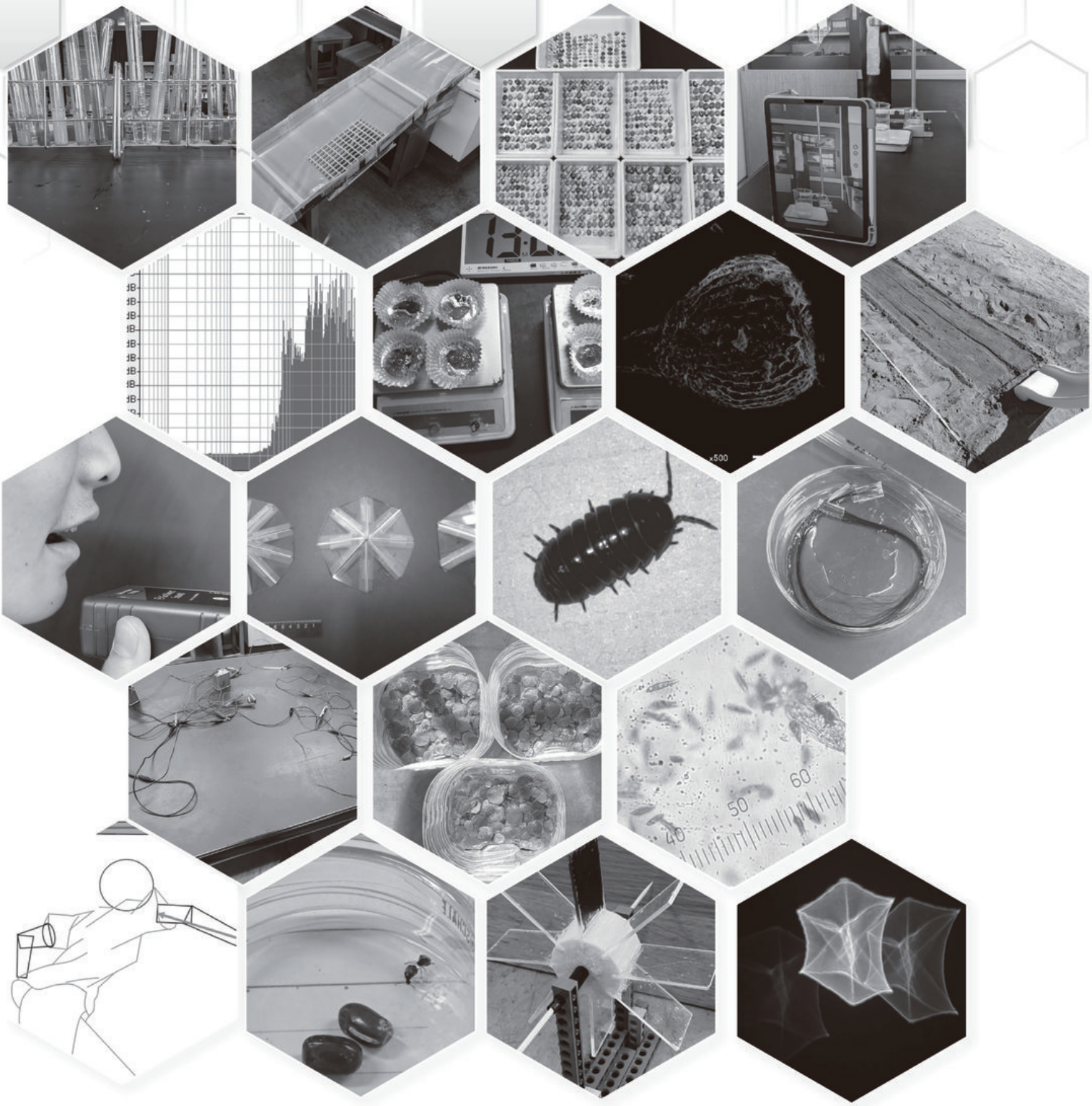


令和7年度

理数科課題研究論文集

千葉市立千葉高等学校

〒263-0043 千葉県千葉市稲毛区小仲台9-46-1
TEL 043-251-6245

目次

１．巻頭言

２．外部コンテスト成果

⑴　アサリの貝殻模様やその変化にはどのようなパターンがあるか
第１８回千葉大学高校生理科研究発表会
ＤＩＣ株式会社総合研究所研究奨励賞
令和７年度千葉県児童生徒・教職員科学作品展
千葉県教育長賞

⑵　グルコースのカラメル化反応について　第１８回千葉大学高校生理科研究発表会　優秀賞
令和７年度千葉県児童生徒・教職員科学作品展
千葉県高等学校教育研究会理科部会長賞

⑶　アズキゾウムシは這った際に付着する物質によって産卵するかを決めている
第１８回千葉大学高校生理科研究発表会　最優秀賞
第１６回坊ちゃん科学賞研究論文コンテスト　優良入賞
令和７年度千葉県児童生徒・教職員科学作品展　優良賞

⑷　炭酸塩ノジュールを用いた放散虫化石の採取
第１６回坊ちゃん科学賞研究論文コンテスト　佳作

⑸　ガラスの表面構造がもたらす光の像　第１８回千葉大学高校生理科研究発表会　優秀賞

⑹　目詰まりによる排水性能低下を改善したグレーチングの研究
第４９回全国高等学校総合文化祭自然科学部門出場

３．理数科　課題研究論文

⑴　ささやき声の類似性と聞き取りやすさへの応用 …… 1～ 6
⑵　アサリの貝殻模様やその変化にはどのようなパターンがあるか …… 7～ 15
⑶　落水のエネルギー効率 …… 16～ 20
⑷　暴露した二酸化炭素量による緑藻類の走光性の変化について …… 21～ 24
⑸　ビニール傘と空気抵抗 …… 25～ 30
⑹　水滴の動きを科学する …… 31～ 35
⑺　大気圧低温プラズマジェットの一般化 …… 36～ 39
⑻　アマゾントチカガミについて …… 40～ 46
⑼　平らなグラウンドを作るために …… 47～ 53
⑽　グルコースのカラメル化反応について …… 54～ 62
⑾　昆布エキスによる毛髪のダメージ補修効果 …… 63～ 70
⑿　アズキゾウムシは這った際に付着する物質によって産卵するかを決めている …… 71～ 79
⒀　SPY×FAMILIY ヨル・フォージャーの身体能力計測 …… 80～ 83
⒁　炭酸塩ノジュールを用いた放散虫化石の採取 …… 84～ 91
⒂　ガラスの表面構造がもたらす光の像 …… 92～101
⒃　目詰まりによる排水性能低下を改善したグレーチングの研究 …… 102～108
⒄　ダンゴムシの交替性転向反応の優先度と仕組み …… 109～113
⒅　クラシック音楽に含まれる 1/f ゆらぎ …… 114～120
⒆　グリセリンの酸化経路と生成物の特定 …… 121～129

巻　頭　言

千葉市立千葉高等学校長　尾留川　聡

ＳＳＨは、現在の本校にとって欠くことのできない、極めて大きな特色となっているところですが、簡単にその歴史を振り返ってみますと、次のようになっています。

第Ⅰ期　2002（Ｈ 14）～ 2006（Ｈ 18）５年間
第Ⅱ期　2012（Ｈ 24）～ 2016（Ｈ 28）５年間
※普通科ＳＳＨコース設置：2012（Ｈ 24）
※科学技術人材育成重点枠：2016（Ｈ 28）１年間
第Ⅲ期　2017（Ｈ 29）～ 2021（Ｒ３）５年間
※科学技術人材育成重点枠：2018（Ｈ 30）～ 2020（Ｒ２）３年間
第Ⅳ期　2022（Ｒ４）～ 2026（Ｒ８）５年間
※科学技術人材育成重点枠：2023（Ｒ５）～ 2026（Ｒ８）４年間

第Ⅰ期の後に５年間のブランクがありますが、その後第Ⅱ期からは途切れることなく継続しています。今年は通算で 19 年目に当たりますが、千葉県では本校が最も長く取り組んでいることになります。

このように長きにわたって継続できたことには、様々な要因があります。まず千葉市教育委員会からの全面的なバックアップがあった上で、ＳＳＨ運営指導委員、評価委員の方々の親身な御指導・御助言が支えとなりました。また、本校の先生方の献身的な指導がなければ絶対に成り立たちませんでした。「仕事」とか「業務」という枠を超えて、皆さんに何とか少しでも役に立つことをしてあげたいという「思い」があればこそ、ここまで継続できたのです。また、直接みなさんを指導している理数教科の先生方に加え、それ以外の先生方がいかにＳＳＨの意義を理解し、いかに協力するかということも不可欠な要因です。

しかし何より、生徒の皆さんがいかに取り組むか…これが最も重要であることは言うまでもありません。先輩方がこれまでに残してきた素晴らしい成果や実績…これがあるからこそ、19 年も継続できたのです。

しかし、このような伝統の「重み」や先生方の「思い」を皆さんにぜひ感じてもらいたいと思う一方で、そのようなことはさておき、シンプルに自らの好奇心や探究心に突き動かされて、それぞれの研究に没頭し、邁進する…それが一番なのだ、という思いもあります。実際、皆さんの取り組む姿を見ていると、一人として「やらされている」という人はいないと感じます。純粋に「知りたい」、そして研究した成果を「伝えたい」…そういう「思い」がヒシヒシと伝わってきます。この気持ちこそが科学技術従事者のベースになるものであり、「全て」であると言ってもいいのかもしれません。皆さんの姿は大変頼もしく、その姿は必ずや後輩たちに引き継がれていくものと確信しています。

課題研究論文集　担任・理数科長　挨拶

理数科担任　　齋藤　千紘

担任としてクラス全員の前で話した内容はあまり覚えていませんが、３年間で唯一覚えている話があります。大島研修の最後の夜のことです。「この研修を通して、理数科には理科の知識だけでなく、発表するための国語力や、班員や先生とやり取りをするコミュニケーション能力など理科以外の力も必要だと分かったと思う。その力を３年間で身に着けてほしい。」多分このような話をしました。論文を書く力、わかりやすく伝える力（特に『理系でない担任にわかるように伝えなきゃ！』と考えてくれたので特に優れています）、担当の先生とやり取りをするコミュニケーション能力、Abstract を書く英語力、教授や大勢の人の前で発表する度胸。

もちろん、理数探求・課題研究以外の、普段の授業やアメリカ研修、報告会などを通して、理科の力はもちろん、私が理数科で身に着けてほしいと伝えた力を大島研修のときから確実に伸ばすことができました。

H 組は全員、最初に私が「こうなってほしい」と願った通りの力を身に着けてくれました。それが私はとても嬉しいです。これらの力は、この先の将来で皆さんのことを大いに助けてくれます。理数科での３年間を通して必要な力を身に着けられたことを誇りに思って、この先の進路でも頑張ってください。素晴らしい論文集をありがとう！

理数科長　　古橋　健太

皆さんは理数科として、３年間、課題研究やフィールドワーク、勉強、部活動など多くのことに取組んできました。本当に忙しかったと思います。その結果、この３年間で皆さんは多くのことにチャレンジし、多くの成功体験や失敗も経験したと思います。これらの多くの経験を経て、入学したときと比べて、とても力がつきました。それは皆さんが頑張ったのはもちろんですが、担任の齋藤先生を中心に多くの先生方が皆さんのために力を尽くして、時に厳しく、時にやさしく支えてくれたからです。今後も感謝の気持ちを忘れず過ごしてほしいと思います。

また、今後の人生においても上手くいかないこともたくさんあると思います。それでも、志高く、小さくまとまらずに思い切って多くのことにチャレンジしてほしいと思います。失敗してなかなか前へ進めないときは、弱音を吐いたり、泣いたりしても良いと思います。それでも最終的には、前を向いて進む力をみんなはもっています。

10 年後も 20 年後もその先も、皆さんの人生が幸せなものであることに期待しています。

アサリの貝殻模様やその変化にはどのようなパターンがあるか

千葉市立千葉高等学校　2年　石井悠介 西村直純 松浦圭吾

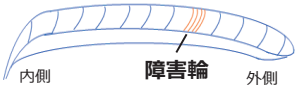
1. アサリの貝殻模様について

・同種で多様な模様を形成する生物は珍しい。
・左右対称の体を持つ種が左右の殻で異なる模様を作るのも珍しい。
・アサリの模様は遺伝的・環境的要因の両方が関連し、模様形成のメカニズムはほとんど解明されていない。

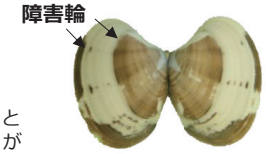
2. 貝殻の成長と貝殻模様の変化

貝殻は外側に付加して成長する。
潮位に合わせて1日2本線ができる。

環境変化等により成長が妨げられると線の間隔が狭まり、**成長障害輪**（以下障害輪）が形成される。



障害輪形成後、**模様の種類が変化する**個体もみられる。



【 模様が変化した貝殻の一例 】

3. 研究目的

どの模様が障害輪形成前後で変化が起きやすいかを検証する

多様な貝殻模様の形成には遺伝や環境などの要因が複合的に作用しており、模様の形成要因を調べるのは困難。そこで、環境変化が起き障害輪を形成したタイミングで変化する模様の把握をすることで、環境要因に対して影響を受けやすい模様が推測できると考えた。

4. 研究方法と貝殻模様の種類

1. 千葉みなとの海岸で両殻の揃った貝殻を採取
2. 以下のように目視で模様を分類　3. 模様の変化の有無を判別

【 模様の分類 】 池田 1893, Taki 1941, 張ら 2013 を参考に分類

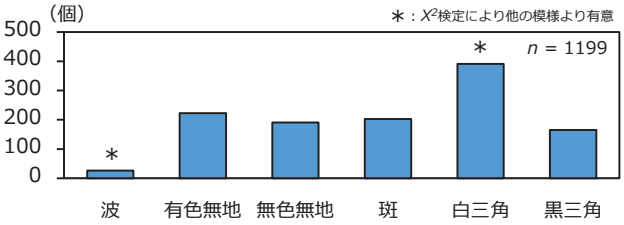
波　**有色無地**　**無色無地**　**斑**　**白三角**　**黒三角**

非対称模様

左殻の後端が着色する模様。非対称の模様をつくる遺伝子は、上記に挙げた模様をつくる遺伝子とは異なる遺伝子座に存在し、非対称は対称に対して顕性と考えられている（張ら 2013）。

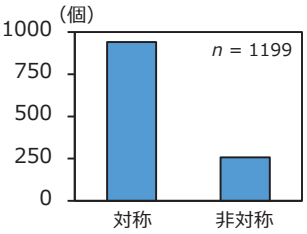
5. 結果

A. どの模様のアサリが多かった？

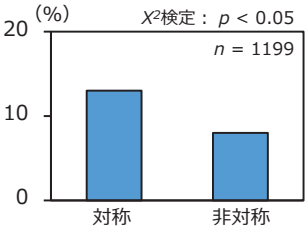


B. 左右非対称模様のアサリ

対称模様と非対称模様の個数



模様変化が起きた割合

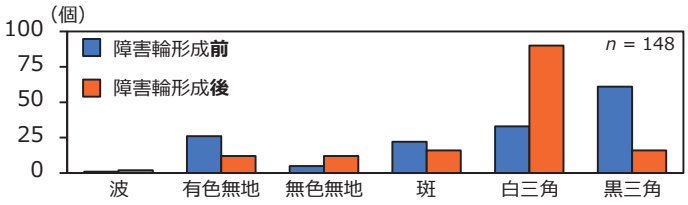


非対称模様は対称模様よりも模様の変化が起きにくい

↳ 非対称模様でも、対称模様と同様に障害輪が形成されている。

C. 変化しやすいのはどの模様？

障害輪を境に模様が変化した殻について、障害輪前後の模様パターンを集計



障害輪形成**前**の模様

色素がある模様が多い

障害輪形成**後**の模様

白三角の模様になる殻が多い

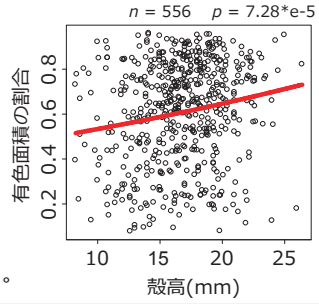
D. 三角模様の特徴

障害輪形成後に一部の場所から色素が出始めて、徐々に色素の範囲が広がることから模様が三角形に見える。

三角模様の個体は、成長に伴い色がつく面積が増えるのでは？

三角模様とした殻について、グレースケールにし、殻面積に対する有色面積の割合を求めた。

殻高と有色面積の割合の関係



6. 考察

・非対称模様について

障害輪が形成されていても、非対称模様をもつ殻は模様変化が起きにくいことから、非対称模様は環境要因よりも遺伝的要因により発現がコントロールされている割合が強いと考えられる。

・障害輪後の模様変化について

変化しているアサリの障害輪の直後に無色の割合が増加し、その後有色の割合が徐々に増えていくという傾向がみられた。この蓄積が三角模様として表れていると考えた。このことから、外部からの刺激によってアサリの貝殻の着色が妨げられていることが考えられる。

障害輪前には有色の殻を形成していたが、障害輪直後には無色の殻を形成することが多い。

アサリの持つチロシナーゼがメラニンを生成し、メラニンが貝殻に沈着することで着色される。感染防御に関わる遺伝子であるエラスターゼ活性が白色アサリで有意に高く、メラニンの沈着を阻害している可能性が示されている(Jiangら2020)。環境変化によるストレスがエラスターゼ発現の活性化や、メラニン生成の阻害を引き起こすことで模様の形成の中断、変化が起こると考えられる。

上記の作用の起きやすさが個体によって異なることが、模様形成の多様化を生じさせている？

グルコースのカラメル化反応について

千葉市立千葉高等学校　理数科２年　加藤夕凪　鈴木正太朗

(1) 目的と仮説

目的：グルコース(以下Glc)のカラメル化の反応機構を明らかにする。

仮説：Glcを加熱すると脱水反応を起こし、Glcの重合体を形成する。またはHMFを生じた後その誘導体を生じる。

(2) 実験１「Glcを加熱した際の様子を調べる」

方法
Glc 1.00 g を250 ℃ のホットプレートで加熱し、加熱開始から一定時間*が経過したときに回収し（以下カラメル）、物質の様子を観察して質量を測定した。

＊0, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 11, 14, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 ,130, 160 分で回収した。

結果

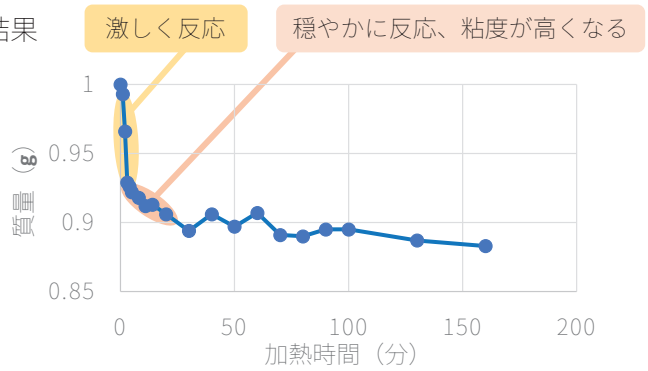


図1 Glcを加熱したときの質量変化と反応の様子

(3) 実験２「褐変物質が還元性を持つかを調べる」

方法
各カラメル(実験1で得たもの)0.01 g に、フェーリング液２mLを加えて加熱した。

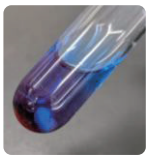


図2 加熱後のフェーリング液

結果
すべてのカラメルでフェーリング反応が見られた。

(4) 実験３「カラメルの分子の変化を調べる」

方法
各カラメルの、質量パーセント濃度2.4%の水溶液を、シリカゲルによる薄層クロマトグラフィー（TLC）で分離し、ヨウ素で検出した。展開には1-プロパノール：酢酸：水＝4：1：1の溶媒を用いた。

結果

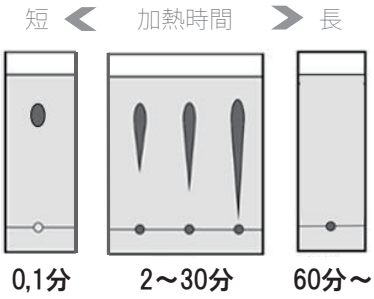


図3 加熱時間によるTLCの呈色域の推移

(5) 実験４「分子の大きさの変化を調べる」

方法
0～100分の一部のカラメルの5%の水溶液を72時間以上透析した。その後、それぞれの内液・外液に対し、

①フェーリング反応、ヨウ素デンプン反応、チンダル現象の有無を確認した。

②200nm～800nmの範囲で、吸光度測定を行った。

結果
①内液と外液のいずれも、以下のようになった。

表1 各水溶液の内液・外液が示した反応

フェーリング反応	すべての溶液で見られた
ヨウ素デンプン反応	すべての溶液で見られなかった
チンダル現象	1分以上のすべての溶液で見られた

②0,1分の溶液は吸収が見られなかった。2分以降の溶液は内液と外液で、それぞれ300nm付近がピークの吸収が見られた。

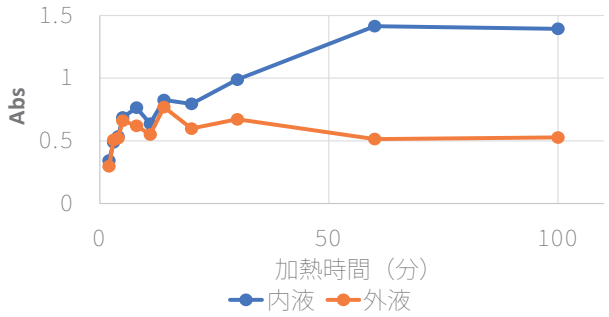


図4 300nm付近におけるAbsの変化

(6) 考察

①脱水反応が分子内脱水の場合
0～20分で分子内脱水して色がつき、中間体となる。それとほぼ同時に物質のやりとりを伴わずに中間体が重合し、最終生成物になる。

②脱水反応が分子間脱水の場合
0～20分で脱水縮合し、中間体が生じた後、すぐに色がつく。その後、ほぼ同時に物質のやりとりを伴わない重合が起こって最終生成物になる。

(7) 展望

・特定の官能基のみを検出できる試薬でTLCを行う。
・流水中での透析を行う。

参考文献　福岡美海ほか『スクロースのカラメル化はどのように進むのか』，山崎光廣ほか『薄層クロマトグラフィーによる各種糖類の分離』

アズキゾウムシは這った際に付着する物質によって産卵するかを決めている

千葉市立千葉高等学校　木下春花　博野真琴　松本亜澄

アズキゾウムシとは

オス

メス

- 体長２～３mm程度（成虫）の昆虫
- 豆類の表面に産卵
- ふ化後豆の内部に入り、豆を食べて成長
- 成虫になると殻を破り、豆の外へ
- **成虫は産卵する豆類を選択する**

先行研究

① アズキには卵数が均等になる（**一様分布**）ように産卵
➡何らかの方法で産卵されたアズキかどうかを認識している
② 成虫がアズキ上を這うと化学物質が付着する
③ 産卵する豆（産卵基質）の種類や状態を認識・選択する

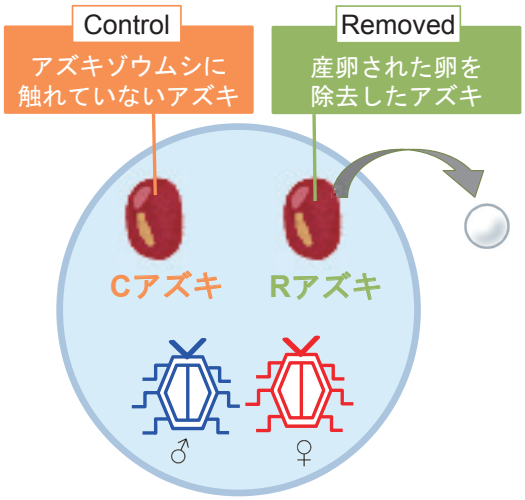
研究目的

アズキゾウムシは何により産卵されたアズキを認識しているのか

仮説
- 視　　覚：卵の有無の目視
- 触　　覚：卵の有無 による凹凸
- 化学物質：成虫が這った際に付着する物質

実験方法

付着卵数 平均28.7個



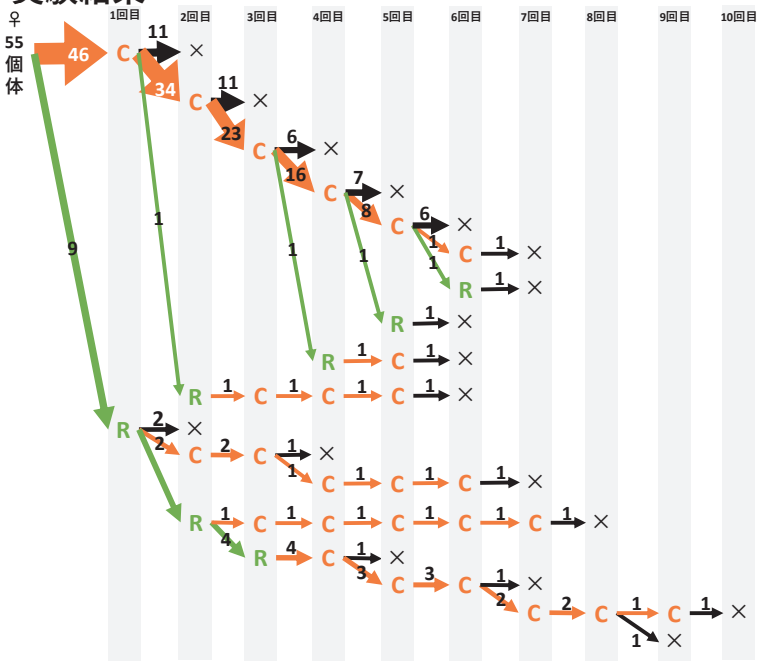
♀アズキゾウムシを30分間観察

観察中に両方のアズキ上を這い、１個以上産卵したものを結果として表した。

観察結果

- 産卵前に両方のアズキ上を這った
  ➡必ず**C アズキ**に産卵した
- **R アズキ**に産卵した後**C アズキ**を這った
  ➡必ず **R アズキ**への産卵をやめ **C アズキ**に産卵し始めた

実験結果



C：Cアズキに産卵　R：Rアズキに産卵　×：以後産卵なし

- **84%** の個体が最初に**C アズキ**に産卵する
- １回目 **C アズキ**に産卵➡**91%** の個体が**C アズキ**に産卵し続ける
- １回目 **R アズキ**に産卵➡ **C アズキ**を這うと**C アズキ**に産卵し始め、**R アズキ**に戻る個体はない
- 産卵するアズキの選択は複数回行われる

考察

- **アズキゾウムシは成虫が這った際に付着する化学物質によって卵の有無を認識し、産卵するかを選択する**
- **産卵基質がアズキの場合、化学物質には産卵忌避効果がある**

展望

先行研究より産卵基質がガラス玉の場合、この化学物質には産卵誘導効果がある可能性が考えられる

参考文献
Utida S,1943,studies on experimental population of the azuki bean weevil, Callosobruchus chuinensis (L).VIII,Statistical analysis of the frequency distribution of the emerging weevils on beans.Men,Coll.Agric,Kyoto Imp.Univ.54: 1 22.

炭酸塩ノジュールを用いた放散虫化石の採取

千葉市立千葉高等学校 2年H組 貞元 公希

目的

日本では地層の重なりが不規則なことが多く，層序を読み解くために形態の変化の速さが適切である放散虫化石を用いることは有効だ．放散虫化石の採取方法はチャートをフッ酸処理したものが一般的であり，劇薬が必要なこの方法は高校生では用いることができない．そこで，塩酸処理で放散虫化石を採取できる炭酸塩ノジュールを用いることにした．

炭酸塩ノジュールの採取

安房小湊駅近くの実入海岸にある中新統天津層からノジュールを5つ採取した(図1)．この層は凝灰質泥質砂岩や砂質泥岩，凝灰岩から形成されており，採取したノジュールの他にもノジュールや生痕化石が見られた．

図1. 左. 実入海岸の場所，中央. 実入海岸の様子，右. 採取したノジュール

実験

採取したノジュールに対して，以下の手順で塩酸処理を行い試料を作成した．

1. ノジュールを砕いたものを50ml ビーカーに入れ，約1mol/L の塩酸に浸し，数日間置く．
2. ふるい(網目53 μm)を用いて残渣を回収する．
3. 回収した残渣をシャーレに広げて常温で乾燥させる．

観察

生物顕微鏡(倍率150～600)および千葉大学にある走査性電子顕微鏡を用いて試料の観察を行った（図2)(図3)(表1)．

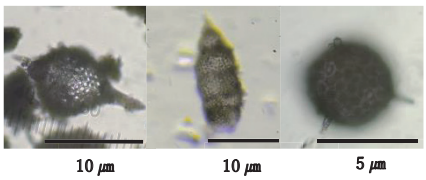


図2. 生物顕微鏡で観察した放散虫化石

表1. 観察できた微化石

	発見した数(個体)	SEMで観察した数(個体)
放散虫(Nassellaria)	46	13
放散虫(Spumellaria)	11	4
珪藻	11	5
カイメン	1	1
その他	3	0
合計	72	24

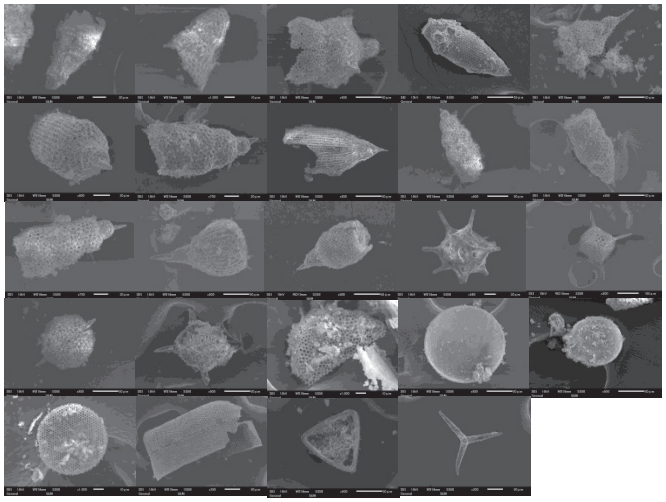


図3. 電子顕微鏡で撮影した微化石の写真

走査性電子顕微鏡で観察したものは，生物顕微鏡で観察したものに比べてポアの形だけでなく骨格の表面の様子や，スパイン(先端の突起)の構造などを見ることができた．保存状態のよいものはフッ酸処理をしたサンプルよりも骨格が綺麗だった．

その一方で，図4の赤丸部分のように一部の微化石に泥のようなものが付着していた．

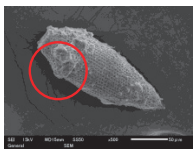


図4. 泥のようなものの写真

考察・今後の展望

今回の研究で高校の施設でも放散虫化石の採取し観察することができることがわかった．また塩酸処理をしたにも関わらず溶け落ちていなかった部分があることから，今回の試料にこびりついていた泥のようなものはドロマイトであると推定される．ドロマイトは石灰岩中の炭酸カルシウムの一部がマグネシウムに置き換わったもので，塩酸処理では取り除くことができないため試料の処理工程を見直す必要があることがわかった．

今後の展望としては今回の試料と処理工程を変えた試料の表面を比較することや，放散虫の種の同定，ノジュールと周辺の地層の年代比較を行いたい．

参考文献

芳賀正和・小竹信宏，1996，房総半島南部中新世天津層下部の珪藻化石年代，地質学雑誌，758-760 /尾田太良・佐藤時幸，2013，「新版　微化石研究マニュアル」，朝倉書店/谷村好洋・辻　彰洋，2012，「微化石　顕微鏡で見るプランクトン化石の世界」，東洋大学出版会

Akihide Kikukawa, Yasuhide Nakamura, Kazuki Kikuchi, Noboru Fukukawa and Yoshiaki Aita, 2024, Exceptionally well-preserved radiolarian fossils within Miocene trace fossils from the Amatsu Formation, Chiba, Japan. Lethaia

radiolaria@milkrotax,https://www.mikrotax.org/radiolaria/cenozoic/Cycladophora_cosma_cosma

表面構造があらわす光の像

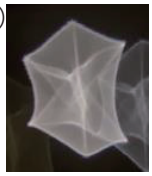
市立千葉高校　2H

鈴木寛人、渡邊捷斗、星野大空

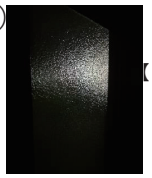
動機と目的

夜間に当校の窓ガラスを観察した際、外部の光に照らされ、以下の①の像が見られた。

③ ⇔ ②　①



↑学校で撮影した像



↑作成者の家で撮影した像

↑学校の窓の表面構造

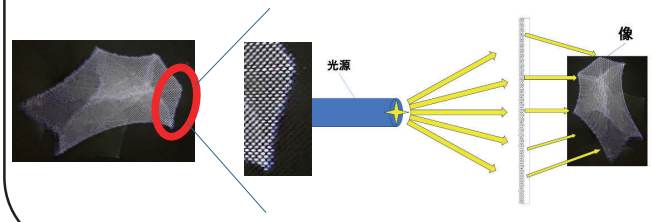
・②のガラスと比べ、光が一つの図形のように明暗がはっきりして写っている

➡ ガラスに表面構造が観察されたことから、表面構造がこの現象に起因しているか？また表面構造の違いで形はどのように変化するか？

仮説

・像の明暗が明確に分かれている。

➡光が表面構造によって屈折し、特定の形に収束しているのではないか。



実験

・表面構造を凸構造として、再現しそこに光を照射して像を観察する

実験器具

- 青色レーザー
- 凹レンズ(直径 75mm、焦点距離約 250mm)
- 透明ビーズ(直径 4mm)
- アクリル樹脂板(180×320mm, 厚さ 2mm)
- ケース
- スタンド６台
- 万力２個

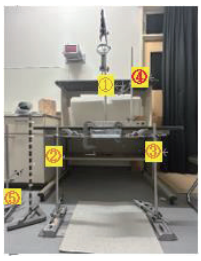
(A)

実験方法

① 暗室に図 A のように器具を設置しレーザーをレンズ、ケースの中心に当たるように調整。

② レーザーを傾けながらケース右奥から左手前にかけて順に照射する。(ケースとスクリーンをそれぞれ撮影する)

③ ①,②のケースを 15~55cm まで 10cm 刻み、凹レンズを 25~50 まで 5cm 刻みで計 30 回行う。



評価方法

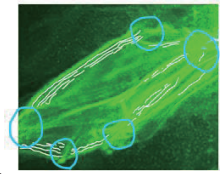
スマートフォンで撮影した動画を以下の評価基準に基づいて２名で確認した。

① 像が多角形に酷似しているか

② 像の縁が層状になっているか

→レーザーを外部から照射し、スリットに照射した際、層が現れたため

できた場合は像の大きさや形をスケッチして形状を観察する。



縁が折れ曲がるところを頂点とするとき、左の写真は５角形とみなすことができる。

結果

・今回の実験では、像は観察できずほぼ大半が図⑤の様になっていた。

・また、図④のように光の線がのびているのが、ビーズの奥側を照射したとき多く見られた。

④

⑤

考察

・今回の実験では像が現れなかったため考察できないが、像の前段階である光の像は図⑥のようなとき、光がビーズの接するところで遮られてできず、図⑦のような隙間があるときに光がより長く映るためできるのではないかと考えられる。

⑥

⑦

よって、凸構造の配置（隙間）画像の有無や形状に関係しているという可能性があると考えられる。

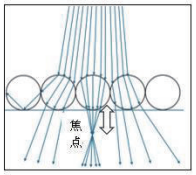


図 24 レーザー光の光線追跡

← ・・・光

【レンズメーカーの公式】

$$\frac{1}{f} = (N-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

f：レンズの焦点距離　n：レンズの屈折率

R_1：第一面の曲率半径　R_2：第二面の曲率半径

（Adachi Yuki,「球面レンズの種類」，光学技術の基礎用語より引用）

←両矢印の部分が焦点距離である。また、図 24 はイメージ図であり、厳密な光線追跡の図ではない。

展望

考察に基づき、ビーズ間に隙間を作るなどビーズの配置を変えて再度実験を行う。

光の照射範囲や種類を変えるなどもしていきたい。

参考文献

高校数学でわかる光とレンズ　竹内淳

札幌デザイン株式会社，2025,「材料の屈折率《光学》Material IOR(Index of Refraction Values)List」（2025 年 2 月 10 日取得，材料の屈折率一覧表 | Material IOR List - 札幌デザイン制作会社 A4JP

目詰まりによる排水性能低下を改善したグレーチングの研究

千葉市立千葉高等学校　理数科　2年H組　寺下慧周

1 動機・目的

グレーチングは側溝を覆う蓋である。この研究では、落ち葉や土砂による目詰まりが引き起こす排水性能低下を抑えるL型側溝における、グレーチングの形状に注目し改善された構造を考察することを目的とした。

図1 落ち葉や土砂等によって閉塞されたグレーチング

2 仮説

以下のようにグレーチングの構造を変化させることで、従来型グレーチングの抱える課題を改善できると考える。

❶バーの形状・大きさ・間隔等を変化させる。
▶上面の凹凸の大きさによって堆積のしやすさが変化する。

❷先行研究で提案されている、中央が窪んだ形状にする。
▶L型側溝の流れに沿わない形で異物が堆積しようとする。

3 実験手順

1 ㈱中部コーポレーションVG5M44-34を60％に縮小し、3Dプリンターで作製した。（図3，図4，図5の三種類）

使用した物

3Dプリンター	ダビンチ mini w+
スライスソフトウェア	XYZprint（ver 2.1.1）
3DCAD	AutodeskFusion（ver 2.0.19941）
フィラメント	PLA樹脂素材（メーカー純正）

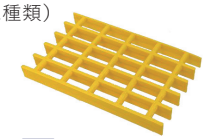


図2 3Dプリンターで作製した従来型のグレーチングモデル

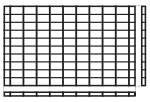


図3 従来型モデル

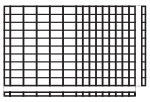


図4 バー間隔変化型モデル

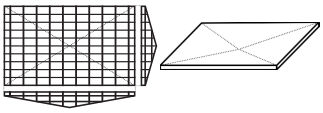


図5 ▲中央窪み型モデル ▶立体的にモデルを見た図

2 L型側溝のモデルを段ボールで作製し、ビニールシートで全体の表面を覆った。作製したモデルを図6のように組み立てた。

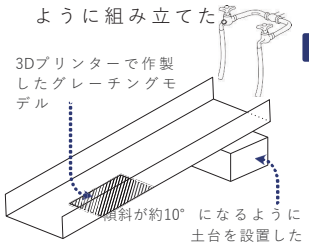


図6 モデルの組み立て図

3 学校周辺で収集した落ち葉をL型側溝のモデル上に約5 cmの間隔で合計 39 枚設置した。水を流し、落ち葉の動きが見られなくなった時点で水流を止めた。

4 落ち葉の堆積状況を図7のようにそれぞれの長さを記録した。なお、流した水量を時間とともに記録した。

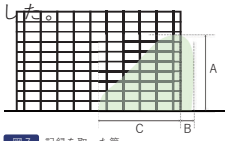


図7 記録を取った箇所

4 実験1｜堆積の特徴を調べる。

従来型のグレーチングにおける落ち葉の堆積する特徴を調べた。

実験条件

グレーチングモデルは従来型モデルを用いた。落ち葉は学校周辺で収集した落ち葉を5 cmの間隔で合計39 枚設置した。

実験結果

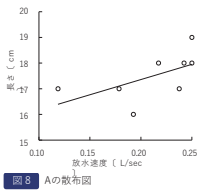


図8 Aの散布図

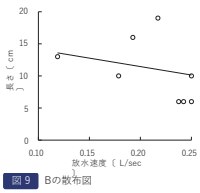


図9 Bの散布図

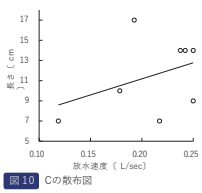


図10 Cの散布図

結果からの考察

- B．水量が多くなるほど、幅が縮まった。
- C．水量が多くなるほど、幅が広がった。

▶ **すべての水がグレーチングの端で落下し、それ以上奥に葉が移動しない。**

5 実験2｜落ち葉をビニールシートで代用する。

実験1で落ち葉を使用したが、モデルに用いたビニールシートとの接触状況から摩擦が大きく多量の水が必要であった。実験で使用する水量を減らすために、実験2では落ち葉をビニールシートで代用し、それによる影響について調べた。

実験条件

落ち葉をビニールシートに置き換え、60％に縮小した。それ以外の条件はすべて実験1と同様に設定した。

実験結果

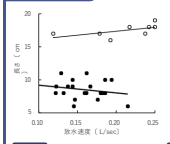


図11 Aの散布図

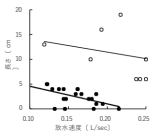


図12 Bの散布図

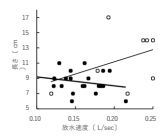


図13 Cの散布図

○ 実験1
● 実験2
—— 実験1
····· 実験2

結果からの考察

A・B　近似曲線の傾きが概ね等しい。▶ **落ち葉をビニールシートで代用しても、実験結果に影響がないとみなせる。**

6 実験3｜バーの間隔を変化させる。

半分のバーの間隔が小さいグレーチングにおける落ち葉の堆積する特徴を調べた。

実験条件

グレーチングモデルをバー間隔変化型モデルに変え、実験2と同様の条件で実験を行った。

実験結果

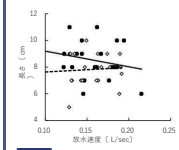


図14 Aの散布図

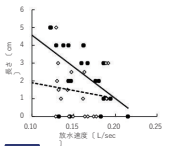


図15 Bの散布図

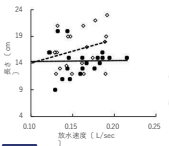


図16 Cの散布図

● 実験2
◇ 実験3
····· 実験2
- - - - 実験3

結果からの考察

A・Bが短くなった **A・B の部分に堆積するビニールシートが減った。**

Cが長くなった **C の部分に堆積するビニールシートが増えた。**

▶より多くの水がグレーチング中央付近まで流れるようになった。

7 実験4｜窪んだ形状にする。

参考文献[1)]で言及されている中央が窪んだグレーチングの効果を調べた。

実験条件

グレーチングモデルを中央窪み型モデルに変え、実験2と同様の条件で実験を行った。

実験結果

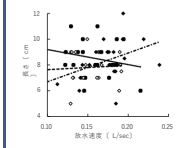


図17 Aの散布図

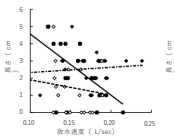


図18 Bの散布図

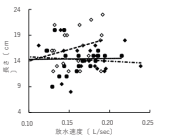


図19 Cの散布図

● 実験2
◇ 実験3
◆ 実験4
····· 実験2
- - - - 実験3
-·-·- 実験4

結果からの考察

- A・B は、0.10 - 0.17 L/secで、長さが短くなった。
- C は、0.10 - 0.17 L/secで、長さが長くなった。

▶特定の水量では，堆積する位置が中央方向に移動した。

参考文献

1)道路構造の変化に対応した雨水の排除機能に関する考察
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jswa/56/679/56_jswa.56.679_88/_article/-char/ja/

2)路面排水能力を向上させたグレーチングの開発
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/72/4/72_I_313/_article/-char/ja/

3)㈱中部コーポレーションVG5M44-34
https://www.chubu-net.co.jp/kenzai/size_pdf/vg5m44-34.pdf

理数科　課題研究論文

ささやき声の類似性と聞き取りやすさへの応用

理数科　青山 祐樹

Abstract

First, during my research, a “whispering voice” is defined as a type of voiceless sound produced without vibration of the vocal cords. I noticed that my whispering voice sounded the same as that of others, so I researched whether whispering voices differ between individuals and how they vary. For the experiment, I recorded the whispered vowel /a/ from 20 teenagers. Next, I examined whether there were differences in frequency distribution among whispering voices in different groups, based on multiple factors such as age and gender, using standard deviation. Additionally, I estimated the confidence interval of the mean deviation using a t-test. As a result, the standard deviation in comparisons between different genders was significantly different from that in comparisons within the same gender, indicating that whispering voices do not differ significantly between individuals of different genders. Future research will involve expanding the data set and comparing whispered sounds with voiced sounds.

要旨

ささやき声とは，声帯を振動させずに発する，無声音の一種である．偶然他人と自分のささやき声が同じように聞こえる事に気がついたため，本研究では，そのささやき声が違うかどうか，またどのように違うかを研究した．実験方法は，10 代において 20 人の「あ」の声のささやき声のデータを取った．そのデータを年齢や性別などの複数の条件で，標準偏差を用いて，集団ごとに声における周波数の分布に違いが見られるかどうかを検証し，t 検定で偏差の平均値の信頼区間を推定した．その結果，同性間の比較と異性間の比較では大きな差が見られなかった．今後は，データの採取量を増やし，また有声音と比べていきたい．

1. 序論

「ささやき声」「有声音」及び「無声音」は，先行研究において様々に定義されている．そのため，本論でのそれらの用語の使い方を，平岡（2021,22-24）を参考にしてここで定義する．

「有声」「無声」という語は，音韻的な意味と音声的な意味の両方で用いられる．これらの本研究での定義を以下の平岡（2021,22）を用いて説明する．

たとえば日本語のタ行の子音音素 /t/ とダ行の子音音素 /d/ は、音韻的な「有声性」という弁別素性によって対立する「無声音素」と「有声音素」である。

通常の発話において「タ」・「ダ」と発話したとき、子音音素はそれぞれ［t］・［d］というように、声帯振動を伴わない閉鎖音とそれを伴う閉鎖音、すなわち音声的な「無声音」と「有声音」として実現する。一方、1.1.2 節で述べるように発話のあいだ一貫して声帯振動を伴わない「ささやき発話」のなかで「ダ」と発音する際には、子音音素 /d/ の部分は音声的な「有声音」とはなっていない（「ささやき発話」という用語については直後の 1.1.2 節で解説する）。

本論では，「有声音」「無声音」は音声的な「有声音」及び「無声音」を指し，声帯振動を伴わずに発生された音声と定義する．また，「ささやき声」はこの定義における「無声音」とする．

ささやき声の同一性については，先行研究で検証されていることを確認できなかった．そこで，本研究では，ささやき声が個人によって有意の差があるかどうか明らかにし，有意の差がみられた場合には，それらの違いを調べることを目的とする．

2. 実験

2.1　予備実験

録音に使用するアプリケーション「 phyphox 」の項目「オーディオスペクトル」の正確性を検証するために，Go Direct® サウンドセンサと同時に音声を録音し，平均周波数及び音圧の最大・最小強度を比較した．

【方法】

双方機器のサンプリングレートを 50000/s ，録音時間を 0.4s に統一し，同時に /a/ の有声音を発声から 1 秒経過した時点で測定した．

【結果】

表 1 測定器具で計測した平均周波数と音圧

	phyphox	Go Direct® サウンドセンサ	差
平均周波数 [Hz]	116.61	116.37	0.245
最大音圧 [a.u.]	0.02074	0.02366	-0.00293
最小音圧 [a.u.]	-0.01487	-0.01636	0.00149

上記の表の結果より，平均周波数に 1Hz 以上の差がなく，最大・最小音圧にも大きな差が見られなかったため，アプリケーション「 phyphox 」の信頼性は十分にあるものと判断した．

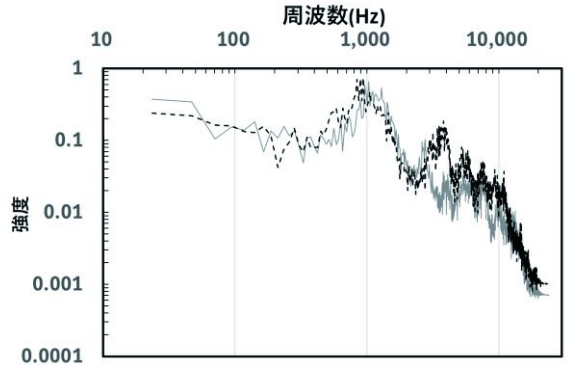
2.2　実験 1

【方法】

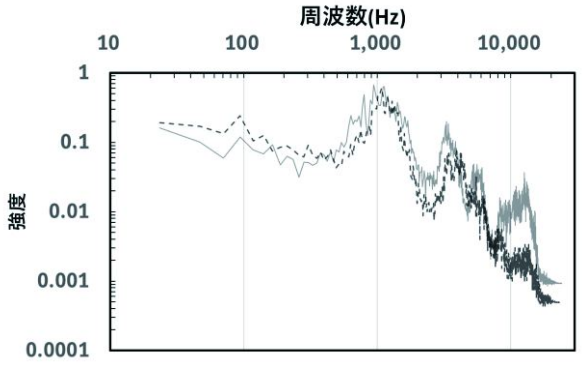
16 ～ 17 歳の男女各 3 人に自分の喉に手を当ててもらい，通常発声において声帯が振動していることを確認させた．その後，喉に手を当てたまま，ささやき発話において声帯が振動していないことの確認の後，/a/ のささやき声を 3 秒間発してもらった．発話から 1 秒が経過した後，Go Direct® サウンドセンサを用いて 0.1 秒間音圧を測定した．この操作を各人 5 回ずつ行った．

取得した音圧 – 時間データを，音声波形の形成要素である周波数の分布で比較するために，Vernier Graphical Analysis アプリケーションでフーリエ変換を行い，周波数の分布を表す強度 - 周波数データに変換した．その後，データの強度の最大値を 1 とし，他の周波数の強度を相対比率で表し，個人ごとの平均を取った．そして，取った平均のうち任意の二組をグラフに表して比較した．

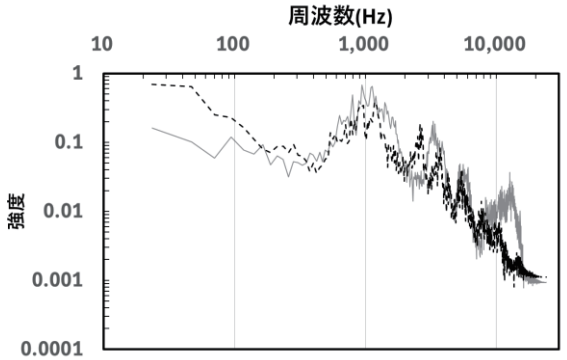
【結果】

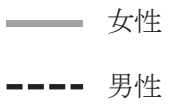


グラフ 1　男性間の比較



グラフ 2　女性間の比較





グラフ 3　異性間の比較

上記のグラフ 3 つから，ピークの周波数は男性・女性ともにおよそ 1000Hz であること，同性間では大きな違いは見られないことがわかった．また，グラフ 3 から，異性間ではグラフの概形は似ているものの，1000Hz 付近以外では同性間に比べて大きな差があることがわかった．

【考察】

グラフ 1・2 とグラフ 3 に見られるように，同性間で並べたグラフと異性間で並べたグラフとでは，1000Hz 付近を除いたほとんどの値で異性間のほうが偏差が大きくなった．これは，まず低周波領域においては，周辺環境によるノイズや機器の状態がやや大きく影響しているからであると思われる．また，高周波領域については，対数表示によって，ごく小さな桁での数字の差もある程度大きく見えることが要因の一つであると考えられる．さらに，実験 1 においては，データを取得したサンプル個体数が 6 と非常に少ないため，単純比較ではばらつきが大きくなってしまい，より正確な比較ができなかったことにも起因して性差が生じたと考える．

2.3　実験 2

実験 1 ではデータの比較において， 2 つのグラフを重ね合わせて目視で類似度を判断するという主観的な評価になってしまっていた．そのため本実験では， 2 つのデータ間で同一周波数ごとに強度の偏差を取り，平均と標準偏差を用いてデータを比較した．

【方法】

環境音の入りにくい暗室で，実験 1 と同様に，16 ～ 17 歳の男女各 10 人に，通常発声において声帯が振動していることと，ささやき発話において声帯が振動していないことを確認してもらった．その後，/a/ のささやき声を 3 秒間発してもらい，発声から 1 秒後に，「 phyphox 」を用いて 0.1 秒間音圧を測定した．この作業を各人 5 回ずつ行った．

周波数の分布を調べて声質を判別できるよう，取得したデータを「 phyphox 」の機能を用いてフーリエ変換し，実験 1 と同様に最大値を 1 とした相対比率で表して，個人ごとの平均を取った．その平均を，条件ごとに周波数の分布の違いを比べるために，すべての人の組み合わせで周波数の相対的な強度の偏差を取り，偏差の平均と標準偏差を同性間と異性間とで分類して求めた．その後，得られた平均と標準偏差を用い，t 検定によって母平均が存在する信頼区間を両側検定で 95% で推定し，データの類似性を調べた．また，実験 1 において顕著な差が見られた 1000Hz ～ 15000Hz においても同様の作業を行った．

【結果】

表 2 全体の偏差の平均と信頼区間（$\times 10^{-2}$）

	男性	女性	異性
標本平均	4.9247	4.9862	5.5047
信頼区間(下端)	4.5939	4.4149	5.1860
信頼区間(上端)	5.2555	5.5576	5.8233

表 3 1000Hz ～ 15000Hz の偏差の平均と標準偏差（$\times 10^{-2}$）

	男性	女性	異性
標本平均	4.6633	5.4839	5.6961
信頼区間(下端)	4.2118	4.7566	5.3279
信頼区間(上端)	5.1147	6.2111	6.0642

表 2 から，全体において，男性間・女性間で偏差の平均値はほぼ同じで，異性間ではやや大きいことがわかった．しかし，男性間・女性間と異性間とでの信頼区間が同一の範囲をまたいでいるため，それぞれの母平均が確実に違うと断定できないということもわかった．

さらに，表 3 から， 1000 ～ 15000Hz において男性間と女性間，異性間の偏差の平均はそれぞれ違い，男性 < 女性 < 異性の順で偏差が大きいことがわかった．また，男性間と異性間とで信頼区間が重なっていないため，同性間と比べて異性間では偏差が大きいと断定はできないものの，男性間では異性間に比べてばらつきが小さいことがわかった．

【考察】

2.3 節のグラフ 1 ～ 3 から， 1000Hz 以上の高周波領域において特に男性間で偏差が非常に小さいことが見て取れる．また，表 3 にあるように，男性間では他よりも偏差の平均が小さく，異性間と比べると信頼区間が重なっていない．これは，1.1 節における定義より，ささやき声は声帯振動を伴わないことから，声帯以外の要素が特に男性間においてはかなり類似しているためだと考えられる．また，前節の考察で述べた周辺及び機器の環境による影響もあると考える．

3. 今後の課題

実験 1 から実験 2 でサンプル個体数を 20 に増やし，統計的比較をすることで信頼性を高めたが，依然として誤差は残っていると考えられ，データを比較する際の処理方法も最善とは言えない．また，本論では性別による差の実験しか行っておらず，年齢などの他の条件について調べられていない．それに加えて，本論では無声音のみの比較のみ行っており，有声音での比較と比べたときの偏差の傾向が調査できていない．

そのため，サンプル個体数をさらに増やすこと，他の年齢との比較をすること，そして有声音と比較することが重要と考える．また，環境をさらに安定した状態にすることと，データの処理方法をより正確に比較できるものにすることも必要である．

さらに，今回は /a/ の音でのみ実験を行ったが，他の母音でも比較して，偏差がどうなるかを調査していく必要もある．

謝辞

本研究にあたり，実験にご協力いただいた皆様，熱心なご指導と温かいご支援を賜りました千葉市立千葉高等学校の藤野裕樹先生ならびに化学科の先生方，要旨の英訳を添削してくださった英語科の坂巻諒一先生，その他，本研究にご支援ご協力を賜りました多くの方々に深く感謝申し上げます．

参考文献

平岡睦津乃 (2021)「日本語のささやき発話における子音有声性の判別」『東京大学言語学論集』43 (2021.10) 21-44

アサリの貝殻模様やその変化にはどのようなパターンがあるか

理数科　　石井　悠介、西村　直純、松浦　圭吾

The shells of Manila clams (*Rupditapes philippinarum*) exhibit various patterns formed by the interaction of genetic and environmental factors. The formation of clam shells may be interrupted by environmental changes, such as a fluctuation in water temperature. At the point where the formation of the shell is interrupted, a more distinct line, is called a growth line, remains. In addition, the pattern may change around a growth line. However, the patterns that clams form are intricately linked to both genetic and environmental factors, and the mechanism is not yet fully understood. This study aimed to analyze the tendencies in the patterns, particularly around growth lines, and examine the patterns tend to be affected by environmental changes. As a result, it found that shell's patterns with primarily colored patterns inclined to change into white inclined.

アサリの貝殻には多様な模様が存在し、それらは遺伝や環境が複合的に作用し形成されている。あさりの貝殻の形成は水温の変化などの環境変化により、中断されることがある。中断した場所には他よりも強調された線が残り、この線を障害線という。また、障害輪の前後であさりの形成する模様が変化することがある。アサリがどのような模様を形成するかは環境と遺伝が複雑に関連し、明確なメカニズムは不明である。そこで、本研究では、貝殻模様の傾向、特に障害輪前後の傾向を分析し、環境変化の影響を受けやすい模様について考察することを目的とした。その結果、黒色などの有色だった殻が、白色を基調とした模様に変化しやすい傾向があることが分かった。

1. 研究動機

アサリ（*Rupditapes philippinarum*）は軟体動物門二枚貝綱に属し、主に東アジアに分布している。アサリの貝殻には縞模様や色素帯など多様な模様が見られ、これらの形成には遺伝要因および環境要因が複合的に関与していると考えられている（小池ら 1992）。しかし、これらの要因がどのように模様の形成に影響を及ぼすのかについては、未だ明確に解明されていない。

アサリの貝殻は、主に外套膜の縁辺部で貝殻表面の有機質の膜である殻皮の上に、炭酸カルシウムの結晶が付加されることで成長していく。このような成長様式は付加成長と呼ばれ、成長の不連続が成長線として貝殻に記録される。さらに、水温の変化などの周辺環境の変化により成長が一時的に停止した場合、その痕跡として障害輪と呼ばれる成長線よりも強調された線が形成されることがある。この障害輪を境に、それ以前とは異なる模様が現れる個体も報告されている（大越 2012）。

また、模様の遺伝的側面として、アサリの左殻後部に色素帯を有する個体と持たない個体が存在し、交配実験によってその二種の模様を決定づける対立遺伝子にある可能性が示唆されている

（Peignon ら 1995）。

さらに、アサリの栄養状態を示す指標として「丸型指数」があり、これは殻長と殻高の比率によって定義される。この指標と肥満度は負の相関を持ち、貝殻がより丸いほど、アサリの栄養状態が悪い傾向があると報告されている（柿野 1996）。

以上の背景を踏まえ、本研究では、模様形成に関与する要因を評価するために、障害輪、丸型指数、非対称模様の有無といった指標を用いてアサリのサンプルを分析した。これにより、多様な模様の形成メカニズムにおける環境的・遺伝的要因の影響を考察し、その解明に寄与することを目的とする。

2. 研究方法

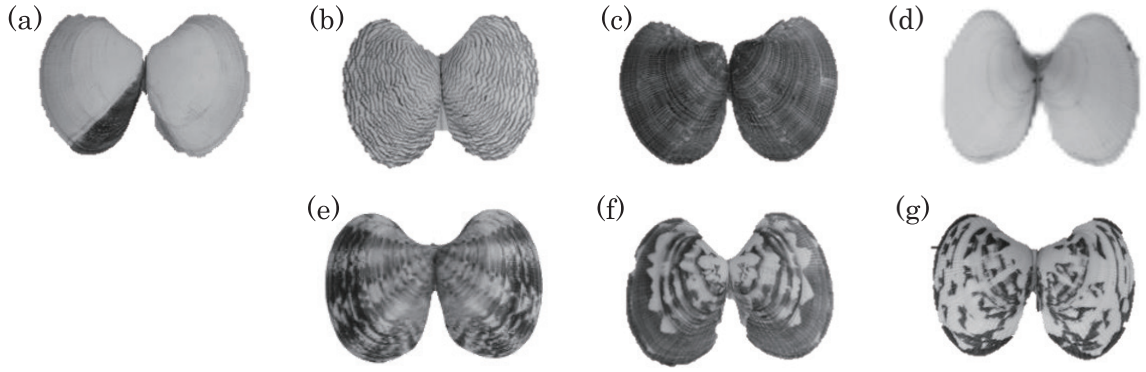
貝殻の採集と記録内容

本研究では、千葉県千葉市の千葉ポートパーク内の海岸においてアサリの貝殻標本を採集した。採集の目的は貝殻模様の観察であるため、両殻が揃っている個体のみを対象とした。また、本研究の採集地点はアサリの放流が行われていない地域であり、遺伝的要因による地域差の影響は限定的であると考えられる（張ら 2013）。採集期間は 2024 年 5 月から 7 月であり、採集した貝殻の総数は 1,233 枚であった。

採集後、各アサリをスケールと並べて個別に撮影し、画像データとして保存した。これらの画像を用いて、貝殻模様の分類、および障害輪後の模様の変化、ImageJ を用いた殻高、殻長の大きさを記録した。

貝殻模様の分類

本研究では、先行研究の分類基準を参考にし、貝殻の模様を 2 つの主要なカテゴリに分類した（張ら 2013）（池田 1893）。具体的には、左殻後端に帯状模様が見られる「非対称型」（**図 1 (a)**）と、それ以外の「対称型」に分けた。さらに、各カテゴリ内で確認された 6 種類の模様について分類を行い、それぞれの基準を図 1 (b)～(g)に示した。



(a) 非対称:主に無地の白を基調とし、左殻後端に黒の帯状の模様を持つ。
(b) 波: 殻全体に細い波打った線が何層も並んでいる。
(c) 有色無地: 有色の単色で構成され、濃淡がほぼない。
(d) 無色無地: 無色の単色で構成され、濃淡がほぼない。
(e) 斑: 殻全体が有色に染色されているが、細かい濃淡が見受けられる。
(f) 白三角: 黒を基調とした殻の上に白い三角の斑点が見られる。
(g) 黒三角: 白を基調とした殻の上に黒い三角の斑点が見られる。

図１　模様の分類例

模様変化

模様変化が確認された個体について、貝殻の中心部から障害輪までを「変化前」、障害輪より外側を「変化後」と定義し、それぞれの模様を分類した。

また、分類の客観性を高めるため、アサリの貝殻模様および模様変化の分類は 3 名が独立して行い、その結果を統合することで分類の信頼性向上を図った。

図２　模様変化の例

貝殻模様の 2 値化及び有色面積の測定

画像は RGBA (Red, Green, Blue, Alpha) モードで読み込み、各ピクセルのアルファチャンネル（透明度情報）を利用して、貝殻の有色部分の面積を算出した。アルファ値が 0 より大きいピクセルを有色領域とみなし、その総ピクセル数をカウントすることで貝殻の面積を求めた。

貝殻模様の二値化処理では、各ピクセルの RGB 値を基にグレースケール変換を行い、さらに閾値処理を適用して白黒画像へ変換した。具体的には、各ピクセルの輝度を$L=(R+G+B)/3$ により計算し、閾値 T を 200 に設定した。輝度が T 以上のピクセルは白（255,255,255）に、それ以外のピクセルは黒（0,0,0）に変換した。

3. 結果

各模様の個体数

採取したアサリ個体を、模様の種類（6 種）および対称・非対称の分類に基づいて分類した。それぞれの模様について、対称模様および非対称模様の個体数を集計し、表 1 に模様の種類のそれぞれの対称・非対称の個体数の内訳と総計を、図 3 に 6 種の模様ごとの個体数を示した。図 3 の結果について $\chi 2$ 二乗検定を行ったところ、波と白斑点の個体数は他 4 種に有意な差があることがわかった（$p<0.05$）。

表 1　各模様の個体数

模様	対称	非対称	総計
波	24	2	26
有色無地	203	20	223
無色無地	22	169	191
斑	176	27	203
白三角	384	7	391
黒三角	132	33	165
計	941	258	1199

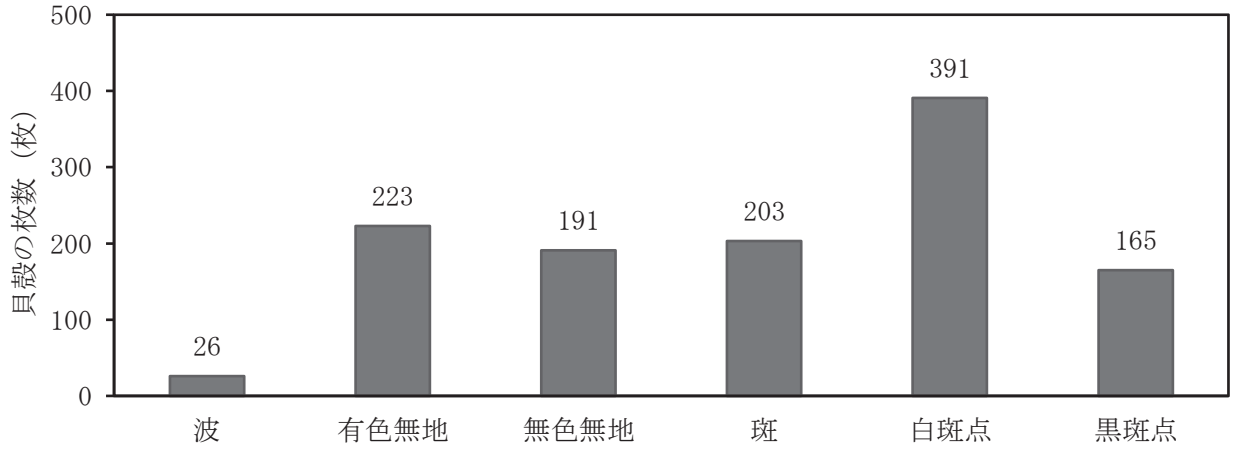


図 3　各模様の個体数

遺伝要因と環境要因の影響力

模様の形成における遺伝要因と環境要因の影響の強さを評価するために、遺伝要因の指標とされる非対称模様、および環境要因の指標とされる障害輪後の模様変化に着目した。非対称模様および対称模様において、それぞれ模様変化が生じた割合を図４に示す。図４の結果について χ^2 二乗検定を行ったところ、対称模様の貝殻と非対称模様の貝殻の間には模様変化の割合に有意な差があるということがわかった（$\chi^2=4.8862$, $p<0.05$）。

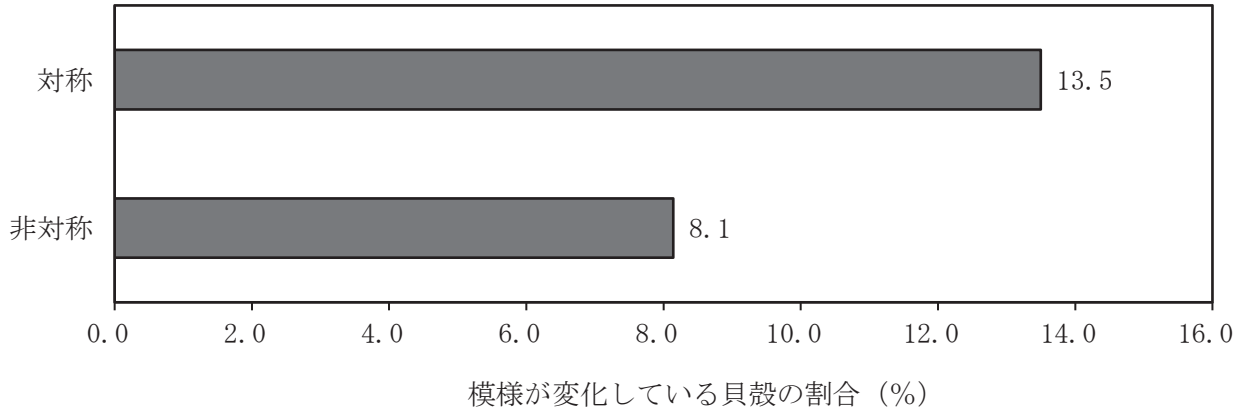


図４　模様が変化した割合

各模様の模様変化の傾向

模様変化が起こりやすい模様、変化後に現れやすい模様はどれかといった模様変化の傾向をつかむため、模様変化が起こっている個体に着目し、模様ごとに変化前の個体数と変化後の個体数を以下の図５、表２に示した。

表２　変化前・変化後の個体数

	変化前	変化後
波	1	2
有色無地	26	12
無色無地	5	12
斑	22	16
白三角	33	90
黒三角	61	16
計	148	148

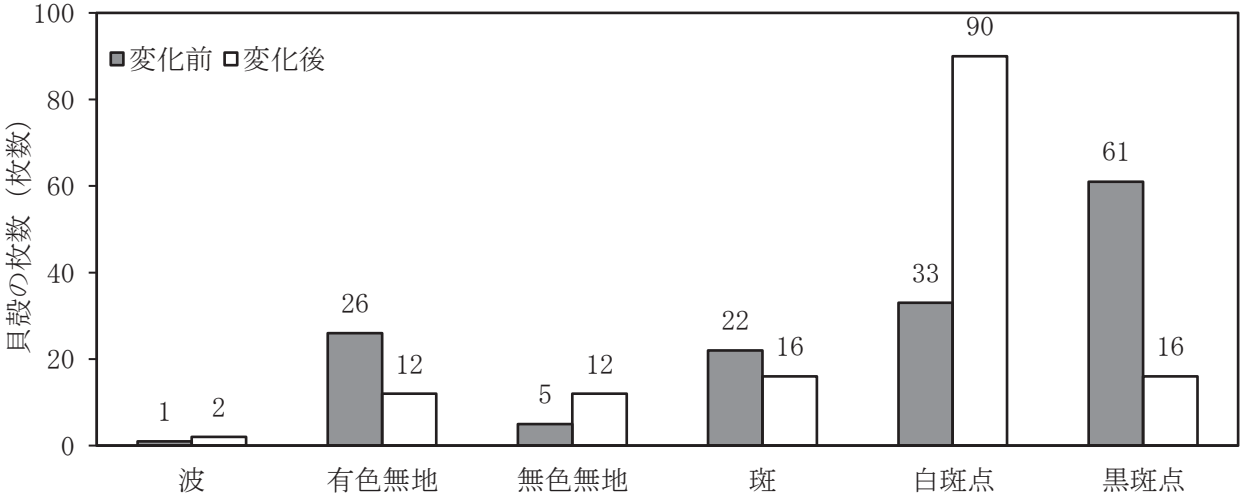


図５　各模様の変化前・変化後の個体数

各模様の変化前、変化後における標準化残差から、変化前に最も多くみられた模様は黒三角であり、他の模様に対して明確な有意差が見られ、白三角がやや多く、波、無色無地が少ないことが示された。変化後では白斑点が有意に多く見られ、波、無色無地が少なかった。

以上より、三角の模様の形成には環境による影響が強く関わっており、一方、波や無色無地は環境による影響をあまり受けない模様であることが示唆された。

貝殻の大きさと有色面積の関係

貝殻と有色面積の割合の関係を詳しく知るために、環境要因が強く作用している白三角・黒三角について、丸型指数（殻高/殻長）を用いて調べた。丸型指数が大きいほどアサリの栄養状態は悪いといえる（柿野 1998）。

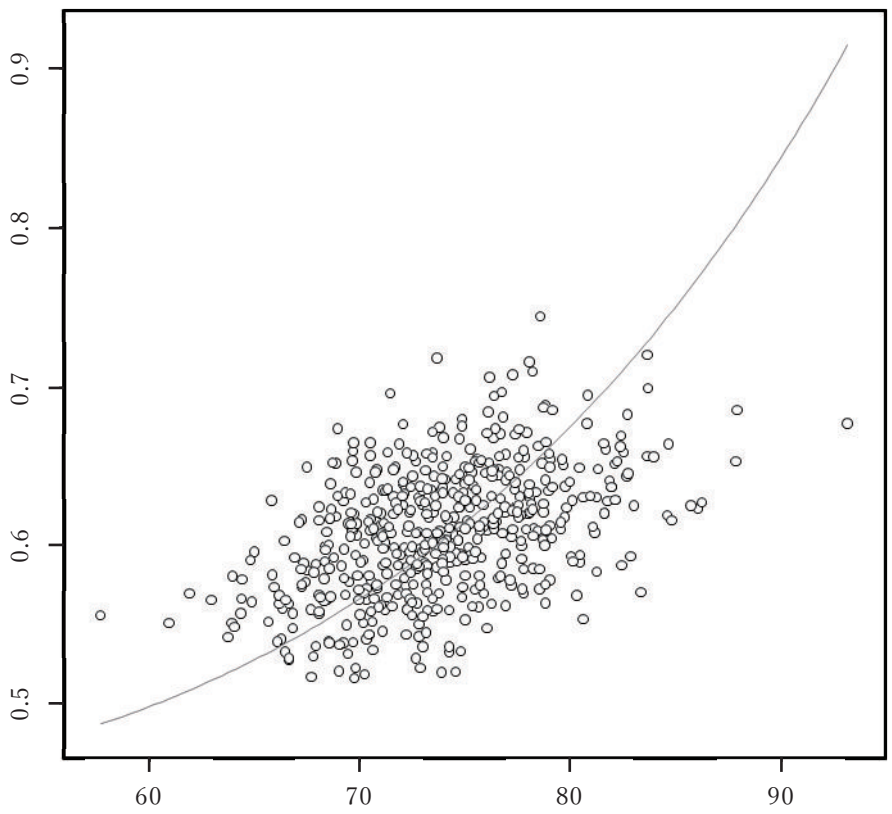


図６　丸型指数とモデル予測された有色面積の割合の関係

殻の大きさと有色面積の関係についての検証は、有色面積を応答変数、殻高・殻長を説明変数、offset 項に貝殻全体の面積を設定した一般化線形モデル（GLM）により行った。その際、確率分布をガンマ分布、リンク関数を対数リンク関数とした。これにより、丸型指数が大きい、つまり栄養状態が悪いアサリは、有色面積の割合が増加する傾向が見られた。

4. 考察

各模様の個体数

非対称の出現頻度が 21.5％であり、東京湾で実施された先行研究（張ら 2013）の 17.2～26.4％の範囲に収まった値であり、偏りなく採集できたと考えられる。それにもかかわらず、6 種の模様の個体数に有意な差が認められたことから、模様の出現頻度には偏りがあるということが考えられる。

遺伝要因と環境要因の影響力

非対称模様と対称模様の遺伝的な差異の模様形成への影響が環境変化による影響よりも小さいと仮定したとき、図４が示す値に有意な差が見られないと考えられる。しかし、結果には有意な差が見られたため、アサリの模様形成には環境要因よりも遺伝要因による影響が強いと判断した。

各模様の模様変化の傾向

各模様の変化の傾向については、変化しやすい模様の共通点として斑点や斑など貝殻の着色に濃淡がある、着色時に白い部分、つまり着色できていない部分があることがあげられる。また、変化後の模様については、白斑点が顕著にみられた。

アサリの各模様の変化の傾向から、三角模様で多くの変化例が見られ、三角模様が環境からの影響を強く受けていることが示唆された。また、変化を起こしていた個体について障害輪直後に無色（白色）の割合が増加しているという傾向が見られた。これらのことから、三角模様について考察した。

1. 障害輪の形成

2. 無色面積の急激な増加

3. 有色面積が徐々に増加

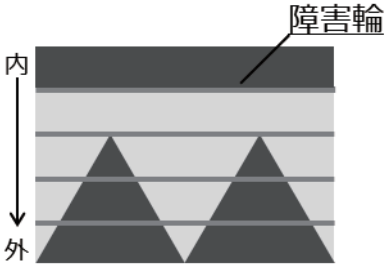


図７　三角模様の形成

以上のような形成プロセスの蓄積が三角模様の表現に繋がっていると考えられ、環境変化がアサリの貝殻の着色に何らかの影響を与えているのではないかと考えた。

貝殻の大きさと有色面積の関係

アサリの貝殻着色は主にメラニンなどの色素沈着によるとされるが、酵素の関与も示唆される。酵素の一つであるエラスターゼは白色個体で活性が高いことが報告されており（Nie *et. al.* 2020）、色素沈着を抑制する可能性が示唆される。また、メラニンは体内に蓄えられたフェノール酸化酵素前駆体（prophenoloxidase；proPO）が活性化され、いくつかの中間体を経て生成される。この過程で生成される中間体およびメラニンは抗菌作用を持つことが報告されている（高橋・室賀 2007）。一般に、タンパク質合成に伴うエネルギー消費はメラニンの重合過程と比較して大きいと考えられるが，本点については定量的な評価が必要である。これらを踏まえると、アサリは栄養状態に応じて合成物質の配分を変化させる適応を示す可能性がある。すなわち、栄養制限下では体内に貯蔵してある proPO を活性化し、メラニン合成を介した防御が行われる。一方、栄養が十分な条件では、相対的に合成コストの高いエラスターゼも合成・活性化され、それにより色素沈着が抑制され、無色部が増加することが考えられる。以上より、アサリの貝殻模様は栄養状態に依存して変化すると解釈され、特に白三角および黒三角模様において本機構の影響が顕著である可能性が示唆される。

5. 今後の課題

今回の分類は人の目によって行っているため、無地、斑、斑点といった模様の境界線などが定量的に行えているとは言い切れないため、機械学習を活用した画像分類の方法を考えた。しかし、アサリの個々の大きさの違いや写真に写る周囲のノイズ、機械学習の教師となるサンプル数の少なさなどの画像分類の精度にかかわる課題が見つかったため、今後はこれらの課題解決に向けて模索をしていきたい。

また、今回は分類を６種類で行ったが、斑や斑点など、細分化ができそうな模様があった。今回は個体数が少なかったことからこれ以上の細分化はできないと判断したが、今後個体数を増やす際に模様の細分化をしていきたいと考えている。

6. 謝辞

サンプルとなるアサリの採集方法、判別方法のご指導、採集の協力を始めとし、統計方法についての丁寧な助言など終始多大なご支援を頂いた篠原先生に感謝の意を表します。

7. 参考文献

H Nie・K Jiang・L Jiang・Z Huo・J Ding・X Yan.2020.Transcriptome analysis reveals the pigmentation related genes in four different shell color strains of the Manila clam *Ruditapes philippinarum*.Genomics112(2):2011-2020.

池田作次郎. 1893. あさり介殻ノ斑紋ニ就テ. 動物學雑誌 5:292-298.

J M Peignon・A Gérard・Y Naciri・C Ledu・P Phélipot.1995.Analysis of shell colour determinism in the Manila clam *Ruditapes philippinarum*.
Aquatic Living Resources.8(2):181-189.

柿野純. 1996. 丸型指数を指標とした籠試験によるアサリの成長と生残の特性.
日本水産学会誌 62(3):376-383.

柿野純. 1996. 東京湾盤洲干潟におけるアサリの成長と流れとの関係.
千葉水試研報 54:7-10.

小池裕子・斎藤徹・小林正人・柿野純. 1992. 東京湾小櫃川河口干潟におけるアサリの食性と貝殻成長. 水産工学 29(2):105-112.

大越健嗣. 2012. 東北地方太平洋沖地震が沿岸に生息する生物に与えた影響.
日本ベントス学会誌 66(2):117-119.

高橋計介・室賀清邦. 2008. 総説：二枚貝の細胞性生体防御機構.
魚病研究 43(1):1-17.

張成年他. 2013. アサリの非対称殻模様出現頻度における地域差. 日本水産学会誌 79(2):190-197.

落水のエネルギー効率

理数科　井関陽登　椎名煌大郎　箕浦泉

要旨

In Japan, thermal power generation accounts for about 70% of the rate of power generation. On the other hand, renewable energy accounts for about 20% of the rate of power generation. we believe that increasing the rate of renewable energy generation is necessary to achieve a sustainable society. So, we focused on hydropower, which has a very high energy conversion efficiency and produces a few carbon dioxide emissions. In this study, we poured was water into the wheel from the same height and clarify the conditions for the highest energy conversion efficiency.

日本の発電割合は約 70 %が火力発電になっている。その一方で、約 20 %が再生可能エネルギーになっている。そのため、再生可能エネルギーの発電割合を高くすることが持続可能な社会を実現するために必要であると考える。そこで私たちは、エネルギー変換効率が非常に高く、二酸化炭素の排出量がほとんどない水力発電に着目した。本研究では、水を同じ高さから水車のモデルに流し、最もエネルギー変換効率が高くなる条件を求めた。

序論

日本では、発電を火力発電に頼っているため二酸化炭素の排出量が多く、地球温暖化対策が急務となっている近年の社会に適応できていないと思い、再生可能エネルギーの一種である水力発電の発電効率を高め、普及率を高めたいと思い本研究を始めた。

器具

・作成した水車のモデル
・5 種類の穴を開けたバケツ
・水車の支え台に使った LEGO ブロック
・3D プリンタで作成した水車の中心の真ん中に刺すための竹ひご
・分銅(10,20,50,100 g)
・分銅を吊るす紐

水車のモデルの中心を 3D プリンタで作成し、羽の枚数は 8 枚にし、アクリル板で作成した。
また、バケツにあけた穴は、それぞれの穴で出る水の流量が、10,20,30,40,50 mL/s になるようにした。
下記の図は水車のモデル、穴を開けたバケツの写真、それらの大きさを示したもの。

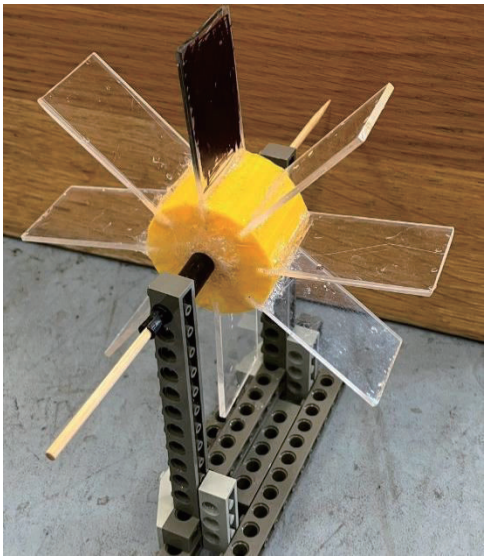


図 1 作成した水車のモデル

図 2 穴を開けたバケツ

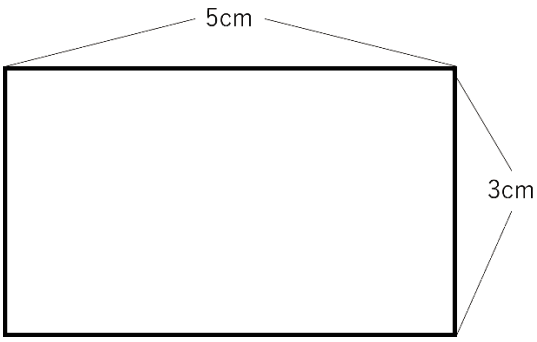


図 3 水車の羽のアクリル板

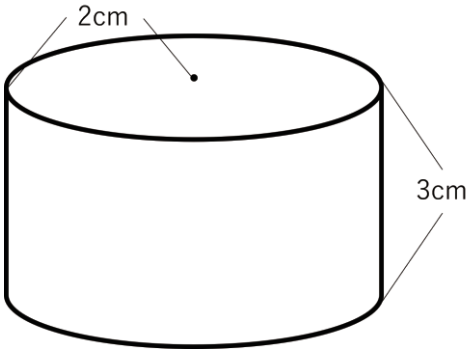


図 4 3D プリンタで作った水車のモデルの中心

実験 1

1－1.目的

バケツの穴から水車までの高さを一定にした場合の、流量と水車の回転数の関係性を調べる。

1－2.方法

バケツに深さ 5 cm まで水を入れて、バケツの穴から水車の中心までの高さを 40 cm にし、5 種類の穴を 1 つずつ使用して、1 L 水を流した時の回転数を記録した。

1－3.結果

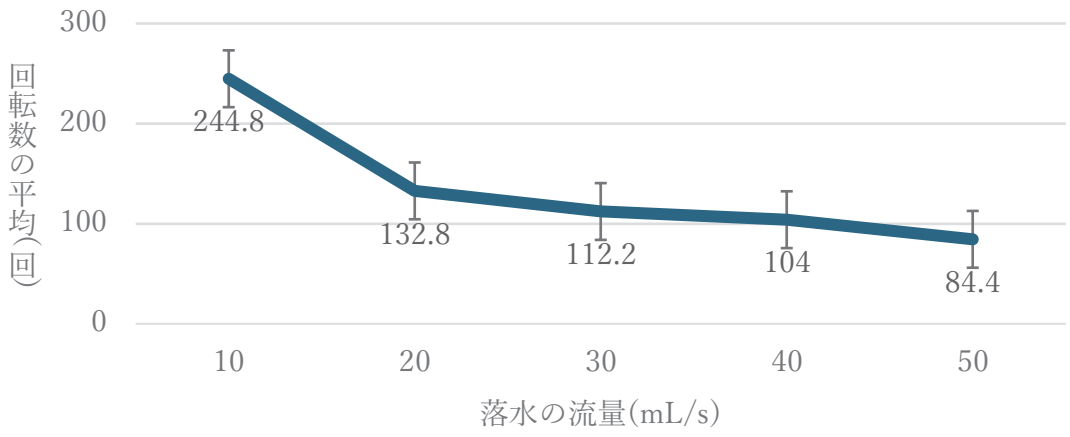


図 5 各穴に対する水車の回転数をグラフ化したもの

1―4.考察

時間当たりの水の流量が小さくなればなるほど回転数が多く、流量 10 mL/s の穴が抜き出て回転数が多くなった。また、一定時間水を流し終わったときに、流れている水を止めるのではなく、回っている水車を止めたこと、モーターが取り付けられていないこと、実際よりも摩擦が少ないことで、この結果になったと考えた。

実験 2

2－1.目的

バケツの穴から水車の中心までの高さを一定にした場合の水の持つ位置エネルギーから水車の運動エネルギーへの変換率を調べる。

2－2.方法

バケツの穴から水車の中心までの高さを、27.5 cm にし、水車の軸に 20 g の重りを付けた 50 cm の紐を吊るし、水車を回して重りが巻き上がるまでにかかった時間を記録した。

2－3.結果

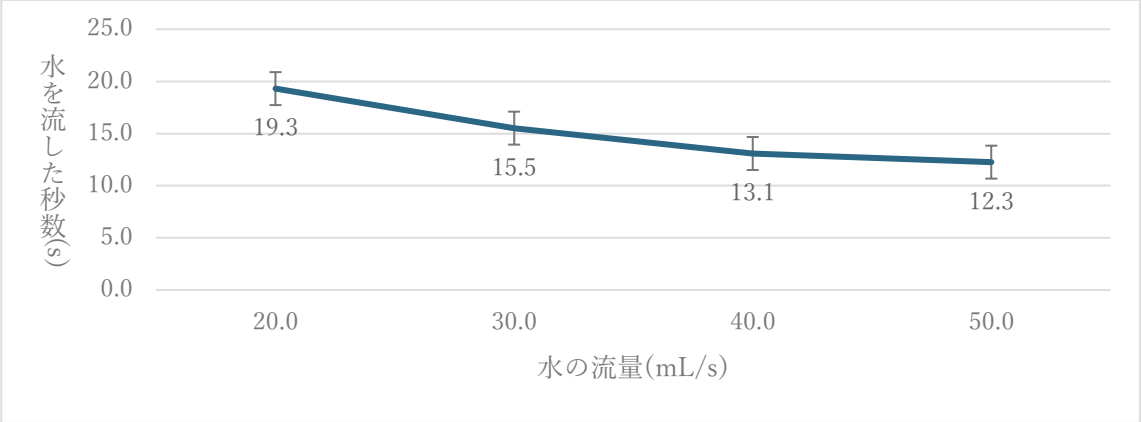


図 2 実験 2 の結果をグラフ化したもの

水の流量(mL/s)	20	30	40	50
エネルギー変換効率(%)	9.42	7.81	6.94	5.93

表 3 実験 2 の結果をもとに計算したエネルギー変換効率
※水の流量が 10 mL/s のときは水車が回転せず測定できなかった。

2―4.考察
水の流量が少ないと重りが上がりきるまでの時間は長くなり、流量が多いほど短くなった。しかし、エネルギー変換効率の面では流量が多い方が効率が悪くなった。これは、重りの重さが軽すぎたため、流量を増やした時に、水車の回転速度が最大に達したことから流量が多いほどエネルギー変換効率が下がってしまったと考えられる。また、流量が少ないとき、重りが上がりきるまでの時間が長くなった。つまり、水車が回るギリギリの重りの重さと流量のバランスの時に、エネルギー変換効率が良くなると考えた。

実験 3

3－1.目的
実験 2 から重りの重さを変えるとエネルギー変換効率が変化すると考えたため、重りの重さを変化させて、高さを一定にした場合の水の持つ位置エネルギーから水車の運動エネルギーの変換率を調べる。

3－2.方法
バケツの穴から水車の中心までの高さを、27.5 cm にし、水車の軸に重りを付けた 40cm の紐を吊るし、重りの重さを変化させて、それぞれの穴で水車が回転する限界の重さを調べ、その重さで、水車を回して重りが巻き上がるまでにかかった時間を記録した。

3－3.結果

水の流量(mL/s)・重りの最大の重量(g)	20・60	30・90	40・130	50・160
エネルギー変換効率(%)	11.83	11.03	12.55	14.79

水の流量が大きくなるほどエネルギー変換効率が高くなったが、水の流量が 30mL のときに下がってしまった。

3―4.考察
流量に対して水車がギリギリ回る重りの重さの時に効率が高くなる。またその条件下で流量と重りの重さの規模を大きくすると効率が高くなった。

今後の課題

現時点では、実験の幅を広げられていないので、今後は高さを変化したときのエネルギー変換効率の推移を見ていきたい。

謝辞

本研究にご協力頂きました皆様ありがとうございました。

暴露した二酸化炭素量による緑藻類の走光性の変化について

伊藤健悟　田村篤郎　吉俣棟吾

要約

緑藻類の一種であるミドリムシ（*Euglena* sp.）は、正の走光性と負の走光性を併せ持つ事が判明している。ミドリムシはこれらに従って運動する事により、光の強度が適切な位置、すなわち光合成速度が適切になるような位置を求めていると考えられる。また、光合成速度は、光の強度のみならず、光合成において重要な要素の一つである二酸化炭素濃度などの周囲の環境要因によっても左右される。故に、二酸化炭素濃度が異なる環境であれば、ミドリムシの走光性の程度に変化が生じる可能性がある。本実験では以上の仮説を検証するため、通常の水道水および炭酸水を用いて、ミドリムシの走光性の程度の変化を検証する。

結果として、それぞれの条件下でミドリムシが最も多く集まった位置は、水道水の場合は 14.5cm、炭酸水の場合は 21.5cm であった。よって、二酸化炭素濃度はミドリムシの走行性を変化させうる要因の一つであると考えられる。二酸化炭素濃度の測定精度を向上させることや、実験に用いるミドリムシの個体数の定量化を今後の課題としたい。

Euglena（Euglena sp.）, a type of green algae, has been found to possess both positive and negative phototaxis. By locomotion based on these responses, euglena are thought to seek a position where the light intensity is appropriate, i.e., where the photosynthetic rate is appropriate. The speed of photosynthesis is also affected not only by light intensity but also by ambient environmental conditions such as carbon dioxide concentration, which is one of the essential components in photosynthesis. Therefore, environments with different carbon dioxide concentrations may cause changes in the degree of phototaxis of Euglena. In this experiment, to test the above hypothesis, we will examine phototactically changes in the degree of Euglena in tap water and carbonated water, which differ in carbon dioxide.

As a result, the position where the most euglena gathered under each condition was 14.5 cm for tap water and 21.5 cm for carbonated water. Therefore, carbon dioxide is thought to be one of the factors that can change the running behavior of euglena. Future challenges include improving the accuracy of measuring carbon dioxide concentration and quantifying the number of euglena used in the experiment.

序論

ミドリムシ（*Euglena* sp.）は感光性鞭毛虫の一種である（庄司ら 2014）。動物学上は原生動物門に、植物学上はミドリムシ植物門に分類され、藻類としての特徴と原生動物としての特徴をいずれも有しており（林ら 2023）、池沼・水田・下水道等の環境に生息する（斎藤 1989）。また、葉緑体を有しており、活発に水中を遊泳する（中澤 2023；田中 2022）。200W/m²よりも弱い光に対しては正の走光性を、強い光に対しては負の走光性を示す事が知られている（庄司ら 2014）。しかし、光合成に必要な要素の一つである、二酸化炭素濃度を変化させた場合の挙動は判明していない。本研究では、二酸化炭素濃度と走光性の挙動が、如何に関係しているかを明確にすることを目的とする。

方法

実験 1

縦 30cm、横 10cm、高さ 5cm の透明な容器を用意し、水 65ml と事前に撹拌したミドリムシの培養液 10ml を入れた。この容器を 5 分間暗室に放置し、その後、容器の短辺に、側面から、白色光を 10 分間、一方向に照射した。光源側の容器の端と光源の距離は 20cm とした。光源側の容器の端から 0.5cm、7.5cm、14.5cm、21.5cm、28.5cm の計 5 ヶ所から、駒込ピペットを用い、それぞれ一定量（ピペット 1 滴分）のミドリムシを採取し、下記の計数方法を用いて個体数を計測した。

実験 2

実験 1 と同様の透明な容器を準備し、炭酸水（PH5.29～5.42）65ml、事前に撹拌したミドリムシの培養液 10ml を入れた。この容器を 5 分間暗室に放置し、その後、容器の短辺に、側面から、白色光を 10 分間、一方向に照射した。光源側の容器の端と光源の距離は 20cm とした。実験 1 と同様の計 5 ヶ所から、駒込ピペットを用い、それぞれ一定量（ピペット 1 滴分）のミドリムシを採取し、下記の計数方法を用いて個体数を計測した。

計数方法

駒込ピペットを用い、1mm 方眼界線入りスライドガラスにミドリムシの培養液を 1 滴、滴下する。その後、スライドガラスを用い、プレパラートを作成する。顕微鏡を使用し、1mm 方眼内のミドリムシの個体数を、カウンターを用いて目視で計測する。以上の作業を、無作為に抽出した 20 マス分繰り返し行い、ミドリムシの個体数の合計値を算出する。培養液 1 滴あたりの個体数が、採取ごとに統一出来なかったため、個体数の割合を指標に用いた。具体的には、

採取した 1 箇所における個体数／採取した 5 箇所全てにおける個体数の合計=個体数の割合

として、以下の統計解析を用いてグラフ化した。

統計解析

明るさによるミドリムシの個体数の違いを検証するために統計解析を行った。ミドリムシの個体数を応答変数、容器の位置を説明変数、offset 項としてミドリムシの総個体数を設定した一般化線形モデル（GLM）により行った。その際、確率分布をガウス分布、リンク関数を対数リンク関数とした。これらの解析は R（version 4。3。1、R Foundation for Statistical）を用いて行った。

結果

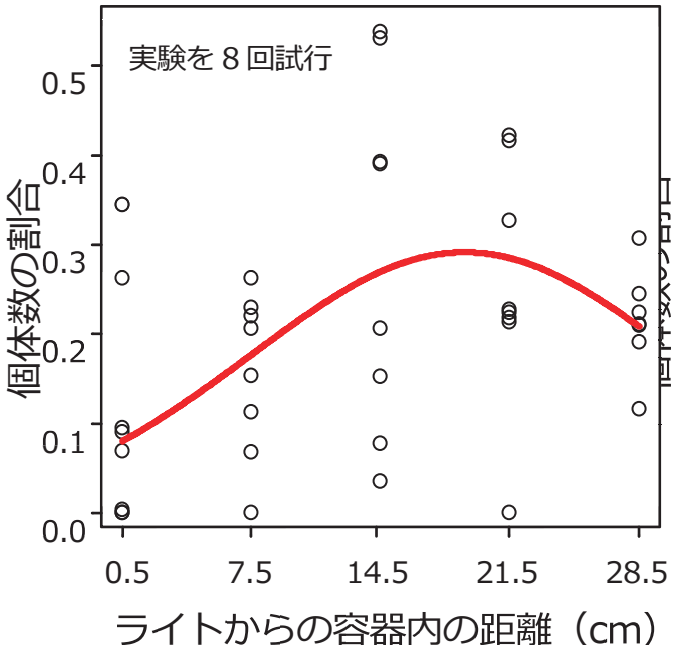


図１実験１の結果

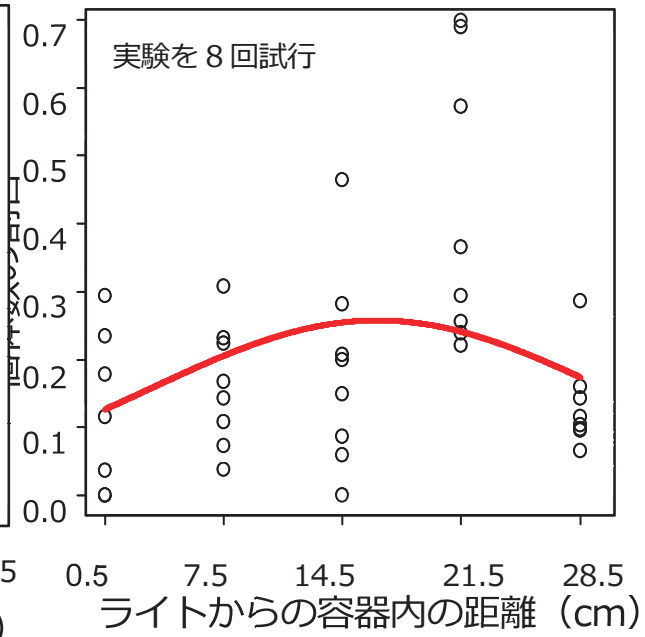


図２実験２の結果

左図が水道水を用いた場合、右図が炭酸水を用いた場合である。結果として、実験１においては、14.5cm の位置におけるミドリムシの個体数が最も多かった。実験２においては、21.5cm の位置におけるミドリムシの個体数が最も多かった。

考察

グラフの赤線における山の部分は、実験１・実験２のいずれにおいても、14.5cm から 21.5cm の中間辺りに位置していた。すなわち、水道水と炭酸水の pH の差は 1.5 程あるにも関わらず、ミドリムシの分布域の差異は小さかった。故に、二酸化炭素濃度は光合成の効率に対しては、顕著な変化を及ぼさないものと思われる。

ミドリムシを 10ml 投入する際に、液体内におけるミドリムシの個体数が実験ごとに一定でなかったため、実験結果に誤差が生じた可能性がある。また、容器の外側で光が屈折し、一方向からの照射が不完全になった可能性もある。グラフ内における外れ値の存在は、これらの要因によるものと思われる。

今後の展望

１回の実験に用いるミドリムシの個体数を出来る限り統一し、結果としてグラフの誤差を小さくできるよう、改善策を考えたい。また、グラフ同士の比較があくまでも恣意的なものにとどまっていたため、客観的な指標を用いた比較を行いたい。

また、ミドリムシの遊泳速度は平均して 40μm/s であり、同サイズの他種と比較してかなり遅い（大高

ら 2013）。ミドリムシが移動している途中で採取を行ったため、結果が不正確になった可能性がある。

今回は二酸化炭素濃度を変化させたが、酸素発生量（松本ら 2007）や、クロロフィル量（Arnon 1948）を計測した先行研究が存在するため、そういった二酸化炭素濃度以外の要素を基準とした実験を行って結果をグラフ化し、今回のグラフとの比較検討を行いたい。

なお、ミドリムシは周囲に酸素が存在する環境においては、余剰の炭素をパラミロンという多糖類として細胞内に蓄積する性質があり、その含有量は細胞の栄養状態により大きく異なる（中澤 2023）。今後は、このパラミロンの含有量の個体差が、ミドリムシの走行性に変化をもたらすのか否かを調査したい。

引用文献

書籍　1.）田中正明.2022.日本淡水産動植物プランクトン図鑑 第 2 版.p772.ISBN978-4-8158-1109-9.

論文　2.）Daniel I. Arnon.1948.COPPER ENZYMES IN ISOLATED CHILOROPLASTS. POLYPHENOLOXIDASE IN *BETA VULGARIS*.PLANT PHYSIOLOGY 24 1.

3.）林雅弘・松田綾子・東海彰太・受川友衣乃・宇髙尊己.2023.ユーグレナの大量培養における従属栄養培養の活用.オレオサイエンス 23（2）:65-72.

4.）松本隆仁・乾博・宮武和孝・中野長久・村上克介.2007.ユーグレナの光合成生育に与える光質と CO_2 濃度の影響.Eco-Engineering 19（1）:27-32.

5.）中澤昌美.2023.ユーグレナ古今東西.生物工学会誌 101（4）:187-190.

6.）大高翔平・伊東明俊.2013.レーザ光を用いた原生生物集団の行動制御:ミドリムシ集団の生物体流によるシーソー駆動.ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 13（0）.

7.）斎藤実.1989.ユーグレナ（ミドリムシ）の観察法.横浜国立大学理科教育実習施設研究報告（5）:1-14.

8.）庄司江梨花・泉俊輔・西森拓・粟津暁紀・飯間信.2014.ミドリムシ生物対流の局在構造ダイナミクスの解析. 数理解析研究所講究録 1900:76-84.

（引用文献メモ）

・https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R100000002-I032520337

・https://academic.oup.com/plphys/article/24/1/1/6076157

・https://cir.nii.ac.jp/crid/1520295281504209664

・https://www.jstage.jst.go.jp/article/seitaikogaku/19/1/19_1_27/_pdf

（CiNii のリンクは無し？）

・https://www.jstage.jst.go.jp/article/seibutsukogaku/101/4/101_101.4_187/_pdf/-char/ja

・https://cir.nii.ac.jp/crid/1390282680915028480

・直接のリンクは無し、PDF をダウンロードする必要あり

・https://cir.nii.ac.jp/crid/1050282810784912896

ビニール傘と空気抵抗

理数科　伊藤優吾　小林碧　山本凛華

1.要約

I thought that vinyl umbrellas (hereinafter referred to as umbrellas) were prone to breaking in rough, so I conducted an experiment focused on the strength of umbrellas against wind. Particularly examining the shape of the upper surface of the umbrella and the corresponding air resistance. I found that the fewer the number of panels on the umbrella, the smaller the air resistance, and that the height of the umbrella does not affect the air resistance. However, previous studies had limited trial runs, and no clear results had been obtained. Therefore, in this experiment, I increased the number of trials to improve the precision of the results. The purpose of this experiment is to consider the optimal umbrella shape that can be reliably used in severe weather conditions. We used umbrella models with upper surfaces made of 6, 8, and 10 panels. With wind applied from various angles and the mass of the umbrella being measured. In this case, the smaller the measured mass, the smaller the air resistance experienced by the umbrella model. And in the future, I plan to further examine the same materials as commercially available umbrellas were used.

一般的に、ビニール傘(以下、傘)は、荒天時に壊れやすいものが多い。そこで、本実験では、荒天時でも安定して使用可能な傘の形状を考察することを目的とした。本実験では、傘モデルを使用した上面の形状と空気抵抗を検討するため、傘の風に対する強度について、傘の上面の形状とそれに対する空気抵抗に着目して実験を行った。本実験では、上面が 6、8、10 面で作成された傘のモデルを使用し、風を様々な角度から当てその質量を計測した。計測した質量が小さければ小さいほど、傘のモデルが受けた空気抵抗は小さいとみなし、検討を進めた。検討の結果、傘の面数が少ないほど空気抵抗は小さくなることを確認した。また、傘の高さは空気抵抗に関係がないことが分かった。しかしながら、これまでの実験では試行回数が少なく、試験の再現度の向上が課題であった。そこで、さらに試行回数を増やし、実験の精度向上を試みた。その結果、当初設定していた仮説に対し、より再現性の高い結果を得ることが出来た。今後は既製品と同様の材料を用い実験の検討をしていく。

2.動機と目的

傘を差している時に強い風が吹くと、傘が強風によって破損してしまうことがある。過去の先行研究において、傘の傾きによる空気抵抗については傘の強度について検討されているが、傘の布の部分の構造については検討されていなかった。このことから私たちは、傘上部の構造に着目して実験を行った。この実験を通して、傘が壊れやすい荒天時においても壊れにくい安定した傘の形状について、空気抵抗を基に考察することを目的とした。

3.仮説

傘上面の面数が少ないほど、また傘の高さが高いほど、風が当たる傘上面の面積が小さくなり、風を受け流しやすく、空気抵抗がより小さくなると考えた。本仮説を基に、下記の通り実験を行うこととした。

4. 実験(1)

4-1 実験(1)に使用した材料

実験材料	仕様／備考
竹ひご	Φ約 3mm
プラスチック板	1mmt
ハンディファン	雑貨店で購入
電子天秤	物理実験室のもの
セロハンテープ	-
発泡スチロール	傘モデルの電子秤固定用

4-2. 実験(1)方法

竹ひごで骨組み、プラスチック板で傘の上面、セロハンテープで骨とプラスチック板を固定し、6,8,10 面の傘モデルを作成した(図 1)。傘モデルの詳細を以下の表 1 に示した。電子天秤の上に発泡スチロールを乗せ、傘モデルを固定した後、電子天秤の表示を 0g にした。傘の頂点から 10cm 離した所でハンディファンを固定し一定の風を当て、その荷重を測定することを、それぞれの傘モデルにて実施した。風を当てるときの角度は以下の通り(図 2)。荷重の測定の際、電子天秤に表示される数値の変動が生じることから、10 秒に 1 回、表示された数値を記録することとし、それぞれの傘モデルで 10 回ずつ行った。

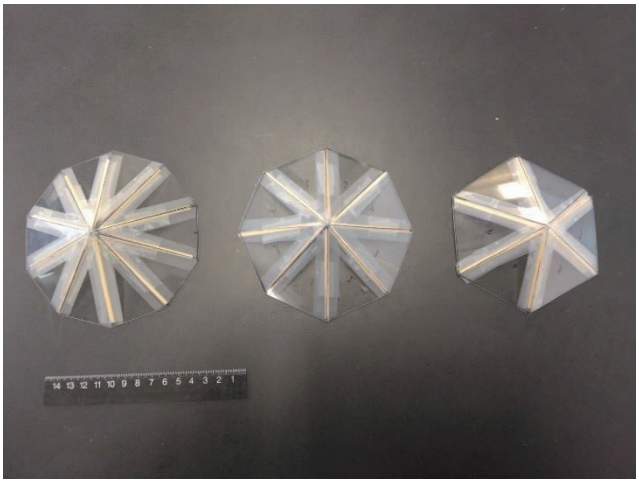


図 1 傘モデ

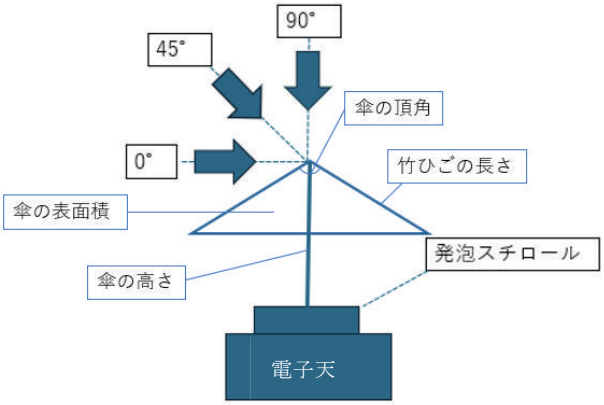


図 2 実験の様

表 1　傘モデルの基本情報

傘の面数	6	8	10
竹ひごの長さ (cm)	6.0	7.0	7.5
傘の頂角(°)	126.5	126.6	127.4
傘の高さ(cm)	3.2	3.4	2.8
面の表面積(cm^2)	113.8	146.3	144.6

4-3. 実験(1)結果

実験(1)により得られた結果を図 3 に示した。0°、45°のときは 6 面が最も空気抵抗が小さくなっており、45°のときは 6 面が最も空気抵抗が大きくなっていることを確認した(表 2)。なお、傘の高さは 10 面が最も小さくなっている(表 1)。

表 2　実験(1)結果の集計

	風を当てた角度		
面数	0°	45°	90°
6	-0.7	4.5	3.3
8	-0.6	3.5	4.2
10	-0.3	3.8	5.7

4-4. 実験(1)考察

実験(1)の結果より、傘の面数については、6 面の時に力が小さくなり、すなわち空気抵抗が最も小さくなった。空気抵抗の小さい順が 6,8,10 面であるとすると、本実験における仮説は確かだと考えられる。しかしながら、45°のときに突出した数値が得られた。この結果は、連続性に問題があり、計測の際に外れ値が表示されたものを記録してしまった可能性が考えられる。本結果を支持するには、実験回数が不足していると考え、試験の再現性を確認する必要があると考えた。また、図 3 より、傘の高さは 10 面が最も小さくなってしまったため、仮説とは異なり、傘の高さは空気抵抗の増減への影響は小さいと考えられる。上記より、実験の再現性を得ることを目的とし、下記の通り追加実験を実施した。

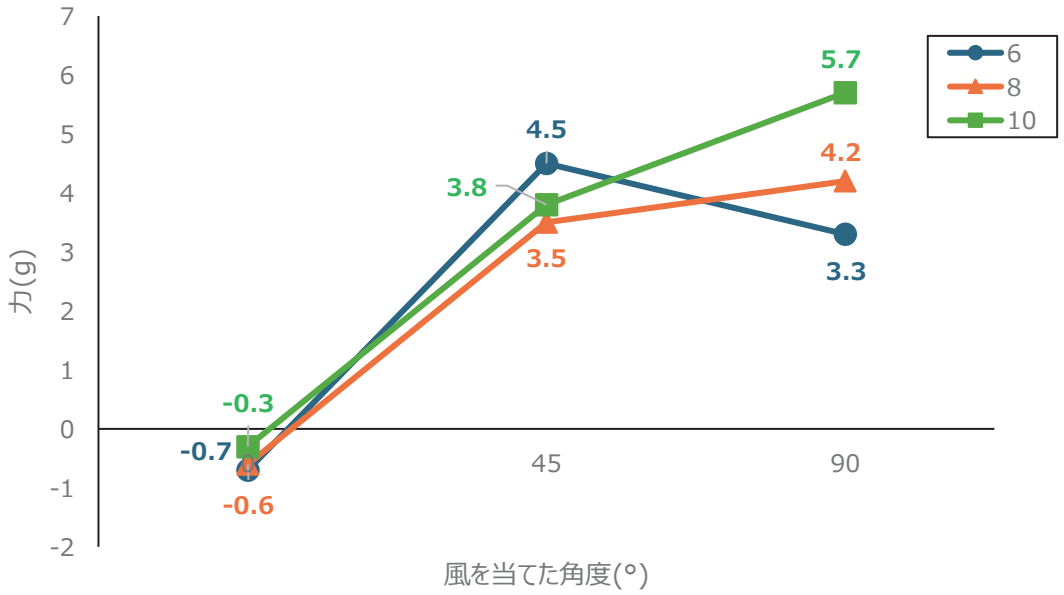


図 3　面数の異なる傘モデルに風を当てた時の力の変化

5. 実験(2)（実験の再現性の確認）

実験(1)で確認された 45°にて得られた結果の再現性、および実験結果の精度向上を目的として、実験(1)と同様の条件により計測時間と計測回数を増やした実験を、下記の通りに行った。

5-1. 実験(2)方法

実験(1)と同様の材料および方法にて実施した。計測時間は 200 秒とし、計測回数は 20 回とした。

5-2. 実験(2)結果

実験(2)の結果を図 4 に示した。45°、90°のときは 6 面が最も空気抵抗が小さく、10 面のときに最も空気抵抗が大きくなった。一方、0°のときに 6 面および 8 面の力の数値がほぼ一致し、10 面の数値が最も大きくなった。

表 3　実験(2)結果の集計

	0°			45°			90°		
面数(面)	6	8	10	6	8	10	6	8	10
1	-1.7	-1.4	-1.8	1	1.6	2.1	4.3	5.7	6.5
2	-1.8	-1.5	-1.8	1.1	1.6	2.1	4.4	5.6	6.4
3	-1.7	-1.5	-1.7	1.2	1.5	2.2	4.3	5.5	6.5
4	-1.6	-1.6	-1.6	1	1.6	2.3	4.4	5.7	6.3
5	-1.8	-1.5	-1.6	1.2	1.6	2.3	4.3	5.8	6.4
6	-1.6	-1.5	-1.6	1.2	1.5	2.4	4.3	5.6	6.6
7	-1.6	-1.4	-1.6	1	1.6	2	4.3	5.7	6.4
8	-1.6	-1.7	-1.6	1.1	1.7	2.2	4.2	5.9	6.4
9	-1.7	-1.5	-1.5	1.1	1.5	2.2	4.3	5.8	6.4
10	-1.7	-1.6	-1.5	1.2	1.6	2.2	4.4	5.6	6.4
11	-1.4	-1.5	-2	0.8	1.8	1.9	4.5	5.5	6.3
12	-1.4	-1.5	-2.1	0.7	1.6	1.7	4.5	5.6	6.3
13	-1.4	-1.7	-1.8	0.7	1.7	1.8	4.5	5.7	6.2
14	-1.3	-1.5	-1.7	0.7	1.6	1.8	4.6	5.8	6.4
15	-1.3	-1.6	-1.7	0.7	1.6	1.8	4.6	5.8	6.2
16	-1.5	-1.6	-1.6	0.6	1.7	1.8	4.7	6	6.4
17	-1.5	-1.5	-1.7	0.6	1.9	1.8	4.8	5.8	6.4
18	-1.4	-1.5	-1.8	0.7	1.7	1.8	4.9	5.8	6.2
19	-1.4	-1.5	-1.6	0.6	1.9	1.9	4.8	5.8	6.4
20	-1.3	-1.6	-1.6	0.7	1.9	1.9	4.6	5.8	6.5
全平均	-1.535	-1.535	-1.695	0.895	1.66	2.01	4.485	5.725	6.38
最小値	-1.8	-1.7	-2.1	0.6	1.5	1.7	4.2	5.5	6.2
最大値	-1.3	-1.4	-1.5	1.2	1.9	2.4	4.9	6	6.6
標準偏差(σ)	0.17	0.08	0.15	0.23	0.13	0.21	0.20	0.13	0.11

5-3.考察

実験(2)の結果より、仮説の通り傘上面の面数が少ないと力は小さくなり、すなわち空気抵抗が小さくなることが確認された。これらは一つの可能性として、本実験に当てた風の向きに対して、面数が小さいほうがより小さい面積となっていることが考えられる。他方、0°において力がいずれの面数においてもほぼ同様の結果が得られた。これは上記の考え方と同じく、ほぼ側面から当てた風に対して、いずれの傘モデルにおいても、その向きでの表面積がほぼ同じであったことから同じような力となったことが考えられる。本実験では、傘が受ける力を測定するため、傘側面あるいは上面に風を当てる方法を実施した。結果として、実験中に傘が破損することはなかった。傘の破損は、実際には側面あるいはそれよりも下側から吹く風によって生じることが多いことが考えられる。そのため、自身が傘を使用し、風雨をしのぐ際は傘の上面の面数の少ないほうが、空気抵抗が小さくなると考える。本実験を通じ、破損を考慮する（破損のしにくい傘の傾向を把握する）場合は、より下方からの風をあてることや、傘モデルが破損するまで風を当て、破損までにかかる時間を計測することが良いと考えた。

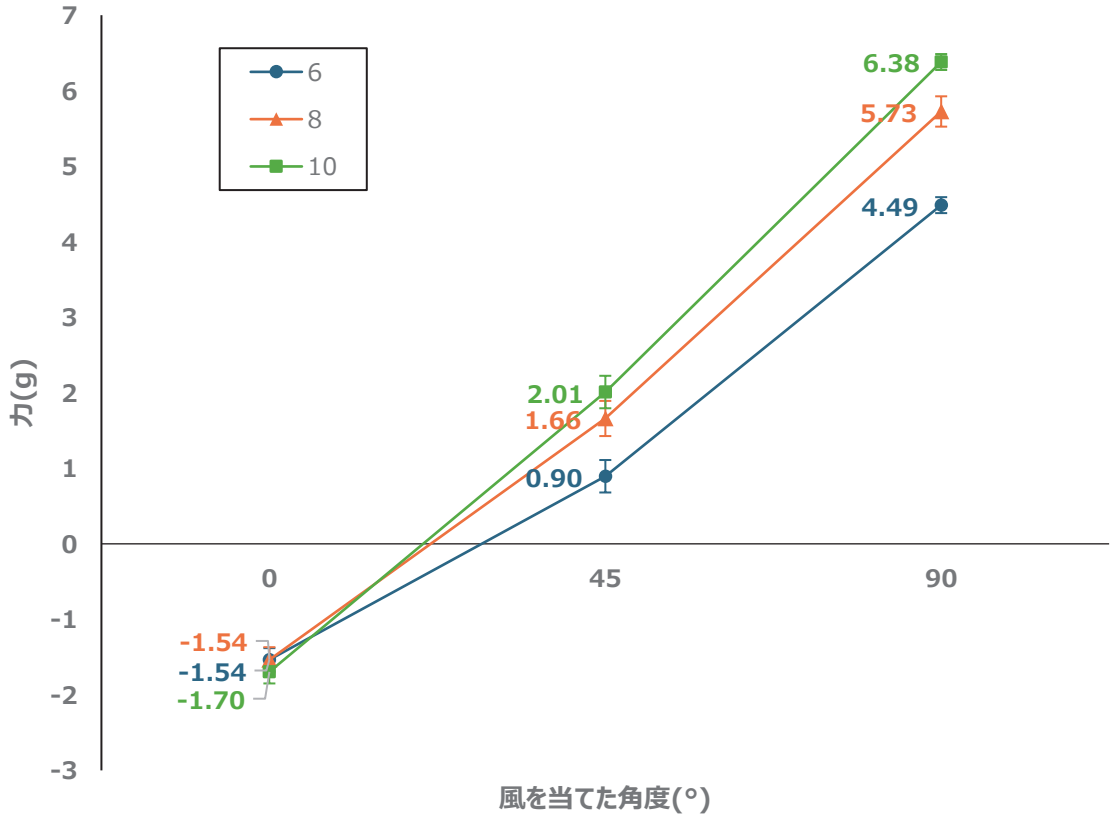


図 4　面数の異なる傘モデルに風を当てた時の力の変化

6. 結論

・空気抵抗を一番受けない傘の形状は、実験 1,2 を通して 6 面であった。面数の小さい形状が風の抵抗を受けにくい。

・傘の破損が生じるのは、側面より下側から受ける風により生じることが考えられ、自身で傘の向きを変えられる時は、より面数の小さい傘のほうが風雨をしのぎやすいことが、本試験で確認できた。

・傘の破損しやすさを考慮する際には、より下方からの風をあてることや、傘モデルが破損するまで風を当て、破損までにかかる時間を計測することが、良い。

7.今後の課題

・傘モデルを実際のビニール傘の材料と同じものでの実験の実施。

・一定の風力、風向きによる再現性の確認。

・実験の追加(下方から風、モデルが破損するまで風をあてる)による、破損しにくい構造の検討。

・風を当てる向きから見た傘の面積の算出と試験結果の相関性の確認。

8.謝辞

ポスターや論文の製作にご協力いただいた鹿野先生や齋藤先生に深く感謝いたします。また、ポスター発表の際にご意見を頂いた教授の皆さんにも深く感謝いたします。

9.参考文献

・急な風速変動下で傘に作用する空気力の特性(野村ら 2005)

・傘の静的空気力の測定(野村ら 2005)

水滴の動きを科学する

理数科　稲毛瑠杏　鈴木華　柾田和奏

要約

When we lifted a wet toilet paper, many drops of water fell. At first, they were falling in a line, then it seemed the intervals between water drops gradually spread. We thought the way of dropping water would be the same as any other material. Then, we hypothesized it has some regularity and decided to research that. This research's goal is "To find some regularity of dropping water and what it is" In the first experiment, we hung a wet towel and recorded the intervals between the falling water drops. As the result, we got a graph resembled an exponential function. Based on this result, we will investigate the detailed regularity by changing the material used to wet and its condition

水を浸したトイレットペーパーを持ち上げた時に、たくさんの水滴が落ちてきた。はじめは連なって落ちていたが、徐々に水滴とその次の水滴の間隔が広がっているように見えた。この水滴の落ち方は他のものを水に浸して持ち上げた時にも同じようになると思った。そこで、水滴の落ち方には何か規則性があると考え、それを研究することにした。この研究の目的は、水滴の落ちる間隔に規則性を見つけ、その規則性がどんなものかを求めることである。最初の実験では、濡らした雑巾を吊るして水滴の落ちる間隔を調べた。その結果、指数関数のようなグラフを得ることができた。この結果をもとに、濡らす物質や条件を変えて、詳しい規則性について考えていく。

動機

以前トイレットペーパーの吸水力についての実験をしたときに、水で浸したトイレットペーパーから落ちた水滴の感覚が徐々に広くなっているように感じた。そこで水滴が落ちる間隔には規則性があるのではないかと考えた。

目的

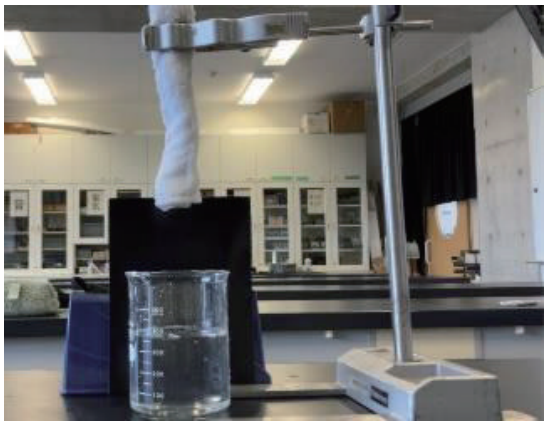
水滴が落ちる間隔の規則性を実験から見つける。

仮説

水滴が落ちる間隔には規則性があり、その規則性はどんどん間隔が広がっていくものであると考えるため二次関数の式やグラフになる。

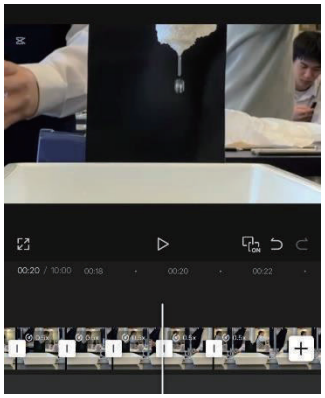
実験の道具

水　雑巾　鉄製スタンド　ビーカー
三脚　スマートフォンのカメラ



実験方法

1. スタンドを 30cm の高さにセットする。
2. 次に雑巾が水を最大限吸うくらいまで雑巾をビーカーに入っている水に浸す。
3. その雑巾から落ちてくる水滴が一点から連なって落ちてくるようにするために、雑巾の短い辺を丸めて上をスタンドに挟む。（この時、雑巾とビーカーを一緒に持ち上げているため、雑巾の下側はまだ水に浸ったままの状態である。）
4. ビーカーを外すタイミングと同時に動画を撮影する。
5. その動画は、落ちてくる水滴がはじめて一点ずつで落ちてくるようになったところから５分でカットし、0.5 倍速にする。
6. 動画をもとに、ある水滴が落ちてからその次の水滴が落ちるまでの秒数を記録する。記録をもとにグラフを作成する。



結果

結果は表 1 のようになった。表の数値はある水滴が落ちてからその次の水滴が落ちるまでの時間であり、単位は秒。1 滴目の水滴が落ちてから 2 滴目の水滴が落ちるまでの時間が n=1 の数値、k 滴目の水滴が落ちてから k+1 滴目の水滴が落ちるまでの時間が n=k の数値である。実験回数は A～U の 21 回。

また、以下は実験を行った日付である。

実験 A：2024/5/10　実験 B～F：2024/5/17　実験 G～J：2024/5/24　実験 K：2024/5/25
実験 L～M：2024/7/5　実験 N～U：2024/7/22

表1 ある水滴が落ちてからその次の水滴が落ちるまでの時間(秒)

n \ 実験	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	0.15	0.4	0.2	0.15	0.25	0.35	0.25	0.2	0.3	0.3	0.45	0.2	0.3	0.3	2.05	0.5	1	0.65	0.7	0.8	0.2
2	0.45	0.65	0.4	0.4	0.4	0.45	0.35	0.5	0.4	0.5	0.75	0.55	0.45	0.4	1.25	0.65	0.95	0.6	0.65	1.1	0.7
3	0.5	0.7	0.45	0.4	0.4	0.5	0.55	0.45	0.4	0.8	0.9	0.6	0.55	0.5	2.75	0.5	1.2	0.3	0.7	0.75	0.55
4	0.5	0.75	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.45	0.35	0.5	0.9	0.5	0.55	0.6	1.6	0.75	1.35	0.8	0.75	0.85	0.35
5	0.5	0.75	0.45	0.4	0.4	0.45	0.65	0.45	0.4	0.5	1	0.65	0.55	0.6	1.8	0.75	1.55	0.75	0.75	0.75	0.8
6	0.5	0.75	0.45	0.45	0.4	0.45	0.65	0.45	0.4	0.45	1.15	0.65	0.6	0.75	2.1	0.85	1.8	0.6	0.8	0.9	0.75
7	0.55	0.75	0.45	0.35	0.45	0.5	0.7	0.5	0.45	0.55	1.25	0.7	0.65	0.65	2.35	0.85	2.15	0.8	0.85	0.85	0.6
8	0.5	0.85	0.45	0.3	0.45	0.45	0.75	0.5	0.4	0.6	1.35	0.7	0.7	0.75	2.15	0.95	2.7	0.75	0.8	0.85	0.75
9	0.55	0.9	0.5	0.4	0.45	0.55	0.9	0.6	0.45	0.55	1.45	0.6	0.75	1	2.55	1.05	3.35	0.75	0.75	1	0.8
10	0.6	0.9	0.5	0.45	0.45	0.5	0.85	0.7	0.45	0.9	1.75	0.75	0.8	1.15	2.75	1.15	3.55	0.8	0.8	1.15	0.75
11	0.55	0.95	0.5	0.45	0.45	0.5	0.5	0.7	0.45	0.7	2	0.7	0.85	1.25	3.45	1.3	4.35	0.9	1	1.15	0.85
12	0.55	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.45	0.45	0.5	0.7	2.3	0.8	0.95	0.5	3.8	1.45	4.1	0.75	1	1.45	0.85
13	0.55	1.05	0.5	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.5	0.7	1.95	0.85	1	0.5	4.45	1.65	4.4	0.9	1	1.2	0.7
14	0.6	1.1	0.55	0.5	0.5	0.55	0.65	0.7	0.5	0.8	2.4	0.85	1.1	1.3	5.1	1.8	8	0.95	1.05	1.1	0.95
15	0.65	1.1	0.55	0.55	0.55	0.6	0.8	0.7	0.5	0.95	2.8	0.85	1.15	1.45	5.8	2	10.2	1	1.1	0.95	0.95
16	0.65	1.2	0.55	0.55	0.5	0.55	0.6	0.55	0.55	1.1	3.4	0.8	1.2	1.45	5.15	2.2	13.25	1.05	1	1.45	1
17	0.7	1.2	0.55	0.55	0.55	0.65	0.8	0.45	0.5	1.2	3.65	1.05	1.35	1.65	4.25	2.25	16.75	1.1	1.2	1.65	1.05
18	0.7	1.25	0.6	0.55	0.55	0.6	0.95	0.7	0.6	1.4	3.8	1	1.4	1.95	7.5	2.7	22.1	1.15	1.35	1.7	1.1
19	0.75	1.3	0.6	0.55	0.55	0.65	1.1	0.55	0.55	1.55	3.8	1.05	1.55	1.6	7.4	3	28.3	1.2	1.35	1.8	1.15
20	0.7	1.4	0.65	0.55	0.6	0.65	1.25	0.7	0.55	1.85	4.25	1.15	1.65	1.45	9.45	3.65	37.5	1.3	1.55	1.45	1.2
21	0.8	1.45	0.6	0.55	0.6	0.65	1.45	0.8	0.6	2.1	4.9	1.2	1.6	1.35	10.5	4.25	49.5	1.25	1.65	2.1	1.3
22	0.8	1.5	0.6	0.6	0.6	0.7	1.6	0.9	0.65	2.45	5.1	1.25	1.85	2.15	13.1	5	56.5	1.4	1.8	2.3	1.25
23	0.8	1.55	0.65	0.55	0.65	0.7	1.75	1.15	0.6	2.8	6.3	0.9	2	1.55	14.65	4.85	68.5	1.55	1.95	2.65	1.45
24	0.8	1.65	0.65	0.6	0.65	0.7	1.75	0.95	0.7	3.05	4.8	0.7	1.95	1.6	15.65	6.5		1.5	2.05	2.65	1.5
25	0.85	1.7	0.7	0.65	0.65	0.75	1.6	1.3	0.65	3.7	5.05	1.05	2.25	2.5	18.8	7.3		1.65	2.15	2.75	1.55
26	0.9	1.8	0.7	0.6	0.65	0.75	1.95	1.5	0.7	4.7	6.85	1.2	2.3	2.85	19.9	8.7		1.7	2.25	3.15	1.6
27	0.85	1.8	0.7	0.6	0.7	0.8	1.7	1.6	0.7	4.75	7.6	1.4	1.25	3	23.95	10.15		1.8	2.3	3.55	1.7
28	0.9	1.9	0.75	0.6	0.7	0.8	1.8	1.9	0.75	5.75	8.15	1.5	2.4	3.4	30.5	11.4		1.85	2.7	3.8	1.75
29	0.95	2.1	0.75	0.7	0.6	0.8	2.45	2.1	0.75	5	7.85	1.65	2.65	3.45	37.5	13.6		2	2.2	4.4	1.9
30	1	2.1	0.85	0.7	0.55	0.85	2.85	2.4	0.75	3.3	9.7	1.6	2.6	3.9	40.5	6.3		2.1	3	4.85	1.95
31	0.8	2	0.85	0.7	0.7	0.85	3.05	2.7	0.75	4.7	11.8	1.8	3.25	4.1	35.5	15		2.3	3.2	5.3	2.1
32	1	2	0.85	0.6	0.75	0.9	3.85	3	0.8	5.75	12.1	1.95	3.4	4.35	55.5	2.05		2.45	3.75	4.95	2.3
33	1	2.3	0.9	0.65	0.75	0.85	3.7	3.05	0.8	6.8	13.15	0.2	3.85	4.75		7.4		2.6	2.45	4.85	2.45
34	1.1	2.6	0.95	0.75	0.8	0.95	2.9	3.65	0.85	5.3	13.7	2.25	4.15	3.9		15.9		2.75	3.25	6.95	2.65
35	1.15	2.8	1	0.8	0.85	0.95	4.45	4.45	0.9	9.4	15.15	2.4	4.55	4.65		17.35		2.95	4.7	8.05	2.7
36	1.15	2.9	1	0.8	0.85	0.95	5.15	3.9	0.9	13.1	17.5	2.3	5.15	3.95		24.35		3.2	5.15	9.25	2.95
37	1.25	2.75	1	0.85	0.55	0.95	5.1	4.85	0.9	14.35	17.45	2.7	5.5	5.15		29		2.85	5.6	11	3.2
38	1.3	3.3	1.1	0.8	0.6	1	5.85	4.45	0.95	17.75	18.95	2.7	2.95	5.55		34		3.3	6.35	12.5	2.85
39	1.3	3.1	1.15	0.85	0.8	0.95	7.3	5.9	1	22.4	24.55	2.85	5.75	5.85		42.5		3.65	6.9	15.9	3.3
40	1.3	3	1.1	0.85	0.9	1.05	8.7	7	1	26.7	24.15	2.9	6.9	5.65		54.5		4.15	7.65	17.4	3.6
41	1.25	3.75	1.15	0.9	0.9	1.05	9.4	4.4	1	31.5		3.15	7.45	5.95				4.35	8.55	21.65	4.15
42	1.3	3.95	1.2	0.9	1	1.15	10.25	5.95	1.05	43.5		3.45	8.45	6.1				4.4	9.75	19.75	4.35
43	1.4	4.45	1.25	0.95	1.05	1.15	11.4	8.4	1.1			3.5	5.9	4.2				5.3	10.95	28.45	4.45
44	1.5	4.65	1.3	1	1.1	1.2	12.6	9.9	1.05			3.85	9.1	6.2				5.35	12.5	32.5	5.3
45	1.45	4.65	1.35	1.05	1.1	1.3	14.7	12.7	1.1			4	10.3	3.25				6.4	14.7	42.5	5.35
46	1.6	5.35	1.4	1.1	1.1	1.3	16.25	15.55	1.15			4.2	11.4	6.75				6.6	17.1	54	6.4
47	1.8	4.8	1.5	1.1	1.25	1.35	18.25	19.35	1.25			2.8	13.2	7.7				7.2	18.05		6.55
48	1.9	5.7	1.5	1.05	1.2	1.4	21.8	20.1	1.3			3.75	14.75	7.8				6.45	23.45		7.25
49	1.9	6.45	1.55	1.1	1.25	1.35	24.9	23.05	1.3			4.7	15.7	8.4				9.05	23.55		6.4
50	2	6.85	1.6	1.2	1.3	1.45	31	18.05	1.35			4.7	16.2	7.8				9.15	30.5		9.05
51	2.05	7.2	1.6	1.25	1.3	1.55	35.5	34	1.45			4.95	16	9.15				11.35	37.5		9.1
52	2.2	8.15	1.65	0.95	1.2	1.6		35.5	1.5			4.65	23.05	8.15				11.05	39		11.35
53	2.35	6.7	1.7	1.1	0.8				1.55			5.85	25.85	10.05				12.25	40.5		11.05
54	2.4	9.1	1.8	1.05	1.3				1.65			6	31	10.05				15.65			12.25
55	2.6	9.7	2	1.3	1.45				1.65			6.35		11				17.6			15.6
56	2.6	12.3	2.05	1.35	1.55				1.75			3.05		11.25				16.9			17.65
57	2.85	11.85	2.1	1.45	1.3				1.85			2.2		12.5				16.35			16.85
58	2.75	14.05	2.2	1.5	1.65				1.9			3.55		13.4				20.1			16.35
59	2.7	16.2	2.3	1.6	1.65				1.95			5.75		15.5				24.2			20.1
60	3.2	19.5	2.4	1.65	1.75				1.95			0.7		13.7				26.6			24.25
61	3.45	23.3	2.7	1.7	1.8				2.1			1.3		15.35				32.5			
62	3.4		2.75	1.8	1.75				2.3			3.6		17.7				35.5			
63	3.4		2.8	1.85	1.95				2.4			6.05		19.4							
64	4		3.05	2.05	2.1				2.5			7.8		20.15							
65	4.15		3.35	2.05	2.25				2.6			8.4		22.15							
66	4.75		3.6	2.2	2.3				2.75			8.6									
67	5.25		3.8	2.35	2.25				2.85			9.85									
68	5.4		4	2.35	2.5				3.05			10.15									
69	6		4.2	2.4	2.4				3.15			12.35									
70	6.4		4.3	2.7	2.7				3			13.1									
71	6.5		4.9	2.8	2.9				3.3			14.3									
72	7.5		5.5	3	3				3.85			15.2									
73	4.2		5.9	3.2	3.3				4.15			16.45									
74	7.55		6.4	3.4	3.5				4			17.55									
75	9.3		6.7	3.7	3.95				4.15			20.65									
76	10.05		5.75	3.95	4				4.75												
77	7.95		7.5	4	4.3				5.05												
78	10.85		8.35	4.4	4.75				5.65												
79	13.5		9.65	4.85	5.45				6.2												
80	15.2		11	5.5	5.55				6.65												
81	11.75		12.7	5.45	5.8				7.05												
82	14.25		13.9	6.3	5.65				7.5												
83	20.3		16.7	6.5	7.3				8.45												
84	18.15		16	7.3	8.1				8.1												
85			18.8	8.1	8.2				9.55												
86			26.3	8.95	9.35				8.3												
87				10.45	11.65				9.8												
88				11.95	13.35				13.55												
89				13.9	15.6				14.4												
90				16.25	16.35				14.3												
91				16.05	18.8				16												
92				21.85	23				18.3												
93				25.45	27.8				22.1												
94									22.5												
95									29.2												

考察

図１は実験の結果をグラフにしたものである。縦軸は、ある水滴が落ちてからその次の水滴が落ちるまでの時間(秒)。横軸は水滴の間隔(番目)。

図１のようにいずれの実験の結果も指数関数に似たグラフとなった。しかし、実験ごとに縦軸の範囲や横軸の範囲が異なっている。

図１が指数関数に似たグラフとなったことから、その片対数グラフは直線に近いグラフになると予想できる。直線になるとグラフの比較が容易になる。そこで、次は片対数グラフの傾きのばらつきから考察することにした。

図２は図１の縦軸の自然対数を取り、それをグラフにしたものである。

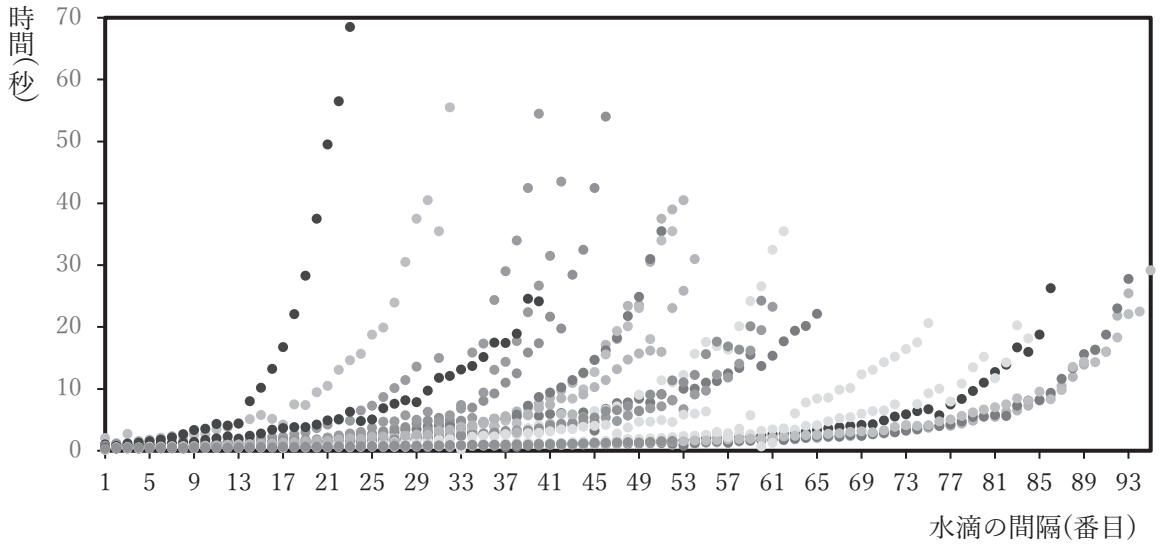


図1 水滴の間隔と間隔の秒数

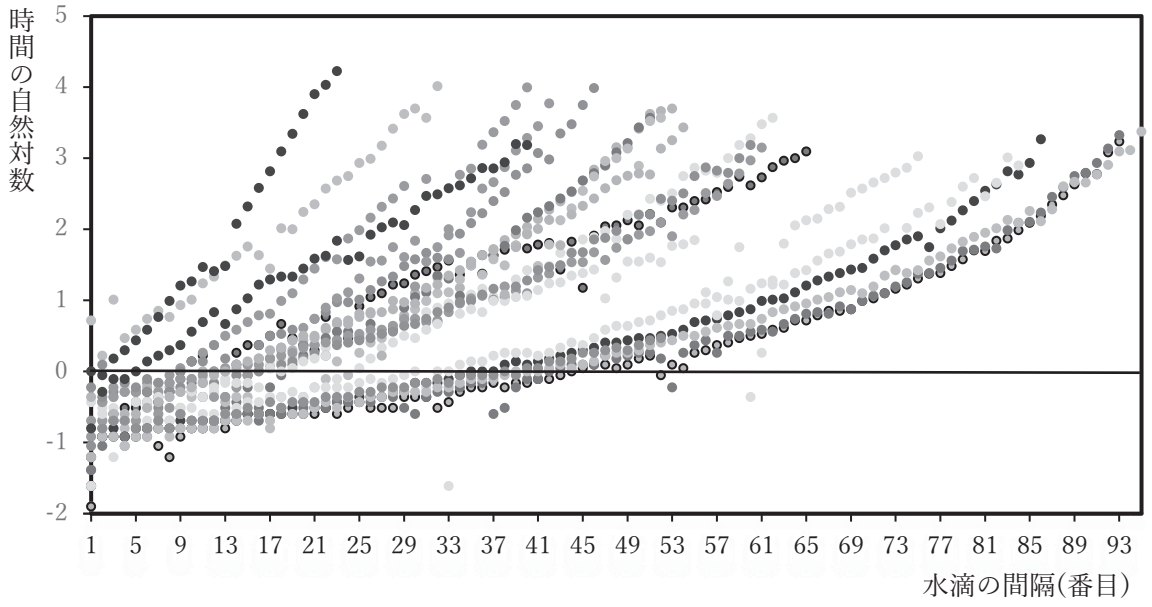


図2 水滴の間隔と間隔の秒数の自然対数

表 2 は図 2 のそれぞれの実験のグラフの近似直線を取り、その傾きの真数のばらつきを求めたものである。

変動係数はデータのばらつきを表す統計指標の一つである。具体的には、標準偏差を平均値で割った値を意味する。標準偏差を平均値で割った値であることから、異なる単位や尺度のデータを比較するのに役立つ。一般に変動係数が小さいほど、測定の精度が高いとされる。

変動係数や標準偏差が小さくなったことから傾きのばらつきが小さいと考えられる。よって、水滴が落ちる間隔には規則性があると考えられる。

表 2 図 2 の傾きを真数に戻したもの

平均	1.07767	最大値	1.223848
標準偏差	0.042619	最小値	1.02552
変動係数	0.039547	範囲	0.198328

今後の課題

含ませる水の量などを統一していなかったため結果の処理が複雑になり、評価も難しくなった。今後は材料を紐などの含ませる水の量による誤差が出にくいものに変えて実験したい。

また、考察で用いた変動係数は主に二つの集団のばらつきを比較する場合に用いられる。今回の実験では一つの集団の解析に用い、変動係数が小さいので落ちる間隔に規則性があると結論づけた。しかし、0.042619 という数値が小さいという明確な根拠がないため、必ずしもこの解析方法が正しいとは言えないと考える。今後は変動係数以上に適した評価方法を探していきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、熱心なご指導と数々の助言を頂きました鹿野先生に深く感謝いたします。また、英文のご指導をしていただいた齋藤先生をはじめ市立千葉高校の先生方、研究発表会にて指導助言者を務め、貴重なコメントを頂いた方々に心より感謝いたします。本当にありがとうございました。

大気圧低温プラズマジェットの一般化

理数科　江上悠真

要旨

プラズマジェットとは，気体をプラズマ化させ射出する装置であり，これを利用すると，狙った物質のみの表面改質を行える．このプラズマジェットの研究は盛んにおこなわれており，今では個人で作成できるほどになっているが，未だ知識がないと難しいものになっている．そうしたプラズマジェットの回路を改良し，より安価に，そしてより手軽に作成できるようにすれば，プラズマジェットへ，そしてプラズマ物理学への新規者の参入を手助けすることができるであろう．本研究では，先行研究で用いられている石英ガラスや希ガスといった高価な材料を安価なCTE33(旧パイレックス管)，混合ガスに置き換え，その分プラズマ化のために不足した条件を針電極や，マルチバイブレータで補うという試みである．

Abstract

Plasma jet is a mechanism that gas change plasma and shoot it, and by using it, it is possible to change modify the surface of only target substance. This plasma jet researches are a lot of doing now so we can make it individual. But have no knowledge high students are not. My researches are that plasma jet's circuit is changed more good and we can make more cheaper and more handmade. I help that join new person to plasma jet and plasma physics.

はじめに

プラズマは，身近なものでは炎やオーロラ，雷が知られており，高エネルギー状態で，気体とは異なった稀有な振る舞いを取ることで知られている．なお，物体を超高温にして気体がイオン化した，物体の第四の状態とプラズマを称するサイトも見つかるが，これは間違っているとは言えないが正しいとも言えない定義であるため，あくまでプラズマの定義は振る舞いであると考えてもらいたい．

プラズマも特徴で二分化され，全ての温度が高いプラズマは暖かいプラズマ($T_e \approx T_i \approx T_g(> 10000℃)$)と，電子温度のみが高いプラズマは冷たいプラズマ($T_e(> 10000℃) \gg T_i \approx T_g(\sim 100℃)$)と呼ばれている[1]．一般的に大気圧下でのプラズマ作成は基本的に粒子密度が高いため，粒子同士の相互衝突回数が盛んになり暖かいプラズマが作成されるのだが，大気圧下でもパルス放電を用いるとイオン温度や中性粒子の温度を上げることなく，冷たいプラズマを作成することができる．また，その技術は様々な分野に適応されており，蛍光灯といったプラズマ発光を応用したものだけでなく，暖かいプラズマによる金属同士の溶接，人工ダイヤモンドの作成といった熱応用や，冷たいプラズマによる熱によって変性してしまう物質表面の吸着挙動の変更[2]や汚染物質の浄化など化学的性質を応用したものもある．

低温プラズマの生成研究自体は 1941 年から現代に至るまで非常に盛んにおこなわれており[3]，最近は市販品を用いて個人で生成したという例も多く見受けられる[4]．しかし，高校生でプラズマを作成したという例は非常に少ない．要因としては，新しく取り入れなければいけない知識が多いというほか，感電や火傷の危険性がある，希ガスや電源装置が高価になってしまうといった問題が挙げられる．前述した高校生研究でも 10kV, 10kHz の高圧高周波電源を使っており，設備面のハードルは高い[5]．

そこで，本稿では真空装置を必要としない大気圧で，危険性の低い冷たいプラズマを扱うことにした．

装置製作

機構としてはプラズマジェットを，プラズマ作成には誘電体バリア方式（Dielectric Barrier Discharge：以下 DBD と称する）を用いる．プラズマジェットは，プラズマを射出することで狙った部分のみをプラズマ処理するという機構であり，DBD は金属で作られた電極を絶縁体で覆うことで起こるパルス放電を利用したプラズマ作成法である．また，ガラス管内でコロナ放電

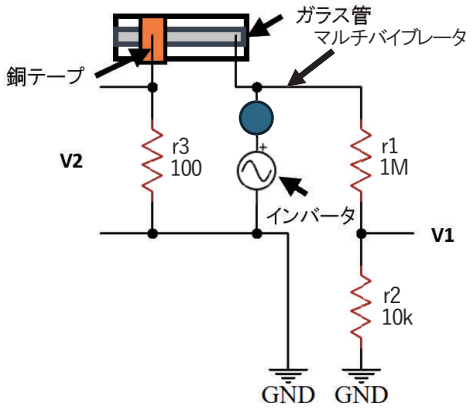
を起こすことによりガスに直接電源装置からのエネルギーを供給してプラズマが出来やすい状態にする.

プラズマジェットを作成する際の材料及び回路は先行研究[3]を参考にし，その材料の中で購入の難しいものを安価なものに変更した．回路は図 1 に示す．最終的に購入，使用したものは以下の通りである．(1)ノズルとなるガラス管は肉厚と内径が小さなもの選択することで必要な電力を小さくした．本稿では，ガラス管.COM(https://www.glass-kan.com/)の CTE33 を使用した．外径はφ6mm，内径はφ1.5mm の状態から，肉厚を限界まで削り，より電極間距離を縮めた．これにより，図 2 のパッシェンの法則に従うならば絶縁破壊に必要な電圧はおよそ 1kV ほどになると分かる．(2)パルス放電を用いるため，高電圧電源は交流である必要である．本稿では秋月電子通商(https://akizukidenshi.com/catalog/g/g111545/)の冷陰極管インバータを使用した．価格は 150 円と非常に安いが，マルチテスターで測定したところ DC12V で 300V 出力することができるものになっている．(3)DBD 放電部はノズルとなるガラス管に幅 5mm の銅テープを巻く．また，コロナ放電を起こしてガスに直接印加するための電極にはステンレス線を使い，先端部を尖形にすることで必要な電力を小さくした．(4)プラズマ材料となるガスは一般的に高純度なヘリウムやアルゴンが使われているが，大変高価であるため先行研究[4]に倣い窒素を主成分とし，ペニング効果による放電開始電圧の減少を期待して酸素との混合ガスにした.

だが材料を安価にした分，どうしてもプラズマを生成しにくい状態となったため，図 1 の青円部に非安定マルチバイブレータを導入した．回路は図 3 に示す．これはクロック回路の一種であり，トランジスタが交互に ON,OFF を繰り返すことによって大きい周波数を得られ，回路全体のリアクタンスを小さくすることができる．なお，クロックするように$R2 \gg R1$にし，更になるべく抵抗値を小さくした.

また，装置にかかる電流および電圧は直接マルチテスターを用いていたが，リード棒にスパークが起こるようになったため，図 1 で示すように r1 および r2 で抵抗分圧して V1 から電圧を測定した．また，r3 の電圧降下 V2 から電流 0.2mA を求め，マルチバイブレータによって大きくした周波数は C++言語のプログラム[5]により計算をした．なお，r1 が巨大なのはコロナ放電を維持するバラスト抵抗となることも期待しているからである.

図 1 プラズマジェットの電気回路



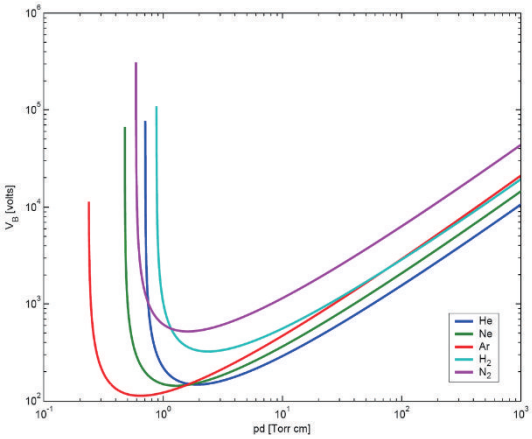


図 2 パッシェンの法則(引用元:Wikipedia)

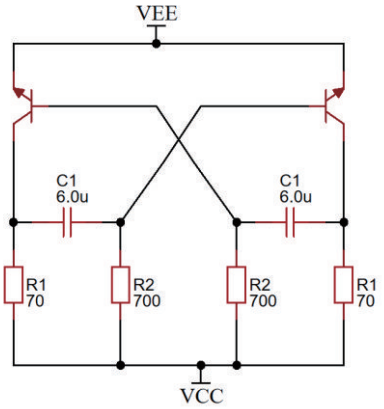


図 3 マルチバイブレータの電気回路

安全対策

実験を行う前に作業者および公衆が死亡災害を起こさないためにも安全対策を練る必要性がある．一番懸念されるのは，比較的高電圧による感電リスクである．人体は数十 V 以上帯電した導電部に近づくことで感電し，そこから 50mA 以上流れ続けることにより心室細動を起こす．そしてこの災害は死傷者数に対する死亡者は約 13%(平成 13 年から 15 年までの 3 年間の平均)と

かなり高く[6]，平成19年から24年までの6年間の死傷者の電圧別割合を見てみると，89人中52人(58%)が低電圧(交流600V以下)である[7].

実際に感電を防止するために実験者に対して以下のことを要求したい.(1)必ず接地されているかということを確認すること.(2)導電部に接触しないよう近づかないこと.(3)集中力を切らさないよう，長時間の実験は避けること.(4)実験開始時，公衆にきちんと伝えること(5)きちんと知識を持つこと.(6)決して過信しないこと.

特に，(6)について，感電死傷者数は作業経験年数が20年以上の作業者が多く[8]，慣れているからと慢心してはいけないことが分かる．また，大気圧プラズマ生成時にはオゾンが発生するため，長時間曝露する環境に居ないことや，火を取り扱わないことも重要である.

実験方法

電源装置を用いてインバータに12V与え，ノズルの銅テープ側ではないほうから窒素ガスと酸素ガスを同時に送り混合させる．そして，放電が起こっているかを音と光で判断し，プラズマが起こっているかをプラズマ発光が確認されるかで判断する.

実験結果

DBD放電，コロナ放電，プラズマのいずれも発生が確認されなかった．この際，電圧は300V，電流は0.2mA周波数は584.51Hzであった.

考察

パッシェンの法則で要求された1kVと実験にて出た300Vではかなりの差があり，本稿の方法では700Vも要求電圧を降下することは出来なかったのではないかと考えられる．またプラズマ化に関しては放電が起こっていないため想定でしかないが，広く行われているプラズマジェットの研究では，最低でも電圧が5kV以上，周波数が10kHz以上であるため[4,9,10]，そもそもぎりぎりではあったのではないかと想定されるほか，希ガスを窒素ガスに変更してプラズマを発生させようとしたのは想定より遙かに大変なことではあったのではないだろうかと考えた.

おわりに

電磁波による影響や感電リスクの上昇を抑えるために整理や絶縁体被膜といった安全性のための改良を行いながら，インバータをより昇圧できるものに変更する必要があると考えた.

また，大型になると危惧して真空装置を導入しなかったが，大気圧を$\frac{1}{10}$にするだけで必要電圧がかなり下がるため，安価な真空装置があるのであれば導入を検討するのもありかもしれない.

実験としては残念な結果となってしまったが，本稿がプラズマジェットという分野に興味をもった新規参入者にとって指南車となることを期待している.

謝辞

本研究の開始および本稿の執筆にあたり，多くの方々にご支援いただきました.

研究を開始するにあたり，テーマのご相談をさせて頂だき，研究発表でも貴重なご指導，ご助言をくださった北川敦志博士，取り次いでくださった平山亮一先生．心より感謝申し上げます.

課題研究担当教員として，本稿の校正等の研究支援を行っていただきました松岡創一郎先生，物理教員として必要機材の貸し出しや，研究テーマの相談にのっていただき，分野に対する知識をご指導いただきました田崎賢也先生，英語教員として本稿の執筆にあたりAbstractを校正していただきました坂巻諒一先生，部活顧問として草稿すらない中からご指導いただきました加藤文孝先生，WSC推進部長として論文の引用方法や国際的な研究発表の場を設けていただきました三坂智樹先生．心より感謝申し上げます.

最後に，所属する物理化学部，そして同じ部屋で課題研究をしたみなさまには多くのご助言をいただき，トランジスタといった物品のご支援までいただきました．お礼申し上げます.

ありがとうございました.

参考文献

[1]「プラズマの定義と温度の概念，そしてサハ方程式(Saha equation)」
https://www.yunseo.kim/ja/posts/definition-of-

plasma-and-saha-equation/(2025年2月28日 閲覧).

[2] 福井寛「粉体の表面処理」(2011).

[3]明石和夫「プラズマプロセシングの発展史概要ー萌芽期・成長初期に重点を置いてー」(2010).

[4]「DBD(誘電体バリア放電)プラズマ発生装置を作成してみました - 株式会社マッケンジー研究所」https://mckenzie.co.jp/2023/05/29/dbd%E3%83%97%E3%83%A9%E3%82%BA%E3%83%9E%E7%99%BA%E7%94%9F%E8%A3%85%E7%BD%AE%E4%BD%9C%E6%88%90/(2025/04/22　閲覧).

[5]池山竜一,小川雄大,野間章寛,山内遼平「大気圧プラズマによる樹脂表面の親水化の研究」. Journal of Plasma and Fusion Research Vol.89, No.1 January 2013: 75-76.

[3] 赤松浩,金田知大,市川和典「簡単に始められる大気圧プラズマジェットの実験」(2012). 神戸市立工業高等専門学校研究紀要 50: 87-92.

[4] 西山修輔,石井玄武,白井直機,佐々木浩一「窒素を主成分とする大気圧プラズマジェットの生成と分光計測」(2017).

[5] 「実は奥が深い無安定マルチバイブレータの発振周波数（より厳密な式を導いてみた）」https://qiita.com/kawanon868/items/4008eff4585fbffa3a8 (2025年2月26日　閲覧).

[6] 野沢智洋,高木弘一,浪平隆男北野勝久,金載浩,野村信福,市川紀充,冨田一,林信哉,岩尾徹「3 大気圧プラズマを準備しよう」(2007).

[7] 富田一「最近の感電死亡災害の分析」(2015).

[8] 中部近畿産業保安監督部北陸産業保安監督署「令和5年度における電気事故について - METI」(2024).

[9] 中村昭平,堀越章,高辻茂,河野元宏,木瀬一夫,橋爪博司,石川健治,堀勝「酵母菌を用いたプラズマ活性水の評価」(2017).

[10] 呉準席,白藤立,八田章光,伊藤昌文「高電圧直流パルス大気圧プラズマジェットを用いたプラズマ活性水作製」(2019)

アマゾントチカガミについて

理数科　大野祐司　鶴岡歩夢

Abstract

In order to suppress the spread of the invasive species Limnobium laevigatum (Amazon frogbit), which has been confirmed to be established in Chiba Prefecture, we will investigate the environmental conditions (mainly the water quality) suitable for its growth. If changes in the population of Limnobium laevigatum are observed through this experiment, it will help to clarify the conditions favorable to its growth and provide clues for controlling its spread.

要約

千葉県での定着が確認されている外来種のアマゾントチカガミの増殖を抑制するために、アマゾントチカガミの生育に適した環境（ここでは主に水質）を調査する。この実験を通して、アマゾントチカガミの個体数に変化が見られれば、アマゾントチカガミに適した環境が明らかになり、増殖を抑制する手がかりになると考える。

研究動機

外来種は生態系や経済、人間社会に悪影響をもたらしており、特に在来種の減少や食物連鎖の乱れは大きな問題となっている。そこで私たちは、千葉県内で繁殖しているアマゾントチカガミに着目した。

研究目的

本研究では、主に水質に着目し、アマゾントチカガミに影響を及ぼす水質条件を調査することで、その生育に適した環境を明らかにし、増殖抑制のための手掛かりを見出すことを目的とする。

アマゾントチカガミとは

オモダカ目トチカガミ科の浮水植物。ランナーと呼ばれる親株から出た茎の先端から出てきた芽や根が子株となって増える。アクアリウムショップなどで観葉植物として販売されており、遺棄されたものが水路などで外来種として繁殖している。湖沼、ため池、河川の淀みなどに生息する。千葉県内では特に印旛周辺で繁殖している。

実験Ⅰ

実験方法

アマゾントチカガミを３つのグループに分け、それぞれのグループで生育環境を変えて栽培し、生育状況を調べ、株の個数で評価する。分けたものに①から⑨までの番号を振り、次のような条件で育てた。

場所：日光が当たる窓際

平均気温：14℃前後

生育容器：ペットボトル

水量：1L

水槽①～③水道水

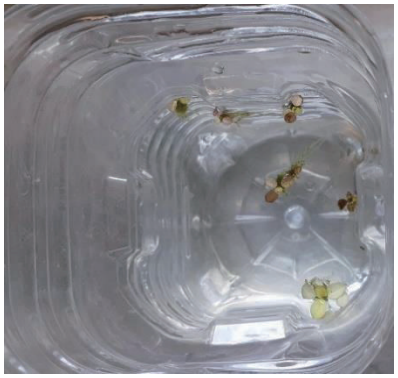
水槽④～⑥チオ硫酸ナトリウム５水和物でハロゲン（主に塩素）を除いた水道水

水槽⑦～⑨肥料入り水道水 微粉ハイポネックス 1g（主成分は窒素、リン酸、カリウム）

実験結果

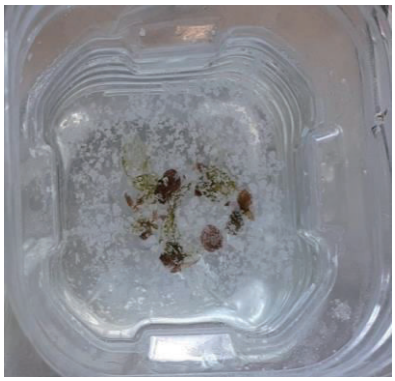
水槽①

水槽②



水槽③

水槽④



水槽⑤

写真は８月６日時点

水槽①、②、③の株数には減少が見られたが大きな変化は見られなかった。

水槽④、⑤の株数には大きな減少が見られた。

硬水を入れたもの(水槽④)では水面に白色の浮遊物が生成されていた。

肥料を入れたもの(水槽⑤)では藻が大量に発生していた。

	水槽①	水槽②	水槽③	水槽④	水槽⑤
7 月 26 日	10 株	15 株	13 株	12 株	8 株
7 月 29 日	9 株	14 株	13 株	7 株	5 株
8 月 2 日	9 株	14 株	12 株	7 株	5 株
8 月 6 日	9 株	14 株	12 株	5 株	4 株

考察

水道水とその他の４つでそれぞれＴ検定を行った。

水槽①と②　$P=1.29275\times10^{-8}$

水槽①と③　$P=2.63038\times10^{-6}$

水槽①と④　$P=1$

水槽①と⑤　$P=1$

この結果から水槽①と水槽②、③間では $P<0.05$ なので有意差があると判断できる。

よって、水道水をカルキ抜きすることや水質を軟水にすることはアマゾントチカガミの生育に影響を与えると考えられる。

また、水槽①と水槽④、⑤間では $P>0.05$ なので有意差がない。よって、これらのデータは比較できないと考える。

水槽④の白い浮遊物は硬水の水面にしか見られなかったため、硬水に多く含まれるカルシウム、マグネシウムが空気と反応したものと考えられる。

水槽⑤の藻は肥料による富栄養化と日照時間が長いことの２つによって大量発生したと考えられる。

これらの２点により、硬水や肥料入り水道水では成長を妨げられる要素があったと思われるため、有

効なデータが得られなかったと考える。

反省点

今回の実験では、藻が発生してしまったり、炭酸塩と思われる物質が発生し呼吸を妨げたりと、成長を阻害する要因が発生した。そのため、次の実験に向けて、栽培方法や水質を調査して改善することが必要である。そのために、いくつかの手段を考えた。まずは水を交換する頻度を増加させる。これにより、アマゾントチカガミの生育を阻害する量の藻の繁殖や水面を覆う物質の蓄積を妨げることができる。また、苦手とされている直射日光を制限することも検討した。アマゾントチカガミの生育に適し、かつ藻の増殖が少ない濃度を明らかにできれば、もう一度ほかの水質条件と比較検討することができると考えられる。硬度についても適した条件を探ることが必要である。これらの反省を踏まえ、条件を決定するための予備実験を綿密に行ったうえで、再度今回と同じ対照実験を実施した。

実験Ⅱ

実験方法

アマゾントチカガミを３つのグループに分け、それぞれのグループで生育環境を変えて栽培し、生育状況を調べ、株の個数で評価する。分けたものに①から⑨までの番号を振り、次のような条件で育てた。

場所：日光が当たる窓際

平均気温：14℃前後

生育容器：ペットボトル

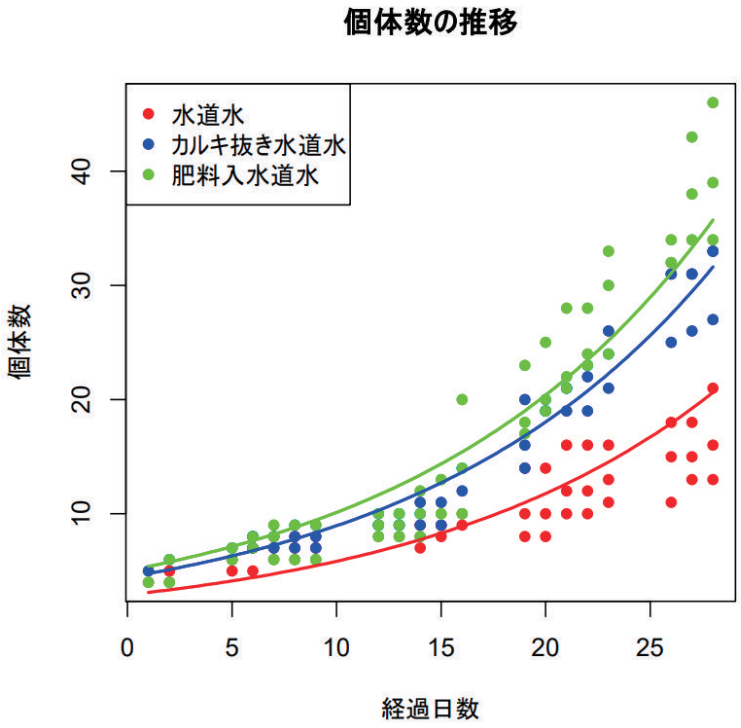
水量：1L

水槽①～③水道水

水槽④～⑥チオ硫酸ナトリウム５水和物でハロゲン(主に塩素)を除いた水道水

水槽⑦～⑨肥料入り水道水 微粉ハイポネックス 1g(主成分は窒素、リン酸、カリウム)

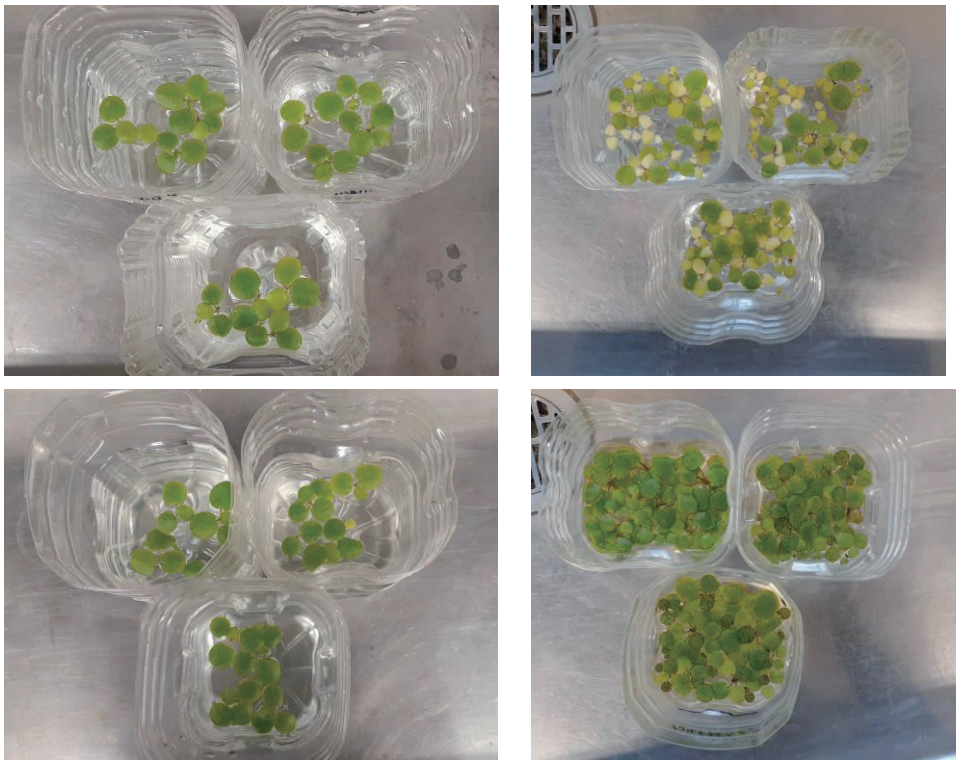
実験結果



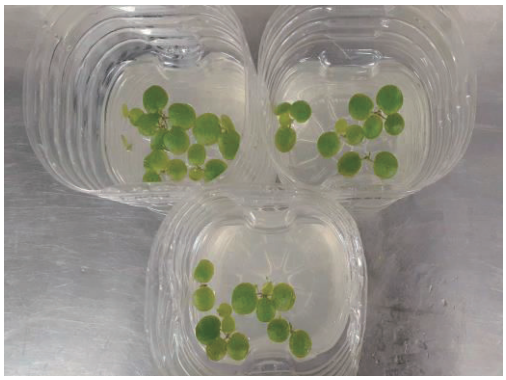
11 月 13 日　　12 月 11 日

水道水

カルキ抜き



肥料入り



・カルキ抜き水道水は水道水と比べて個体数は約 1.53 倍となった。

・肥料入り水道水は水道水と比べて個体数は約 1.73 倍となった。

考察

・経過日数に比例して個体数は増加している。

・残差が小さく、p 値も有意で、データを十分に説明するモデルである。

・基準となる水道水と比べて、カルキ抜き水道水と肥料入り水道水は個体数を増加させる。

今後の展望

本実験の結果、塩素がアマゾントチカガミの生育に影響を与えることが確認された。したがって、在来種に悪影響を及ぼさないものが見いだされれば、有効な対策となり得ると考える。今後は、同条件下で在来種を生育し、その影響を詳細に観察することで、さらなる検証と考察を進める予定である。

個体数だけでなく、個体の大きさや重量にもばらつきがあるため、アマゾントチカガミの重量や生息密度といった他の指標も測定対象に含めることを検討する。

次回の実験では、生息環境における気温や肥料濃度の変更など、新たな条件を加え、本実験と同様の対照実験を再実施することを検討する。

印旛沼をはじめとした、アマゾントチカガミが多く生息する地域における水質を詳細に調べる計画も立てている。本実験では、水温、ph、溶存酸素量、栄養塩濃度(窒素、リン等)など複数のパラメーターを網羅的に測定し、各因子がアマゾントチカガミの生育に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。この調査から、本実験で得られたデータと現地で得られたデータを比較することによって、自然環境における塩素、栄養塩がアマゾントチカガミの生育に及ぼす影響の解明、及び実験条件が自然環境をどの程度再現できていたのか、あるいはどのような点で乖離が生じているかを明確に把握することが期待される。こうしたフィールド調査と実験結果の比較を通し、環境要因とアマゾントチカガミの分布及び生育状況との関係性を包括的に解析し、将来的な環境保全対策の策定に寄与することが見込まれる。

謝辞

本論文の作成に際し、松田先生には終始適切なご指導とご助言を賜り、深く感謝申し上げます。また、山田先生にはポスターの制作に際し、貴重なご助言を賜り、心より御礼申し上げます。さらに、篠原先生にはデータ分析におけるご協力を賜り、厚く御礼申し上げます。加えて、英語要約の作成にご尽力してくださった廣瀬先生にも、重ねて感謝申し上げます。

参考文献

アマゾントチカガミ　超水草図鑑　閲覧日 9 月 8 日

https://eightmillion.net/2011/04/post-444/

日本帰化植物友の会通信　アマゾントチカガミについて　大野啓一　閲覧日 9 月 19 日

優先対策種「アマゾントチカガミ」について/栃木県　閲覧日 9 月 8 日

https://www.pref.tochigi.lg.jp/d04/gairaishu/amazonfrogbit.html

平らなグラウンドを作るために

大村仁哉,　出口真帆

[Abstract]

When there was a large amount of sand on the ground, it was difficult to level it with an infield rake. However, when a vehicle towed brush was used, the ground could be leveled. Ground maintenance is keeping the amount of sand that passes through the gap between the rake blades when the infield rake is pulled. Therefore, we focused on the differences between the weight of infield rake and vehicle towed brush and experimented that the ground could be leveled by changing the weight of the infield rake. In experiment1, we recorded the distance that softballs rolled on two types of ground. One where a hole was dug with a shovel and another where the maintenance was completed. The results showed that the heavier the infield rake became, the more uneven the ground became, and the distance the ball traveled decreased. We believe that the reason for this was that the heavier infield rake decreased the amount of sand that pass through the gap between the blades of the infield rake and increased the amount of sand that was dug by the infield rake. As a result, uneven the amount of sand remained on the ground after leaving. In experiment 2, we rolled softballs and recorded the distance they traveled after maintaining the ground with both the bladed side and non-bladed side of the infield rake. The results showed that softball traveled was longer when the ground was maintained on the surface without the blades than when it was maintained with the surface with the blades of the infield rake. We attributed this to the fact that the removal of the infield rake blades decreased the amount of sand that could be dug up, thereby reducing the unevenness in the amount of sand remained from the infield rake.

［要旨］

砂の量が多いグラウンドではグラウンドレーキを用いて整備をしてもグラウンドが平らになりづらい。しかし、車両牽引用レーキブラシを用いることで、グラウンドを平らにすることができた。グラウンド整備は、グラウンドレーキを引く際にグラウンドレーキの刃の隙間から砂が通り抜け、その量を一定に保つことで行われる。そこで今回私たちは、グラウンドレーキと車両牽引用レーキブラシの重さの違いに注目し、グラウンドレーキの重さを変化させることによって、グラウンドを平らにすることが出きるのではないかと考え実験を行った。実験１では、グラウンドに穴をスコップで掘ったときと、グラウンド整備を行った後の両方でソフトボールを転がし転がった距離を記録した。その結果、グラウンドレーキの重さを増やすほど、かえってグラウンドが凸凹になってしまい、ボールの進む距離が減少した。これは、グラウンドレーキが重くなることで、グラウンドレーキの刃の隙間から出る砂の量が減少し、堀取る砂の量が増加してしまったため、グラウンドレーキからグラウンドに出る砂の量にムラができてしまったからだと考えた。また実験２では、グラウンドレーキの刃のある面で整備をしたときと刃のない面で整備をしたときの両方でソフトボールを転がし、転がった距離を記録した。その結果、グラウンドレーキの刃がある面で整備をしたときよりも刃のない面で整備をしたときのほうがソフトボールの転がる距離が長くなっていた。これは、グラウンドレーキの刃がなくなったことで、掘れる砂の量が少なくなったことで、グラウンドレーキから出る砂の量にムラができにくくなったからだと考えた。

1. 序論

グラウンド整備とは、サッカーや野球など主にスポーツをする目的で土のグラウンドを使用する際、使用する前後にグラウンドを使いやすくするために平らにする作業のことである。砂の量が多いグラウンドでグラウンドレーキ（図１）. を用いてグラウンド整備をした場合、グラウンドが平らにならないことがある。しかし車両牽引用レーキブラシ（図２；写真はエバニュー公式オンラインショップより引用）. を用いたグラウンド整備では、グラウンドを平らにすることができた。そこで今回私たちはグラウンドレーキを、車両牽引用グラウンドレーキを用いた時の条件に近づけることで、グラウンドを平らにしたいと考えた。

図１　グラウンドレーキ

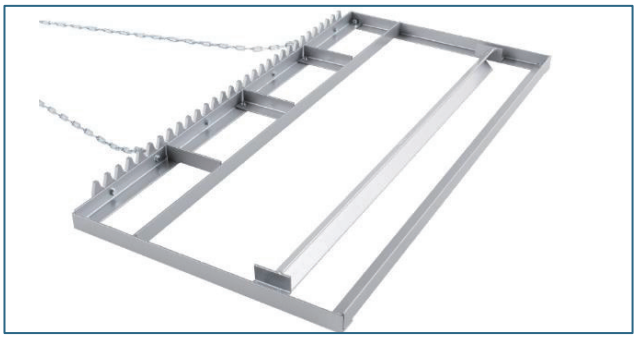


図２　車両牽引用グラウンドレーキ

3. 予備実験

本実験での計測方法として、摩擦によってボールの転がる距離に違いが生まれることに注目した。グラウンドがどれくらい平らになったのかを判断するための指標として、整備した前後でボールを転がし、転がった距離の変化を用いた。転がったボールの距離が短い方が摩擦をより多く受けているため、グラウンドは平らでないと考えた。そのため、予備実験では結果をより明確に出すために、大きさ、重さの違うテニスボール、ソフトボールを比較し、地面との摩擦によって変化が出やすく、値の変化がより明確に出るボールの選定を行った。

実験方法

砂場をグラウンド使用後の状態と同じにするために、グラウンドレーキで平らに整えたあと、グラウンドに縦 30 ㎝、横 20 ㎝の間隔で縦に 3m 横に 1m の範囲、深さ 5 ㎝の穴をスコップで掘った。段ボールを使い同じ角度から 50 回テニスボール、ソフトボールを転がし、転がった距離を、それぞれグラウンド整備前　テニスボール、グラウンド整備前　ソフトボールとして記録した。

その後、グラウンドレーキを使い、一度だけ、グラウンド整備を行い、整備前と同様の方法でテニスボール、ソフトボールを 50 回転がし、転がった距離を記録し、記録をそれぞれグラウンド整備後　テニスボール　グラウンド整備後　ソフトボールとした。

図３　実験の様子

結果

表１　整備前後のテニスボールの転がった距離

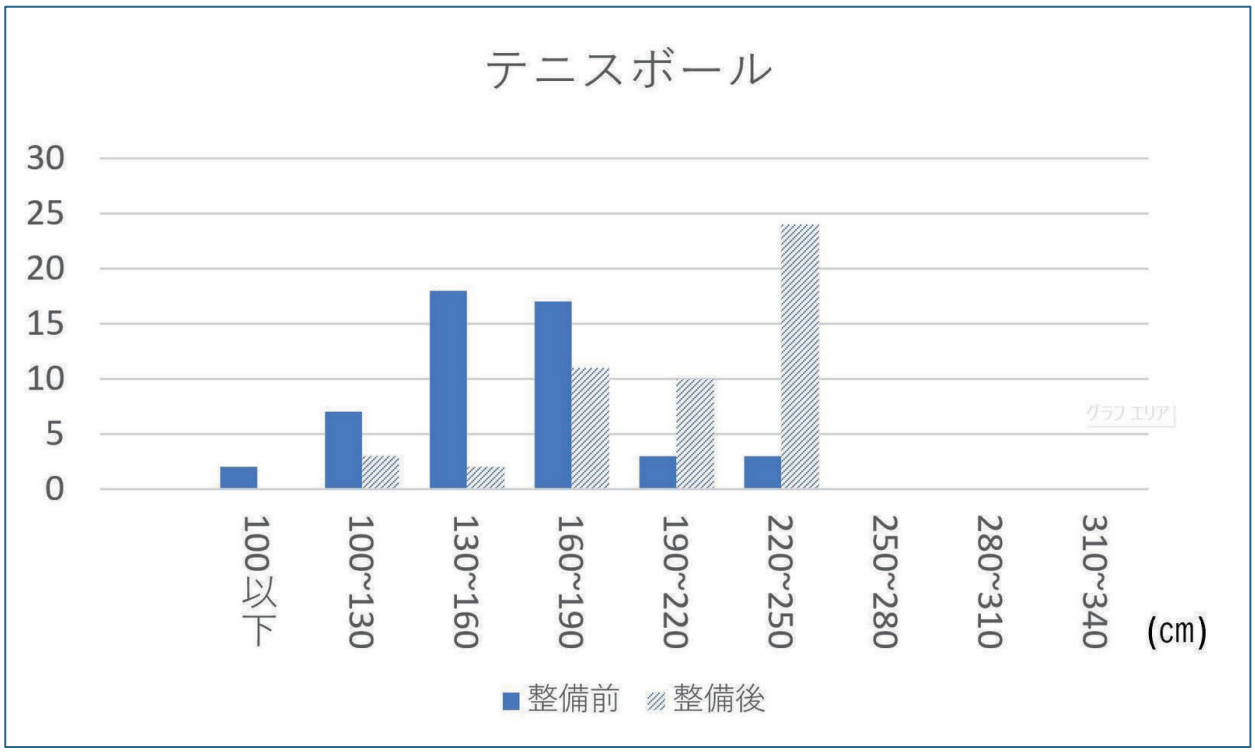


表２　整備前後のソフトボールの転がった距離

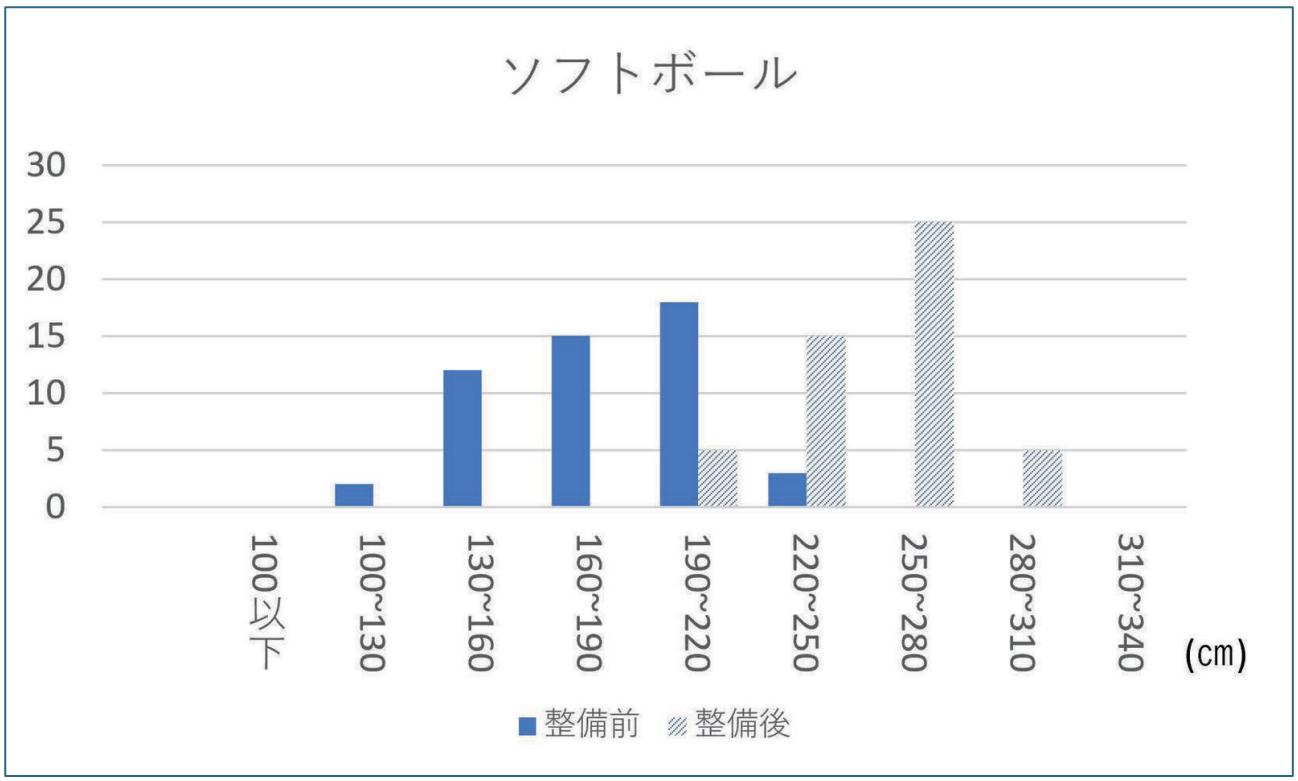


表３　各ボールの転がった距離の平均とその差

	整備前	整備済み	差
テニスボール	154.80	204.80	49.86
ソフトボール	174.86	252.52	77.66
単位はcm			

実験中テニスボールは地面の凹凸にぶつかり、はねて空中に浮きあがることがあった。また、ソフトボールの方がテニスボールよりも値の変化が大きかった。（表２）（表３）.

これらのことからソフトボールの方が、整備前により多くの摩擦を受けていたことがわかったため、私たちはテニスボールよりソフトボールの方が、この実験に適していると考えた。

3. 本実験

3-1　本実験１

本実験１では、実際にグラウンドレーキを重くすると、グラウンドが平らになるのかについて調べた。

実験方法

スコップ、グラウンドレーキ、ソフトボール、滑り台、重り(5kg、10kg)を用いて実験を行った。予備実験と同じ条件で砂場に穴を掘り、5kg の重りをつけたグラウンドレーキを一度かけ、グラウンドを平らにした。その後、滑り台を使い同じ角度で同じ位置から、ソフトボールを 50 回転がし、転がった距離を記録した。同様の実験を、重りを 10kg に変えて行った。

結果

表４　重りなし、重り５kg、重り１０kgで整備をした前後のボールの転がった距離

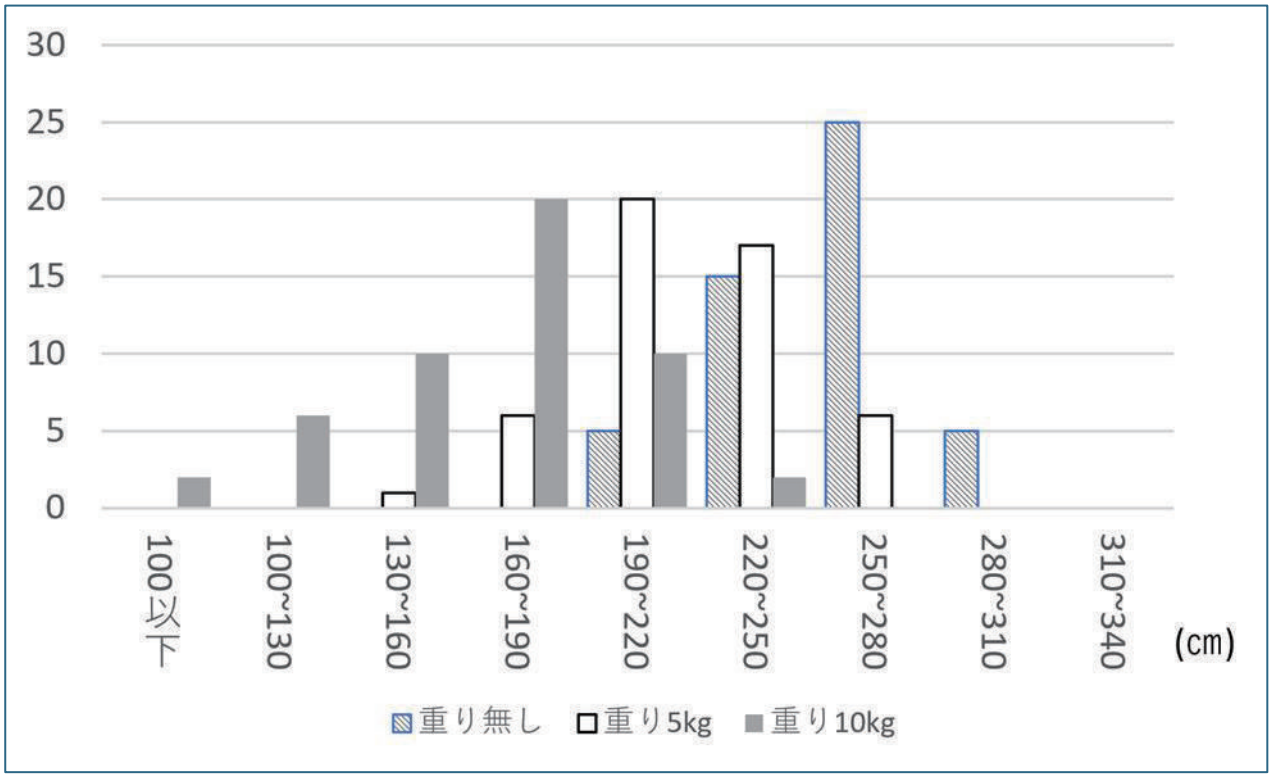


表５　重りなし、重り５kg、重り１０kgで整備をした前後のボールの転がった距離の平均値

重り無し	252.52
重り　5kg	166.32
重り　10kg	144.32
単位はcm	

グラウンドレーキの重りが 5kg の時に比べて、10kg の時の方が進む距離が短くなっていることが分かった。(表５）. また、重くなるほど重さによって地面がえぐれてしまい、凹凸ができているのが見られた。

考察

実験では砂の多いグラウンドのモデルとして、陸上部の走り幅跳び用の砂場を活用した。しかし、砂の多いグラウンドのモデルだとしても、かなり砂の量が多く、また、粒が細かい。そのため、グラウンドレーキを重くしていくことによって、グラウンドレーキが砂場に沈む深さが深くなり、その結果、掘れる砂の量が多くなってしまったり、刃の隙間から出る砂の量が場所によって違いが出てしまったりしたと考えられる。そのことから、砂の粒子の大きさや砂の量によって、平らになりやすいグラウンドレーキの重さが変わってくるのではないかと予想される。そのため、今回使ったグラウンドレーキは、使用した砂場に対して重すぎたのではないかと考えられる。

3-2　本実験 2

本実験 2 では、グラウンドレーキの重さは変えず、刃のない平らな面でグラウンド整備を行うと、平らになるのかについて調べた。

実験方法

スコップ、グラウンドレーキ、ソフトボール、滑り台を用いて実験を行った。予備実験と同じ条件で砂場に穴を掘った後、グラウンドレーキの平らな面でグラウンド整備を一度した。その後、滑り台を使い同じ角度で同じ位置から、ソフトボールを 50 回転がし、転がった距離を記録した。

結果

表６　刃ありの面と刃なしの面で整備をした前後のボールの転がった距離

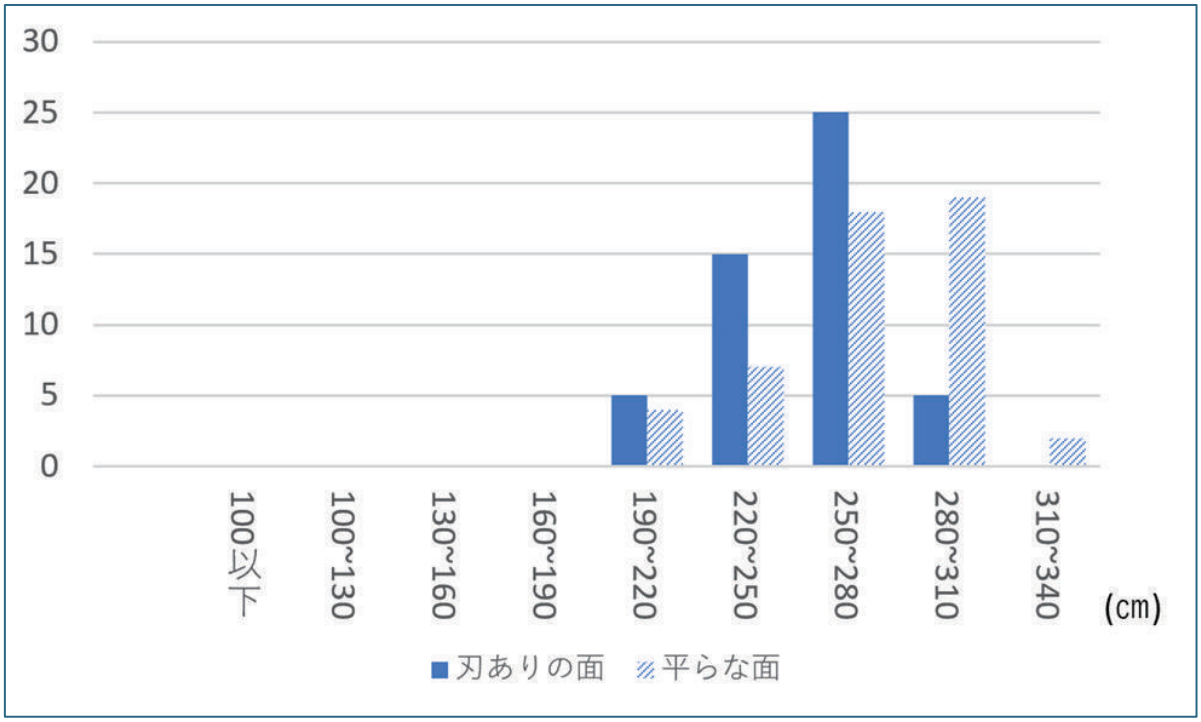


表７　刃ありの面と刃なしの面で整備をした前後のボールの転がった距離の平均値

平らな面	252.52
刃ありの面	268.76
単位はcm	

本実験１に比べて、ボールの転がる距離が長くなっていることが分かった。（表６）（表７）.

考察

グラウンドレーキの刃がなくなり、グラウンドと接する面が平らになったことによって、グラウンドにかかる圧力が、刃があった時に比べて分散したと考えられる。そのため、刃があった時に比べて、掘る砂の量が少なくなることで、レーキから出る砂の量に場所ごとの違いが少なくなり、今までで一番平らに近いグラウンドになったのだと考えられる。しかし、平らな面でグラウンド整備をすると、かける人の力加減や、砂の粒子の大きさ、グラウンドがどれくらい固まっているかによっては、必要以上に地面が削られてしまう可能性があると考えられる。

4. 展望

実験１より、より重さの軽いグラウンドレーキを使って実験を行うことで、どのくらい変化があるのかについて調べたいが、私たちには軽いグラウンドレーキの模型を作成することは難しい。そのため、実験１と実験２から刃の隙間から出る砂の量と掘れる砂の量の関係が、グラウンドが平らになる条件に関わっているのではないかと考え、今後はグラウンドレーキの引く速さを変えることで、どのくらいの速さがグラウンドを平らにするのに適しているのかについて調べていく。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、研究の着想から実験、論文まで数多くのご指導と助言をいただきました山下先生、論文の執筆の際に、概要の英文を添削していただきました大槻先生に深く感謝いたしますとともに、御礼申し上げます。

6.　参考文献

エバニュー公式オンラインショップ

https://evernew-product.net/products/detail.php?product_id=5737　６月２日閲覧

グルコースのカラメル化反応について

加藤夕凪，鈴木正太朗

[Abstract] The caramelization reaction is a reaction in which a specific smell and color appear when sugars are heated. However, there are several hypotheses about the reaction mechanism, which had not yet been clarified in detail. Therefore, we conducted research to clarify the reaction mechanism. In our experiments, we used glucose and caramel produced by heating glucose. Why we used glucose is that it is monosaccharide with a simple structure, making it easier which means it is easy to estimate the reaction mechanism compared to other sugars. In the experiments, we examined color, mass, and reducing power of glucose and its caramel. We also traced changes in the substances in the caramels by thin-layer chromatography. In addition, we dialyzed aqueous solutions of caramel and then examined changes in molecular size and color by analyzing the inner and outer solutions.

[要約]カラメル化反応とは、糖類を加熱した際に特有の匂いや色があらわれる反応のことである。しかし、この反応機構については複数の仮説があり、詳しく解明されていない。そのため、私たちはこの反応機構を明かすための研究を行った。実験には、Glc および Glc を加熱させて生成したカラメルを使用した。これは、Glc の構造が単純な単糖類であることから、反応機構の推定が他の糖と比べて容易であり、他の糖の反応機構の推定にも応用できると考えたからである。実験では、Glc とそのカラメルの色や質量、水溶液にした時の還元性の有無を調べた。また、薄層クロマトグラフィーにより、カラメルに含まれる物質の変化を追跡した。さらに、カラメルの水溶液を透析し吸光度を測定することで、分子の大きさの変化や、色の変化を調べた。

1.序論

1-1　背景

一般に、糖類を加熱すると、茶褐色に変化し、特有の甘い匂いを発する反応を起こすと知られている。この反応のことをカラメル化反応という。カラメル化反応は、比較的簡単に観察することができる反応であるが、その反応機構は複雑であるといわれており、複数の説が提唱されているため反応機構は詳しくわかっていない。そのため、カラメル色素を作る際には、実際の試行によって求めた色のカラメルを生成しているという。この反応機構が明らかになれば､試行によってではなく、理論的にカラメル色素を生成できるようになると考え、本研究ではこの反応機構について研究し、提唱されている仮説の検証を行うこととした。

1-2　関連研究

カラメル化反応の反応機構を調べるにあたって、参考となる研究事例を探したところ、スクロース(以下 : Suc)のカラメル化反応に関する研究がおこなわれていた。先行研究では、Suc を加熱して得たカラメルに対し、透析や薄層クロマトグラフィー(以下 : TLC)、吸光度測定などを行い、Suc がグルコース(以下 : Glc)とフルクトース(以下 : Fru)に分解した後にカラメル化反応を起こし、Fru 由来の色やにおいを発するという結果を得ていたが、全体の具体的な反応機構については現段階では未解決としていた(図１)。

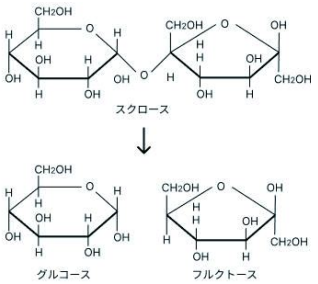


図１　Suc の分解の様子

これは、二糖類である Suc を用いたために反応経路が複雑化したことが原因の一つであると考えられる。したがって、糖類のカラメル化反応の反応機構を明らかにするための一つの方針として、先行研究で行われていた実験の単糖類への応用が考えられる。

1-3　本研究のねらい

先行研究の研究内容を踏まえ、本研究では構造が単純である単糖類の Glc を用いて実験を行い、糖類のカラメル化反応についての仮説を検証していくことにした。

1-4　仮説

定説では、Glc を加熱すると脱水反応を起こすといわれている。また、Glc が分子内脱水を起こすとヒドロキシメチルフルフラール(以下：HMF)を生成し、分子間脱水を起こすと重合してポリマーを形成するといわれている(図 2)。そのため、カラメル化は HMF または重合体を生じた後、その誘導体を生成する反応であると考えた。

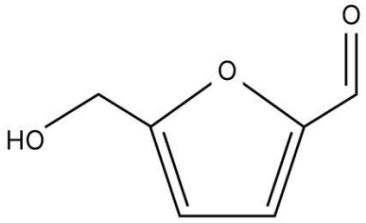


図 2　HMF の構造式

2.実験

2-1　Glc の加熱による質量と色の推移を調べる

[器具・薬品]

・アルミカップ(底径 4.9 cm)
・ホットプレート
・Glc(和光純薬, 一級 D(+)-Glucose)

[方法]

250 ℃に加熱したホットプレートでアルミカップに入れた 1.00 g の Glc を 20 個加熱し、それぞれ 1, 2, 3, 4, 5, 8, 11, 14, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 130, 160 分が経過したときに回収した(図 3)。各生成物の色と質量を記録し、加熱時間によって Glc の色と質量がどのように推移するのかを調べた。

図 3　Glc を加熱している様子

[結果]

加熱開始から 0～2 分では融解し、この時、色の変化は見られず、融解が進むにつれて気泡を出し始めた。加熱開始から 2～5 分ほどでは白色から薄黄色に変化し、褐色に近づいていった。反応の様子を観察すると、4 分ごろにかけて粘度が高くなり、気泡が落ち着きはじめ、5 分を過ぎると反応が穏やかになった。その後、色が濃褐色に近づいて行った。加熱時間が 20 分ほどになると色が黒に近い濃褐色になり、色の変化がほとんど見られなくなった。また、質量は加熱開始から 3 分間で急激に減少し、その後加熱時間 20 分まで緩やかに減少した。それ以降は元の質量の 90 %ほどの質量で顕著な変化がほぼ見られなくなった(図 4)。

表 1　加熱時間と生成物の色

加熱時間	2~5 分	5~20 分	30~ 分
色	黄～褐色	濃褐色	黒褐色
質量変化	急激	緩やか	変化なし

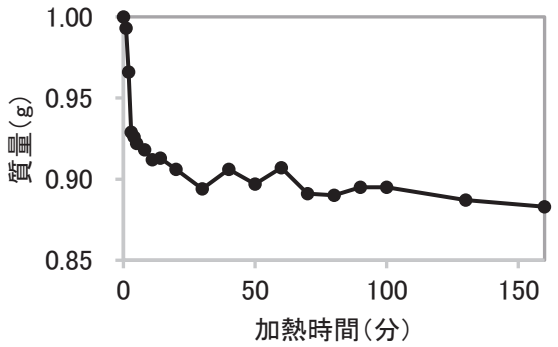


図 4　加熱時間と質量の変化

[考察]

① Glc1 分子から水 1 分子が脱離する。

Glc を加熱すると最終的に質量が約 0.90 g となった。これは、元の質量である 1.00 g の 90 %の質量である。Glc と水の分子量はそれぞれ 180 と 18 であり、水の分子量は Glc の分子量の 90 %である。これらのことを踏まえ、Glc を加熱すると、1 分子あたり水 1 分子が脱離していると考えた。

② カラメル化反応では重合体が生じている。

考察①より、カラメル化反応では Glc1 分子から水 1 分子が脱離していると考えられる。本実験の仮説では、HMF か重合体が生じていると述べたが、HMF は Glc1 分子から水 3 分子が脱離してできる物質である。これは考察②に反するため、カラメル化反応においては HMF の生成よりも重合体の形成のほうが優先されて起こっていると考えた。

2-2　生成物の還元性の有無を調べる

[器具・薬品]

・試験管
・ガスバーナー
・試料(実験 2-1 で生成した物質)
・フェーリング液(フェーリング A 液 : フェーリング B 液＝1 : 1)

[方法]

試料 20 個をそれぞれ 0.01 g ずつ試験管に取り、フェーリング液を 2 mL 加えて、ガスバーナーで加熱した。加熱後、フェーリング液の色と沈殿物の有無を観察した。

[結果]

すべての試料の水溶液で Cu_2O と思われる赤い粉末が析出した。0~2 分の試料に関しては、フェーリング液の色が青色から透明になったが、3 分以降の試料では、すべてのフェーリング液が青色のままだった(図 5)。

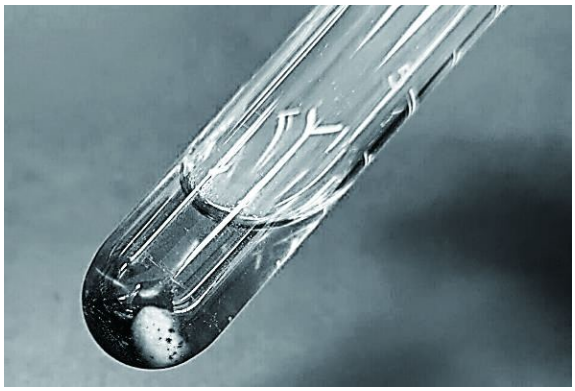


図 5　加熱後のフェーリング液の様子

[考察]

① 生成した物質は一定の還元性を持つ。

全ての試料で酸化銅が析出したことから、Glc を加熱して得た物質は加熱時間にかかわらず還元性を持つと考えられる。

② 加熱時間が長くなると、還元性が低くなる。

0~2 分の試料に関しては、フェーリング液の色が青色から透明になったが、その後加熱を続けた

ものについては色が青色のままだった。このことから、0~2 分の試料では、フェーリング液内にあった銅イオンがすべて還元されたことがわかる。よって、Glc を 250 ℃で加熱すると、加熱開始から 3 分後までに還元力が減少していくと考えられる。

2-3　生成物の分子の変化を調べる

[器具・薬品]

- 薄層クロマトグラフィー(以下：TLC)プレート(シリカゲル 60 F_{254})
- キャピラリー
- ホットプレート
- 試料(実験 2-1 で生成した物質)
- 展開溶媒(1-プロパノール：酢酸：水＝4：1：1)
- $KMnO_4$ 試薬(0.1 g/L $KMnO_4$aq-Na_2CO_3(1000 mL-2 g))
- フェーリング液

[方法]

試料それぞれを 2.4 %の水溶液にし、TLC を行い、Rf 値を計測した。展開には展開溶媒を、検出には $KMnO_4$ 試薬とフェーリング液を用いた。$KMnO_4$ 試薬は有機物全般を、フェーリング液は還元性のあるものを呈色できると考えたため、物質の極性と還元力の関係性について調べるためにこれらの試薬を用いた。

[結果]

加熱時間が 14 分以下の粉末では、どちらの試薬を用いた場合でも、呈色域の上端には変化が見られなかった。呈色域の下端は、加熱時間が長くなると Rf 値が小さくなった(図 6)。$KMnO_4$ 試薬の場合は、フェーリング液の場合と比べて Rf 値が小さかった(図 7, 8)。加熱時間が 20 分以上の粉末では、$KMnO_4$ 試薬とフェーリング液の両方で、展開溶媒が上昇した位置に線上に呈色した。

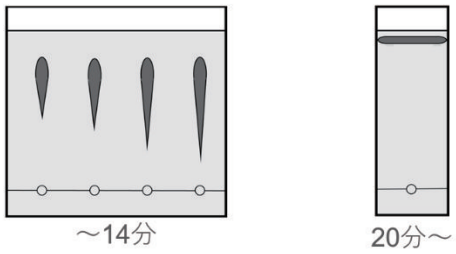


図 6　TLC の結果

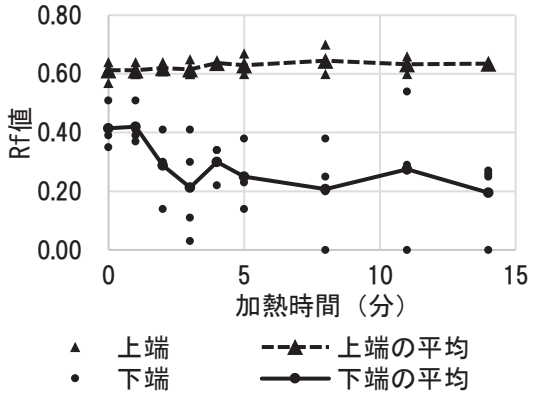


図 7　$KMnO_4$ 試薬を用いたときの Rf 値

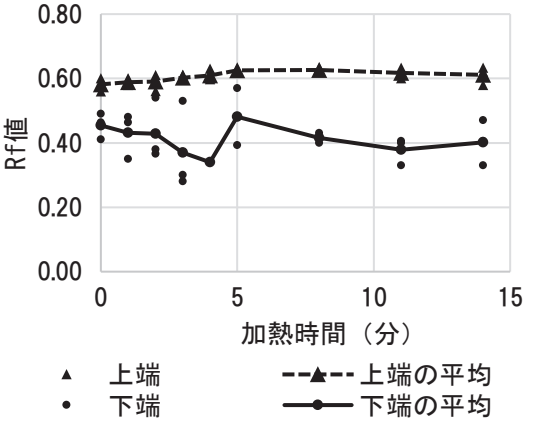


図 8　フェーリング液を用いたときの Rf 値

[考察]

実験結果が 20 分から急激に変化したため、これらの結果が信頼できるものなのかを確かめるため、別の試薬を用いて呈色してみることにした。

2-4　生成物の分子量を追跡する

[器具・薬品]

・TLC プレート
・キャピラリー
・ホットプレート
・湯浴器
・試料
・展開溶媒
・ヨウ素
・シリカゲル
・でんぷん

[方法]

実験 2-3 と同様の実験を行い、ヨウ素をシリカゲルとプレートとともに瓶に入れ、湯浴に入れることによって呈色した。ヨウ素は $KMnO_4$ 試薬よりも多くの物質を、容易に呈色することができるため、試薬として使用した。また、TLC プレートでは極性が高いもののみではなく、分子量の大きいものもスポットの近くに呈色する可能性があると考え、検証のため、でんぷんを同様にスポットして呈色した。

[結果]

加熱時間が 30 分以下の粉末では、加熱時間が 2 分を過ぎたあたりから呈色域が下に伸び始め、スポットした場所に呈色が出始めた。その後、加熱を続けていくと、呈色域がスポットの付近まで伸びた。加熱時間が 60 分を超えると、呈色域が上がらなくなり、スポットした地点のみに呈色が見られた(図 9)。また、でんぷんは 60 分以降のものと同じようにスポットした位置に呈色した。いくつかの呈色域では同じ高さの場所に 2 か所、濃くスポットが出ているところがあった。

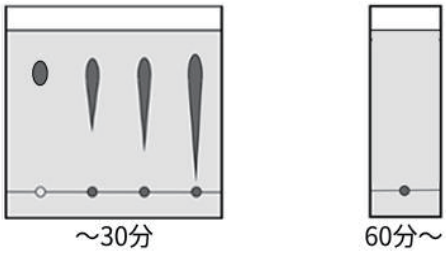


図 9　TLC の結果

[考察]

① 実験 2-3 で用いた試薬は適正ではなかった。

ヨウ素では $KMnO_4$ 試薬では呈色できなかったところにも呈色が確認された。$KMnO_4$ 試薬はすべての生成物を検出する目的で用いていたため、$KMnO_4$ 試薬よりもヨウ素のほうが検出薬として適正であると考えられる。

②中間生成物は主に 2 つある。

いくつかの呈色域では、同じ高さの 2 カ所に濃くスポットがあらわれていた。ヨウ素呈色では観察できる時間が短いため、Rf 値の測定をしたり、はっきりとスポットを観察したりすることはできなかったが、いくつかのサンプルで同じ場所に見られたことから、これらは主な中間生成物であると考えられる。

③加熱時間が 2 分を超えると重合体を生じる。

加熱時間が 2 分以上の試料の呈色域は、下に帯状に伸びていたため、このとき重合体が生じていると考えられる。

④30 分までは Glc が残り続けている。

30 分まではスポットの上端が 0 分から変わらなかったため、Glc が残り続けていると考えられる。

⑤ 最終的な生成物は展開しない。

60 分を過ぎると、スポットの位置から呈色域が上がらなくなり、変化がなくなった。そのため、最終生成物は今回用いた展開溶媒では展開しないと考えられる。また、展開しなかったため、この最終生成物が一種類であるとは断定できない。

⑥最終的な生成物の分子量は大きい

実験 2-1 より、生成物は Glc の分子間脱水によって生じたものであると考えられる。分子量の大きいでんぷんが 60 分以降の生成物と同様の場所に呈色したことから、これらの生成物は分子量が大きいと考えられる。

2-5　生成物の分子量を追跡する

[器具・薬品]

・レーザーポインター
・ヴィスキングチューブ(分画分子量：12000～14000)
・試料
・フェーリング液
・ヨウ化カリウム水溶液(以下：KI aq)

[方法]

試料を 5 %の水溶液にし、ヴィスキングチューブを用いて透析を行った。この際、透析は濃度が一定になるよう、十分な時間を置いた。次に、透析を行った内液、外液それぞれにレーザーポインターを用いてチンダル現象の観察を行った。また、その後それぞれの試料を試験管に 1 mL ずつ取り、フェーリング液を加えて還元力の観察を行った。同様に試料を試験管に取り、KI aq をそれぞれ加えて、Glc の重合体の一つであるでんぷんのような重合体の有無を観察した。識別のため、それぞれのサンプルに以下のように番号を振った。

内液・チンダル現象 …… (a)
内液・フェーリング液 …… (b)
内液・KI aq …… (c)
外液・チンダル現象 …… (d)
外液・フェーリング液 …… (e)
外液・KI aq …… (f)

また、予備実験として Glc 水溶液にレーザーポインターを当てたところ、チンダル現象を起こしたが、あまりはっきりと光の道筋は見えなかったので、これよりもはっきりと光が見えた際にチンダル現象が起こったと判断することとした。

[結果]

結果は以下のようになった。

表 2　内液の試料と試薬の反応

反応した…○　反応しなかった…×

(a)	(b)	(c)
○	○	×

表 3　外液の試料と試薬の反応

反応した…○　反応しなかった…×

(d)	(e)	(f)
○	○	×

内液も外液もチンダル現象を起こし、フェーリング液に反応した。また、すべての試料でヨウ素でんぷん反応は観察できなかった。なお、0 分の試料ではチンダル現象を示さなかった。

[考察]

①でんぷんは生成しない。

すべての試料でヨウ素でんぷん反応が確認できなかったことから、Glc は加熱を続けてもでんぷんにはならないと考えられる。

②外液は還元性を失わない。

全ての試料の外液がフェーリング液と反応をしたことから、少なくとも外液に含まれる物質は還元性を持つものを含むと考えられる。

③内液・外液ともに重合体を含む。

全ての試料でチンダル現象が確認できたことから、すべての試料は重合体を含むと考えられる。

2-6　透析した物質の吸光度を測定する

[器具・薬品]

・分光光度計

・試料(実験 2-5 で透析したもの)

[方法]

試料と水を 1:5 の比率で混合し、得た液体の吸光度を分光光度計(200～800 nm の範囲)で測定した。

[結果]

0 分と 1 分を除く全ての試料において、300 nm 前後の波長の吸光度が最大になったため、その波長における、吸光度の推移をグラフにした(図 10)。

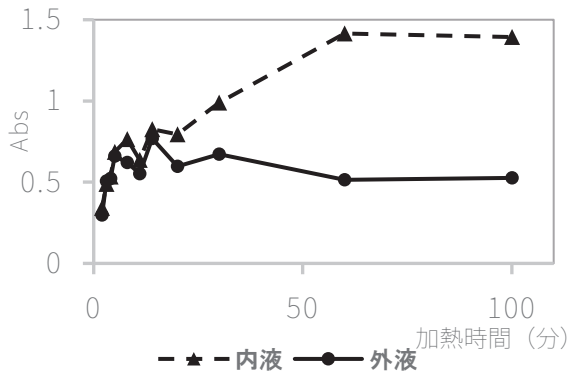


図 10　300 nm 付近の Abs の変化

加熱時間が 14 分までは、内液と外液の吸光度がほとんど等しかった。その後、加熱時間が 20 分を超えると外液の吸光度は変化しなかったが、内液の吸光度は増加した。

加熱時間が 60 分を超えると、内液と外液、それぞれの吸光度の大きな変化がなくなった。

加熱時間が 0, 1 分の場合、200～800 nm の間に吸収は見られなかった。

[考察]

カラメルの色のもとになる物質について、以下のことが言える。

① 加熱時間が 14 分まででは分子量は約 14000 以下である。

14 分までの吸光度は内液と外液で等しいため、ヴィスキングチューブの分画分子量より大きい物質は生じていないと考えられる。

② 加熱時間が 20 分以降は分子量が 14000 を超える物質が生成され始める。

加熱時間が 20 分を超えると、内液の Abs のみが増加したため、ヴィスキングチューブの分画分子量よりも大きい物質が生じていると考えられる。

3.反応機構全体の考察

実験 2-1 より、この反応では加熱開始から 2 分以降に脱水反応が起こっていると考えられる。しかし、分子内脱水と分子間脱水のどちらが起きているかについて判断できないため、2 つの場合について考察を立てた。

(Ⅰ)分子内脱水の場合

①加熱開始から 20 分が経過するまでに Glc が分子内脱水を起こし、共役系が形成されることで色がつく。

実験 2-1 より、加熱開始から 20 分で Glc が分子内脱水をしていると考えられる。

また、加熱時間が 20 分以下の時に Glc の色が大きく変化し、それ以降は色の変化が穏やかになった。

この色の変化が見られなくなった時と、質量変化が見られなくなった時が一致しており、実験 2-6 より重合（②参照）はこれ以降も起こっていると考えられるため、この色は分子内脱水で生じた物質に由来するものだと考えられる。

さらに、実験 2-6 より、Glc のカラメルの水溶液は一貫して 300nm 付近の光を吸収した。共役系は 300nm 付近の光を吸収するため、カラメルの色は主に二重結合に由来していると考えられる。これらのことから、Glc は加熱開始から 20 分が経過するまでに分子内脱水を起こし、共役系を形成することで色がつくと考えられる。

②①において、色がついた物質が生成されるとほぼ同時に、外界の物質と反応せずに重合する。

実験 2-4, 2-5 より、加熱開始から 2 分以降で重合体が生じていると考えられる。このとき、実験 2-1 より、加熱時間が 20 分を過ぎると質量変化が見られなくなったため、物質のやり取りはないと考えられる。しかし、実験 2-6 より、加熱時間が 20 分以降でも重合反応が起こっていると考えられる。そのため、加熱時間が少なくとも 20 分以降には物質のやり取りを伴わない重合反応のみが起こっていると考えられる。

(Ⅱ)分子間脱水の場合

①加熱開始から 20 分が経過するまでに、Glc が脱水縮合し、中間体が生じた後すぐに色がつく。

（Ⅰ)と同様に、Glc の重合体が形成されると考えられる。このとき、実験 2-1 において、脱水が始まった時間と色が付き始めた時間はほぼ一致している。Glc の重合体は色を持たないため、Glc が脱水縮合したすぐ後に色がつくような反応が起こっていると考えられる。

②少なくとも 20 分以降に脱水縮合によって生じた重合体が、外界の物質と反応しない重合反応を起こり始める。

（Ⅰ)と同様に、重合体が生じると考えられる。

（Ⅱ）の反応は、実験 2-1 においてほぼすべての Glc が脱水縮合をすると考えられるため、Glc の重合体がさらに重合するという点において、起こっていると考えにくい。このため、カラメル化反応は（Ⅰ）のような分子内脱水を伴う反応であると考えられる。

また、考察（Ⅰ）において、実験から以下のようなことが言えると考えた。

①中間生成物は主に２種類ある。

実験 2-4 において、呈色域の中でより濃く呈色した箇所が２か所あったことから、中間生成物は２種類あると考えられる。

②中間生成物の分子量は 14000 以下である。

実験 2-6 において、加熱時間が 20 分未満のときには内液と外液の Abs が等しかったことから、分画分子量である 14000 よりも分子量の小さい物質が生じていると考えられる。

③最終的な生成物の分子量は 14000 を超えるものがある。

実験 2-6 で、加熱時間が 20 分を超えると、内液の Abs が外液よりも高くなったことから、分画分子量である 14000 よりも分子量の大きい物質が生じていると考えられる。

④カラメルの色のもととなっている物質は最終的に重合体となる。

実験 2-5 で TLC を行い、最終的にスポットが上昇しなくなったため、最終的な生成物は重合体であると考えられ、また、実験 2-7 において内液の Abs が外液の Abs よりも高かったことから、カラメルの色のもとになっている物質は、最終的に分子量が 14000 以上の重合体となると考えられる。

(2)において、すべての粉末がフェーリング液に反応したため、還元性を持つとわかる。このことから、Glc のカラメルは還元性を持つ物質を含むと考えられる。

4.今後の課題

今回の実験では、TLC のヨウ素の呈色において、ヨウ素が TLC プレートからすぐに脱着してしまうため、スポットがきちんと確認できなかったケースがあった。今後ヨウ素呈色の実験をもう一度行いうときには、プレートを取り出してすぐに観察を行いたい。また、ヨウ素のほかにも特定の物質や構造を呈色できる呈色液を使った実験を行い、生成物の構造についても言及していきたい。透析についても、内液は外液と混合しているため、流水中で透析を行って内液の物質を分離する実験を行い、分子量の大きい物質についても調べていきたい。

5.謝辞

本研究のためにご協力いただいたみなさまに心から感謝いたします。

三瓶雄司先生には、研究の着想から、実験、論文執筆まで多くのご指導をいただきました。心から感謝申し上げます。

また、藤田雅子先生には論文執筆にあたり、概要の英語の添削をしていただきましたこと、感謝申し上げます。

最後に、所属する物理化学部の先生方には、部活内での研究指導など、多くのご支援をいただきました。お礼申し上げます。

ありがとうございました。

6.参考文献

・福岡美海他.2018.第 42 回全国高等学校総合文化祭「スクロースのカラメル化はどのようにすすむのか」. 公益社団法人全国高等学校文化連盟
・阿武喜美子.1984.糖化学の基礎.講談社サイエンティフィック
・山崎光廣他.1987. 関税中央分析所報 27 号「薄層クロマトグラフィーによる各種糖類の分離」. 関税中央分析所

昆布エキスによる毛髪のダメージ補修効果

理数科　狩野絢香　松崎桜子

Abstract

It is said that kelp makes our hair stronger. It seems like a myth; however, it is a fact that many shampoos and treatments which contain kelp extract are sold in Japan. Therefore, we theorized that it was likely that kelp extract contains an ingredient that help to repair hair damage in some way. For the purpose of our research, we focused on alginic acid which is said to have a moisturizing effect. In the course of our research, we elicited kelp extract which contained alginic acid, applied it to damaged strands of hair and tasted to see if it repaired the hair. We used tensile strength to measure the strength of the hair and degree of damage. Also, we investigated the surface of each hair using a microscope and evaluated them. In the course of our research, an improvement of the hair's resistance to heat damage was observed when kelp extract was used.

要約

昆布には髪を強くする効果がある、と聞いたことがあったが、単なる迷信だと思っていた。しかし、海藻成分が配合されたシャンプーやトリートメントが販売されていることを知り、海藻成分を塗布することによって毛髪のダメージを補修する効果があるのではないかと考えた。そこで、保湿の効果があると言われているアルギン酸を多く含む昆布に着目した。本研究では、アルギン酸を含む昆布エキスを抽出し、昆布エキスを塗布した際にダメージを受けた毛髪を補修する効果があるかを調べた。評価方法としては、毛髪の引張強度を調べ、ダメージを数値化した。また顕微鏡を用いて毛髪の表面のキューティクルの様子を観察した。その結果、ブリーチ処理を施した毛髪に対しては強度を弱くしてしまったが、毛髪の熱ダメージに対して毛髪の強度を強くしたという結果が得られた。

序論

【動機】

日常でヘアアイロンを使用することが多くなり、枝毛や切れ毛が見られるようになった。そこで、ヘアアイロンによる熱ダメージが毛髪に対してどれだけ影響を及ぼしているかを数値化したいと考えた。また、海藻成分に毛髪のダメージを補修する効果があるのかを明らかにし、自然由来のヘアケアアイテムを作れないかと考え、本研究を行った。

【目的】

本研究では、海藻成分を塗布することにより毛髪のダメージを補修する効果があるのかを明らかにすることを目的とした。先行研究から、アルギン酸ナトリウムを含むハイドロゲルを配合したトリートメントで処理した毛髪は、高い潤滑性を示すこと、さらにキューティクルのように毛髪のなめらかさ維持に寄与し、毛髪の絡まりを防ぐことが分かっている。また、アルギン酸ナトリウムには保湿の効果があることが分かっている。そこで私たちは、アルギン酸を多く含む昆布に着目した。今回の実験では、ヘアアイロンによる熱処理、ヘアカラーやブリーチなどによる化学処理に対して、それらのダメージを補修する効果が昆布エキスにあるのか調べることにした。

使用した毛髪

・バージン毛（ヘアカラーやパーマなどの薬剤処理を施していない毛髪）
・ヘアカラーのみを施している毛髪
・ブリーチとヘアカラーを施している毛髪

以下、バージン毛：毛髪 A
ヘアカラーのみを施している毛髪：毛髪 B
ブリーチとヘアカラーを施している毛髪：毛髪 C　と表記する。

今回使用した毛髪は美容室 Or 様よりご提供いただきました。

毛髪 A　　毛髪 B　　毛髪 C

（図 1）使用した毛髪

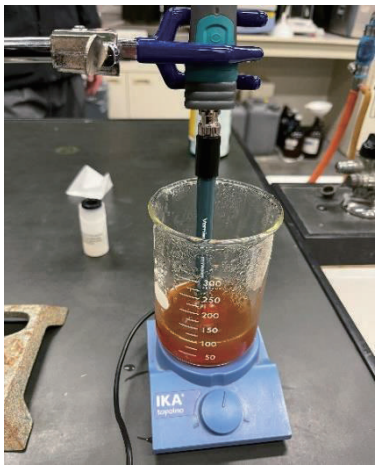
昆布エキスの抽出方法

【目的】
本研究で使用する昆布エキスを抽出する。

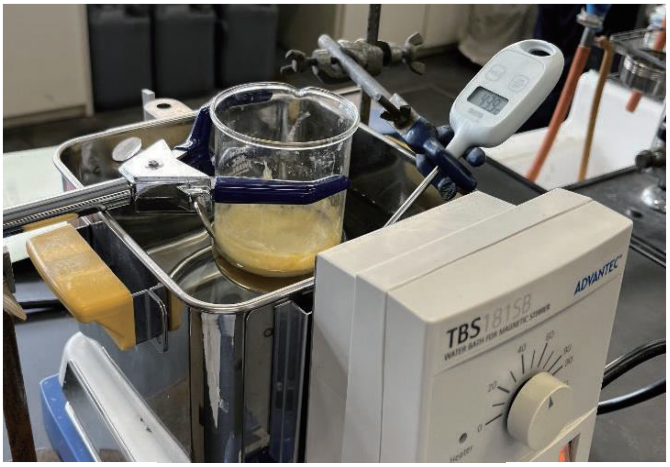
【実験器具】

・日高昆布	・塩酸 0.5 mol/L	・水道水	・炭酸ナトリウム
・セルラーゼ（粉末）	・ペクチナーゼ（粉末）	・電子天秤	・ガスバーナー
・マッチ	・ビーカー	・駒込ピペット	・ガラス棒
・pH センサー	・温度計	・スターラー	・ウォーターバス
・スタンド	・漏斗	・漏斗台	・ろ紙
・駒込ピペット	・シャーレ	・精製水	

【方法】
5 mm 幅に切断した日高昆布と水道水をビーカーにいれてガスバーナーで 90 ℃で 30 分加熱した。この熱水抽出残渣 16 g に 0.5 mol/L 塩酸 80 g を加えてガスバーナーで 90 ℃で 40 分加熱した。熱水抽出残渣の質量：0.5 mol/L 塩酸の質量＝1:5 とした。その後、溶液が 1.0 mol/L となるように 2.0 mol/L 塩酸を加えてガスバーナーで 40 分加熱した。加熱終了後、水道水と炭酸ナトリウムを加えて pH センサーを用いて、pH を 4.5 に調節した（図 2）。セルラーゼ 0.08 g とペクチナーゼ 0.05 g を添加後、ビーカーをウォーターバスに入れて、45 ℃で 24 時間酵素分解した（図 3）。その後、80 ℃で 20 分間酵素を失活させた。酵素を失活させた後、炭酸ナトリウムを加えて pH センサーを用いて、pH 6～6.5 に調節した。ろ過して得られた溶液を昆布エキスとした。



（図 2）pH の調節の様子



（図 3）酵素分解の様子

毛髪ダメージの評価方法①

【目的】

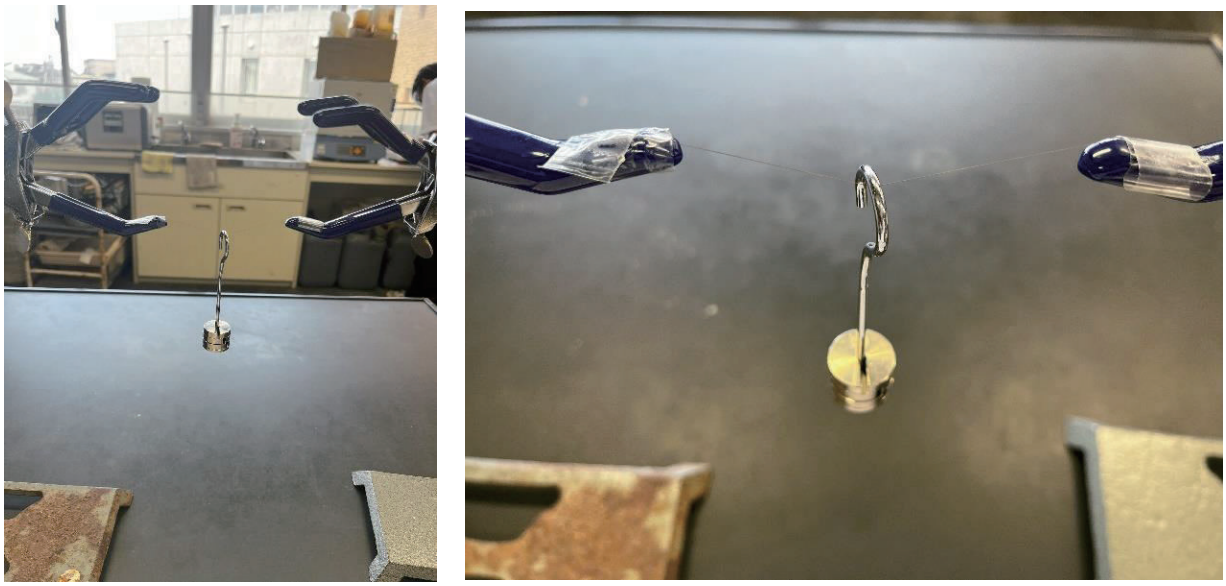
毛髪の引張強度を調べることで毛髪のダメージを数値化する。

【実験器具】

・毛髪　（バージン毛、ヘアカラーのみを施している毛髪、ブリーチとヘアカラーを施している毛髪）
・おもり　　・スタンド　　・セロハンテープ

【方法】

10 cm に長さを揃えた毛髪をスタンドの両端にセロハンテープで固定した。毛髪の中央部分に 10 g ずつ重りを静かにかけた。切れたときの重さを毛髪の引張強度とした。この操作を 10 回行った。



（図 4）引張強度の測定の様子

毛髪ダメージの評価方法②

【目的】

毛髪の表面の様子に違いがあるかを観察する。毛髪を直接スライドガラスにのせて顕微鏡で観察すると、毛髪は光を透過しないため、表面のキューティクルを観察することかできなかった。そこで、スンプ法[1]により毛髪の表面のレプリカを作製し、これを光学顕微鏡で観察することにより毛髪の表面の様子に違いがあるかを確認する。

【実験器具】

・毛髪（バージン毛、ヘアカラーのみを施している毛髪、ブリーチとヘアカラーを施している毛髪）
・光学顕微鏡　　・スライドガラス　　・液体のり

[1] スンプ（SUMP）法とは、観察面の凹凸をアセチルセルロースフィルムに転写し、顕微鏡にて観察する手法。鈴木式万能顕微鏡印画法（Suzuki's Universal Micro-Printing method）の略称である。

【方法】
　今回は、セルロイド板の代わりに、安価で入手しやすい液体のりを使用した。
まず、スライドガラスに液体のりを垂らし、のりの表面に毛髪を置いた。のりが乾いたら、毛髪をゆっくり剥がした。毛髪の跡がついたのりの表面を光学顕微鏡で観察した。倍率は 600 倍で観察した。

実験１　毛髪の熱ダメージに対する昆布エキスの効果

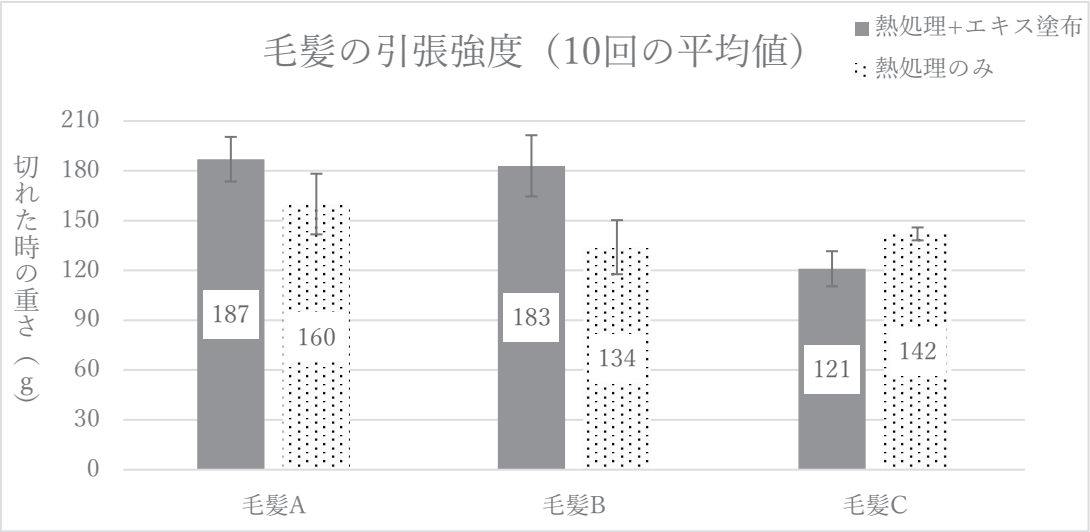
【目的】
　ヘアアイロンによる熱ダメージに対して昆布エキスを塗布した際の毛髪の強度と表面の様子を比較する。

【実験器具】
・毛髪（バージン毛、ヘアカラーのみを施している毛髪、ブリーチとヘアカラーを施している毛髪）
・ヘアアイロン　・抽出した昆布エキス　　・駒込ピペット　・シャーレ

【方法】
　3 種類の毛髪をそれぞれ 190 ℃に熱したヘアアイロンで 2 秒間、30 回熱を通した。その後、抽出した昆布エキスを駒込ピペットで 3 ml とり、シャーレに入れた。熱処理を施した毛髪を昆布エキスに浸るようにシャーレに入れ、30 分間放置した。毛髪を乾かした後、引張強度の測定と顕微鏡での観察を行った。

【仮説】
　熱処理により毛髪中の水分が蒸発し乾燥してしまうため、昆布エキスを塗布することにより毛髪が保湿され、引張強度は上がると考えた。よって、昆布エキスを塗布した毛髪は、熱処理のみを施した毛髪に比べて引張強度は上がり、毛髪の表面の様子は凹凸が少なくなると考えた。

【結果 1-1】
　測定した毛髪の引張強度の値をグラフに示した。(図 5)

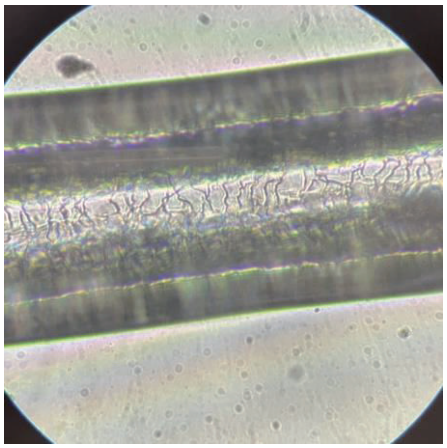


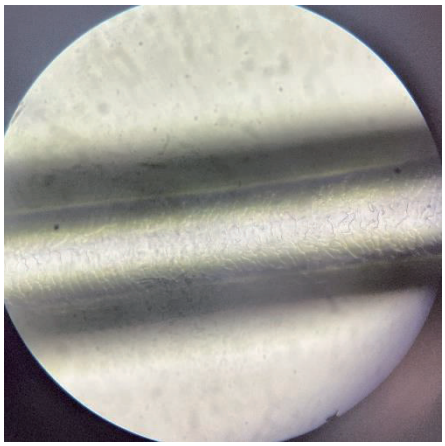
（図 5）　毛髪の引張強度

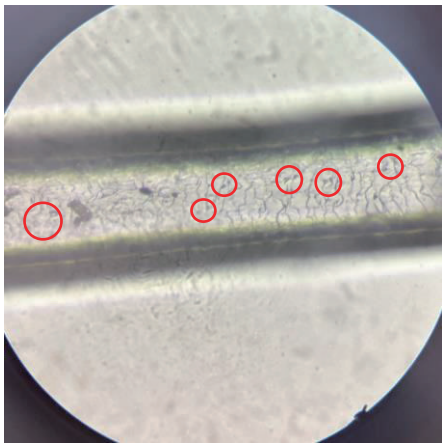
　グラフから、熱処理を施した毛髪 A,B に昆布エキスを塗布した場合、熱処理のみを施した毛髪 A,B と比べて切れにくくなることが読み取れた。毛髪 B は昆布エキスの有無により値に大きな差が生まれるという結果が得られた。反対に、毛髪 C は熱処理のみを施した場合の方が切れにくく、昆布エキスを塗布すると切れやすくなるという結果が得られた。

【結果 1-2】
毛髪の表面の様子を図 6 に示した。

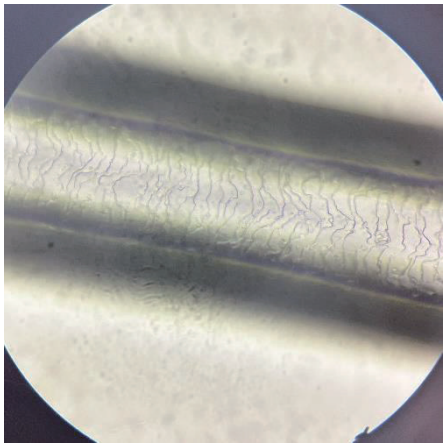
熱処理＋昆布エキス塗布

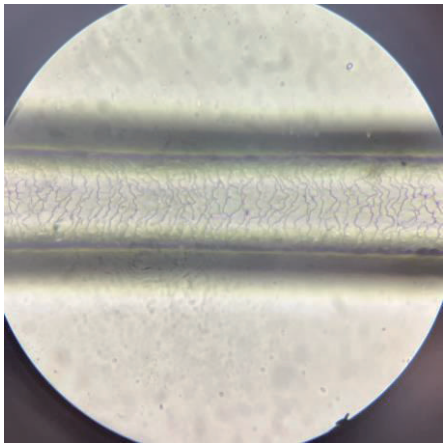

毛髪 A

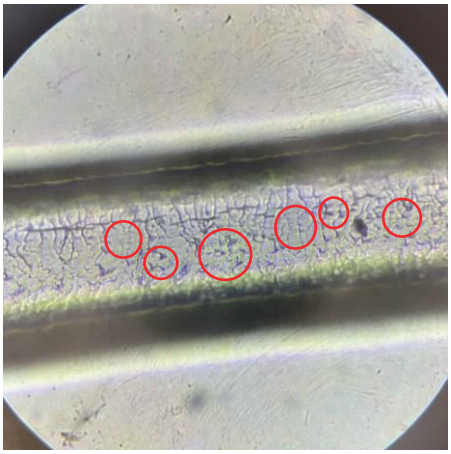

毛髪 B


毛髪 C

熱処理のみ


毛髪 A


毛髪 B


毛髪 C

（図 6）　毛髪の表面の様子

【考察】
熱処理を施した毛髪 A,B に昆布エキスを塗布した場合、塗布していない場合と比べて切れにくくなった。しかし、熱処理を施した毛髪 C に昆布エキスを塗布した場合、塗布していない場合と比べて切れやすくなった。このことから、熱処理後に昆布エキスを塗布したことで、バージン毛とヘアカラーのみ施した毛髪は、昆布エキスが熱処理によって乾燥した毛髪を保湿したと考えた。また、毛髪の表面を顕微鏡で観察すると、毛髪 C にのみ毛髪にキューティクルの損傷が見られた。このことから、ブリーチ処理によってキューティクルの損傷、毛髪内部のタンパク質や脂質の流出が起こり、毛髪内部に空洞が多くできていると考えた。つまり、昆布エキスを塗布した場合、ブリーチ処理を施した毛髪の強度が弱くなった要因の一つとして、昆布エキスが毛髪内部にできた空洞に作用したことが挙げられる。

実験２　ヘアカラーやブリーチのダメージに対する昆布エキスの効果

【目的】

ヘアカラーやブリーチなどの化学処理を施している毛髪に対して昆布エキスを塗布した際の毛髪の強度を比較する。

【実験器具】

・毛髪（ヘアカラーのみを施している毛髪、ブリーチとヘアカラーを施している毛髪）
・抽出した昆布エキス　　・駒込ピペット　・シャーレ

【方法】

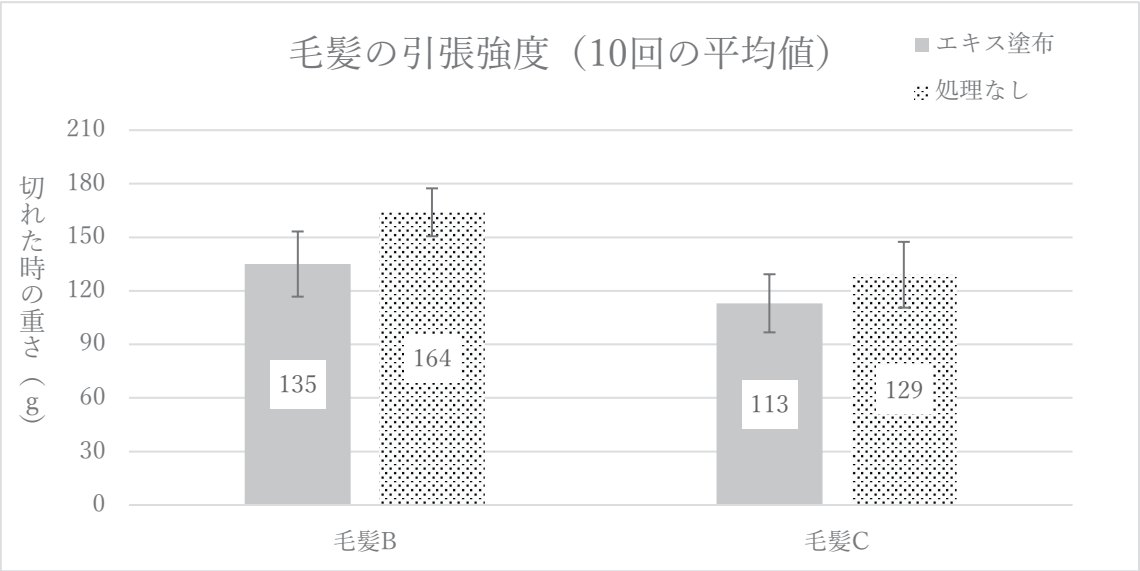
抽出した昆布エキスを駒込ピペットで 3 ml とり、シャーレに入れた。使用する毛髪を昆布エキスに浸るようにシャーレに入れ、30 分間放置した。毛髪を乾かして引張強度の測定を行った。

【仮説】

ヘアカラーやブリーチなどの化学処理により、毛髪内部の空洞化が起こる。そのため、毛髪は乾燥し、切れやすくなってしまう。そこで、昆布エキスを塗布することによって毛髪は保湿されるため、昆布エキスを塗布しなかった場合と比較して、引張強度が上がると考えた。

【結果 2-1】

測定した毛髪の引張強度の値をグラフに示した。（図 7）



（図 7）　毛髪の引張強度

グラフから、毛髪 A は昆布エキスを塗布した方が切れにくくなるが、昆布エキスを塗布していない場合の平均値の差は小さいということが読み取れた。毛髪 B,C は昆布エキスを塗布した方が切れやすくなることが分かった。

【考察】

今回使用した毛髪 B,C は同一人物のものではないため、一概に今回使用した昆布エキスが化学処理を施した毛髪を切れやすくしてしまうということは言えない。その理由としては、毛髪の太さが異なったり、化学処理に対しての毛髪への影響の大きさが異なったりすることで、人によって元々の毛髪の強度が異なるという点が挙げられる。また、ヘアカラーやブリーチをした毛髪は、化学処理の影響で強いダ

メージを受け、毛髪内部が空洞化することが多いといわれている。よって、ヘアカラーやブリーチをした毛髪には毛髪内部の保湿が必要である。しかし、今回は昆布エキスに浸す時間が短かったため、内部まで保湿することができなかったと考えた。

実験３　昆布エキスに含まれる成分によるダメージ修復効果

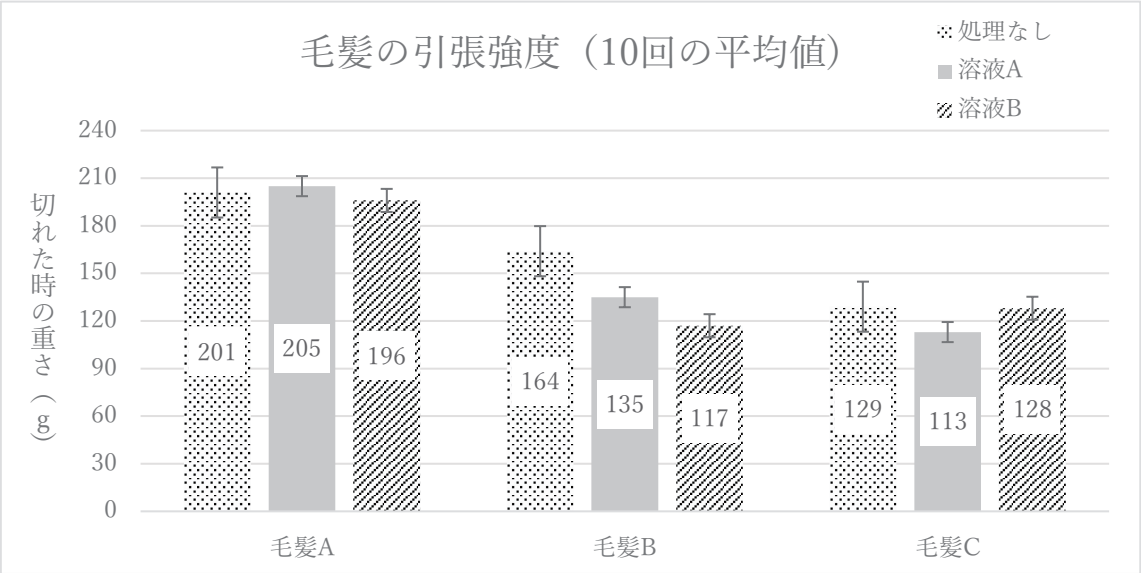
【目的】
　比較のために昆布の成分を含まない溶液を作成し、それを塗布した毛髪の強度と昆布エキスを塗布した毛髪の強度を比較する。

【実験器具】
・毛髪（バージン毛、ヘアカラーのみを施している毛髪、ブリーチとヘアカラーを施している毛
・駒込ピペット　・シャーレ　　・昆布エキス　　昆布の成分を含まない溶液

【方法】
　上記の抽出方法において、昆布を使用せずに同様の手順で、コントロール群を作成した。作成した溶液を駒込ピペットで 3 ml とり、シャーレに入れた。使用する毛髪を昆布エキスに浸るようにシャーレに入れ、30 分間放置した。毛髪を乾かして引張強度の測定を行った。

【仮説】
昆布エキスに含まれる成分が毛髪に作用していると考え、どの毛髪においても昆布エキスを塗布した毛髪の強度が最も大きくなる。

【結果 3-1】
測定した毛髪の引張強度の値をグラフに示した。(図 8)
　以下、昆布エキス：溶液 A
　　昆布エキスを含まない溶液：溶液 B　と表記する。



（図 8）毛髪の引張強度

　グラフから、毛髪 A,B は溶液 A を塗布した方が溶液 B を塗布した毛髪よりも切れにくくなることが読み取れた。また、毛髪 C は処理なしの毛髪の強度と溶液 B を塗布した毛髪の強度はほぼ等しいことが読み取れた。

【考察】
毛髪 A,B は溶液 A を塗布した方が溶液 B を塗布した毛髪よりも切れにくくなることから、昆布に含まれる成分には毛髪の強度を強くする効果があると考えた。また、毛髪 C は処理なしの毛髪の強度と溶液 B を塗布した毛髪の強度はほぼ等しいことから、昆布に含まれる成分がブリーチ処理を施した毛髪の強度を弱めると考えた。

【今後の展望】
今回は、毛髪の個体差によって毛髪の強度に誤差が生じたため、今後は同一人物の毛髪を使用してより正確な毛髪の強度の変化を調べる。また、化学処理に対する昆布エキスの効果について、ヘアカラーやブリーチの実施回数によって強度の数値に違いがあるかを調べる。そして、昆布エキスをより毛髪内に浸透させるために、毛髪を昆布エキスに浸す時間を長くしたり、昆布エキス塗布後、毛髪に熱処理を施したりするなどの工夫をする。さらに、毛髪ダメージの評価方法として、毛髪表面のすべり性を調べる。

【謝辞】
本研究の遂行にあたり、丁寧なご指導をしてくださった三瓶雄司先生をはじめとする化学科の先生方また、本論文の要約の英文のご指導をしてくださった藤田雅子先生に深く感謝いたします。そして、本研究で使用する毛髪を提供してくださった美容室 Or 代表吉田愛子様に心より感謝いたします。本当にありがとうございました。

【参考文献】
・花王株式会社　「失われたキューティクルの代わりに髪を守り続ける潤滑性と耐久性を両立するヘアケア新素材」(https://www.kao.com/jp/newsroom/news/release/2023/20231026-002/) 2025 年 02 月 11 日最終閲覧。
・大澤優華他「毛髪のダメージの原因について」
(https://school.gifu-net.ed.jp/ena-hs/ssh/R04ssh/sc2/22241.pdf) 2025 年 02 月 11 日最終閲覧。
・田中直樹「昆布エキスの製造方法」(https://patents.google.com/patent/JP4017783B2/ja) 2025 年 02 月 11 日最終閲覧。
・山下真司他「毛髪の熱ダメージとその指標について」日本化粧品技術者会誌 46 巻 3 号、2012 年
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/sccj/46/3/46_219/_pdf) 2025 年 02 月 24 日最終閲覧。

アズキゾウムシは這った際に付着する物質によって産卵するかを決めている

理数科　木下　春花　　博野　真琴　　松本　亜澄

Abstract

Callosobruchus chinensis is an insect that lays eggs on beans like adzuki beans. Their body length is about 2 or 3 mm. They choose beans that are suitable for their eggs when they lay eggs on beans. If there are a lot of beans, they avoid beans which have had eggs laid on them to make an even distribution. This suggests that they can distinguish between new beans and beans which have eggs laid on them.

Our research aims to explore whether Callosobruchus chinensis avoid laying eggs not by sight or touch but by a substance that adhere to the beans when the adult insects crawl across them during laying eggs.

We conducted experiments using two types of adzuki beans: ‘R adzuki’, from which the eggs had been removed in advance, and ‘C adzuki’, which Callosobruchus chinensis has never touched. We set both R adzuki and C adzuki in a glass petri dish, and put a pair of male and female. Callosobruchus chinensis in it. We observed Callosobruchus chinensis movements and counted the number of eggs that had been laid on R adzuki or C adzuki.

The results of the research showed that they prioritize eggs on C adzuki. It means Callosobruchus chinensis prefers to lay eggs on C adzuki before R adzuki, whether there are eggs on the adzuki beans or not.

要約

アズキゾウムシはアズキなどの豆類の表面に産卵する体長約 2～３ｍｍの昆虫である。彼らは産卵する豆類を選択して産卵する。もしそこに複数のアズキがあった場合、彼らはすでに産卵されたアズキを避けて、乱数が均一になるように偏りなく産卵する。そのため、彼らは何らかの方法で産卵されたアズキを見分けていると考えられる。

本研究では視覚や触覚ではなく、産卵のときに成虫がアズキを這った際に付着する物質で、産卵を忌避するのか解明することを目的とした。実験には、事前に産卵させた後、卵を除去した R アズキと未処理の C アズキを用いた。シャーレに R、C両方のアズキ１粒ずつとアズキゾウムシ雌雄一対を入れた。アズキゾウムシがどのような順路で、何個ずつＣアズキとＲアズキに産卵したのか、行動を観察した。

その結果、Cアズキに優先的に産卵した。このことから、アズキゾウムシは卵の有無に関わらず、Cアズキに好んで産卵することがわかった。

序論

アズキゾウムシとは

アズキゾウムシ(学名：Callosobruchus chinensis)とは、マメゾウムシ科の昆虫体長約2～3mmの昆虫で、アズキなどの貯蔵豆類の表面に産卵する貯穀害虫である（本田 1990)。雌雄の違いは触覚に現れ、オスは櫛状に枝分かれした触角、メスはオスに比べて枝分かれが短い触角をもつ(図1)。豆上に産卵された卵は約1mmで白く楕円に近い形をしている。卵から孵化した幼虫は蛆虫のような姿をしており、アズキの中に侵入し、アズキを食べて成長し、成長しきるとアズキの中から出てくる。幼虫が生まれてから次の世代の幼虫が生まれるまでのサイクルは約1か月間である。アズキから出てくると約1週間の産卵行動がみられ、その後は死亡する。

図1　アズキゾウムシのオス(左)とメス(右)

先行研究

アズキゾウムシはアズキ1粒に偏らないよう均一に産卵する習性があり、卵のあるアズキと卵のないアズキでは卵のないアズキに産卵することがUtida（1943）の研究からわかっている(図2)。これを一様分布という。一様分布とは、1つのアズキに対する産卵数が等しい状態のことである（図

3)。そのため、豆の量に対して個体数が多いと、1個体あたりの産卵数が減少する。

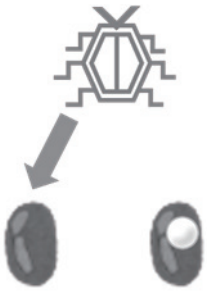


図2　卵の有無による産卵選択

図3　一様分布

また、アズキゾウムシの産卵寄主選択には、産卵基質の大きさ、曲率、平滑さなどの物理性のほかに、種皮に含まれる産卵刺激物質、卵の存在、成虫がアズキ上を這った際に付着する化学物質が関与していることがわかっている（本田 1990)。成虫が這った際に付着する化学物質はエーテル可溶性物質であり、高級飽和炭化水素、高級脂肪酸、トリグリセリドからなることが報告されている(本田 1990)。

Otake & Dobata（2018）の研究により、ガラス玉を用いた場合の産卵基質の選択について明らかになっていることがある。アズキゾウムシに触れてないガラス玉と事前にアズキゾウムシに産卵させたガラス玉では卵を産ませたガラス玉に優先的に産卵した（図4）。この行動は子孫を残すことが難しい基質に産卵する際に、より良い状態の基質を選択しようすることによって起こったと考えられている。

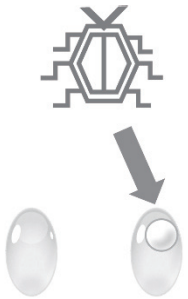


図４　卵なしとありのガラス玉における産卵選択

実験目的

アズキゾウムシは何らかの方法で、アズキに産卵されている卵の有無を見分けている。そのため、どのような方法でアズキゾウムシは、産卵されたアズキを認識しているかを調べる。

仮説

視覚ならば卵の有無による目視、触覚ならば卵の有無による凹凸、化学物質ならば成虫が這った際に付着する物質によって産卵したアズキを見分けているという仮説を立てた。

実験方法

〈実験動物〉雌雄のアズキゾウムシ

〈試料〉アズキゾウムシに触れていないアズキをＣアズキ(control)、平均一個につき 28.7 個の卵が産卵された卵を除去したアズキを R(removed)アズキとする。ただし、アズキ内から出てきて間もない成虫であり、C、Ｒアズキは見た目に違いはなく、凹凸はどちらにもない。
〈器具〉30ｍｍガラスシャーレを使用した。

〈方法〉ガラスシャーレの中にアズキゾウムシ雌雄一対、Ｃアズキと Ｒアズキを一つずつ入れた。雌のアズキゾウムシがどのような経路で行動したのかを目視で観察した。また、雌のアズキゾウムシがC、Ｒアズキにそれぞれ何個ずつ産卵したのかを 30 分間、目視で数え、観察した。C、Ｒ両方のアズキ上を這い、かつ一個以上産卵したものを結果として表した。この実験は７月１９日から８月２２日にかけて行ない、アズキゾウムシは３０分の実験ごとに毎回アズキ内から出てきて間もない成虫アズキゾウムシに変えた。

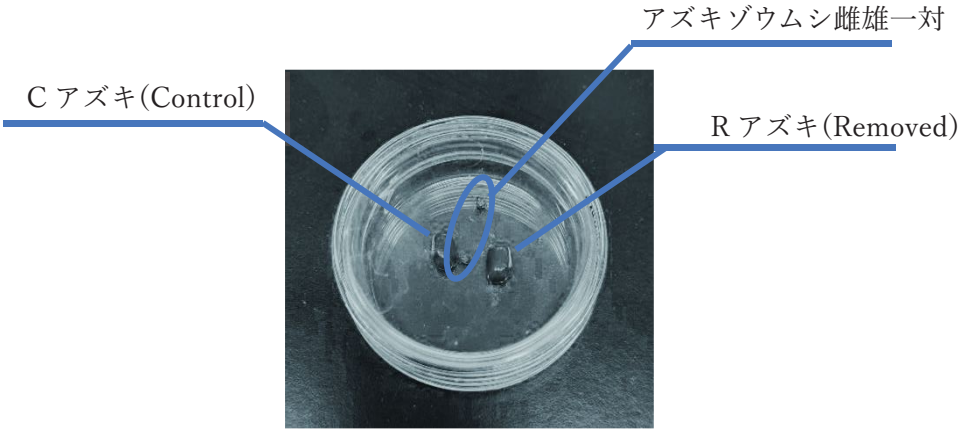


図 5　実験の様子

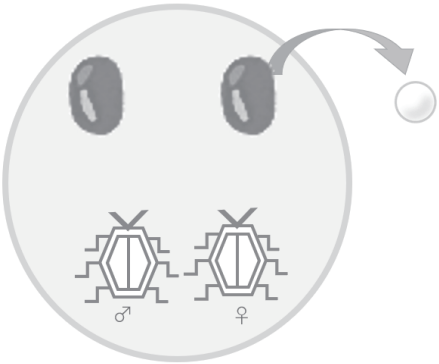


図 6　実験の様子

実験結果

実験した雌のアズキゾウムシ 271 個体中、188 固体は産卵をせず、28 固体は産卵をしたが C、R 両方のアズキを這わなかった。C、R 両方のアズキ上を這い、かつ一個以上産卵したアズキゾウムシは 55 個体だった。以下の図 7、8 の破線矢印はアズキゾウムシがそのアズキに這ったことを示し、矢印はそのアズキに産卵したことを示す。

産卵前にC、R両方のアズキ上を這ったアズキゾウムシはCアズキに産卵した。

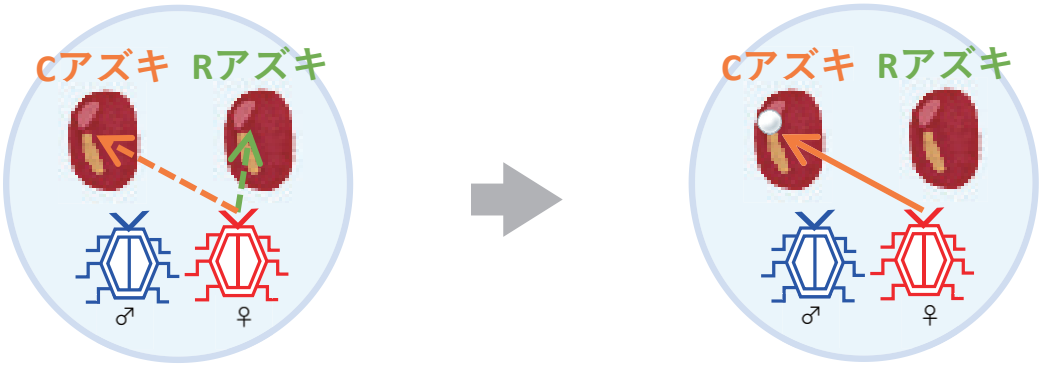


図7 アズキゾウムシが這った経路のイメージ

Rアズキのみを這い、Rアズキに産卵した後にCアズキ上を這うとRアズキへの産卵をやめCアズキに産卵し続けた。

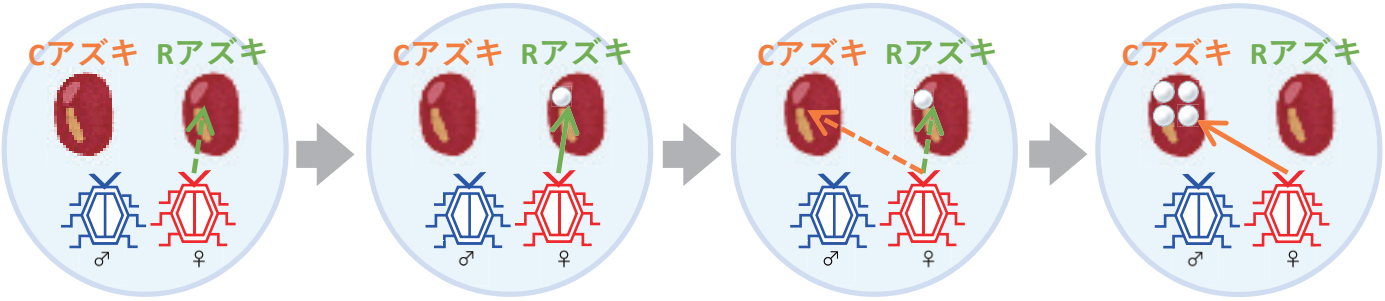


図8 アズキゾウムシが這った経路のイメージ

以下の図9のCはCアズキに産卵したこと、RはRアズキに産卵したこと、×は以後産卵しなかったことを表している。数字はその経路をたどった雌のアズキゾウムシの個体数、矢印の太さは、太いほどその経路をたどったアズキゾウムシの個体数が多いことを表している。

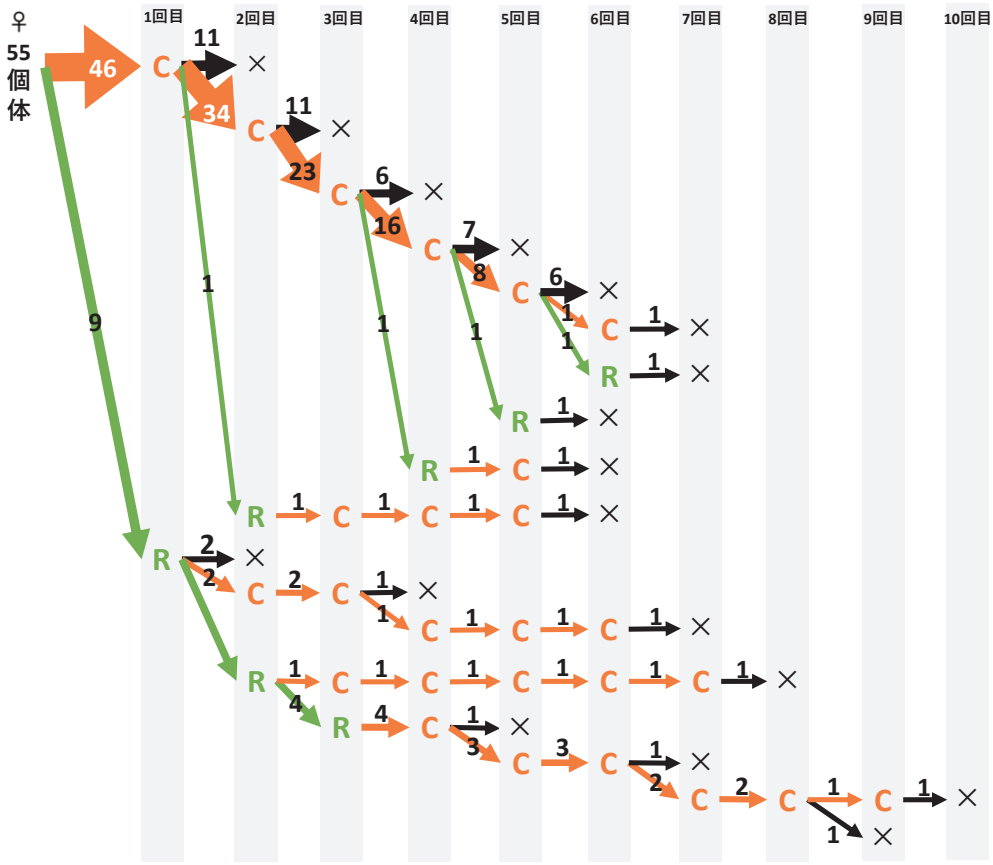
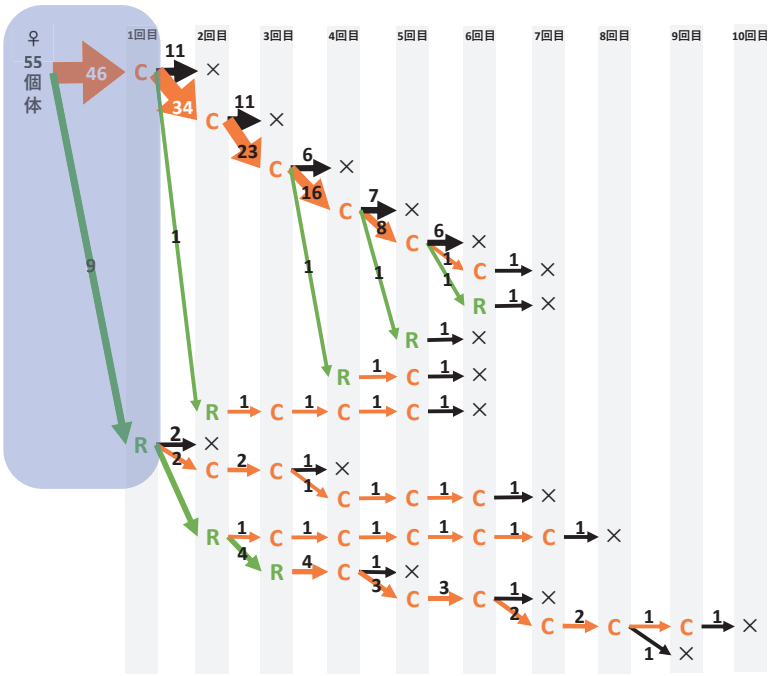


図 9 アズキゾウムシが這った経路を示した表①

55 個体中 46 個体に当たる 84%の個体が最初に C アズキに産卵をした



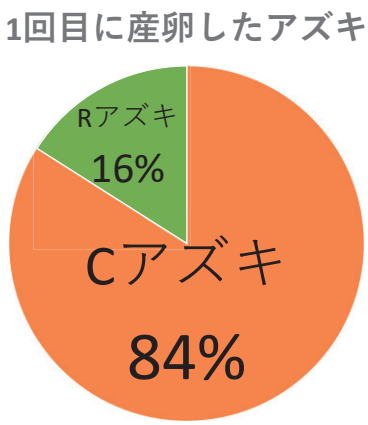
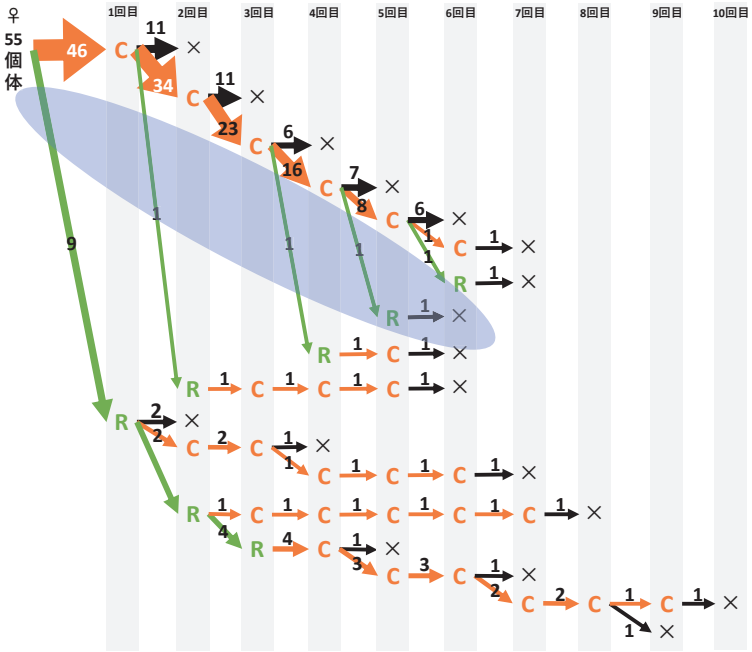


図 10　アズキゾウムシが這った経路を示した表②

図 11　1 回目に産卵したアズキの割合

1 回目 C アズキに産卵した個体のうち、91%の個体は C アズキにのみ産卵し続けた。



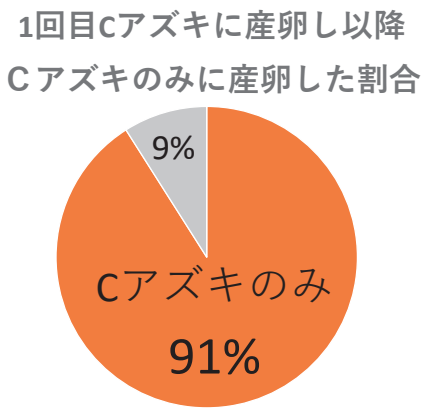


図 12　アズキゾウムシが這った経路を示した表③　　図 13　C アズキのみに産卵したアズキの割合

1 回目 R アズキに産卵した個体は C アズキを這うと C アズキに産卵し始め、R アズキに戻って産卵した個体はいなかった。

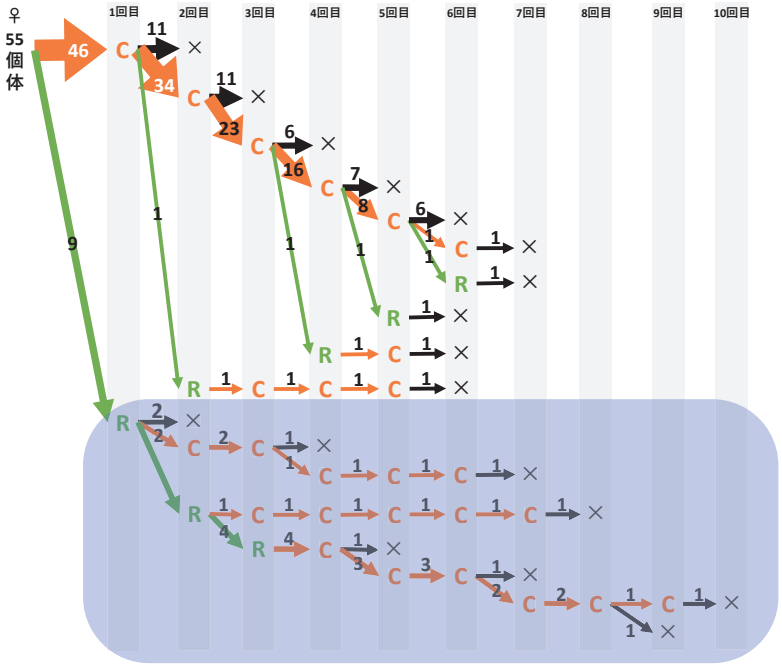


図 14　アズキゾウムシが這った経路を示した表④

Ｃアズキのみに産卵し続けている個体、Ｒアズキのみに産卵し続けている個体、どの個体も複数回、産卵するＣ、Ｒアズキの選択を行っていた。

考察

卵が取り除かれているにも関わらずＣアズキに偏って産卵していた。このことから仮説は正しく、アズキゾウムシは成虫が這った際に付着する化学物質を何らかの方法で認識し、その物質を避けていると考えられる。この化学物質の有無によって既に産卵されたアズキかどうかを判別し、それに基づいて産卵するかしないかの選択をしていると考えられる。最初にＲアズキに産卵した個体がＣアズキ上を這うとＣアズキにのみ産卵するようになったことから、直接触れることによって化学物質を認識しているのではないかと推測される。また、このことから産卵基質がアズキの場合、この化学物質には産卵忌避効果があると考えられる。

展望

先行研究より、産卵基質がガラス玉の場合、アズキゾウムシは卵の付着したガラス玉に優先的に産卵することから、この化学物質には産卵誘導効果がある可能性が示唆される。ゆえに、今回と同様に新しいガラス玉と産卵させた卵を取り除いたガラス玉を用いて産卵行動を観察し、この化学物質がガラス玉ではどのような効果を示すのか解明することが今後の課題である。

先行研究

・Dobata Shigeto・Otake Ryoga.（2018）足りないなら模倣せよ：そうでないなら革新せよ：昆虫における対照的な意思決定. Animal Cognition DOI：10.1007/s10071-018-1212-0

・本田　博.（1990）貯穀害虫の化学生態学的研究. 日本農薬学会誌 15. 263-270

・石井　象二郎.（1952）アズキゾウムシの寄主選好に関する研究. 農業技術研究所報告.C,病理・昆虫 1号. 156-185

・梅谷　献二.（1968）マメゾウムシ類の比較生態学的研究Ⅲ 3種のマメゾウムシ成虫に対する給餌が寿命と産卵数に及ぼす影響. 植物防疫所調査研究報告第5号. 40-49

・Utida S,（1943）,studies experimental population of the azuki bean weevil,Callosobruchus chuinensis(L).VIII,Statistical analysis of the frequency distribution of the emerging weevils on beans.Men,Coll.Agric,Kyoto Imp.Univ.54: 1-22.

SPY×FAMILIY　ヨル・フォージャーの身体能力計測

理数科　佐々木瑠美　宮﨑風歌

要約

We studied Yor Forger's physical ability, who appear in SPY×FAMILY. The purpose of our experiment is understanding deeply herself through measuring her physical abilities. In this study, we displayed a scene where her full body can be watched on our smartphone screens, we calculated her real length from elbow to fingertips by using proportional formula. In the same way, we calculated the ball's speed from a scene she had pitched a ball. We speculated the ball's speed might be over 100km/h. As a result, the ball's speed was 83.5km/h. However, there are many scenes she shows amazing her physically abilities. Therefore, we thought out experiment lacked accuracy. Based on this result, we want to figure out accurately by changing our devices or analyzing her abilities from other anime scenes.

私たちの実験はSPY×FAMILYに登場するヨル・フォージャーの身体能力計測である。私たちは彼女の身体能力を計算することで彼女の行動を深く知って彼女自身について知ることを目的として実験している。この研究では、私たちのスマートフォンで彼女の全身が写っているシーンを表示し、彼女の実際の肘から指先までの長さを比を用いて算出した。また彼女がボールを投げているシーンからボールの速度を求めた。仮説としておよそ100km/h以上の速さであると考えた。計算の結果、彼女の投げたボールの速さは83.5km/hとなった。しかし彼女の驚異的な身体能力を思わせるシーンが数多く存在することを考えると、この値の正確性は低いと思った。今後の展望として、実験機材を変えて計測の精度を上げること、ボールの速度以外の事例から彼女の能力を計測することなどを考えている。

研究目的

本研究の目的は、週刊少年漫画『SPY×FAMILY』に登場する超人的な能力を持つことで知られているキャラクター、ヨル・フォージャー（以下彼女）の身体能力を科学的に検証することである。主に、アニメを中心としたメディアにおける描写をもとに、彼女の能力の実態を明らかにすることを目指している。

研究動機

この研究の動機は、空想の世界における能力を「科学的」に解明するという興味から生まれた。特に、漫画、アニメ、特撮などのメディア作品で描かれるキャラクターのSF設定がどのように科学的に成立するかを検証した書籍『空想科学読本』に触発され、空想上の事象を実際の科学的枠組みで解析してみたいという意欲が湧いた。本研究では、ヨル・フォージャーの身体能力に関する描写を科学的に検証することを通じて、空想世界と現実の境界を科学の視点で探究することを目指している。

実験器具

・スマートフォン 2 台（Redmi Note10 JE　iPhone SE 第二世代）

・15cm 直定規 2 本

・記録用ノート

実験方法

まず彼女の体の比率は常に等しいと仮定した。彼女の全身が写った画像を佐々木、宮崎のスマートフォンでそれぞれ表示し定規を使ってスマートフォンの画面上の、同じ画像内での肘から指先の長さ(①と置く)と彼女の全身(②と置く)をそれぞれ 10 回計測した。その計測結果と彼女の公式の身長の情報をもとに彼女の実際の肘から指先の長さ(③と置く)を

①：②＝③：彼女の公式の身長　［図 1 参照］

として、比を使って③を算出した。そして、その平均値を彼女の実際の肘から指先の長さとして実験に使用した。

その後、ボールを投げたシーンを表示し、その画面上での彼女の肘から指先までの長さ(④と置く)とアニメーションの 1 コマ(1/24 秒)で動いたボールの飛距離(⑤と置く)を計測し、実際の 1 コマあたりのボールの飛距離(⑥と置く)を

③の平均：⑥＝④：⑤　［図 2 参照］

として、比を使って⑥を算出した。またそれらの結果をもとに、彼女の投げたボールの初速度を求めた。

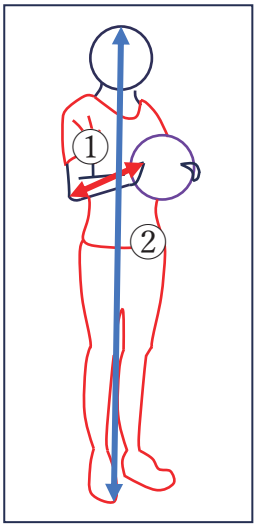


図 1　全身のシーン

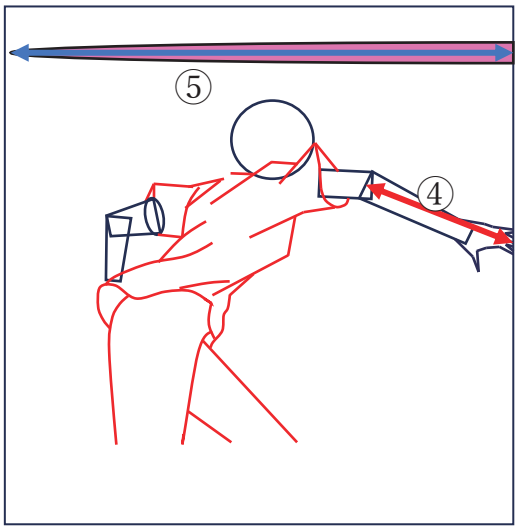


図 2　ボールを投げたシーン

表 1　数字で置いた単語

①…全身が写ったシーンの肘から指先までの長さ
②…全身が写ったシーンの全身の長さ
③…実際の肘から指先までの長さ
④…ボールを投げたシーンの肘から指先までの長さ
⑤…ボールを投げたシーンのボールの飛距離
⑥実際の 1 コマあたりの飛距離

ただし奥行きなどは考えずに彼女から見てボールが垂直に真っすぐ飛んだ場合の最短距離で計測した。［図 3 参照］

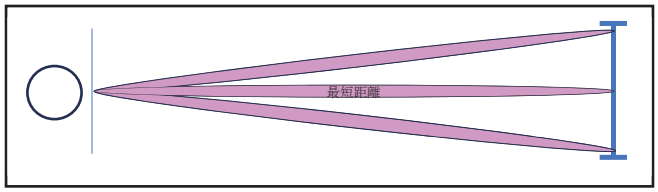


図 3　最短距離

また参考用として佐々木・宮﨑の肘から指先までの長さ(右を⑦、左を⑧と置く)を計測した。

なお有効数字はすべて3ケタとした。

実験結果　考察

表2　肘～指先の長さ

回数	①/②(cm)	③(cm)
1	1.80/7.87	38.9
2	1.54/8.87	29.8
3	1.47/8.89	28.1
4	1.85/9.31	33.8
5	1.72/9.32	31.4
6	1.57/8.90	30.0
7	1.11/6.38	29.6
8	1.91/8.73	37.2
9	1.74/8.22	36.0
10	1.81/9.54	32.3
平均		32.7

表3　1コマあたりの飛距離

回数	④/⑤(cm)	⑥(cm)
1	1.68/6.33	123
2	1.79/5.53	101
3	1.81/5.22	94.3
4	1.95/4.52	75.8
5	1.78/4.24	77.9
6	1.35/4.15	101
7	1.35/4.12	99.8
8	1.35/4.15	101
9	2.10/6.28	97.8
10	2.15/6.25	95.1
平均		96.7

表4　比較用のデータ

名前	身長	⑦(cm)	⑧(cm)
佐々木	152	36.4	35.3
宮﨑	154	39.2	38.4

表2は佐々木・宮﨑のスマートフォンで測った①と②と、算出した③とそれの平均を表にしたものである。表3は④と⑤の値と算出した⑥とそれの平均を表にしたものである。表4は私たちの身長と⑦と⑧を測った結果である。

実験の結果⑥の平均は96.7cm、時速に変換すると83.5㎞となった。また③の平均と⑦、⑧を比較すると、彼女よりも身長が低い私たちの方が⑦、⑧の値が大きいという結果になった。

しかし空想科学研究所の公式YouTubeチャンネル『空想科学研究所KUSOLAB』が投稿した、「『SPAY×FAMILIY』ヨルさん、テニスボールをバラバラに！」という動画によると彼女はテニスボールをマッハ20.5で打つことが出来ると考察されている。こちらと比較すると私たちの時速83.5kmは遅すぎると感じた。そのため、③の真の値はもっと大きく、それに伴う初速度ももっと大きいのではないかと考えた。また、このようになった原因としては、画質の悪さやそれに伴う計測のズレなどが考えられる。

今後の課題

タブレットのように画面の大きい機材で計測する、画素数の大きい機材で計測するなど計測に使用する機材を変え、計測の精度を上げることや、投げるボールの速度以外の面から彼女の能力を計測することを考えている。

謝辞

本研究、論文作成にたくさんのご指導をくださった、長崎亜希子先生・大槻美萌先生に、深く感謝申し上げます。

本研究のテーマとなる作品を作り上げてくださった、遠藤達哉先生・Clover Works 株式会社の皆様・WIT STUDIO 株式会社の皆様に、心より感謝申し上げます。

本論文作成の参考とさせていただいた、柳田理科雄さんをはじめとする空想科学研究所の皆様に、感謝申し上げます。

参考

・柳田理科雄.空想科学読本１［新装版］. KADOKAWA.2006

・空想科学研究所 KUSOLAB.″『SPAY×FAMILY』ヨルさん、テニスボールをバラバラに！″.YouTube,2023/02/03,https://youtu.be/iasXtC8ZcUw?si=BuEMunYJQ7a0uV75,(参照 2025/2/11)

・ABEMA.“アニメ「スパイファミリー」キャラ一覧！身長などのプロフィールや担当声優も網羅”.https://times.abema.tv/articles/-/10028154,

ABEMA TIMES. 2023/10/12,(参照 2024/7/29)

炭酸塩ノジュールを用いた放散虫化石の採取

理数科　貞元公希

Radiolaria are used as index fossils by researchers. On the other hand, it`s difficult for high school students to use a common method which uses hydrofluoric acid. Therefore, I decided to use carbonate nodules, which can be collected by high school students using hydrochloric acid treatment. I collected six carbonate nodules of various sizes from the Miocene Amatsu Formation, in Awakominato, Japan. After that, I crushed and dissolved one of six with hydrochloric acid. When I observed with an electron microscope, it`s revealed that there are several radiolarian and diatom fossils. In the future, I would like to further observe the characteristics of these fossils and estimate their age, and identify their genus and preferably species.

放散虫は示準化石として使用されている.採取方法はチャートにフッ酸処理をするというものであり高校生が行うには難しい.そこで高校生でも行える塩酸処理で採取できる炭酸塩ノジュールを使ってみようと考えた.まず安房小湊にある中新統天津層から炭酸塩ノジュールを大小6個採取した.その後そのうちの一つを砕いたものを塩酸処理し、電子顕微鏡で観察したところいくつかの放散虫化石や珪藻化石などを確認した.今後は更にこれらの化石の特徴を観察し,年代特定や,属の同定を行いたいと考えている.

1.研究の背景（動機）

放散虫は海洋プランクトンの一種である.5億年前にはすでに生息していたとされ,基本的にどの時代の地層にも含まれている.生命サイクルが数か月と短く,形態の進化が明確であり,その骨格が二酸化ケイ素(SiO_2)から作られているため,丈夫で化石になりやすいことから示準化石として地層の対比に用いられる.採取方法はチャートをフッ酸処理することが多い.チャートの主成分は放散虫化石や珪藻化石であるため,岩石を処理した量に対して試料の量が多いという利点がある.その一方,使用するフッ酸(HF)は劇薬であり,高校生は扱えない.　また,サンプルの表面を溶かして採取を行うため,化石の保存状態に問わず表面の状態が悪くなってしまう.そのため,　本研究では,　炭酸カルシウム($CaCO_3$)によって固結された炭酸塩ノジュールを用いることにした.

2.研究の目的

炭酸塩ノジュールには,形成される過程で海底に堆積していた放散虫が混入することがあるため,それを塩酸(HCl)処理し,サンプルとなる放散虫化石を採取することを目的とした.

3.実験方法

この研究で使用した炭酸塩ノジュール試料は,千葉県鴨川市天津の実入海岸にある露頭から採取したものである(図1,a,b,c).

三浦半島及び房総半島に分布する黒滝不整合以前の中期中新世から鮮新世の地層は,嶺岡構造帯を境に,北側は前弧海盆堆積物で側方に連続な厚い海成層からなり,南側は小規模で側方変化の激しい海成層が分布しており,前者は安房層群,後者は三浦層群と呼ばれている(高橋,2008),(尾崎,2019).一方で,(柴田,2021),(Kikukawa,2024)など,どちらも三浦層群と呼ぶこともあるが,本稿では

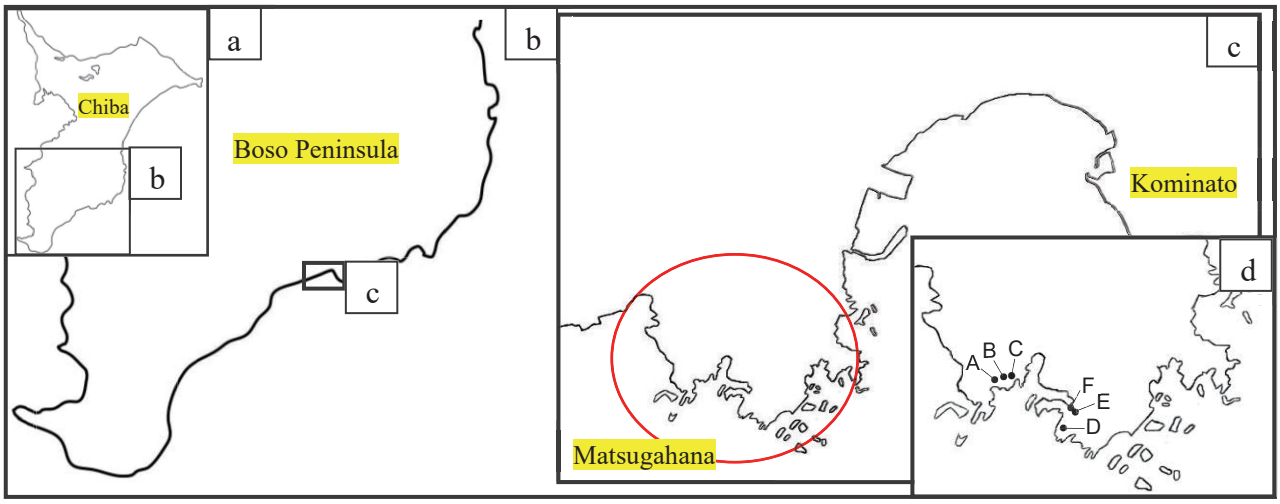


図 1. a, b, c, 実入海岸の場所. d, 炭酸塩ノジュールの採取位置. 本研究では A 地点から採取したものを用いた. Kikukawa (2024), 国土地理院の地理院地図 Vector を基に作成.

名称を分けて呼ぶこととする.

実入海岸に位置する安房層群は下位から木ノ根層, 天津層, 清澄層, 安野層に区分され (図 2), 実入海岸は天津層小湊凝灰岩部層下部とそれより下位の天津層下部が分布している (芳賀, 小竹, 1996). 主に青灰色または灰緑色泥岩からなり, 多数の凝灰岩層を挟在することを特徴とする (芳賀, 小竹, 1996) (図 3. a, b).

ここから, 大小合わせて 6 つの炭酸塩ノジュールを採取した (図 1, d). また, この露頭には (芳賀, 小竹 1996) や (Kikukawa, 2024) にもあるように, 採取したもの以外にも, 多数の炭酸塩ノジュールや生痕化石が見られた. (図 4. a, b)

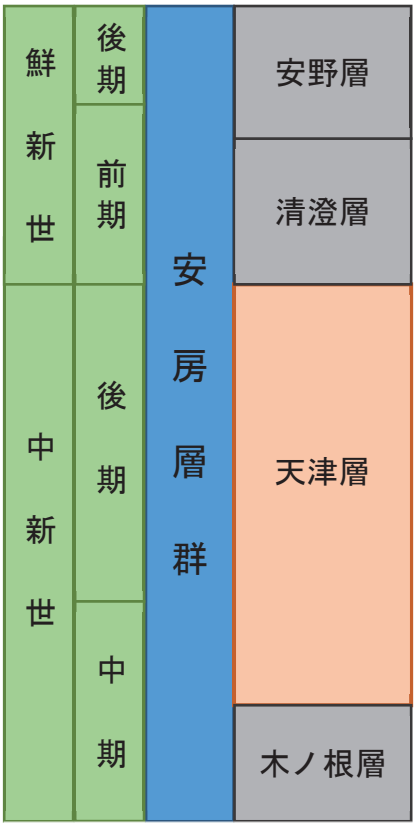


図 2, 安房層群の地層層状. 尾崎 (2019), Kikukawa (2024) を基に作成.

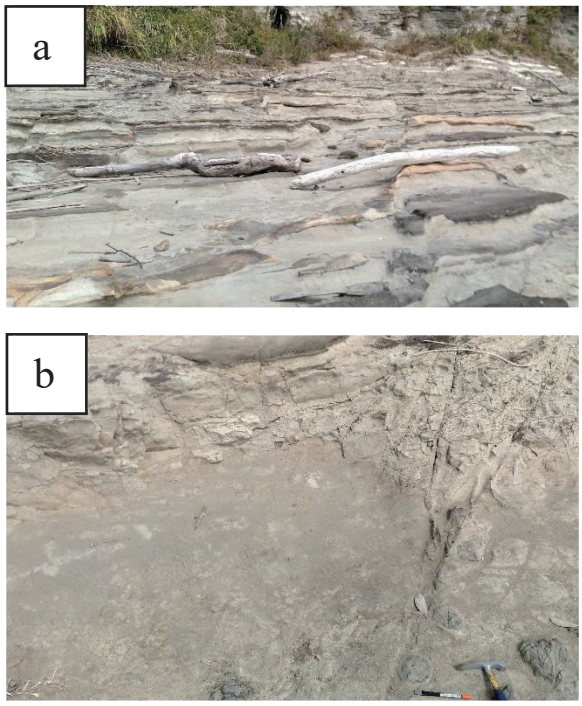


図 3. a, b, 実入海岸の露頭の写真. 中央に見える黒色の層が凝灰岩層.

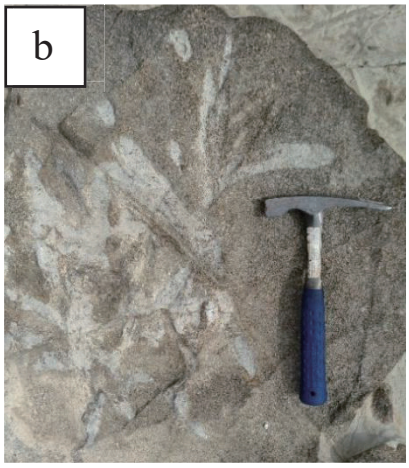
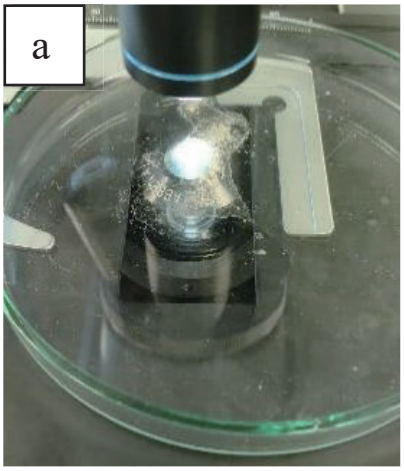
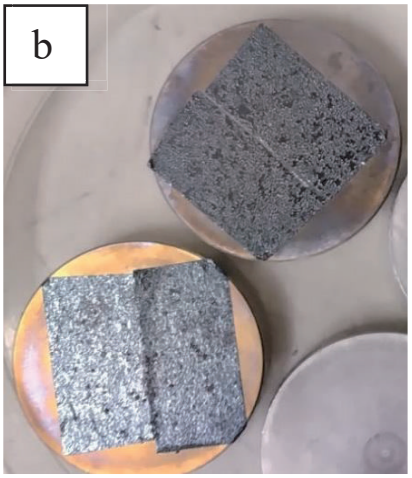


図 4. a, 埋まっている炭酸塩ノジュール.
b, 生痕化石. 何かの巣だと考えられる.

炭酸塩ノジュールは（尾田, 佐藤, 2013）に従って 1mol/L の塩酸を用いて炭酸塩ノジュールを処理した. 採取してきたノジュールを常温の室内において数か月乾燥させた後, ハンマーやタガネを用いて砕き, その後, 乳棒, 乳鉢を用いて粒径が 0.5～1mm になるまで小さくした. 次に, 200ml ビーカーに 5～10g 程度の試料と 20ml ほどの塩酸を入れ, 数日間放置した. この時, 塩酸に入れた直後は試料から気泡が発生したが, 1 日ほど経つと反応は起こらなくなっていた. その後, ビーカー内の塩酸を希釈し, 目開き 53 μmのふるいに残った残渣を乾燥させて試料を採取した.

放散虫化石の観察には最初に生物顕微鏡（150～600 倍）と双眼実体顕微鏡（20～40 倍）を用い, 顕微鏡下で拾い出した試料をスライドガラスやシャーレの上に載せて詳しく観察した. また, その後千葉大学にある走査性電子顕微鏡で骨格の細部を観察した（図 5. a, b, c）.





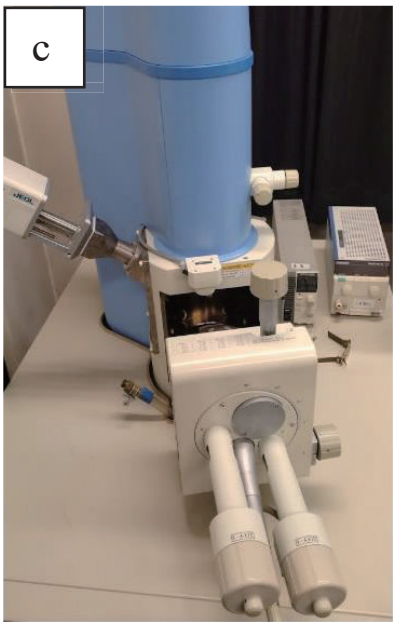


図 5. a, 観察で用いた生物顕微鏡. b, 白金で蒸着した化石. c, 骨格の詳細な観察に用いた走査性電子顕微鏡.

4. 結果

結果,放散虫化石を 78 個体（*Nassellaria* 57 個体,*Spmelaria* 17 個体,その他 4 個体）,花粉化石 13 個,珪藻化石 11 個,海綿骨針化石 2 個体を拾い出し,その中で放散虫化石 17 個体（*Nassellaria* 13 個体,*Spmelaria* 4 個体）,珪藻化石 6 個体,海綿骨針化石 1 個体の試料を白金で蒸着し,走査性電子顕微鏡で表面の形状を詳しく観察し,一部の化石は同定を行った（図.6,表. 1）. この試料の中には石英残渣などが入っており,化石に泥のようなものがへばりついていたため,生物顕微鏡や双眼実体顕微鏡では表面の様子が詳しく観察できないものが多かった.走査性電子顕微鏡では試料によっては骨格に空いた穴の形状やスパインまで観察できたが,ほとんどは周りについている泥のようなものによって細部の観察ができなかった.今回用いた炭酸塩ノジュールは生痕化石の可能性が高く同試料にはドロマイトが含まれている(Kikukawa,2024).そのため,今回の試料にこびりついていた泥のようなものはドロマイトだと推定した. これを取り除くために追加実験を行った.

5. 追加実験と結果

ドロマイトを取り除くためには 80～90℃にした 10%塩酸で処理する方法や,ピロリン酸ナトリウム(Na4P207)かヘキサメタリン酸ナトリウム($(NaPO_3)n$)に 10%過酸化水素水(H_2O_2)を混ぜたもので処理する方法が有効である.そのため 20%(6mol/L)塩酸を希釈し作成した 10%塩酸 100ml と,塩酸処理を行っていない試料数 g と 2cm ほどの薄片状の試料をそれぞれ別の 150ml ビーカーに入れ,ホットマグネットスターラー(IKA C-MAG HS 7)で 1 時間半ほど 70～85℃に加熱しながら反応させた(図 7). しかし,採取した試料には泥のようなものが着いていた(図 8. a, b).

図 7. 使用したホットマグネットスターラー.

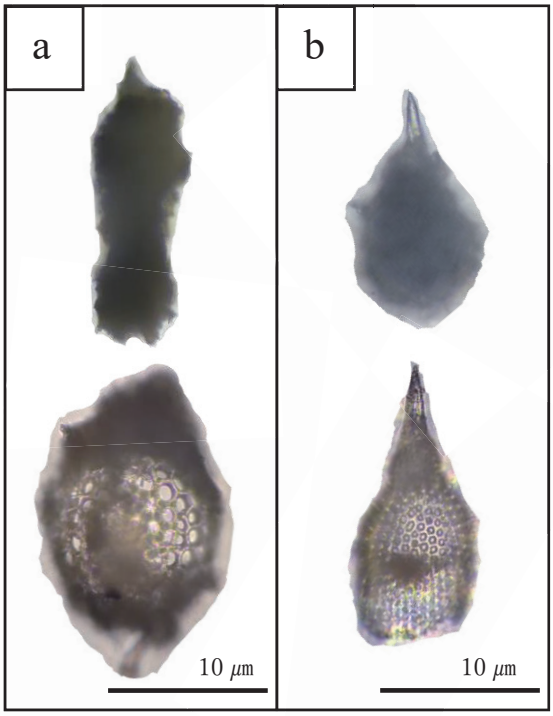


図 8. a, 加熱した塩酸で処理して採取した放散虫化石. b, 常温の塩酸で処理して採取した放散虫化石. どちらも表面のドロマイトの付着率には個体差が大きい.

6. 考察

10%塩酸で加熱処理を行っても放散虫化石表面のドロマイト様の物質を落とすことはできなかった. 原因として, 加熱した時間が短かったことが挙げられる. 加熱し終えた時には溶液内から気泡がほとんど発生していなかったが, ドロマイトは塩酸と反応する際に気泡をほとんど発さないため, 塩酸と石灰岩の反応は終わったがドロマイトはまだ残っている状態で実験を終えてしまった可能性がある. 他にも, 加熱処理したことで別の物質が析出し, 放散虫化石の表面に付着したことなどが考えられる(図. 9, a, b).

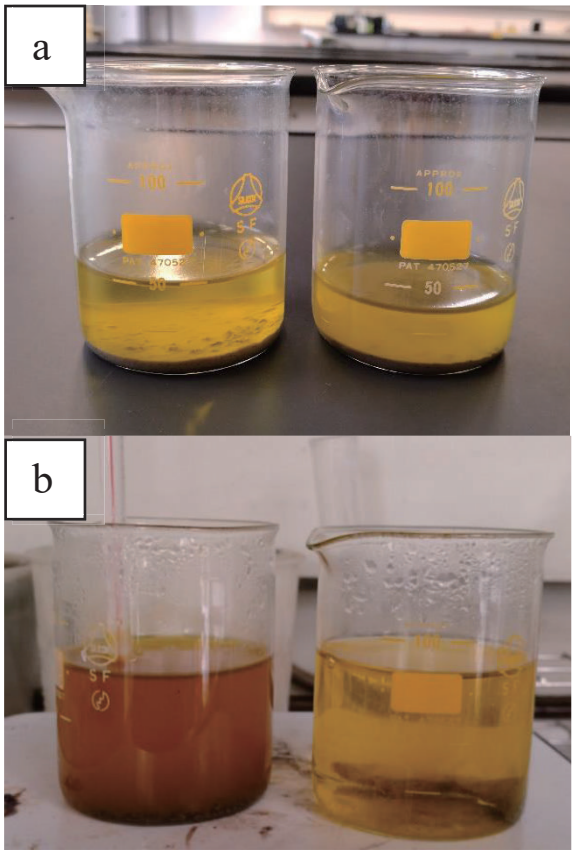


図 9. a, 常温で反応させた後のビーカー.
b, 加熱して反応させた後のビーカー.

7. 結論

今回の実験では, 塩酸処理によって炭酸塩ノジュールから放散虫化石や珪藻化石を取り出すことができた. しかし, 試料にはドロマイトが付着している場合が多く, 骨格やポアが詳しく観察できないものが多かった.

今後の課題としては, 塩酸による加熱処理を長時間行うか別の方法でドロマイトを処理した試料と, 今回扱った常温の塩酸処理のみによって採取した試料の表面を比較して, 試料表面の比較を行いたい. また, 状態のよい放散虫化石が多数採取できた場合には種の同定を行い, 炭酸塩ノジュールとそれが産出した地層の年代比較を行いたい.

8. 謝辞

電子顕微鏡の使用を快諾し, 観察の手助けをして下さった千葉大学教授の小島隆先生と千葉大学所属の吉沢明日香さん, 放散虫研究についてアドバイスを下さり, 論文集等を下さった千葉県立中央博物館の菊川照英先生をはじめとした放散虫化石研究者の皆様, そして薬品の準備や研究, 要旨の英語について指導をして下さった市立千葉高校の先生方に感謝申し上げます.

9. 参考文献

[1]芳賀正和, 小竹信宏, 房総半島南部中新世天津層下部の珪藻化石年代, 地質学雑誌, 758-760(1996).

[2]A. Kikukawa, Y. Nakamura, K. Kikuchi, N. Fukukawa and Y. Aita, Exceptionally well-preserved radiolarian fossils within Miocene trace fossils from the Amatsu Formation, Chiba, Japan. Lethaia(2024).

[3]尾田太良, 佐藤時幸, 「新版　微化石研究マニュアル」, 朝倉書店(2013).

[4]谷村好洋, 辻　彰洋, 「微化石　顕微鏡で見るプランクトン化石の世界」, 東洋大学出版会(2012).

[5]H. Yoshida, K. Yamamoto, M. Minami, N. Katsuta, S. Shirono and R. Metcalfe, Generalized conditions of spherical carbonate concretion formation around decaying organic matter in early diagenesis, Nature, 6308, 1-10(2018).

[6]鈴木進, 蟹江康光, 神奈川県南東部に分布する中新統三浦層三崎層の放散虫化石年代, 神奈川博調査研報(自然), 117-126(2012).

[7]坂井充, 鈴木紀毅, 三浦半島・野比海岸（中新統葉山層群）から産出した放散虫化石群集, 横須賀市博研報(自然), 70, 53-62(2023).

[8]尾崎正紀, 古山精歴朗, 佐藤智之, 新井晃作, 房総半島東部沿岸域の 20 万分の 1 海陸地質図及び説明書(特に第四紀地殻

変動について),海陸シームレス地質情報集,房総半島東部沿岸域,海陸シームレス地質図 S-6(2019).
[9] 柴田健一郎,野崎篤,高橋直樹,笹間友博,西澤文勝,田口公則,三浦半島の新第三系と第四系:付加体-外縁隆起帯-前弧海盆堆積物, 神奈川博調査研報(自然),16,69-106(2021)
[10]高橋直樹,柴田健一郎,平田大二,新井田秀一,葉山-嶺岡帯トラバース,地質学雑誌,122,8,375-395(2016)

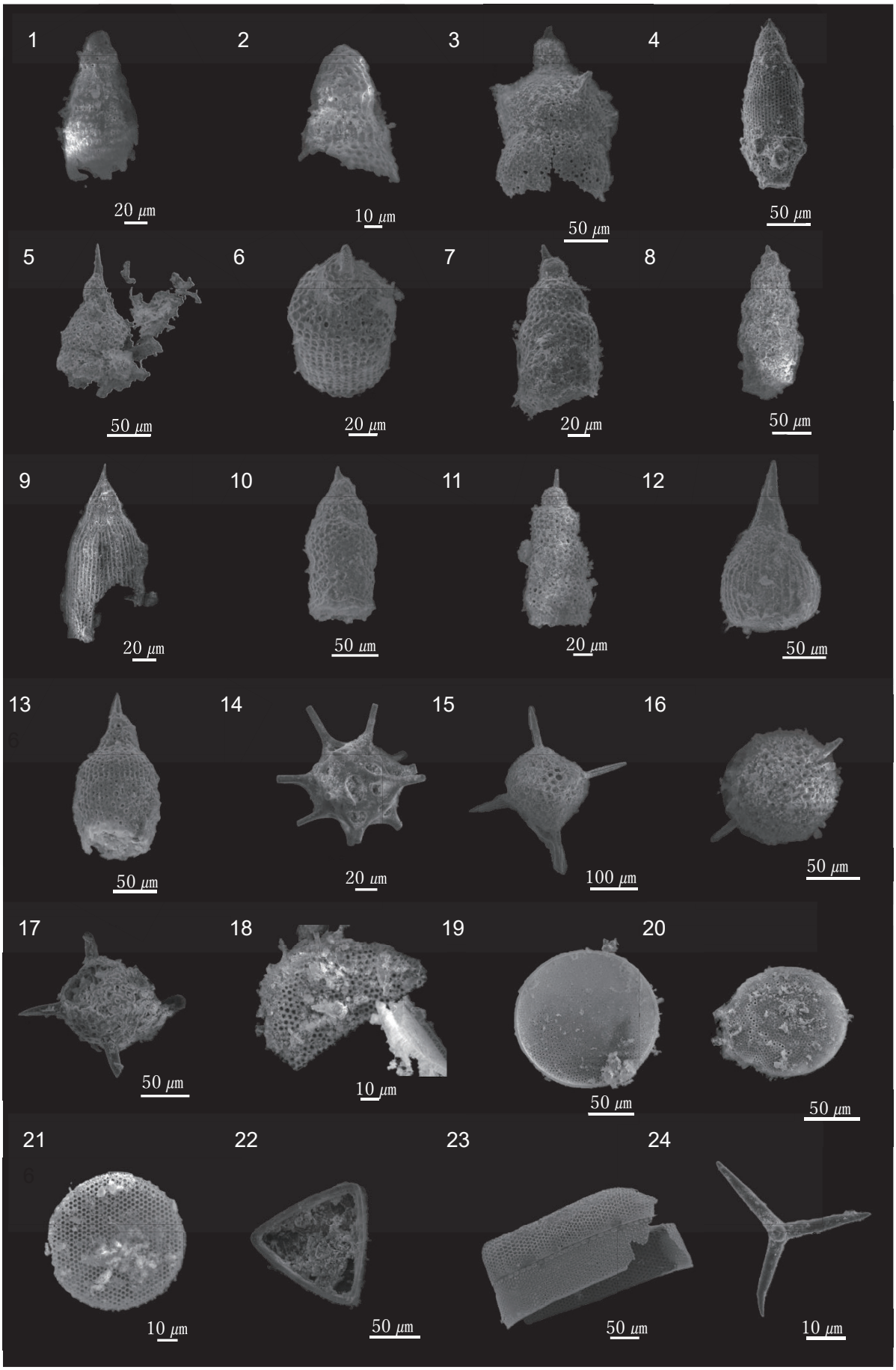


図. 6, 走査性電子顕微鏡で観察した試料.

表. 1, 走査性電子顕微鏡で観察した試料の種類.

No.	種類
1	*Siphostichartus corona.*
2	*Nassellaria sp.*
3	*Nassellaria sp.*
4	*Nassellaria sp.*
5	*Nassellaria sp.*
6	*Nassellaria sp.*
7	*Nassellaria sp.*
8	*Nassellaria sp.*
9	*Nassellaria sp.*
10	*Nassellaria sp.*
11	*Nassellaria sp.*
12	*Anthocyrtidium sp.*
13	*Nassellaria sp.*
14	*Spumellaria sp.*
15	*Spumellaria sp.*
16	*Spumellaria sp.*
17	*Spumellaria sp.*
18	*Bacillariophyceae sp.*
19	*Bacillariophyceae sp.*
20	*Bacillariophyceae sp.*
21	*Bacillariophyceae sp.*
22	*Bacillariophyceae sp.*
23	*Bacillariophyceae sp.*
24	*Porifera sp.*

ガラスの表面構造がもたらす光の像

理数科　星野大空 鈴木寛人 渡邊捷斗

1 要旨(Abstract)

When we saw a windowpane in Chiba Municipal Chiba High School, polygonal real images were observed. The images differed from that on uneven glass.
There was regular uneven structure on the surface of the windowpane, so we thought that the surface structure relates to the images, and researched how differences in surface structure affect the shape of the image.
We arranged beads and reproduced the surface structure artificially. Then, we shined a beam of laser at the beads. We changed the distance each experiment.
In this experiment, we investigated whether there are any changes in shape and image on the screen.

私たちが千葉市立千葉高等学校の窓ガラスを観察した際に、通常の凹凸ガラス（すりガラスなど）とは違い、外側からの光によって、ガラスに多角形状の明暗がはっきりした像ができているのが見られた。また、窓ガラスの表面には規則的な凹凸構造があったことから、私たちは表面構造が像の成因に関係していると考え、表面構造の違いが像の形状にどんな変化をもたらすかのかについて研究した。実験では、ビーズ球を並べて、表面構造を擬似的に再現し､レーザーを光源として、ビーズを並べたものを器具間の距離を変化させながら照射した。ビーズの並べ方を変化させた際に、スクリーンに映る像の有無や形状に変化があるのかを調べた。

2 序論(Introduction)

2,1　動機と目的(Motives and Objectives)

千葉市立千葉高等学校（以下本校と呼ぶ）の窓ガラスを観察した際に、外部の光によって、像がガラス上に観察できた(図1)。この像は班員の家のすりガラス（図2）に映るもののように徐々に光が弱まるのではなく、光が強め合う領域と暗の領域の境界がはっきり判断でき、かつ頂点のようなものが複数ある多角形状であった。また像が観察できたガラスにはすりガラスとは違う規則的に配列されたような表面構造が観察できた(図3)。このことから、私たちはこのガラスの表面構造と観察できた像の発現や形状に関係性があると考えた。私たちの目的は表面構造の配列や構造の変化によってどのように像の形状が変化するのかを調べることである。

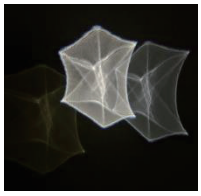


図1-1

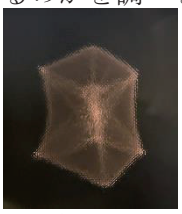


図1-2

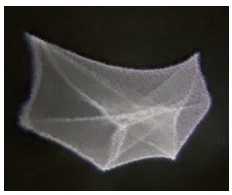


図1-3

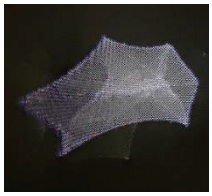


図1-4

図1-5

図1-6

図１ 本校の窓ガラスで観察できた像の写真群

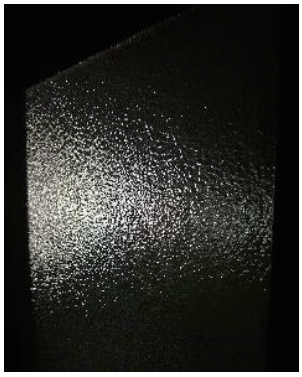


図２　班員の家のすりガラスの場合

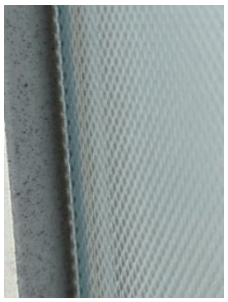


図３　本校の窓ガラスの表面構造

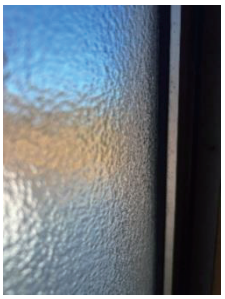


図４　一般的なすりガラスの表面構造

また、動機の段階で、観察できた像や窓ガラスの表面構造について以下ことが分かった。

〈像について〉
1. 像は図1-1, 1-2, 1-6に示す縦長な形状と図1-3, 1-4, 1-5に示す横長な形状に大別できること。
2. 移動してガラスを変えて像を観察すると、1で述べた縦長の像が横長の像に変化することもあったことや、図1-3と図1-4のように上下が逆になることもあったこと。
3. 像は白色光で主に観察でき稀に図1-2のような橙色光や図1-5のような黄色光によっても観察できたこと。また、光源の色が違っていても、ほぼ全ての像は図1のどれかに似た形状をしていたこと。

〈ガラスについて〉
観察したガラスは、AGC株式会社の強化ガラス学校用タイプ「スクールテンパ」という製品であったことがわかった。このガラスは熱処理によって製造された型板強化ガラスであり、フロート板ガラスを軟化点近くの650℃まで熱した後、両面に空気を均一に吹きかけ、製造する。また、偏光サングラスで強化ガラスを見ると、光の反射具合や角度、背景の色などの条件でモアレ（干渉縞）が見えることもある（AGC株式会社ホームページより引用）。

〈ガラスの表面構造について〉
1. 表面構造に針を押しながら移動したところ、上側に押したことから凸構造であると分かったこと。
2. 表面構造は校舎内側のみの表面にあり、校舎外側の表面は一般的なガラスと同様になめらかであったこと。
また、AGC株式会社に問い合わせたところ、このガラスの反射像は意図的にデザインされたものではないというご返答を頂いたことから、ホログラムのように特定の光（像の形）を再生するために、ガラスに干渉記録を記録して、表面構造を作成したのではないと考えられる。

以下の図5は，図1の写真群を撮影した際の観測者，窓，光源等の位置関係を表した図である。

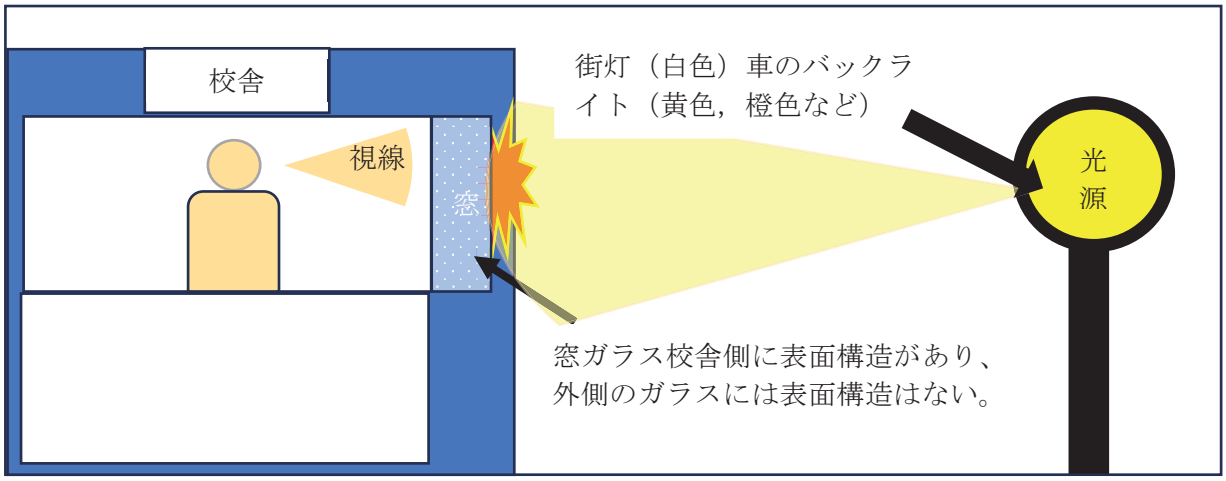
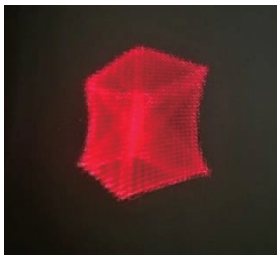


図５　イメージ図



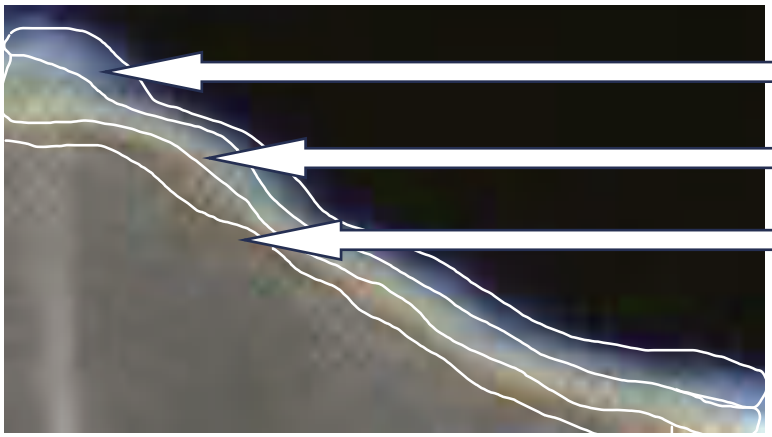
さらに、図5の位置関係と逆の場合（校舎外側に観測者，光源が校舎内部にあり、表面構造が光源側）だった際も、図6に写真のように、校舎内部から観察できた像(図1)同様の像が観察できた。

←校舎内部にある消火設備の赤色光を窓ガラスを通して校舎外部から撮影したもの。図1の像の際、位置関係は表面構造が観測者側にあったのに対し、図6の像の際は表面構造が光源側にあるという点で位置関係が逆である。

図 6

2.2 仮説(Hypothesis)

図1-1のような白色光によってできている像の縁に着目すると、白色光が像の内側から順に赤→黄→青と、波長の違いによる屈折率の違いによって起こる分光が観察できた(図7)。このことから、ガラスの微小な凸構造が光を様々な方向に屈折させてある特定の形状に光を収束させてこのような像を形成していると考えた。そのため、表面構造を変化させたとき、屈折する方向が変化し、収束する形状が変化することで映る像の形状も変化すると考えた。また、図8は光源から出た光がガラスや表面の規則的な凸構造によって屈折することで、ガラス表面上のある一定の範囲内に集まり収束しているのが観測できた像であるのではないかということを示している。



←※像の縁はグラデーションのようになっており、示した色の部分の境界が一部不明瞭の部分もある。

図 7　図 1-1 の像の右上部分の拡大写真

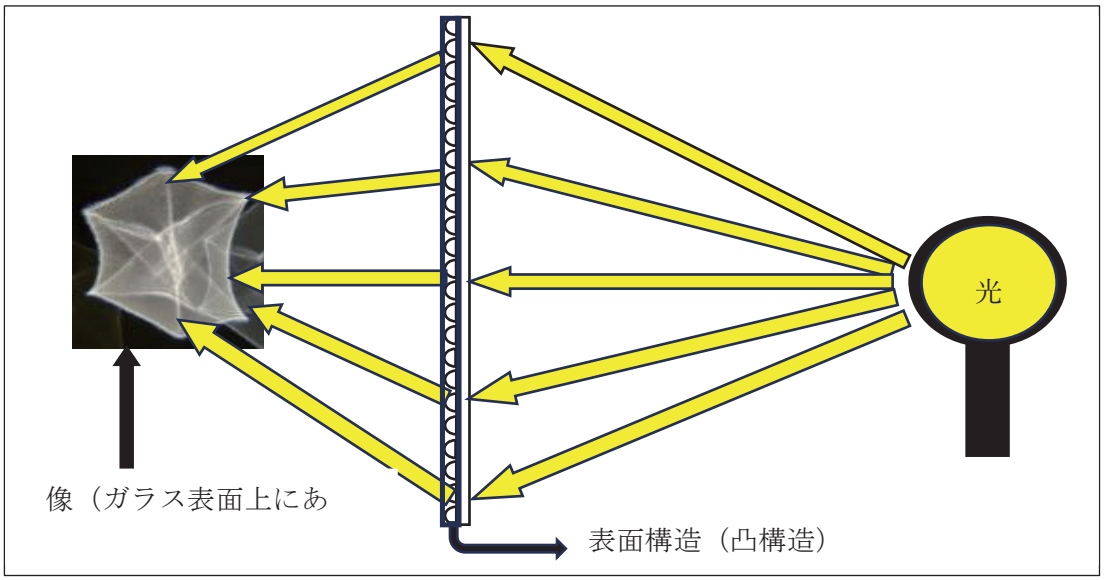


図 8 光源から出た光の進行と像の形成のイメージ図

3　実験(Experiment)

3.1 実験について（About Experiment）

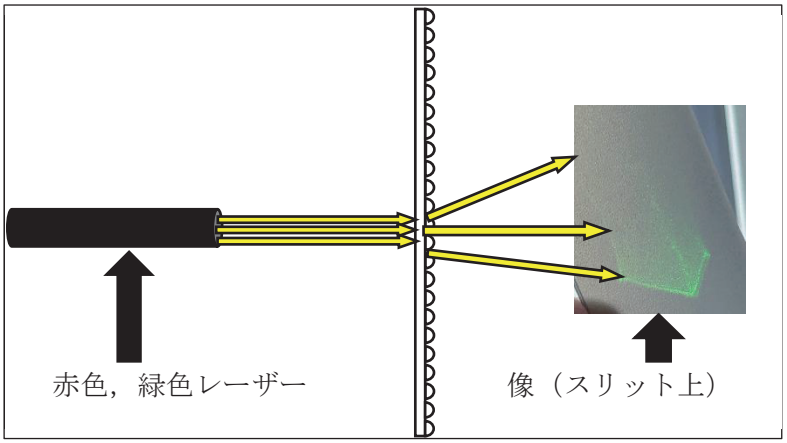
実験では、実験以前に行った簡易的な操作で判明したことを用いて、動機と目的で述べた図5の位置関係（光源，表面構造など）を一部変更して実験装置を組み立てた。そのため、先に変更点について述べる。

1.〈光源と表面構造の位置関係〉

動機と目的の図6の説明で述べた通り、表面構造が光源側に向いていても観測者側に向いていても像が観察できた。このことから、実験では再現した微小な凸構造を光源側に向けて実験を行った。

2.〈スクリーンの使用〉

動機と目的で観察できた像は窓ガラスに映っていた。しかし、図9に示すように窓ガラス外側から赤色，緑色レーザーを窓ガラスを通してスリット（スクリーンとして）に照射した際、スリットにも似たような像ができていた(図9)。この操作は１で前述した実験の際の位置関係とは逆であるが、同様に成り立つと考え、実験ではスクリーン上に映る像を観察した。



←図９の簡易操作では、スリットと窓ガラスの距離を遠ざけると、スリットに映る像も大きくなった。また、赤色レーザーと緑色レーザーで光源の色を変化させてもスリットに映る像の形状に大きな変化は見られなかった。さらに、結果として図８の仮説とは違うことが分かった。

図９　レーザーポインターを用いた簡易操作の位置関係のイメージ図

3.〈光源の変更〉

動機と目的で観察できた像は街灯や赤色灯であったが、微小な凸構造を製作して白色光などを照射した際、影になってしまった。またレーザーを用いた際、影になりにくかったため、実験では単色のレーザー光を使用した。

3.2 実験の目的（Purpose of Experiment）

私たちは今回、直径4mmの透明で小さなビーズ(図10)を12.8cm×17.7cmのケース内に平面状に規則正しく敷き詰めて微小な凸構造（以下凸構造と呼ぶ）を製作した(図11,12)。本実験では、この凸構造に光を照射した際の像の有無とできた場合の像の形状について調べる。

図 10　ビーズの写真

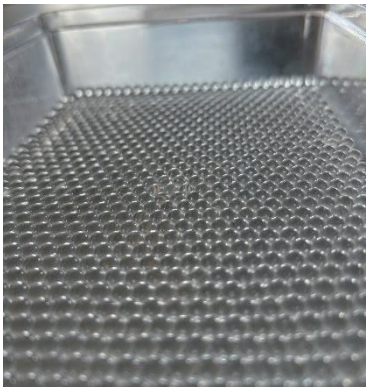


図 11 製作した凸構造

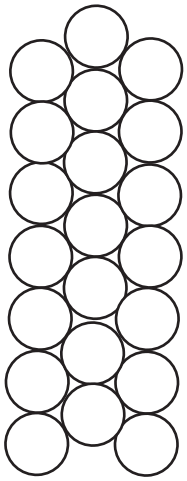


図 12　図 11 の拡大図

3.3　実験器具(Experimental Equipment)

・透明ビーズ（材質不明，直径4mm）・青色レーザー（波長 450nm）・凹レンズ（Φ75mm，焦点距離約250mm）(注１)　・スタンド×6台・アクリル樹脂板　・ケース（材質不明，大きさ12.8cm×17.7cm）・スマートフォン×2（撮影用）・画用紙（スクリーン）・万力×2

注１　レーザーは照射範囲が狭く、レーザー単体で照射すると図12のビーズ一個分のみを照射してしまう。そのため、より多くのビーズを照射するために照射範囲を広げることを目的として用いた。

3.4　装置の組み立て(Equipment Assembly)

本校暗室にスタンドを配置した(図13)。各スタンドに①~⑤と番号を振り、組み立て方法を述べる。

1. ①を床からの高さ62cmの机に置き上部トングでレーザーを机からの高さが57cm（図13-2の両矢印が示す高さ）になるように挟み、下部トングで凹レンズを挟む。
2. ②と③を向かい合わすように床に置き両側の上部トングでアクリル樹脂板を挟み、スマートフォンの水準器で床と水平になるように調整する。
3. ④を机の上に①と隣り合うように配置し、④の上部トングにスマートフォンⅠを挟む。
4. ⑤を②から一定の距離を離して、スクリーン全体と②と③の全体が映るようにスマートフォンⅡを⑤の上部トングに挟む。
5. ②、③のスタンドの間に床に張り付くようにスクリーンを設置し、凸構造のケースに貼ってあるシールが図13の手前側となるようにアクリル樹脂板の中心部に置く。

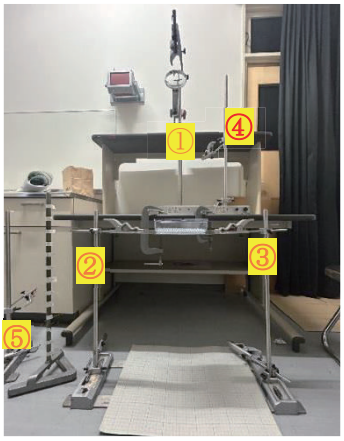


図 13-1　全体写真

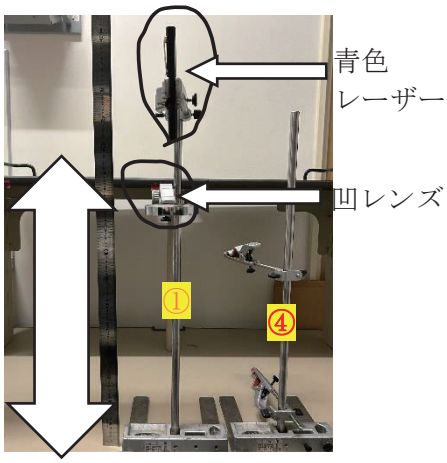


図 13-2　①と④の詳細写真

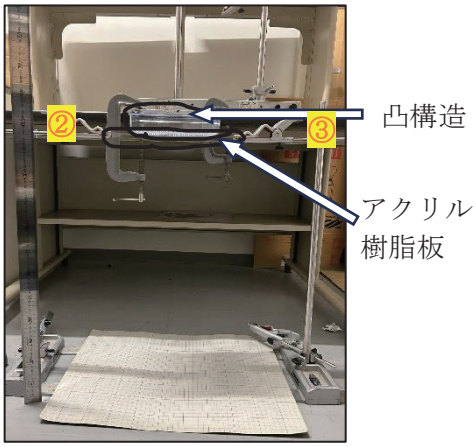


図 13-3　②と③の詳細写真

図 13　実験装置の写真群

〈組み立て上の注意・補足〉

・実験を行っている期間中は基本的に図13の状態を保っていたが、凸構造をアクリル樹脂板にのせる作業は何度も行った。

・凸構造に貼っているシールは途中から実験途中に付けたものであり、一部の結果では凸構造をのせる位置が逆転してしまった可能性もある。

3.5 実験方法(Experimental Method)

1. 図14のようにレーザーと凹レンズの中心と凸構造の中心が一直線になるように調整する。
2. レーザーを動かさずに手動で傾けて動かしながら照射する(図15)。また、照射している最中の凸構造とスクリーンをそれぞれ撮影する。
3. 1と2の操作を、図16の両矢印が示す凸構造と床の距離が15cm, 25cm,35cm,45cm,55cm、図17の両矢印が示す凹レンズと机の距離が25cm,30cm,35cm,40cm,45cm,50cmとなるようにそれぞれ高さを変

化させて計30回のデータ（動画）を取る。

4. 2で撮影した動画を再生して、二名の記録者が後述する方法を用いて像の有無や形状を確認し、像が確認できれば再度、その像を撮影する。また、像があった際にはレーザーが凸構造に当たった場所も確認する。（なお像の観察後、他の高さでも同一の形状の像が見られるかも調べる。）

〈実験上の注意・補足〉

・4の確認の際に、動画がぼやけているときや記録者が適正に判断できないとしたときは操作2を再度行う。

・凸構造のケースの裏側の中心部と四隅に突起が見られたため、その部分にレーザーを当てた場所は除外する。

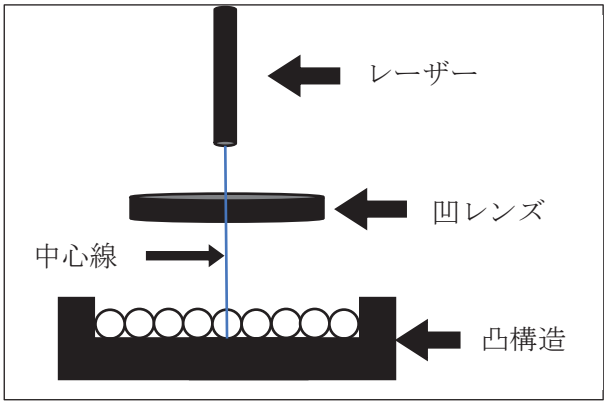
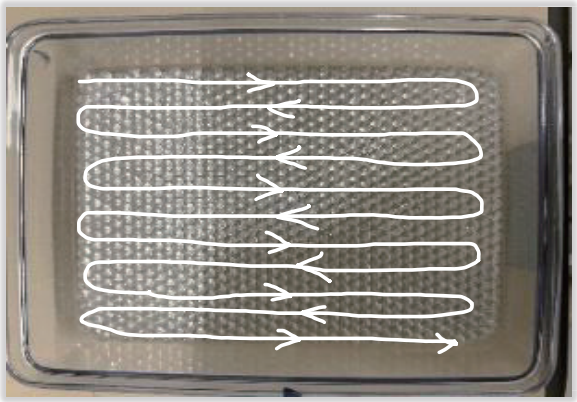


図 14　簡略化したイメージ図



↑
図 13 の
奥側

図 13 の
手前側
↓

図 15　レーザーの照射経路

図 16 床から凸構造までの距離

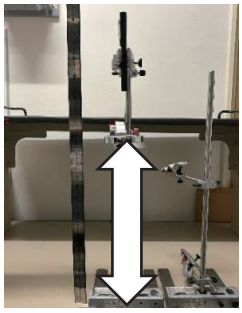


図 17 机から凹レンズまでの距離

3.6 評価方法(Evaluation Methods)

前述した方法で像の有無や形状を確認するにあたり、本実験における像の基準と像の形状の評価方法と記録方法について述べる。

〈像の基準〉

1.　スクリーンに映った光の形が多角形に酷似している

2.　スクリーンに映った光の縁が明線と暗線の層状になっている

1, 2の両方の基準を満たすスクリーンに映ったものを像として判断する。

〈像の基準についての補足〉

１について：動機と目的で述べた通り、本研究では窓ガラスに映る光が多角形状になっていることを特筆して像と呼称しているため、実験においても像と呼称するには光の形が多角形状になっている必要があるためである。

2について：図9の赤色，緑色レーザーを用いた簡易操作を行った際、スリット上に像のようなものできた際に縁の部分が明線と暗線の層状になっていたためである(図18)。

〈形状の評価方法と記録方法〉

1.　取得したデータ（動画，写真）から、像の全体の大きさを計測する。

2.　像をスケッチして記録し、頂点の数などからどの多角形に類似しているかを調べる。
また、前述した像の定義，評価方法から図19に具体的に像に認定できるものと形状を例として示す。
なお、図18, 19の白線の部分が暗線になっている部分である。

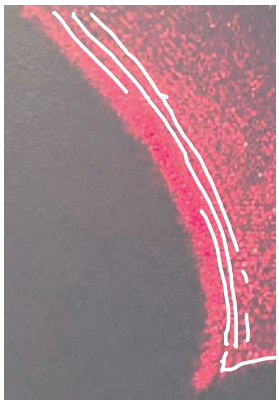


図 18　スリットに映る像の縁

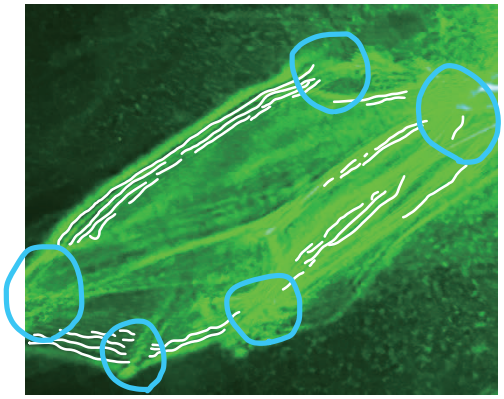


図 19　像と認定できるものの具体例
（実験以前の操作で撮影したもの）

…光が強め合う部分の境界線の頂点

←光の強め合う部分の境界線によって光が多角形状になっており、図 18 のように縁に明線と暗線の層ができているため、像と認識できる。また、この像は頂点が五つあることから形状は五角形とする。

4 結果(Result)

本実験では、すべての高さにおいて像と断定できるものは確認できず、スクリーンに映ったほぼすべての光は凸構造を通って図20のようになっているのが観察できた。また、それぞれの器具間を変化させて行った全30回のうちのほぼ全ての場合において図21の囲みが示すように奥側にレーザーを照射した際に線状の光がスクリーンで観察できた。

図 20

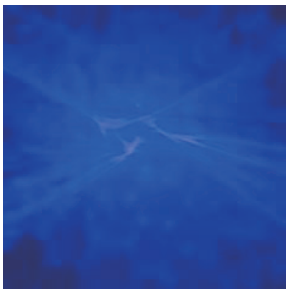


図 21　線状の光（左側写真）と観察できた際のレーザーの照射範囲（右側写真）

5 考察(Discussion)

実験では像はできなかったため、図20と図21の成因について考察する。図20は図22のようにビーズが完全に隙間なく並べられたときに光がビーズの接する部分で弱まる注2ことでこの構造の隙間のみが強く照らされてスクリーンに映ったためできたと考えられる。また、図21はビーズの奥側で多く観察でき、また奥側は配列が崩れやすく隙間があったと考えられることから、図23のように隙間があることで光が弱まらずに長い距離を直進して光の線がスクリーンに映されてできたと考えられる。

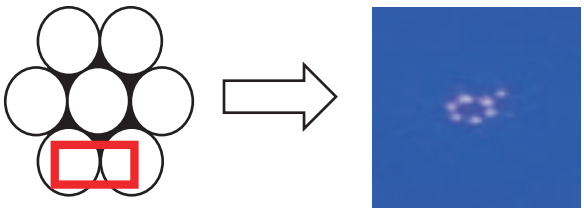


図 22　規則的に並んでいるビーズの時

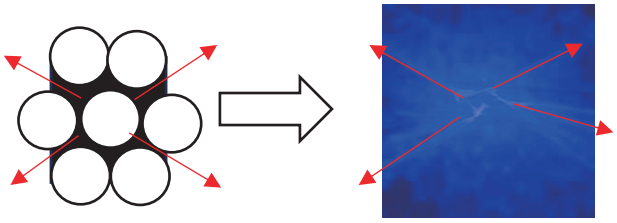


図 23　奥側でビーズの配列が崩れている時

■・・・光が強くスクリーンに映される範囲　　→・・・線状の光

注2 今回の実験では、図22,23が示すようにレーザーは最大でビーズ1個と接するビーズの半分ほどを照射していた。このことから、簡易的な光線追跡を行うと、図22,23の中央にあるビーズを照射した光はアクリル樹脂板と垂直な平行光線だとみなすことができる。よって、中央のビーズを肉厚両凸レンズとして第一面，第二面の曲率半径2.00mm,屈折率1.50（ガラス製かプラスチック製か判断できなかったためこの値とした）としてレンズメーカーの公式に代入して計算した際 f ＝2.00mmとなったことから、光が集光し、スクリーンに映る際には広範囲にレーザー光が広がってしまうため(図24)、光が弱まったのではないかと考えられる。また、中央のビーズに接するビーズの半分を照射するレーザー光はビーズ球での屈折によって拡散することで光が弱まってしまうと考えられる。（屈折率：札幌デザイン株式会社，「材料の屈折率《光学》Material IOR(Index of Refraction Values)List」より引用，焦点距離計算：Adachi Yuki,「単レンズの焦点距離,主点,体積の計算ツール」,光学技術の基礎用語より引用）

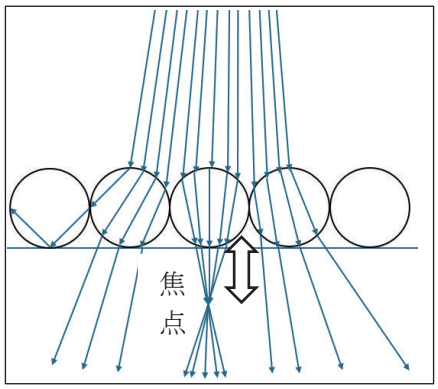


図 24 レーザー光の光線追跡

・・・光

【レンズメーカーの公式】

$$\frac{1}{f} = (N-1)(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2})$$

f：レンズの焦点距離　n：レンズの屈折率

R_1：第一面の曲率半径　R_2：第二面の曲率半径

（Adachi Yuki，「球面レンズの種類」，光学技術の基礎用語より引用）

←両矢印の部分が焦点距離である。また、図 24 はイメージ図であり、厳密な光線追跡の図ではない。

また図20，図21の像の考察から、球状の凸構造がある表面構造において、隙間が完全にない状態であると、光がビーズにより弱められてしまい評価方法にあるような多角形状の像はできないと考えられる。そのため、我々が観察した多角形状の像の有無や形状について少なからず凸構造の配置（隙間）が関係している可能性があると考えられる。加えて、隙間が関係していることや、発表会において外部の先生方からご助言を頂いたことから、干渉や回折といった現象も関与していると考えて研究を進めるべきだとも考えた。

6 今後の展望(Future prospects)

発表会において様々な先生方から4mmビーズを用いて製作した凸構造では大きすぎるという旨のご助言を頂いたことや、前述したように回折や干渉といった現象も考慮しなければいけないと考えたため、4mmビーズよりもさらに小さい透明の1mmガラス球を用いて簡易的な操作を行った(図25)。また現時点ではガラス球を用いた実験の計画を立てて実験の準備中である。

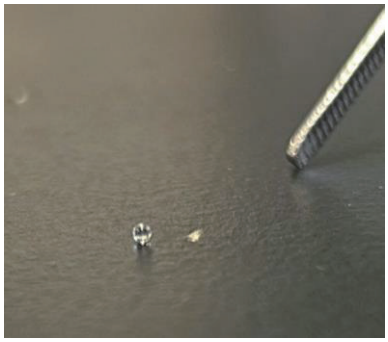


図 25 1mm ガラス球

〈1mmガラス球を用いた簡易的な操作〉

私たちは1mmガラス球を用いて2つの簡易的な操作を行った。

【操作1】シャーレ(直径90mm,ガラス製)にガラス球を実験の凸構造のように平面状に敷き詰めて(図26)、本校物理実験室で青色レーザーを照射し、机（スクリーンとして）に映る光の様子を観察した。

【操作2】シャーレにガラス球を無作為に二層三層になるようにふりかけ（写真なし）、本校暗室で青色レーザーを照射しスクリーンに映る光の様子を観察した。

※簡易的な操作のため、具体的な器具間の距離や状態は記録していない。また、今回の二つの操作はシャーレに入れた凸構造の違いが像にどの程度影響するかを大まかに調べることを目的とした。そのため、二つの操作の器具の配置はレーザー→凸構造→スクリーンという位置関係では共通であるが、一部器具の配置が異なっており、器具の配置は完全には一致していない。

操作の結果として、操作1では光が実験の図20のような形状になっているのが観察できた(図27)。また、操作2では像に認定できる可能性が高い光がいくつも観察できた(図28)。操作1の結果から、実験1の凸構造や操作1の凸構造のように平面上に隙間なく敷き詰めた凸構造では像はできないと考えられる。また操作2では像に近しい光が観察できたことから、平面状にガラス球を並べる凸構造よりも、二層三層と立体的にガラス球を配列する凸構造のほうが凹凸の効果が高まり(図29)、像ができやすいのではないかと考えた。

【操作1】

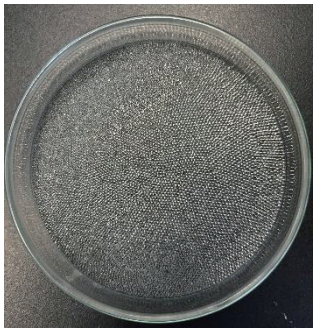


図 26 ガラス球の凸構造

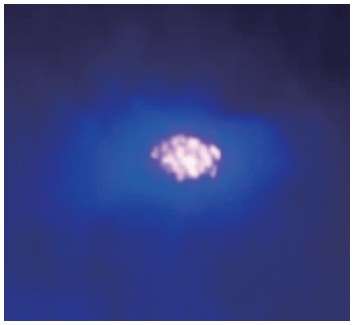


図 27 観察できた光

【操作 2】

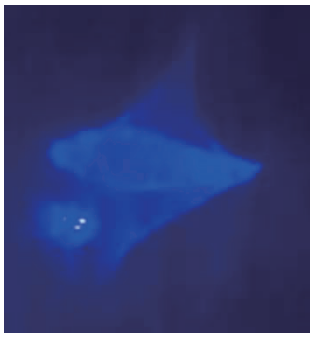
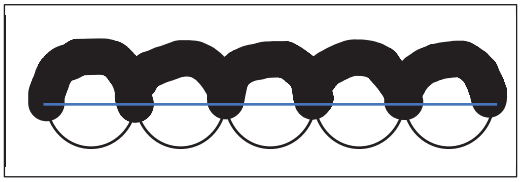


図 28 観察できた光



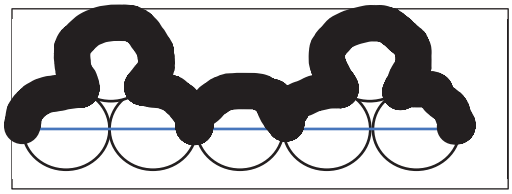


図 29　凸構造のイメージ図（左側 操作 1 の凸構造, 右側 操作 2 の凸構造）※太線が凸構造

実験の考察とガラス球を用いた二つの簡易的な操作から、私たちは図29の右側のイメージ図のような凸構造を発展させて、シャーレに一層目のガラス球を敷き詰めてその上に二層目ガラス球を配置する二層構造の凸構造を製作することを決定した。二層構造にすることで、二層目のガラス球の間隔や配置を調整することができ、多くの種類の凸構造を再現できる。

以上のことから、現段階では凸構造の規則性と像の有無や形状の関係性や、凸構造の配列の規則性の違いと像の有無や形状の関係性について調べるため、シャーレを発泡スチロールで四分割しⅠランダム(大), Ⅱランダム（小）, Ⅲ規則的同心円, Ⅳ規則的格子として二層目のガラス球30個を配列して実験と同じ実験方法，評価方法でこの先実験を行うことを予定している(図30)。（図30の黒点は二層目のガラス球で実際には30個を配列する）また、実験ではレーザーを手動で動かしていたため、動かし方にムラができてしまうという旨のご助言も発表会で先生方から頂いたことからギアなどを用いて自動的にムラなくレーザーを動かせる方法も検討し、今後の実験で行っていく予定である。

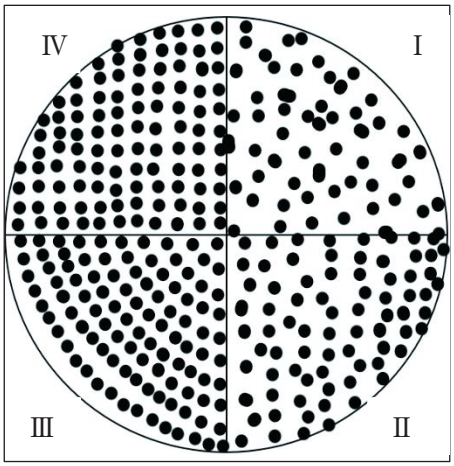


図 30 今後の実験の凸構造

←ⅠとⅡを比較することで凸構造の規則性と像の有無と形状の関係性を、ⅢとⅣを比較することで規則正しい配列の違いと像の有無や形状の関連性について調べることができる。

←ⅠとⅡを比較するにあたり、ビーズのランダムさ（乱雑度）φを定義する。初めにⅣの規則的な配列のガラス球をⅣ内で座標化し$B_k(x_k,y_k)(k=1,2,3\cdots30)$とする。Ⅰ(Ⅱ)のガラス球の配列をそれぞれⅣの座標内に移動させる。その後、移動したⅠ(Ⅱ)のガラス球をⅣのガラス球と対応させ、$B_{k'}(x_{k'},y_{k'})(k'=1,2,3\cdots30)$と座標化する。この時、ⅣとⅠ(Ⅱ)の対応する座標の変位$\Delta l_{x(y)k,k'}=x(y)_{k'}-x(y)_k$をとり、$x$と$y$について分散${\sigma_x}^2,{\sigma_y}^2$をとる。また、この分散の平均値を$\varphi$とする。この操作をⅠとⅡについて行う。

$$ {\sigma_{x(y)}}^2=\frac{1}{30}\sum_{k=1}^{30}\left(\overline{\Delta l_{x(y)}}-\Delta l_{x(y)\,k,k'}\right)^2 \ ,\varphi=\frac{\left({\sigma_x}^2+{\sigma_y}^2\right)}{2} $$

ただし　$\overline{\Delta l_{x(y)}}$は座標の変位の平均値

7 謝辞(Acknowledgements)

- 鹿野先生, シャーレを提供してくださった生物科の篠原先生及び研究に助言、支援してくださった市立千葉高等学校理科職員の皆様

  主な研究の進め方、我々が気づけなかったことの気づきを与えて、有益な助言をいただきました。ありがとうございました。

- 市立千葉高等学校英語職員の斎藤先生

  研究の概要である、要旨の改善と英訳の添削をしてくださり、また、要旨に見合う助言をいただきました。ありがとうございました。

- CCSSや千葉大学理科研究発表会にお越しくださった外部機関の先生方

  私たちが知らない新たな物理の用語及び、実験の改善案や有益な提案や助言をいただきました。ありがとうございました。

- AGC株式会社建築ガラスカスタマーセンター様

  本研究の動機となった、強化ガラス学校用タイプ「スクールテンパ」についての製作過程、また観察された像についての質問等に丁寧にご説明くださいました。ありがとうございました。

8.参考文献(A List of References)

・札幌デザイン株式会社, 2025, 「材料の屈折率《光学》Material IOR(Index of Refraction Values)List」 (2025年2月10日取得, https://a4jp.com/material-ior-list/

・Adachi Yuki, 2023, 「球面レンズの種類」, 光学技術の基礎用語
(2025年2月10日取得, https://www.optics-words.com/kikakogaku/lens_shape.html

・Adachi Yuki, 2024, 「単レンズの焦点距離, 主点, 体積の計算ツール」, 光学技術の基礎用語
(2025年3月2日取得, https://www.optics-words.com/kikakogaku/single_lens_calculation.html

・AGC株式会社, , 「24. 板ガラスの強度と強化ガラス」, AGC Glass Plaza
(2025年6月2日取得, https://www.asahiglassplaza.net/knowledge/rg_knowledge/vol24/

・AGC株式会社, , 「強化ガラス」, AGC Glass Plaza
(2025年6月2日取得, https://www.asahiglassplaza.net/category/toughened/

・志村研究室, 2015, 「光学」
(2025年6月2日取得, https://qopt.iis.u-tokyo.ac.jp/optics/8holographyU.pdf

・竹内淳. 高校数学でわかる光とレンズ. 東京. 講談社. 2016. 270p.

目詰まりによる排水性能低下を改善したグレーチングの研究

理数科　寺下慧周

Abstract: A grating is a cover for a street drain, but sometimes the drainage performance is reduced to the accumulation of leaves and other things such as mud and twigs. A previous study [1] by Makoto ISHIKAWA, Hiroshi GOTOH and Mitsuo TAKEZAWA shows a new structure which improves drainage performance. The purpose of this study is to confirm the effects of the new grating structure examined in the previous study and how the structure is related to drainage performance. The grating cover replicas were created with a 3D-printer and I compared the performances of the original grating covers with the new version.

要　　約：グレーチングは道路の側溝を覆う蓋である。グレーチングは道路の排水に使用されているが，落ち葉や土砂の堆積により目詰まりが起こり，排水性能を損なうことがある。参考文献[1]（石川眞，後藤浩，竹澤三雄らによる）において，中央に向かって窪んだ形状が落ち葉等による影響を軽減できると提案されている。本研究では，参考文献[1]の形状の妥当性を検討するとともに，格子内のバーの形状や間隔を調整し，落ち葉等による影響を軽減できる構造について調べた。方法としては，３Ｄプリンターで作製したモデルを用いて，異物の堆積状況と排水性能を比較した。

序　　論

１．目的

グレーチングは側溝を覆う蓋である。この研究では，落ち葉や土砂による目詰まりが引き起こす排水性能低下を抑えるＬ型側溝におけるグレーチングの形状に注目する。

参考文献[1]において，落ち葉等による影響を軽減できる新たな形状が提案されている。その形状による効果を確認するとともに妥当性を検討することを目的とする。

２．仮説

以下のようにグレーチングの構造を変化させることで，異物の堆積する際の特徴が変わり，その結果から従来型のグレーチングが抱える課題を改善したグレーチングの形状を考えられると仮説立てた。

1）バーの形状・大きさ・間隔を変化させることでグレーチング上面の凹凸の大きさが変化しグレーチングの上を流れる異物の堆積のしやすさが変化する。

2）参考文献[1]では，Ｌ型側溝内の流れが歩道に沿わないような形状にする工夫が好ましいと考え，グレーチングの中央部を窪ませた構造を提案している。中央部を窪ませることで窪み方向へ水が流れＬ型側溝に沿う形で異物が堆積することを防ぐことができると期待されている。

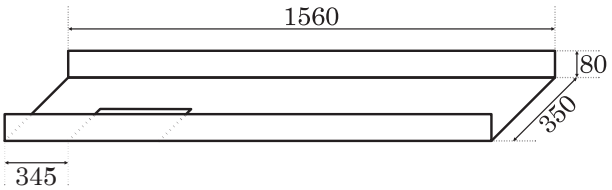
方　　法

３．実験に用いたモデル

Ｌ型側溝におけるグレーチングの上を流れる異物の堆積する際の特徴を調べるために，Ｌ型側溝とグレーチングのモデルを作製した。作製したモデルを用いて水で落ち葉を流す実験を行い，その結果からそれぞれのグレーチングモデルの排水性能を評価した。以下は作製したモデルである。

1）Ｌ型側溝のモデル

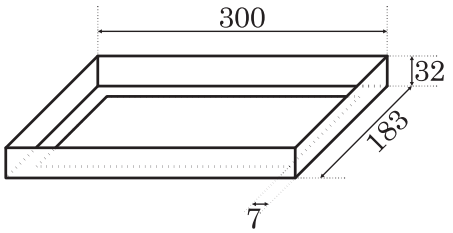
段ボールを用いて，**図－１**のモデルを作成した。作成したモデルにおいて，水を流す実験を行うため，水による変形を考慮して表面をビニールシートで覆った。



図－１　Ｌ型側溝のモデル〔mm〕

2）グレーチングモデル設置用ガイド部品

グレーチングモデルを，段ボールで作製したＬ型側溝のモデルに設置するために，**図－２**に示したガイド部品をアクリル板から作製した。



図－２　ガイド部品〔mm〕

ガイド部品の内側に，グレーチングモデルが入

り，その上を流れた水はグレーチングモデルの穴を通って落ち，ガイド部品の下部空間から下に流れる。

3）グレーチングモデル

グレーチングモデルを，３Ｄプリンターを用いて作製した。使用機材は以下の通りである。

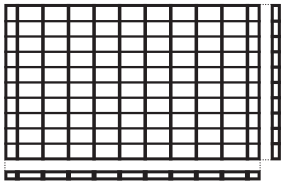
① ３Ｄプリンター
da Vinci mini w+

② ３ＤＣＡＤ
Autodesk Fusion（ver. 2.0.19941）

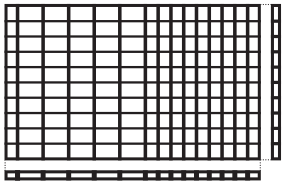
③ スライスソフトウェア
XYZprint（ver. 2.1.1）

④ フィラメント
メーカー純正品（ＰＬＡ樹脂製）

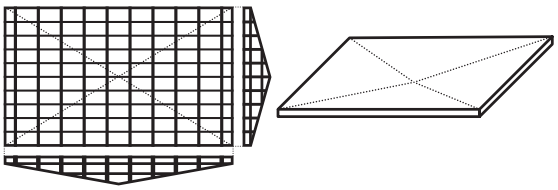
本研究で作成したグレーチングモデルは 3 種類ある。



図－３　従来型



図－４　バー間隔



図－５　窪んだ形状

図－３のグレーチングモデルは，従来型のグレーチングモデルである。一方，**図－４**は従来型のグレーチングにおける，半分区間のバーの間隔を狭めたモデルである。また，**図－５**は参考文献[1]において言及されている中央が窪んだ形状のモデルである。窪みの深さは 2 cm に設定した。

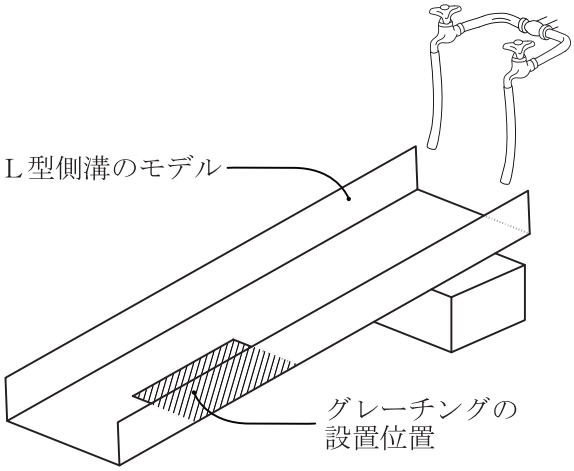
なお，参考文献[3]のグレーチングモデルを参考にして作製した。

３Ｄプリンターの特性上，プリント物表面に小さな凹凸が発生してしまったため，カッターを用いて凹凸を取り除いた。また，最大印刷サイズに合わせて，モデルを 4 分割し，さらに 60 %に縮小して印刷した。

４．実験手順

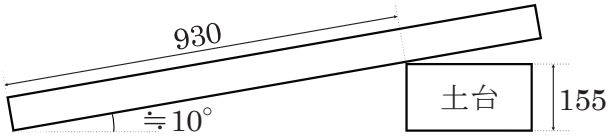
1）モデルの組み立て

作成したそれぞれのモデルを**図－６**のように組み立てた。



図－６　組み立て図

Ｌ型側溝モデルの傾斜角度と，土台の高さ・配置位置は**図－７**の通りである。



図－７　傾斜角度〔mm〕

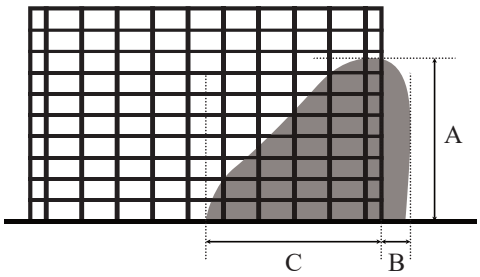
その後，落ち葉をＬ型側溝モデルの上に設置した。設置枚数や設置間隔はそれぞれの実験についての記載を参照。

2）水の放水

Ｌ型側溝モデルの上部から水を水道から放水した。放水は落ち葉の動きが見られなくなるまで続けた。なお，放水量を記録するためにグレーチングモデルの下に目盛り付きの水槽を設置し，時間とともに放水量を記録した。この記録から放水速度も算出した。

3）堆積状態の記録

水を放水した後の，落ち葉の堆積位置を記録した。記録方法は**図－８**に示した A, B, C それぞれの長さを計測し記録した。放水量と放水速度に対応するようにそれぞれの試行ごとの結果を記録した。



図－８　計測した位置

なお，グレーチングの範囲に全く触れておらず，グレーチングの範囲に触れている落ち葉と，落ち葉同士を通じて連なって触れていない落ち葉を余った落ち葉の枚数として同時に記録した。

A, B, C，放水量，放水速度の値の単位はそれぞれ，cm, cm, cm, L, L/sec である。

実　　験

５．実験１−従来型グレーチングにおいて落ち葉が堆積する特徴を調べる。

1）実験条件

グレーチングモデルは**図－３**を用いた。落ち葉は学校周辺で収集した落ち葉を 5 cm の間隔で合計 39 枚設置した。落ち葉は試行毎に水で濡らし水を切った後に並べた。試行回数は 10 回である。

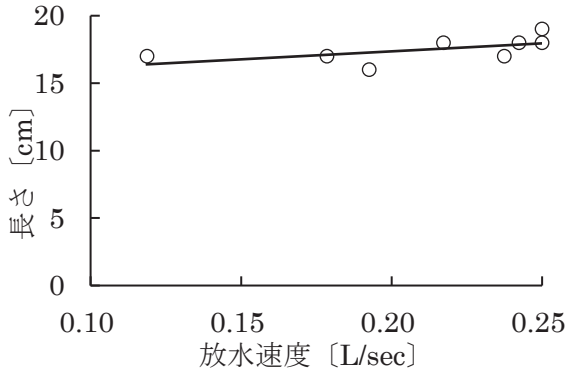
2）実験結果

表－１は計測した A, B, C の長さ，放水量，放水速度，余った落ち葉の枚数をまとめたものである。

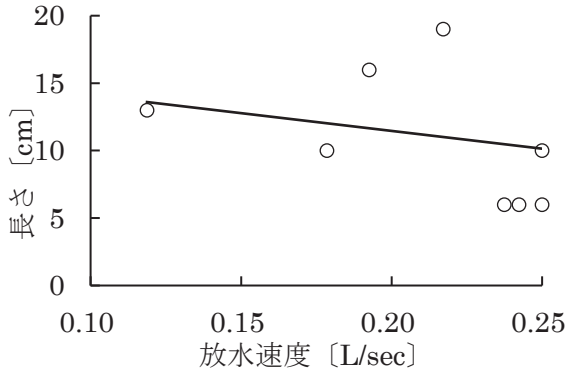
表－１　実験１の結果

試行	A	B	C	放水量	放水速度	余った落ち葉
1	17	13	7	3.8	0.11875	0
2	18	6	14	5.5	0.25000	0
3	19	10	9	3.5	0.25000	0
4	18	19	7	6.3	0.21724	0
5	17	10	10	2.5	0.17857	0
6	19	11	14	6.0	0.31579	0
7	18	6	14	6.3	0.24231	0
8	16	16	17	5.2	0.19259	0
9	17	6	14	3.8	0.23750	0
10	18	10	15	4.0	0.28571	0

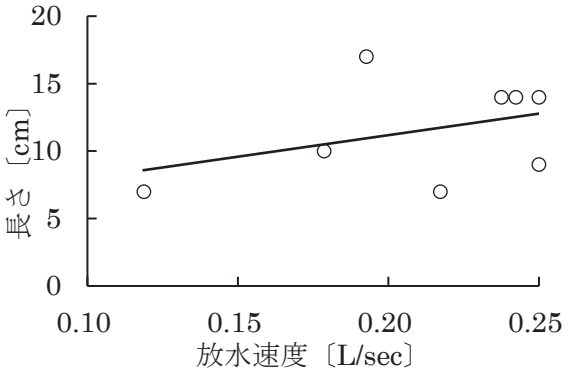
図－９，図－１０，図－１１はそれぞれ A, B, C の長さと放水速度を対応させた散布図である。



図－９　実験１，Ａの長さ



図－１０　実験１，Ｂの長さ



図－１１　実験１，Ｃの長さ

3）結果に対する考察

落ち葉は一定の特徴を持つ配置で堆積し、その特徴としてグレーチングにおける，水が落下し始める部分に多く堆積し、それより先には落ち葉があまり届いておらず堆積した落ち葉によってさらに流れてきた落ち葉がその手前に堆積することがわかった。これは、グレーチングに差し掛かった瞬間にほとんどの水が落下し、落ち葉をそれ以上奥に移動させることがないからである。

参考文献[2)]より、バーの間隔によって落下する水の割合は変化することがわかっている。このことから**図－４**のグレーチングモデルを改善モデルとして考えた。水流がグレーチングに差し掛かった直後の範囲で、バーの間隔を小さくすることで中央付近まで水流を届かせることができ、落ち葉の堆積する位置を中央に近づけることができると考えた。

６．実験２−従来型グレーチングにおいて落ち葉をビニールシートで代用した際の影響を調べる。

1）実験条件

グレーチングモデルは**図－３**を用いた。実験１では実際の落ち葉を用いたが，水に濡れた落ち葉とＬ型側溝の作製に用いたビニールシートの間で発生する摩擦によって多量の水が必要であった。実験で使用する水量を減らすため，落ち葉をビニールシートで置き換えた。なお，ビニールシートは縦 4.4 cm，横 2.5 cm に切りそろえた。この大きさは，実験１で用いた落ち葉の平均の大きさを，グレーチングモデルの縮小率である 60 % に合わせて縮小した大きさである。試行回数は 20 回である。

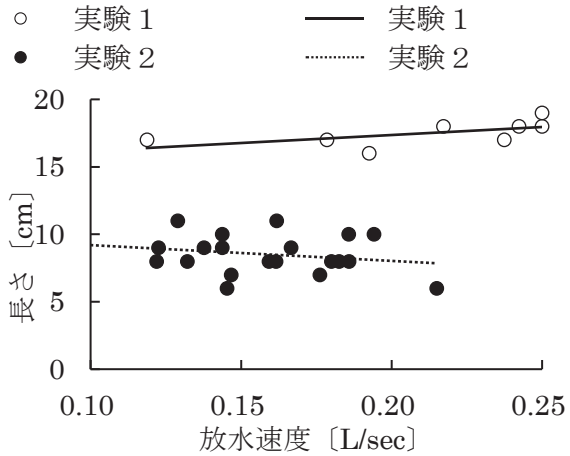
2）実験結果

表－２は計測した A, B, C の長さ，放水量，放水速度，余った落ち葉の枚数をまとめたものである。

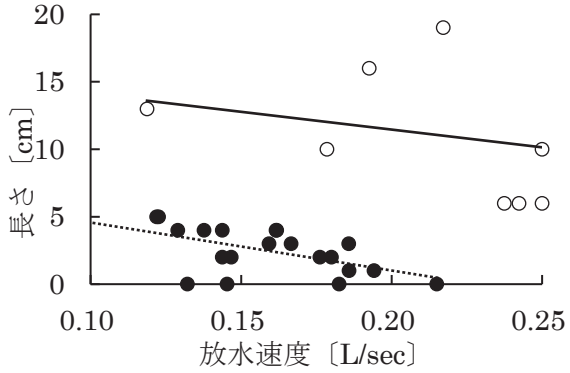
表－２　実験２の結果

試行	A	B	C	放水量	放水速度	余った落ち葉
1	6	0	15	0.9	0.14540	13
2	9	3	14	0.9	0.16667	3
3	8	5	16	0.7	0.12195	5
4	6	0	15	1.4	0.21505	3
5	10	1	15	1.0	0.19417	3
6	7	2	13	0.8	0.17621	6
7	8	0	14	1.3	0.18258	3
8	9	5	16	0.9	0.12262	6
9	8	0	20	0.6	0.13216	7
10	7	2	11	0.7	0.14675	5
11	11	4	9	0.6	0.12903	3
12	8	2	15	1.1	0.18003	4
13	8	4	15	0.8	0.16162	6
14	9	4	13	0.7	0.14374	8
15	8	3	12	0.9	0.15929	4
16	10	3	16	0.6	0.18576	4
17	8	1	15	1.0	0.18587	8
18	10	2	20	0.7	0.14374	4
19	9	4	11	0.8	0.13769	5
20	11	4	13	0.9	0.16187	4

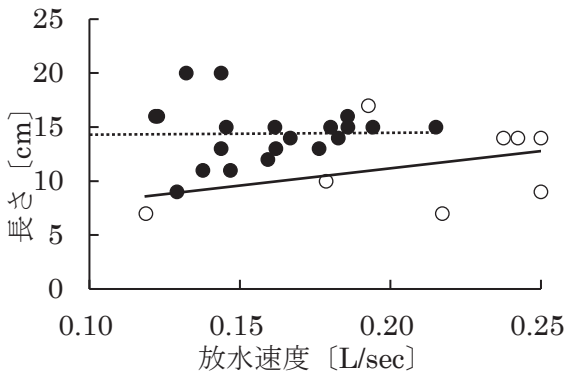
図－１２，図－１３，図－１４はそれぞれA, B, C の長さと放水速度を対応させた散布図である。



図－１２　実験２，Ａの長さ



図－１３　実験２，Ｂの長さ



図－１４　実験２，Ｃの長さ

3）結果に対する考察

A のグラフの近似曲線は実験１と２で特徴が異なっている。一方，B, C のグラフについては，実験１と２で近似曲線の傾きが概ね等しくなっている。

B, C はグレーチング上での水の流れに影響する落ち葉の堆積特徴を表すものであるが、A は水の流れに直接影響するものではない。そのため、本研究においては落ち葉をビニールシートで代用しても実験結果に影響がないとみなせると考える。今後の実験では落ち葉をビニールシートで代用する。

７．実験３−バーの間隔を変化させたグレーチングの効果を調べる。

1）実験条件

実験１の考察で考えた改善モデルである**図－４**を用いて実験を行った。グレーチング以外の条件は実験２と同様である。試行回数は 20 回である。

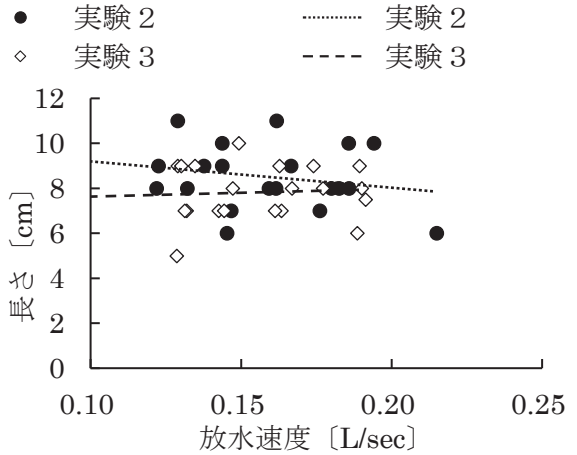
2）実験結果

表－３は計測した A, B, C の長さ，放水量，放水速度，余った落ち葉の枚数をまとめたものである。

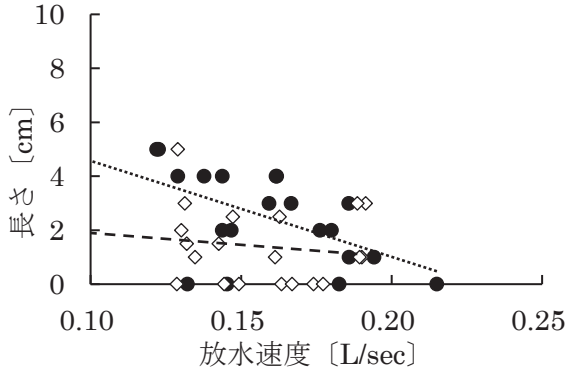
表－３　実験３の結果

試行	A	B	C	放水量	放水速度	余った落ち葉
1	10	0	12	1.1	0.14925	5
2	7.5	3	23	1.2	0.19139	6
3	9	2.5	21	1.2	0.16282	7
4	8	1	19	1.2	0.19017	2
5	7	1.5	13.5	0.9	0.14263	6
6	7	1.5	21	1.0	0.13193	6
7	7	0	12	1.0	0.16340	6
8	9	5	16	0.8	0.12903	5
9	7	3	16	1.3	0.13131	6
10	8	2.5	19	1.6	0.14733	3
11	9	1	12	1.0	0.18939	5
12	9	2	12	0.6	0.13015	7
13	7	1	14	0.7	0.16129	2
14	9	1	13	1.0	0.13477	7
15	9	0	15	0.9	0.17408	4
16	5	0	16	0.8	0.12862	11
17	6	3	18	1.0	0.18868	7
18	7	0	19	0.8	0.14440	15
19	8	0	22	0.7	0.17722	6
20	8	0	17	0.9	0.16698	4

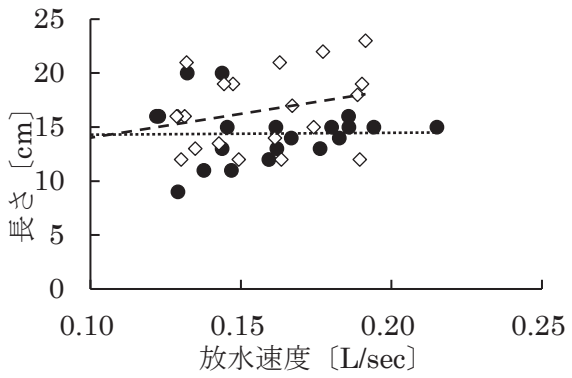
図－１５，図－１６，図－１７はそれぞれA, B, C の長さと放水速度を対応させた散布図である。



図－１５　実験３，Ａの長さ



図－１６　実験３，Ｂの長さ



図－１７　実験３，Ｃの長さ

3）結果に対する考察

図－１５，図－１６より，A, B の長さが**図－３**のグレーチングより**図－４**のグレーチングのほうが短くなったことが分かる。一方 C の長さは**図－４**のグレーチングのほうが長くなったことが分かる。

実験１で期待したとおり，中央部まで流れる水の量が増えたことで，より多くのビニールシートが中央部まで流れたと分かる。中央部に流れるビニールシートが増えたため，A, B の部分に堆積するビニールシートが減ったため A, B の長さが短くなった。また，C の部分により多くのビニールシートが堆積するようになったため長くなった。

堆積する位置を中央部方向に移動させることができたが，グレーチングの端付近の穴を閉塞していることは防げなかった。B の部分に堆積するビニールシートを更に減らすためにより改善されたバーの間隔を見つける必要がある。

８．実験４−中央が窪んだ形状のグレーチングの効果を調べる。

1）実験条件

参考文献[1]において言及されている中央が窪んだ形状のグレーチング**図－５**を用いて実験を行った。グレーチング以外の条件は実験２と同様である。試行回数は 20 回である。

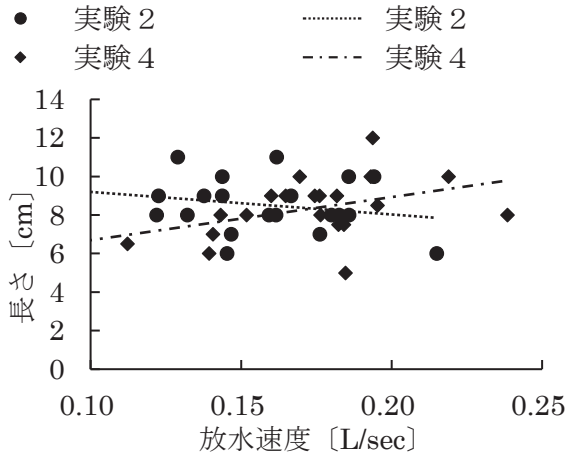
2）実験結果

表－４は計測した A, B, C の長さ，放水量，放水速度，余った落ち葉の枚数をまとめたものである。

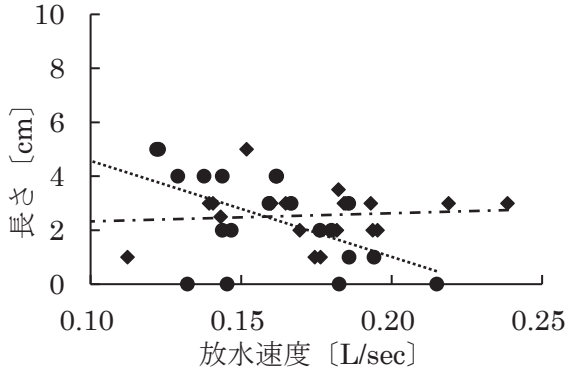
表－４　実験４の結果

試行	A	B	C	放水量	放水速度	余った落ち葉
1	8.5	2	12.5	1.5	0.19531	4
2	8	2.5	16	1.1	0.14323	3
3	8	3	13	1.4	0.23850	7
4	9	3	13	1.5	0.16484	6
5	7.5	3	15	1.7	0.18418	1
6	6	3	20	1.1	0.13942	1
7	7.5	3.5	17	1.2	0.18237	3
8	5	3	12.5	1.5	0.18473	7
9	7	3	9.5	1.4	0.14070	8
10	6.5	1	17	1.2	0.11225	8
11	8	1	13	1.0	0.17637	7
12	9	2	16	1.0	0.17606	7
13	9	1	14	1.0	0.17452	6
14	9	2	13	0.7	0.18182	6
15	9	3	16	0.8	0.16000	3
16	8	5	8	1.3	0.15187	3
17	10	3	14	0.9	0.19313	1
18	10	3	18	1.5	0.21898	1
19	12	2	12	0.8	0.19370	2
20	10	2	14	0.9	0.16949	9

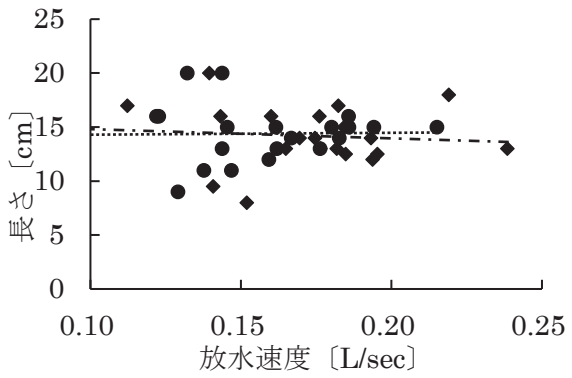
図－１８，図－１９，図－２０はそれぞれA, B, C の長さと放水速度を対応させた散布図である。



図－１８　実験４，Ａの長さ



図－１９　実験４，Ｂの長さ



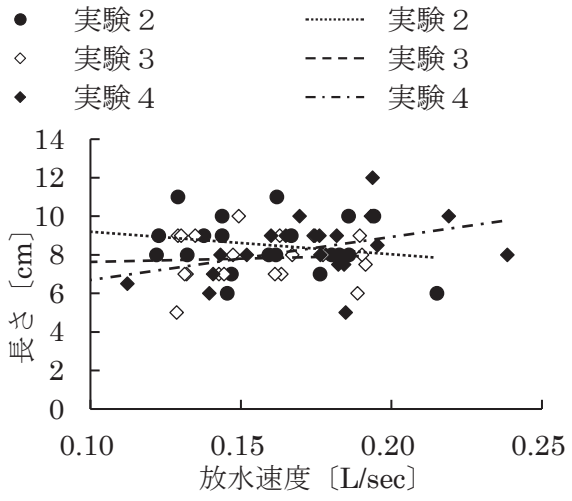
図－２０　実験４，Ｃの長さ

3）結果に対する考察

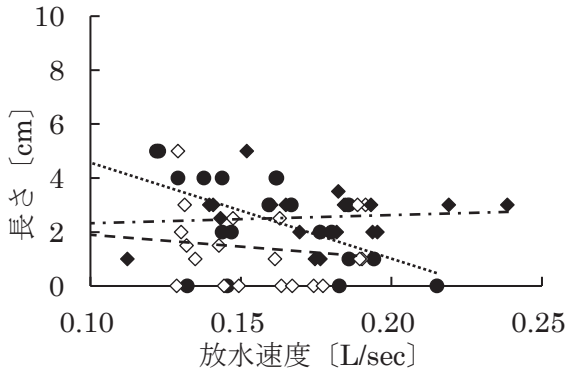
図－１８と図－１９において，近似曲線の傾きが大きく変化していることが分かる。このことから，A, B についてはおおよそ 0.10 L/sec 以上 0.17 L/sec 以下の水量では，長さが短くなった事が分かる。また，図－２０から C についてはおおよそ 0.10 L/sec 以上 0.17 L/sec 以下の水量では，長さが長くなっている事が分かる。

B が短くなり，C が長くなったことから，ビニールシートが堆積する位置は中央方向に移動したと分かる。

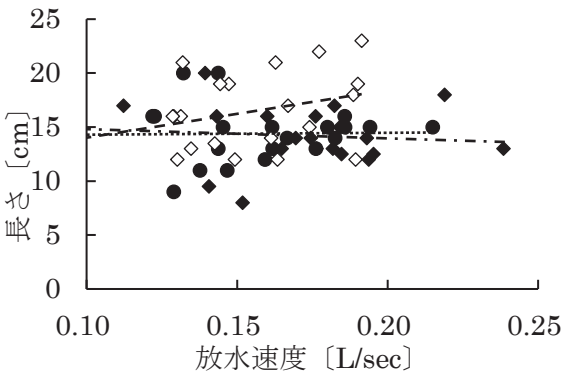
一方で，図－２１，図－２２，図－２３は実験２，３，４のデータの散布図である。



図－２１　実験４，Ａの長さ



図－２２　実験４，Ｂの長さ



図－２３　実験４，Ｃの長さ

実験３と実験４の結果を比較する。B の長さは，実験４より実験３のほうが短くなっていることが分かる。C の長さは，実験４より実験３のほうが長くなっていることが分かる。これらのことから，ビニールシートが堆積する位置は実験４より実験３のほうがより中央方向に移動していることが分かる。

これらの結果と考察から，実験４のグレーチングは実験２のグレーチングより排水性能が上がったと評価できるが，実験３ほどの性能向上は見られなかったと分かる。

今後の展望

実験３では，ビニールシートが堆積する位置を中央方向へ移動でき，閉塞される穴を減らせたと評価できた。しかし，グレーチングの端付近に堆積し，端付近の穴を閉塞してしまうことは解決できていない。バーの間隔の変化によって水の流れる距離・量が変化したため，より改良されたバーの間隔を求める必要がある。また，それを求めるにあたってビニールシートの堆積する位置だけでなく，どれだけの水がグレーチングのどの位置まで届いているか確認することも重要な評価方法である。

実験４では，実験３と同様に性能向上が確認できたが，その程度は実験３に及ばなかった。実験４のグレーチングの形状は，窪みの深さが 2 cm であったが，2 cm 以外の深さにも設定する事ができる。グレーチング上面の凹凸による影響を減らすためには，より大きい深さに設定することが効果的であると考える。

今後，バーの間隔を変化させたモデル，窪みの深さを変化させたモデルをそれぞれ作成し，それぞれの観点において排水性能と性能向上の程度を評価する。

謝　　辞

本研究を進めるにあたり、松岡創一郎先生，田崎賢也先生，藤田雅子先生には多大なるご指導を賜りました。松岡創一郎先生の的確なアドバイスが、私の研究を深める大きな助けとなりました。田崎賢也先生からは，３Ｄプリンターの使用にあたりアドバイスをいただきました。また藤田雅子先生には，本論文の要約英訳を援助していただきました。所属する物理化学部の顧問の先生方には実験などにおいて指導していただきました。それぞれの先生方に心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

１）川口隆尚，佐伯利将，竹谷佳尚，河原能久．路面排水能力を向上させたグレーチングの開発．水工学論文集．2016, vol. 72, no. 4, p. I_313-I_318 .

２）石川眞，後藤浩，竹澤三雄．道路構造の変化に対応した雨水の排除機能に関する考察．下水道協会誌．2019, vol. 56, no. 679, p. 88-96.

３）中部電力株式会社 ．“VG5M44-34” ．中部電力株式会社 ．2015 ．https://www.chubu-net.co.jp/kenzai/size_pdf/vg5m44-34.pdf ，(参照 2025-03-03) .

ダンゴムシの交替性転向反応の優先度と仕組み

理数科２年　船木璃乃　山口凛生　豊藏絵実

1.　要約

Pill bugs have a characteristic called alternate turn response, which causes them to turn response or avoidance behavior, as well as the mechanism behind alternate turn response. In Experiment 1, Kimwipes soaked in either vinegar or water were placed in four directions of a maze, and the movement of pill bugs was observed. In Experiment 2, after the pill bugs avoided the vinegar in Experiment 1 and moved toward the alternately at branching points. This study investigated whether they prioritize alternate turn water, their subsequent left or right turns were observed. As a result, the pill bugs prioritized avoidance and exhibited correct alternate turning behavior after avoiding the stimulus.

ダンゴムシには交替性転向反応という分岐点があると左右交互に進むという性質がある。この研究では交替性転向反応と忌避行動のどちらを優先させるのか、また、交替性転向反応の仕組みについて調べた。実験１では迷路の左右４方向に、酢または水を含ませたキムワイプを起き、ダンゴムシがどこに進むかを調べた。実験２では実験１で酢を忌避してから水の方向に進んだダンゴムシが、その後左右どちらに進むかを調べた。結果としてダンゴムシは忌避を優先させ、忌避した先で正しく交替性転向反応を行った。

2.　序論

・実験に使用したダンゴムシについて

オカダンゴムシ *Armadillidium vulgare*（以下ダンゴムシ）は、オカダンゴムシ科の昆虫で、全長 1-2cm ほどの落ち葉や生物の死骸などを食べる雑食性の昆虫である。体色は黒色から灰色で、光沢がある。ほとんどの場合、図１のようにオスの背中には模様が無く、メスの背中には金色の斑点模様があるが、稀にオスにも金色の模様がある場合がある。交替性転向反応という性質を持ち（渡辺、岩田 1956）、酢を忌避することもわかっている（ダンゴムシの駆除は大量発生する前に 2024 年　3 月 24 更新）。また、今回の実験では、触覚が２本ともあること、歩き方に異常がないこと、の２つの条件を満たしているダンゴムシを雄雌関係なく使用した。

図１：（左）オス　（右）メス

・ダンゴムシの性質について

ダンゴムシは連続した分岐点があると、図２のように２つ目の角では最初に曲がった方向とは反対の方向に交互に進む「交替性転向反応」という性質を持つことが分かっている(渡辺、岩田 1956)。また、酢の匂いを忌避するという性質を持つことも分かっている(ダンゴムシの駆除は大量発生する前に 2024 年 3 月 24 更新)。

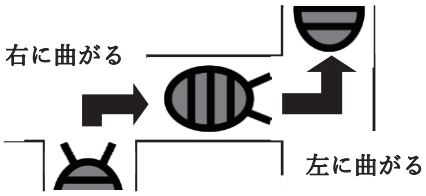


図２：ダンゴムシの交替性転向反応

・飼育方法について

実験に使用したダンゴムシの飼育は（図 3）のようにして行った。

28×17cm のプラスチックケースに土を 2cm ほど、その上に枯葉を 10cm ほど敷き詰め、土の部分を湿らす。その後、プラスチックケースに蓋をする。その後一週間ごとに土全体が湿るくらいに水をかける。

図３：ダンゴムシの飼育状況

3. 研究目的

ダンゴムシが交替性転向反応と忌避のどちらを優先させるのか調べる。また、忌避して進行方向を変えた場合、その後正しく交替性転向反応を行うのか調べること。

4. 実験

・実験１

【方法】

実験１は図４のようにして行った。

①LL、RR、LR、RL にそれぞれキムワイプ(＊)を置く。

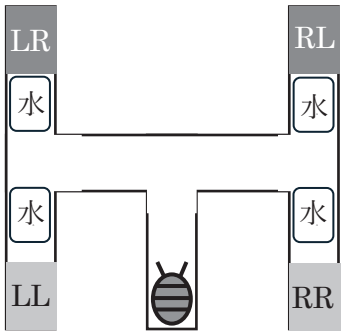
②パターン１では全ての方向のキムワイプに水を含ませ、パターン２では LR と RL にのみ酢を含ませて行い、最終的に 40 匹のダンゴムシを一回ずつ歩かせ、最終的にどの方向に進むのかを観察した。

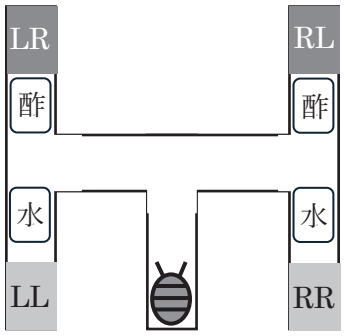
なお、実験中は 15 分ごとに LL、RR、LR、RL それぞれに一滴ずつ液体を追加し、ダンゴムシがキムワイプを踏んだ時点で記録した。

＊キムワイプとは日本製紙クレシア株式会社がキンバリー・クラーク社との連携の下で生産、販売している産業用ワイパーである。

【仮説】

ダンゴムシが最初に右に曲がったら次は左に、最初に左に曲がったら次は右に曲がった場合に正しく交替性転向反応を行ったと言える。そのため、LR、または RL に進んだ場合正しく交替性転向反応を行ったと言える。





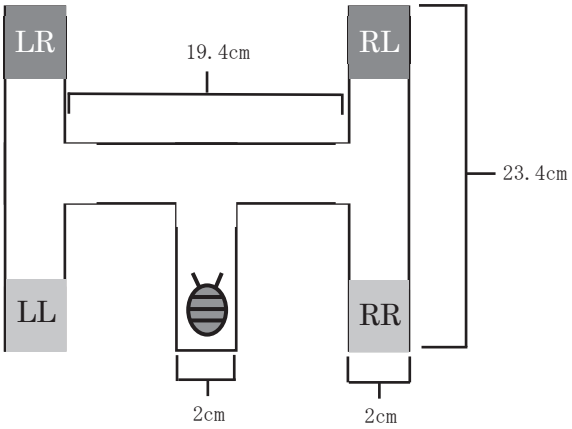


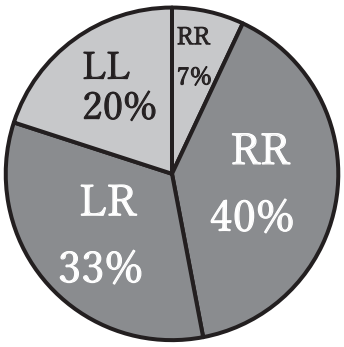
図 4（左）：パターン 1 で使用した通路
図 5（右）：パターン 2 で使用した通路

図 6：実験 1 に使用した通路の大きさ

【結果】

パターン 1 では全体の 73%が正しく交替性転向反応を行い、パターン 2 では正しく交替性転向反応を行った個体は観察されなかった。

また、パターン 2 では交替性転向反応を行おうとしてから、酢の匂いを嗅いで進行方向を変えた個体がほとんどだったが、交替性転向反応を行わずに LL、RR に進んだ個体もいた。また、酢を忌避してスタート地点の方向に戻った場合は記録なしとした。



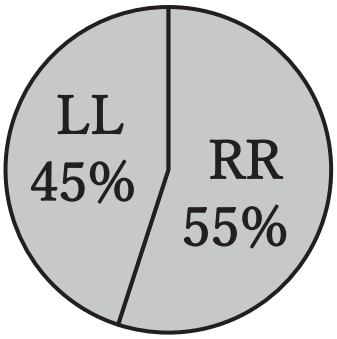


図 7(左)パターン 1 の結果　　図 8（右）パターン 2 の結果
色の濃い部分が交替性転向反応を行った個体の割合を表している。

【考察】

パターン 1 では忌避する物質がなかったため、ダンゴムシは通常通り交替性転向反応を行った。

パターン 2 では忌避する物質を方向転換の先に設置していたため、ダンゴムシは酢を忌避し、通常の交替性転向反応とは違う方向に進んだ。このことから、ダンゴムシは交替性転向反応を行うよりも、忌避する物質を避けることを優先させることが分かった。

・実験 2

【方法】

実験 2 でも実験 1 と同様に、40 匹のダンゴムシを歩かせて進む様子を観察した。実験 1 の経路の LL から LLR と LLL を分岐させ、RR から RRL と RRR を分岐させた経路を使用した。(図 9)変更点は経路のみであり、その他は実験 1 と同様の条件で実験を行った。

【仮説】

ダンゴムシが正しく交替性転向反応を行っていた場合、初めに左に曲がるとその後右に曲がり、酢を忌避して方向転換をして、LLR へ、最初に右に曲がった場合も同様に、最終的に RRL に進むと考えられる。このように、酢を忌避した後、正しく交代性転向反応を行い、LLR または RRL に進む個体が多いと考えた。

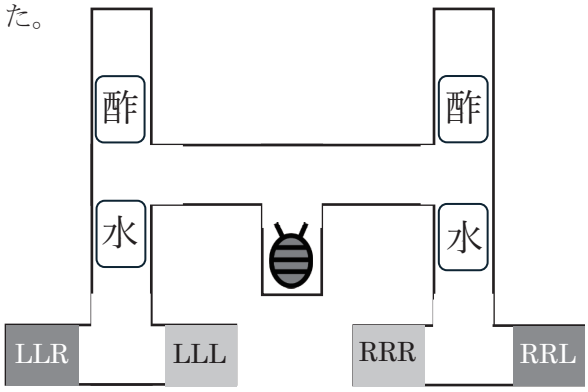


図 9：実験 2 に使用した通路

【結果】

LLR または RRL に進んだ個体が多く見られたことから、ダンゴムシは方向転換を行った先でも正しく交替性転向反応を行っていることがわかった。

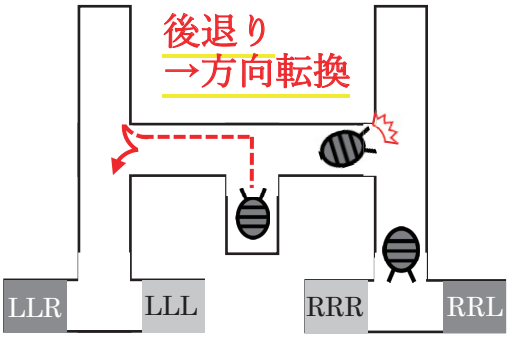


図 10：ダンゴムシの進み方

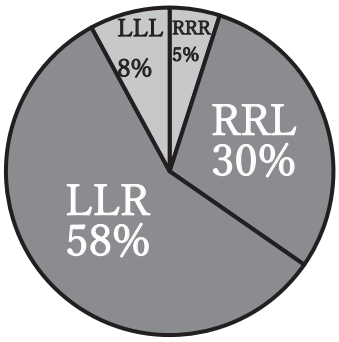


図 11：実験 2 の結果

図 11 の濃い色の部分は正しく交替性転向反応を行ったダンゴムシの割合を表している。

【考察】

ダンゴムシが交替性転向反応を行ったことについての仮説を 2 つ立てた。

仮説 1:ダンゴムシが交替性転向反応を意識的に行っている。

ダンゴムシが交替性転向反応をしたことを自ら認識し、その後正しく交替性転向反応を行っており、ダンゴムシは自分の認識で左右に等しく曲がりながら進んだという説。

仮説 2:ダンゴムシが交替性転向反応を機械的に行っている。

ダンゴムシが交替性転向反応を行ったことを認識しておらず、触覚を使った機械的な交替性転向反応を行っているのではないかと考えた。例えば、左壁に左の触角をつたって進んでいた場合、左壁が途切れると、ダンゴムシは右の触角が目の前の壁に触れるはずである。すると今度は右の触角で右壁をつたい進むことになるので、動作的に見れば交替性転向反応を行ったということになる。

この仮説 2 について、ワラジムシを使った実験では交替性転向反応を触覚によって機械的に行われるという研究があった。そのため、ダンゴムシでも同じことがいえるのではないか。

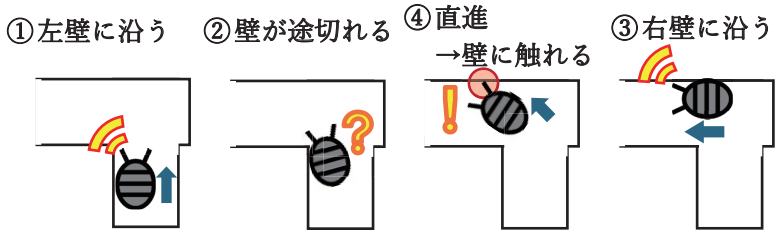


図 12：堀部侑正らによるオレンジクマワラジムシ Porcellio leavis の研究では上のような結果が示されている。

5.　今後の展望

今後の展望としては、実験 2 の酢をさらに遠ざけることを考えている。酢を遠ざけた状態で実験を行い、仮設 1 が正しければ、実験 2 と変わらずに交替性転向反応を行う個体が多く見られると予想される。しかし、仮説 2 が正しければ、ダンゴムシが触角で壁を伝うことで次に曲がる方向が決まるため、左右どちらも等しい確率で起こると予想される。

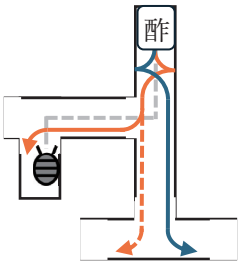


図 13：今後行う実験の方法

6. 参考文献

「ダンゴムシにおける交替性転向反応」
岡山大学理学部生物学教室　　渡辺 宗孝　岩田 清二
https://www.jstage.jst.go.jp/article/janip1944/7/0/7_0_53/_article/-char/ja/

「ワラジムシの交替制転向反応について」
滋賀県立河瀬高等学校 科学部
堀部侑正　堀部晃正　外川大智　村松滉友

ダンゴムシの駆除は大量発生する前に｜植物の食害を防ぐ退治法【実物画像なし】 - くらしのマーケットマガジン https://curama.jp/pest/magazine/1053/（2024 3 月 6 日更新）

クラシック音楽に含まれる 1/f ゆらぎ

理数科　星野天太郎

Abstract

It is said that classical music has the efforts on music therapy. It is from participants experiences of music therapy however, these effects have not been elucidated scientifically but it is from participants experiences of music therapy. So, I researched whether classical music is related to music therapy in terms of a scientific point of view.

In this study, I investigated the comfort provided by music by focusing on 1/f fluctuation and analyzing it. I measured sound pressure and frequency, and compared classical music with different genres music. Also, I researched the differences among composers within classical music.

要約

クラシック音楽は音楽療法において効果があるといわれている。しかし、それは科学的に解明されているわけではなく、経験論からのものである。そのため、クラシック音楽が、1 つの科学的観点から音楽療法につながるかを調べた。

この研究では、1/f ゆらぎに焦点を当てて分析することで、音楽による心地よさを調査した。音楽から、音圧と周波数を計測し、クラシック音楽と別のジャンルの音楽を比較した。また、クラシック音楽の中でも、作曲者による違いを比較した。

研究の動機

幼いころから通っているピアノ教室にて、クラシック音楽を引いていた際、教室の先生にクラシック音楽は人を癒すことができるという旨の話を聞いた。しかし、そのことについて調べてみても科学的根拠が薄かったため、この研究を始めようと考えた。

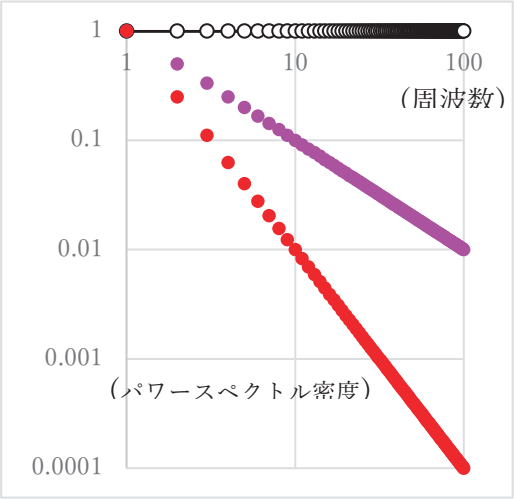
研究の目的

音楽療法において、一つの科学的な観点からその有意性を示す。

仮説

クラシック音楽は 1/ f ゆらぎを多く持っていると考える。

1/ f ゆらぎについて



上から順に

ホワイトノイズ(P=1/f^0)

ピンクノイズ(P=1/f^1＝1/ f ゆらぎ)

レッドノイズ(P=1/f^2)

P=1/f は反比例の図になり、対数グラフで表すことで傾き−1 の直線と表せる。

使用した器具
　アプリケーション　Audacity　Excel
　楽曲 CD
方法
　Audacity にてＤＦＴ(離散フーリエ変換)を行い、周波数(Hz)とそれに対応したdB値を求める。傾き θ は最小二乗法を用いて計算する。また、3 曲の平均からの各楽曲との差の絶対値の平均を取り、それを A と置き、そ散らばり具合の判断基準とする。

式１　　P＝1/ f
P：パワースペクトル密度
f：周波数

式２　P＝10^((L+96.5)/10)
Ｌ：Audcity 内のdB値
　　最大が 0 dBのため補正をする

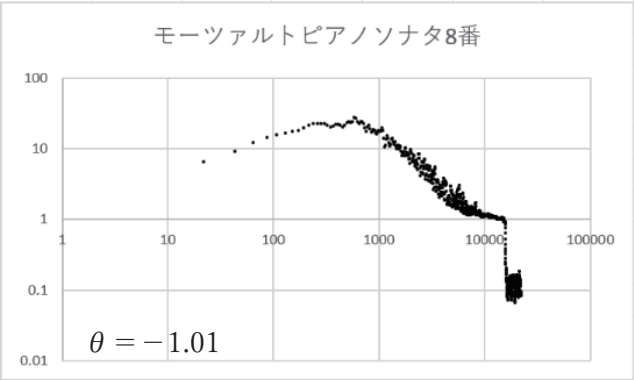
実験１　音楽のジャンルごとに調べる。

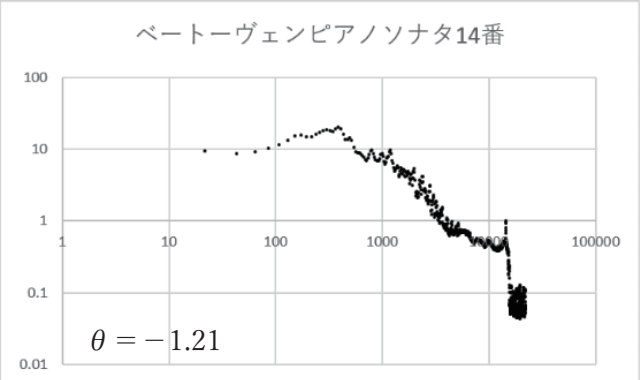
実験の目的　クラシック音楽と別ジャンルの音楽とを比較し、
　　1/ f ゆらぎとの差異を調べる。

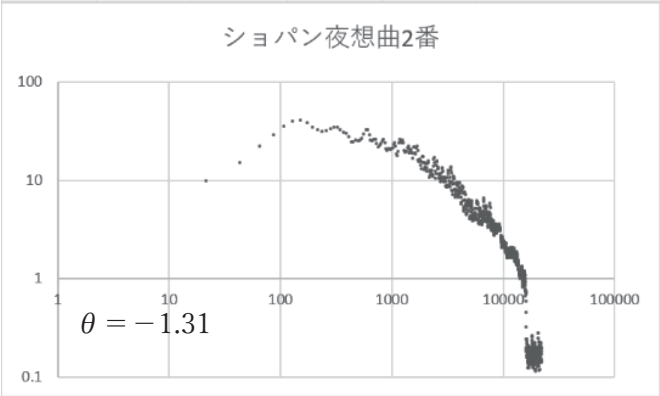
使用した楽曲
クラシック：モーツァルト・ピアノソナタ第 8 番
　　ベートーヴェン・ピアノソナタ第 14 番
　　ショパン・夜想曲第 2 番
　　和楽：平調　越天楽
　　琴曲　六段の調べ
　　時歌三絃独奏曲　古今抄
　　ジャズ：Take the A Train
　　この素晴らしき世界
　　So What
　　ロック：Hey Bulldog
　　We Will Rock You
　　Taxman

結果

　クラシック



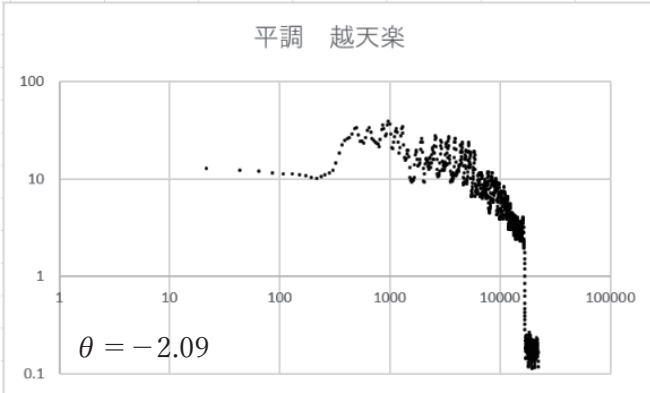


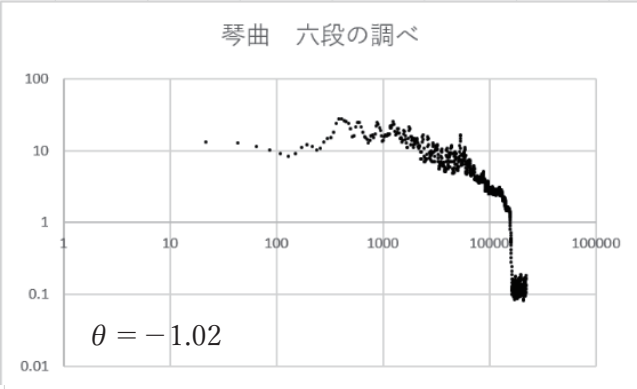


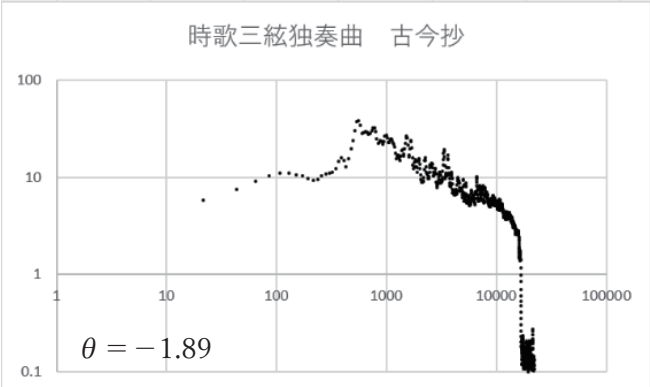
平均 $\theta = -1.18$

各楽曲との差の平均 A＝0.11

和楽



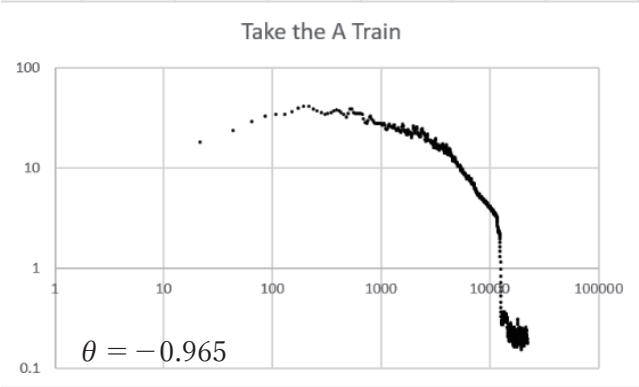


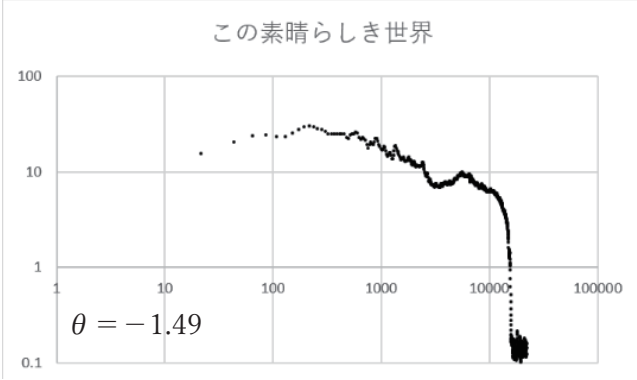


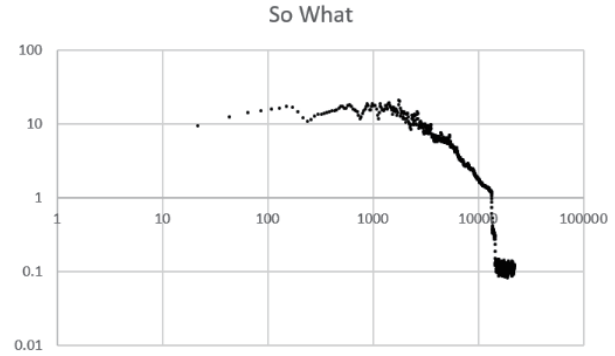
平均 $\theta = -2.00$

各楽曲との差の平均 A＝0.39

ジャズ





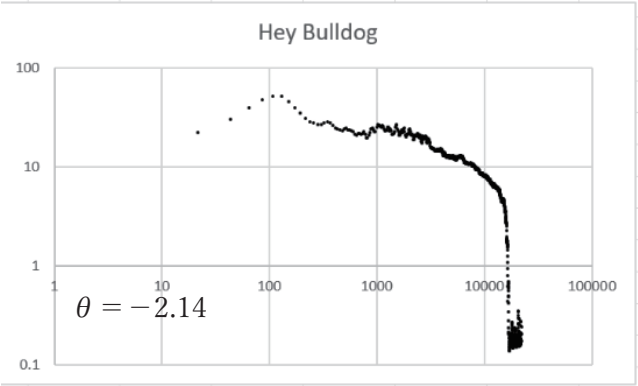


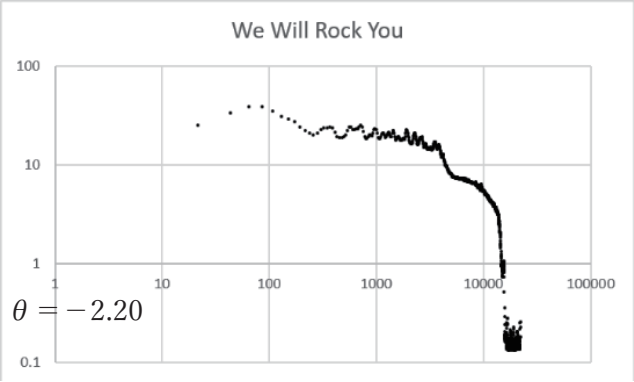
平均 $\theta = -0.929$

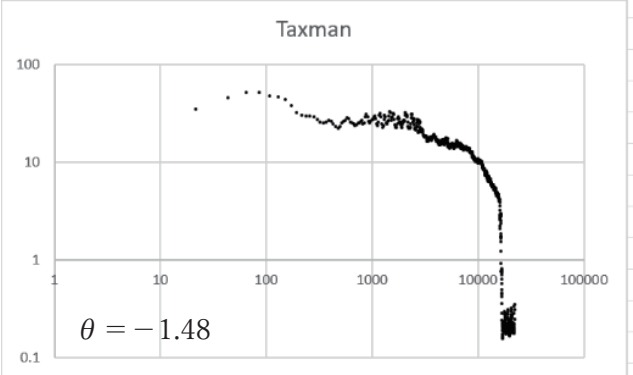
各楽曲との差の平均 A＝0.40

ロック

$\theta = -0.332$







平均 $\theta = -1.94$

各楽曲との差の平均 A＝0.31

結果

平均の θ はクラシックとジャズが−1 に近づいた。クラシック音楽は他の音楽に比べて散らばり具合が小さかった。

考察

和楽やロックは一定したリズムに合わせて強い刻みがあるため 1/ｆ＾２に近づいたと考えられる。クラシックとジャズは近い値を示したが、クラシック音楽はすべての楽曲が−1 に近づいていて散らばりが小さいのに対し、ジャズは 0 と−2 に近づいているものを平均した結果であり、クラシックと比べ散らばりが大きい。そのため、これらのジャンルの中ではクラシック音楽が 1 番 1/ｆゆらぎに近いと考える。

実験２　作曲者ごとに調べる。

実験の目的　クラシック音楽を作曲者ごとに比較し、
1/ｆゆらぎとの差異を調べる。

使用した楽曲

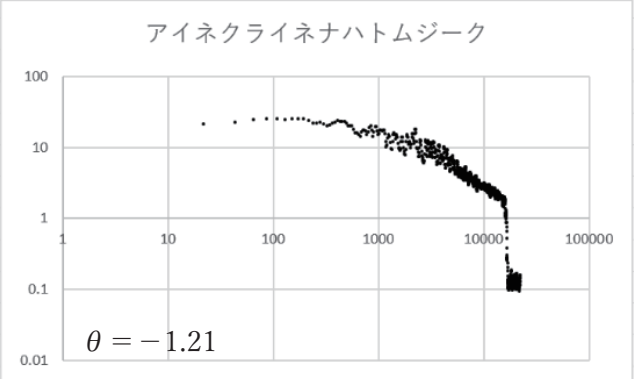
モーツァルト：アイネクライネナハトムジーク
レクイエム
ピアノソナタ第 8 番

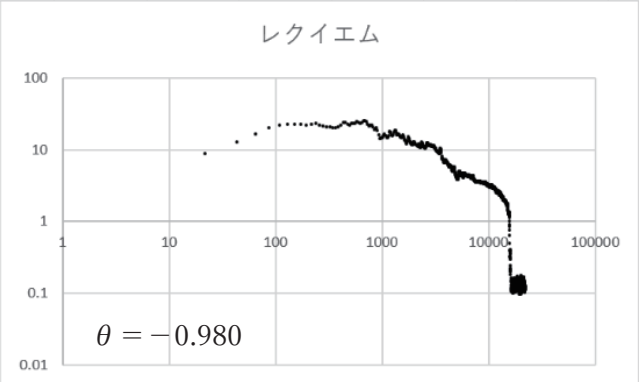
ベートーヴェン：交響曲第 5 番、第 9 番
ピアノソナタ第 14 番

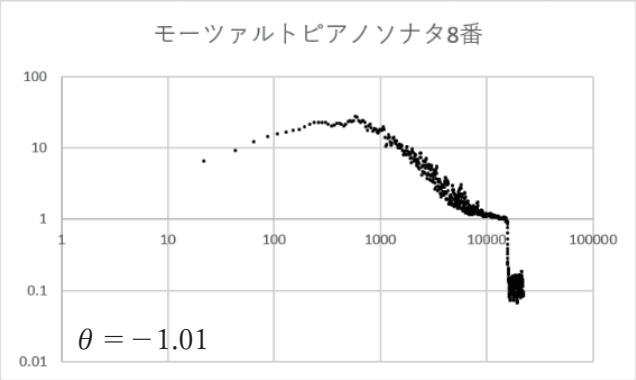
ショパン：夜想曲第 2 番、第 20 番
エチュード・革命

バッハ：G 線上のアリア
主よ、人の望みの喜びよ
メヌエット・ト長調

モーツァルト



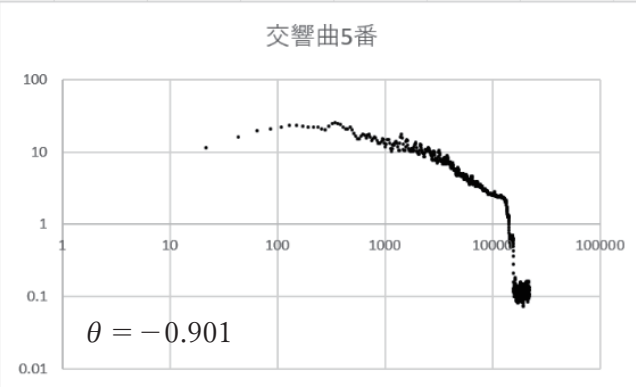


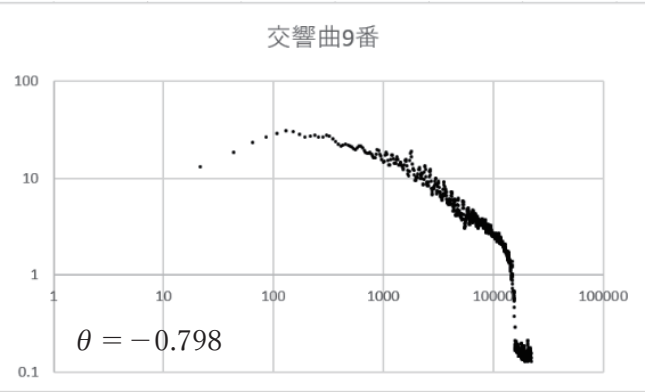


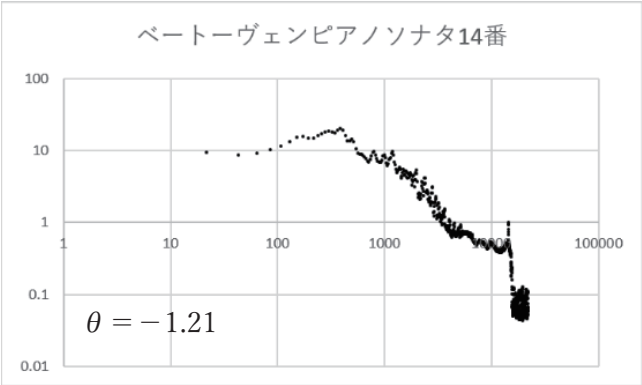
平均 $\theta = -1.07$

各楽曲との差の平均 A＝0.10

ベートーヴェン



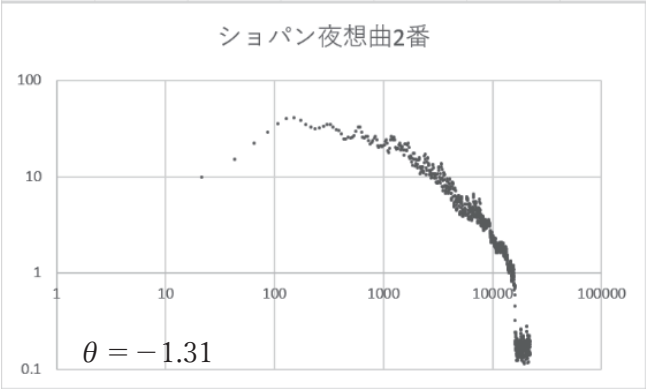


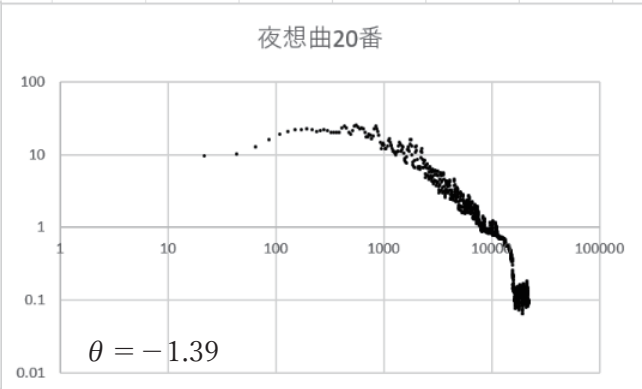


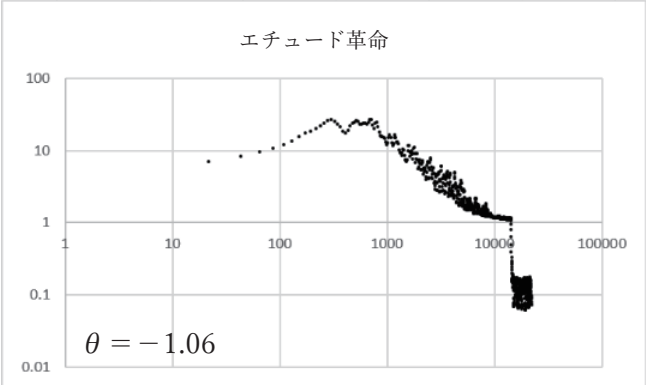
平均 $\theta = -0.970$

各楽曲との差の平均 A＝0.16

ショパン



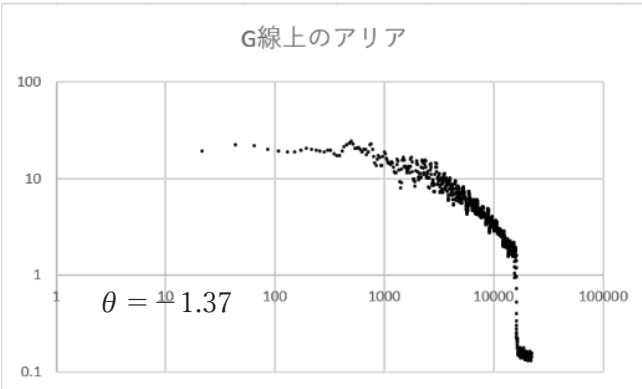


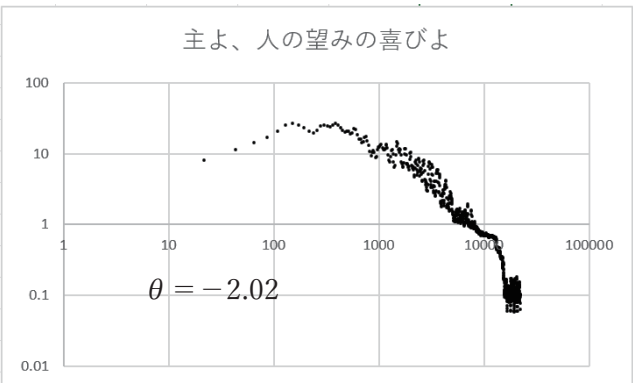


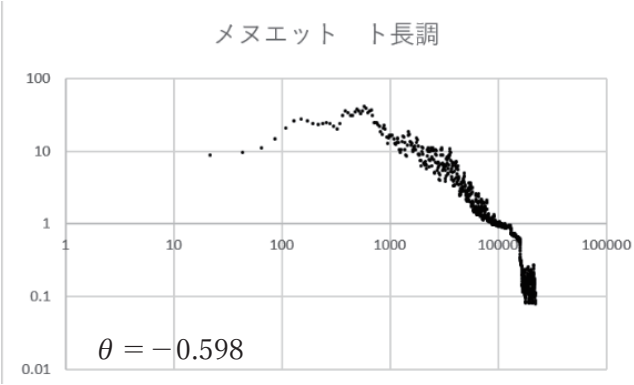
平均 $\theta = -1.25$

各楽曲との差の平均 A＝0.13

バッハ







平均 $\theta = -1.33$

各楽曲との差の平均 A＝0.49

結果

実験 1 に比べて大きな差は見られなかった。平均は全て-1 に近いが、バッハの散らばりがほかの楽曲と比べ大きくなっていた。

考察

クラシック音楽には作曲者に問わず普遍的に 1/ f ゆらぎを持っていると考えられる。特に音楽療法において特に有名なモーツァルトの楽曲は傾きが-1 にかなり近かった。

今後の課題

今回の実験では周波数が 10000～20000Hz に入るとパワーが著しく減少する現象が多くみられた。そのためその部分をトリミングするなどの対策を施して平均を取ることが必要だと感じた。また、バッハやジャズは散らばりが大きくなってしまったため、データ数を増やす必要があると考える。

謝辞

本研究を進めるにあたって、ご指導していただいた数学科長崎先生、CD を提供してくださった音楽科長谷川先生、英文要約にご協力いただいた英語科大槻先生、心から感謝を申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

Audacity: https://audacity.softonic.jp/download
MATLAB dB 振幅変換 :デシベル (dB) を振幅に変換する - MATLAB db2mag (mathworks.com)
Mathway : https://www.mathway.com/ja/Algebra
デシベル値から振幅を求める
https://www.geidai.ac.jp/~marui/julialang/audio/node1.html

グリセリンの酸化経路と生成物の特定

理数科　眞下　舷

1 Abstract

Glycerin is a type of trihydric alcohol. In addition, it combines both secondary and primary alcohol structures. The global market for glycerin continues to expand because it is used to produce various products and is safe to use. Glycerin, which is easy to handle and mass-produce, can be converted into other substances and used. Therefore, further market expansion is expected. According to previous research, oxidation of glycerin has been conducted using various metal catalysts, and it is particularly known that almost all of the resulting substances consist of formic acid. I hypothesized that specific substances could also be produced when glycerin is oxidized by common and widely used oxidizing agents. In this experiment, I oxidized glycerin using inexpensive and easily accessible oxidizing agents. Besides, I used reagents available in high school to identify reaction pathways and the resulting substances without relying on expensive equipment.

要約

グリセリンは三価アルコールの一種である。また、第二級アルコールと第一級アルコールの二つの構造を併せ持っているといえる。グリセリンは様々なものに使用され、安全性も高いため、世界での市場規模は拡大し続けている。その扱いやすく大量生産が容易なグリセリンを、別の物質に作り変え利用することで、さらなる市場規模の拡大が見込まれる。先行研究では、種々の金属触媒を用いて酸化を行い、様々なものが生成されるが、特にギ酸が多く生成されることが知られている。[1)2)]私は一般的に広く用いられている酸化剤でグリセリンを酸化した時に、特定の物質を生成できるのではないかと考えた。本実験では、安価で扱いやすい酸化剤を用いてグリセリンの酸化を行い、生成された物質を高い機材を用いず、高校にある試薬を用いて、反応経路の特定と生成物の特定をした。

2 序論

動機

有機化学の授業で扱っていくアルコールの酸化について興味をもった。その際、三価アルコールの代表例であるグリセリンを酸化させたとき、どの様な反応を示すのかと思い、課題研究のテーマとした。

目的

グリセリンを安価な酸化剤で酸化させたときに、どのような生成物ができるのかを高校の範囲内で行える方法で調べ、生成物を特定する。これにより、酸化経路を特定するとともに、特定の酸化剤で特定の物質が生成できるようにする。

仮説

先行研究で用いられた、金属触媒のような酸化力が弱いものではなく、過マンガン酸カリウムなど酸化力が強いものを用いるため、先行研究より多くのギ酸ができると考えた。しかし、反応時にグリセリンの構造の第二級アルコールにあたる部分は酸化によってギ酸になるのか、炭酸となり分解して二酸化炭素と水になるのか、またはそれ以外の物質が生成されるのではないかと考えた。

3 実験方法及び、結果と考察

実験１

目的

過マンガン酸カリウム水溶液での酸化の可否を調べた。また、生じた生成物について調べた。

方法

塩基性条件下と酸性条件下それぞれで実験を行った。

（塩基性条件下）

1. 試験管にグリセリンを１ mL 加えた。
2. １の試験管に、6.0 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液を５滴加えた。
3. ２の試験管に、0.02 mol/L 過マンガン酸カリウム水溶液を３滴加えた。
4. ３の試験管に、湯浴で 70℃に温めながら反応させ、観察した。
5. 反応が見られなくなったら、同じ試験管で３からの操作を繰り返した。

（酸性条件下）

1. 試験管にグリセリンを１ mL 加えた。
2. １の試験管に、0.3 mol/L 希硫酸を５滴加えた。
3. ２の試験管に、0.02 mol/L 過マンガン酸カリウム水溶液を３滴加えた。
4. ３の試験管に、湯浴で 70℃に温めながら反応させ、観察した。
5. 反応が見られなくなったら、同じ試験管で３からの操作を繰り返した。

結果

塩基性条件下、酸性条件下ではともに無色透明を示すことがあった。しかし、複数回実験を繰り返したところ、塩基性条件下では溶液が黄色く、酸性条件下では、褐色に濁った。

考察

はじめはどちらも無色透明になったことから、どちらの条件下でも関係なく酸化が行われていると考えた。また、複数回実験を繰り返していった結果、どちらも濁ったのは加えた水酸化ナトリウムと希硫酸の量が少ないため、過マンガン酸カリウムの酸化の反応がうまく進まなかったと考えた。

実験２
目的
　過マンガン酸カリウム水溶液を用いたグリセリンの酸化における、水素イオン濃度の維持の必要性を調べた。
方法
1. 試験管にグリセリンを 1 mL 加えた。
2. 同じ試験管に 3 mol/L 希硫酸を 2 mL 加えて、振り混ぜた。
3. 0.02 mol/L 過マンガン酸カリウム水溶液を 1 mL 加えて同じく振り混ぜた。
4. 水浴で 70℃に温めながら反応させ、観察した。
5. 反応が見られなくなったら、同じ試験管に 2 からの操作を繰り返した。

結果
　はじめは試験管を振らなくてもよく混ざり無色になったが、以降実験の操作を繰り返していくと、自然には混ざらず、下層は無色透明の液体、上層は赤紫色透明の液体の二層に分かれるようになった（図１）。これらは軽く振ると混ざったが、実験の操作を４回繰り返した時には、軽く振っても混ざらず、試験管をひっくり返して振るなど強く振ると、混ざりはするが全体的に褐色になり、濁った（図２）。しかし、その中でもうっすらと二層に分かれ、下層のほうが濁りが弱かった。

図１

図２

考察
　二層に分かれたのは生成物と加えていった過マンガン酸カリウム水溶液、希硫酸との極性によるものであると考えた。また、 最終的には褐色で終わっていることから、水素イオン濃度に関係がないと考えた。

　１、2 の実験結果から、酸化していることがわかったが、このときの酸化によってできた生成物を調べるには、酸性条件下にするために加えた希硫酸や多くの水を含んでいるため、簡単な試薬での生成物の特定が難しいと考えた。
　過マンガン酸カリウム水溶液を用いた実験結果から、グリセリンを酸化させるためには、なるべくグリセリンと酸化剤のみで反応できるようにする必要があると考えた。そこで、次の実験では固体で扱いやすく、生成物を調べるうえで生じる副生成物が少ないと考えられる、次亜塩素酸ナトリウム五水和物を使っていくこととした。

実験３

目的

次亜塩素酸ナトリウム五水和物によるグリセリンの酸化の可否、また生じた生成物について調べる。

方法

1. 試験管に次亜塩素酸ナトリウム五水和物を 0.005 mol 加えた。
2. １の試験管にグリセリンを 1 mL 加えた。
3. 氷水で冷やしながら反応させ、観察した。
4. 反応後に試験管内の気体をピペットで取り、石灰水内に気体を出した。

図３

結果

気体を発生させながら反応し、反応が終わると始めは白く濁っていたが、時間がたつと無色透明の液体と白色の固体に分かれた（図３）。また、液体の粘性はグリセリンより下がっていた。手で仰いでにおいを確かめると刺激臭がした。さらに、試験管内の気体を石灰水内に出しても何も起きなかった。

試験管の壁面には液体がついていて、塩化コバルト紙で調べると青色から赤色になった。

考察

グリセリンと反応後の液体の粘度が下がっていることから、一分子におけるヒドロキシ基の数が減ったと考えた。また、刺激臭がしたことと、石灰水に加えても反応が起きなかったことから、反応によって二酸化炭素は発生していないと考えた。さらに、壁面についていた液体は塩化コバルト紙の変色から、水だと考えた。

実験４

目的

次亜塩素酸ナトリウム五水和物を用いたグリセリンの酸化により生じた固体と液体についての反応性や性質を調べた。

方法

以下の実験をそれぞれ別に行った。また、生成物の液体は反応が落ち着いてから上澄み液をとり、固体はエタノールを使って吸引ろ過を用いて分離した。

1. 生成物の液体と固体、グリセリンをそれぞれに水を加え、様子を観察した。
2. 試験管を別に用意し、それぞれに 0.1 mol/L 硝酸銀水溶液を加え、様子を観察した。
3. グリセリンと生成物の液体は直接 pH 試験紙につけ、固体は水に溶けた場合のみ pH 試験紙につけて pH を調べた。

結果

固体と液体の反応性と性質について以下の表にまとめた。

表１　生成物（液体、固体）、グリセリンの反応性と性質

	親水性	$AgNO_3aq$	pH
グリセリン	可溶	反応なし	7
液体	可溶	白色沈殿	3.5
固体	可溶	白色沈殿	6.5

考察

生成物の固体には親水性があり、硝酸銀水溶液と反応した。また、純水に溶かして pH を調べると、中性であったことから、生成物の固体は塩化ナトリウムだと考えた。一方、生成物の液体は水に対して可溶性があり、酸性に偏っていたことから、有機酸が含まれていると考えた。さらに、生成物の液体が硝酸銀水溶液と反応したのは、次亜塩素酸ナトリウム五水和物に含まれる水が液体に溶けていて、生成物の固体を少し溶かしていたと考えた。

実験５
目的
　次亜塩素酸ナトリウム五水和物の量による反応の違いを確認した。
方法
1. 試験管に次亜塩素酸ナトリウム五水和物 0.0025 mol、0.005 mol、0.0075 mol、0.01 mol をそれぞれ加えた。
2. それぞれの試験管にグリセリン 2 mL 加えた。
3. 氷水で冷やしながらそれぞれの反応を観察した。

結果
　次亜塩素酸ナトリウム五水和物を加えた量が多くなればなるほど、反応の激しさが増していき、発熱量も増加した。また、その時加えた量が多くなるほど水蒸気の発生量が増えた。反応が落ち着いてから観察すると加えた量が多くなればなるほど、反応後の全量が増えていった。特に、0.0025 mol と 0.005 mol で大きく体積に差が出ていた。また、加えた量が 0.0075 mol 以降のものは固体の沈澱があった。（図４）

図４　左から 0.010 mol、0.0075 mol、0.0050 mol、0.0025 mol、グリセリンのみ

考察
　加える次亜塩素酸ナトリウム五水和物の量を増やしていくと、反応が激しくなり、発熱したことから、自己の反応熱によって反応が加速していったと考えた。水蒸気の発生量と沈殿物の量に違いがあったことについては、沈殿物であると考えられる塩化ナトリウムの生成量が増えたことに加え、水が反応時に大気に出ていったことで、溶けきらない沈殿物があったからだと考えた。体積に変化があるのはグリセリンの分子数より、生成物の分子数が多くなっているからだと考えた。

実験６
目的

次亜塩素酸ナトリウム五水和物を用いたグリセリンの酸化によって生じた、生成物に含まれる塩素の量を調べた。

塩素原子は次亜塩素酸ナトリウム五水和物のみに含まれているため、反応後に生じる塩化物は次亜塩素酸ナトリウム五水和物に由来すると考えられる。そのため、生成物に含まれる塩素原子の量を調べることで発生する塩素分子の量を調べることができると考えた。

方法

1. 実験５で反応させたものを、十分に時間をおいてからメスフラスコで 100 mL に希釈した。
2. 0.1 mol/L 硝酸銀水溶液を使ってモール法を行った。
3. 結果をグラフにまとめ、比較した。

結果

それぞれの塩素の量は以下のグラフのとおりである。（図５）

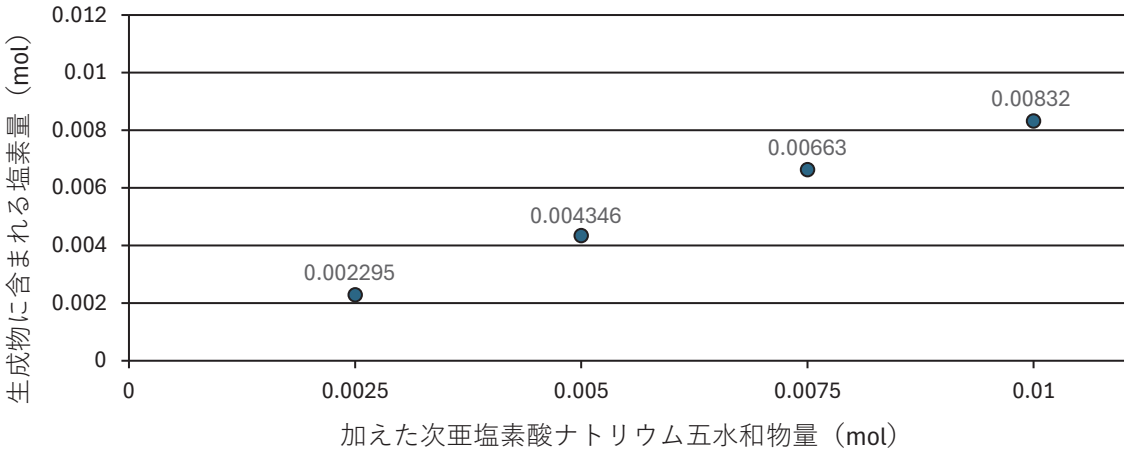


図５　加えた次亜塩素酸ナトリウム五水和物量と生成物に含まれる塩素量

考察

生成物に含まれる塩素量のほうが、はじめに加えた次亜塩素酸ナトリウム五水和物に含まれる塩素量より少ないことから、刺激臭の気体として発生していたのは塩素と考えた。また、次亜塩素酸ナトリウム五水和物に含まれるナトリウム原子と塩素原子は 1:1 で存在していることから、発生した塩素原子と同数のナトリウム原子はイオンとして生成物の有機酸と反応していると考えた。

実験７
目的
　生成物のホルミル基の有無を、トレンス試薬を用いた銀鏡反応で調べた。
方法
1. 0.1 mol/L 硝酸銀水溶液とアンモニア水を混合してトレンス試薬を調製した。
2. 実験５で 100 mL に希釈させた次亜塩素酸ナトリウム五水和物 0.01 mol を加えて反応させたもの 1 mL に含まれる塩素の過剰量（※）のトレンス試薬を加えて観察した。
3. グリセリン 1 mL にもトレンス試薬を加えて観察した。

※ここで示す過剰量とは、実験６の結果における値 0.0832 mol 以上を指す。
結果
　グリセリンを加えても何も起きなかったが、生成物を希釈したものを加えると灰色に濁った。（図６，７）

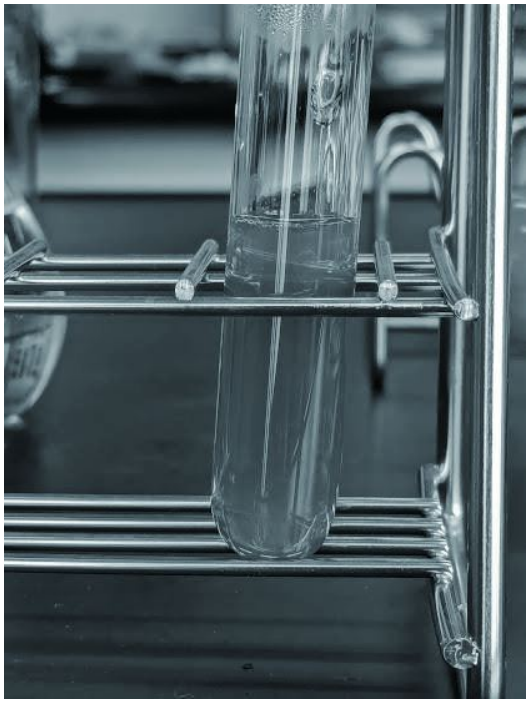


図６　生成物にトレンス試薬を加えたもの。

図７　グリセリンにトレンス試薬を加えたもの。

考察
　銀が生じたことから、生成物にはホルミル基が含まれていると考えた。また、通常の銀鏡反応のようにきれいに銀が析出していないのは、希釈しているため、希釈液に含まれるホルミル基が少ないと考えた。さらに、少し白く濁っているのは生成物に含まれる塩素と反応して塩化銀ができていると考えた。

実験８
目的
生成物のカルボキシ基の有無をハンスディーカー反応[3)]を用いて調べた。
ハンスディーカー反応とはカルボン酸銀塩と臭素のラジカル反応のことである。（図８）

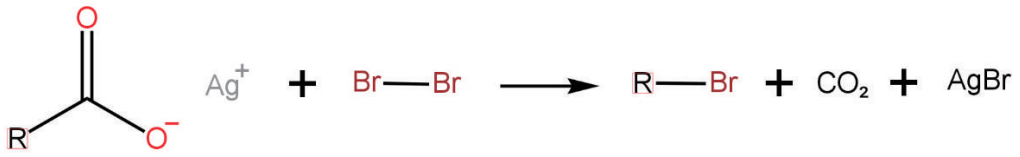


図８

また、カルボン酸ナトリウム塩に硝酸銀を加えてカルボン酸銀塩を作ることで、ハンスディーカー反応を用いてカルボキシ基の有無を調べられると考えた。

方法
1. 生成物を含めた様々な条件での、ハンスディーカー反応の様子を観察した。

条件１
酢酸ナトリウムに硝酸銀水溶液を加えて反応させた後、臭素水を加えた。

条件２
酢酸ナトリウムに硝酸銀水溶液を加えて反応させた後、吸引ろ過を行い、分離した個体に臭素水を加えた。

条件３
塩化カリウムに硝酸銀水溶液を加えて反応させた後、吸引ろ過を行い、分離した個体に臭素水を加えた。

条件４
硝酸ナトリウム水溶液に臭素水を加えた。

条件５
生成物に硝酸銀水溶液を加えて反応させた後、臭素水を加えた。

条件６
生成物に硝酸銀水溶液を加えて反応させた後、吸引ろ過を行い、分離した固体に臭素水を加えた。

結果
条件１
湯で温めながら振り混ぜると、白濁して沈殿物が出て、無色になった。また、時間をおくと沈殿物は黒くなった。

条件２
湯で温めながら振り混ぜると、固体が臭素水に溶けて白濁し、時間をおくと無色になった。また、新たに沈殿物ができ、さらに時間をおくと、沈殿物は黒くなった。

条件３
湯で温めながら振り混ぜても、変化がまったく表れなかった。

条件４
湯で温めながら振り混ぜても、変化がまったく表れなかった。

条件５
湯で温めながら振り混ぜると、白濁して沈殿物が出て、無色になった。また、時間をおくと沈殿物は黒くなった。

条件６
湯で温めながら振り混ぜると、固体の一部が臭素水に溶けて白濁し、時間をおくと色が薄くなった。また、新たに沈殿物ができ、時間をおくと、新たにできた沈殿物は黒くなった。

反応の有無を、わかりやすくしたものが以下の表である。（表２）

表２　それぞれの条件における反応の様子

	加える物質				反応の様子	追加の操作	ハンスディーカー反応の様子
条件１	CH_3COONa	+	$AgNO_3$	→	沈殿物 (CH_3COOAg)		無色 新たな沈殿物
条件２	CH_3COONa	+	$AgNO_3$	→	沈殿物 (CH_3COOAg)	吸引ろ過	無色 新たな沈殿物
条件３	KCl	+	$AgNO_3$	→	沈殿物 (AgCl)	吸引ろ過	黄色
条件４	$NaNO_3aq$			→	反応なし		黄色
条件５	生成物	+	$AgNO_3$	→	沈殿物		無色 新たな沈殿物
条件６	生成物	+	$AgNO_3$	→	沈殿物	吸引ろ過	淡い黄色 新たな沈殿物

考察

生成物にはカルボキシ基があると考えた。また、塩化ナトリウムが液体にも少し溶けていると考えた。さらに、硝酸銀と反応し、ハンスディーカー反応を示したことから、生成物には、カルボン酸ナトリウム塩があると考えた。

4 今後の課題

これまでの実験から、生成物が持つ構造の指標を立てることができた。この情報をもとに、生成物の構造式が考えることができるため、TLC などを用いて、生成物の同定を行っていきたいと考えている。また、過マンガン酸カリウムを用いた酸化において、これまでの結果をもとにもう一度確かめてみようと考えている。

5 謝辞

本研究を進めるにあたり、藤野裕樹先生には、担当として実験の相談であったり、ポスターや論文の添削であったりと終始熱心なご指導、ご助力を頂きました。心から感謝いたします。物理化学部の先生方、並びに化学科の先生方には、実験を行う際、終始見守ってくださり、大変お世話になりました。お礼申し上げます。また、英語の要旨を作成する際、温かいご助言を頂いた坂巻諒一先生にもお力添えを頂きました。感謝申し上げます。

6 参考文献

1) 多湖輝興、中坂佑太、増田隆夫、吉川琢也、藤墳大裕。 酸化鉄触媒によるグリセリンからの有用化学物質直接合成。2017
2) 中村文香、吉川琢也、船井啓、多湖輝興、増田隆夫。金属酸化物を添加した酸化鉄触媒によるグリセリンからの有用化学物質合成。2010
3) Hunsdiecker reaction. Organic Chemistry Portal. https://www.organic-chemistry.org/namedreactions/hunsdiecker-reaction.shtm

令和7年度

理数科
課題研究論文集