

**令和6年度
SSH サイエンス研究会
生徒研究論文集**



**国立大学法人奈良国立大学機構
奈良女子大学附属中等教育学校**

2024年度
スーパーサイエンスハイスクール
サイエンス研究会
研究論文集

奈良女子大学附属中等教育学校

2025年4月1日

2024年度 奈良女子大学附属中等教育学校

サイエンス研究会 研究論文集

目次

刊行にあたって	1
2024年度教育課程表	2
第4期SSH概念図	3
研究論文	
生物班	
海水温上昇によるタコクラゲへの影響	5
多様性でアレルギーを克服！～アレルギー患者急増の原因に迫る～	8
奈良県生駒市におけるツバメの雌雄別給餌行動の観察と給餌内容の解析	16
絶滅寸前種ヒメタイコウチの飼育方法に関する研究 ～幼虫の餌をはじめとした適切な飼育環境の調査について～	22
情報班	
生物模倣的自己注意機構を導入したスパイクニューラルネットワークによる 神経動態予測モデルの提案	25
みまもりコンパス - 認知症高齢者のための発見共有システム	35
物理班	
様々な段差を越える跳躍歩行ロボット	41
難聴の人も楽しめるピアノSpotの開発	45
クリスマスピラミッドの設計要件	49
化学班	
サリチルアルデヒド誘導体を利用する水中での有機合成反応	53
アリールアルキン修飾電子欠乏性アルケン分子内環化反応による 含酸素5, 6員環合成	57
二核ビスマス錯体の合成とRNA分解活性の評価 －大阪大学産業科学研究所創薬研究体験報告－	61
基盤探究Ⅱ 科学探究類型	
キューティクルの観察について	64
マツタケの人工栽培	67
水に溶かす溶質と水溶液の保温性の関係	72
数式のイメージ化で理解を助ける	76

「SSH サイエンス研究会 生徒研究論文集」の刊行に当たって

～サイエンス研究会が担ってきた科学技術人材の育成～

先日、本校 2009 年度卒業の永嶋知紘さんが来校された。彼は米スタンフォード大学教育大学院卒業後、現在、独ザールランド大学でアシスタントプロフェッサーとして活躍されており、数か月にかけてエスノグラフィ型協働研究を本校と一緒にやりたいとの提案でした。内容的には、今後ますます増える AI を用いた学習において、現場密着型研究を通して実際に使える AI 最先端ツールの共同開発、実施の取組を先導していくといったものです。

本校は SSH の指定を受けて「第Ⅳ期の最終年」となる 5 年目を迎えました。トータルで 20 年目となります。この 20 年間、永嶋さんのような世界で活躍する多くのすぐれた科学技術人材を輩出してきました。サイエンス研究会はその核となる役割を担ってまいりました。

今、学校教育は大きな変革期を迎えております。先行きが不透明な時代を迎え、知識・技能の習得に加え、多様な他者との「共創」の中で、自ら思考し、判断する力、主体的に学ぶ力を育成することを通し、社会において課題を解決する能力を身につけることが求められております。

サイエンス研究会をはじめとする本校の探究活動は、文系理系を問わずにすべての生徒に科学技術にかかわる素養を基盤とした幅広い教養を涵養し、また協働的な課題解決につながる能力を育む、6 年一貫のカリキュラムを作り上げ、また実証的にその成果検証を進めてまいりました。

これからは、次のステップとして、これまで積み上げてきた実績や研究開発の成果を積極的に発信・普及をしていこうと考えております。これまで培ってきたネットワークを大切に、双方向型の探究活動が進められればと考えております。

最後に、サイエンス研究会の指導に当たっていただいた、多くの先生方や研究者の皆様には厚く御礼を申し上げ、今後もサイエンス研究会の活動がさらに飛躍し、発展しますようご協力のほど、よろしくお願い申し上げます。

令和 7 年 3 月

奈良女子大学附属中等教育学校

校長 片岡 達郎

2024(令和6)年度 教育課程表案(50分換算)

2024.4.1

50分換算で表記

*必修選択 △自由選択 ○総合的な学習(探究)の時間 ☆学校設定科目

学年 時間	1年	2年	3年	4年	5年	6年																		
	共通	共通	共通	共通	共通	理系	文系	PICASO理系	PICASO文系															
1	国語(4)	国語(4)	国語総合1 (2)	現代の国語 (2)	論理国語(2)	論理国語 (2)	論理国語(2)	☆実践探究 (2)	論理国語(2)															
2			国語総合2 (2)	言語文化 (2)	古典探究(2)	古典探究(2)	古典探究(4)	古典探究(2)	古典探究(4)															
3										Topic Studies I (4)	Topic Studies II (3)	Topic Studies III (4)	Topic Studies IV (4)	Topic Studies IV (4)	☆文学探究(1)									
4																Writing II(1)	Writing III (2)	Writing IV(2)	Writing IV(2)	Topic Studies IV (4)				
5	英語(4)	英語(4)	理科総合 (3)	生物入門 (2)	代数・幾何II (2)	解析III(5) ☆数学演習(2) △(2) or (5)	体育(3)	解析III(5) ☆数学演習(2) △(2) or (5)	体育(3)															
6										数学(5)	数学(5)	理科総合 (3)	代数・幾何I (2)	解析II (4)	体育(3)	体育(3)	体育(3)							
7																		Writing I(1)	解析I (2)	Writing III (2)	Writing IV(2)	Topic Studies IV (4)	Writing IV(2)	Topic Studies IV (4)
8																								
9	理科(4)	理科(4)	化学入門(1)	音楽I 美術I 工芸I 書道I *(2)	化学基礎 (2)	代数・幾何III △(2)	☆数学演習 △(2)	☆実践探究 (2)																
10									社会(4)	社会(4)	☆地歴総合I (1)	情報I(2)	体育(3)	化学 △(3)	☆化学演習 △(2)	☆化学演習 △(2)								
11																	☆日本史特講 ☆世界史特講 ☆地理特講 △(1)	代数・幾何III △(2)	☆数学演習 △(2)	☆実践探究 (2)				
12																					地理探究 世界史探究 日本史探究 倫理 政治・経済△(3)	化学 △(3)	☆化学演習 △(2)	
13	音楽(1)	美術(1)	音楽(1)	家庭基礎(2)	公共 (2)	物理 生物 △(3)	☆生物演習 ☆物理演習 △(2)	物理 生物 △(3)	☆生物演習 ☆物理演習 △(2)															
14										保健・体育(3)	保健・体育(3)	保健(2)	地理探究 日本史探究 世界史探究 *(2)	地理探究 日本史探究 世界史探究 倫理 政治・経済*(3)	地理探究 日本史探究 世界史探究 *(3)	地理探究 日本史探究 世界史探究 *(3)								
15																	○探究入門I(1)	○探究入門II(1)	☆統計入門(1)	物理 生物 地理探究 世界史探究 日本史探究 *(2)	地理探究 日本史探究 世界史探究 倫理 政治・経済*(3)	地理探究 日本史探究 世界史探究 *(3)		
16																							☆自己探究(1)	☆自己探究(1)
17	道徳(1)	道徳(1)	道徳(1)	○基盤探究I (2)	○基盤探究II(2) (科学探究/社会貢献/コ ロキウム/PICASO)	○基盤探究III(科学探究/社会貢献) ☆数学特講 ☆英語探究 音楽II 美術II △(2)	○基盤探究III(PICASO) (2)																	
18	HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)															
短期集中	○探究入門I	○探究入門II	OCG	OAG	OAG																			

科学技術イノベーションにより未来社会を創出する 「飛躍知」を育むカリキュラム開発

「飛躍知」を備えた科学技術イノベーターの育成

自然科学の学識と「共創力」を基盤として、高度な多分野知識を駆使し、幅広い人々の双方向的かつ互恵的な協力関係を築き、未来社会を創出する市民リーダー



「飛躍知」を育む6年一貫カリキュラム

多様な価値観を有する他者との協働や社会との連携により、従前からの「科学技術」の枠組みに安住しない自由な視点を獲得し、新たな知見や価値、発想を生み出す能力

教科授業の探究化

飛躍知

探究活動の深化

評価研究 リフレクションシート 学習意欲アンケート 在校生インタビュー 卒業生追跡調査 先進的な視野の育成 興味関心意欲の育成 基礎・基本の徹底	教科融合型 多教科融合授業 Science Issues 理科・数学の融合授業 教科横断型の課題 異教科間の連携授業	5・6年 発想の飛躍	実践探究 基盤探究Ⅲ 大学教員の指導のもと 個別課題を深く探究する 基盤探究Ⅱ 4つの類型に分かれ、 個別探究を深化させる	共創型研究(飛躍期)	研究指導 活動評価 高大接続文理統合 探究プログラム 「PICASO」 異学年合同 探究成果発表会 理系女子育成 発表・交流会
	統計入門 探究活動に必要な 統計に関する授業	3・4年 手法の飛躍	基盤探究Ⅰ 個別課題について、 1年間にわたり探究する 探究基礎 共通課題にグループで取り 組み探究過程を体得する	共創型探究(充実期)	
	探究スキル型 理数カリキュラム の構築 教科内探究型授業 教科融合型の導入授業 学習内容の再配置 学習時期の検討	1・2年 視点の飛躍	探究入門Ⅰ・Ⅱ 地域の素材を通じて 基礎スキルを身に付ける 資料の読解、文章表現、 データ整理、 プログラミング、 プレゼンテーション	共創型学習(基礎期)	
	教科探究型				

研 究 論 文

海水温上昇によるタコクラゲへの影響

1年B組 久保いぶき

指導教員 松原 俊二

1. 概要

現在、海水温上昇によって様々な生物の生態に大きな影響を与えられている。そこで褐虫藻と共生しているタコクラゲにどのような影響が及ぼされるのかを調べるために研究を行った。その結果、海水温が低温であるよりも高温であるほうがタコクラゲに悪影響が及ぼされることが分かった。

キーワード 海水温上昇 タコクラゲ クラゲ 褐虫藻

2. 背景

小学生の頃、タコクラゲについて研究してから毎年採集・飼育を続けている。温室効果ガスである二酸化炭素の増加などが引き起こす海水温上昇で、タコクラゲも影響を受けるのだろうかと思い、この研究を始めた。

3. タコクラゲとは

刺胞動物門・鉢虫綱・根口クラゲ目

白い斑点が特徴的な夏のクラゲ。付属器と口腕が8本ある。傘の直径は成体で



図1 タコクラゲ

10cmほど。オレンジや茶色、青色をしている。

タコクラゲの体内には褐虫藻という藻が共生しており、それが光合成を行うことで生成した栄養をタコクラゲに与えている。タコクラゲはこの与えてもらった栄養と動物性プランクトンを食べることで得た栄養で生きている。



図2 タコクラゲの部位のモデル

4. 実験方法

和歌山県沿岸でタコクラゲと海水を採集して全く同じ水槽を3つ用意し、全てにフィルターとエアを設置した。

A水槽は冷却ファンを、B水槽は何も設置せず、C水槽はヒーターを設置して海水温をA25°C、B30°C、C35°Cに設定した。そして各水槽で5匹ずつ、9/14から10/14までの31日間飼育した。

全てのタコクラゲの個体判別ができるようにして、傘の直径と1秒あたりの拍動回数を個体別に、水槽内の藻の生え具合を水槽別に毎日観察した。

5. 予想

A25°Cで飼育しているタコクラゲが1番早く消滅するのではないかと考えたから。なぜなら、タコクラゲは夏のクラゲで低い海水温には慣れていないと考えたから。

C35°Cの水槽が1番藻は生えやすいのではないかと考えたから。気温が高いと植物が多いのと同じように周りの温度が高い方が生えやすいと考えたから。

6. 結果

6-1 傘の直径

・A25°C

全個体が22~30日間しか生きることが

できなかった。実験開始から 11 日間は成長している個体が多いが、それ以降は傘の直径が徐々に小さくなっている。(図 3)

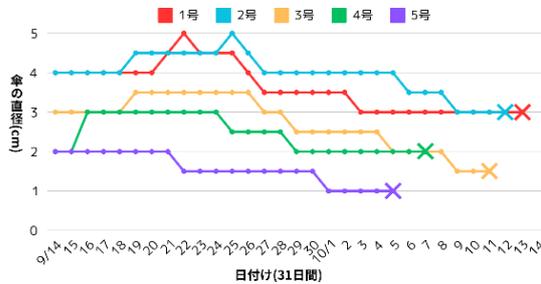


図 3. 25°Cにおける各個体の傘の直径

・ B30°C

大きさが急激に変化する個体は少なく、全個体が 31 日間以上生きた。何度も傘の直径の長さの順位が入れ替わったり並んだりしている。(図 4)

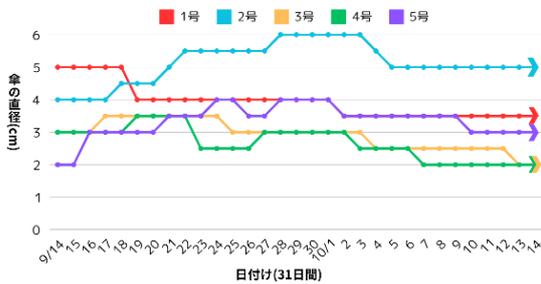


図 4. 30°Cにおける各個体の傘の直径

・ C35°C

全個体が 7~11 日間しか生きられなかった。実験開始の 4 日後頃から全個体の傘の直径が急激に小さくなっている。(図 5)

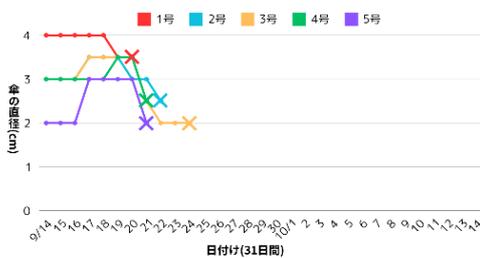


図 5. 35°Cにおける各個体の傘の直径

6-2 1秒あたりの拍動回数

どの海水温でも、傘が大きくなるまたは弱ると拍動の速さと拍動回数は落ちた。

6-3 水槽内の藻

実験開始から 5 日後にはすべての水槽に藻が生えだした。生えだした当初の藻の量は B30°C > A25°C > C35°C だったが、生えだした 5 日後には A25°C > C35°C > B30°C になった。

水槽に生えた藻を顕微鏡で観察すると、生えていた藻はタコクラゲの体内から出てきた褐虫藻であると分かった。A25°Cの藻は原形があるが静止しており、B30°Cの藻はウジャウジャと動いていた。しかしC35°Cは丸い原形がなく溶けていた。(図 6)

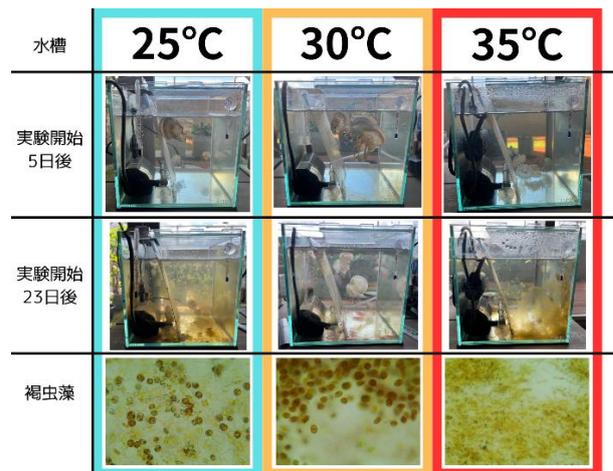


図 6. 各水槽の藻の様子

6-4 消滅過程

・ A25°C

付属器がちぎれ、傘が破れるまたは小さくなったのちに消滅。(図 7)

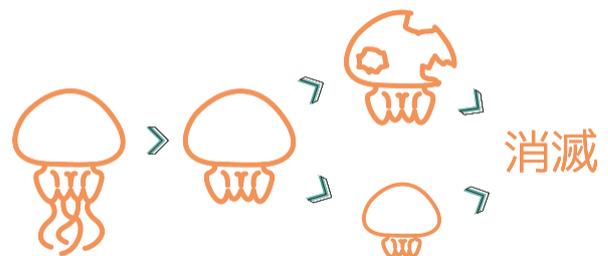


図 7. 25°Cにおける消滅のモデル

・ C35°C

付属器がちぎれ、傘と口腕が分裂したのちにそれぞれ消滅。(図8)

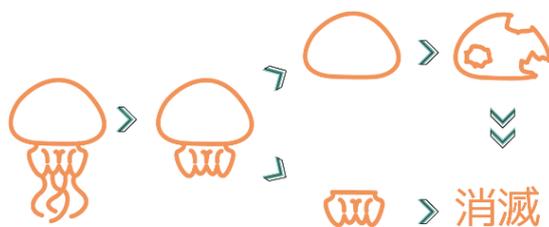


図8. 35°Cにおける消滅のモデル

7. 考察

これまでの実験を踏まえて以下のように考察する。褐虫藻も含めてタコクラゲに適した海水温は、30°Cである。これはタコクラゲを採集した海の表面温度が30°C前後であったため、最も自然の環境に近かったからだと考える。

25°Cでタコクラゲが弱ったのは、夏のクラゲだから低温に慣れていない、水槽内の藻の量が多いことから褐虫藻が体内から出ていきやすく栄養不足になったからだと考えられる。

35°Cだとタコクラゲはすぐに弱り、消滅してしまった。消滅過程から考えても口腕と傘が分裂してしまうと、少しずつ小さくなるよりも早く生命活動が停止してしまう。さらに褐虫藻が溶けてしまったことからタコクラゲに加えて褐虫藻にとっても悪影響があると考えられる。

8. 生物としてのタコクラゲの可能性

もし、タコクラゲが海水温上昇についていくことができなかつたら、絶滅するだろう。その場合クラゲを捕食する生物たちにも影響が及ぼされると考えられる。

一方、絶滅しなかった場合は生息域が変化すると考えられる。例えば北上したり南

下したり、もしくは深海へ向かうかもしれない。そうなれば、その新たな生息域に合わせて進化する可能性もある。

9. 今後の活動

今回タコクラゲや褐虫藻に影響を与えると分かった海水温上昇は、二酸化炭素の増加によって現在も進行中である。同じく二酸化炭素の増加によって現在問題となっているのが海洋酸性化である。海洋酸性化とは大量の二酸化炭素が海に溶け込むことである。これによって、貝殻やウニの殻に含まれている炭酸カルシウムが減少してしまい、貝やウニが成長できなくなってしまう。

タコクラゲにも炭酸カルシウムが含まれていると考えられており、タコクラゲにも海洋酸性化によってどのような影響があるのかをこれからは研究していきたい。

10. 参考文献

- ・『日本クラゲ大図鑑』
峯水亮, 久保田信, 平野弥生, ドゥーグル・リンズィー 平凡社(2015)
- ・『ほんわかクラゲの楽しみ方』
平山ヒロフミ, アクアパーク品川(監修) 誠文堂新光社(2016)
- ・『世界で一番美しいクラゲの図鑑』
リサ＝アン・ガーシュウィン, ドゥーグル・リンズィー(監修), 的場知之(翻訳) エクスナレッジ(2017)

11. 謝辞

本研究においてご指導して下さった顧問の先生方にこの場をおかりして感謝申し上げます。ありがとうございました。

多様性でアレルギーを克服！～アレルギー患者急増の原因に迫る～

6年C組 阿久津 優衣

指導教員 櫻井 昭

1. 要約

先進国ではアレルギー患者の数が急速に増加している。私たちは過去と現在の環境変化に着目し、アレルギー病態の発症が抗原多様性や化学物質に関連していると仮説を立てた。そこで、抗原多様な環境と清潔な環境を模擬し、アレルギー反応において抗原と化学物質の影響を調査した。結果は、アレルギー反応は共抗原処理によって抑制され、共化学処理によって促進される可能性が示唆された。

キーワード：アレルギー、抗原多様性、IgE、IgG2a

2. 研究の背景・目的

近年、日本国内でアレルギー患者が急増しており(図1)、日本人の2人に1人が何らかのアレルギーを発症している状況にある。急増の原因について、衛生仮説^{*1}や化学物質説^{*2}などが提唱されている。しかし、化学物質説を例に挙げると、法律の制定により大気中の化学物質の濃度は近年減少傾向にあることから、アレルギー患者増加の唯一の根拠とは考えにくい。よって、本研究では、アレルギー患者の急増原因を

なかった。一方、大学から奈良県で生活するようになってから、衛生環境が劇的に改善された一方で、花粉症など各種アレルギーを発症した。この経験に基づいて、抗原種が過少な環境ではアレルギーを発症しやすいのではないかという仮説を考えた。抗原種過少の環境下では、免疫細胞がアレルゲンに集中して反応を起こす一方で、抗原多様な環境下では、免疫細胞が様々な抗原に対して一様に働きかけるためアレルギー反応が抑制されると考えた。

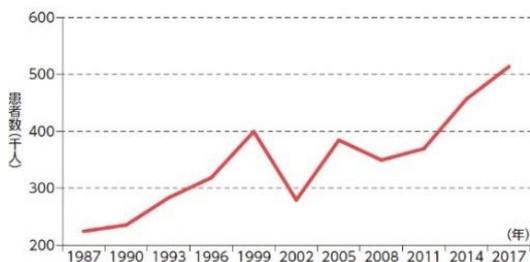


図1：アトピー性皮膚炎の患者数推移

参考：厚生労働省「平成29年患者調査」〔傷病分類編〕

明らかにすることを目的とする。

3. 仮説

父は和歌山県の田舎町で、薪の五右衛門風呂や井戸水を利用し、畑の草むしりを手伝い、水泳の授業は海で行うなど、虫や菌が身近に存在する抗原多様な環境で生活していた。その頃は家の前に杉の木が生えていたにも関わらず、花粉症などの症状は一切

3-1. 仮説検証の方針

抗原種過少説の検証を行うため、抗原投与や化学物質投与によるアレルギー反応を評価した。アレルギーを発症させるためNC/Ngaマウスにアレルゲンを投与した。また抗原多様な環境や大気汚染の環境を再現するため、抗原や化学物質を投与した。投与方法は、アレルギーの重症度を耳の腫れで評価するために、アレルゲン投与は耳の皮内に、抗原は首の皮下に投与した。投与後は、免疫機序を明らかにするため血液や脾臓、所属リンパ節の抗体価や免疫細胞数を測定した。

昨年度は抗原多様性がアレルギー反応を抑制することが明らかになったが、データの数や解析が不十分であり、抑制効果の機

序がクラススイッチの頻度や IgG2a など様々可能性が考えられ、不確かであった。そのため、今年度は信頼性を確保および統計処理を行うことで、アレルギー抑制の機序を明らかにすることを目的とした。さらに、父のアレルギー事情に着目し、抗原多様な環境から大気汚染の環境に変化させた後にアレルゲンを投与することで、田舎から都会に移住するモデルを作成した。

4. 研究方法

4-1. 使用した試料・器具・材料

マウス

生後 3 週齢および 6 週齢の雌 NC/Nga マウスを日本エスエルシーより購入した。通常のマウスでアレルギーを発症させるためには、投与期間を長くする必要があり困難だった。そのため、先行研究を参考にし、ダニにアレルギー反応を示しやすいノックアウトマウスを用いて実験を行った。また免疫形成前後の、アレルギー反応や抗原多様性の影響の違いを確認するため、2 種類の週齢で実験を行った。動物の倫理的取り扱いを確保するため実験は大阪大学の施設ガイドラインに従って行った。

試薬

抗原試薬として、アルテルナリア抽出物 (ITEA 社) とクロゴキブリ (ITEA 社) を、化学物質試薬として、都市廃棄粉塵 DEP (国立環境研究所) を用いた。また、アレルゲンとしてヤケヒョウダニ (Dp) (富士フィルム和光純薬株式会社) を用いた。

投与

抗原投与の際は、首にテルモシリンジ (26G) で皮下投与を行った。また、Dp・DEP 投与の際は、ペントバルビタール (麻酔薬) をマイジェクターで腹腔内投与を行った後、耳の皮内に投与した。

4-2. 測定方法

測定

アレルギーの重症度を確認するために、耳の厚さをノギスで測定した。ノギスで測定する際、測定位置を耳の真ん中で固定するなど、ばらつきが出ないように工夫した。また、抗原多様性説の機序を解明するため、脾臓およびリンパ節における Th 細胞の割合をフローサイトメトリー法で測定した。さらに、血漿中の抗体 (IgG1, IgG2a, IgE) および耳組織中のサイトカイン (IL-4, IL-17, IFN- γ) を ELISA によって測定した。

血液サンプル

最後の投与から 24 時間後にマウスをイソフルラン麻酔下で解剖した。心採血により血液を採取した。次いで、血液を 3000 g 4℃で 15 分間遠心分離することによって血漿を収集した。血漿はアッセイまで 80℃で保存した。

ELISA

血漿中の IgE 抗体は、LBIS ELISA アッセイキット (富士フィルム和光純薬株式会社) を用いて製造者の指示に従って測定した。まずサンプルと標準試料をプレートに加えて室温にて 2 時間、または 4℃で一晩反応させた。その後、1×Biotinylated Anti-mouse IgE Antibody を加え、室温にて 2 時間反応させた。プレート洗浄後、さらに 1×HRP Conjugated Streptavidin を加え、室温で 2 時間反応させた。再度プレート洗浄後、Chromogen (TMB) を加え室温で約 5 分反応させ、反応停止液を添加した。測定はプレートリーダーを用いて、測定波長 450 nm における吸光度を測定した。IgG1 および IgG2a は、製造元の指示に従って ELISA キット (LS Bio) を使用して測定しました。まずサンプルと標準試料をプレートに加えて 37℃のインキュベーターにて 90 分間、または 4℃で一晩反応させた。その後、1×Biotinylated Detection Antibody を加え、37℃にて 1 時間反応させた。プレート洗浄後、さらに 1×HRP Conjugate を加え、37℃で 30 分反応させ

た。再度プレート洗浄後、TMB Substrate solution を加え 37°C で 15 分反応させ、反応停止液を添加した。測定はプレートリーダーを用いて、測定波長 450 nm における吸光度を測定した。耳のサイトカインを、メーカーの指示に従って ELISA キット (CUSABIO) を用いて測定した。耳を解剖はさみで細かく切り、RIPA と Halt protease の混合液と共にホモジナイザーを用いてホモジナイズした。その後 15 分静置し、18000g で 30 分遠心操作を行った。さらに上清を採取し、BCA キットでタンパク質量を測定した。ELISA の手法は LS bio と同様のため省略する。

フローサイトメトリー

リンパ節または脾臓を摘出し、RPMI-1640, 1xMEM 非必須アミノ酸溶液, 50 μM 2-ME, 1% Ab, 10% 非働化 FCS を含む培地中にて保存した。解剖終了後、70 μm セルストレーナー上で潰し、細胞懸濁液を得た。細胞懸濁液を 300 g 4°C で 10 分間遠心した。そして得られた細胞ペレットを NH₄Cl, KHCO₃, EDTA・2Na・2H₂O を含む ACK 3mL で 5 分間静置した。その後、5 mL の培地を加え、4°C 300 g で 10 min 遠心した。さらに、非活性化培地で再懸濁した後、細胞数を 1x10⁶ cells に調製し、300 g 4°C で 5 分間遠心した。そして、活性化培地 1mL で再懸濁し、5 時間インキュベーションを行った。その後、脾臓およびリンパ節の免疫細胞を BD Pharmingen™ マウス細胞内サイトカイン染色スターター キット (BD Biosciences) で染色し、MACSQuant® X フローサイトメーター (Miltenyi Biotech) を使用して分析した。

4-3. 分析手法

マウスは各群 5 匹用意し、同様の実験を 2 回行うことで、n=10 とした。データは、one-way ANOVA 法を用いて解析を行い、信頼度の検討を行った。

5. 実験結果・考察

4 種類の実験を行った。実験 I, II では抗原過少説の検証、実験 III, IV では父の経験のもとに移住モデルの検証を行った。具体的には、実験 I では幼児期、実験 II では成人期 (免疫形成後) における抗原過少説の検証を行い、実験 III では抗原多様な環境から抗原過少な環境に移住した場合のアレルギー反応、実験 IV では抗原多様な環境から大気汚染の環境に移住した場合のアレルギー反応を確認した。前年度は実験 I ~ III を行い、今年度は実験 IV 及び、I, II の n 数を増やす実験を行った。また、実験データの解析、及び新たな考察も行った。

5-1. 実験 I

(1) 実験条件

抗原投与の有無によるアレルギー反応の影響を確認するため、以下の 3 群を用いた。3 週齢のマウスに、1 週間抗原投与を行い、その後 2 週間は抗原投与に加え、2 日に 1 回 Dp (アレルゲン) を投与した。

	抗原投与 (/30 μℓ)		Dp 投与 (/20 μℓ)
	ゴキブリ (μg)	アルテルナリア (μg)	ダニ (μg)
PBS/PBS	-	-	-
PBS/Dp	-	-	0.75
Antigen/Dp	60	15	0.75

(2) 実験結果

Antigen/Dp 群は PBS/Dp 群に比べ、耳の腫れが有意に (p<0.0001) 抑制された (図 4-A)。一方で、IgE 抗体量は有意に (p=0.0131) 増加した (図 4-B)。IFN-γ はアレルゲン投与を行った Antigen/Dp と PBS/Dp 群は、PBS/PBS 群より増加傾向にあった。その他の測定対象はどの群間にも差は認められなかった (図 4-C, D, E, F, G)。

(3) 考察

従来の仮説では Th1 と Th2 の割合が、Th2 優位であるとアレルギーを発症しやすいと考えられていたため、抗原過少説も同様の機序を予想していた。しかし、抗原投与は Th1/Th2 バランスに影響を及ぼさなかつ

た。そのため、抗原過少説では異なる機序が働いていることがわかった。また、昨年度は IgG2a が抗原投与によって抑制傾向にあると捉えていたが、実験結果より有意差が見られず、アレルギー抑制に関与しないことがわかった。

一般的に IgE 抗体量はアレルギー重症度の指標になっており、産生される抗体量が多いほどマスト細胞に多く結合し、炎症物質が放出されやすくなる。しかし、抗原多様な環境下では耳の腫れが抑制されたにも関わらず IgE 抗体価が増加するという結果となった。そこで、抗原投与により Dp だけでなくゴキブリやアルテルナリアに特異的な IgE 抗体も産生されていたと予測し、多様な特異的抗体が炎症を抑制したと考えた。抗原種が過少な場合、マスト細胞にアレルギーに対する抗体のみが結合した状態になり、隣接する IgE 抗体がアレルギーと架橋しやすくなる。一方で、抗原多様な場合、マスト細胞には多様な IgE 抗体が結合しており、アレルギーに特異的な IgE 抗体が隣接している可能性が低く、架橋が阻害される。よって排出されるヒスタミン量が抑制され、炎症が抑制されたと考えられる(図 2)。

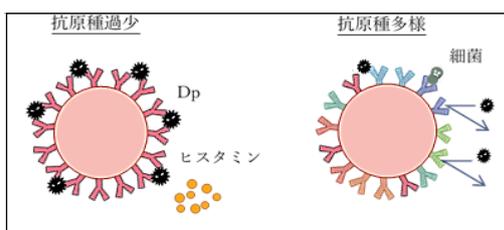


図 2. マスト細胞のイメージ

5-2. 実験 II

(1) 実験条件

抗原投与の有無によるアレルギー反応の影響を確認するため、以下の 3 群を用いた。6 週齢のマウスに、1 週間抗原投与を行い、その後 2 週間は抗原投与に加え、2 日に 1 回 Dp(アレルギー)を投与した。

	抗原投与(/50 μ l)		Dp 投与(/20 μ l)
	ゴキブリ(μ g)	アルテルナリア(μ g)	ダニ(μ g)
PBS/PBS	-	-	-
PBS/Dp	-	-	1.25
Antigen/Dp	100	25	1.25

(2) 実験結果

幼児期のマウスと同様に、抗原投与により、耳の腫れが有意に($p=0.0019$)抑制された(図 5-A)。一方で、IgE 抗体量は有意に($p=0.0306$)増加した(図 5-B)。また、幼児期のマウスと違い、IL-17 がアレルギー投与によって増加した。その他の測定対象はどの群間にも差は認められなかった(図 5-C,D,E,F,G)。

(3) 考察

IL-17 を産生する Th17 細胞は、幼児期にはほとんど存在せず、成人になるにつれて増加することが知られている^{※3}。本実験でアレルギー投与により、3 週齢のマウスでは IL-17 は増加しなかったが、6 週齢のマウスでは増加したことから、3 週齢は免疫が未熟な幼児期であり、6 週齢は免疫形成後の成人マウスであると捉えられる。そのため抗原多様性の効果は、免疫形成後の大人であっても効果が認められることが示唆された。よって、近年は乳児に対するアレルギー予防についてよく講じられているが、抗原多様な環境で過ごすという対策は大人にも効果が認められる可能性が高い。

5-3. 実験 III

(1) 実験条件

抗原事前投与の有無によるアレルギー反応の影響を確認するため、以下の 3 群を用いた。6 週齢のマウスに、1 週間抗原投与を行い、その後 2 週間に渡り 2 日に 1 回 Dp(アレルギー)を投与した。

	抗原投与(/50 μ l)		Dp 投与(/20 μ l)
	ゴキブリ(μ g)	アルテルナリア(μ g)	ダニ(μ g)
PBS/PBS	-	-	-
PBS/Dp	-	-	1.25
Antigen/Dp	100	25	1.25

(2) 実験結果

耳の腫れと IgE 抗体量は PBS/PBS 群より、PBS/Dp と Antigen/Dp 群が有意に増加していたが(図 6-A,B)，PBS/Dp と Antigen/Dp の群間に差は認められなかった。その他の測定対象にはどの群間でも差が認められなかった(図 6-C,D,E,F,G)。

(3) 考察

抗原多様な環境から清潔な環境に移住した後、アレルゲンを投与するとアレルギーを発症したという結果は、父の田舎で育ち都会に移住したという経験と合致する。マスト細胞の寿命は 80-120 日と知られているため³、アレルゲン投与時も多様な抗体が結合したマスト細胞は生存していたと考えられる。しかし、同時にアレルゲンに特異的な抗体のみが結合したマスト細胞が増加したため、アレルギー反応が抑制されなかったと考えられる。

5-4. 実験IV

(1) 実験条件

化学物質の有無によるアレルギー反応の影響を確認するため、以下の3群を用いた。6週齢のマウスに、1週間抗原投与を行い、その後2週間に渡り2日に1回 Dp(アレルゲン)と DEP を投与した。

	抗原投与(/50 μ l)		Dp 投与(/20 μ l)	
	ゴキブリ (μ g)	アルテルナリア (μ g)	ダニ(μ g)	DEP(μ g)
PBS/PBS	-	-	-	-
PBS/Dp	-	-	1.25	-
PBS/Dp・DEP	-	-	1.25	250
Antigen/Dp	100	25	1.25	250

(2) 実験結果

PBS/Dp・DEP と Antigen/Dp・DEP は、事前に抗原投与を行ったか否かに関わらず、耳の表皮が硬化しており、掻きむしりが多く見受けられた(図 7-H)。アレルゲン投与を行った群 (PBS/Dp, PBS/Dp・DEP, Antigen/Dp・DEP)は耳の腫れと IgE 抗体量が PBS/PBS より有意に増加していた(図 7-A,B)。PBS/Dp と PBS/Dp・DEP 群間で、耳の腫れや IgE 抗体量に差は認められな

ったが、Th2 細胞が有意に($p=0.0009$)減少する結果となった(図 7-F)。また PBS/Dp と Antigen/Dp・DEP 群間でも同様に、耳の腫れや IgE 抗体量に差は認められなかったが、Th2 細胞が有意に($p=0.0001$)減少する結果となった(図 7-F)。

(3) 考察

DEP は炎症を重症化させたが、IgE や Th 細胞など免疫反応には影響を及ぼさなかった。先行研究により DEP は表皮細胞に酸化ストレスを与え、タイトジャンクションを切断する働きがあることが知られている⁴。タイトジャンクションの切断により、耳の表皮の水分が蒸発し、カサカサになることで痒みの感受性が向上したために、ひっかき傷が多くなったと考えられる。また、細胞間が広がることで周囲の細菌が侵入したことで、細菌の侵入によりマクロファージなど IFN- γ を産生する自然免疫が活発に働くため、Th2 細胞が IFN- γ によって抑制されたと考えられる(図 3)。

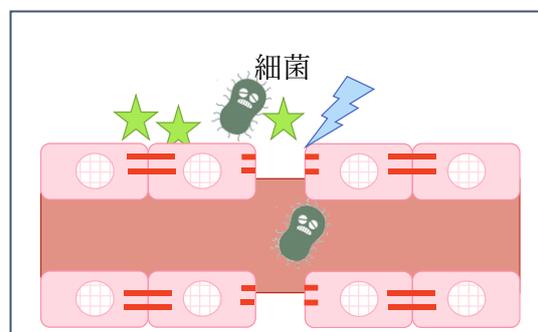


図 3. DEP による炎症悪化の機序

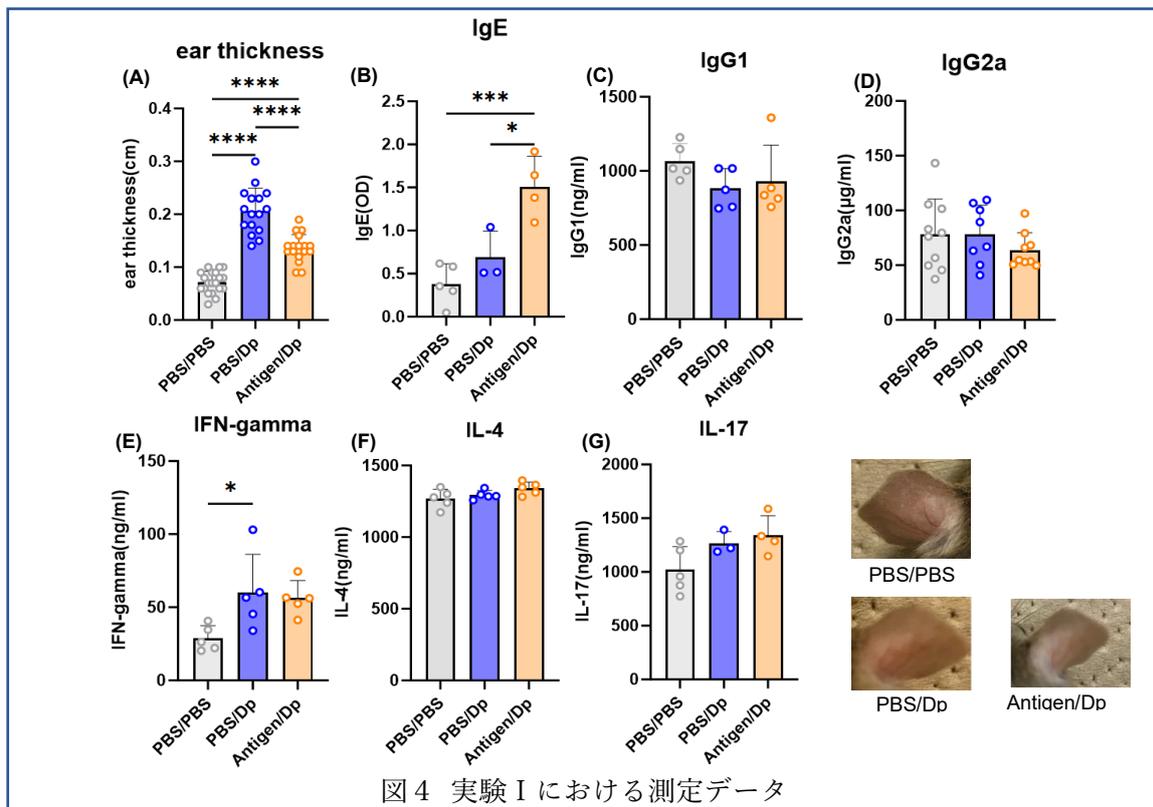


図4 実験Iにおける測定データ

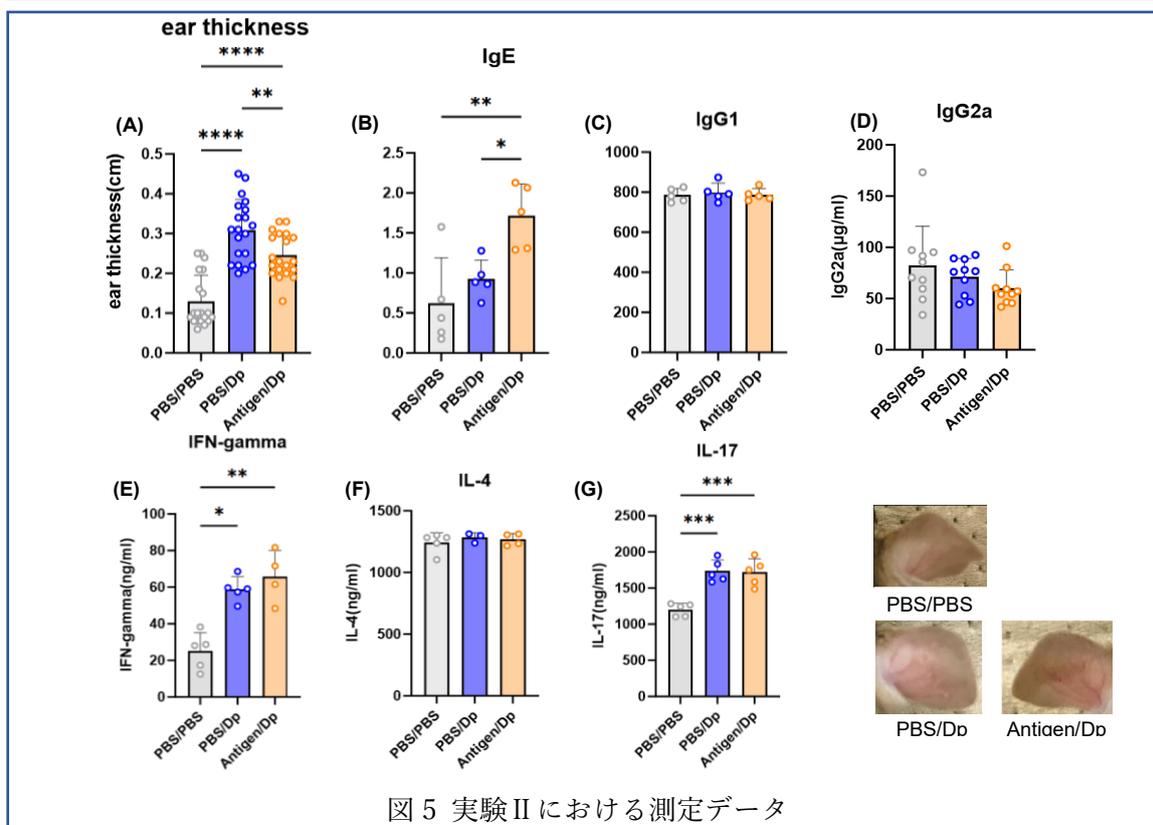


図5 実験IIにおける測定データ

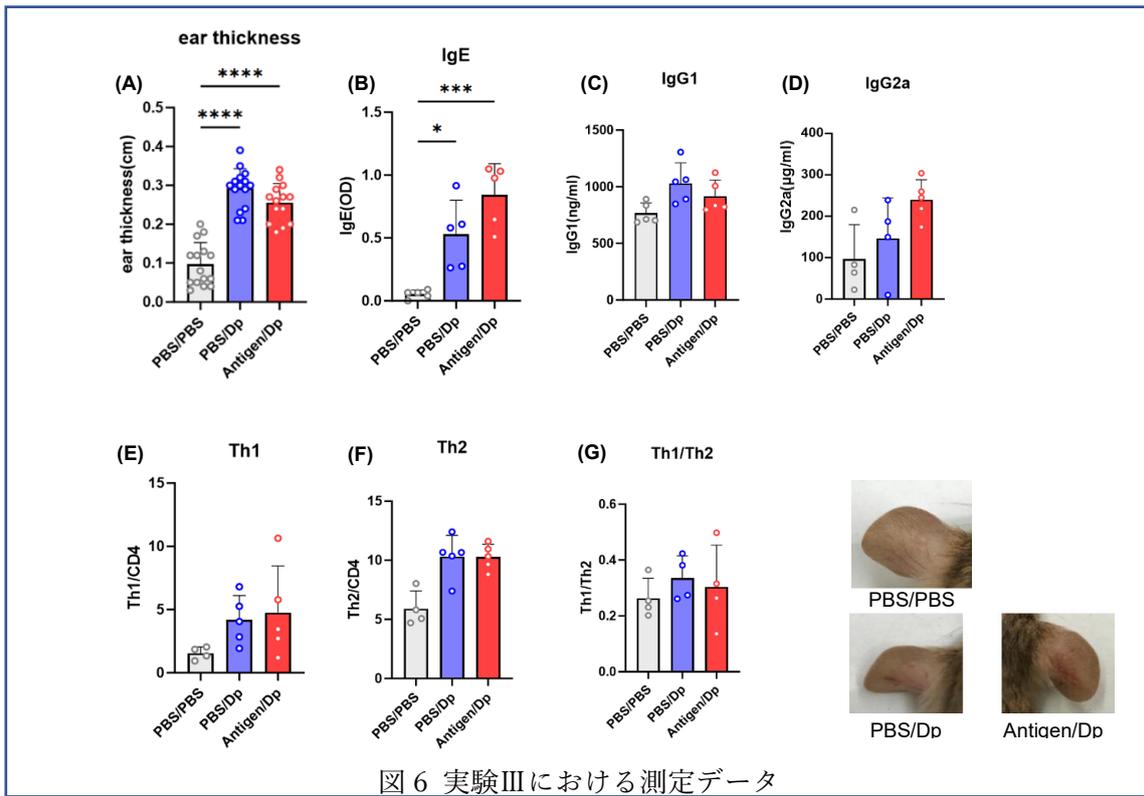


図6 実験IIIにおける測定データ

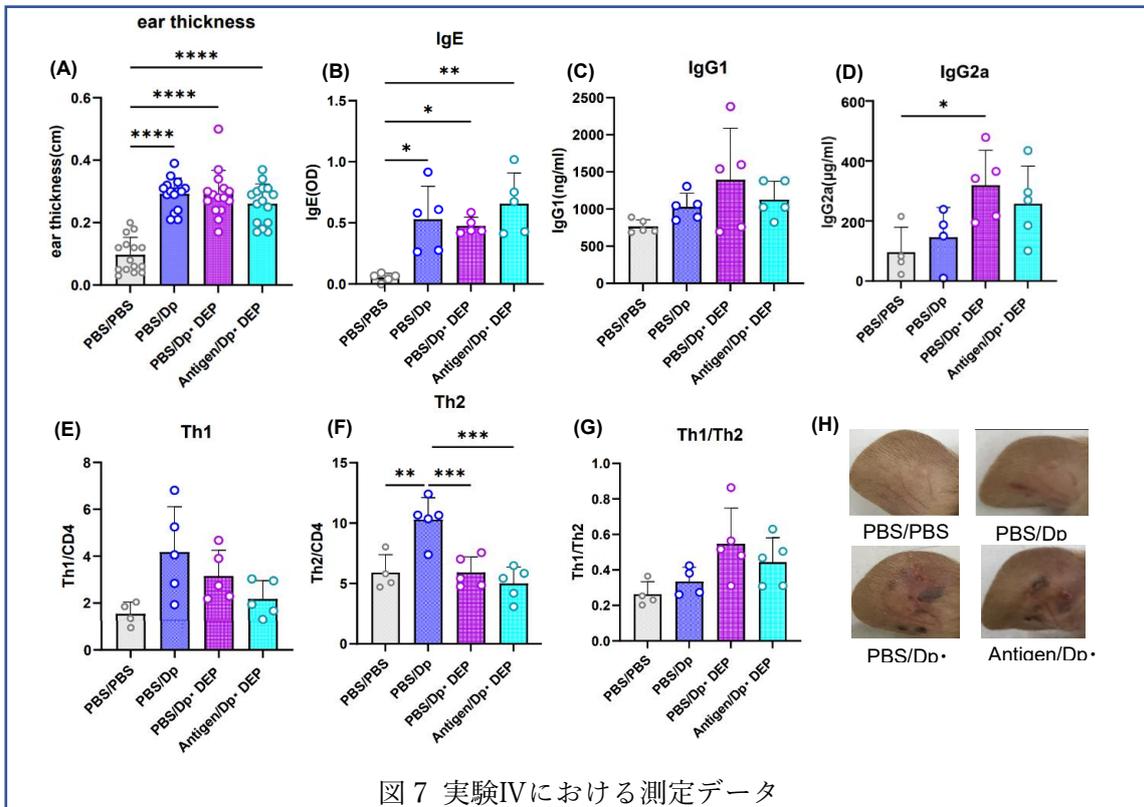


図7 実験IVにおける測定データ

6. 結論

本研究では、抗原種過少説を家族の経験や文献調査に基づいて新たに提唱した。抗原過少説を、マウスを用いて検証したところ、幼児期だけでなく成人期においても、抗原多様な環境下ではアレルギー反応が抑制された。抗原過少説の機序として、多様な抗原特異的抗体によりマスト細胞の架橋が抑制されることで、アレルギー反応が抑制されたと考えられる。一方、抗原過少な環境に移行すると、アレルギー反応が抑制されず、抗原多様性はメモリー効果がないことが明らかとなった。よって、アレルギー患者の急増は、現代の日本人が田舎のような抗原多様な環境から離れ、抗原過少な環境で生活していることが原因であると考えられる。また、大気汚染の環境に移行すると、アレルギー反応に影響はなかったが症状は悪化した。化学物質は皮膚の表面上のみで悪影響を及ぼすため、アレルギー患者の急増との関連性が低いと考えられる。

7. 実社会への応用

本研究はマウスを用いた実験を行い、抗原多様な環境でアレルギーが抑制されることが示唆された。一方でフィンランドでは、国民にアレルギー対策を教育するプログラムが行われ、アレルギーに関する治療費が大幅に減少したという成果が認められた^{※5}。教育内容は、発症予防のために自然との接触や禁煙を推奨し、発症後は早期治療や禁煙に努めるといったものである。本研究と比較すると、自然との接触は抗原多様な環境と、喫煙は大気汚染の環境と類似している。よって、今回のマウスによる結果が、人間に対しても妥当する可能性が高いといえる間接的証拠となると考えている。

また、日本で同様のプログラムを実施する際の案を提唱する。まず、アトピー性皮膚炎の重症化を防ぐため、化学物質を避けるよう注意喚起する。また、子供も大人も、発症前だけでなく発症後も、継続して自然との接触を行うことを推奨する。

8. 今後の展望

今後は、マスト細胞の培養実験(ex-vivo)や抗原特異的 IgE 抗体量の測定などにより、マスト細胞の架橋が抑制された機序を解明していきたい。また研究成果を元に、日本でもアレルギー患者を減らすための教育プログラムを実施したいと考えている。本研究は、アレルギーのテラーメイド予防薬の開発に役立つことが期待される。現在の抗アレルギー薬はヒスタミンがヒスタミン受容体への結合を阻害する抗ヒスタミン薬が主流であるが、眠気や抗コリン作用による副作用が表れる可能性が高いことが知られている^{※6}。

一方で、複数種類の細菌由来タンパク質を投与することでアレルギーを抑制することは、自然な免疫反応を促しているに過ぎないため、副作用が表れないと考えられる。また、肥満細胞に結合した IgE 抗体は半減期が 3 週間程のため、毎日薬を飲む必要がなくなり、患者の負担軽減に繋がる。

謝辞

堤康央先生には研究全般についての的確なアドバイスをしていただきありがとうございます。また、実験手法、器具、分析手法などの指導をしていただいた東阪和馬准教授、芳賀優弥助教、そして櫻井先生に感謝いたします。大阪大学大学院薬学研究所毒性学分野の皆様のご尽力に感謝いたします。本研究は SEEDs プログラムのご支援をいただいております。

参考文献

- [1] H Okada et.al, “The ‘hygiene hypotheses for autoimmune and allergic diseases” in 2010
- [2] 本田晶子 et.al, “環境化学物質とアレルギーに関する研究の進展” in 2014
- [3] Arie J. Stoppelenburg et.al, “Elevated Th17 Response in Infants Undergoing Respiratory Viral Infection” in 2014
- [4] Kenichi Azuma et.al, “Living environment and allergic disease: A surveillance study for the relevance in Saitama prefecture” in 2004
- [5] Tari Haahtela et.al, “The Finnish Allergy Program 2008-2018: Society-wide proactive program for change of management to mitigate allergy burden” in 2021
- [6] 谷内一彦 “薬理作用から見た理想的な抗ヒスタミン薬治療”, 第 120 回目日本耳鼻咽喉科学会総会ランチョンセミナー, p196-204, in 2020

奈良県生駒市におけるツバメの雌雄別給餌行動の観察と給餌内容の解析

5年A組 萩巢 樹

指導教諭 櫻井 昭

1. 要旨

2018年～2024年までの7年間、奈良県生駒市の飲食店街でツバメ(*Hirundo rustica*)の子育てについて観察した。本研究では毎年、ツバメの子育てを観察することでツバメの子育てにおける雌雄の役割の違いや時期による親鳥の行動の変化を調べることを目的としている。また、2023年度からは子育ての時期による給餌内容の違いを調べることを目的とし、雛の糞に含まれる昆虫のDNA解析を行った。

調査結果から、親鳥の雄は雌と比較して給餌回数が多く、巣での滞在時間が短いことがわかった。また、子育ての時期が遅くなると給餌回数は減る一方で、巣立ちまでの日数も短くなることがわかった。親鳥の給餌回数と巣立ちまでの日数には給餌している昆虫の内容が関係するのではないかと考え雛の給餌内容を解析した結果、時期によって給餌している昆虫が異なることが明らかとなった。

キーワード：ツバメ，子育ての役割分担，子育ての効率化，食性解析，保全

2. 背景と目的

2017年度にシジュウカラ(*Parus cinereus*)の子育ての観察を行い、雄と雌で餌を持ってくる回数に違いがあることがわかった。しかし、観察していた巣に、翌年はシジュウカラが訪れず、研究テーマを探している中で奈良県生駒市の飲食店街にツバメの巣が多数あるのを見つけ、ツバメの子育てや雌雄の役割について調査したいと考えたため、奈良県生駒市の飲食店街・グリーンヒルいこまの3階でツバメ(*Hirundo rustica*)の子育ての観察を開始した。

本研究では毎年、ツバメの子育てを観察す

ることでツバメの子育てにおける雌雄の役割の違いや時期による親鳥の行動の変化を調べることを目的としている。また、2023年度からは子育ての時期による給餌内容の違いを調べることを目的に追加した。

長谷川・森本(2020)によると、ツバメは、一夫一妻であるが、メスの方が抱卵、給餌など、日々の子育てを積極的に行うとされている。

また、ツバメは近年減少傾向が見られている。すいた市民環境会議(2011)によれば、大阪府吹田市においてツバメが繁殖していた巣の数を1998年と2010年で比較すると3分

の1にまで減少している事がわかった²⁾。本研究を行うことにより、ツバメの保全に大きく役立てる事ができると考えている。

3. 研究方法

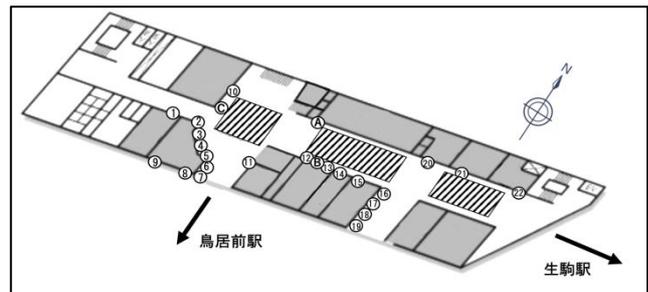
3.1 観察場所

2018年から2024年までの7年間、奈良県生駒市元町1丁目の、「グリーンヒルいこま」でツバメの子育てを観察した。グリーンヒルいこまは生駒駅と鳥居前駅（生駒ケーブル始発駅）の連絡通路になっている地下1階・地上4階建てのビルである。3階の飲食店街には、竣工年の1982年（昭和57年）から40年以上、毎年多くのツバメが飛来し、子育てを行なっている。生駒山の麓にあり、周囲には森林や公園、河川等の雛の餌となる昆虫の生息地が存在する。

2025年1月31日現在、2024年度の子育てで使われなかった巣も含めて、22個のツバメの巣が3階の飲食店街に存在する(図1)。一部吹き抜け部分はあるものの、23時(新型コロナウイルス感染拡大前の2019年度までは24時、新型コロナウイルス収束後も閉館時間は23時まで)の飲食店営業終了後はグリルシャッター（パイプが並んだ開放的なシャッター）が閉まることから、ツバメの雛の天敵であるカラスのなかまやノラネコは入りづらくなっている(図2)。午前6時30分にシャッターは開く。シャッターが閉まった後もツバメはその隙間からビル内へ入ることが可能である。また、ビル中央部は一部が吹き抜け構造となっており、ツバメは終日出入りすることが可能

である。

さらに、ツバメの巣の糞受けの設置や、子育ての見守りの協力を促す張り紙など、通行人も含め、ツバメの子育てを温かく見守っている。



英語で示された巣は現存しない

図1 グリーンヒルいこま館内図



図2 設置されているグリルシャッター

3.2 観察方法

1つの巣を選び、最初の雛が孵化した日（孵化日と定義）から、最後の雛が巣立ちをした日（巣内の雛が飛べる状態まで成長し、襲われた形跡がなく雛がいない状態を巣立ちとし、その日を巣立ち日と定義）まで親鳥や雛の行動の観察を行った。観察はほぼ毎日、放課後の17時から19時40分までのうちの1時間、子育てに影響を及ぼさないようにツバメの巣から3~10メートル程度離れた場所

に座り、双眼鏡や望遠鏡を用いて実施した。

観察開始時に親鳥が巣内に残っていた場合は親鳥が巣外に出るまで待機し、観察を開始した。観察日の天気、観察時刻、雛の数をまず記録し、観察中には巣に入った親鳥の雌雄、雛への給餌（餌を与えること）の有無、親鳥が巣に滞在した時間、巣内の様子（羽ばたきの練習など）、餌の種類（肉眼で確認できた場合に限る）、観察できた場合は巣の下に落ちた餌の種類を記録した。観察中に雛が寝てしまった場合は観察を終了した（稀にこの事象が発生した）。

また巣の内部の観察には、上部天井にツバメの渡来前から設置しておいた鏡を利用した。親鳥の雌雄の判別は、尾羽の長さや喉の赤い部分の濃さで行った。なお、雄個体は雌個体よりも尾羽が長く、喉の赤い部分が濃いため、判別することができる（図3）。

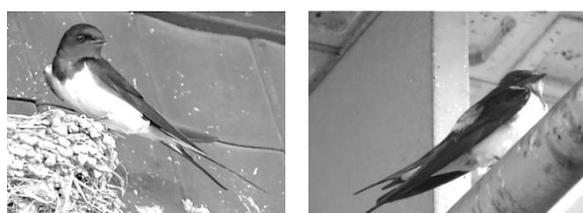


図3 親鳥 左図が雄成鳥，右図が雌成鳥

孵化日から巣立ち日までの観察を1シーズンとし、この観察を毎年繁殖状況に応じて1～5シーズンの観察を行った。

2023年度からは雛への給餌内容を明らかにするために雛の糞の採取を行った。観察前、巣の下に用紙を設置し、観察中の1時間に落下した糞を採取した。ただし、雛が一定の大

きさに成長するまでは親鳥が雛の糞を外部へと運んで捨ててしまうため糞の採取をできた日は限られている。結果的に2023年度は5月が4回、6月が2回、7月が8回の合計14回、2024年度は5月が4回、6月が1回、7月が3回の合計8回の糞の採取を行った。採取した糞はチャック付きの袋に入れた上で、マイナス20度で冷凍し、分析を行うまで保管した。

4. 研究結果

4.1 観察結果

観察することが出来た巣とその期間は以下の通りである(表1)。

表1 観察時期と観察巣

※観察年度-巣番号-その年におけるその巣での子育て回数

年度	孵化日～巣立ち日	日数	孵化したヒナ	巣立ったヒナ
2018-A-1	5/4～5/29	26	5	3
2018-A-2	6/22～7/13	22	5	4
2019-A-1	4/30～5/22	23	5	5
2019-13-1	5/22～6/12	22	5	5
2019-A-2	6/19～7/7	19	4	2
2019-13-2	7/15～8/2	19	4	4
2020-A-1	4/24～5/16	23	6	6
2020-13-1	5/20～6/8	20	5	5
2021-13-1	5/1～5/22	23	5	5
2022-1-1	5/22～6/12	22	5	4
2022-10-2	7/2～7/22	21	5	4
2023-4-1	4/23～5/15	23	6	5
2023-2-1	5/10～6/3	25	5	4
2023-C-1	6/24～7/15	23	4	4
2023-17-1	7/12～7/29	18	5	5
2023-C-2	7/26～8/15	21	4	3
2024-4-1	4/28～5/27	29	5	4
2024-18-1	6/7～6/29	22	5	4
2024-3-1	7/7～7/28	21	4	4

雛の巣立ちまでの日数は子育ての時期が遅くなるにつれ短くなることがわかった(図4)。

また、子育て期間中の気温が高いと巣立ちまでの日数は短くなることもわかった（図5）。

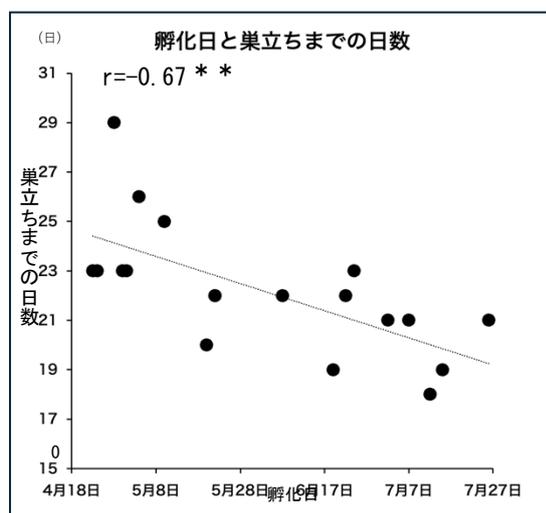


図4 孵化日と巣立ちまでの日数

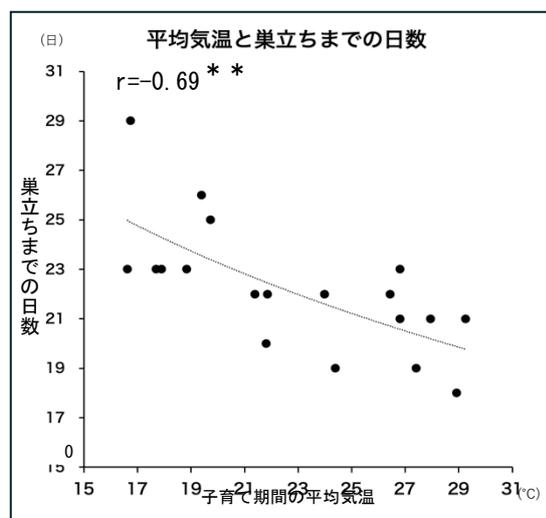


図5 平均気温と巣立ちまでの日数

図5、図6において、**は有意水準0.01、自由度17のt検定を用いた無相関の検定より相関を示す。

子育ての時期が遅くなると給餌回数は減少し（図6）、親鳥の滞在時間も短くなる傾向にあることがわかった（図7）。

また、子育てにおいて親鳥の雄は雌に比べて1時間あたりの巣に入った回数が多く（図8）、滞在時間が短い事が判明した（図9）。

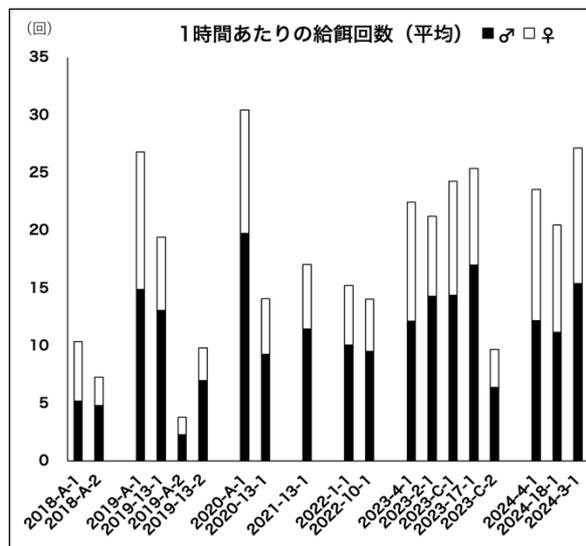


図6 1時間あたりの給餌回数

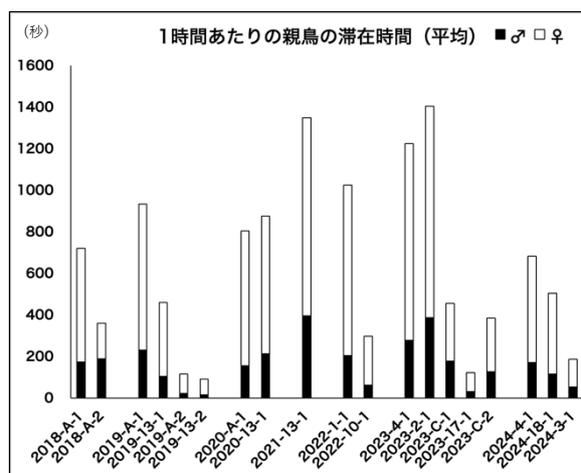


図7 1時間あたりの滞在時間

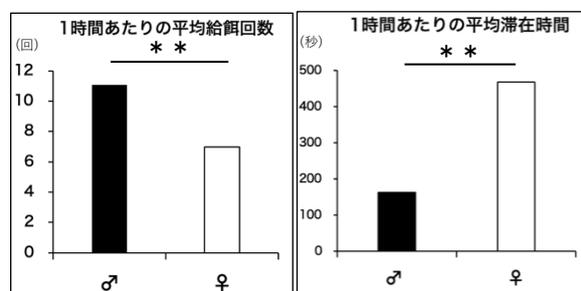


図8 平均給餌回数 図9 平均滞在時間

**は有意水準0.01、自由度18のt検定を用いたWelchの検定より $p < 0.001$ を示す。

4.2 食性解析結果

親鳥の子育ての日数は子育ての時期が遅くなるにつれて、短くなる一方で、給餌回数も減少する事がわかった。これは雛が捕食している昆虫が変化したためではないかと考えたため、2022年度に給餌動画や糞の濾過装置を用いて給餌内容の解析を試みたが、給餌内容は判明しなかった。そこで、2023、2024年度は(株)生物技研に委託する形で、雛の糞に含まれるリボソーム16S rRNAの部分配列を決定しBLASTNを用いて種単位まで同定し、種同定ができないものは属単位まで同定を行った。

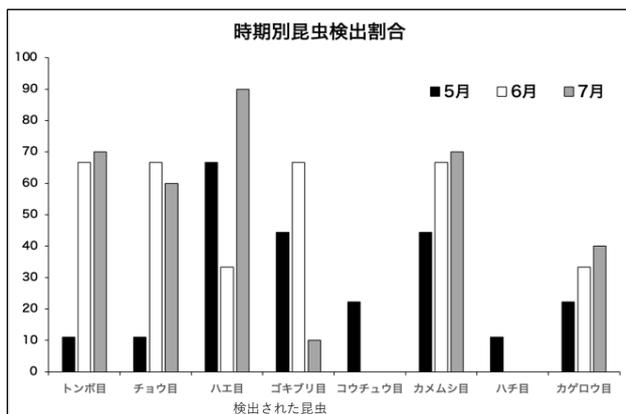


図10 時期別昆虫検出割合

※チョウ目は鱗翅目、ハエ目は双翅目などと呼ぶのが一般的ではあるが、わかりやすいように今回はこの表記を用いた。

検出された昆虫はほとんどが飛翔性昆虫(飛翔によって移動する昆虫)であった。時期ごとに比較するとトンボ目やチョウ目の昆虫は5月にはほとんど検出されず、6、7月に多く検出された(図10)。

5.考察

本研究結果より、親鳥の雌雄における役割分担や、時期による子育ての日数の違いが明らかとなった。神山・佐藤・渡辺(2012)によれば、繁殖期のツバメの成鳥の雌には腹部の羽毛が抜け、肌が露出する抱卵斑が存在する³⁾。親鳥の雌の方が、雄よりも優位に雛を温められることから雌が雛を多くあたため、雄は多く給餌を行うという役割分担を行っているのではないかと考えられる。

また、子育ての時期が遅くなると親鳥の巣に滞在する時間が短くなったのは、ツバメは晩成性であることから、ヒナが小さいうちは親鳥が雛を温めなければ雛が死んでしまうが、時期が遅くなり、気温が高くなると雛をあたためる必要性が小さくなることが要因の一つと考えられる。

そして、子育ての時期が遅くなると給餌回数が減るのは、気温が高くなったことにより雛の成長が促進された可能性、また与えている昆虫の栄養価が高くなった可能性が考えられる。給餌内容を解析した結果、給餌している昆虫が時期によって変化する事がわかった。例えばチョウ目やトンボ目の昆虫は5月にはほとんど検出されなかったが、6、7月には多く検出された。そのほかの昆虫も遅い時期の方がよく検出されていることから、給餌している昆虫の栄養価が雛の成長と大きく関係している可能性がある。

6.今後の展望

2025年度も継続してツバメの親鳥の行動を観察する。そして、ツバメの採餌範囲に生息する昆虫を調べるため、親鳥の採餌範囲にFITトラップを設置し、FITトラップ⁴⁾や捕虫網等を用いての昆虫採集を定期的を実施し(図11)、ツバメの子育ての時期に周囲に生息する昆虫について調べたい。



図11 FITトラップ

また、現在、捕獲した昆虫の乾燥標本を作成し、重量を計測した上でクロロホルムとメタノールの混合液に浸し乾燥させ、再度重量を測り、比較することで昆虫に含まれる脂質の量を調べている。これらを行うことで、2025年度は雛の成長と給餌内容の関係についてより詳細に解明したいと考えている。

7.謝辞

この研究は、令和4年度・令和5年度・令和6年度、東京動物園協会野生生物保全基金の交付により遂行されたものです。この場を借りて深く御礼申し上げます。

また、研究を行うにあたり、大阪市立自然史博物館主任学芸員 和田岳先生、奈良女子大学理学部 遊佐陽一教授、片野泉教授、顧問の櫻井昭先生には多大なご指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。

最後に、観察を行うにあたり、あたたかく受け入れてくださったグリーンヒルいこまの皆様には感謝申し上げます。

8.参考文献

- 1) 長谷川克・森本元 (2020)
『ツバメのひみつ』, 緑書房 P39
- 2) NPO 法人すいた市民環境会議 (2011) 「つばめの巣マップ 吹田市制 70 周年事業」
<https://www3.big.or.jp/~sskk/kanri/110521swallow-map.pdf> 2024年9月18日閲覧
- 3) 神山和夫・佐藤信敏・渡辺仁 (2012)
『ツバメ (田んぼの生きものたち)』,
農山漁村文化協会
- 4) 丸山宗利 2003. 好蟻性・好白蟻性甲虫の採集法. 昆虫と自然 38(9): 43-47

絶滅寸前種ヒメタイコウチの飼育方法に関する研究 ～幼虫の餌をはじめとした適切な飼育環境の調査について～

4年 片岡 憲伸

1. 概要

奈良県では絶滅寸前種に指定されているヒメタイコウチを幼虫から成虫にするための「より良い飼育方法」を見つけ出し、その理由を明らかにすることを目的として、これまで継続的な飼育を行ってきた。今年度は、ヒメタイコウチの採卵および幼虫飼育に重点を置き、飼育環境や餌などの要因が本種の成長に及ぼす影響について調査した。その結果、非常に高い孵化率を生み出す条件を見つけ、複数個体を五令幼虫まで飼育することに成功した。また、冷凍アカムシを餌として使用できることが明らかとなった。

2. 背景と目的

ヒメタイコウチ (*Nepa hoffmanni* Esaki 1925) とは、カメムシ目タイコウチ科ヒメタイコウチ属の体長2cmほどの肉食水生昆虫で、水深の浅い綺麗な湿地帯にのみ生息する。2022年度から、奈良県庁景観自然環境課と橿原市昆虫館、五條のヒメタイコウチを守る会の協力のもと、「ヒメタイコウチの飼育担い手プログラム」に参加している。本種を幼虫から成虫にするための「より良い飼育方法」を見つけ出し、その理由を明らかにすることを目的として、継続的な飼育を行い、適切な飼育環境や餌などの条件について検討した。

1)。直射日光の当たらない窓際にこのケースを設置して、餌はダンゴムシを1日1個体に数匹ずつ与えた。産卵が始まると毎日目視で卵をチェックし、産卵数を記録した。

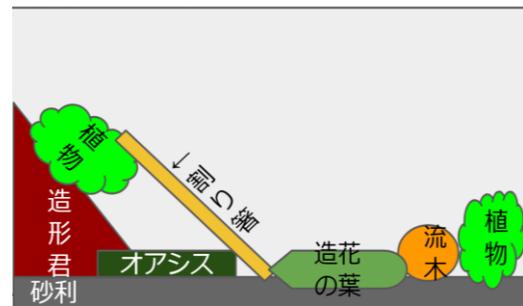


図1：成虫飼育ケースの模式図（正面）



写真1：ヒメタイコウチの成虫（雌）

3-2. 幼虫の飼育方法について

孵化した一令幼虫は、プリンカップ（直径10cm、高さ4cm）に砂利を少量敷き、水を1mm入れた環境で飼育した（写真2）。一部の個体は、使用する砂利を別の種類にしたり、ミズゴケを入れたりした。初めのうちは、なるべく小さい（隊長5～10mm）ダンゴムシ一匹を餌として各個体に与えていたが、その後、餌を変更した。これについては後述する。

3. 方法

3-1. 成虫の飼育と採卵について

過去2年間の飼育結果をまとめたうえで、今年度はヒメタイコウチを守る会の代表から、成虫♂3匹♀3匹の計6匹を譲り受けた。これらを飼育ケース（縦21cm、横35cm、高さ25cm）に入れて飼育と観察をすることにした。成虫の飼育ケースの中には、造形君やオアシス、流木や植物などを配置した（図



写真2：幼虫の飼育カップの様子

幼虫は夏休みに入るまでは学校の理科教室内で飼育していたが、夏休み以降は自宅に持ち帰り飼育を続けた。

4. 結果

4-1. 産卵数と孵化率について

4月から5月にかけて、3ペアから計28個の卵が得られた。これらの多くは、造形君やその他の植物と土の部分に産み付けられていた。その後、幼虫が全ての卵から孵化した。孵化しない卵もあった可能性もあるが、目視で確認していた分の全ての卵について孵化が確認できた。

4-2. 幼虫の飼育について

餌として、小さいダンゴムシを毎日採ってくるのは非常に手間がかかったので、学校内の観察池にいるアカムシを捕まえて与えたところ、食いつきは良かった。しかし、池にいるアカムシの個体数の減少が確認されたため、途中から冷凍アカムシを餌として代用することを試みた。冷凍アカムシ4匹ほどをピンセットで一令幼虫の前に落とすと、すぐ反応し、前脚で捕まえて、アカムシの体液を吸い始めた。冷凍アカムシでの飼育は、餌の大きさとコストの問題から、三令幼虫まで行った。四令幼虫から五令幼虫までは、通常より小さいダンゴムシを使用した。



写真③：冷凍アカムシを食べる1令幼虫

一部の幼虫は、成長過程で死んでしまったが、大半の個体は順調に脱皮を重ね、飼育していた幼虫28個体中4個体が五令幼虫にまで成長した。しかしながら、夏休みに入ると、全ての個体の成長は完全に停止してしまい、続々と死んでいった。最後に生き残った幼虫は、五令

幼虫のまま三か月以上生き続けたが、10月16日に死亡した。

5. 考察と今後の展望

本研究から、ヒメタイコウチ幼虫の餌として、冷凍アカムシを使用できることが明らかになった。これは、「ヒメタイコウチなどの肉食水生昆虫は、生きているものしか食べない」という定説を覆す発見となった。だが、今回の飼育では、餌不足のため、冷凍アカムシを使わなかった個体を用意できなかったため、冷凍アカムシが幼虫の成長に及ぼす影響は調査できなかった。しかしながら、この方法が確立できれば、飼育のコスト削減、作業の効率化を実現することができる。

今回は産卵された卵を回収せずにその状態のまま孵化させた。その結果100%の孵化率が得られた。このことから、卵の回収は孵化率を下げることが示唆された。ただ、成虫容器内で孵化した1令幼虫は共食いやその他ストレスにさらされるリスクもあり、孵化率を下げないように回収方法についても今後検討したい。

また、本研究ではカップごとの砂利の違いや、ミズゴケの有無による幼虫の成長への影響を調べたが、特に目立った影響は確認できなかった。

最後に、今回の飼育では、幼虫期間の長期化と夏休み中の飼育場所の変更および餌の捕獲場所の変更等から、状況が悪化した可能性があり、成虫まで飼育ができなかったと判断した。今後は、生育停止の要因の調査や、新たな発見を目指し、ヒメタイコウチに向き合っていきたい。

6. 参考文献

- 1) 奈良県ホームページ，県民だより「ならの希少な生きもの」
- 2) 奈良県と和歌山県における最近10年間のヒメタイコウチの生息場所の減少要因，中尾史郎，2011

【参考資料】ヒメタイコウチの飼育記録 2024 (片岡作成)

本校	ダンゴムシ・クラジムシ	アカムシ	ヒメタイコウチの増減	脱皮・備考
日付	与えた数	回収した数	与えた数	回収した数
5月27日	0	0		成虫1・幼虫2：弱っている
5月29日	0	0		13・17・18：(1→2)
5月30日	0	1		11・16：(1→2)、2：(2→3)
6月3日	0	0		14・22(1)、5・13(2)：死亡 12・15・21：(1→2)、3：(2→3)
6月5日	0	0		1・11・17(2)：死亡
6月6日	0	1		12(2)：死亡
6月7日	0	0		24(1)：死亡、 27(1)：成虫用飼育ケース内で死亡
6月10日	0	0		3・4・9・10(2)：死亡
6月11日	0	0		7：(3→4)、18：(2→3・このとき、脱皮不全となった個体)
6月12日	0	3		18(脱皮を助けるも、左中脚に支障が出て、機能不全になる)
6月13日	5	0	1カワヅ4-5匹	2：(3→4)、23：(2→3)
6月14日	0	0	1カワヅ4-5匹	15、21：(2→3)
6月17日	1	0		26：(1→2)
6月18日	0	0		7：(4→5)、28：成虫用飼育ケース内で発見
6月19日	0	0		16(2)：死亡
6月21日	0	0		26(2)：死亡
6月24日	1	0		2：(4→5)、15・18・21・23：(3→4)
6月25日	4	3		
6月27日	0	0		カワヅの蓋付近に、ダンゴムシの死骸を発見
6月28日	3	0		
7月1日	0	0		21：(4→5)
7月4日	1	0		
7月5日	0	1		23：(4→5) この日以降、全ての個体は、脱皮しなくなった。
7月6日	0	2		♂成虫1匹死亡より、♂全滅。
自宅				
7月7日以降	1	1	0	夏休み中、7匹中6匹が死亡
10月24日				23(5)死亡 幼虫全滅

生物模倣的自己注意機構を導入したスパイキングニューラル

ネットワークによる神経動態予測モデルの提案

6年B組 岡本 晃朋

指導教員 鵜飼 哲真

1. 要約

ニューロンモデルに生物学的な自己注意機構を導入することで、スパイキングニューラルネットワーク(SNN)の神経動態予測精度を向上させると共に、より生物学的な挙動を再現することを目的としている。SNNの時間的情報処理能力にTransformerの強力な注意機構とイオンチャネル等の神経論的計算科学の理論を統合した新しいモデルを提案することで、現在76%の精度でのスパイク予測を達成している。

キーワード

Computational Neuroscience, Bioinformatics, Machine Learning,

2. 研究の背景と目的

私は昨年脳波や五感情報を用いたマルチモーダルな感情推論モデルの作成を行っていた。その際に脳波の θ 帯について感情によって時系列による変化が大きく異なり、時間と共に減衰していくことを発見した。この原因としてシナプスの電位が時間と共に減衰していくことや、シナプス可塑性による影響だと仮説を立てた。そこで、スパイキングニューラルネットワークに自己注意メカニズムを導入することにより時空間パターンの学習がより容易になり、精度向上や生物学的なモデルの再現度の向上につながると考え、本研究を始めた。

3. 脳波及び生理的信号の解析

最初に仮説にて示した脳波の時間減衰について紹介する為、脳波が具体的にどのような形式で感情などに影響を与えるか解析を行った結果を示す。脳波の解析データに

はOpenBCIのヘッドセットを用いた測定データ、及びECSMP[1]データセットにおける映画鑑賞時の脳波を測定したものである。

3.1 感情による脳波の差異

10/20法にてFp1, Fpz, Fp2, AF3, AF4, F7, F8, A2の8箇所電極から250Hzでサンプリングを行っている。

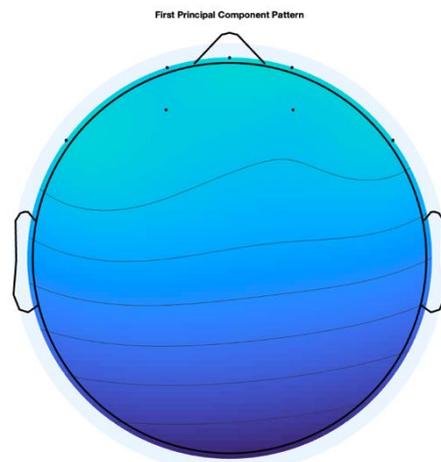


Figure 1: Topography of dataset

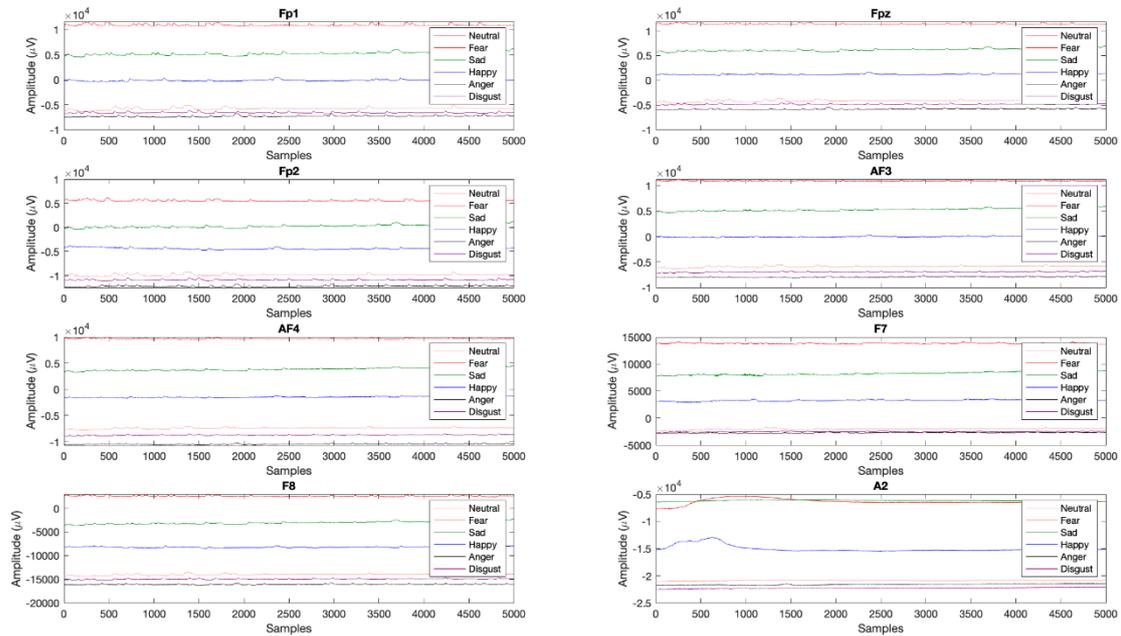


Figure 2: Electrode classified by emotion

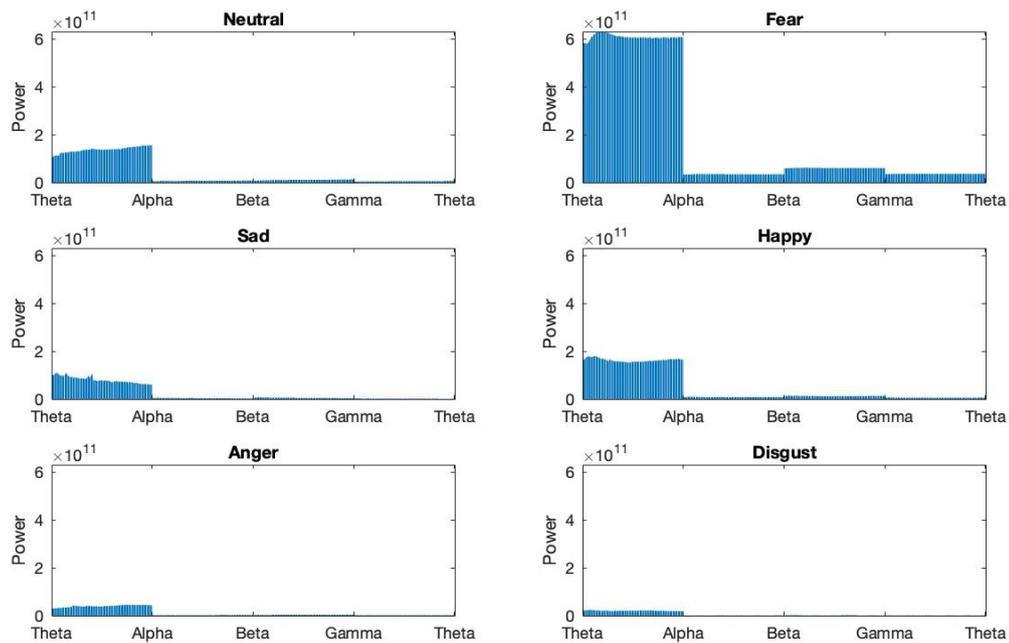


Figure 3: Band Power for Different Emotion

Figure 2, 3 より、感情によって Amplitude (Power)が異なることが確認できる。そこで、それぞれの感情についてスペクトラムを作成し、どのように変異していくのかに着目した。帯スペクトル Figure 4 から感情に

よってバンド周波数の持続性が異なることが読み取れる。これは、感情の種類によって時間変化の変位が異なることを示している。このことから、生命活動において時間減衰に関する関数が必要であると考えた。

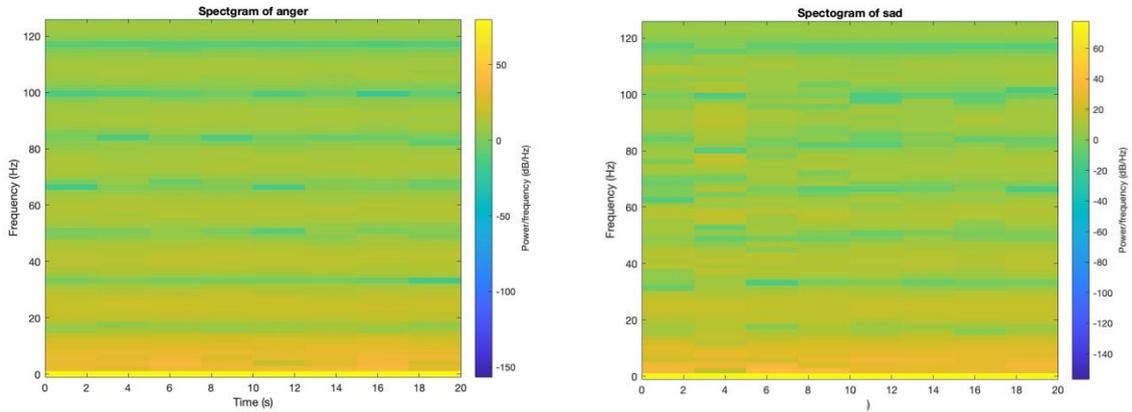


Figure 4: Spectrum of anger and sad

3.2 生理的信号の一致性

Figure 5~8 より生理的信号については、感情が変わる時などに反応がみられる場合が多いと結論づけた。インタラクティブでない場面(映画を見ている状態)で行う体の

移動や体温、皮膚電位などから、感情が変化する前後のタイミングを推論できると考えている。これらのデータについては発生時間が殆ど同じであり、感情のトリガーとしては一つに絞ることを考えている。

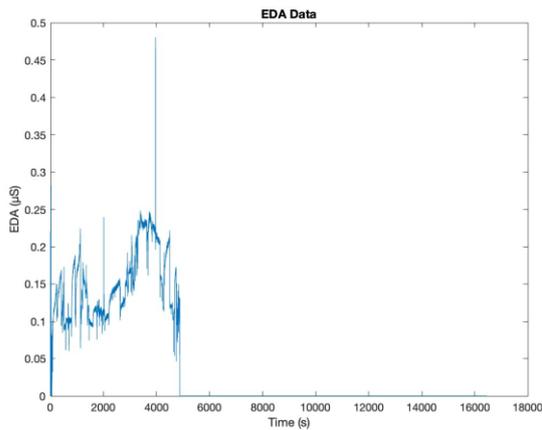


Figure 5: EDA

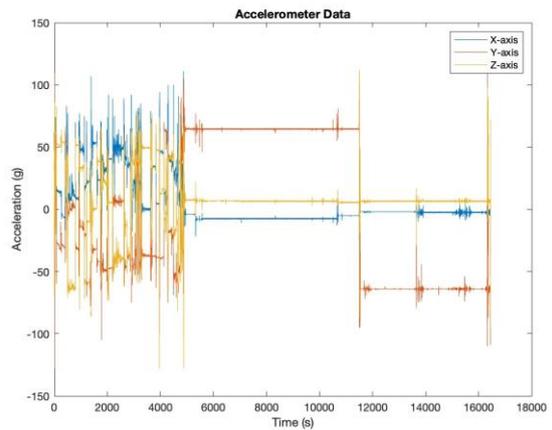


Figure 6: Accelerometer

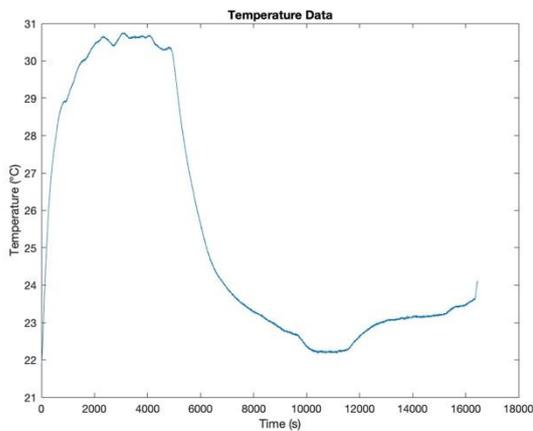


Figure 7: Temperature

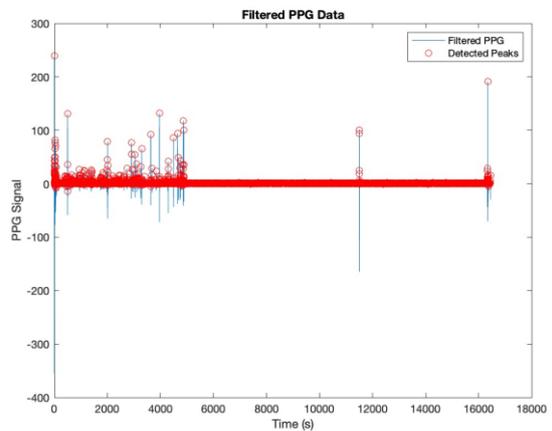


Figure 8: PPG(Filtered)

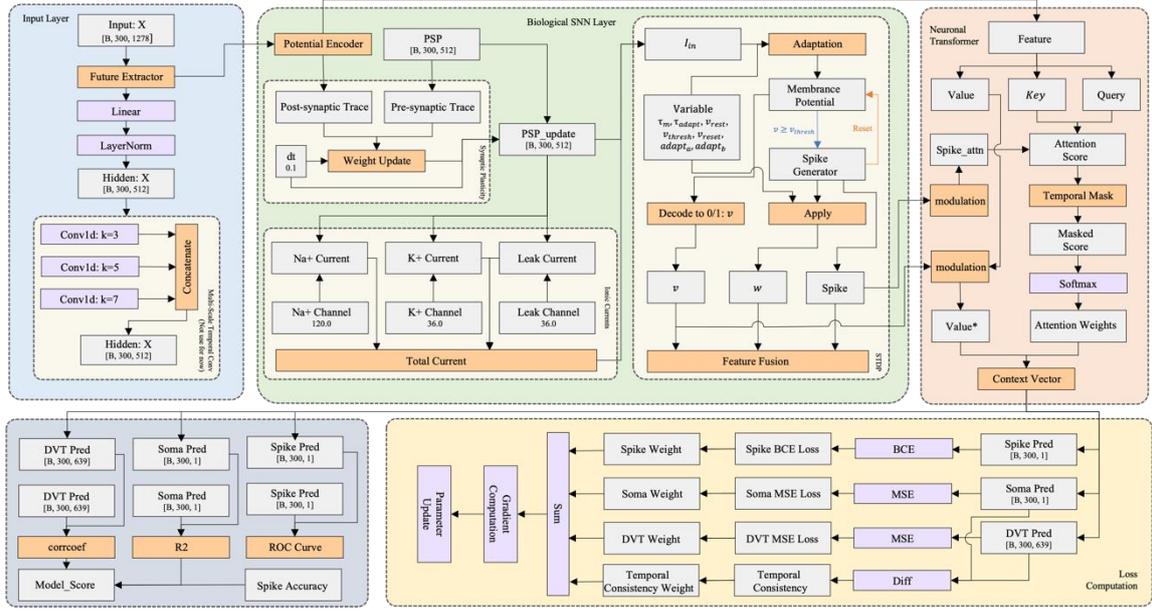


Figure 9: Architecture of CSnT

4 アーキテクチャの提案

脳波から見られる傾向を参考に、新たなアーキテクチャ CSnT: Continuous Spiking Neural Transformer (Figure 9)の提案を行った。以下にそれぞれのモジュールについて解説していく。

4.1 生物学的自己注意機構の提案

通常の Transformer[2]で用いられる自己注意機構では時間的相関を見出すことができない。時系列を扱える iTransformer などのアーキテクチャが提案されているが、生物学的な演算を行うにあたり妥当性に欠けていると考えた。そこで、新たに生物学的自己注意機構を提案した。

スパイクニューラルネットワーク (SNN)におけるスパイク S とその転置 (transpose) S^T 間での類似度を

$$A_{spike} = \frac{SS^T}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

と表現する。ここで d は埋め込み次元(dim)であり、スケールリングすることで勾配の爆発や消失を防いでいる。

このモジュールに時間減衰を導入するために、実験的に SNN で用いられる指数減衰型の α 関数[3]を用いた。

$$K(\Delta t) = \exp\left(\frac{-|\Delta t|}{\tau}\right) \quad (2)$$

これらのアダマール積を主軸に、生物学的自己注意メカニズムを以下のように定義した。

$$A(Q, K) =$$

$$\text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} \odot K(\Delta t) \odot (1 + A_{spike})\right) \quad (3)$$

$$\text{Context} = A(Q, K)V \odot \varsigma(g(V_m)) \quad (4)$$

これらにより、Transformer にスパイクの変調 $\frac{SS^T}{\sqrt{d}}$ 、時間依存 $K(\Delta t)$ 、膜電位の相関 A_{spike} などを組み込み、シナプスの電位が時間と共に減衰していくことを再現した。Context では 4.3 にて説明する膜電位 V_m にシグモイド関数 ς を施し神経細胞の特性を抽出したものと積を用いることでモデルの挙動に生物性を持たせている。

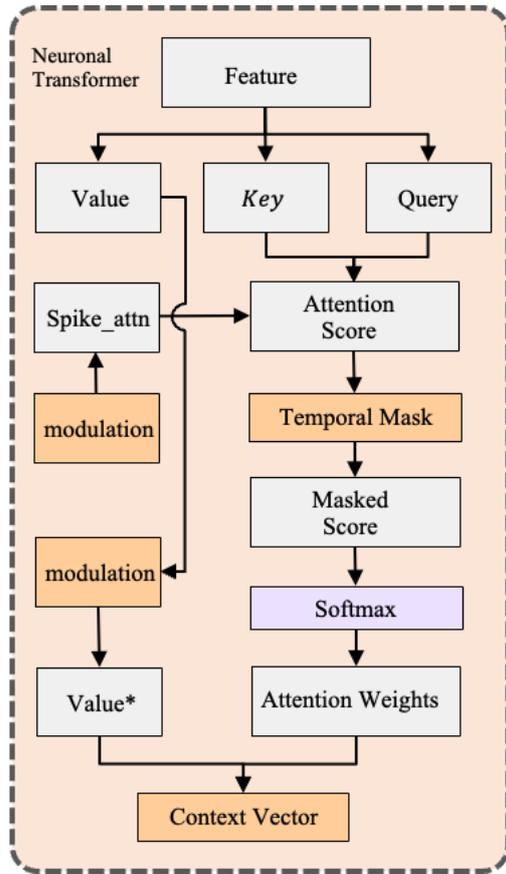


Figure 9: Architecture of Neuronal Transformer

4.2 SNN レイヤーの定義

次に、SNN における生物妥当性を保持するために、Synaptic Plasticity(STDP)[4]と Hodgkin-Huxley 型ニューロンモデル(HHModel)[5]を用いて電流 I と電圧 V を計算する。

4.2.1 STDP の導入

実際のシナプスの学習メカニズムを模倣することを目的に、ニューロン間の発火時間差に起因するシナプス可塑性を再現した STDP を導入した。プレシナプスとポストシナプスの動力学について、プレシナプス性トレース x_{pre} とポストシナプス性スパイク S_{pre} 間で LTP(Long-Term Potentiation)を、ポストシナプス性トレース x_{post} とプレシナプス性スパイク S_{post} 間で LTD(Long-

Term Depression)を以下の微分系で定める。

$$\frac{dw}{dt} = \eta(x_{post}(t)S_{pre}(t) - x_{pre}(t)S_{post}(t)) \quad (5)$$

また、トレースの動力学における時間発展については以下の微分方程式で表される。

$$\frac{dx_{pre}}{dt} = -\frac{x_{pre}}{\tau_{pre}} + \sum_f \delta(t - t_f^{pre}) \quad (6)$$

$$\frac{dx_{post}}{dt} = -\frac{x_{post}}{\tau_{pre}} + \sum_f \delta(t - t_f^{post}) \quad (7)$$

ここで、 τ_{pre} は時定数、 δ はディラックのデルタ関数である。 $\sum_f \delta(t - t_f^{pre})$ はスパイク発生時にトレース変数を増加させること、 $\frac{x}{\tau}$ はトレース変数の指数的な減衰を表すことで、直近のスパイク活動が保持されるようにした。そして、計算したプレシナプススパイクと重みの線形結合によって膜電位を計算した。

4.2.1 HHModel への接続

STDP にて計算した膜電位を元に HHModel による電流の計算を行った。

膜容量 C_m をコンデンサ、イオンチャンネルを可変抵抗と見做し、キルヒホッフの第二法則から

$$C_m \frac{dV}{dt} = -\sum I_{ion} + I_{ext} \\ = -(I_{Na} + I_K + I_L) + I_{ext} \quad (8)$$

と定められる。Hodgkin と Huxley がイカの神経軸索を膜電位固定法から実験的に求めた式 9~11 を用いて、STDP にて計算した膜電位を用いて電流を計算した。

$$I_{Na} = g_{Na} m^3 h (V - E_{Na}) \quad (9)$$

$$I_K = g_K n^4 (V - E_K) \quad (10)$$

$$I_L = g_L (V - E_L) \quad (11)$$

ここで、 g_{Na} 、 g_K は Na^+ 、 K^+ の最大コンダクタンス、 g_L はオームの法則から導かれる。また、 m 、 h 、 n はゲートの開閉確率を表している。

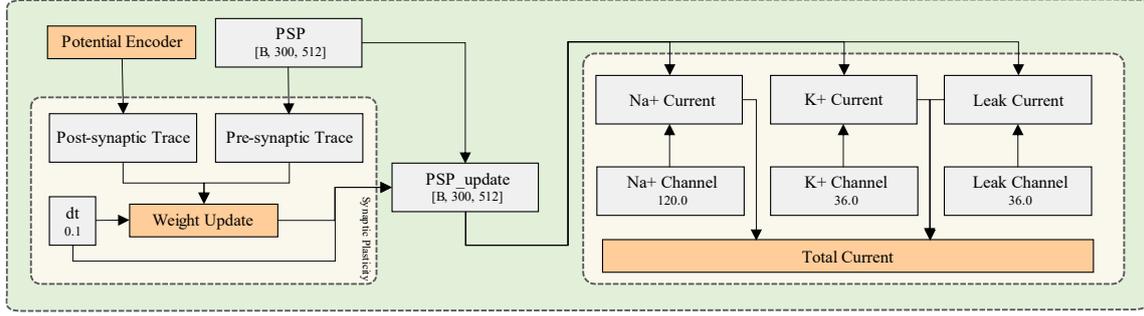


Figure 10: Structure of SNN Layer

$$\frac{dx}{dt} = \alpha_x(V)(1-x) - \beta_x(V)x$$

$$(x = m, h, n) \quad (12)$$

また、 α_x, β_x は以下のように表される。

$$\alpha_m(V) = \frac{0.1(25-V)}{\exp[(25-V)/10]} - 1 \quad (13)$$

$$\beta_m(V) = 4\exp(-V/18) \quad (14)$$

$$\alpha_h(V) = 0.07\exp(-V/20) \quad (15)$$

$$\beta_h(V) = 4\exp(-V/18) \quad (16)$$

$$\alpha_n(V) = \frac{0.01(10-V)}{\exp[(10-V)/10]} - 1 \quad (17)$$

$$\beta_n(V) = 0.125\exp(-V/80) \quad (18)$$

4.3 LIF Neuron の実装

STDPにて得られた電圧 V と Hodgkin-Huxley 型ニューロンモデルにて得た電流 I を用いて Leaky integrate-and-fire(LIF) Neuron[5]に適応機構を追加した Adaptive exponential integrate-and-fire model(AdEx)[6]を実装した。膜電位の動力学を適応変数 w を用いて

$$\tau_m \frac{dV}{dt} = -(V - V_{rest}) - w + RI \quad (19)$$

と表す。ここで、 τ_m は膜時定数、 V は膜電位、 V_{rest} は静止膜電位、 RI は入力電流を表す。また、適応変数 w の動力学は

$$\tau_w \frac{dw}{dt} = -a(V - V_{rest}) - w + b \sum_i \delta(t - t_i) \quad (20)$$

となる。 τ_w は適応時定数、 a は電圧依存性適応の強さ、 b はスパイク依存性適応の強さ、 $\delta(t - t_i)$ はスパイクの発生を表している。メカニズムとして、1. 膜電位が上昇する程適応変数 w も増加する、2. 適応変数 w の増加により膜電位を下げる方向に働く、3. スパイクの発生により w が急激に増加、4. 連続発生を抑制し、スパイク発火頻度の適応を実現するようになっている。

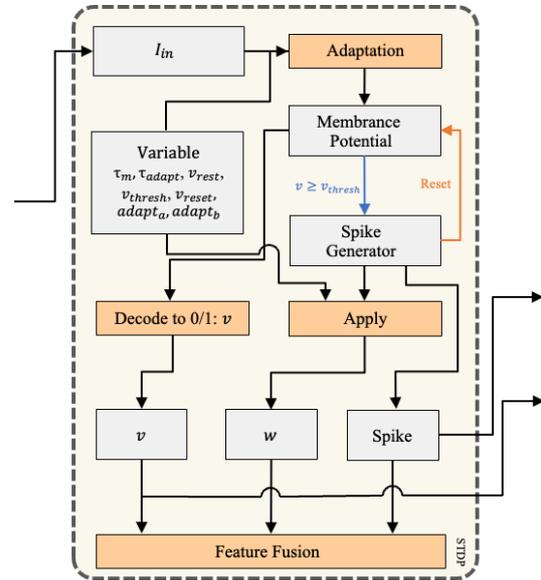


Figure 11: Structure of AdEX

そして、最終的なスパイクを

$$\text{if } V \geq V_{thresh}: \begin{cases} V \rightarrow V_{reset} \\ \text{emit spike} \end{cases} \quad (21)$$

として、発火の是非を判断した。

4.4 特徴抽出モジュールの実装

単純な特徴抽出モジュールを設計することで、神経細胞からの入力情報を失うことなくモデルに渡すことを目指した。データには David ら [7] が Neuron にてシミュレーションを行ったデータを用いた。

$$F = \phi(W_{in}X + b) \quad (22)$$

入力 $x \in \mathbb{R}^{\{\text{input_size}\}}$ に対して、線形変換を行う。

$$h^1 = W^1x + b^1 \quad (23)$$

ここで、 $W_1 \in \mathbb{R}^{\{\text{hidden_size} \times 2\} \times \text{input_size}}$, $b_1 \in \mathbb{R}^{\{\text{hidden_size} \times 2\}}$ の次元を持つ。次に、レイヤー正規化を行う。

$$\begin{aligned} h^2 &= \text{LayerNorm}(h^1) \\ &= \gamma \odot (h^1 - \mu) / \sqrt{(\sigma^2 + \varepsilon)} + \beta \end{aligned} \quad (24)$$

ここで、 μ は平均、 σ^2 は分散、 γ, β は学習パラメータである。次に、活性化関数

GELU を用いる。これは標準正規分布の累積分布関数を用いており、モデルが巨大であるほど効率的に正規化が可能である。

$$\begin{aligned} h^3 &= \text{GELU}(h^2) = h^2 \Phi(h^2) \\ &= h^2 \cdot \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{2}}} e^{-t^2} dt \right] \end{aligned} \quad (25)$$

その後 Dropout, 線形変換, Layer Normalization を再度行ったものをモデルの入力とした。

$$\begin{aligned} h_4 &= \text{Dropout}(h_3, p = 0.1) \\ &= h^3 \odot \frac{m}{(1-p)}, m \sim \text{Bernoulli}(1-p) \end{aligned} \quad (26)$$

$$h^5 = W^2h^4 + b^2 \quad (27)$$

$$\begin{aligned} y &= \text{LayerNorm}(h_5) \\ &= \gamma' \odot (h^5 - \mu') / \sqrt{(\sigma'^2 + \varepsilon)} + \beta' \end{aligned} \quad (28)$$

4.5 損失関数の定義

総損失関数を以下のように定義した。

$$\begin{aligned} L &= \lambda^1 L_{\text{spike}} + \lambda^2 L_{\text{soma}} + \lambda^3 L_{\text{dvt}} \\ &\quad + \lambda^4 L_{\text{temporal}} \end{aligned} \quad (29)$$

ここで、 λ は各損失関数の重みを表し、Epoch が進むごとに配分を変えることで各予測に対する適応性の向上を狙う。以降、正解を y , 予測を \hat{y} で表す。

L_{spike} にはバイナリクロスエントロピーロス (BCE Loss) を採用した。2 値分類が可能なたため、Spike に適すると考える。

$$\begin{aligned} L_{\text{spike}}(y_{\text{spike}}, \hat{y}_{\text{spike}}) \\ = - \sum (y \log(\sigma(\hat{y})) + (1-y) \log(1 - \sigma(\hat{y}))) \end{aligned} \quad (30)$$

ここで、 σ はシグモイド関数である。

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (31)$$

また、 $L_{\text{soma}}, L_{\text{dvt}}$ には平均二乗誤差 (MSE) (24) を採用した。

$$L_{\text{soma}} = \frac{1}{n} \sum (y_{\text{soma}} - \hat{y}_{\text{soma}})^2 \quad (31)$$

$$L_{\text{dvt}} = \frac{1}{n} \sum (y_{\text{dvt}} - \hat{y}_{\text{dvt}})^2 \quad (32)$$

L_{temporal} には Temporal consistency Loss を用いた。

$$\begin{aligned} L_{\text{temporal}} &= \frac{1}{T} \sum |\hat{y}_{\text{soma}}^t - \hat{y}_{\text{soma}}^{t-1}| \\ &\quad + \frac{1}{T} \sum |\hat{y}_{\text{dvt}}^t - \hat{y}_{\text{dvt}}^{t-1}| \end{aligned} \quad (33)$$

このように、時間変化による差分を計算しており、膜電位 y_{soma} や Dendritic Voltage Trace (樹状突起電圧) y_{dvt} は物理的制約により急激な変化が起こりにくい連続信号であるため、この生物学的な特徴を再現する為に Temporal consistency Loss を用いた。

4.5 評価メトリクスの定義

損失関数と同様に、それぞれの予測対象別に評価メトリクスを別途定義した。

スパイク予測の性能評価は AUC-ROC を用いた。TPR (True Positive Rate) と

FPR(False Positive Rate)の関係を描くROC 曲線(Receiver Operating Characteristic Curve)を用い、予測スコアから正答率を算出する。また、Soma 電位には説明分散 R を用いた。

$$R_{Soma}^2 = 1 - \frac{MSE(y_{soma}, \hat{y}_{soma})}{U_{y_{soma}}^2} \quad (34)$$

ここで U は不偏分散である。

DVT には相関係数を用いた。

$$\rho_{dvt} = \text{Corr}(y_{dvt}, \hat{y}_{dvt}) \quad (35)$$

5. 研究結果及び考察

研究結果を Figure.12~16 に示す。

Figure12 は、実際にモデルをシミュレーションして得られた神経活動である。上側が 600ms, 下側に拡大した 60ms の活動を示す。拡大されたグラフから分かるように、興奮性シナプス後電位に見られる特徴である数ミリ程度の電位変動が見られること、不規則な振動パターンを再現できていることから神経活動の特性をつかめていると考えられる。

Figure13~16 では Validation における Loss 及び Accuracy の推移を示す。

Figure14, 16 より Spike の Loss は 0.0062, DVT の Loss は 0.0008 とかなり収束が良いと考えられる。一方で, Spike の Accuracy は 76.69%と高くないことから, 評価メトリクス及び損失関数の最高が必要である。

6. 今後の展望

6.1 時間減衰の再考

現在, 生物学的自己注意メカニズムにおいて時間減衰を表すのに α 関数(式 2)を使用しているが, これは二重指数関数型モデル [8](式 36)において立ち上がり時定数 τ_r (シ

ナプス後電流の立ち上がりにかかる時間)と減衰時定数 τ_s (神経伝達物質の減少量)が等しい時に成り立つものであり, 推論上神経伝達物質のシミュレーションデータがない為用いた。今後神経動態シミュレーションにてこれらの要素も考慮したモデルを作成し, モデルに帰属させたい。

$$A = \frac{\tau_d}{\tau_d - \tau_r} \cdot \left(\frac{\tau_r}{\tau_d}\right)^{\frac{\tau_r}{\tau_d - \tau_r}} \quad (36)$$

6.2 偏微分系の導入

モデルの多くの部分で微分方程式を用いており計算オーダーが大きくなっている。

$$\tau_{ion} \sim \mathcal{O}(1)$$

$$\tau_{stdp} \sim \mathcal{O}(B * T * N * M)$$

$$\tau_{neuron} \sim \mathcal{O}(1)$$

$$\tau_{SNN} \sim \mathcal{O}(B * T * N * M + H)$$

$$\tau_{attn} \sim \mathcal{O}(B * H * T * T)$$

$$\tau_{trans} \sim \mathcal{O}(B * H * T * T)$$

これより, モデル全体での \mathcal{O} は

$$\tau_{csnt} \sim \mathcal{O}(B * T * (N * M + H * T))$$

と, 微分方程式を用いている部分と Transformer 関連で特に計算オーダーが大きくなっていることがわかる。これらの式をまとめる上で偏微分系を用いることで計算コストの削減が可能であるので, 実用に向けて最適化を行なっていきたい。

6.3 Spike 発火の改良及び生理活性の利用

Spike 発火について実際の生理活性及び化学反応にて取りうるエンタルピー等を用いることで, 人間の脳で表現できるレベルを拡張することを目指す。これにより細胞活動がより豊かな表現が可能になると考えられ, 人間の活動との紐付けが可能になると考えられる。

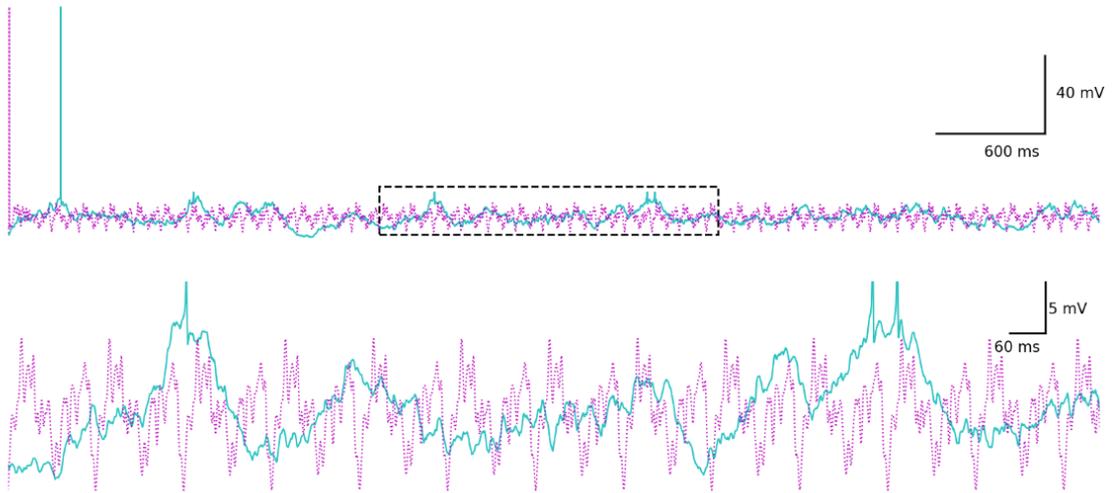


Figure 12: The Simulation of Neural Activity

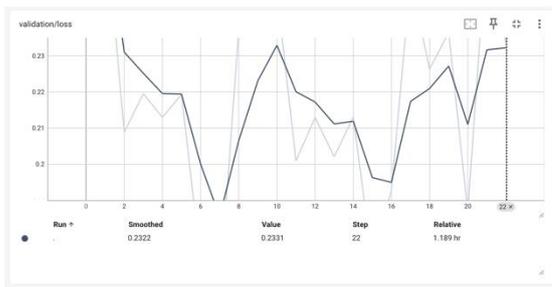


Figure 13: Validation/All Loss

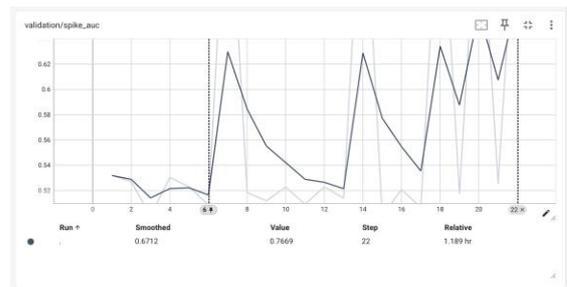


Figure 15: Validation/Spike Accuracy

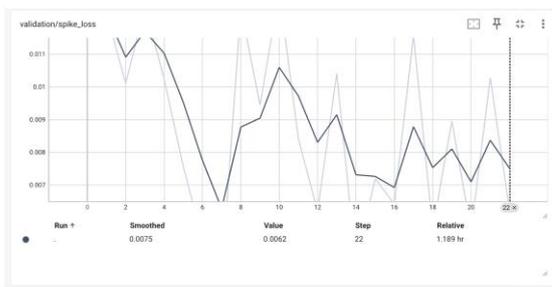


Figure 14: Validation/Spike Loss

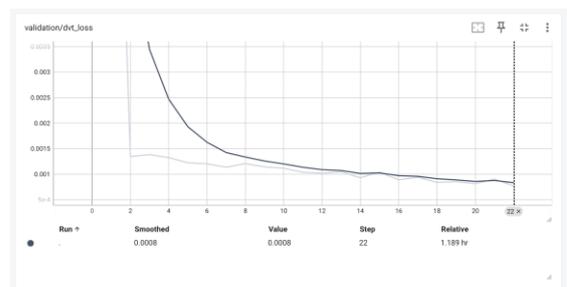


Figure 16: Validation/DVT Loss

6.4 外部入力の利用

昨年の研究などで用いた脳活動を特徴量として用いることで、実際の神経細胞の活動の推論を目指す。現在 HCI 分野にて脳波と行動の関連付けを行なっている。第一歩として Eye Tracking による人間の注視機能と脳活動の関連付けを行なっている。

また、人間の脳活動が人によらず一定であるという仮説を立て、個人によらず脳活動を定量化することにより、昨年の感情推論技術への統合を目指す。

7. 謝辞

本研究において、情報科学の達人プログラムより計算資源 ABCI の提供、MATLAB

の購入など、様々なサポートをしていただきました。前期メンターの大阪大学の浦西友樹さんと情報学研究所の杉山麿人さん、後期メンターの筑波大学の平木剛史さんと慶應義塾大学の鳴海紘也さんにこの場を借りてお礼を申し上げます。

8. プロジェクトの公開及び質問

本プロジェクトのソースコード等のアセットを学習目的で公開している。また、本論文で不明瞭な点やソースコードに関する質問は GitHub アカウント(@Tps-F)上に記載しているメールアドレスに送信して頂けると幸いである。



<https://github.com/Tps-F/CSnT>

9. 参考文献

[1] Gao, Z., Cui, X., Wan, W., Zheng, W., & Gu, Z. (2021). ECSMP: A dataset on emotion, cognition, sleep, and multi-model physiological signals. *Data in Brief*, 39, 107660. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107660>

[2] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *arXiv preprint arXiv:1706.03762*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>

[3] Rall, W. (1967). Distinguishing theoretical synaptic potentials computed for different soma-dendritic distributions

of synaptic input. *Journal of Neurophysiology*, 30(5), 1138–1168. <https://doi.org/10.1152/jn.1967.30.5.1138>

[4] Bi, G.-q., & Poo, M.-m. (1998). Synaptic modifications in cultured hippocampal neurons: Dependence on spike timing, synaptic strength, and postsynaptic cell type. *Journal of Neuroscience*, 18(24), 10464–10472. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.18-24-10464.1998>

[5] HODGKIN AL, HUXLEY AF. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *J Physiol*. 1952 Aug;117(4):500-44. doi: 10.1113/jphysiol.1952.sp004764. PMID: 12991237; PMCID: PMC1392413.

[6] Brette, R., & Gerstner, W. (2005). Adaptive exponential integrate-and-fire model as an effective description of neuronal activity. *Journal of Neurophysiology*, 94(5), 3637–3642. <https://doi.org/10.1152/jn.00686.2005>

[7] Beniaguev, D., Segev, I., & London, M. (2021). Single cortical neurons as deep artificial neural networks. *Neuron*, 109(17), 2727–2739. [10.1016/j.neuron.2021.07.002](https://doi.org/10.1016/j.neuron.2021.07.002)

[8] A. Destexhe, Z. F. Mainen and T. J. Sejnowski, "An Efficient Method for Computing Synaptic Conductances Based on a Kinetic Model of Receptor Binding," in *Neural Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 14-18, Jan. 1994, doi: 10.1162/neco.1994.6.1.14.

みまもりコンパス - 認知症高齢者のための発見共有システム

2年C組 水野 太陽
指導教員 鵜飼 哲真

1. 要約

本研究の内容は、認知症高齢者の徘徊や行方不明から早期発見につなげるシステム「みまもりコンパス」の開発である。QRコードを活用することで認知症高齢者の早期発見につなげ、地域社会全体で支える新たな社会モデルを目指す。

キーワード

認知症高齢者 徘徊 発見共有システム QRコード Next.js Firebase Vercel

2. はじめに

日本では、認知症が原因で行方不明になる高齢者が右肩上がりに増えており、現状は、約2万人にもものぼる^[1] (Fig. 1)。高齢化社会において、認知症は誰にとっても身近な問題だ。実際に認知症が原因で事故が起きている。ある日、家族が目を離した隙に認知症高齢者が外に出て、交通事故に遭って命を落としたケースや、介護施設から行方不明になり、公園で亡くなっているのが発見されたというような痛ましい事故が起きている

このような問題を解決するためには地域社会全体で認知症高齢者を支え、その家族が安心安全に暮らせるようにする新しい仕組みが必要だ。

そこで、私は「みまもりコンパス」を開発することにした。

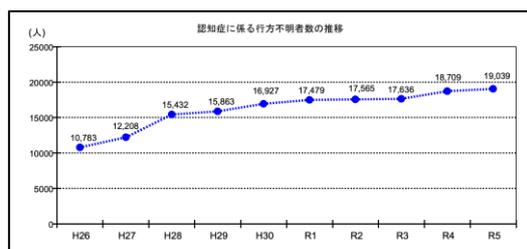


Fig. 1 認知症行方不明者の推移

3. 関連研究

3.1. 認知症高齢者の支援システムの現状

認知症高齢者の事故やトラブルを未然に防ぐために、様々な支援システムやデバイスが開発されている。主な例を以下に示すとともに課題を説明する。

① GPS 端末

概要：GPS 端末を活用することで、認知症高齢者の現在地をリアルタイムで把握できる。事前に家族が高齢者にGPS 端末を携帯させることで、行方不明時に迅速な捜索が可能になる。

利点：GPS を利用することで、高齢者の現在地をリアルタイムで確認でき、迅速な対応が可能になる。徘徊が発生した際にも、移動経路を追跡できるため、早期発見に役立つ。

課題：デバイスを常に携帯しておく必要があり、認知症高齢者の負担になる。

多くのデバイスが契約を必要とする。

② 福祉サービスの QR コード

概要：QR コードを印刷した名札やカードを認知症高齢者に携帯してもらい、万が一の徘徊や行方不明時に発見者がスマートフォンで読み取ることで、身元情報を確認できるシステム。家族の連絡先や健康状態、緊急時の対応方法などの情報を登録することで、適切な支援につなげることができるようになる。

利点：QR コードをスキャンするだけで、発見者が本人の基本情報を確認できる。住所や家族の連絡先、持病の有無などの情報をすぐに把握でき、適切な対応が取れるようになる。

課題：家族と発見者の連絡機能が不足しており、リアルタイム性に欠ける。

3.2. 課題の整理

上記の例から、既存システムの課題が明確となった。

- ・GPS 端末はコストが高く、利用者にかかる負担がかかる

- ・QR コードを利用したサービスは、連絡機能や情報の動的な管理が不十分

本研究では、これらの課題を解決する新たなシステムを開発する。

4. 設計と実装

4.1. システムアーキテクチャ

みまもりコンパスのシステム全体の設計を行った。機能を以下に説明する。

- ・QR コードの発行

認知症高齢者の情報と紐づいた QR コードを発行する機能 (Fig. 4)

- ・QR コード読み取り後の発見報告機能

実際に、認知症高齢者の発見者が読み取ると発見報告を行えるようにする機能

- ・SNS を活用した検索依頼機能

認知症高齢者が行方不明になった際に家族が SNS に地域ごとの検索依頼を出せる機能 (Fig. 5)

- ・発見報告後の連絡機能

発見者がみまもりコンパス上で認知症高齢者の家族と連絡を取れる機能 (Fig. 7)

- ・発見通知機能

本人が発見されると、認知症高齢者の家族にメールに通知される機能 (Fig. 8)

これらの機能は、発見者もしくは認知症高齢者の家族によって利用できる機能が異なる。

(A)：認知症高齢者の家族向けの機能

(B)：発見者向けの機能



Fig. 2 認知症高齢者の情報登録画面(A)

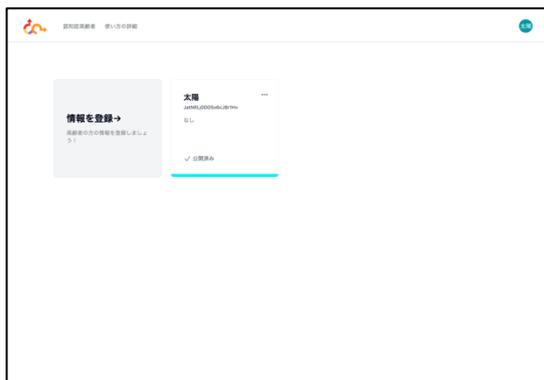


Fig. 3 ダッシュボード(A)



Fig. 4 QR コード発行画面(A)



Fig. 5 Xの検索依頼ページ(A)



Fig. 6 徘徊前の場所を見るページ(B)

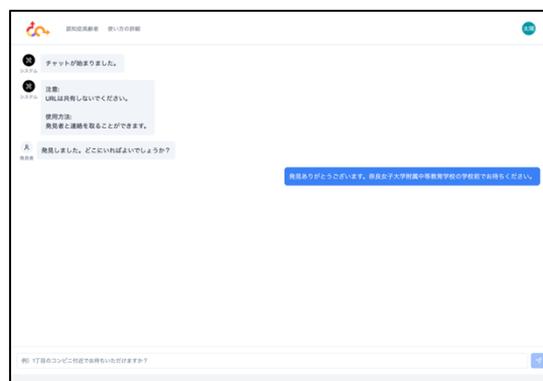


Fig. 7 連絡ページ(A, B)

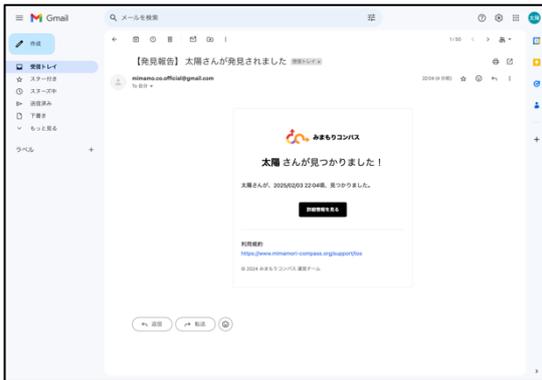


Fig. 8 発見通知の様子(A)

4.2. システムの実装

みまもりコンパスは、フレームワークに Next.js (TS)^[2]、UI に Tailwind CSS^[3]を用いて開発した。

5. ユーザーシミュレーション

5.1. 概要

みまもりコンパスの有効性を確認するために、サイエンス研究会でシミュレーションを実施した(Fig. 9)。このシミュレーションでは、以下のように3つの役割を決め、実際の運用を想定した検証を行った。

① 認知症高齢者役

- ・ QR コードを装着して、校内を徘徊
- ・ 発見者が QR コードを読み込む

② 発見者役

- ・ 適当な場所で認知症高齢者を発見
- ・ 簡単に報告が可能かを確認

③ 認知症高齢者の家族役

- ・ 通知を受け取り、発見地点を確認
- ・ 発見者とのスムーズな連絡が可能かを確認



Fig. 9 ユーザーシミュレーションの様子

5.2. 検証結果

- ・ QR コードのデザインや位置によって発見者の気づきやすさが変わることが判明した。
- ・ 発見報告後、みまもりコンパス上で発見者と連絡できるのは非常に有用であるとわかった。

5.3. ユーザーのフィードバック

ユーザーシミュレーションに参加したサイエンス研究会のメンバーのフィードバックを以下に示す。

- QRコードを手軽に印刷し、すぐに利用を始められるのは、とても便利！
- Xを利用した検索依頼機能で、他の人に周知してもらえて、どこでいなくなったかがわかるから安心！
- 地域の参加意識がもっと高まる仕組みが必要ではないか？
- 見つかったら、すぐにメールが来るから、認知症高齢者の家族も安心できると思う。

5.4. 考察

ユーザーシミュレーションを通して、みまもりコンパスは迅速な連絡手段の提供と、発見後の行動支援において、十分な効果を発揮することが確認できた。

また、発見者役の人物がQRコードを活用して高齢者の身元を特定することに成功した。これにより、従来の方法で必要とされていた警察への通報や手続きの手間を簡略化し、家族との連絡をスムーズに行えたのが大きな成果である。

一方で、システムの扱いやすさという面では、UI/UXの更なる改善が求められると感じた。

6. 今後の展望

本研究で開発した「みまもりコンパス」は、ユーザーシミュレーションの結果、認

知症高齢者の早期発見や安全確保といった面で効果を発揮することが確認できた。しかし、さらに効果的にシステムを活用するためには、地域全体での協力体制の構築が重要な課題だ。地域のつながりを活用することで、認知症高齢者をより多くの人々が見守ることが可能になる。そのためには、ボランティア活動や自治体との連携を強化する必要がある。地域の協力を得ることで、発見者がシステムをより利用しやすくなり、認知症高齢者の行方不明のリスクを大幅に軽減することができる。このような地域全体の支援を受けて、みまもりコンパスの効果を広げ、社会全体で認知症高齢者を支える仕組みを拡大していくことが今後の目標だ。

7. 参考文献

- [1] 警察庁生活安全局人身安全・少年課.
「令和5年における行方不明者の状況」
(令和6年7月). 警察庁.
[https :
//www.npa.go.jp/safetylife/seianki/fumei/R05yukuefumeisha.pdf](https://www.npa.go.jp/safetylife/seianki/fumei/R05yukuefumeisha.pdf)
- [2] Next.js Docs 14.2.14
[https : //nextjs.org/docs](https://nextjs.org/docs)
- [3] Tailwind CSS Docs 3.4.1
[https : //tailwindcss.com/docs](https://tailwindcss.com/docs)
- [4] Firebase Docs 10.13.1
[https : //firebase.google.com/docs?hl=ja](https://firebase.google.com/docs?hl=ja)

9. 最後に

みまもりコンパスは、既にWEB上に公開されており、皆様に試用していただくことが可能です。システムのさらなる改善に向けたご意見やフィードバックをいただけることをお待ちしております。



みまもりコンパス

<https://www.mimamori-compass.org/>



謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々から貴重なご支援とご指導をいただきました。まず、私の研究を支えてくださった、未踏ジュニアメンターの尾藤正人様に深く感謝申し上げます。

また、みまもりコンパスのユーザーシミュレーションに協力してくださった認知症高齢者役、発見者役、そしてその家族役の皆様にも感謝いたします。皆様のおかげで実際の利用場面に即した貴重なデータを収集することができました。

最後に、サイエンス研究会情報班顧問の鵜飼哲真先生に深く感謝申し上げます。

様々な段差を越える跳躍歩行ロボット

2年C組 松野一輝

指導教員 田中 海

1. 要約

本研究では跳躍して移動する「跳躍歩行ロボット」を製作する。ワンボードマイコン Arduino を使用して連続回転サーボモーターを制御し、回転運動を直線運動に変える機構を組み込むことで、跳躍を試みた。

2. 研究の背景と目的

私はこれまでの研究で、周囲からの衝撃に強く、耐久性の高いロボットとして「球体型ロボット」を開発した^[1]。この球体型ロボットは壊れにくい反面、凹凸や坂道などを超えることが困難であった。そこで、凹凸を飛び越えることができる跳躍ロボットの製作を試みた。

3. 研究の過程について

ロボットの跳躍の動きを実現するため、様々な試作を行った。

<試作1> 間欠歯車式

(1) 機構

間欠歯車^[2]を使い、噛み合っているときは脚棒を縮め、外れたときに力を解放することで、跳躍する機構を作った(図1)。跳躍の動力源には輪ゴムを使用した。



図1

(2) 制御

Arduino Uno^[2]とL298N^[3]モータードライバを使い、DCモーターを制御して(1)の機構に組み込んだ。プログラムは1秒ごとに回転と停止を交互に実行するようにした。

(3) 結果

DCモーターのトルクが足りず歯車を回すことができなかった。

<試作2> 開脚ゴム式

(1) 機構

向かい合わせた関節を、ゴムで左右に伸縮するような機構を作った(図2)。先端についている紐をサーボモーターで引っ張って足の伸び縮みを行い、跳躍するようにした。



図2

(2) 制御

試作品1と同じくArduino Unoで制御し、SG90⁴のサーボモーターで駆動させた。サーボモーターは0°から180°まで30°間隔で引っ張り、180°になったら一気に解放するようにプログラムした。

(3) 結果

上下運動させることはできたが、床反力が足りず、跳躍することはできなかった。ゴムを増してみるとサーボモーターのトルクが足りず動かなくなった。

<試作3> カム式

(1) 機構

カム機構を応用してカタツムリのような円盤を回転させて、ゴムを一気に解放させる機構を作った(図3)。



図3

(2) 制御

無制限に回転する連続回転サーボモーターを機構に組み込み、モータードライバなしで連続回転ができるようになった。プログラムは延々と回転し続けるだけのシンプルなものにした。

(3) 結果

試作品1と同様に、モーターのトルクが足りず、動かなかった。手動で動かして

も、床反力が足りなかった。

<試作4> 開放式

(1) 機構

連続回転サーボモーターのリールで糸を引いてゴムを引き伸ばし、別のサーボモーターで穴をロックしてから、リールを完全にゆるめたときにロックを解除して跳躍力を開放する機構を作った(図4)。



図4

(2) 結果

連続回転サーボモーターがゴムの負荷に耐えきれずに破損してしまった。そのため途中で制作を断念した。

<試作5> 間欠スコッチヨーク式I

(1) 機構

間欠スコッチヨーク機構を応用し、脚棒を素早く上下させる機構を作った。

(2) 制御

連続回転サーボではない普通のサーボを左右に動かして回転運動を再現した。

(3) 結果

ゴムを使わなかったので比較的少ないトルクで駆動させることができ、初めて動くことができた。また2, 3mmほど跳躍することができた。

＜試作6＞ 間欠スコッチヨーク式Ⅱ

(1) 機構

試作品4の機構にギアボックスを組み込んだ（図5）。また自重を持ち上げやすくするためにゴムを入れた。

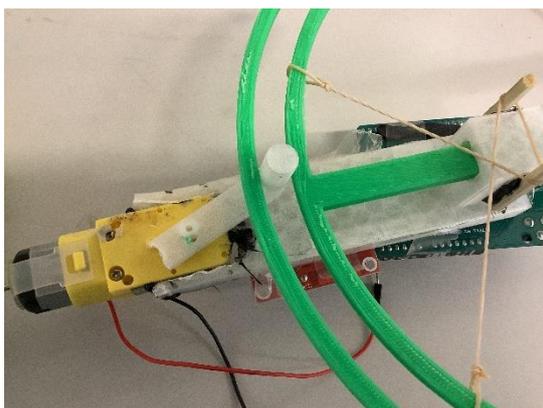
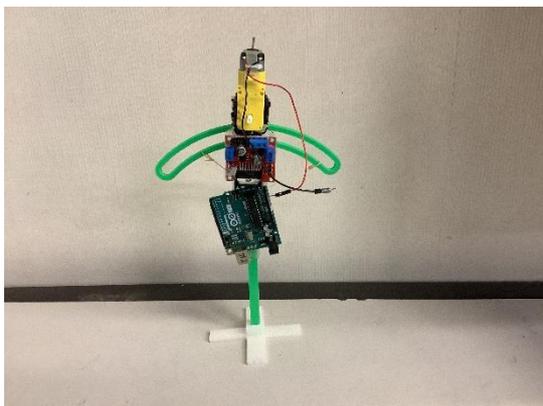


図5

(2) 制御

モータードライバでは電力不足のため、外部電源から直接モーターに給電した。

(3) 結果

電圧を上げたことで動きやすくなり、3～5cmほど跳躍することができた。

4. 結果と考察

間欠スコッチヨーク機構を使って跳躍歩行するロボットを製作することができた（試作品6）。しかしながら3～5cmほどしか跳躍できなかったため、越えられる凹凸

に限りがあった。また姿勢制御はまったく行っていないので、2、3回跳躍すると転倒してしまっ

5. 今後の展望

機構の改良をして、10cm以上跳躍できるようにしたい。また、ジャイロを回して倒れにくくしたいと考えている。さらに脚を正四面体の形状に組むことで、倒れてもそこから動き続けられるようにしたい。

6. 試作に用いた部品

1) 間欠歯車

3Dプリンタで作成した。

素材：PLA・ABS

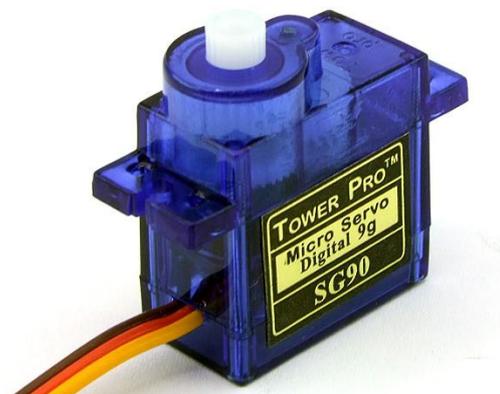
2) Arduino Uno



3) L298N



4) SG90



謝辞

本研究において、顧問の鵜飼先生、田中先生に多大なご指導を賜りました。そして同研究会の先輩方に多くに助言を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。

7. 参考文献

- [1] 松野一輝(2024). 「二輪で駆動する球体型ロボットの制作」. 奈良女子大学附属中等教育学校 2023年度SSHサイエンス研究会生徒論文集.
- [2] RICOH. “NHK BSプレミアム「魔改造の夜」 “Rコー” 開発マシンに迫る” . https://jp.ricoh.com/technology/40days_challenge, (参照 2024年) .
- [3] 大倉康弘. “このシンプルなロボットは、将来的に自由の女神より高く跳べる！(ナゾロジー)” . goo ニュース. 2024. <https://news.goo.ne.jp/article/nazology/world/nazology-156049.html>, (参照 2024年) .
- [4] n_shinichi. “ジャンプ機構のテストを始めた。” . n_shinichi's blog. 2022. <https://n-shinichi.hatenablog.com/entry/2022/10/14/224719>, (参照 2024年) .

難聴の人も楽しめるピアノ Spot の開発

2年C組 森田 湊

指導教員 田中 海

1. 要約

本研究では、難聴の人でもピアノの音色を楽しめる電子ピアノ（以下「Spot」 ※sound piano of transcends の略）の開発に取り組んだ。難聴を患っている人は音が聞こえない、または聞こえにくいいため、振動によって音を伝えようと考えた。そこで、Arduino を用いて振動モーターから出る振動で音を伝えようと考えた。また、聴者でも聾者でもピアノを楽しめるように、音と振動のどちらも出力しようと考えた。さらに、いつでもどこでも Spot を楽しんでもらいたいため、鍵盤の数を減らし、持ち運びができるようにした。

キーワード：電子ピアノ、振動モーター、Spot、Arduino

2. 研究の背景と目的

僕は自分が通っている中学校（奈良女子大学附属中等教育学校）での学園祭で聾学校の人たちが訪れた際、耳が聞こえないことの大変さを知り、このような方たちにもピアノの面白さ、楽しさを伝えたいと思った。僕は、幼いころからピアノを習っていたため、ある程度ピアノの知識があり、また、ピアノを演奏する面白さや楽しさを十分わかっているため、Spotの開発に取り組んだ。しかし、ピアノの構造や難聴についての知識があまり無かったため、その知識を得ようと考えた。

調べていくと、ピアノのアクション機構（鍵盤を押すとハンマーが動く機構）の中の一つに、「ダブルエスケープメント機構」というものが存在することが分かった。これは、レペティションレバー（ハンマーが再び完全に戻る前に再び発射できるようにする部品）によって、鍵盤を少し戻しただけで再度ハンマーが動くため、素早い連打が可能になる機能だ。しかし、この機能はグラン

ドピアノのみにしか搭載されていないため、Spotにもこの機能を実装しようと考えた。また、Spotはよりピアノに近い楽器にしたいため3Dプリンターを用いてハンマーの部分を作成しタクトスイッチをたたくような仕組みにしようと考えた。

難聴について調べてみると、難聴には、外耳や中耳、内耳、脳などの異常がある部位の違いによって、伝音難聴、感音難聴、混合性難聴の3種類あることが分かった。伝音難聴は、外耳や中耳に異常があり、音が聞こえにくい状態のこと。感音難聴は、内耳、蝸牛神経、脳に異常があり、音だけでなく言葉も聞こえづらくなる状態のこと。混合性難聴は伝音難聴と感音難聴が混在した状態のこと。また、難聴の程度は4段階で分けられ、軽度、中等度、高度、重度があることが分かった。

このような様々な種類、程度の難聴の方たちを救うために振動によって音のメロディを伝える、音の壁を越えたピアノ、

Spot の開発に取り組んだ。

騒音の程度	聴力レベル (HL)	日常生活での聞こえ方の状態
正常		● 特に不便を感じない
軽度	25dB	● しばしば聞き返すことがある ● 小さな声やささやき声が聞き取りにくい
中等度	40dB	● テレビの音が大きすぎると注意される ● しっかり聞こえていないのにわかったふりをする
高度	70dB	● 大きな声でないと聞き取りにくい ● 電話の音が聞き取りにくい
重度	90dB	● 大きな声で話しかけられてもしっかり聞こえない ● 電話の着信音や車のクラクションが聞こえにくい

3. 研究方法

2 で述べた通り, Spot は電子ピアノだが, グランドピアノのような押し心地にしようと考えている。そのため, 電子ピアノを土台にして, そこに「ダブルエスケープメント機構」と振動モーターを実装することにした。

3. 1 ボタンを押すと振動モーターが動く機能の再現

3. 1. 1 プログラム

PWM 出力で振動の大きさを変え, タクトスイッチを押すと振動が動くプログラムを作成した。

```
const int motor_pin = 9;
```

```
int piano_pin = 10;
int val;
void setup() {
  pinMode(piano_pin, INPUT);
  pinMode(motor_pin, OUTPUT);
}
void loop() {
  val = digitalRead(piano_pin);
  if (val == LOW) {
    analogWrite(motor_pin, 255);
  } else {
    analogWrite(motor_pin, 0); }
}
```

プログラムの中に「255」と書いてあるが, これにより音の強さを変えることができ, 255 は最大の値である。この値によって, 様々な大きさの振動を出せるようにした。

3. 1. 2 構造

Arduino を用いて, 作成した。

準備物一覧↓

- Arduino UNO
- タクトスイッチ (1 個)
- ジャンパー線 (5 本)
- 振動モーター (1 個)
- typeB ケーブル (1 個)
- ブレッドボード (1 個)

手順 1: ブレッドボードにタクトスイッチを埋める。

手順 2: タクトスイッチの右端上と GND をジャンパー線で繋ぐ。

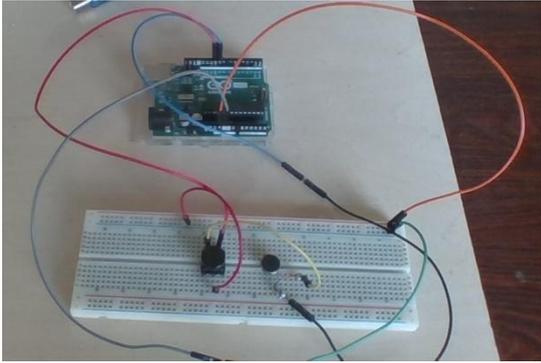
手順 3: タクトスイッチの左端下と振動モーターの一極側をつなぐ。

手順 4: 振動モーターの+極側と Arduino の 9 番ピンを繋ぐ。

手順 5: タクトスイッチの右端下と Arduino の GND をジャンパー線で繋ぐ。

3. 1. 3 結果

タクトスイッチを押すと振動モーターが動き振動を感じる事ができた。



(図 2 : タクトスイッチで振動を鳴らす模型)

3. 2 鍵盤の作成

ピアノのように木で製作するのは難しいため、3Dプリンターを用いて製作した。白鍵と黒鍵と鍵盤のハンマー部分を作るための心棒をモデリングし、それぞれ色のフィラメント (PLA) で作成した。



(図 3 : 白鍵部分)



(図 4 : 黒鍵部分)



(図 5 : 鍵盤を支える心棒)

3. 3 ハンマー部分の作成

3. 2 で作成した鍵盤におもりを取り付け鍵盤を押したときにグランドピアノのような押し心地を再現した。鍵盤の先の真上に図 2 の部分を 1 オクターブ分並べたものを設置し、鍵盤を置くとタクトスイッチに当たり、振動がなるような仕組みにした。ピアノの土台には木の板を置き、その上に鍵盤を置いて、タクトスイッチを押せるようにした。さらに、木の板と鍵盤の間に緩衝材を置くことで鍵盤を押したときの衝撃を吸収できるようにした。

4. 結果

- ・振動モーターを用いて、振動の大きさを変えたり、小さくしたりして、難聴の人にも聞こえることのできる装置を作ることができた。
- ・3D プリンターを用いて、鍵盤を作成し、感触がピアノに近いものを作成することができた。
- ・ハンマー部分の作成を行ったことで、より本物のピアノに近い押し心地を再現することができた。

5. 今後の展望

① 鍵盤の増量

今のままでは白鍵と黒鍵が 1 オクターブ分しかなく十分な演奏ができないため、3 オクターブに増量しようと思っている。

② 点字の導入

難聴の人にもピアノの楽しさを感じてもらうためだけではなく、様々な障がいを持っている方にも楽しんでもらいたいため、鍵盤の押す部分に音の文字を表す点字を付け、視覚障がい者の方たちにもピアノ楽しんでもらいたいと考えている。

③ 取り外し可能なペダルの作成

ピアノには音のニュアンスが微妙に変わる 3 つのペダルがある。これを取りつけることによってより高度な演奏ができるため実装したいと考えている。しかし、Spot は持ち運びができるピアノのため、ペダルをどこでも使えるように、取り外しができるようにしようと考えている。

④ メトロノームの内臓

この機能は市販の電子ピアノには実装されているが、Spot には実装されていないため取り付けようと考えた。メトロノームはピアノの練習ではテンポをとるときには必須なため、Spot には必要だと考えた。

⑤ 鍵盤の素材を木に変える

今回は 3D プリンターで鍵盤を作成した

が、それでは素材が軽く、また「ダブルエスケープメント機構」が作りにくかったため、次は木で鍵盤を作り、機構を完成しようと考えている。

6. 参考文献

[1] 「電子ピアノで便利な機能 7 選！」電子ピアノで便利な機能 7 選 PhonimMusic

[2] 「アップライトピアノとグランドピアノの違い② 鍵盤タッチの違い」アップライトピアノとグランドピアノの違い② 鍵盤タッチの違い | 世界最大級のピアノ販売モール グランドギャラリー | 中古ピアノ販売, 中古グランドピアノを購入するならグランドギャラリー愛知 東京

謝辞

顧問の田中先生、また、同研究会の諸先輩方にも様々なアドバイスをいただきました。深くお礼申し上げます。

クリスマスピラミッドの設計要件

2年B組 南島 怜子

指導教員 田中 海

1. 要約

本研究では、ドイツの装飾的燭台のクリスマスピラミッドの機構部を作り、ろうそくの上昇気流の力が回転の力に変わる様子について検討した。プロペラの枚数・角度、ろうそくの本数を変えて実験を行い、結果プロペラの枚数とろうそくの本数が多く、角度が小さいものがろうそくの上昇気流を1番多く回転の力に変えることができるとわかった。

キーワード:クリスマスピラミッド・上昇気流・ろうそく・火・プロペラ

2. はじめに

「クリスマスピラミッド」は、ドイツのエルツ山地の民俗と文化に根付いた、クリスマスのデコレーションの一種である。

「クリスマスピラミッド」は中央にメリーゴーラウンド状の部品がついており、ろうそくに火がともされると、ろうそくの火によって起きる上昇気流でその部品の先端についた回転部が回る仕組みである。

私はこの「クリスマスピラミッド」を制作したいと考え、そのためにプロペラやろうそくの長さなど、「クリスマスピラミッド」の機構部分の設計要件を検討した。

3. 方法

3-1. 土台の制作

(1)材料

9mm厚の板材とφ10の丸棒100mmを四本、釘を8本とM4の六角穴付きボルトの長さ10mmを1本用意した。

(2)制作

9mm厚の板からφ20の円盤とφ10の円盤を切り出しそれぞれ中心にφ5とφ2.5の穴を開ける。4本のφ10の丸棒をφ20の円盤の中心から50mmのところ

に等間隔に釘で打ち付け4本の丸棒の上にφ10の円盤の中心をφ20の円盤の中心に合わせて、釘で打ち付ける(図1)。



図1. 制作した土台

プロペラはφ2の真鍮の棒250mmの一方の先端をとがらせ、もう一方をプロペラと固定して、M4の六角穴付きボルトの六角穴にとがらせた先端を入れて使う。

3-2. 実験方法

3-1で作った土台とそれぞれのプロペラで、ろうそくの本数を1,2,3,...,6本と増やしていき、それぞれ回転が安定してから30秒間の回転数を数えて結果をまとめた。

4. 実験

4-1. 4枚羽プロペラ

初めに4枚羽のプロペラ(図2)を作り、実験を行った。ろうそくを1,2,3,...,6本と増やしていきプロペラが回転するかを観察

したが、ろうそくを6本まで増やしても回らなかった。



図2. 制作した4枚羽プロペラ

4-2. 8枚羽プロペラ 53°

4-1の実験結果から、ろうそくの上昇気流を受けるには羽部分の面積が少なかったのではないかと考え、羽の枚数を増やして8枚の羽にした。制作方法を図3と図4に、完成写真を図5に示す。4枚のときと同様にろうそくを1,2,3,⋯,6本と増やしていきプロペラが回るかを観察したが、6本まで増やしても回らなかった。

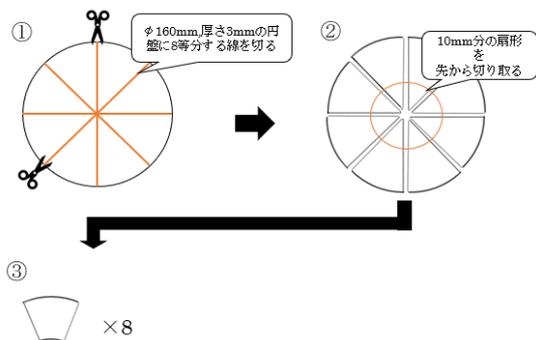


図3. 羽の作り方

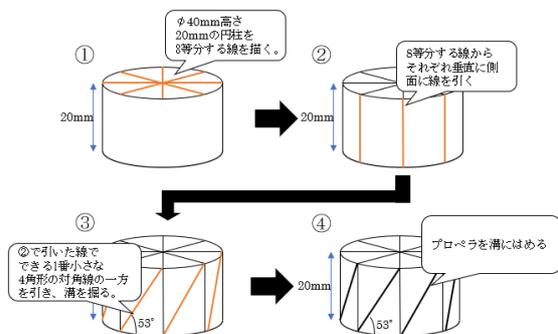


図4. 8枚羽プロペラ 53° の付け根の作り方



図5. 制作した8枚羽プロペラ 53°

ろうそくの火とプロペラの距離に問題がある可能性を考えて、ろうそくの火を近づけるため、ろうそくを「ダルマ」から「3号」という長いものに変えてみたが、回らなかった。

4-3. ろうそくの上昇気流の観察

4-2でもプロペラを回すことはできなかったので、ろうそくの上昇気流はどのようなものかを考え直してみることにした。

ろうそくの上昇気流は範囲が広くプロペラを簡単に回せるくらいの力があると考え、それを可視化するため、250mm×250mm×350mmの発泡スチロールの箱の中に線香の煙を満たして、ろうそくを入れて観察した。するとろうそくから真上に細く線香の煙を押し上げる気体の柱がわずかながら観察できた(図6)。



図6. 上昇気流の動き

実験中に箱の天板に直径40mmの穴が開きかけた(図7)が、穴が開くには非常に長い時間がかかっていた。ろうそくの上昇気流は想像以上に細く、弱いと予想し

た。上記のことからプロペラは細い気流を受け止められていないと仮説を立てた。仮説の概念図を図8に示す。



図7. 上昇気流によって形成された窪み

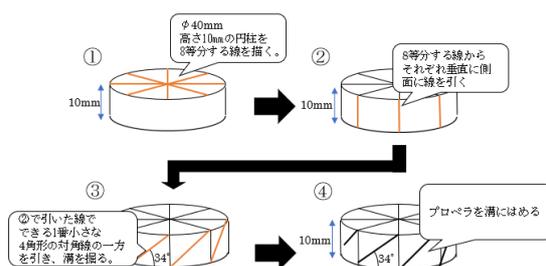


図9. 8枚羽プロペラ 34°
の付け根の作り方

仮説の概念図

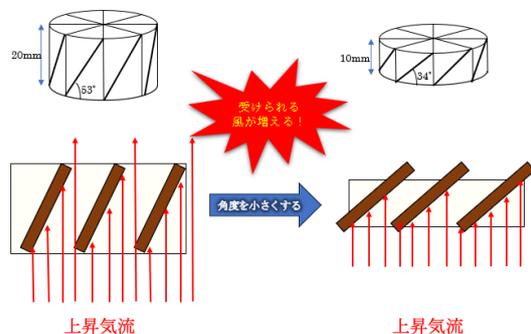


図8. 仮説の概念図

4-4. 8枚羽プロペラ 34°

細い上昇気流を受けるために、プロペラの取り付け角度を小さくすることでプロペラ同士の隙間を減らした。制作方法を図9に、完成写真を図10に示す。4枚、8枚の53°のときと同様にろうそくの本数を1,2,3,...,6本と増やしていくと、3本の時から回りはじめ、ろうそくの本数を増やすごとに回転速度が上昇した。



図10. 8枚羽プロペラ 34°

4-5. ろうそくの長さ

34°プロペラでも、ろうそくの長さを長いものにして実験をした。するとろうそくを6本まで増やしてもプロペラは回転しなかった。

5. まとめ

表1に30秒あたりのプロペラの回転数を示す。回転したのは8枚羽 34°のろうそくの短い場合でかつ3本以上で、プロペラは限られた条件でのみ回ることが分かった。

表1. 30秒あたりのプロペラの回転数

ろうそくの本数	1	2	3	4	5	6
プロペラの種類	本	本	本	本	本	本
4枚羽	×	×	×	×	×	×
8枚羽 53° ろうそく短	×	×	×	×	×	×
8枚羽 53° ろうそく長	×	×	×	×	×	×
8枚羽 34° ろうそく短	×	×	9	11	16	20
8枚羽 34° ろうそく長	×	×	×	×	×	×

6. 今後の展望

4-5の実験で、ろうそくの長さが長いとプロペラが回らなかったことから上昇気流がどこから始まるのかを把握する必要性を感じた。煙での上昇気流の可視化には限界があったので、今回の仮説を裏付けるためにもサーモグラフィや気流可視化装置等を使用した実験を行ってみたい。また、室温との関係についても検討したい。真鍮の棒の先端の研磨具合による摩擦の影響や、メリーゴーラウンド状の飾りをつけたときの重さの影響がある場合、それによってろうそくの必要な本数などに変化があるかについても今後調べていきたいと考えている。成功した実験用クリスマスピラミッドを図11に示す。



図 11. 実験用クリスマスピラミッド

7. 参考文献

- 1) クリスマスピラミッド - Wikipedia
- 2) 「ろうそくはなぜ燃え続けるの？簡単に解説！」 <https://www.science-kido.com/single-post/candle/>

謝辞

本研究を行うにあたり、サイエンス研究会顧問の田中海先生にご指導を賜りました。また、担任の石賀勇樹先生にはプロペラの角度の計算にあたって三角関数のグラフを用いての角度の計算方法について講義していただきました。そして、永守コレクションギャラリーの橋爪宏治館長にはクリスマスピラミッドの軸の材料の向き不向きや軸の回転のサポートの仕方について教えていただくなど、大変お世話になりました。この場を借りて皆様に深くお礼申し上げます。

サリチルアルデヒド誘導体を利用する水中での有機合成反応

4年C組 高橋 知花

指導教員 鶴飼 哲真

1. 概要

サリチルアルデヒド誘導体とメルドラム酸との環境にやさしい溶媒である水中の反応で蛍光性クロメン誘導体の合成を検討した。超音波加熱で反応を行い、メタノールでの再結晶により、精製を行った。

2. はじめに

持続可能な社会の実現を目指す化学研究として、環境負荷の少ない有機合成の新技术の開発は重要である。有機合成では、一般に有機溶媒が用いられるが、有機溶媒は環境にとって有害であることが多い。有機溶媒に替わる環境にやさしい溶媒として、無害で低コストである水が期待される。

サリチルアルデヒドは医薬品原料として知られているサリチル酸の類似体で、サリチル酸と同様に芳香環の隣り合ったオルトの位置に二官能基をもつ有用な物質の合成原料である。容易に手に入り、天然にも存在する。

ベンズアルデヒドと活性メチレン化合物であるメルドラム酸(2,2-ジメチル-1,3-ジオキサシロリン-4,6-ジオン)**2**との Knoevenagel (クネーフェナーゲル) 縮合は、環境にやさしい方法として、水中加熱で進行することが報告されている¹。さらに、サリチルアルデヒドと活性メチレン化合物であるメルドラム酸**2**との Knoevenagel 縮合-環化反応は、水中加熱でも進行し²、そのほかジュース中での超音波による反応³などが報告されている。

本研究では、4-(ジエチルアミノ)サリチルアルデヒド**1**とメルドラム酸**2**との水中での連続的 Knoevenagel 縮合-環化反応で、有用な蛍光物質 7-(ジエチルアミノ)クマリン-3-カルボン酸**3**の合成を試みた。

3. 結果と考察

サリチルアルデヒド誘導体**1**とメルドラム酸**2**との水中で超音波促進による反応を試みた(図1)。室温から50°Cでの7-(ジエチルアミノ)クマリン-3-カルボン酸の合成の単離収率の向上と精製を検討した。

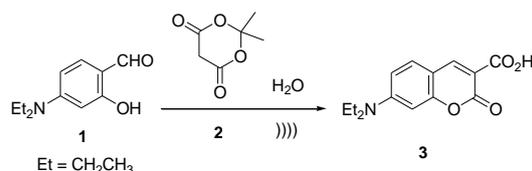


図1. サリチルアルデヒド**1**とメルドラム酸**2**との Knoevenagel 縮合-環化反応

水中攪拌加熱 22 時間 (75 °C), 水中超音波室温, 4% 酢酸水溶液中超音波室温, 20mol% K₂CO₃ 水溶液中超音波, 10mol% SDS (ドデシル硫酸ナトリウム, ラウリル硫酸ナトリウム) 水溶液中超音波, 水-アセトン(1:1)溶液中超音波などを検討した。

反応の進行は、薄層クロマトグラフィーで行った。生成物の単離は、酢酸エチルで抽出後、カラムクロマトグラフィー、またはメタノールでの再結晶を行った。

その結果、水だけで反応は進行するが収率の再現性に問題があった。添加物の効果は、反応の追跡や単離、再現性において、はっきりしない。薄層クロマトグラフィーの追跡では定量性があまりよくない。生成物単離についても、いくつかの問題点があった。

1) 原料は固体で、水中に分散しないと反応が進行しにくい。

2) 酢酸エチルでのカラムクロマトグラフィーでの単離は、生成物の酢酸エチルへの低い溶解性から長時間かかり、スケールアップなどの点でも問題がある。一方、0.5-1.0 mmol スケールでは反応が良好に進行したときには、水中反応で 69%, 4%酢酸水溶液で定量的に生成物 **3** が単離された。

再現性と単離の解決策として、以下検討した。超音波照射時、途中でかき混ぜながら行う。また 50 °C に加温する。平たい容器で反応させ、水中での表面積を増やす、を検討している。

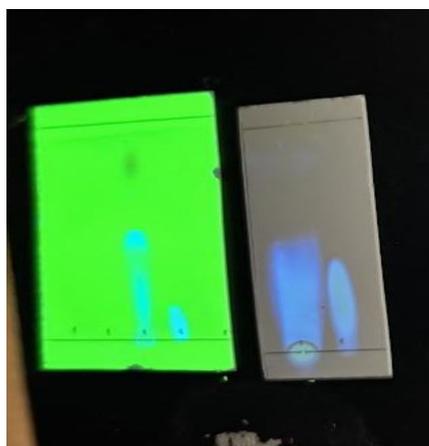
生成物 **3** の単離は、反応で用いた水を遠心分離機などを用いて除き、固体をメタノールから再結晶すると、橙色結晶が析出した (図 2) (41-52%)。



図 2.3 の結晶

母液には残っている原料などが入っていると考えられる (図 3)。生成物の蛍光が見られる。また、メタノールからの再

結晶の操作で未反応の原料が反応した可能性がある。



(a) (b) (c) (d)

図 3.3 の薄層クロマトグラフィー (展開溶媒酢酸エチル) 紫外線ランプでの発色
蛍光剤入り TLC 板(a)母液(b)結晶
蛍光剤なし TLC 板(c)母液(d)結晶

図 4,5 に反応が進行しなかったときの原料の混合物とカラムクロマトグラフィーで単離した生成物の ¹H-NMR (核磁気共鳴) スペクトルを示す。

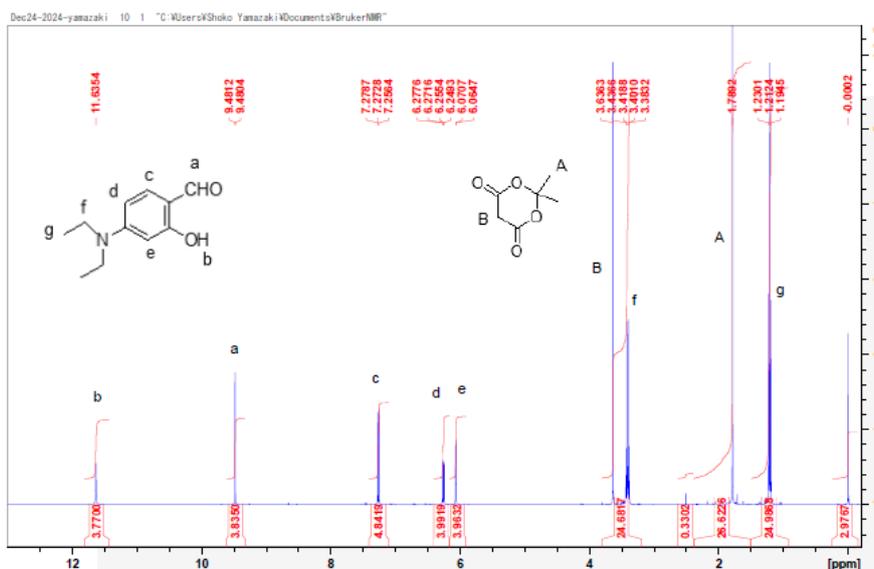


図 4. 原料 **1** と **2** の混合物の ¹H-NMR スペクトル

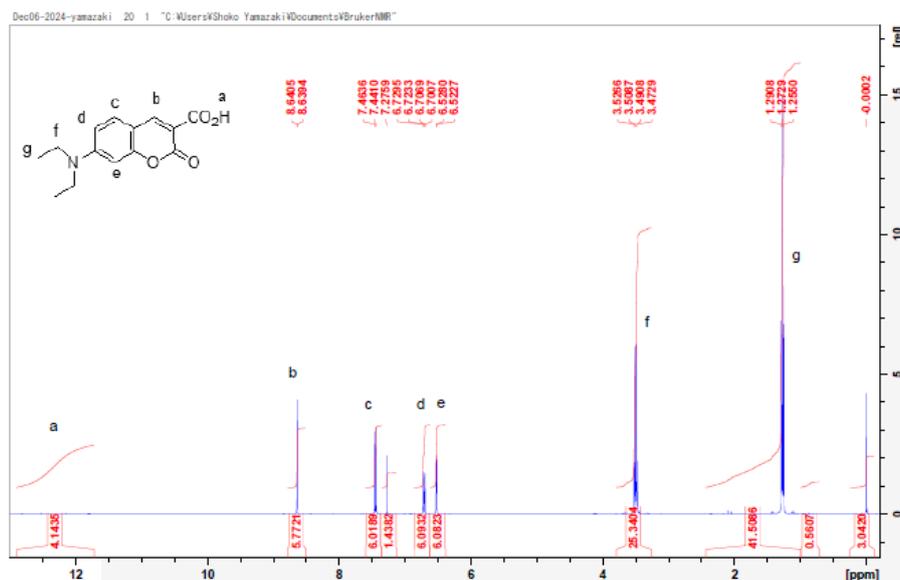


図 5. 生成物 **3** の $^1\text{H-NMR}$ スペクトル

参考のため、**1** と **2** をそれぞれ単独で水中で終夜 75°C で加熱したところ、**1** は変化せず、**2** は分解した。**2** は加水分解より、**1** と反応する方が速いと考えられる。

水中で進行するメルドラム酸 **2** とサリチルアルデヒド **1a** から **3** が生成する反応機構は密度汎関数理論(DFT)計算を用いて調

べられた (奈良教育大) (図 6,7)。中性、水中での反応モデルとし $1a + 2 + (\text{H}_2\text{O})_{12}$ を用いた。鍵中間体 **B** が求められ、律速段階は **2** 番目のプロトン(水素陽イオン)引き抜き(TS3)である。続く δ -ラクトン環化反応は容易に起こる。水がプロトン移動や求核試薬として、効率的に働いていることがわかった。

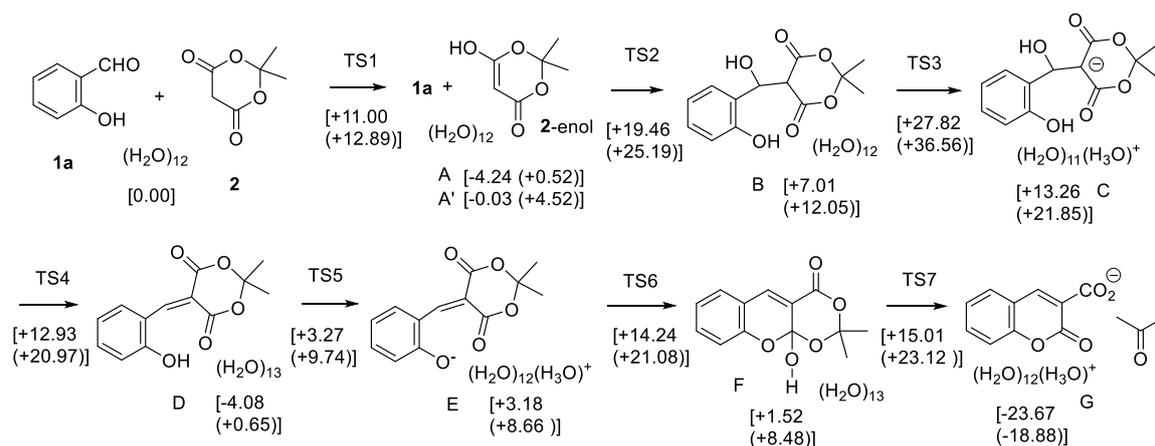


図 6. **1a** と **2** との水中での反応機構と密度汎関数によるエネルギー変化 $\Delta E(\Delta G)$ 値, kcal/mol, B3LYP/6-311+G(d,p) SCRf = (PCM, solvent = water) // B3LYP /6-31G* SCRf = (PCM, solvent = water).

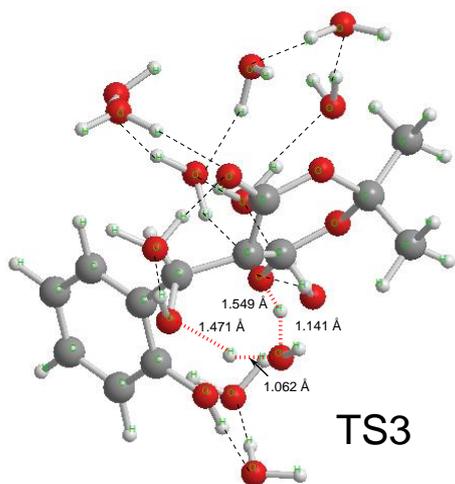


図 7. プロトン引き抜き遷移状態 TS3(図 3)の構造

生成物 **3** は、蛍光性があり、**3** を結合した化合物の光物性を調べることは興味を持たれる。その誘導体の合成についてもこれから検討する。

5. まとめ

4-(ジエチルアミノ)サリチルアルデヒドとメルドラム酸との環境にやさしい溶媒である水中での連続的 Knoevenagel 縮合-環化反応で、蛍光性クロメン誘導体の合成を検討した。超音波加熱で反応を行い、メタノールでの再結晶により、精製を行った。環境負荷の少ない合成法の開発は、既知または新規な生物活性、物性をもつ化合物の開拓に役立つと考えられる。

6. 参考文献

- (1) Bigi, F., Carloni, S., Ferrari, L., Maggi, R., Mazzacani, A. and Sartori, G. (2001) *Tetrahedron Lett.* 42, 5203–5205.
- (2) Maggi, R., Bigi, F., Carloni, S., Mazzacani, A. and Sartori, G. (2001) *Green Chem.* 3, 173–174.
- (3) Fiorito, S., Taddeo, V. A., Genovese, S. and Epifano, F. (2016) *Tetrahedron Lett.* 57, 4795–4798.

7. 謝辞

計算は分子科学研究所で行っていただきました。核磁気共鳴スペクトルは、奈良女子大学で測定していただきました。本研究を進めるにあたり、奈良教育大学 山崎祥子教授には終始熱心なご指導を頂きました。心より感謝申し上げます。

アリールアルキン修飾電子欠乏性アルケン分子内環化反応による

含酸素 5, 6 員環合成

6 年 B 組 中村 一葉

指導教員 牧野 百

1. 概要

含酸素 5,6 員環化合物は、生物活性物質に多く含まれる構造であり、その効率的合成法の開発は重要である。本研究では、遷移金属触媒を用いずこれらの構造を合成する反応の開発を試みた。

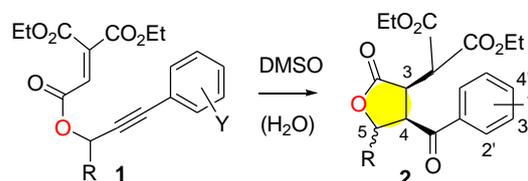
2. 研究の背景・目的

含酸素 5,6 員環化合物は、生物活性物質に多く含まれる構造であり、その効率的合成法の開発は重要である。最近、アリールプロパルギルエテントリカルボン酸アミド誘導体の反応において 110°C DMSO 中でアロイル基 *cis* 置換含窒素 5 員環ピロリジン誘導体が得られることが報告された¹⁾。本研究では、酸素類似体のアリールアルキン修飾電子欠乏性アルケンの分子内環化反応を試みた。

3. 実験

アリールプロパルギルエテントリカルボン酸エステル誘導体 **1** を DMSO 中加熱したところ、系内の水が関与したと考えられる環化反応が起こり、含窒素 5 員環誘導体に比べてやや低収率ではあるが、アロイル基置換テトラヒドロフラン誘導体が 33-54%の収率で得られた(図 1)。

予想反応機構は図 2 のようである。フェニル基に置換基の導入などを試みたが収率は、窒素類似体の反応に比べ向上しなかった¹⁾。



R = H, Y = H, 80 °C 35%
R = Me, Y = H, 80 °C 49% (dr 2.6:1)
R = H, Y = 2'-Cl, 110 °C *cis* = 30% (*trans* = 17%)
R = Me, Y = 2'-Cl, 110 °C 54% (dr 4.6:1)
R = H, 4'-Cl, 110 °C, 35% + (3,4-*trans*)
R = H, 4'-Me, 110 °C, 33% + (3,4-*trans*)

図 1 含酸素 5 員環の合成

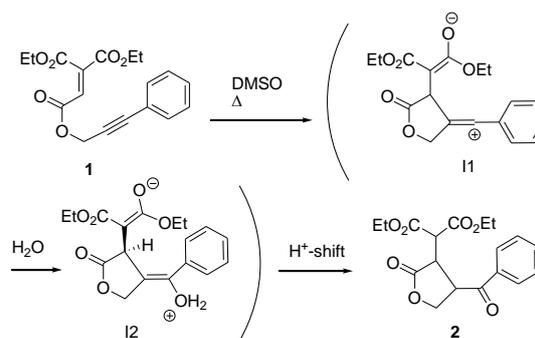


図 2. 環化-水付加の予想反応機構

図 3,4 に生成物 **2** (Y=2'-Cl) の ¹H と ¹³C-NMR (核磁気共鳴) スペクトルおよび帰属を示した。

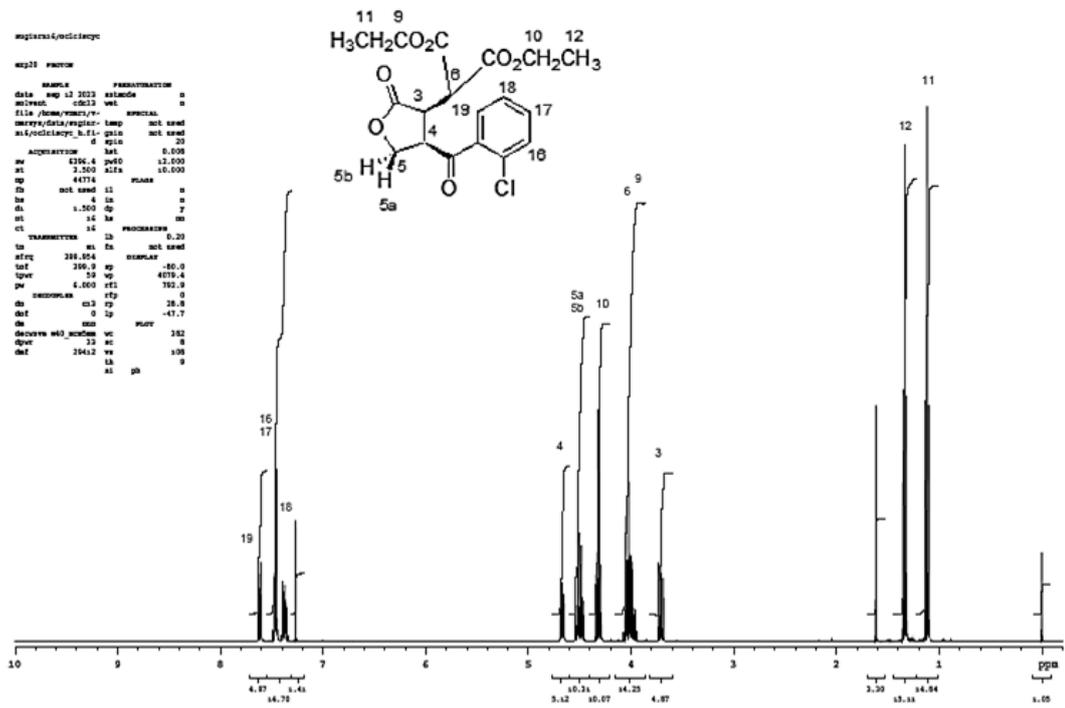


図 3. 2 (Y=2'-Cl)の¹H NMR スペクトル

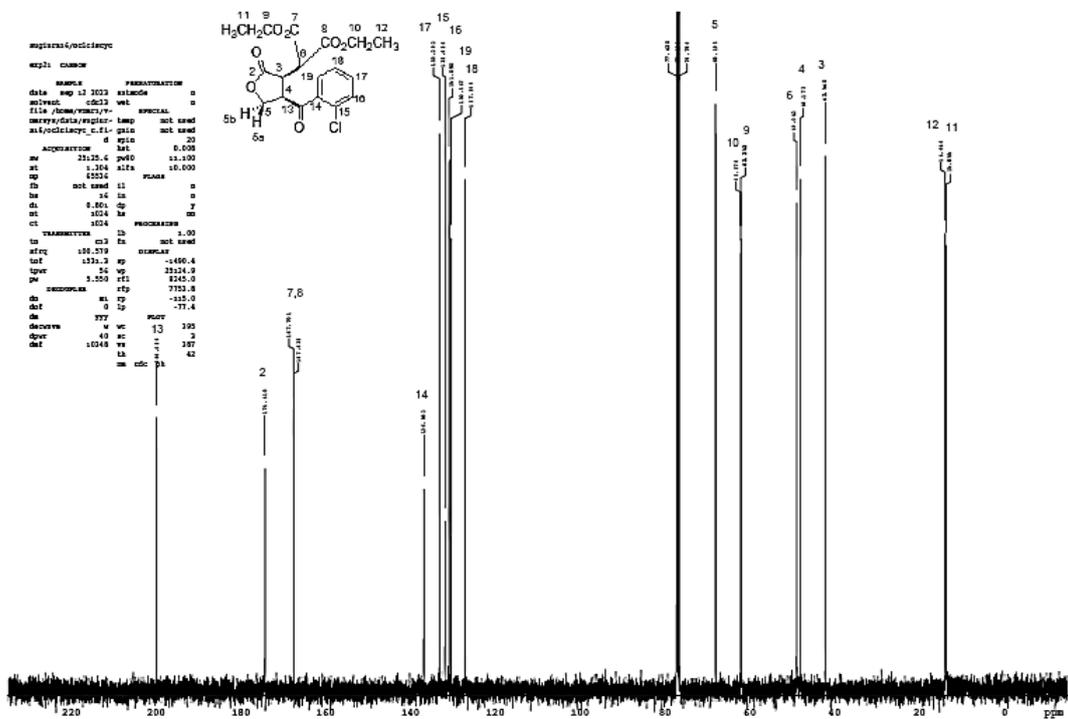


図 4. 2 (Y=2'-Cl)の¹³C NMR スペクトル

一方、アリールプロパルギル基を持つアリリデンマロン酸エステル基質を利用した含酸素 6 員環形成の試みでは、同様の環化-水付加生成物を単離することができなかつた。そこで、アリリデンマロン酸エステルより、求電子性が高いアリリデンメルドラム酸基質 A を Knoevenagel 縮合でベンズアルデヒド誘導体 3 から合成しようとしたところ、縮合反応条件下で連続的にヘテロ Diels-Alder 反応などが起こり、含酸素 6 員環多環性化合物 4 が得られた(図 5)。

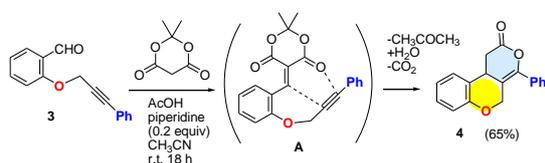


図 5 含酸素 6 員環の合成

また、フェニル基のないプロパルギル誘導体では、Knoevenagel 反応条件で縮合のみが起こった生成物が得られた(図 6)。

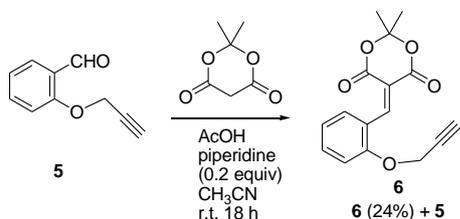


図 6 フェニル基のない誘導体での反応

現在、芳香環の置換基の影響について調べている。

4. 考察

含酸素 5 員環化の反応機構を密度汎関数計算によって調べた。窒素類似体と環化段階の活性化エネルギーは、あまり変わらない。従って、酸素類似体トリエステル基質の立体配座が、窒素類似体ジエステルアミド基質と比較すると、環化前駆体 *s-trans* 体が直線型 *s-cis* 体に比べかなり不安定であることに起因していると考えられる(図 7)。

そのほか、環化反応を促進させると考えられる Thorpe-Ingold 効果 (*gem*-ジアルキル効果)による置換基の影響も考案した。計算で調べたところ、やや環化は有利になる。しかし、 α, α -ジ置換体の合成にはいまだ至っていない。

また、含酸素 6 員環の合成反応では、中間体 A から連続的にヘテロ Diels-Alder 反応、脱アセトン、水付加、脱炭酸が起こり、化合物 4 が得られる。Ph 基の効果で *asynchronous* (非同期的) に進行するヘテロ Diels-Alder 反応が促進されると考えられる(図 8)。プロパルギル誘導体 A2 からの付加環化の活性化エネルギーはアリールプロパルギル誘導体に比べて大きい。

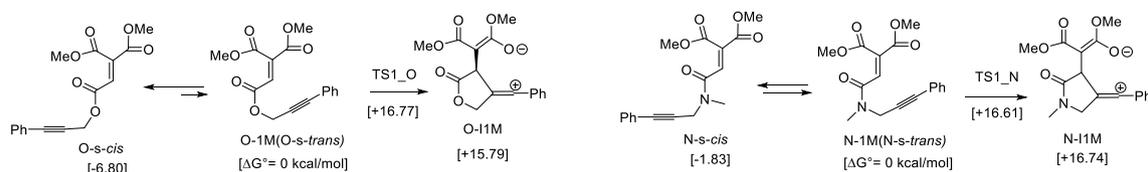


図 7. 酸素及び窒素前駆体のモデル化合物の密度汎関数計算 ω B97X-D/6-311+G(d, p) SCRFF = (PCM, solvent = DMSO) // ω B97X-D/6-31G* SCRFF = (PCM, solvent = DMSO)による環化の Gibbs 自由エネルギー変化と配座エネルギーの比較

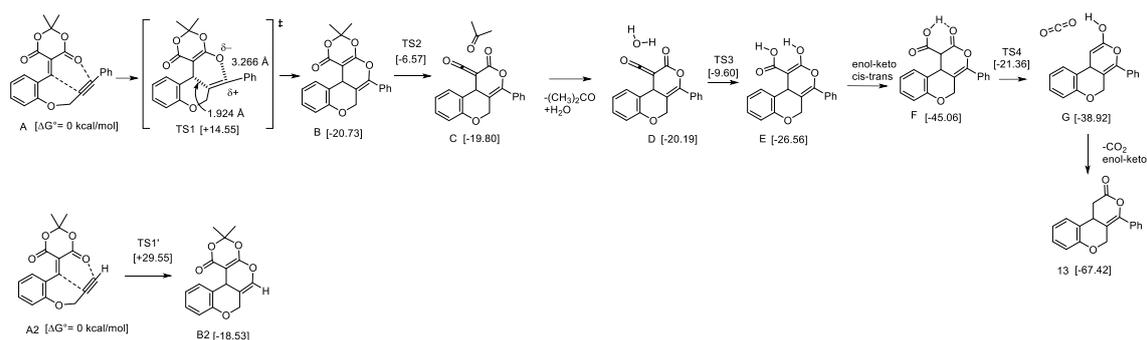


図 8 含酸素 6 員環形成時のエネルギー変化

5. まとめ

本研究では含酸素 5 員環, 6 員環を遷移金属触媒を用いない環化合成法の開発を行った。報告のあった含窒素 5 員環の合成と比較し収率が低く, これは基質の配座エネルギーの違いが原因にあると考えられる。また, 6 員環に関しては芳香環の有無により Knoevenagel 縮合反応後の環化反応の進行の可否が変わることが分かった。芳香環上の種々の置換基の影響および触媒, 溶媒などについて, 今後調べる必要がある。

以上の研究結果は, 奈良女子大学中高生科学発表会 2023 年度サイエンスコロキウム (2023 年 12 月 23 日) および日本化学会・日本薬学会共催第 53 回複素環化学討論会 (2024 年 10 月 11 日) で発表を行った。

6. 参考文献

1) Wang, Z.; Yamazaki, S.; Morimoto, T.; Takashima, H.; Nakaoku, A.; Shimizu, M.; Ogawa, A. *Org. Biomol. Chem.*, **2023**, *21*, 2172.

謝辞

本研究を進めるにあたり, 奈良教育大学山崎祥子教授には終始熱心なご指導を頂きました。心より感謝申し上げます。また, 山崎研究室の皆様には多大なご助言, ご協力いただきました。お礼申し上げます。

二核ビスマス錯体の合成と RNA 分解活性の評価

—大阪大学産業科学研究所創薬研究体験報告—

報告者 5年B組 上田 眞衣

(参加者：4年 阿久津 莉子，阿部 莞太郎，高橋 知花，徳田 脩人，三浦 悠雅)

指導教員 鶴飼 哲真

1. 要約

2024年7月30日から3日間、本校の生徒6名と西大和学園高等学校の生徒3名で大阪大学産業科学研究所複合分子化学研究分野 鈴木孝禎教授の研究室を訪問し、創薬化学分野における最先端の研究をご指導頂いた。研究の成果は、2024年11月21日に京都テルサで開催された第41回メディシナルケミストリーシンポジウム（主催：日本薬学会 医薬化学部会）において、「二核ビスマス錯体の合成と RNA 分解活性の評価」という題目でポスター発表した。

2. 研究の背景

ヒトゲノムの98%はタンパク質へ翻訳されないノンコーディングRNA(ncRNA)が占めており、中には病気の原因となるものも存在することから、新たな創薬標的として注目されている。

RNAを標的とする代表的な医薬品としては低分子医薬品や核酸医薬品があげられ、低分子医薬品には選択性や親和性が低い、核酸医薬品は高価で安定性や細胞膜透過性が低く、製剤化に工夫が必要というデメリットがある(図1)。

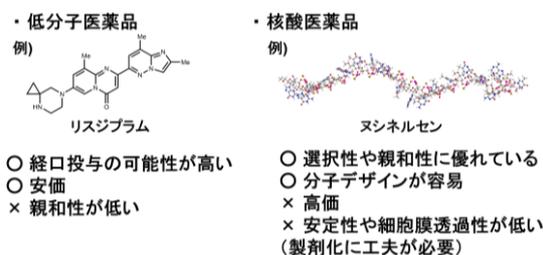


図1. RNAを標的とするための代表的な方法

そこで、標的RNAに結合する低分子(バインダー)、RNAを分解する低分子(クリーパー)

一バー)、そしてそれらをつなぐリンカーからできる化合物(図2)を設計し、標的RNAを選択的に分解する次世代の薬として創製を目指した。

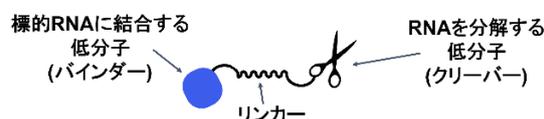


図2. 設計した低分子化合物のイメージ

この化合物は標的RNAを選択的かつ効率的に分解し、生体内での安定性や透過性の向上が期待できるほか、安価という特徴がある。今回の研究では、クリーパーの設計・合成を行い、そのRNA分解活性について評価をおこなった(図3)。

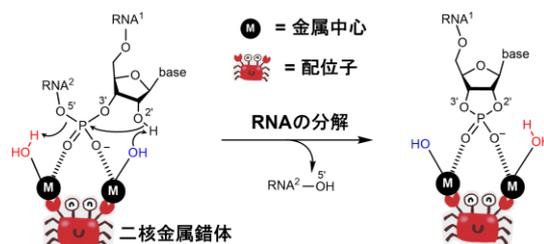


図3. 二核金属錯体(クリーパー)の設計

3 日目はこれまでの実験結果をまとめ、その内容と成果を学会（メディシナルケミストリーシンポジウム）で発表するため、ポスターの作成をおこなった。



休憩時には、山下先生に研究室の設備や測定機器について紹介していただき、実際に使用させていただいた。大学院生や留学生と交流する機会も設けていただき、研究内容や大学院に関する貴重なお話をいただいた。

4. 研究成果発表

メディシナルケミストリーシンポジウムでは、産官学の各分野で活躍されている医薬品研究開発の研究者によって活発な意見交換がおこなわれた。私たちは、「二核ビスマス錯体の合成と RNA 分解活性」というテーマでポスター発表した。



この機会を通じて、多くの研究者との交流が生まれ、貴重な意見や助言をいただくことができた。また、最新の創薬技術や研究に関する情報を多く得ることができた。難

解な内容もあったが、新しい知見を得ることができ、知識の向上と飛躍に繋がった。



謝辞

本活動は、大阪大学産業科学研究所教授の鈴木孝禎先生にお世話になりました。実験や解析、発表準備では伊藤幸裕准教授、山下泰信先生、高田悠里先生、鈴木研究室の皆様にご指導頂きました。ありがとうございました。

キューティクルの観察について

5年A組 山本 ゆい
指導教員 櫻井 昭

1. 概要

電子顕微鏡を使わずにキューティクルを観察する方法を検討した。その後、被験体の髪の毛を採取し、様々な条件下でのキューティクルの状態を観察した。観察結果から塗布したものとキューティクルの状態の関係と、今回行った型取りの方法がうまく行ったかの評価を行った。

キーワード キューティクル, スンプ法

2. 研究目的

キューティクルを一時的に保護、修復できるスタイリング剤を発見することで、日常での髪質に関する悩みが少なくなり、ストレスを感じにくくなるのではないかと考えた。

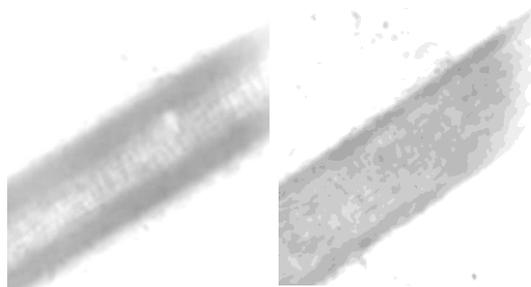
またこの研究にあたり、キューティクルの状態をより細かく鮮明に映し出せる器具が必要であった。だが本校には電子顕微鏡の設備がないため、そのかわりとなる実験手段を検討する必要があった。

3. 研究内容

3-1 観察方法について

一般的に、先行研究でもあったようにキューティクルの研究には電子顕微鏡が使用される。だが、本校にはその設備がないため、他の方法を検討することにした。

まず双眼実体顕微鏡で観察を行った。この観察において、キューティクルが目視で確認できたのは14検体中1検体のみであった（成功例→写真1, 失敗例→写真2）。



(写真1)

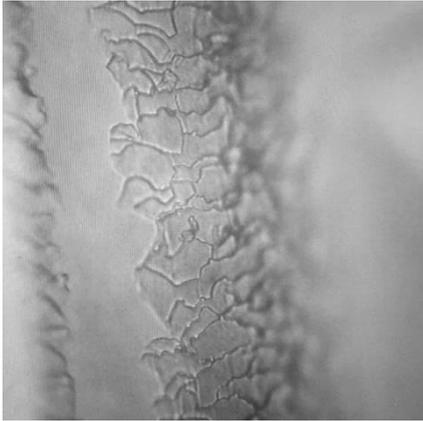
(写真2)

そこで、別の方法を検討し、主に生地表面状態観察に用いられるスンプ法を参考にした観察方法を用いることにした。なお、スンプ法では瞬間接着剤が使用されているが今回は簡単に扱えるトップコートを使用した。

以下にその観察方法を具体的に記す。

- ① プレパラートにネイルのトップコートを薄く塗布する。
- ② 塗布したトップコートの上に毛髪を乗せる。
- ③ ②を一週間放置する。

この観察方法では写真3のようにはっきりとキューティクルの確認ができるものが多かった。



(写真3)

そこで、今回の研究にはスンプ法(改)を用いて観察することにした。

3-2 毛髪の観察

2種類の毛髪を用意した。

一つは通常時の毛髪（何もしていない）、もう一つは20分間風を当て続けた（今回はドライヤーで20分間風を当て続けた）毛髪である。

それぞれの髪の毛に対して、下記パターンでキューティクルの状態に変化が見られるか観察した。

- (1) 何もしない
- (2) オリーブオイル
- (3) ヘアワックス
- (4) ヘアオイル
- (5) ドライヤー
- (6) ドライヤー+オリーブオイル
- (7) ドライヤー+ヘアワックス
- (8) ドライヤー+ヘアオイル

また、この観察を補完するために、5回ずつ実験した。

この観察結果は表1にまとめた。

	1回	2回	3回	4回	5回
(1)	密度が小さい 並列していない 少し欠けている	密度が大きい 並列していない 先端が欠けている	密度が小さい ほぼ並列 先端が欠けている	密度が小さい ほぼ並列 先端が欠けている	密度が小さい ほぼ並列 先端が欠けている
(2)	密度が小さい 並列していない 欠けていない		密度が小さい 並列していない 少し欠けている		密度が大きい 並列していない 少し欠けている
(3)	密度が小さい 並列していない 欠けていない		密度が小さい 並列 少し欠けている	密度がある程度ある 並列 先端が欠けている	密度が大きい 並列 少し欠けている
(4)	密度が小さい 並列していない 欠けていない		密度が小さい 並列 欠けていない	密度がある程度ある 並列していない 欠けていない	密度が大きい 並列 欠けていない
(5)	密度が小さい ほぼ並列 欠けていない	密度が大きい 並列していない 先端が欠けている	密度が小さい 並列 欠けていない	密度がある程度ある 並列 欠けていない	密度がある程度ある 並列 欠けていない
(6)					
(7)					
(8)	密度が小さい ほぼ並列 欠けていない	密度が小さい 並列 欠けていない	密度がある程度ある ほぼ並列 欠けていない	密度がある程度ある 並列 欠けていない	密度がある程度ある ほぼ並列 欠けていない

表1 観察結果

キューティクルの健康さを判断する基準は、先端の欠け具合、並び方(並列か否か)として、キューティクルと思われる線で判断した。観察時のキューティクルの鮮明さはマスの濃淡で表している。色が濃いほど鮮明である。

4. 観察結果と比較

比較した結果、何もしなかった毛髪とドライヤーに当てた毛髪ではキューティクルにあまり違いは見られなかった。

観察ができた各結果について、これもまた同様にキューティクルにあまり違いは見られなかった。

一方で、キューティクルの線が不鮮明で見えづらかった結果においては、キューティクルがスタイリング剤によって補修されることで、膜におおわれてしまった可能性がある。」

5. 考察

風に当てることでキューティクルは痛むと考えていたが、キューティクルの状態との関連はないことがわかった

また、今回の観察方法では完全に固まり切るまでに時間がかかってしまうトップコートを使用したため、髪の毛をトップコートからとる際に型が崩れてしまった可能性も否めない。今後、この操作における検討が必要である。

6. 参考文献

コロスキンを使ったキューティクルの観察
<http://blog.livedoor.jp/web247/archives/53457585.html>

東京都立産業技術研究センター

『スンプ法による生地表面状態の観察』

マツタケの人工栽培

5年A組 大東柚衣

指導教員 櫻井 昭

1. 概要

マツタケの菌糸を育てる環境について比較実験したり、バーミキュライトに植継いだ菌糸が偶然増殖したため、菌糸のDNAを調べマツタケであることを確認したりして、マツタケの人工栽培を成功に近づけることを目標に色々な角度から実験を行った。

キーワード マツタケ(*Tricholoma matsutake*)

2. 実験の背景と目的

シイタケやシメジなど他のキノコ類の人工栽培は成功しているが、マツタケだけ成功していないことに疑問を抱き、このテーマで実験していくことに決めた。

未だ明らかにされていない、マツタケの子実体への誘導方法を見つけることを主な目的としているが、昨年行った実験の疑問点を解消することも目的とした。

バーミキュライト培地の組成は以下の通りである。

エビオス	2.0g
グルコース	8.0g
蒸留水	400ml
バーミキュライト	約 21.4g

3. 実験内容

3.1.1 実験目的

シャーレで菌糸を培養していると横方向にしか成長しないため、子実体への誘導がしにくいと考え、ビーカーに移し替えて菌糸がどのように成長するかを観察する。

3.1.2 実験仮説

菌糸は縦方向に成長することができる。

3.1.3 実験方法

バーミキュライトを入れたビーカーにシャーレで培養していた菌糸を植え継ぎ、28℃のインキュベーターで保管した。

3.1.4 実験結果

植え継いだ直後のビーカー



(2025.02.05 撮影)

2024.04.26 に作成した 300ml ビーカー



(2025.02.05 撮影)

2024.11.25 に作成した 200ml ビーカー



(2025.02.05 撮影)

3.1.4 実験考察

2024.11.25に作成したビーカーの方が2024.04.26に作成したビーカーよりも縦方向に大きく成長していた。どちらも周りの環境は何も変えていないため、ビーカーのサイズが小さいほうが菌糸同士が刺激を与えあってたくさん増えるのかもしれない。

3.2.1 実験目的

菌糸の子実体にするためには菌糸に何らかの刺激を与える必要があり、昨年は「つつく」刺激を与えたが、あまり参考になる結果が出なかった。

そこで、日本の自然界でのマツタケ生産量が多い地域の特徴に近づければ子実体になりやすいかもしれないと考え、生産量の多い長野県、岩手県の過去約80年の気温の平均をとった11°Cで培養することにした。

3.2.2 実験仮説

温度を下げると、菌糸の成長率が上がり、子実体になるための刺激が見つかる。

3.2.3 実験方法

シャーレで培養している菌糸と新しく植え継いだ菌糸をそれぞれ4つずつ用意して、28°Cインキュベーターと11°Cインキュベーターに入れて培養し、時々成長具合を確認する。

3.2.4 実験結果

11°Cで培養していた菌糸の方は菌糸の成長が遅く、新しく植え継いだ菌糸は広がってもしなかった。

3.2.5 実験考察

菌糸が成長しないまま11°C下で培養してしまっただけのため、ただ成長を遅らせるだけ

になってしまった。

3.3.1 実験目的

昨年バーミキュライトに含ませる薬品の実験を行った際に白い菌糸のようなものが大量に増えたので、それがマツタケの菌糸であることを確かめるために、PCR法と電気泳動法を用いた。

3.3.2 実験仮説

増えた白い菌糸のようなものはマツタケの菌糸である。

3.3.3 実験方法

材料

本物のマツタケ(冷凍)

寒天で培養していた菌糸

バーミキュライトに増えた菌糸(?)

DNA抽出キット(ISOSPIN Plant DNAキット)

方法

DNA抽出キットを使ってDNAを抽出し、分光高度計を使ってDNAが抽出できているかを確認した。以下の表が分光高度計で測定した結果である。

サンプル名	抽出量($\mu\text{g}/\text{m}\ell$)
冷凍マツタケ①	8.7
冷凍マツタケ②	4.8
寒天培地①	3.7
寒天培地②	3.5
バーミキュライト培地①	8.0
バーミキュライト培地②	3.5

どのサンプルからもDNAが抽出できたことがわかったため、PCR法を用いてDNAを増幅させた。その際に使った薬品の量は以下の通りである。

冷凍マツタケ①

薬品名(濃度)	量(μℓ)
H ₂ O	15.356
10×PCR バッファー	2
dNTP ミックス(0.2mM)	2
プライマー1(0.5 μM)	0.1
プライマー2(0.5 μM)	0.1
Tag ポリメラーゼ(5U/μℓ)	0.1
鋳型 DNA 溶液	0.344
total	20

寒天培地②

薬品名	量(μℓ)
H ₂ O	14.843
10×PCR バッファー	2
dNTP ミックス(0.2mM)	2
プライマー1(0.5 μM)	0.1
プライマー2(0.5 μM)	0.1
Tag ポリメラーゼ(5U/μℓ)	0.1
鋳型 DNA 溶液	0.857
total	20

冷凍マツタケ②

薬品名	量(μℓ)
H ₂ O	15.075
10×PCR バッファー	2
dNTP ミックス(0.2mM)	2
プライマー1(0.5 μM)	0.1
プライマー2(0.5 μM)	0.1
Tag ポリメラーゼ(5U/μℓ)	0.1
鋳型 DNA 溶液	0.625
total	20

バーミキュライト培地①

薬品名	量(μℓ)
H ₂ O	15.325
10×PCR バッファー	2
dNTP ミックス(0.2mM)	2
プライマー1(0.5 μM)	0.1
プライマー2(0.5 μM)	0.1
Tag ポリメラーゼ(5U/μℓ)	0.1
鋳型 DNA 溶液	0.375
total	20

寒天培地①

薬品名	量(μℓ)
H ₂ O	14.89
10×PCR バッファー	2
dNTP ミックス(0.2mM)	2
プライマー1(0.5 μM)	0.1
プライマー2(0.5 μM)	0.1
Tag ポリメラーゼ(5U/μℓ)	0.1
鋳型 DNA 溶液	0.810
total	20

バーミキュライト培地②

薬品名	量(μℓ)
H ₂ O	14.843
10×PCR バッファー	2
dNTP ミックス(0.2mM)	2
プライマー1(0.5 μM)	0.1
プライマー2(0.5 μM)	0.1
Tag ポリメラーゼ(5U/μℓ)	0.1
鋳型 DNA 溶液	0.857
total	20

プライマー1と2の塩基配列は以下のとおりである。

プライマー名	塩基配列
primer Forward	GAGACACAACGGCGAGATT
Primer Reverse	ACCCTTACCCGAGCTCAGT

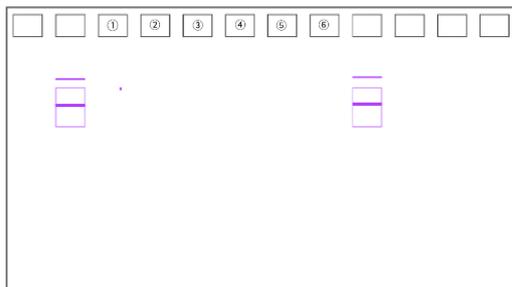
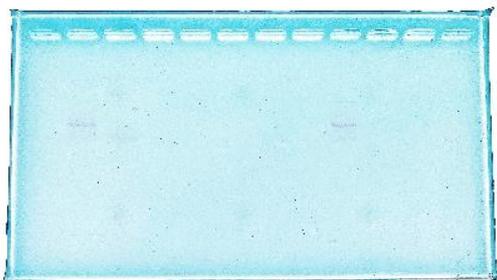
PCRプログラムは以下のとおりである。

PCR Program

30 cycles	94°C	1 min	
	94°C	30 sec	変性
	57°C	2 min	アニーリング
	72°C	1 min	伸長
	72°C	10 min	
	4°C	∞	

次に電気泳動法を用いて増幅させたDNAの確認を行った。

3.3.4 実験結果



冷凍マツタケ①のみ若干バンドが見えたが、それ以外は何も見えなかった。

3.3.5 実験考察

バーミキュライト培地に増えた白い菌糸のようなものが本当にマツタケの菌糸であ

ることはわからなかったが、冷凍マツタケ①のバンドが見えたことから、実験方法や実験器具に不備がなかったことは確認できた。

4. 今後の展望

人工栽培でも縦方向に広げることはできたので、培地に混ぜる薬品や保管環境などをもう一度考え直して、より早く成長させる方法を探りたい。また、昨年偶然増えた菌糸が何だったのか特定できなかったの

で、最初に採取するDNAの純度を上げて結果が出るようにもっていきたい。

5. 参考文献

茨城県林業技術センター(2019年3月8日)。「マツタケの栽培化に向けた取り組み」。

<https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/ringyose/seiktopix/matsutake-bun.html>

出井利長, 吉沢信夫, 多胡正洋(1988)。

「電気等の刺激によるシイタケ子実体の発生」. 『宇都宮大学農学部演習林報告』(24), 29-38

食品微生物光学研究室(2019)。「きのこの生態を解き明かし、世界初のマツタケ人工栽培をめざす。」

<https://www.nara.kindai.ac.jp/laboresearch/007.php>

藤原直哉「マツタケの省力的栽培技術の開発」

<https://www.pref.okayama.jp/uploaded/attachment/319625.pdf>

気象庁。「諏訪(長野県)日平均気温の月平均値(°C)」

https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s3.php?prec_no=48&block_no=47620&year=&month=&day=&elm=monthly&view=a1

気象庁 . 「 盛岡 (岩手県) 日平均気温の月
平均値 (°C)」

https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s3.php?prec_no=33&block_no=47584&year=&month=&day=&elm=monthly&view=a1

水に溶かす溶質と水溶液の保温性の関係

5年A組 奥野詩桜

5年A組 寺谷 諒

指導教員 櫻井 昭

1. 要約

どのような水溶液が湯たんぽに最も適しているのかを調べた。さらに一度目実験の結果から粘り気のある水溶液のほうが湯たんぽに適しているという仮説を立てることができ、二度目の実験では澱粉の糊化作用の影響で吸熱反応が起こっていたことが分かり、粘り気があり吸熱反応も起こらない水溶液が最も湯たんぽに適していることが分かった。

2. 研究背景

この世の中にはたくさん水溶液があるが、どういった水溶液が湯たんぽに適しているのか気になったので、それぞれの水溶液の保温性から調べてみようと思った。

ここでいう「湯たんぽに適している」の定義は冷めにくいこと、つまり温度変化しにくいことである。

電解質の水溶液のみを使った理由は、電解質の水溶液だと電流を流すと電気分解が起こってしまうからだ。



図1. 実験 3-1 の様子

3. 実験方法

3-1 初期の実験方法

初めに試した手法は、水溶液の比熱から調べる手法である。比熱とは、物質の温度変化のしにくさを表す値である。

まず物質の溶解度を調べて、その中で水に溶かしたときに非電解質となる物質として代表的な糖類とアルコール類からスクロース、エタノールを選んだ。

次にそれぞれ水 1 L 当たりに 1 mol ずつ溶かした水溶液を用意した。この時は 50 mL で実験を行ったため、スクロースが 17.1 g、エタノールが 2.3 g であった。

そして、50 Ω の抵抗器と電源装置を用意し、抵抗器に 10 V の電圧をかけて抵抗器から発生する熱で加熱した。ちなみに、非

その後、20 秒ごとに温度を測り、20 分が経過した後に、時間を横軸、温度変化を縦軸にとり、グラフを作成し、そのデータから比熱を計算した。つまり、比熱が最も高い水溶液が最も温度変化しにくいため湯たんぽに適していることになる。この手法を考えた理由としては、加えた熱量を常に一定に保てるからである。しかし、この手法には不適切な点があつた。

一つ目は、気温の影響を受けやすいことである。一種類ごとに別日に行うため、気温差が実験結果に大きく影響を与えることになる。

二つ目は、比熱というのは温度ごとに代

わるものであり、決して一定ではないため、特定の温度で測定してもあまり意味がないことである。

三つ目は、湯たんぼは暖かい状態から温度が下がっていくものであるため、加熱実験とは少し状況が違ふことである。

四つ目は、電流をながす手法だと電気分解が起こらないようにするために非電解質の水溶液を使う必要があり、そうなる使える水溶液が限られてくることである。

このような理由から手法の再構築が必要となった。

3-2 実験方法の改善

まず、加熱する際に時間と温度変化を測定することをやめた。これは、三つ目の問題点として挙げた所を改善したものである。数分間加熱してから、加熱を止め、時間変化と温度変化を測定するのである。これで、より湯たんぼを実際に使う時の状況に近づけることができた。そして、これ以降『比熱』という一定でない値を扱う必要がなくなった。また、加熱方法は抵抗器の熱を使うなどして温める必要がなくなったため、色々な水溶液で試すことができるようになった。これで、二つ目と四つ目の問題点は解決した。

残る一つ目の問題点については、すべての水溶液を同じタイミングで測定することと、ゴム栓をして蒸発を防ぐことで、気温の差の影響や、蒸発による体積変化の影響による誤差を極力なくすようにした。

こうして出来上がったのが次の実験方法である。

3-3 確定した実験方法

使う水溶液は実際に湯たんぼに使えるもの、つまり日常的によく使うものを溶質

にした。今回選んだのは、食塩水、スクロース水、エタノール水、重曹水、クエン酸水である。以前は蒸留水を溶媒にしていたが、日常的に使えるものに重きをおいたため、今回は水道水を溶媒に使用した。

また比較対象として、水道水、純水、蒸留水も用意した。

まず、食塩、スクロース、エタノール、重曹、クエン酸をそれぞれ水道水 1 L あたり 1 mol の割合になるように 50 mL の水道水に適量溶かし、それらと水道水、純水、蒸留水の三つを駒込ピペットで試験管にそれぞれ 20 mL ずつ入れた。

次に、それらをすべてガスバーナーで 70°C まで加熱し、ゴム栓を閉めて温度計を穴からさし、恒温浴槽に入れて全ての温度が一定になるようにした。

最後に、それらを同時に恒温浴槽から出して 20 秒ごとに温度を測定し、すべての水溶液の温度が 30°C を下回ったところで測定を止め、時間を横軸、温度変化を縦軸にとってグラフを作成し、そこからどれが一番冷めにくいかを判断した。

ちなみに、一回の実験ではそれが本当に正しいかわからないので、二回同じ実験をやるようにした。

3-4 3-3 の実験結果

図 2 と図 3 からわかる通り、水道水とスクロース水はかなり僅差だが、スクロース水のほうが若干冷めにくそうだった。つまり、スクロース水が最も冷めにくいことがわかる。

ここで、どうしてスクロース水が冷めにくいのかを考えた。スクロース水の特徴といえば、ほかの水溶液と比べて、べとべととしていることである。つまり、粘り気、

粘性が高いということだ。おそらく、粘性が高いと液体の温度の差によって起こる熱対流が、サラサラの水に比べると遅くなり、その分ゆっくり熱が伝わるのだろうと予想した。

3-5 新たな実験へ

3-4 で粘性が高い水溶液ほどゆっくり熱が伝わりと予想した。

そこで、次は粘性が高い水溶液に絞って実験した。

まず、水に溶かして粘り気が出そうなものとして真っ先に思いついたのは片栗粉である。片栗粉を水に溶かして加熱すると、葛餅のようになる。よく考えると、保冷材の中に入っているジェルのようなものに材質は似ている。片栗粉といえば、もう一つ思い浮かぶのが小麦粉である。小麦粉も水に溶かすと、パン生地のようになって、粘り気のあるイメージだ。そこで、次の実験として片栗粉と小麦粉を溶質として使ってみた。スクロースは、ほぼ水道水と僅差であったため、今回は使わなかった。

3-6 粘性の高い溶質を用いた実験

手法としては3-5とほとんど変わらない。まず、片栗粉や小麦粉のモル質量というところから分からないので、普段一般の家庭でよく使われている小さじ一杯（およそ3g）を基準にし、小麦粉と片栗粉をそれぞれ50mLの水道水に溶かした。

そして、それらと水道水を駒込ピペットで試験管にそれぞれ20mLずつ入れた。次に、それらをすべてガスバーナーで70℃まで加熱し、ゴム栓を閉めて温度計を穴からさし、恒温浴槽に入れて全ての温度が一定になるようにした。最後に、それらを同時に恒温浴槽から出して20秒ごとに温度

を測定し、すべての水溶液の温度が30℃を下回ったところで測定をやめ、時間を横軸、温度変化を縦軸にとってグラフを作成し、そこからどれが一番冷めにくいかを判断した。今回も、二回同じ実験をやっている。

3-7 3-6の実験結果

図4を見ると、片栗粉水が序盤に急激に温度低下したため、40℃くらいまでは水動水の温度が高いが、そこからは片栗粉水のほうが高くなっている。

そして、図5を見ると、ずっと片栗粉水のほうが水道水よりも少し温度が高いことがわかる。

データが少ないので信頼性は低いですが、この二つのデータを見るかぎり、片栗粉水と水道水の間においては、粘り気がある片栗粉水のほうが温度は下がりにくいと言える。ただし、明確な差がないため、これだと水道水でもあまり変わらないのではないかと考えられる。

しかし小麦粉水は、片栗粉水や水道水と比べ、早く温度が下がることが鮮明に見られた。これは予想の全く逆をいく結果となった。

4. 結果と考察

今回は主に、二つの実験を行った。一つ目の実験は、いろいろな水溶液を用意して、その中で見つけた温度が下がりにくい水溶液の特徴から二つ目の実験を行った。しかし、二つ目の実験では、用意した2つの水溶液から思わぬ結果が出た。ただ、熱対流はゆっくりになっているはずなので、何かほかの要因が働いたと考えられる。

考えられるのは、実験の過程のどこかで

吸熱反応のようなものが起こったことだった。これは、どのようにして起こったのか気になったため、片栗粉と小麦粉の主成分から考えることにした。

片栗粉の主成分はデンプン、小麦粉の主成分はデンプンとタンパク質である。つまり、この二つには共通の成分としてデンプンが入っている。そこで、デンプンによって起こる吸熱反応に着目すると、「デンプンの糊化によって起こる吸熱」が知られている。デンプンは過熱すると 51~57°C で糊化が開始し、60~66°C で最大糊化吸熱温度に達する。ということは、片栗粉水と小麦粉水をガスバーナーで 70°C まで熱したときに、すでに糊化による吸熱反応が起っていた可能性が高い。これにより、実験 3-6 の一回目の序盤における片栗粉水の急激な温度変化や、実験 3-6 全体における小麦粉水の急激な温度低下に説明がつく。片栗粉水と小麦粉水で差が出たのは、片栗粉水のほうがより固まっていて対流する余地がなく、吸熱反応のみによる温度低下が起こっていたのに対して、小麦粉水のほうはまだ流動性があったため、吸熱反応に加えて熱対流による温度変化まで起こっていたからだと考えられる。

5. まとめと今後の展望

今回の実験で分かったことは、粘り気のある水溶液の温度が下がりにくい、吸熱反応が起こるような物質が入っていると逆に早く冷めることもあることだ。ただ、今回の実験では広範囲の下がり具合を見るために、70°C まで加熱してから下がり具合を見ているが、実際に湯たんぽとして使うときは、おそらく 50°C 以下で使うことが

多いように思う。デンプンによる糊化反応は 51~57°C で開始するためようなので、50°C まで熱してから下がり具合を見る場合はまた違う結果が出る可能性が高い。

今回の実験の反省点としては、今の手法に変更するまでに時間をかけすぎたため、時間がなく、少ししか実験できなかったことや、20 mL を試験官に入れてとすぐに温度変化実験するとすぐに温度が下がるため温度変化を正確に見るには適していなかったことだ。

今後の展望として、ほかの粘り気がある水溶液で実験してみたい。今回の水溶液は両方糊化反応の影響で、粘り気があるほうが温度は下がりにくいかどうかは明確にはわからなかった。そこで、確実な証拠を見つけるために、もう一度同じやり方で、違う水溶液でも調べてみたいと思う。片栗粉水や小麦粉水の 50°C からの温度変化を見ることはやってみたいため、次回はより正確な結果を出したいと考えている。

6. 参考文献

- [1] 塩坪聰子「澱粉と水野相互作用における熱力学的性質」Netsu Aokutei 18(1), 1991
- [2] 瀬口正晴、「製パンに於けるコムギ(14)」, Pain 1, Vol, 55, 2008
- [3] 小柱 フミ子、「澱粉の糊化過程における吸熱温度」, Bull. Kagoshima Pref. Jr. College, 38, 21-34, 1987

数式のイメージ化で理解を助ける

5年C組 水野 珠希
5年C組 松井 駿介
指導教員 米田 隆

1. 概要

数学を学ぶ過程で、多くの理解しがたい概念や難しい数式を日常的な現象に落とし込み、イメージ化し、直感的な理解を助けるための工夫を考えた。

2. 研究理由

私たちは相対性理論からワープを考察することを目標として研究をスタートし、一年間勉強に励んだ。その中で何度も感じた、数式を直感的に理解したい、腑に落としたいという気持ちはおそらく誰もが抱く感情であると思う。数学や科学に登場する数式を直感的に理解することは、運用においても大いに助けとなる重要な過程であると考えている。そのために、これまでよりもより理解しやすい解釈の仕方を提案したい。

3. 研究内容

数式や数学的概念を日常的な場面をたとえに用いて解釈し、視覚的なイメージに落とし込むことでより簡単に理解できる方法を考える。

3-1 勾配(grad) 図1

勾配は3次元スカラー場に対して考えることも多いが、ここでは視覚的なイメージのしやすさを優先し2次元スカラー場に対する勾配を視覚化する。 $f(x, y)$ で表される2次元スカラー場 f は、3次元空間上で $(x, y, f(x, y))$ としてグラフを描くことが可能であり、これは現実世界の地形のように見ることが可能である。ここで、ある点 (x, y) における勾配は、地形の (x, y) 地点と同じ高さを繋いだ等高線について垂直な方向のうち高い方を向いている (x, y) 地点の地面の傾きが大きさのベクトルとして考えることが可能である。

3-2 発散(divergence) 図2

発散も勾配と同様に2次元ベクトル場に対するものを視覚化する。ベクトル場は水の流れに表すことによって理解しやすくな

ると考えた。ある点ベクトルの向きを水の流れる向きに対応させ、ベクトルの大きさを水の流れる速さに対応させる。そうすることで、発散は、正になる場所は水が湧き出る場所、が負になる場所は水が消滅する(水の下に穴があって流れ出ていると考えるとイメージしやすい)と考えることができる。

3-3 回転(rotation) 図3

回転も発散同様、2次元ベクトル場を水の流れに表して考える。ある点における回転はその場所に葉っぱ等を浮かべる場合を考える。葉っぱがある点に浮かべられ、場所は固定されて自由に回ることができる状況を考えると、葉っぱは周りの流れの速さの差によって回る。ここで、その点での回転は、回る向きに対して右ネジにおける親指の向きで回る速さを大きさとしたベクトルとして表すことができる。回転は3次元ベクトル場に対して行われる演算のため、このイメージを3方向それぞれで行うイメージで考えることができる。

3-4 スカラー場の線積分 図4

$$\int_C \mathbf{f} \cdot d\mathbf{r} A$$

スカラー量が分布している場をスカラー場と呼ぶ。スカラー場内の曲線 C に沿ってスカラー量の和を取ることを、スカラー場の線積分と言う。

図のように、雨の降っている場所を水桶を持って曲線 C に沿って一定の速度で通過するとする。雨の降っている場所は、降水量

というスカラー量が分布したスカラー場である。水桶を持ってここを通過したあとに水桶に溜まった水の量は、曲線Cに沿って降水量の和を取った値になる。

スカラー場の線積分はこのようなものと捉えることができる。

3-5 ベクトル場の線積分 図5

$$\int_C f(x) ds$$

ベクトル量が分布している場をベクトル場と言う。ベクトル場内の曲線C上の各点について分布しているベクトルと曲線Cの接線ベクトルの内積を計算し、その和を取ることをベクトル場の線積分と呼ぶ。

ベクトル場の線積分によって、サッカーのドリブルの上手さを測ることができる。

曲線Cに沿ってドリブルすることを考える。

ドリブルのボールタッチでボールにかかる力が一定であり、一定の細かい間隔でボールを蹴るとき、ボールを蹴る力の分布をベクトル場と捉えてベクトル場の線積分を行うと、曲線の接線方向に近い方向に蹴ると線積分の値が大きくなり、方向が外れるほど値が小さくなるので線積分で得られる値によってドリブルの上手さを測ることができる。

3-6 局面の面積 図6

曲面の面積を測りたいとき、曲面状の相異なる2曲線に沿った接ベクトルを考える。曲線各点の2曲線の接ベクトルを非常に細かく考えて外積をとると、その接ベクトル2つで囲まれた領域の面積を求めることができる。

これは、山の面積を求めたいときに小さな定規を使って山の上すべての領域でたくさんの四角形を作り、いくつの四角形ができたかを数えるようなものである。

図のように、山の表面は遠くから見ると曲面だが、近づくと局所的には平面と見ることができる。山を移動しながら、表面に沿って隙間なく定規を当てて四角形を作ってゆきそれを数えれば、山の表面積を求めることができる。

数式における接ベクトルが定規として作用するのである。

3-7 テンソル 図7

スカラー量、ベクトル量はすでに紹介した。今度は量の次元に注目する。

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}$$

スカラー量は0次元 ベクトル量は1次元の量である。

次元を一般化したものをテンソルと言う。つまり、スカラー量もベクトル量もテンソルの一種なのである。

テンソルの用例の一つは、2つの量を繋げることである。力と変位を繋げる事例として猫がクッションに座ることを考える。

クッションにかかる力は大雑把に考えると猫にかかる重力であるから、延長下向きの猫の質量に比例したベクトルである。この力に対してクッションは延長下向きに猫の形にへこむのではなく、ゆったりとした曲線を描いて沈む。延長下向きとそれに垂直な2つの異なる座標軸を考えると、力は一方向にだけかかっているのに、変位は力の方向以外にも生じる。猫がクッションに与える一方向の力は、クッションに3方向の変位を生じさせる。この力と変位をテンソルがつけられる。

同じように今度は斜めに力を加えるとしても、座標軸に沿って力を分解しそれぞれの成分に対して3方向の変位を考えることで、与える力によって生じる変位を計算できる。

5. 考察

数式をイメージでとらえることで新しい解釈を探すという作業は、誰しもが学習の過程で経験することだと思う。一人一人が考えて終わるよりも、解釈を共有する場所があれば、教科書の理解を簡単に深めることができると感じた。

6. 今後の展望

今後も相対論につながる数学を勉強する中で、理解に用いた解釈を共有していきたい

図1

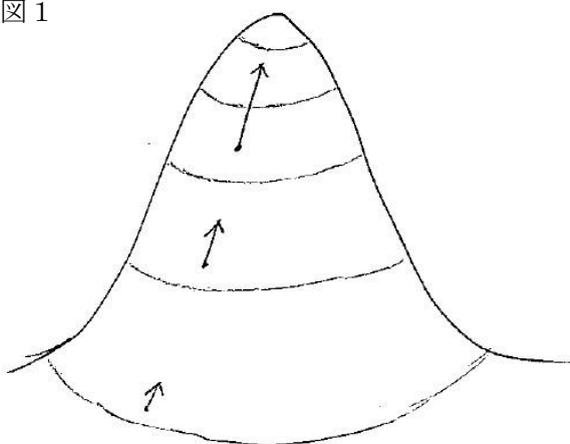


図2

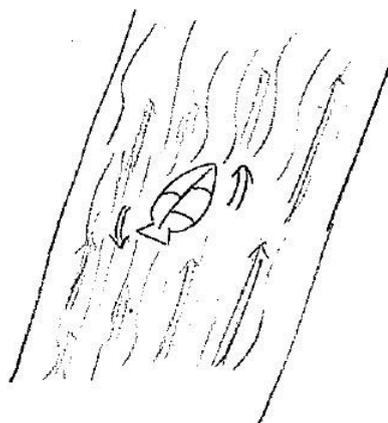


図4

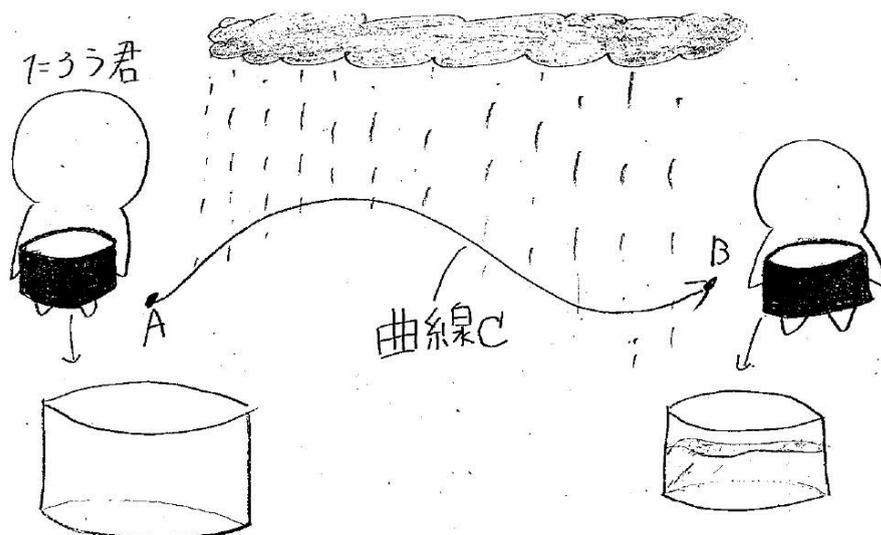


図5

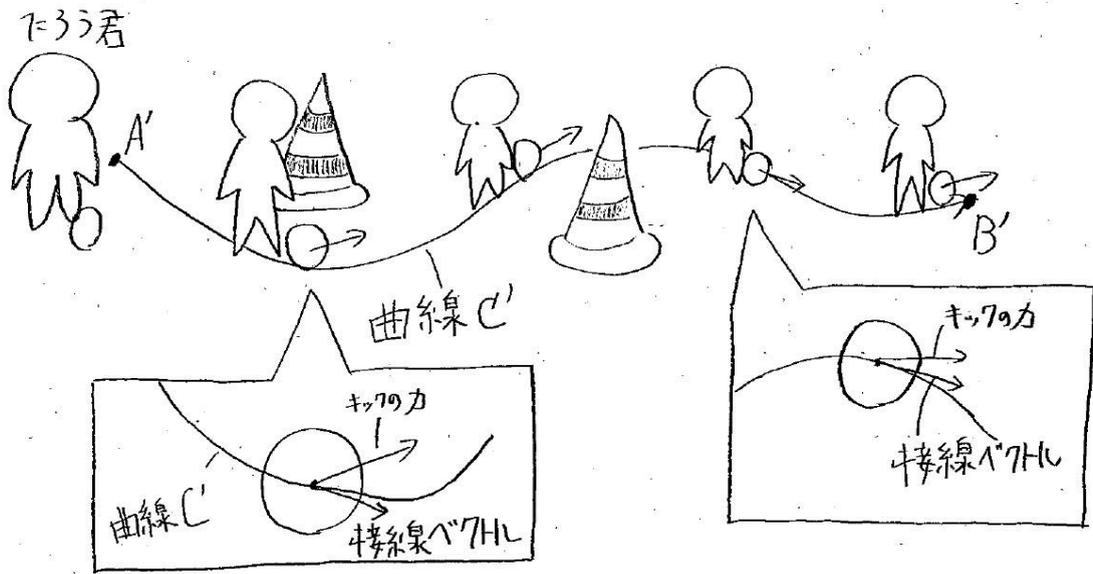
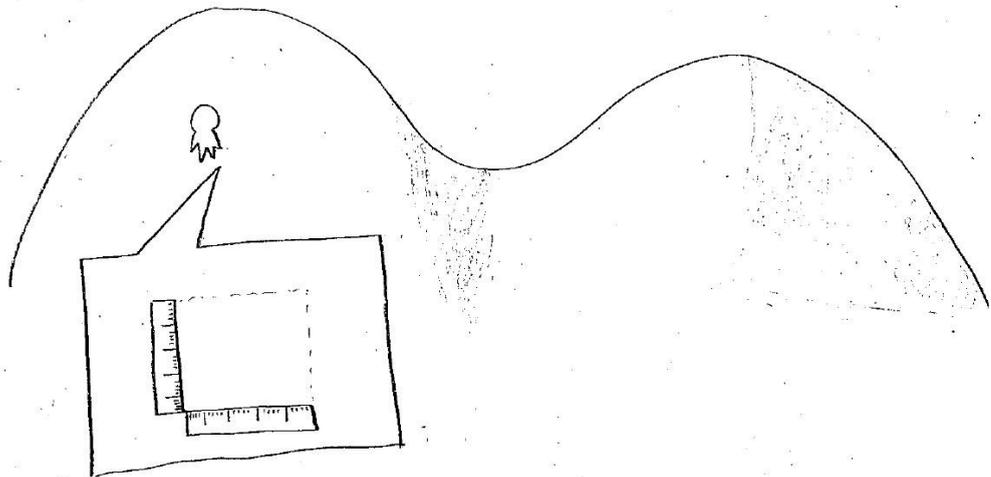


図6



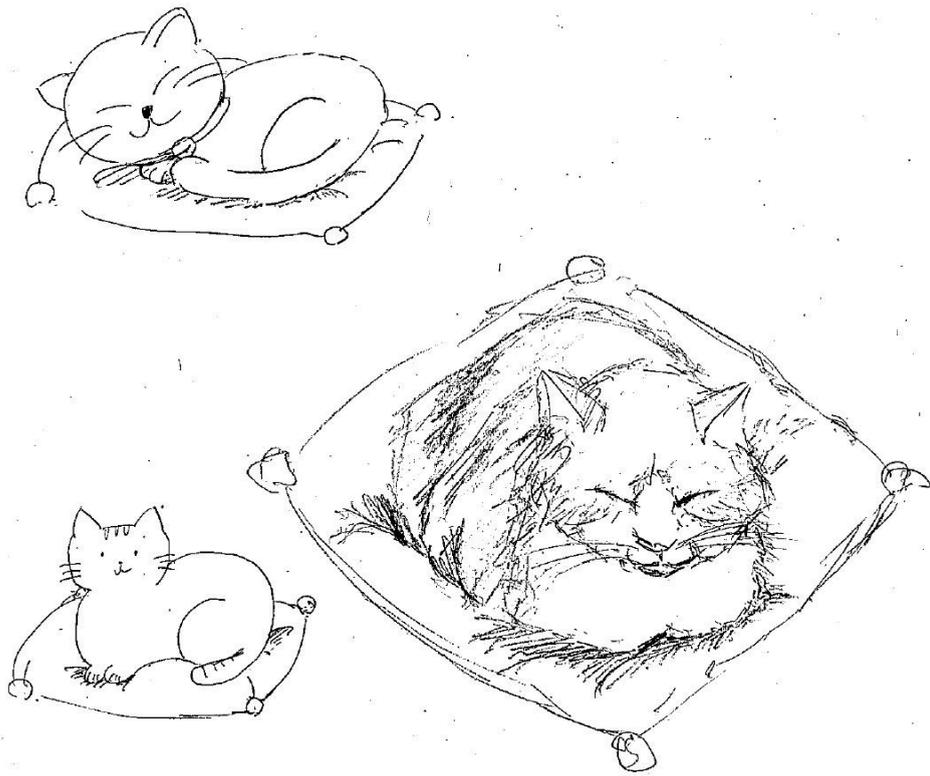


图7

2024年度

スーパーサイエンスハイスクール
サイエンス研究会 研究論文集

2025年(令和7年)4月1日 発行

国立大学法人奈良国立大学機構
奈良女子大学附属中等教育学校
〒630-8305 奈良市東紀寺町一丁目60番1号
TEL. 0742-26-2571
FAX 0742-20-3660
<https://nwuss.nara-wu.ac.jp/>

