c4cad0bbfd59562b0e416e4?frame_id=967210)

# テーマ



滋賀県立膳所高等学校1年 組 班

班員の名前

## 要約（ここを見ればどんな研究をしたかが一目でわかるように書く）

○○について、△△した結果、□□であることがわかった。  
(研究の目的から結論まで、研究した内容を簡潔に記述する。)

### 動機・目的・仮説

- について、△△の点で興味を持った。
- ▽▽であることは既にわかっているが、▼▼であるかはまだわかっていない。
- そこで、◇◇という仮説を立て、▼▼であることを明らかにすることが本研究の目的である。  
(研究に取りかかるきっかけや着眼点・背景等について記述する。)
- 研究したことすべてを記述する必要はない。本研究で一番言いたいことをストーリーを考えて仕上がる方が大切である。

例

- どうしてそれが疑問なのか、不思議なのか。
- 前提となっていることはなにか。(今までにわかっていることは何か。)
- どういう問題に取り組んだのか、なにをやろうとしているのか。

### 研究方法

- 以下の□□の条件で実験・調査を行った。  
(自分たちが立てた仮説の内容を検証する方法を記述する。)
- 本研究で何を明らかにしたいかを示す問をリサーチクエスチョンという。  
このリサーチクエスチョンに確実に答えられる方法がとれているか。
- 研究に関連する人々のプライバシーへの配慮等、研究倫理をふまえているか  
(研究方法では明らかにならない、研究の限界点も記述する必要はないが考えておくこと)

例

- どのようにして実験・調査するのかを明瞭に記述する。
- 実験では比較する条件を明らかにする。
- 測定(調べた)対象や内容等を具体的に記述する。

### 結果・考察

- 現段階での到達内容をかく。
- 表、グラフ、写真等を使って実験・調査の結果を記述する。
- その結果から言えることを考察する。(何が言いたいのかを明確にする。)  
※事実と解釈を明確に区別して記述する。  
(得られた結果(事実)を記述する。  
その結果から考えられることを記述する。)
- 複数の結果がある場合は、まずそれぞれについて考察し、最後にまとめて再度考察をする。
- 自分たちが実験・調査した内容を順番どおりに記述するのではなく、研究のストーリーがわかるように配列し直して、論理的に記述すること。
- 実験回数ができるだけ増やすこと。  
また、グラフには標準誤差を表示すること。

$$\text{標準誤差} = \sqrt{\frac{\text{(標準偏差)}}{\text{(測定回数)}}}$$

- 有効数字に注意、単位の表示を必ず行うこと
- キャプション 図は下 表は上
- ポスターを黒一色で印刷することも考えて、色の濃度を変える。

### 結論(結果考察の欄に含めてよい)

- について、◇◇であることが分かったが、◆◆についてはまだ明らかでない。

### 今後の展望(と課題)

- 今後、◆◆という点について実験し○○を明らかにしていく。◇◇のような課題がある。

### 参考文献

- 研究の参考にした文献  
著者、(出版年), タイトル, 出版社 の順に記述
- 研究の参考にした電子情報  
作成者, 公開年, タイトル, アクセス した日付, URL  
※ Wikipedia などの著者不明の情報は不可

## 理数科「課題研究」基本ルーブリック

目標	項目	A (4)	B (3)	C (2)
(協同)課題設定能力	様々な現象に疑問・問題意識をもち、課題を見付け出す。	興味・疑問をもったことについてよく考え、検証可能な現象を取り出し、適切な課題を設定することができる	興味・疑問をもったことについてよく考えているが、検証可能な現象をうまく取り出し切れていない	過去の課題研究や文献で扱われている現象を自分の課題とする
	文献やデータベースの調査ができる。	過去の課題研究や文献、HP だけでなく、個人の論文まで調べている	過去の課題研究だけでなく、文献、HP を調べている	主に過去の課題研究のみを利用している
	仮説を考える。研究方法を考える。	なぜそうなるのか、予備調査の結果も踏まえて、理論的に深く考えて仮説をたて、検証方法を考えている	自分で仮説をたてているが、あまり論理的ではない	過去の課題研究で使われていた仮説を利用している
問題解決能力	実験を計画する。実験装置や実験条件を考えられる。	適切でオリジナルな実験装置、方法を考え、論理的に適切な実験条件で実験できる	実験装置、方法に工夫をして改良し、適切な実験条件で実験できる	過去の課題研究で使われていた実験装置、方法を用い、実験条件だけを変えている
	実験・観察の手法に習熟している。	実験装置の扱い、観察方法に習熟し、正確な測定、観察方法で正確な数値、観察結果が得られる	実験装置の扱い、観察方法が適切で、測定、観察結果が正確に得られている	実験装置の扱い、観察方法を覚えているが、なぜそうなっているかの理解が弱い
	実験結果を考察し分析する。	得られたデータを適切なグラフ、表を用いて表し、そこから言えることを正しく読み取り考察できる	得られたデータをグラフ、表を用いて表し、そこから言えることを読み取り考察できる	得られたデータをグラフ、表を用いて表し、考察できるが、言えないことまでも読み取れたように誤解している
	論理的に考え、結論をまとめる。	考察から、言えることを整理し、研究全体を論理的に矛盾なく結論へ導くことができる	考察から、言えることを整理し、論理的に結論へ導くことができる	考察し、考えられることを整理し、結論を導くことができる
プレゼンテーション・ディスカッション能力	プレゼンテーションの技能(班単位)	スライドを指し、聴衆を見て、原稿を見ずに大きな声で発表できる	スライドを指し、聴衆を見るこことを意識しているが、しばしば原稿を見てしまう	ほとんど原稿を見ての発表である
	スライドのわかりやすさ(班単位)	適切で見やすいグラフ、表があり、全体の流れがわかりやすく、枚数も適切なスライドが作成出来ている	グラフ、表は適切であるが、文字のスライドが多いなど、枚数が多く、流れがつかみにくい	グラフ、表はかけているが、文字のスライドが多く、全体として意味がつかみにくい
	要旨(班単位)	簡潔で、全体の流れが論理的にわかりやすい要旨である。	全体の流れがわかり、研究の内容が理解できる	全体の流れが整理されておらず、研究の内容は理解できるが、読みづらい
	論文(班単位)	研究の背景がわかり、実験装置や観察手法が正確に記述され、得られたデータから適切に考察し、論理的に矛盾なく結論できている	研究の背景にもふれ、実験装置や観察手法が正確に記述され、得られたデータを考察し、論理的に結論できている	研究の背景や、実験装置や観察手法が記述され、得られたデータを考察し、結論できている

## 普通科「探究」のルーブリック

(1年生)

	D	C	B	A	S
	探究活動に十分に参加できなかったレベル	探究活動の質について改善を要するレベル	探究活動の質について満足できるレベル	探究活動の質について十分満足できるレベル	探究活動の質について特筆すべき成果をあげたレベル
課題設定能力	自分の興味や関心から問い合わせをつくり、仮説を立てて課題設定する能力を身につけて努力している。	自分の興味や関心に基づいた問い合わせをつくり、仮説を立てて課題設定する能力を身につけている。	過去の研究成果を参考したうえで、研究の意義を自分なりに考え、具体的な問い合わせをつくり、仮説を立てて課題設定する能力を身につけている。	過去の研究成果を参考したうえで、研究の意義を自分なりに考え、具体的な問い合わせをつくり、仮説を立てて課題設定する能力を身につけている。	過去の研究成果を十分に踏まえたうえで、独創的な切り口で現象をとらえ、学問的(社会的)価値を考えたテーマを検証可能な仮説を立てて課題設定する能力を身につけている。
問題解決能力	調査活動に参加し、活動する能力を身につけて努力している。	周辺知識を調べ、調査方法を自分で選択し、計画的に調査活動を行う能力を身につけている。	周辺知識を理解しようと努め、調査活動の過程で問題に直面した時には改善に努める。計画を立て、精度の高い調査方法を意識して実施する能力を身につけている。	周辺知識を理解しようと努め、調査活動の過程で生じた問題点に気づくことができる。目的や見通しを明確にした計画を立て、精度の高い調査方法を意識して実施する能力を身につけている。	周辺知識を理解して教訓を引き出し、調査活動の過程で得た情報を生かしながら修正することができる。目的や見通しを明確にした計画を立て、精度の高い調査方法を工夫して実施する能力を身につけている。
ディスカッション・プレゼンテーション能力	グラフ等を用いてポスターを作成する能力を身につけて始めている。	グラフ等を用いてポスターを作成し、研究の流れを意識しながら伝える能力を身につけている。	グラフ等を用いてポスターを作成し、研究内容を論理的に伝え、議論する能力を身につけている。	適切なグラフ等を用いて分かりやすいポスターを作成し、研究内容を論理的に伝え、議論する能力を身につけている。	適切なグラフ等を用いて分かりやすいポスターを作成し、研究内容を論理的に伝え、議論する能力を身につけている。
	発表の際に受けた質問を聞き、対応しようと努力している。	発表の際に受けた質問に受け答えする能力を身につけて始めている。	発表の際に受けた質問に受け答えする能力を概ね身につけている。	発表の際に受けた質問に適切に受け答えする能力を身につけている。	発表の際に受けた質問に適切に受け答えできるだけでなく、そこから自分の研究を発展させる能力を身につけている。

(2年生)

	D	C	B	A	S
	探究活動に十分に参加できなかったレベル	探究活動の質について改善を要するレベル	探究活動の質について満足できるレベル	探究活動の質について十分満足できるレベル	探究活動の質について特筆すべき成果をあげたレベル
課題設定能力	自分の興味や関心から問い合わせをつくり、仮説を立てて課題設定する能力を身につけて努力している。	自分の興味や関心に基づいた問い合わせをつくり、仮説を立てて課題設定する能力を身につけている。	過去の研究成果を参考したうえで、研究の意義を自分なりに考え、具体的な問い合わせをつくり、仮説を立てて課題設定する能力を身につけている。	過去の研究成果を十分に踏まえたうえで、独創的な切り口で現象をとらえ、学問的(社会的)価値を考えたテーマを検証可能な仮説を立てて課題設定する能力を、身につけている。	過去の研究成果を十分に踏まえたうえで、独創的な切り口で現象をとらえ、学問的(社会的)価値を考えたテーマを検証可能な仮説を立てて課題設定する能力を、十分に身につけている。
問題解決能力	調査活動に参加し、活動する能力を身につけて努力している。	周辺知識を調べ、調査方法を自分で選択し、計画的に調査活動を行う能力を身につけている。	周辺知識を理解しようと努め、調査活動の過程で問題に直面した時には改善に努める。計画を立て、精度の高い調査方法を意識して実施する能力を身につけている。	周辺知識を理解しようと努め、調査活動の過程で生じた問題点に気づくことができる。目的や見通しを明確にした計画を立て、精度の高い調査方法を意識して実施する能力を身につけている。	周辺知識を理解して教訓を引き出し、調査活動の過程で得た情報を生かしながら修正することができる。目的や見通しを明確にした計画を立て、精度の高い調査方法を工夫して実施する能力を身につけている。
	得られたデータを分析し考察する能力を身につけて努力している。	得られたデータを分析して考察を加える能力を身につけている。	得られたデータを正確に分析して論理的な考察を加える能力を身につけている。	得られたデータを正確に分析して論理的な考察を加え、次の課題を発見する能力を身につけている。	得られたデータを緻密に分析して論理的な考察を加え、次の課題を発見し、次の課題を発見する能力を身につけている。
ディスカッション・プレゼンテーション能力	グラフ等を用いてスライドを作成する能力を身につけて始めている。	グラフ等を用いてスライドを作成し、研究の流れを意識しながら伝える能力を身につけている。	グラフ等を用いてスライドを作成し、研究内容を論理的に伝え、議論する能力を身につけている。	適切なグラフ等を用いて分かりやすいスライドを作成し、研究内容を論理的に伝え、議論する能力を十分に身につけている。	適切なグラフ等を用いて分かりやすいスライドを作成し、研究内容を論理的に伝え、議論する能力を十分に身につけている。
	発表の際に受けた質問を聞き、対応しようと努力している。	発表の際に受けた質問に受け答えする能力を身につけて始めている。	発表の際に受けた質問に受け答えする能力を概ね身につけている。	発表の際に受けた質問に適切に受け答えする能力を身につけている。	発表の際に受けた質問に適切に受け答えできるだけでなく、そこから自分の研究を発展させる能力を身につけている。
	科学論文の形式を意識して論述しようとしている。	科学論文の形式を意識して論述しようとしている。	科学論文の形式を意識して論述する能力を身につけている。	科学論文の形式に則って論述する能力を身につけている。	科学論文の形式に則って論述する能力を十分に身につけている。

(3年生)

	D	C	B	A	S
	探究活動に十分に参加できなかったレベル	探究活動の質について改善を要するレベル	探究活動の質について満足できるレベル	探究活動の質について十分満足できるレベル	探究活動の質について特筆すべき成果をあげたレベル
アカデミックライティングの技法	科学論文の形式を意識して論述しようとしている。	科学論文の形式を意識して論述する能力を身につけている。	科学論文の形式に則って論述する能力を身につけている。	科学論文の形式に則って論述する能力を身につけている。	科学論文の形式に則って論述する能力を十分に身につけている。
	パラグラフライティングを学習し、キーワードを用いて論述しようとしている。	キーワードを意識して用いて、パラグラフライティングを意識して文を構成する能力を身につけている。	キーワードを効果的に用いる、またはパラグラフライティングを活用して文を構成する能力を身につけている。	キーワードを効果的に用いて、パラグラフライティングを活用して文を構成する能力を身につけている。	キーワードを効果的に用いて、パラグラフライティングを活用して文を構成する能力を身につけている。
論旨の明確さ	論理的な文章を記述しようと努力している。	論理的な文章を記述する力を習得している。	論理的な文章を記述する力を習得している。	論理的な文章を記述する力を習得している。	論旨が明解で論理的な文章を記述する力を習得している。

科学的探究に関する標準ルーブリックと指導方略					
観点(上段)→ 本質的な問い (下段)→ 基準(上段) 微候(下段)↓	課題の設定		調査計画の立案と実施	情報収集と情報の評価	結果からの考察
	研究の意義づけ	課題の具体化	よい調査計画とはなにか?	情報(実験・観測データ等)を目的に応じて適切に評価した上で、考察に向けた示唆を与える形で解釈している	どうすれば妥当な考察ができるだろうか?
<b>5 基準</b> 課題研究の質が特別優れているレベル  <b>微候</b> 一連の探究の手続きを理解し、省察しながら次の段階を視野に入れて探究活動を行っている  <b>指導方略</b>	自分の研究課題の学術的情報や社会的価値、既存の前提を問う問い合わせている	妥当な評価が可能な目標や、環境的な制約の中で実行可能で検証可能な問い合わせや仮説を立てている	実践から教訓を引き出し、必要な情報や手続きを身につけて、次の計画に活かせる	情報(実験・観測データ等)を目的に応じて適切に評価した上で、考察に向けた示唆を与える形で解釈している	得られた結論から、より発展的な課題を見いだし、次の探究のプロセスが見据えている。
	○自分の研究課題が社会や学問の進展に寄与するものであることを口頭または文章において説明できる ○研究課題に関連する先行研究との違いが明確にされている	○取りうる手段を踏まえ、実際に評価可能や目標や検証可能な仮説が立てられている ○身近な物・実験材料などに注目し、検証可能な課題を設定した ○先行研究がある場合、それらと比較できるような課題が設定できている	○現状で知識・技術不足があったときに、自ら情報を収集し、習得しようとすると ○実施の都度、自分で振り返りをして、目的に応じて、計画を修正する	○データを緻密に分析し次の研究への発展または大きな発見の結論に至っている ○実験の失敗などから修正点を見いだし実験デザインを直す ○別アプローチで得られた考察の妥当性を確かめようとしている	○自分が進めてきた探究の手法や考え方を振り返り、発展的な新たな課題を見いだし、その解決にむけたアプローチを考察したりしている
<b>4 基準</b> 課題研究の質が十分に満足できるレベル  <b>微候</b> 探究の手続きや一連の流れを理解しつつ、自分の活動を評価しながら探究活動を行っている  <b>指導方略</b>	自分の研究課題の学術的情報や社会的価値に触れて問い合わせる意義を説明している	評価が可能な目標や検証可能な問い合わせや仮説を立てている	先行研究等を踏まえ、妥当性のある方法を多角的・多角的に判断し、計画に取り入れている	情報(実験・観測データ等)を先行研究や既存の前提(概念枠組み・パラダイム等)を用いて合理的に解釈している	論理的な考察ができるおり、得られた結論の妥当性の評価がなされている
	○研究課題に関連する先行研究が紹介されている ○自分の研究課題が社会や学問においてどのような位置づけにあるか当該分野の話題を取り上げている △最終目標と、実現可能な実験などをどのようにしてらし合わせるべきか悩んでいる	○目標や仮説を、曖昧な言葉や單語を用いて表現している ○必要な定義がなされている ○緻密な仮説を立てている ○評価可能な目標か、検証可能な仮説を立てている ○数多くの実験をした上でそれを踏まえた仮説を立てている △環境的な制約等を念頭に問い合わせや仮説を設定することはできない	○先行研究や既存の理論を参考にしつつ、調査方法の妥当性を評価しつつ、選択できている ○課題解決に必要な条件・精度・具体性を意識した計画が立てられる ○既存の複数の方法を評価し、自分の研究に合った方法を選択した ○既に得られている各種データと、自らの予想に整合性があることを確認している △考察等をふまえて、発展的な研究に至るプロセスを提案することができない	○データの提示と解釈が正確に行われている ○有効数字、測定・系統誤差の評価・再現性的検討ができる ○自分が選択した方法や測定法の精度を意識している △実験と理論式が結びついている △[理論式への]代入に終始している	○先行研究や既存の理論との比較の結果、進めてきた探究をよりかえり、評価(仮説の採択・棄却や方法の不備等)し、次の課題を見出している。 ○考察から新たな問題を見いだすための気づきがなされている △課題は見つけられているが、発展的な研究のプロセスまでは考えられない
<b>3 基準</b> 課題研究の質が満足できるレベル  <b>微候</b> 個々の探究の手続きを理解して探究活動を行っている  <b>指導方略</b>	他者に自分の研究課題の意義を説明できる	研究の目標を踏まえて、問い合わせや仮説を設定できている	目的を明確にした計画を立て、見通しをもって計画となっている	情報(実験・観測データ等)を目的に合わせてまとめている	論理的な考察がされている
	○どのような社会的課題・学術的課題を解決しようとする研究であるかということを表現している ○自分自身の研究内容を表現している ○社会的課題を解決しようとしている △考察の方向と研究課題の方向が一致していない △個々の課題をこなすことによつて終止している	○曖昧な語を含んでいるものの、研究を通じて明らかにしたいことを目標や仮説といった形で表現できている ○仮説は立てている △検証可能な仮説や問い合わせではない	○使用できる材料・機器・締め切りなどを考慮できる ○具体的な手法が記載できる ○実験系の作り方を検討している ○目的にあった装置を作る必要性に気づいている △どうすれば正確な検証ができるかよくわかっていない △立式・パラメータ等の意味を実際の操作と結びつけて捉えていい △何をもって期待した結果が得られたと評価できるのかがわからぬ	○実験・観測の条件などによってデータの整理ができる ○データから、一定の論理的考察に結びついている ○研究における定義について考えはじめた ○データの見ながら、どこに着目すべきかを見つけている ○実験方法の記録をとっている ○再現性よく、比較的バラツキのおさえられたデータを得ている △グラフ化できても解釈に困る	○結果から事実に基づく論理的思考ができる(正しい結果か間違った結果かは問わない) ○データをしっかりとまとめられた △対照実験で差が出た原因の特定をすることはできない △先行研究の実験内容との比較に悩んでいる
<b>2 基準</b> 課題研究の質がやや改善を要するレベル  <b>微候</b> 個々の探究の手続きを意識して探究活動を行っている  <b>指導方略</b>	自分の研究に漠然とした意義づけができる	問い合わせ立てができる	作業としての計画が立てられ、実施している	入手した情報(実験・観測データ等)を示している	論理的な考察が不十分である
	○自分の興味や関心に基づいた問い合わせ立てられている ○防災や環境問題といった、問題意識から課題を設定しようとしている △問い合わせから探究すべき方向が導かれないと	○自分自身の疑問や、知りたいことを表現できている ○対象に関して、自分自身で問い合わせ立て、目的を定められる △抽象的な問い合わせを持つたが、どうアプローチしてよいかわからないほど曖昧な問い合わせである △問い合わせが漠然で具体的に何をしたらいいかまで絞り切れない	○調査の手順を明確にしている ○研究手法と手続きを示している ○実施しやすい条件での実験・シミュレーションができる ○着目するパラメータを決める △着目するパラメータ以外が制御できていない △やりたいことはあるが、先行行き不透明な状況	○記録にどまり、論理的なまとめができるでない ○複数のデータを得ている ○データがどれようになつた △サンプリングの条件が揃っていない △データの「特徴とは何か」でもめることがある △信用性のあるデータがない	○結果について考察しているが、多面的でない ○根拠が不十分である ○結果から読みとれていでない飛躍した考察がなされている △解釈されたデータを考察でどう扱うのか分からぬ ・なぜ上手くいったのか問い合わせる
<b>1 基準</b> 課題研究の質が大幅な改善を要するレベル  <b>微候</b> 探究の手続きがわからず、探究を進められない  <b>指導方略</b>	自分自身で研究の意義を見出せない	問い合わせ不出せない	抽象的な計画にどまり、実施が困難である	入手した情報(実験・観測データ等)をまとめていない	論理的な考察ができない
	○自分自身の研究が、自分自身の興味と離れている △研究分野は決まつたが自分自身が問題意識をもつていない	○自分自身の疑問や知りたいことが何なのが表現されていない △何を対象として良いかわからぬ	○実際の行動手順が見えない抽象的な語を多く含む計画を立てる ○すでに知っている手法を利用して計画を立てている ○最低限の道具を用意し、実験にとりかかる △行動手順が見えていない	○定量的なデータを得られるにも関わらず、定性的なデータしか示せていない △サンプルを一つしかとらない △特徴をぬきだせない。一般化できない △実験操作の基礎的な手法を理解していない	○結果と考察が分離できず、結果のみとなる ○予想通りの結果が得られない場合に、「失敗した」と終わる △試しやつたら(予備実験)上手くいったものの、それで満足する

数学的探究に関する標準ルーブリックと指導方略

観点(上段) → 本質的な問い (下段) → 基準(上段) 微候(下段)↓	問の設定の妥当性 ・独創性	情報収集と議論		証明方法の方針の立案と実施	証明の論理性・独創性
		(先行研究あり)	(先行研究なし)		
よい数学的な問いとは何か?		どこまでが既知でどこからが未知なのか?		証明の核はなにか?	
子どもたちの到達点を判断する主な評価資料: (実験) ノート(振り返りノート)・ポートフォリオ・検討会でのやりとり・行動観察・論文・ポスター等					
<b>5 基準</b> 課題研究の質が特別優れているレベル	周囲を納得させる研究の価値(個人の価値を超えたもの)を説明できる。 見通しがあり、検証できる校り込んだ問い合わせられている。	先行研究を理解し、活用することで新たな見出しが生まれ、大きな発見に繋がった。 (議論が十分になされ、創造的な発見につながっている。)	発展させた研究内容から新たな見出しが生まれ、大きな発見に繋がった。 (議論が十分になされ、創造的な発見につながっている。)	証明の取組から必要な知識や手法を自ら発見し、証明に活かせる。	論理的な証明ができるおりかつ独創的な発想で証明できている。
<b>微候</b> 一連の探究の手続きを理解し、省察しながら次の段階を視野に入れて探究活動を行っている	○研究成果が社会や学問の進展に寄与するものである。 ○従来の学説や経験、これまでの研究成果を踏まえて証明可能な問い合わせられている。	○研究が独創性のある大きな発見に繋がるものとなっていいる。 (議論が繰り返しなされ、明らかに大きく研究が進んでいくことが分かる。)	○先行研究がないことを明らかにし、自分(たち)で考えた研究内容を分析し発展させ、大きな発見に至っている(議論している)。	○現状で知識や理解不足があったとき、自ら情報を収集し、自らのアイデアで証明できている。 ○取組のなかでこれまでの内容を振り返り計画的に筋道を立てて証明に至っている。	○示された証明から、他の波及効果のある新しい価値への提案ができている。
	・検証可能な学術的価値や社会的価値のある研究であるかを説明させる。	・先行研究と関連した研究があればその研究との比較、新規性について常に考えさせ議論させる		・新規性のあるアイデアを常に考えるよう指導する	・先行研究と比較したうえで、証明の独創性について説明させる。 ・証明した(定理)内容が他の事柄とどのように関連し新しい価値を見出しているか説明させる ・有識者による査読
<b>4 基準</b> 課題研究の質が十分に満足できるレベル	他者に研究の価値を説明できる。見通しのある問い合わせをしてられる。 研究の動機・目的が明確である。	先行研究を調べ、その内容を理解し、自らの研究に発展的に活かしている。 議論がよくなされている。	自分(たち)で考え研究を発展させている。 議論がよくなされている。	目的を明確にした方針を立て、見通しをもって証明を綿密にデザインできる。	論理的な証明ができるいる。
<b>微候</b> 探究の手続きや一連の流れを理解しつつ、自分の活動を評価しながら探究活動を行っている	○自分の研究課題が社会や学問が進展にどう寄与する。 ○自分の知識や経験をもとに証明可能であるような問い合わせられている。	○先行研究の内容を理解しこの内容を正確に活用することで自らの研究を発展させていく。 (議論ができるおり、研究内容が大きく進展した。)	○先行研究がないことを明らかにし、自分(たち)で考えた研究内容を分析し発展させている。 議論している。	○証明するために必要な補題や事柄を、道筋をつけて考えている。	○結論へと至る論理的な思考がよくなされている。 ○(先行研究や既存の理論との比較がなされている。)
	・研究テーマの意義と価値を説明させる。	・先行研究や別領域(周辺領域)での論文との整合性を求めるよう指導する ・新規性・有効性・信頼性を意識し研究する中で関連する領域の内容についても考えるように指示する。		・証明に必要と考えられるすべての事柄を整理させる	・証明の道筋を一つずつ確認させる
<b>3 基準</b> 課題研究の質が満足できるレベル	研究の価値を個人レベルで理解している。 研究の動機・目的が明確である。	先行研究を調べ、その内容を理解し、研究に活かしている。 議論ができている。	先行研究がないことを明らかにし、自分(たち)で考え研究を行っている。議論ができる。	証明の不十分な点に自ら気づき、証明方針を変更できる。	証明に論理的な飛躍がある。
<b>微候</b> 個々の探究の手続きを理解して探究活動を行っている	○自分の研究課題の意識に自覚的である。 ○問い合わせが具体的である。(研究の目的・動機がはっきり示されている。)	○先行研究を調べ、その内容を理解し、研究に活かしている。 (議論ができるおり、研究内容に深まりがある。)	○先行研究がないことを明らかにしている。 ○自分(たち)で考え研究を行う活動の過程がわかる。	○自ら証明方法の誤りに気づき改善に取り組んでいる。	○結論へと至る論理的な思考ができる。
	・研究テーマから社会的価値が見出せるか考えさせる(議論させる) ・新規性のある問を探させる ・研究の目的・動機を振り返らせる。	・先行研究とその関連内容についての理解を求める ・先行研究を調べて新規性があるか調べるように指示する ・学術書や学術論文を読むように指示する	・先行研究を調べさせる。 国立国会図書館、CiNii-NII、GoogleScholarなどの利用 ・教員、研究者に尋ねさせる	・証明方法を説明させ、不明瞭な点を質問する。 ・証明に必要なすべてのプロセスを把握させる。 ・証明の大まかな道筋を考えさせる	
<b>2 基準</b> 課題研究の質がやや改善を要するレベル	研究の価値は十分に理解していないが、問い合わせをしている。 (議論が不十分である。)			証明の方針は立てているが、証明方法が不十分なまま取り組んでいる。	
<b>微候</b> 個々の探究の手続きを意識して探究活動を行っている	○自分の興味や関心に基づいた抽象的な問は立てられた。 △具体的にどういう結果が得られたら、その問に答えたことになるかが不明瞭である。 △研究の目的・動機が示されていない。	○先行研究を調べた。 △先行研究と問との関連が見えていない。 (話し合いはできているがそのことで、内容に深まりが見られない。)		△証明の道筋を十分に考えていない。 △このことが示せれば良いという確信がない。 △結論へと至る論理が、根拠がなく不十分である。	
	・生徒を見守る(待つ) ・生徒同士で話し合わせることで共通の興味を引き出す ・どんな疑問でもいいのでできるだけ書きあげさせる ・研究者の話を聞かせる	・興味のある内容で文献や論文を調べさせる。 ・発表会や先輩の研究からヒントを見つけさせる ・社会性、話題性のあるものからキーワードを探させる		問い合わせ出してから証明方法の方針を考える。	問い合わせ出してから証明のアプローチを考える。
<b>1 基準</b> 課題研究の質が大幅な改善を要するレベル	問い合わせない	先行研究を調べていない。 (議論ができない。)			
<b>微候</b> 探究の手続きがわからず、探究を進められない	○単語レベルのテーマがある。 △何を対象として良いかわからない。 △何をしてよいかわからない。 △抽象的。 △したいことがない。 △調べる対象が広すぎる。	△研究の手続きがとれていない。 (議論ができるないので個人の考えとなっている。)			

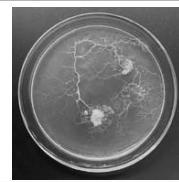
# 令和3年度 SSH生徒研究発表会生徒投票賞受賞 真正粘菌の周期記憶行動及びウルトラディアンリズムの 同調因子の可能性について

0315 滋賀県立膳所高等学校 兼田真奈 河崎晨太郎 清水樹 松本大和



## ○要旨

真正粘菌（以下粘菌）は自身にとって悪い刺激が周期的に与えられたとき、その周期を学習することができる。この能力は温度・湿度によってのみ見られることが分かっていたが、今回の研究によって、「光による刺激も学習すること」、及び「ウルトラディアンリズムを持ち、周期的刺激によってそれを同調させている可能性がある」ことが分かった。



## 1 序論

粘菌は自身にとって悪い刺激が与えられると、自らの活動を抑制する。また、この刺激が周期的に与えられた場合、その周期を記憶し、次の刺激のタイミングを予測して行動する能力を持つ（手老篤史ら、2007）（図1）。この能力は温度と湿度によってのみ確認されていたため、粘菌の一種モジホコリ (*Physarum polycephalum*) を用いて、他の因子による学習、またこれらに関わる性質を追求することを目的に研究を行った。

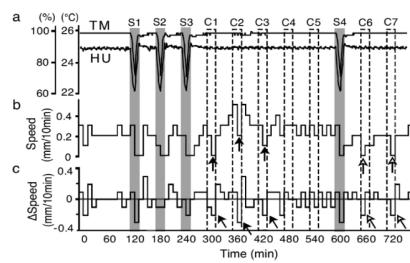


図1 温度・湿度による粘菌の学習

## 2 予備実験

【24 °C、200 luxの環境において、粘菌がどのような行動をしているかを調べるために実験を行った。】

実験に用いた粘菌は1時間ほどのウルトラディアンリズムを持つ可能性があると考えられる。

ウルトラディアンリズムとは、生物がもつ、数分から数時間程度の周期的なリズムのことである。本研究においては、粘菌の行動速度が周期的に変化していることを指す。

結果を右図のように示す。横軸は時間（分）、縦軸は移動速度（mm<sup>2</sup>/分）とする。以後同様に示す。

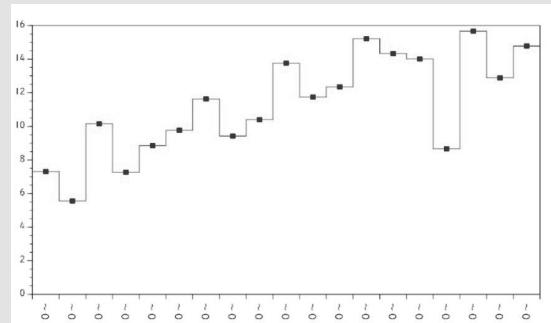


図2 平常時の粘菌の移動速度の変位

## 3 温度に関する実験

【温度を一定時間ごとに下げる操作を行った。】

温度を下げた時、粘菌の行動は促進された。

粘菌は、その周期を記憶した（図3、4）。

刺激によって、二つの粘菌が同調していた。

→ 温度変化が同調因子となった可能性がある。

同調因子について、本研究では、他個体の行動を同期・同調させる因子のことを指す。

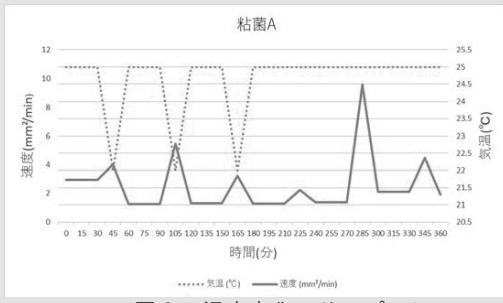


図3 温度変化 サンプルA

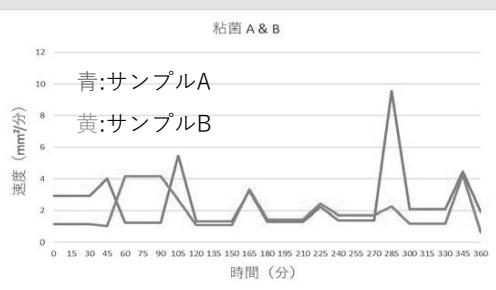


図5 同調している様子

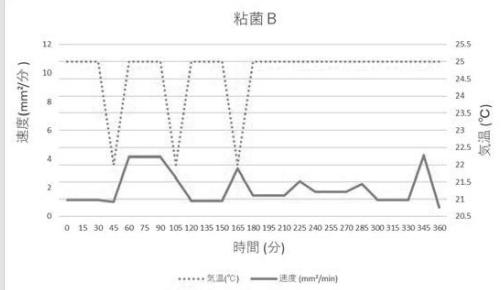


図4 温度変化 サンプルB

## 4 光に関する実験

【白色光を、一定時間ごとに赤色光に変える操作を行った。】

光を赤色に変えた時、粘菌の行動は促進された。

粘菌は、その周期を記憶した（図6）。

刺激によって、二つの粘菌が同調していた。

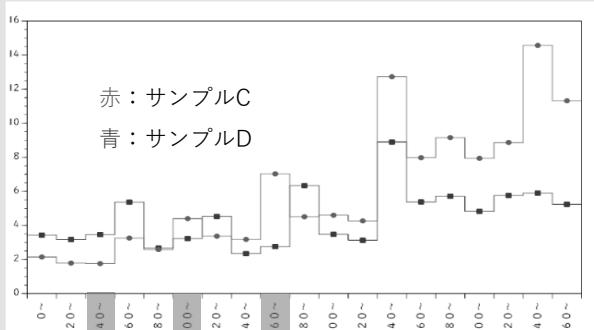


図6 赤色光変化 サンプルC、D

〈実験の様子〉



赤色光



白色光

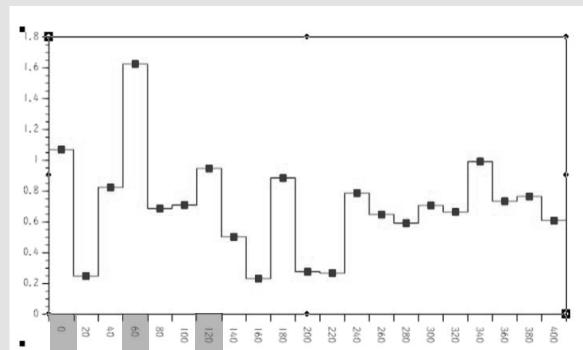


図7 光量変化 サンプルE

## 5まとめ

粘菌が周期を学習することのできる刺激として考えられるものは、以下の通り。

- ・温度変化
- ・照度変化
- ・光の波長変化

また、粘菌が自らのウルトラディアンリズムに従って行動をしていた場合、それらの刺激が同調因子となっている可能性がある。

## 6 展望

粘菌のウルトラディアンリズムの実態についてより多くの実験を行う

→本当に同調因子と称してもよいかが明らかになる

刺激を与える回数を変えたり、周期を記憶する割合を比較したり、周期を変化させる実験を行う

→同一の機構によるかを調べられる

同一の機構によった場合

→行動を抑制したときに体内の何らかの物質濃度変化が生化学的振動子として働いた可能性が大きいと考えられる

### 参考文献

- ・Tetsu Saigusa Amoebae anticipate periodic events (Graduate School of Engineering, Hokkaido University, N13 W8, Sapporo 060-8628, Japan Atsushi Tero and Toshiyuki Nakagaki Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University, Sapporo, 060-0812, Japan Yoshiaki Kuramoto) Department of Nonlinear Science, ATR Wave Engineering Laboratories,(Dated: November 9, 2007)
- ・山田卓三,山極隆,“新しい教材生物の研究”,(1980),講談社
- ・中道範人,「植物の概日リズム研究に関して」,第13回(2015年度)時間生物学学会学術奨励賞受賞論文,名古屋大 トランスフォーマティブ生命分子研究所
- ・高木 清二, 佐藤 勝彦, 中垣 俊之, 「モジホコリ」, 生物工学 第96巻 第8号 (2018) 生物教材インデックス
- ・大阪府立大学植物工場研究センター, 科学技術振興機構 (JST) ホームページより
- ・青野 真士, 「真性粘菌アメーバの時空間振動 ダイナミクスによる自己組織的計算」, (2010)
- ・吉本康明 大阪大学 理系博士 学位論文, 学位記番号 3870, 学位論文題目「粘菌変形体系の収縮リズムに関する研究」, 学位授与の日付 昭和 52年3月 25日

## 膳所高校課題研究論文フォーマット タイトルの英語表記を入れる

膳所太郎 膳所花子 理数科男 理数科子  
Tarou Zeze Hanako Zeze Kao Risuu Kako Risuu

### 要約

要約は論文の要点を簡潔に伝えるためのものである。提案手法の必要性を示す研究分野の背景、提案手法の基本的なアイデア、実験等を通して得られた知見を的確に論述し、結論まで書く。特に字数の制限は設けないが、1ページ全体が概要にならないように注意する。文字フォントは、「要約」と「キーワード」はゴシック系フォントで、概要中の文章とキーワードは明朝系フォントで記載する。また、文字の大きさは8pt とし、改行幅は固定値で 12pt とする。2段組で指定する本文の幅より左右に 15mm ずつマージンを取る。要約の後に1行空けて、ABSTRACT を構成する。また、さらに1行空けて1行におさまる程度のキーワードを続ける。

### ABSTRACT

ここに英語で入れる。（英語 ABSTRACT を必ず入れる） 日英併記（英語のフォントは Times New Roman）

キーワード：原稿フォーマット、ページ数、余白、参考文献

### 1. はじめに

本資料は、膳所高校理数科課題研究発表会の論文のフォーマットについての解説である。本資料を熟読し、論文の執筆にあたってほしい。以下に、論文の体裁、ページフォーマット、文字フォント、図表、参考文献、締め切り、チェック、IMRAD フォーマット、謝辞の順に記載する。この解説の通り、「、」ではなく「、」を「。」ではなく「。」を用いること。

1枚目には、本用紙上記に書かれてある通り、左端に「膳所高校理数科課題研究（10.5pt）」、右端に半角「vol. ○○ R4.3. ○○（10.5pt）」

### 2. 論文のページ数、ヘッダー、フッター

論文のページ数は概ね 6 ページ。ヘッダーとフッターはつけず、ページ番号もつけないようにする。論文は、研究の背景、提案手法、提案手法の利点を示す実験、実験結果の考察、まとめ、参考文献、謝辞の順に構成し、論旨に直接関わらない詳細な実験結果や予備実験の実験結果等については、付録にまとめるとよい。IMRAD フォーマット<sup>※9</sup>に準拠する。

### 3. ページのフォーマット

#### 3. 1 全体のフォーマット

A4 サイズの用紙を用いる。原稿全般にわたり横書きとする。原稿の余白は上下各 20mm、左右各 15mm とする。行間はシングルスペース（固定値で行間 14pt 程度）とする。Microsoft Word の場合、固定値で指定すると行間が自動調整されず、見映えがよい。ただし、数式の関係で固定値を使えないときは、最小値などを用いても良い。見た目を重視して、体裁を整える。この文書は、1 行 4~6 文字、行数は要約の行数にもよるが、5~5 行程度とする。

段落の最初は字下げする。また、段落間に空行はいれないようにする。章タイトルの前後には 1 行の空行をいれる。節タイトルの前にも空行をいれるが、この世の様に昭タイトルと説タイトルが連続するときは

空行は 1 行のみとする。また、節タイトルの後に空行はいれない。タイトルが段やページの 1 行目に来るときは、タイトルの前に空行を入れないものとする。

ページの最初に以下の項目を 1 段組で記載する。  
・日本語原稿タイトル(14pt、ゴシック系フォント)。  
・日本語著者名(12pt、明朝系フォント)。  
・英語著者名(12pt、Times 系フォント)。  
・要約(8pt)。ABSTRACT(8pt)。  
・キーワード(8pt)。ただし、1 行に収まる個数。

続いて、2 段組で本文原稿を記述する。本文の文字の大きさは、10pt とする。中央の空白の間隔は 8mm 程度の段組とする。2 ページ目からは最初から段組で行うこと。

### 3. 2 フォント

フォントについては、以下のように定める。

- ・原稿タイトル、章と節のタイトル、図表のキャプションはゴシック系フォントとする。
- ・英語著者名などの英文字は、Times New Roman または類似するフォントとするが、明朝を使っててもよい。この解説では、本文中は明朝で統一している。Times を使った場合は、英文字が太字に強調されて見えることがあるので注意する。
- ・本文を含め、その他は明朝系フォントを用いる。

### 4. 章、節タイトルおよび数式番号

章タイトルは 12pt、節タイトルは 10pt のゴシック系フォントとする。番号は、章番号には 1. 2. . . . の連番を、節番号には 1. 1 や 2. 3 などを用いる。原稿の構成上必要であれば、さらに小節を設けても構わない。小節の番号については、2. 3. 1 のようにするか、(a) のようにするかは、自由とする。数式の番号は論文の最初から連番で振り付け、(1) や (2) のように( )カッコを用いて、番号付けを行う。

## 5. 図・表

表 1: サンプル表

		y			
		u	N	Z	P
r	N	N	N	Z	
	Z	P	Z	N	
	P	P	P	P	

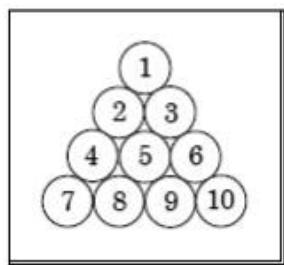


図 1: サンプル図

表のキャプションは上に、図のキャプションは下につける。図表の番号はそれぞれ図と表を別々に連番とする。

図表のキャプションは 8 pt とし、センタリングする。段の最後やページの最後でタイトルのみにならないようする。

図表中の文字は本文の文字の大きさよりやや小さめの 8 pt 程度の大きさにすると、バランスがよい。図表はページの最初や最後に配置するとバランスがよい。原則的に、本文の段落幅を変更しないようにする。また、図表は必ず本文中で言及し、図表の前後には空行をいれて、本文との境界をはっきりさせるようする。

## 6. 参考文献

研究を整理するために用いた参考文献は、参考とした該当個所に[1]のように番号をつけて参照する。複数の参考文献を参照する場合は、[1, 2] や [1-3] のようにする。番号は、本文中にでてきた順序か著者名のアルファベット順かどちらでもよい。原稿の末尾に各文献についての情報を、文献の言語（和文または英文）、および雑誌に掲載された原稿、書籍、Web ページのいずれかにより、次のような順序で記述する。参考文献欄に、日本語論文[1]、英語論文[2]、日本語講演予稿集[3]、英語講演予稿集[4]、日本語書籍[5]、英語書籍[6]、ホームページ[7]の順で記載する。

英語と日本語で論文タイトルの後のコンマとダブルコートーションの位置関係が異なっていることに注意する。また、参考文献番号を明確にするため、文献情報の 2 行目以下を字下げして記載する。英語の書名にあたる部分はイタリック体にする。出版された年については、わかる範囲で、出版月も記載する。また、書籍については、出版社の後に出版社の場所を記載し、最後に総ページ数を記載する。ホームページアドレスの

場合、管理者名がわからない場合は、名前を省略してもよい。

## 書籍

例 1 国立天文台編. 理科○○年表. ○○出版, 2022. 7  
(編者) (書名) (出版社) (発行年, 月)

例 2 Taro,Z. et al The Math. 7<sup>th</sup> ed., Publishing Co., 2023, pp.111-201  
(著者) (書名)(版)(出版社) (発行年)(引用ページ範囲)

\* 著者が多数の場合それ以下の著者を省略する場合 et al. と書くことがある。

## 論文（雑誌）

例 1 謝所太郎. 「理数科次世代型課題研究への挑戦」 2023  
(著者) (論文タイトル) (発行年)

例 2 Journal of ○○, 2023, Vol.17, No.11, p.25-50  
(雑誌名) (発行年) (巻数, 号数) (論文のページ)

## インターネット上の資料

文部科学省. “高等学校学習指導要領(平成 30 年告示)開設 理数編 平成 30 年 7 月”

(著者) (Web ページの題目)

[https://www.mext.go.jp/content/1407073\\_05\\_1\\_2.pdf](https://www.mext.go.jp/content/1407073_05_1_2.pdf) (参照 2022-07-07)

(入手先)

(閲覧日)

## 新聞

滋賀新聞 (2022). 「123 番目の元素「セゼニウム」謫所研世界初命名へ」.

(新聞名)(掲載年) (記事のタイトル)

滋賀本紙 12 月 4 日朝刊.

(地域, 掲載日)

## 7. チェック

提出に当たり、指導担当教員のチェックを必ず受けること。提出後、論文の内容の点検は行わないので、文責は各班でもつ。

## 8. IMRAD フォーマット

Introduction, (Material), Methods, Results And Discussion (And Reference) の略

「文章構成のスタイル」のひとつ。文章の中のあるまとまりを持ったひとかたまり（構成要素）を、機能面（文章の中でどういう役割を果たしているのか）から分類し、それらをどのように配列するのかを定めたルールのこと。この構成は科学的方法と相性がよく、学術論文においてよく使われる。特に実験系の学術誌に掲載される論文ではほとんどがこの IMRAD 型の構成をとっている。通常は Introduction の前に Title (タイトル:T) をおくことや、Discussion の後に Conclusion (まとめ:C) を書くことがほぼ必須で、Title の後 (Introduction の前) に Abstract (アブストラクト:A) が入るのが普通である。また、文章の要素というほどではないが、それに準ずる役割を担うものとして、文章の最後に、謝辞や参考文献一覧、脚注が書かれていることがほとんどである。

## 9. 謝辞

本校教員は書かず、外部の研究協力者、指導助言者を書くこと。