

2023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

2024年3月1日

# 2023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
2023年度教育課程表	2
第4期SSH概念図	3
<b>研究論文</b>	
<b>化学班</b>	
緑茶抽出物が天然染料の染色堅牢度に及ぼす影響	5
Determination of the Degree of Ultraviolet Inhibition with Cyanotype	10
奈良・大阪の大気中のアルデヒドの定量測定	15
酢酸ナトリウム結晶成長における不純物の影響	20
連続的に起こる分子内環形成反応の開発	25
“AI”および“ヒト”の構造認識を活用したHDAC阻害薬の探索	27
塩化ナトリウムの結晶について	29
<b>生物班</b>	
抗原多様性がアレルギー病態に与える影響	33
神経細胞の突起伸長に対する大豆成分の効果	43
植物細胞融合と培養	47
<b>物理班</b>	
マルチモーダル対照学習を応用した五感から感情を推測、制御する手法の提案	50
強力音場を透過した音波の振る舞い	60
FM音源を搭載した和音の出力可能な電子ピアノの製作	71
QRコードによる開け閉めが可能なスマートロックの作成	73
二輪で駆動する球体型ロボットの制作	74
<b>数学班</b>	
折り紙における無理数の折り方	79
コラッツ予想の分析と拡張	83
$n$ 次元における中線定理	86
<b>基盤探究Ⅱ 科学探究類型（人文社会系）</b>	
純正律における和音の数値解析	94
音のテンポと人の感情や行動の関係	97
奈良の鹿と人間の共生社会の在り方	100
<b>基盤探究Ⅱ 科学探究類型（自然科学系）</b>	
キョウチクトウからのオレアンドリンの抽出—オレアンドリンの薬品としての利用に向けて—	103
飲料水に含まれる酸化防止剤の酸化速度と味覚変化について	106
Processingを用いた感染シミュレーターの作成	110
カルマン渦と地球温暖化	113
紙飛行機の形状の最適化	116
Unityの強化学習を用いた学校の避難経路の最適化	119

## SSH サイエンス研究会生徒論文集の刊行に当たって

令和5年度は、新型コロナウイルスが5類となり、オンラインから対面型への研究会が増えました。ただし、オンラインとの併用の研究会も開催され、遠隔地であっても参加できるようになったのは、この間のICT活用の結果、さまざまな工夫が可能となり、交流会が活性化したのではないかと考えています。奈良女子大学サイエンスコロキウムについては、今年度もオンライン開催となり、全国から多くの学校に参加していただくことができました。

さて、本校のサイエンス研究会は、平成17年に発足以来、「ゼロから作る」をコンセプトにして取り組んできました。「ゼロから作る」は、言うは易く行うは難しで、生徒の発想を大切にしながら、ある時は教員が生徒の盾となり、ある時は教員が伴走し、課題研究に取り組むことでサイエンスに向き合うことの厳しさとおもしろさを生徒と共に分かち合ってきました。課題研究で大切にしなければならないのは、まず課題のテーマ設定です。自分自身の中にそのテーマに取り組む発想の原点がなければなりません。なぜそのテーマに取り組みたいと思ったのか、動機を大切にしています。中高時代にしか思いつかない発想の原点を大切にしながら、学問研究の系譜の中に位置付けて考えていくことが求められます。過去の膨大な研究史に照らして、自分がこれから取り組もうとする課題は、どんな意味があるのかを考えることです。ここでは、自分一人で考えるだけでなく、教員の手助けが必要だったり、大学の研究者の助言が必要だったりします。課題のテーマ設定の段階で、自分と向き合ってしっかり考えることが重要で、この段階をおろそかにすると斬新な成果は生まれません。既存の枠組みを転換するような発想は、今ある学問の枠組みを相対化するようなところからうまれてくるのではないかと思います。だからこそ、中高時代にしか思いつかない発想を大切にする意味があるのだと思います。

一方、すでに取り組まれている研究の追体験をすることも決して無駄なことではありません。誰もが知っているような分野ですでに研究成果も出て、確定しているような分野であっても、おもしろいと思った分野があれば、研究史をたどりながら追体験していく取組から、見落としていた研究テーマが生まれてくることもあるかもしれません。何事もやってみなければわからないことが存在するはずで、一見無駄に見えることも、やり続けている中で見えてくることや、経験を積むことでしか見えない世界があるかもしれません。いずれにしても中高時代のサイエンス研究会での研究体験はその後の人生の大きな財産になると思います。

日本国内にとどまらず、世界中の中高生とつながりながら、ひとつのことを追究する経験を積み重ねることでもしか、達成しえない世界を見るために日々努力してほしいと思っています。

サイエンス研究会の生徒論文集の発刊に当たって、SSH19年間を見てきた者の一人の雑感を述べました。サイエンスの世界に足を踏み入れたみなさんには、サイエンスの世界の作法に学びつつ、サイエンスの常識を疑うことを忘れずに研究を続けてほしいと思います。

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申し上げます。今後もサイエンス研究会がさらに発展していきますようにご協力のほど、よろしくお願い申し上げます。

令和6年3月

奈良女子大学附属中等教育学校 校長 吉田 隆

# 2023(令和5)年度 教育課程表(45/50分換算)

2023.4.6

旧カリ45分、新カリ50分換算で表記

\*必修選択 △自由選択

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	文系	文系 PICASO	理系	理系 PICASO
1	国語(4) ・国語1 ・国語2	国語(4) ・国語1 ・国語2	国語総合1 (2)	現代の国語 (2)	論理国語(2)	現代文B(3)			現代文B(3)
2			国語総合2 (2)	言語文化 (2)	古典探究(2)				
3						Topic Studies I (4)	Topic Studies II (3)	Topic Studies III (4)	古典講読(1)
4			Writing II (1)	Writing III (2)	日本史B(3) 世界史B(3) 地理B(3) *(3)				
5	数学(5) ・代数I ・幾何I	数学(5) ・代数II ・幾何II				Writing I (1)	解析I (2)	解析II (4)	日本史B(3) 世界史B(3) 地理B(3) 倫理・政経(3) △(3)
6			解析入門 (3)	代数・幾何I (2)	数学演習(2) △(2)	化学演習(2) △(2)			
7							代数・幾何入門 (2)	物理入門 (2)	物理演習(2) 生物演習(2) △(2)
8			理科(4) ・理科1 ・理科2	理科(4) ・理科1 ・理科2 ・理科3	理科総合 (3)	生物入門 (2)			
9	音楽I 美術I 工芸I *(2)	化学基礎 (2)					化学入門(1)	化学 (2)	Reading(1) △(1)
10			社会(4)	社会(4)	社会 (2)	化学 (2)			
11	音楽(1)	音楽(1)					音楽 (1)	家庭基礎(2)	Reading(1) △(1)
12			美術(1)	美術(1)	美術 (1)	家庭基礎(2)			
13	技術・家庭(2)	技術・家庭(2)					音楽・美術(1)	体育(2)	Reading(1) △(1)
14			保健・体育(3)	保健・体育(3)	技術・家庭(1)	体育(2)			
15	探究入門I (1)	探究入門II (1)					保健・体育(3)	保健(2)	Reading(1) △(1)
16			自己探究(1)	自己探究(1)	探究基礎(1)	基礎探究I (2)			
17	道德(1)	道德(1)					道德 (1)	基礎探究II (2) (科学探究/社会貢献/コ ロキウム/PICASO)	Reading(1) △(1)
18			HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)			
19	HR(1)	HR(1)					HR(1)	HR(1)	Reading(1) △(1)
20			HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)			
21	HR(1)	HR(1)					HR(1)	HR(1)	Reading(1) △(1)
22			HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)			
23	HR(1)	HR(1)					HR(1)	HR(1)	Reading(1) △(1)
24			HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)			
25	HR(1)	HR(1)					HR(1)	HR(1)	Reading(1) △(1)
26			HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)			
27	HR(1)	HR(1)					HR(1)	HR(1)	Reading(1) △(1)
28			HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)			
29	HR(1)	HR(1)					HR(1)	HR(1)	Reading(1) △(1)
30			HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)			
31	HR(1)	HR(1)					HR(1)	HR(1)	Reading(1) △(1)
32			HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)			
33	HR(1)	HR(1)					HR(1)	HR(1)	Reading(1) △(1)
34			HR(1)	HR(1)	HR(1)	HR(1)			
短期集中	探究入門I	探究入門II					CG	AG	AG

# 研 究 論 文

# 緑茶出物が天然染料の染色堅牢度に及ぼす影響

5年 A組 吉田 菜乃果  
指導教員 鵜飼 哲真

## 1. 概要

天然染料は、日本でも伝統的に衣服の染色などとして使用され、現在も日本文化の発信において大きな役割を果たしている。2022年、タイの王立高校と両国の伝統的な天然染料に関する国際共同研究を行い、互いの国と染料の魅力を学んだと同時に、天然染料は変退色や色泣きといった染色堅牢度に係る問題があることを知った。その解決方法として、日本で古くから行われてきたタンニン媒染の手法を応用し、緑茶を媒染剤として使用したときの色合いや堅牢度、性質を、デジタルカメラと自作のプログラムを用いた色差の測定やクロマトグラフ法により、媒染剤としての緑茶の有用性を調べた。

## 2. はじめに

2022年に行ったタイの王立高校との国際共同研究で、互いの国と染料の魅力を学んだと同時に、天然染料が堅牢度の低さに係る問題を抱えていることを知り、その解決方法を探りたいと思った。そこで、日本で古くから行われてきたタンニン媒染に注目し、タンニンが多く含まれ、奈良県の名産品でもある緑茶を使用することを考えた。本研究は、天然染料の弱点の克服と、日本の茶文化を象徴する緑茶の新たな有用性の発見につなげることを目的としている。

## 3. 染料ならびに媒染剤について

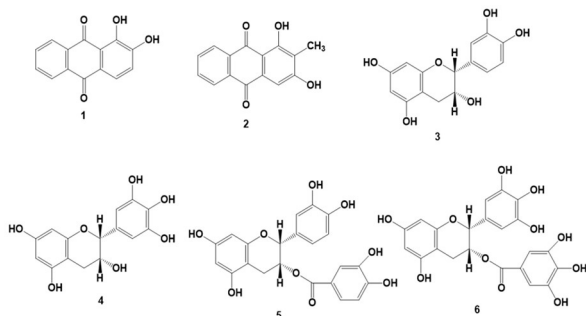


図1. セイヨウアカネ色素とカテキン  
左上から順に 1 アリザリン, 2 ルビアジン,  
3 EC, 4 EGC, 5 ECg, 6 EGCg

本研究では、染料にセイヨウアカネを、媒染剤に緑茶抽出物を使用した。セイヨウアカネはアカネ科の多年草で、色素にアリザリンとその配糖体、ルビアジン、ムンジスチン、プソイドプルプ

リンなどを持つ<sup>1)</sup>。タンニン媒染は、タンパク質や金属化合物と結合し難溶性の塩を形成する働きにより色素の定着を高めるとされている。緑茶に含まれるタンニンの多くはフラボノイド系ポリフェノールのカテキン類で、主にエピカテキン (EC)、エピガロカテキン (EGC)、エピカテキンガレート (ECg)、エピガロカテキンガレート (EGCg) などがあり、水色 (茶の色) や味に影響を及ぼす他、抗酸化性、抗菌性などを持つ<sup>2)</sup>。

## 4. 実験

試薬はすべて市販のものを使用した。

### 4. 1 実験1: セイヨウアカネによる多染交織布の染色

緑茶抽出物で媒染したもの、無媒染の他に、比較のために媒染法として一般的なアルミニウム媒染を施したものも作成し、各繊維に対するセイヨウアカネの染まり方と媒染による違いを調べた。セイヨウアカネは粗粉 (田中直染料店500g) を、緑茶茶葉は「ホームサイズ緑茶」(伊藤園150g) を使用した。多染交織布 (株式会社ナリカ Cat No.35-8010) は染色後に幅1.5cmの短冊状にした。媒染は全て先媒染である。

#### (1) 媒染

緑茶媒染は、緑茶茶葉8.0 gを95°Cの水200mLで20分浸出し媒染液とした。その後媒染液に布を2分浸しすぐ作業を4回行った。アルミニウム媒染は、ミョウバン  $AlK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$  0.80gを45°Cの

水200mL に溶かし媒染液とした。その後加熱しながら布を20分浸し、すすいだ。

## (2) 染色<sup>3)</sup>

セイヨウアカネ12.0g を水300mL で20分煮出す作業を2回行い、染色液を得た。そこに布を90°C以上で20分浸し、すすいで乾燥させた。

## (3) 色の測定

染色布をデジタルカメラで撮影し、自作のプログラム(Processing 3.5.4)でHSB 値を得た。

## 4. 2 実験2：染色堅牢度試験

実験1で作成した各染色布に負荷を与え、色の変化やそれに対する緑茶媒染の影響を調べた。評価方法として、各実験の前後に同一照明下で布の写真を撮影し、HSB 値を入手した後、フリーソフトCCConverterでL\*a\*b\*形式に変換し、色差(CIE1976 UCS 色度図)を求めた。

### (1)実験2.1：紫外線に対する堅牢度

紫外線ランプ(東芝「ブラックライト蛍光ランプ」FL20S BLB)を合計48時間照射した。

### (2)実験2.2：酸性雨に対する堅牢度

人工酸性雨は、硫酸と硝酸の1:1(モル比)混合液をpH4.2<sup>4,5)</sup>に調製した。この水溶液100mLに各染色布を60分間浸した。

### (3)実験2.3：洗濯に対する堅牢度

45°Cの5g/Lセッケン水(株式会社東邦「ウタマロ石けん」)に布を入れ、マグネチックスターラーで30分回転させた<sup>6,7)</sup>。

## 4. 3 実験3：緑茶成分の薄層クロマトグラフィーによる分離

緑茶の水色は光合成色素やカテキンに由来し、抽出温度により異なる。その温度と水色について調べるため二次元展開薄層クロマトグラフィーにより色素やカテキンの分離を行った。

緑茶茶葉3.0gを90°C、50°C、常温(17.5°C、水出しとする)の水50mLで20分浸出し、ろ紙とセライトで吸引ろ過したものを酢酸エチルで抽出し、濃縮した。展開溶媒は、石油エーテル：アセトン=7:3<sup>8)</sup>(溶媒A)により色素を、1-ブタノール：酢酸：水=4:1:1<sup>9)</sup>(溶媒B)によりカテキンを分離した。TLCプレートは”TLC Silica gel 60 25 Aluminum sheets”(Merck社20cm×20cm)を5cm四方

の正方形にし、溶媒A、Bの順に二次元展開した後、UVランプを照射しRf値を調べた。また実験後、塩化鉄(III)水溶液に浸し、カテキンの存在について調べた。

## 5. 結果と考察

### 5. 1 実験1：セイヨウアカネによる多染交織布の染色

緑茶媒染では布が薄く茶色に染まった。ナイロン、毛、絹が濃染され、アセテート、ポリエステルがあまり染まらなかった(図2)。

無媒染布で、毛とナイロンは赤、アセテートとアクリルは黄、絹は橙色、綿とレーヨン、ポリエステルは薄赤色に染まり、ナイロン、毛、絹が濃染された(図3)。毛や絹などのタンパク質繊維の染色では、繊維のアミド基、ペプチド基と染料の親水基との水素結合が働くと考えられているが<sup>10)</sup>、結果から、セイヨウアカネは赤と黄の2つの色素を持つことと、正に帯電した繊維ほど赤味が強いことから、染色には静電的引力も関わっていることが示唆される。

緑茶媒染布は、無媒染布と比較してナイロン、毛、絹がやや濃染され、毛、レーヨン、絹、ポリエステルが僅かに赤味を、それ以外は黄味を帯びた(図4)。これはタンニンの働きや、緑茶の色素によると考えられる。アルミ媒染布はアルミニウムイオンと色素の錯体形成により赤味を帯び<sup>10)</sup>、濃染されたと考えられる。

### 5. 2 実験2：染色堅牢度試験

#### (1) 実験2.1：紫外線に対する堅牢度

ナイロン以外の繊維で、緑茶媒染布は無媒染布よりも色差が小さくなった(図5)。無媒染布において特に彩度が低下し、退色が起こったが、媒染布はアクリル以外の繊維で彩度が上昇した(図6)。これより、無媒染布と比較して、媒染布で退色が抑制されたと考えられる。

#### (2) 実験2.2：酸性雨に対する堅牢度

毛とアクリル以外で、緑茶媒染布は無媒染布より色差が小さくなり、全体的には毛と絹の色差が小さく、レーヨンが最大となった(図7)。また、無媒染、アルミ媒染布はやや黄味を帯びたが、緑茶媒染布は赤味を帯びた(図8)。

#### (3) 実験2.3：洗濯に対する堅牢度

全体的に色差が大きく、明度や彩度が低下した(図9)。明度の低下は塩基性溶液中での染料の酸化によると考えられ、アルミ媒染布で顕著であった(図10)。彩度の低下は染料の溶液への溶出やセッケンの働きによると考えられ、無媒染布で顕著であった(図11)。緑茶媒染布はアルミ媒染布と無媒染布の中間に位置した。

### 5. 3 実験3：緑茶成分の薄層クロマトグラフィーによる分離

緑茶抽出液は、液温が高いほど褐色が濃く、水出しでは黄～黄緑色になった(図12)。これは加熱によりクロロフィルがフェオフィチンに、カテキンがテアフラビン類やテアルビジン類に変化したためとされている<sup>12)</sup>。酢酸エチル抽出液は、90℃では黄褐色、50℃では黄～黄緑色、水出しではほぼ無色となった。

溶媒Aでは、90℃、50℃でバンドが3つできたが、水出しではできなかった。また、バンドA-aは蛍光が見られ、Rf値もクロロフィルaの挙動と類似していたが、灰色だったため、フェオフィチンか、クロロフィルaが展開後に酸化しフェオフィチンとなった可能性がある。(表)

溶媒Bでは、前線付近に茶色で二、三又のスポット(バンドB-a～B-c)と、黄～黄緑色(バンドB-d)、分散した無色の蛍光物質が見られ、バンドA-a～A-cは溶媒前線付近に移動した。90℃、50℃では抽出温度が高くなるとともにバンドB-a～B-cの茶色は濃くなり、B-dに重なった。これを塩化鉄(Ⅲ)水溶液に浸すとB-a～B-cのみ呈色したため

(図13)、テアフラビン類やテアルビジン類に変化したカテキンと考えられる(図14)。この部分について、枝分かれ部分を左から順に別のバンドB-a～B-cと見なし、種類を考察した(表1)。

各液温における水色と、テアフラビン類やテアルビジン類、フェオフィチンの存在から、加熱等によって、クロロフィルやカテキンが酸化し、褐色になったことが分かる。塩化鉄(Ⅲ)と反応しなかった色素(バンドB-d)は、キサントフィルとともに強い黄味の原因となるのではないかと考えた。また全体的にRf値が高く、展開溶媒の極性が高い可能性があり、バンドが上手く分かれなかったり、水出しで光合成色素が抽出されなかったこ

とから、色素の抽出方法や展開溶媒について検討し直す必要がある。

## 6. まとめ

緑茶媒染布には一定程度良好な堅牢性が見られた。しかし緑茶媒布と無媒染布との色の違いは少なかったため、この手法は、安価で、廃液による環境への負荷が小さく、染料本来の色を損なわずに染色堅牢度改善に一定程度の期待ができると考えられる。またカテキンは抽出温度が高いほど溶出量が多くなる<sup>12)</sup>ことから、緑茶を媒染剤として使用するときには、クロロフィルやカテキンの酸化による褐変の防止のためにも、熱水で抽出したものを使用するのがよいと思われる。さらに、実験2.3や2022年の研究結果からも、天然染料は酸化による影響を受けやすい可能性がある。したがって、染料の酸化を抑制することが、天然染料の変退色に係る問題の解決に繋がると考えた。その上で、他の媒染法との併用など、より効果的な媒染剤としての使用を検討すると同時に、日本文化の媒体としての緑茶の新たな有用性に関する考察を深めたい。

## 7. 参考文献

- 1) 増井幸夫・神崎夏子、「植物染めのサイエンス—万葉の色を化学する—」、裳華房、2007。
- 2) 前田清一、「緑茶の化学」、調理科学、1969、2巻、2号：73-77。
- 3) SEIWA、西洋茜の染め方、enjoy fabric dyeing、(<https://seiwonet.jp/ap/NList02.d1l/?No=NS015015>)。
- 4) 西東京市 Web、「酸性雨調査結果令和2年度」
- 5) 三輪誠・伊豆田猛・戸塚績、「スギ苗の生長に対する人工酸性雨とオゾンの単独及び複合影響」、大気汚染学会誌28(5)：279-287、1993。
- 6) 日本産業規格、洗濯に対する染色堅牢度試験方法、2011、JIS L 0844 A-1。
- 7) 一般社団法人日本繊維製品品質技術センター、Test 染色堅ろう度、QTEC、試験業務、(<https://www.qtec.or.jp/search/test/kenro/>)。
- 8) 吉里勝利ほか、「高等学校生物」、第一学習社、2023。
- 9) 大阪府立高津高等学校、「カテキンの効率的な取り出し方」、2020。
- 10) 大下浩司ほか、茜染めの染色挙動に対する一考察、文化財情報学研究、11号：21-24。
- 11) 山西貞、「お茶の科学」、裳華房、1992。
- 12) 堀江秀樹ほか、「茶主要成分の茶浸出液への溶出特性」、2001、茶研法91：29-33。





図2. 緑茶媒染多染交織布  
上から順に、綿、ナイロン、アセテート、毛、レーヨン、アクリル、絹、ポリエステル

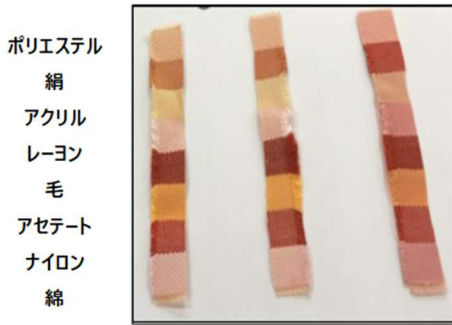


図3. セイヨウアカネによる多染交織布の染色  
左から無媒染、緑茶媒染、アルミ媒染

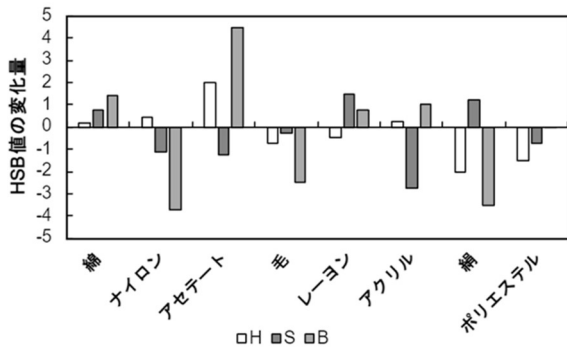


図4. 無媒染-緑茶媒染 HSB 値差

色相 H の色相環の赤-黄部分で、H 値が増加すると黄色に近づくため「黄味を帯びる」、減少すると赤色に近づくため「赤味を帯びる」とする。

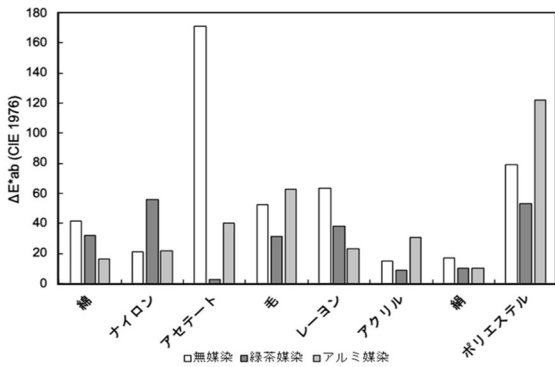


図5. 実験2.1: 紫外線ランプ照射前後の色差

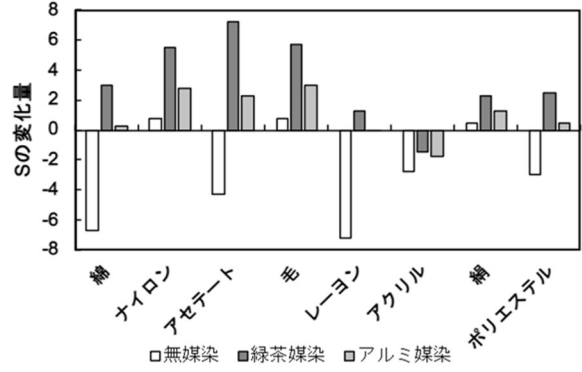


図6. 実験2.1: 彩度Sの変化

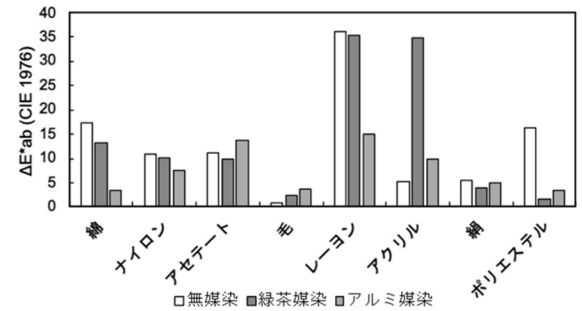


図7. 実験2.2: 人工酸性雨による色の変化

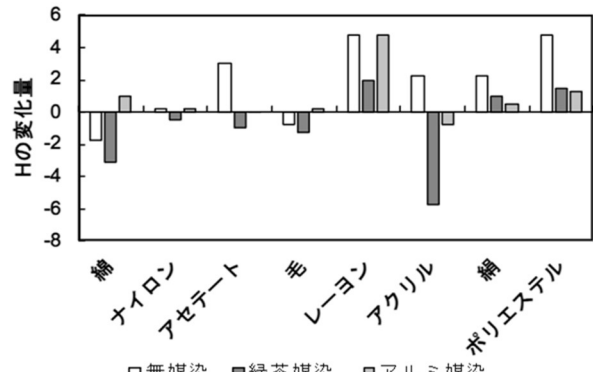


図8. 実験2.2: 色相Hの変化

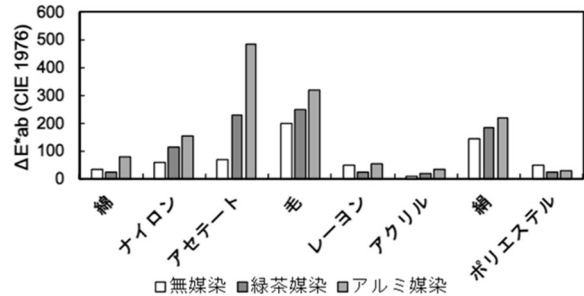


図9. 実験2.3: 洗濯による色の変化

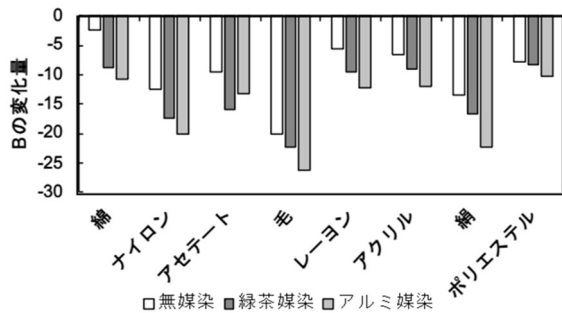


図 1 0. 実験 2. 3 : 明度 B の変化

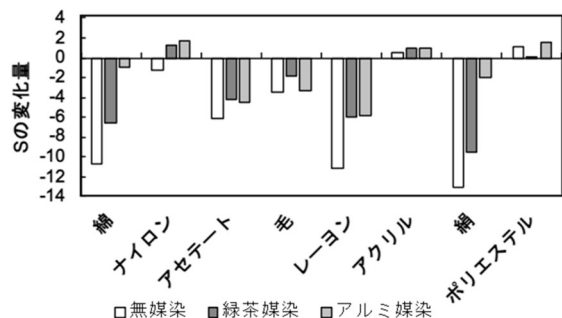


図 1 1. 実験 2. 3 : 彩度 S の変化

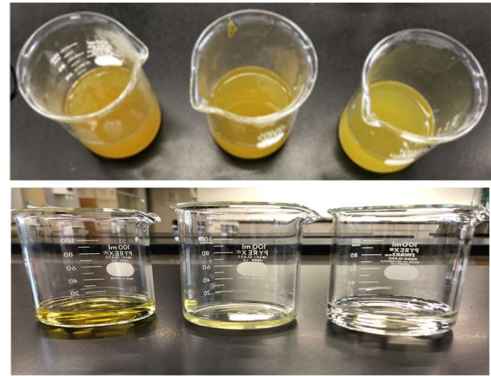


図 1 2. 抽出液：緑茶（上），酢酸エチル（下）  
左から90℃，50℃，水出し

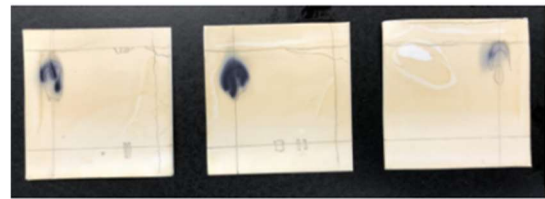
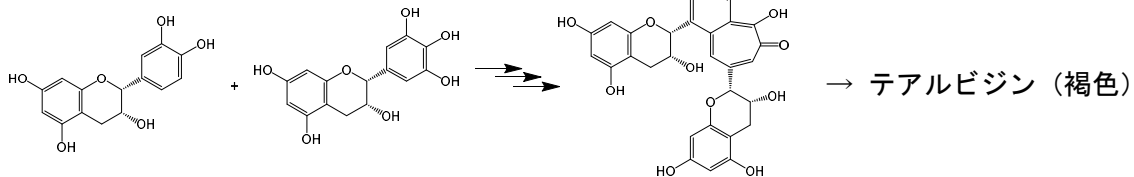


図 1 3. 塩化鉄（III）水溶液に浸した後の様子  
左から90℃，50℃，水出し



カテコール型カテキン    ピロガロール型カテキン    テアフラビン（橙赤色）

図 1 4. テアフラビン，テアルビジンの生成  
二分子のカテキンが酸化，脱炭酸を経てテアフラビンとなる。

表 1. 緑茶の抽出温度と Rf 値

溶媒 A : 光合成色素の分離				溶媒 B : カテキンの分離			
液温 (°C)	90	50	17.5	液温 (°C)	90	50	17.5
バンド A-a	0.71	0.68	-	バンド B-a	0.78	0.69	0.99
バンド A-b	0.68	0.60	-	バンド B-b	0.74	0.61	-
バンド A-c	0.46	0.43	-	バンド B-c	0.60	0.78	-
				バンド B-d	0.65	0.69	0.66
展開距離 (cm)	3.50	3.40	3.95	展開距離 (cm)	3.30	3.21	3.21

バンド A-a. クロロフィル a (フェオフィチン)

バンド A-b. クロロフィル b

バンド A-c. キサントフィル

90B-a. ECg

90B-b. EGCg

90B-c. EC

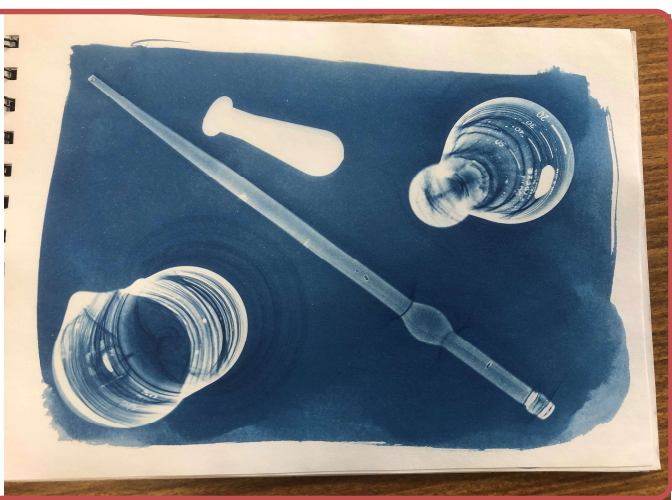
50B-a. EGCg

50B-b. EC

50B-c. ECg

17.5B-a. カテキン (未分離)

それぞれのバンドについて，文献値<sup>8-9)</sup>から物質を考察した。溶媒 B において，図 1 2 で塩化鉄 (III) により黒色に着色した二又，三又の部分からバンド a, b, c とし，それらに重なって存在するスポットまたは水出しにおいて着色部分の下に現れたスポットをバンド d とした。バンド d については，どの液温にも共通して存在する黄色系の色素であることを考えると，フラボノールや，ケンフェロール，ケルセチン，ミリセチンなどのアグリコン<sup>11)</sup>が含まれている可能性がある。



**Keywords:** Cyanotype, Blueprint, Ultraviolet, Photographic Printing

## Determination of the Degree of Ultraviolet Inhibition with Cyanotype

### Introduction

The cyanotype forms the origin of pictures, and its uniqueness stems from using UV light during the printing process. Cyanotype is based on a mechanism that quantifies the amount of ultraviolet (UV) light transmitted through a material. This mechanism can be used as a tool to design materials that limit UV exposure and their associated risks. Overexposure to UV radiation causes severe health issues, such as sunburn, erythema, photodamage, photocarcinogenesis, and eye damage<sup>2</sup>. The production and use of plastics have remarkably increased in recent decades owing to their accessibility and applicability; thus, plastic disposal has become a major challenge. The amount of plastic in the ocean is expected to exceed the quantity of fish consumed by 2050. According to the Japan Meteorological Agency<sup>3</sup>, the amount of UV rays reaching Tsukuba city in Japan increases annually. We found that some sunscreens contain microplastics. Therefore, light transmittance through these plastics is possible. Such a possibility could increase the risks<sup>4</sup> associated with UV exposure owing to the continuous increase in the annual amount of radiation and the use of plastics. We conducted experiments to identify the wavelengths that specifically caused the reaction by transmitting light through various colored films and proposed the fabrication of high-performance UV protection tools by investigating colors with lower transmittance. This study aims to find a potential solution to contemporary plastic-related issues, using the traditional blueprinting method.

Sanami Kanda<sup>1</sup>  
Momo Makino<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nara Women's University Secondary School,  
1-chōme-60-1 Higashikiderachō, Nara, Japan,  
630-8305

### Abstract

We capture photographs to convert valuable moments into distinguishable memories. Photographs can be easily printed today, however, this process was remarkably different at the time of their discovery. The cyanotype, known as the blueprint process, forms the origin of photographs and was first invented by the English scientist John Frederick William Herschel in 1842. The photographers did not use this methodology owing to its distinctive colors. However, it was extensively utilized to create mathematical or constructional drawings due to several advantages over the previously used silver method in terms of cost, durability, and safety. Electron transfer between iron ions leads to the appearance of a blue color, and light is used as a catalyst for creating different valences. An image with gradation forms as a colored film, which suppresses light-induced changes due to light absorption at 300–400 nm<sup>1</sup> wavelengths. The areas covered by the colored films are light blue than the uncovered or white areas because the film prevents the conversion of iron (III) into iron (II). The paper is washed with water to remove unreacted yellow iron (III), and photographs are obtained with blue gradation. We use various materials to intercept light and observe the differences depending on the shading material.

# Materials and Methods

## Materials

1. Spectroscopic charge-coupled device (CCD)
2. Fiber patch cords
3. Ultraviolet radiator
4. Tungsten halogen light source
5. Potassium hexacyanoferrate (III)
6. Ferric ammonium citrate
7. Citric acid
8. Beaker (50 mL)
9. Graduated cylinder
10. Dispensing spoon
11. Brush
12. Prism lens
13. Stand
14. Pipette
15. Clamp
16. Plastic tray
17. Glass rod

## Methods

### Part 1 Cyanotype Creation

1. Steps 1–3 were conducted in a darkroom. Potassium hexacyanoferrate<sup>5</sup> (III) (0.50 g), ferric ammonium citrate<sup>6</sup> (1.0 g), and distilled water (20.0 mL) were placed in a beaker using dispensing spoons, and mix the chemicals with glass rod.
2. The chemicals were passed through filter paper using a brush to ensure even distribution.
3. The chemically impregnated filter paper was exposed to UV light using UV lamps or sunlight. When UV light was intercepted by the plastic, the material was taped onto paper to cover it. Colored overhead projector (OHP) sheets were used to intercept the UV light with colored films, as shown in Figures 1 and 2.
4. Distilled water (500.0 mL) and citric acid (5.0 mL) were placed in a plastic tray to prevent unwanted reactions that can occur in a metal tray.
5. The filter paper in Step 3 was dipped into the solution in the plastic tray to wash away the unreacted chemicals.
6. The paper was washed with distilled water.



Figure 1. OHP sheet colored with water-based pigments.

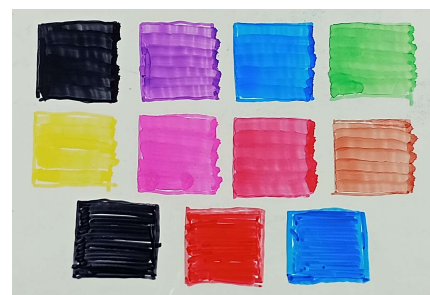


Figure 2. OHP sheet colored with oil-based dyes.

### Part 2 Spectroscopic Studies of Light Transmitted Through Filter Paper After Reaction

1. The lights were turned off, and the curtain was closed to prevent UV light from affecting the measurement.
2. CCD X-ray detectors, fiber cords, a tungsten halogen light source, a computer for obtaining the spectrum, a prism lens, and stands were assembled, as shown in Figure 3 and 4.

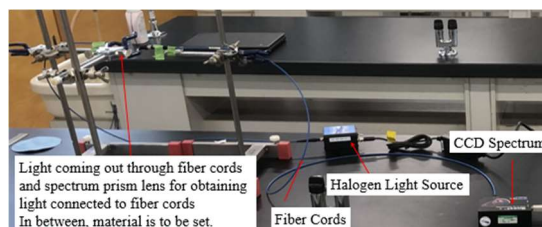


Figure 3. Experimental setup using fiber cords, tungsten halogen light source, CCD, prism lens, and stands.

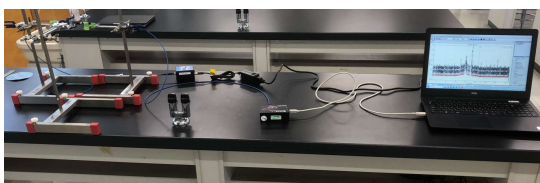


Figure 4. Image of the entire setup for measurement

3. The filter paper was secured on a stand using a clamp to measure light transmittance.
4. The computer program for obtaining spectrum data (BWspec) was launched.

### Equations and chemical formulae

The reaction depicted in Figure 5 is performed in this experiment.

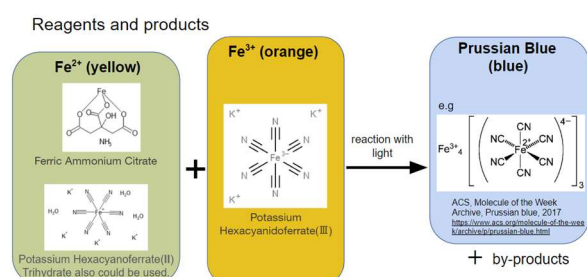


Figure 5. Chemical formulae for cyanotype with chemicals and their images.

## Results and Discussion

### UV Light Transmittance of Plastics

The blue color of the filter paper darkened as more reactions occurred, indicating that the intercept material exhibited a higher UV light transmittance. Lower UV light transmittance was associated with higher peak intensity. Polypropylene (PP) exhibits the highest UV radiation transmittance, followed by polyvinylidene chloride (PVDC), polystyrene (PS), polyethylene (PE),

polyethylene terephthalate (PET), and high-density polyethylene (HDPE) (Figure 6). Differences are observed at the highest relative intensity, which is approximately 614 nm for polypropylene, polyvinylidene chloride, and high-density polyethylene, and 271 nm for the other materials.

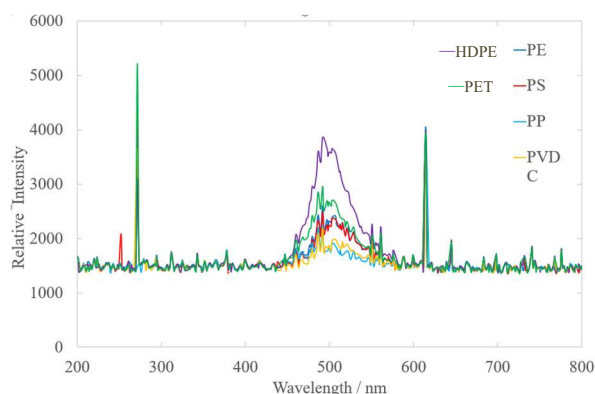


Figure 6. Spectra obtained through the filter papers with BWspec, where UV light was intercepted by plastic.

This reaction is promoted by the UV radiation that originates from the sun and constitutes our daily UV radiation exposure. We are exposed to two types of UV radiation in our daily lives: ultraviolet A (UVA) and ultraviolet B (UVB). UVA has a wavelength of 320–400 nm and promotes skin cell aging, whereas UVB has a wavelength of 280–320 nm and causes sunburns owing to its higher energy. This experiment used radiation with wavelengths between 300–400 nm<sup>7</sup>, which enabled the observation of UVA inhibition. With the increasing amount of UV radiation, the risk of skin cancer and other adverse effects of UV radiation are expected to increase over the years. These data would be valuable for developing UV protection tools.

## UV Light Transmittance of Colored OHP Films

Figure 7 indicates a minimal reaction for the OHP film with black pigment, followed by light green, purple, blue, and no pigment. The spectrum from the black film appears as an outlier but indicates the prevention of nearly all UV light. Figure 8 reveals that the minimal reaction occurs with the black film, followed by the light-green, non-colored, blue, and purple films.

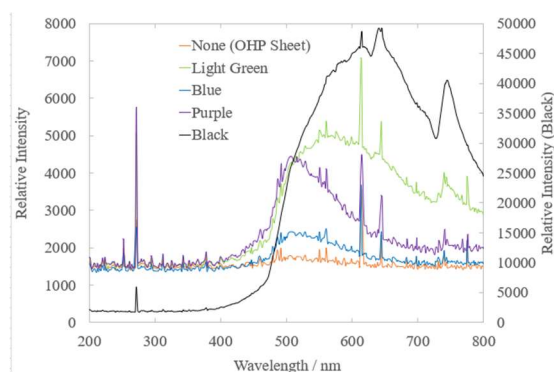


Figure 7. Spectra obtained through the filter papers with BWspec, where UV light was intercepted by an OHP film colored with water-based pigment.

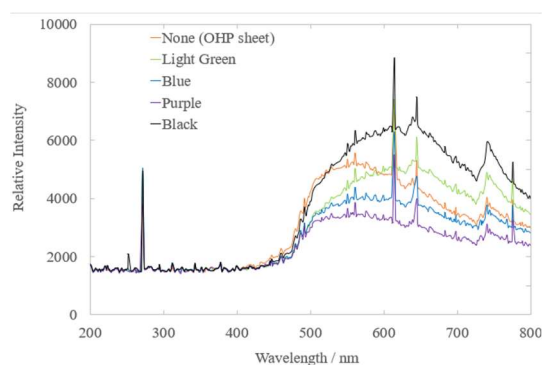


Figure 8. Spectra obtained through the filter papers with BWspec, where UV light was intercepted by an OHP film colored with oil-based dye.

A strong response is observed when radiation with short wavelengths (such as violet and blue light) are transmitted, indicating that shorter wavelengths have a considerable effect on the response, as described in the Introduction.

The peaks in the spectra in figure 7 and 8 are different, and the relative intensities for the films with the dye are higher than those for the films with the pigment, which could be attributed to their respective structures. Dyes are soluble, transparent, and do not scatter light, whereas pigments are insoluble, opaque, scatter light, and are commonly suspended in a medium or binder. The size of the pigment particles was larger than that of the dyes, possibly leading to a lower particle packing ratio and a higher transmission rate, even though the particles scattered UV light. Therefore, smaller constituent particles exhibit a higher packing ratio and a greater scattering contribution, rendering them more effective at blocking UV radiation.

## C Conclusions

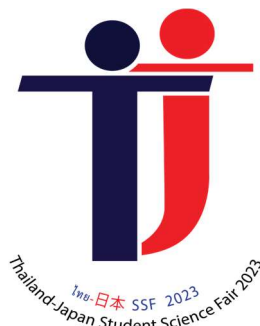
Considering the degree of UV inhibition with blueprinting characteristics, this study confirms that plastics such as polyethylene and polyvinylidene chloride effectively block UV light. The structural differences between pigments and dyes lead to different UV inhibition rates. These data can be used to develop products that efficiently reduce the risk of UV radiation-induced diseases. The low UV inhibition of plastics used primarily in containers, such as polypropylene and polystyrene, and the high UV inhibition of PET, which is reused as shirts, opens up the possibility of producing products with high UV inhibition. Similar experiments would be conducted with nonplastic materials to address the issue of marine plastics and strike a balance between human health and environmental protection.

## A Acknowledgments

I would like to express my gratitude to Tetsuma Ukai, Hiroyuki Matsuura, and the entire staff at Nara Women's University Secondary School, who supported me by providing the resources, materials, and equipment required for this project, which would not have been successful without their sincere cooperation.

## References

- [1] Mike Ware, Cyanotype: The History, Science and Art of Photographic Printing in Prussian Blue. London; Bradford (England): Science Museum; National Museum of Photography, Film & Television, (2004)
- [2] Tadakatsu Ohnaka, Health Effects of Ultraviolet Radiation, *The Annals of physiological anthropology*, Vol. 12, No. 1: 1–10, (1993)
- [3] 気象庁(Japan Meteorological Agency), “オゾン層・紫外線の診断情報。紫外線の経年変化” (Information about ozone layer and ultra violet. Aging of ultraviolet), [https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/uvhp/diag\\_cie.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/uvhp/diag_cie.html), (2023)
- [4] Glen D. Lawrence and Stuart Fishelson, UV Catalysis, Cyanotype Photography, and Sunscreen, *Journal of Chemical Education*, Vol. 76, No. 9: 1199, (2008)
- [5] Shinichi Kikuchi, 写真化学(Photochemistry), 共立出版株式会社(Kyoritsu Shuppan Co.), 244–249, (1985)
- [6] Harmon B. Abrahamson, The Photochemical Basis of Cyanotype Photography, *Journal of Chemical Education*, Vol. 78, No. 3: 311, (2001)
- [7] Glen D. Lawrence and Stuart Fishelson, Blueprint Photography by the Cyanotype Process, *Journal of Chemical Education*, Vol. 76, No. 9: 1216A–1216B, (1999)



# 奈良・大阪の大気中のアルデヒドの定量測定

5年C組 福留 菜月

5年C組 廣谷 美羽

指導教員 鶴飼 哲真

## 1. 概要

環境省の定める大気測定法により、2022年8月に奈良県および大阪府の各2地点の大気中のアルデヒド類および揮発性有機化合物（VOC）の調査を行った。ホルムアルデヒドとアセトアルデヒドの調査結果は、大阪府2地点より奈良県2地点の方が、濃度が高いことが分かった。特に高濃度であった奈良市東紀寺町について、一過性の局所的な高濃度事例と考えられるが、現在のところ原因の特定ができていない。1つの仮説として、ペンキのアルデヒド放散性による、気体に含まれるアルデヒド類の測定方法の応用を目指した。

## 2. はじめに

2020年春、COVID-19感染拡大防止のため世界中で人々の移動が制限され、大気汚染が一時的に軽減したことをテレビや新聞の報道で知った。このときに私たちは大気汚染の仕組みや調査方法に興味を持ち、大気中の光化学オキシダント（その主成分はオゾン）の濃度の測定法を開発したり。

大気中のアルデヒド類は、自動車のエンジンの排気ガスからの一次的なものだけでなく、光化学反応により二次的に大気中の炭化水素からも生成する。私たちは、光化学オキシダントの測定を行う中で、大気中で起こる光化学反応によるアルデヒドや光化学スモッグの生成について模擬大気中での研究を進め、大阪府や奈良県にある公的な環境関連試験研究機関で、私たちの研究に関しての意見交換などを行ってきた。今回、環境省の定める大気測定法を体験する機会を得たので報告したい。

学校（奈良県奈良市東紀寺町、以下「奈良」）、奈良県景観・環境総合センター（奈良県桜井市粟殿、以下「桜井」）、国設大阪測定局（大阪府大阪市中央区大手前、以下「大阪」）、大阪府立環境農林水産総合研究所（大阪府羽曳野市尺度、以下「羽曳野」）の4地点である（図1）。夏季調査2022年8月22日17:00～8月25日17:00および秋季調査2022年11月14日17:00～11月17日17:00に、それぞれ昼間9:00～17:00、夜間17:00～翌日9:00とに分けて調査した。



図1. 調査地点

## 3. 調査方法

調査地点は、奈良女子大学附属中等教育

アルデヒド類の調査は、有害大気汚染物質測定方法マニュアル<sup>2)</sup>に準拠して行った。



試料の採取；2,4-ジニトロフェニルヒドラジンで被覆したシリカゲルを捕集管に充填した。この捕集管を2段にして設置し、0.10 L/min で昼間 8 時間、夜間 16 時間試料採取を行った。揮発性有機化合物 VOC の調査は、有害大気汚染物質測定方法マニュアルに準拠して行った。試料の採取は 6 L のステンレス容器（キャニスター）を用い、減圧採取法により昼間 8 時間、夜間 16 時間試料採取を行った（図 2）。



図 2. 大気調査の様子(奈良)

#### 4. 結果と考察

大気中のアルデヒド類は、直接排出される一次排出と、大気中の光化学反応によって生成される二次生成がある。二次生成によるアルデヒド類の値は、一般に夜間に比べ光化学反応が活発な昼間の方が高い。

夏季調査の 4 地点のアルデヒド類（ホルムアルデヒド HCHO，アセトアルデヒド CH<sub>3</sub>CHO）を比較すると、大阪府 2 地点より奈良県 2 地点の方が高いことが分かった。また、夏季に比べ冬季は全体的に低い値だった（図 3）。特に CH<sub>3</sub>CHO 濃度は奈良で高い値であり、また、アルデヒド類の値には昼夜間の差があった。奈良の昼間の HCHO:CH<sub>3</sub>CHO の割合は、桜井が約 1.15 であるのに対して、奈良の昼間は約 2.7、そして奈良の夜間は約 4.0 であった。奈良の

昼間でなぜ、CH<sub>3</sub>CHO の値が高かったのか。私たちは、アルコールを扱う酒蔵、エタノールを使用した自然系塗料が発生源ではないかと考えて考察を行った。

##### (1) 外部環境による影響

タバコの主流煙中のアセトホルム類の比較では、CH<sub>3</sub>CHO が多く発生することが知られている（標準的・平均的銘柄 14 種類について 11.1～38.0 μg/本）<sup>3)</sup>。また、タバコの主流煙中の VOC 成分として、アセトンやイソプレンが多く排出される。しかし、奈良でのイソプレンの突出した上昇は認められなかった。学校敷地内は禁煙であるため、タバコの煙が原因ということは考えにくい。

奈良の調査地点である本校から半径 1km 圏内に 7 箇所に酒蔵や酒店がある。酵母の発酵時にアルコールが発生するが、酒づくりの過程から考えても、このことが原因である可能性は低い。

##### (2) エタノールを使用した自然系塗料の可能性

8 月の調査期間に、学校敷地内にある体育館の改修工事があった。体育館改修工事で使用された塗料は、2 社のメーカーのものだったが、どちらも有機溶剤を含んでいなかった。文献によると、有機溶剤系合成塗料からは CH<sub>3</sub>CHO の放散がなく、水性塗料や自然系塗料からは CH<sub>3</sub>CHO が放散されるとある<sup>4)</sup>。自然系塗料の CH<sub>3</sub>CHO 放散性が高い理由は、エタノールを溶剤として使用しているからだと考えた。エタノール C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH は酸化されると CH<sub>3</sub>CHO になる。しかし、2 社のメーカーとも、溶剤としてエタノールを含んでいないことが分かった。また施工時も C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH を使用す

ることは考えにくい。なお、同時に測定した VOC の結果から、奈良のキシレンは桜井に対して若干高いものの、極端に突出して高くない。奈良、桜井ともにトルエン、

キシレン濃度が夜間に上昇し、昼に減少していた。工事は日中に実施することからも、VOC 濃度が夜間に上昇するのは不自然である。

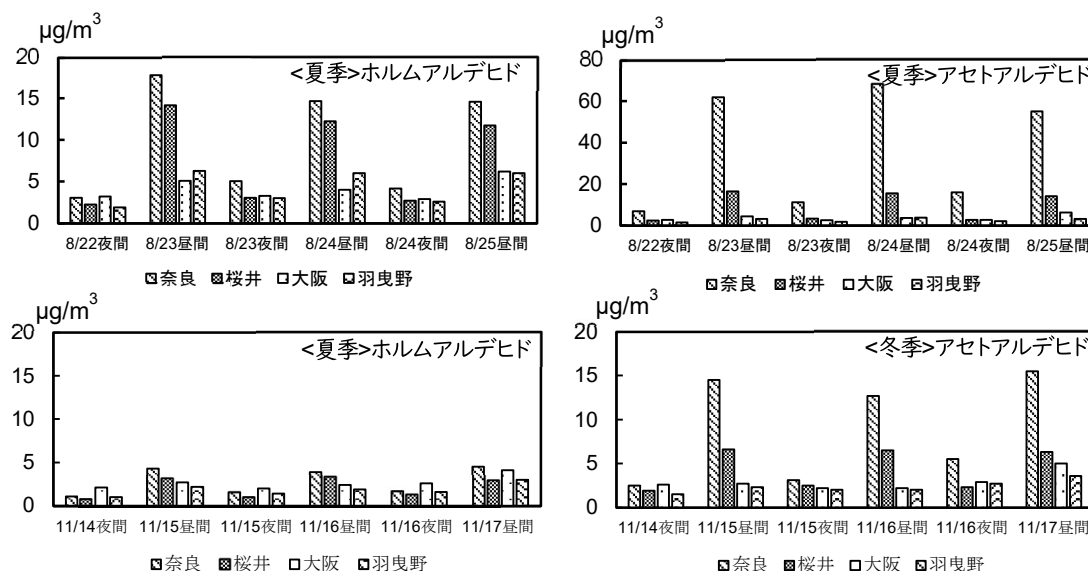


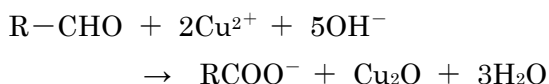
図3. アルデヒド類の調査結果  
(アルデヒド類は、固相捕集－高速液体クロマトグラフ法により測定した)

## 5. 検証実験

これらの考察を実証するには、自然系塗料からの  $\text{CH}_3\text{CHO}$  放散性を確認する実験を行う必要があった。そこで、自分達でアルデヒド類を定量する方法を模索した。

### (1) フェーリング液の還元

フェーリング液に還元性物質を加えて加熱すると酸化銅( $\text{Cu}_2\text{O}$ )の赤色沈殿が生成することで知られている。



〈実験方法〉

試験管 5 本にホルマリンを 10 倍, 100 倍, 1000 倍, 10000 倍, 100000 倍にそれ

ぞれ希釈した水溶液を  $100\mu\text{L}$  ずつ用意した (表 1)。フェーリング A 液, B 液をそれぞれ 1 : 1 で混合し, これらを試験管に  $2\text{mL}$  ずつ入れた。バーナーで加熱し, 沸騰してから 5 秒経過したところで加熱をやめた。

ホルマリン濃度 (mol/L)	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
換算アルデヒド濃度 (ppm)	0.1	0.01	0.001	0.0001	0.00001

表 1. 実験に使用したホルマリンの濃度

〈結果〉

全ての試験管で酸化銅の赤褐色沈殿が見られた。またホルマリン濃度が高くなるほど, 多くの沈殿が生じた (図 4)。

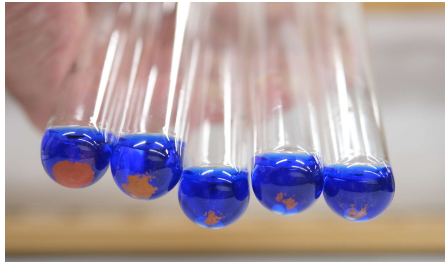


図4. ホルマリウムによるフェーリング液の還元

〈考察〉

フェーリング反応により、アルデヒドの検出に有効性を示すことができた。しかしながら、定量を行うためには、さらなる工夫が必要だった。

(2) アセチルアセトン法

アセチルアセトン法とはホルムアルデヒドが過剰のアンモニウム塩の存在下で、アセチルアセトンと反応して生ずる黄色のジアセチルジヒドロルチジンの吸光度を測定して定量する方法である。

アセチルアセトン試薬の調製；

酢酸アンモニウム 15g を蒸留水に溶かし、酢酸 0.3mL とアセチルアセトン (2,4-ペンタジオン) 0.2mL を加え、蒸留水で希釈し試薬の全量を 100mL とした。

〈実験方法〉

アルコールランプの炎にガラス管をさしこみ、真空ポンプで一定時間吸引して、発生した気体を三角フラスコ内でバブリングさせた (図6)。この溶液 25mL を試験管に入れ、アセチルアセトン試薬 5mL を加えて加熱した。開始から 10 分後と 20 分後の溶液をそれぞれ水浴中で 10 分間冷却した後、分光光度計で 425nm の吸光度を測定した。

(バブリングした溶液は 3 回、ブランクは 2 回測定した。)

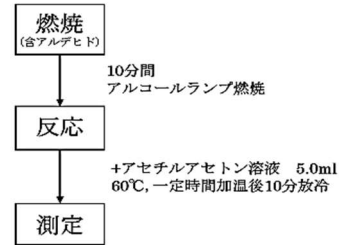


図5. アセチルアセトン法による実験の流れ

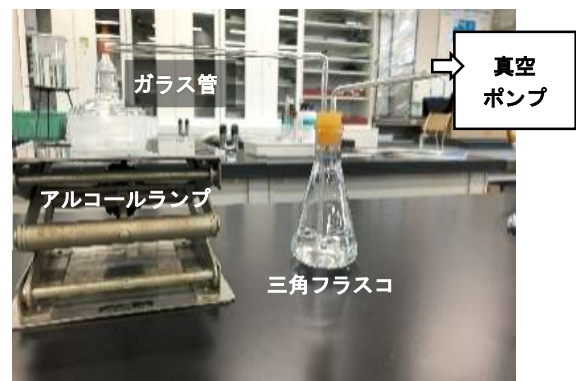


図6. アセチルアセトン法の実験装置

〈結果・考察〉

燃焼時間の経過により、水溶液の吸光度は増加する傾向がみられた (図7)。

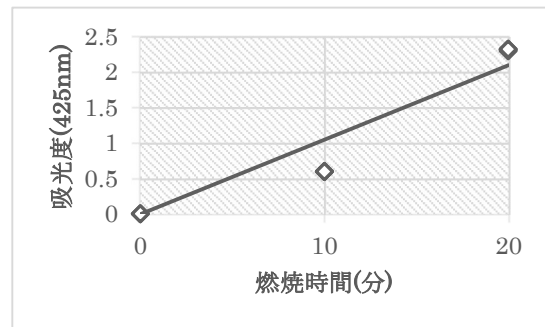


図7. 燃焼時間による吸光度の変化

燃焼時間が 0~10 分の時よりも、10~20 分の時の方が吸光度の増加率は大きかった。これは、アルコールランプの炎がエアコンの風の影響を受け、燃焼が不安定だったためと考えられる。実験を重ねても値

が不安定だったことから、実験方法を工夫する必要がありそうだった。今後は、アルコールランプの燃焼によって発生したホルムアルデヒドをより正確に吸引するために、ランプの炎に漏斗を被せて吸引する方法を検討中である。

## 6. まとめ

2022年8月に発生した奈良市東紀寺町におけるアルデヒド類の高濃度事例について、一過性の局所的な高濃度事例と考えられるが、現在のところ有効な考察ができていない。検証実験の実現を目指して、これからの実験方法の見直しを進めていきたいと考えている。

## 7. 謝辞

本研究は、公益社団法人大気環境学会「大気環境未来60」の支援を受けています。測定および解析は、大阪府立環境農林水産総合研究所および奈良県景観・環境総合センターにご指導いただきました。奈良女子大学附属中等教育学校第2体育館改修工事の施工資料は、奈良国立大学機構施設課より提供頂きました。体育館改修工事で用いた塗料の詳細データは、メーカーの方に教えて頂きました。ありがとうございます。

## 8. 追記

本研究は、日本化学会近畿支部第39回高等学校・中学校化学研究発表会(2022年12月26日,大阪大学,奨励賞受賞)および気環境学会近畿支部第11回研究発表会(2022年12月28日,大阪大学,支部長賞受賞)で発表した。

本研究の一部は、読売新聞奈良版(2022

年12月30日)で紹介された。

高校化学グランドコンテスト(2023年10月28日,29日),及びJapan Super Science Fair 2023(2023年11月4日)で発表した。

## 9. 参考文献

- 1) 廣谷美羽, 福留菜月, 大気汚染物質を捕まえろ, 第64回日本学生科学賞(文部科学大臣賞), 2020.
- 2) 環境省水・大気環境局 大気環境課, 有害大気汚染物質等測定方法マニュアル, 2019.
- 3) 平成11-12年度たばこ煙の成分分析について, 厚生労働省報告.
- 4) 秋津裕志, 伊佐治信一, 朝倉靖弘, 平林靖, 梅原勝雄, 林産試験場報, 2006, 20, 8.
- 5) 埼玉県立蕨高等学校・化学部, 擬似光化学スモッグ中のアルデヒド及びCO<sub>2</sub>濃度測定, 2008.
- 6) ホルムアルデヒド及び前駆物質の分析方法 資料2 参考8, 厚生労働省報告
- 7) 繊維技術委員会, 日本界面活性剤工業会, 繊維製品中の微量ホルムアルデヒド分析法の問題について, 繊維製品消費科学, 1973, Vol.14 No.6.

# 酢酸ナトリウム結晶成長における不純物の影響

5年B組 辻本 理菜  
5年C組 水戸 愛琳  
指導教員 鵜飼 哲真

## 1. 概要

酢酸ナトリウムの再結晶では、過飽和水溶液に種結晶を加えることで、長い針状の結晶ができる。この再結晶において、水溶液中にコロイド粒子が存在すると、結晶の成長が妨げられ、枝分かれすることを発見した。さらに、水溶液中にコロイド粒子が多いほど、結晶の枝分かれも多くなることが分かった。

## 2. 研究背景

中学生のとき理科の授業で再結晶について学習し、夏休みの課題で結晶作りに挑戦した。酢酸ナトリウムの再結晶では、過飽和状態の溶液に種結晶を落とすことで、針状の結晶が放射状に成長する（図1）。この実験において、溶液中に小さなごみなどの不純物があると結晶が枝分かれしてしまい、きれいに成長しないことに気がついた（図2）。



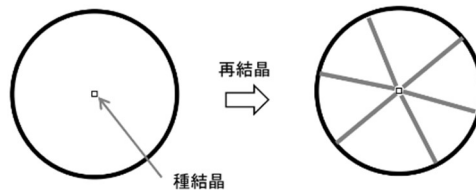
図1. 酢酸ナトリウムの針状結晶  
(不純物 なし)



図2. 酢酸ナトリウムの枝分かれ結晶  
(不純物 あり)

そこで、成長中の結晶がコロイド粒子（不純物）と衝突することで枝分かれが生じるのではないかと、という仮説を立て、調べることにした（図3）。

(a) 溶液中にコロイド粒子を含まないとき  
針状の結晶が放射状に伸びるように成長する



(b) 溶液中にコロイド粒子を含むとき  
結晶の成長が妨げられ、結晶は枝分かれする

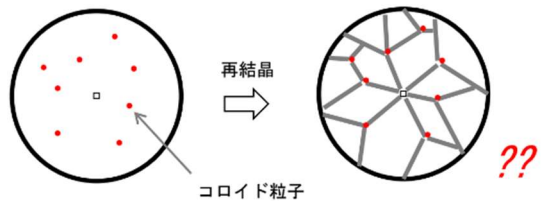


図3. 研究の仮説

## 3. 研究目的・意義

本研究ではコロイド粒子を不純物と見立て、コロイド溶液中における酢酸ナトリウムの再結晶を行うことで、含まれる不純物の数と結晶の枝分かれについて因果関係を明らかにする。これにより、酢酸ナトリウム結晶の枝分かれの様子から、溶液に含まれるコロイド粒子の濃度を求めることが可能

になると考えた。コロイド濃度を求める既存の分析方法としては、粒子の数を測定する単粒子測定法が挙げられるが、この手法では高度な測定技法や高額な費用が必要である<sup>1)</sup>。酢酸ナトリウムは安価で安全性も高く、数分で簡単に結晶が析出することから、本研究では酢酸ナトリウムの再結晶を利用することで手軽にコロイド濃度を求める測定法の開発を目指したい。

#### 4. 実験

実験で用いた酢酸ナトリウム三水和物は、ナカライテスク（試薬特級）をそのまま利用した。温度の測定には、アルコール温度計（0～100°C 測定用）を用いた。水浴は、東京理化工学ウオーターバス SB-350 を用いた。純水や溶液をはかり取るときは、マイクロピペット（クリアピペット EP-ML-10, 1～10 cm<sup>3</sup> 用）を用いた。

##### 実験 4-1 「どの濃度の酢酸ナトリウム水溶液のときに結晶が析出しやすいか」

6 本の試験管 a～f に、10.0 g の酢酸ナトリウム三水和物  $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  をそれぞれ入れた。これらに表 1 に示す量の純水をそれぞれ加えて、試験管をよく振った。

表 1. 試験管 a～f に加えた純水の体積

試験管	a	b	c	d	e	f
純水 [mL]	2	5	6	7	8	10

試験管を 80°C まで加熱し、酢酸ナトリウムを完全に溶解させた。この溶液をシャーレ（直径 9 cm）に流し入れ、室温（16.0°C）で数分間放置した。室温付近まで冷えたら、シャーレの中央に酢酸ナトリウム三水和物の種結晶（約 0.8mm）を落

とし、結晶化の様子を観察した。

##### 実験 4-2 「シャーレに含まれるコロイド粒子の数が増えると、酢酸ナトリウム結晶の枝分かれの数も増えるのか」

デンプン 0.3g に水を加え、デンプンのコロイド水溶液を 10mL 調製した。次に 5 本の試験管 A～E に酢酸ナトリウム三水和物 10.0 g をそれぞれ入れた。表 2 に示す割合で上記のデンプン水溶液と純水を試験管に加え、よく振った。

表 2. デンプン水溶液と純水の割合

試験管	A	B	C	D	E
デンプン溶液 [mL]	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
純水 [mL]	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5

実験 4-1 と同様に、80°C まで温めた溶液をシャーレに流し入れ、冷却してから種結晶を落とし、結晶が成長する様子を観察した。

##### 実験 4-3 「コロイド粒子の種類により酢酸ナトリウム結晶の枝分かれに違いは見られるか」

5 本の試験管①～⑤を準備し、酢酸ナトリウム三水和物 10.0 g をそれぞれに入れた。これらにコロイド（①デンプン、②墨汁、③絵具<sup>2)</sup>、④牛乳、⑤ゼラチン）の水溶液 0.3mL 加え、さらに蒸留水を加えて全量が 5mL になるよう調製した。80°C まで温めた溶液をシャーレに流し入れ、冷却してから種結晶を落とし、結晶が成長する様子を観察した。

## 5. 結果と考察

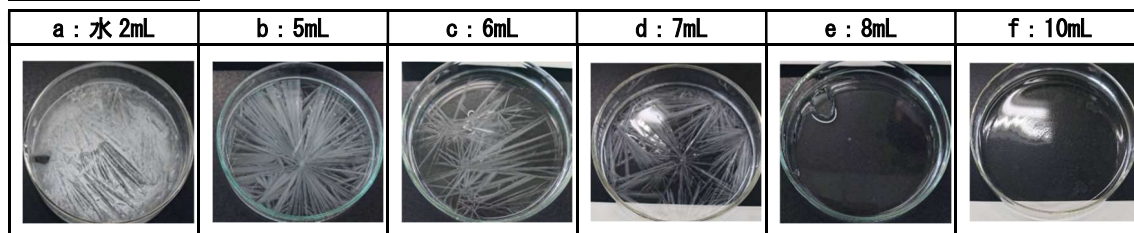


図 4. 水の量による酢酸ナトリウム結晶の析出の比較

実験 4-1 の結果を図 4 に示す。酢酸ナトリウムの過飽和水溶液に種結晶を入れて観察した結果、酢酸ナトリウムの針状の結晶がきれいに析出する条件は、水の量が 5mL (試験管 b) のときであった。以前に文献を元に作成した酢酸ナトリウムの溶解度曲線は図 5 のようになり、水温が高くなるにつれて溶解度は大きくなる<sup>2)</sup>。

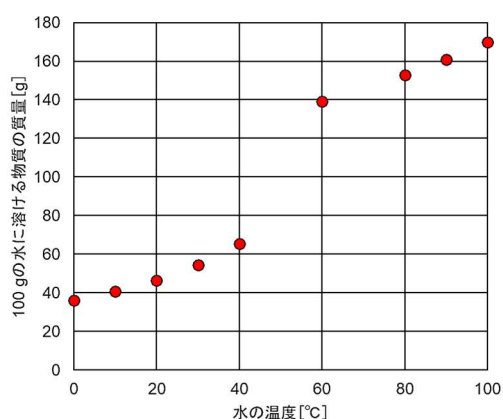


図 5. 酢酸ナトリウムの溶解度曲線<sup>2)</sup>

溶解度曲線から予想される最も結晶が析出しやすい条件は、水の量が 2mL (試験管 a) のときである。しかしながら、実際

に実験すると水の量が 2mL のときは水の体積が少ないためか、結晶がきれいに成長しなかった。水の量が 8mL 以上のときは水溶液が飽和しておらず、種結晶を入れてもそれ自体が水に溶けてしまい、結晶が析出しなかった。

実験 4-2 の結果を図 6 に示す。A~E のいずれも結晶が放射状に析出した。加えたコロイド溶液が多いほど、結晶の枝分かれも多くなる傾向が見られた。何度も試行を繰り返したが、枝分かれの程度にはばらつきが見られた。実験結果を正確に得るためには再現性が必要である。結晶化させるシャーレなどの実験器具にコロイド以外の不純物が入ってしまうと本来得られるはずの結果が得られない。また、気温の変化によって結晶成長の速度が変化するため同じ結果を得ることが難しい。このような課題を解決するためには、できる限り実験を行う条件をそろえる必要があると考える。

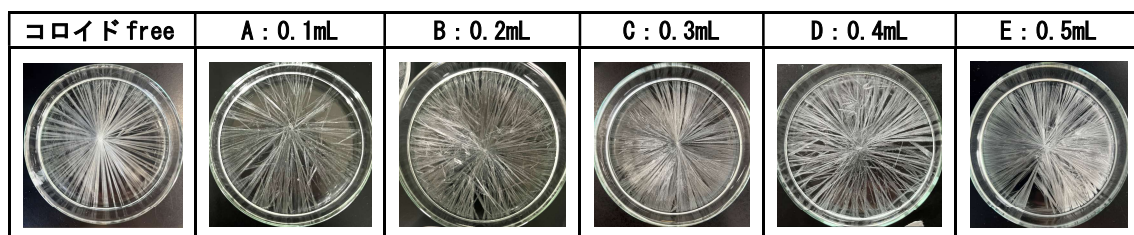


図 6. 加えたコロイド (デンプン) 溶液の量による酢酸ナトリウム結晶の析出の比較

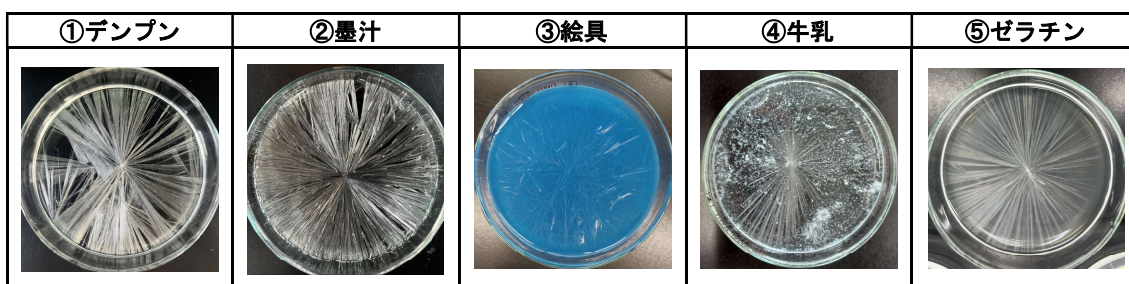


図 7. 加えたコロイド溶液による酢酸ナトリウム結晶の析出の比較

実験 4-3 の結果を図 7 に示す。③絵具を用いた実験では、①デンプンと同様に結晶の枝分かれを確認できた。一方で、②墨汁、④牛乳、⑤ゼラチンでは枝分かれが生じなかった。

親水コロイドは、水中では水分子がコロイド粒子の周りに集まって安定化しているため、少量の電解質を加えても沈殿（凝析）が起こりにくい。しかしながら、多量の電解質を加えると、コロイド粒子に水和している水分子が取り除かれ、コロイド粒子同士が集まって沈殿（塩析）してしまう。今回、②墨汁と④牛乳においては実験中に沈殿物が確認された。酢酸ナトリウムは水中で  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  と  $\text{Na}^+$  に電離する電解質であるため、墨汁と牛乳では塩析が起きたと考えられる。コロイド粒子が沈殿してしまったことで、結晶の成長を妨げることができなくなったことが、枝分かれが生じなかった原因であると考えられる。

また、ゼラチンの成分はタンパク質であ

り、 $70^\circ\text{C}$ 以上では変性し、固まりにくくなることが知られている。今回の実験では、酢酸ナトリウムの粉末を溶かすために、水溶液を  $80^\circ\text{C}$  で温めた。これにより、ゼラチンが変性してしまい、完全に水溶液に溶解してしまったことが、枝分かれしなかった原因であると考えられる。

結晶の枝分かれのようすを正確に評価するためには、数値化が必要だと考えた。枝分かれした本数や、枝分かれするまでの結晶の長さなど、比較できる要素はあるものの、目視でそれらを数えると正確さに欠けてしまう。そこで画像解析ソフト（ImageJ）を用いた分析を試みた（図 8）。写結晶領域の面積を数値化し、比較を行おうと試みたが、写真撮影時の室内照明を調整するのが難しく、光の反射が写りこんでしまった。その結果、画像に局所的な明度変動が生じ、結晶領域の正確な面積の推定は困難であった。

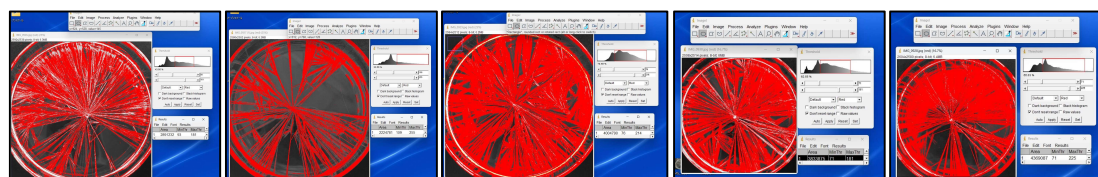


図 8. ImageJ により酢酸ナトリウムの結晶画像の解析のようす



## 6. まとめ

実験 4-1 より、酢酸ナトリウム三水合物 10g に対し、水 5ml の条件が最も酢酸ナトリウムの再結晶に適していると分かった。実験 4-2 からはデンプン水溶液の濃度が高くなるにつれ、結晶の成長途中で枝分かれする程度大きくなる傾向が見られた。実験 4-3 では、デンプンと絵具を使用すると結晶に枝分かれが生じたが、墨汁、牛乳、ゼラチンの場合は枝分かれが見られなかった。

コロイド粒子の数と枝分かれの数に相関性があることを示そうと、Image J による分析試みたが、十分な成果は得られなかった。

## 7. 今後の展望

現在、結晶の枝分かれのようすを、人工知能 AI を用いた画像認識によって分析できないか検討中である (図 9)。検証実験<sup>4)</sup>では 200 枚の画像で画像分類を試み、判定の結果、枝分かれなし画像の正答率が 98%、枝分かれあり画像の正答率は 65% となり、まずまずの結果を得た。

今後はさらに精度の高い機械学習の検討や、機械学習に必要なデータ数を増やすことで、枝分かれのようすを効果的に AI に分析させる手法を確立したい。そして、枝分かれの数から、コロイド溶液の濃度を間接的に求める分析法を開発したい。

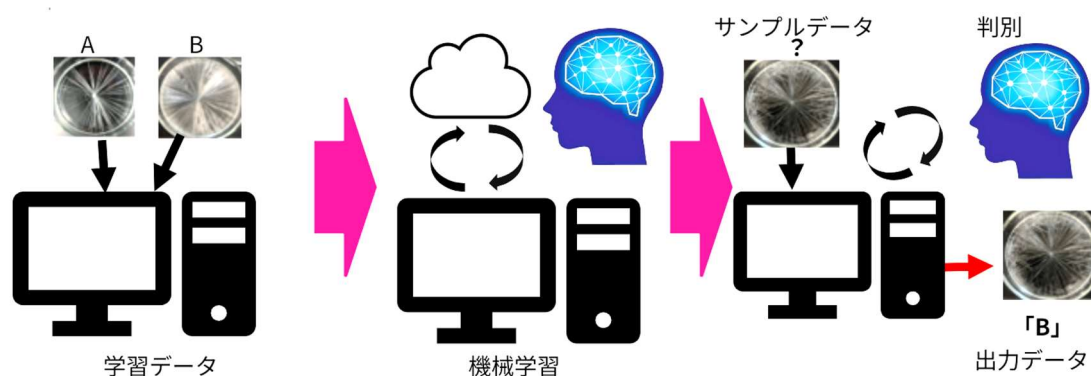


図 9. 人工知能 AI の画像分類による結晶分析のながれ

## 参考文献・注釈

- 1) 金井豊 (2007). 「コロイドを観察・分離する分析法について」. 地質ニュース 631 号,19-23.
- 2) サクラクレパスのマット水彩 (ポリチューブ入)
- 3) 水戸愛琳, 辻本理菜, 由井さくら (2022). 「溶液中のコロイド粒子は結晶成長を妨げるのか」. 奈良女子大学附属中等教育学校 令和 3 年度 SSH サイエンス研究会生徒論文集.
- 4) ためになる社内 SE ブログ. <https://www.it-edu-suport.com/>

# 連続的に起こる分子内環形成反応の開発

5年C組 福留 菜月  
指導教員 鵜飼 哲真

## 1. 概要

最近の有機合成の重要な課題の一つは持続可能な社会の実現を目指した新手法の開発である。有機合成におけるSDGsには、いろいろな取り組みがあるが、本研究では環境負荷の少ない新規合成方法を用いて、有用な環骨格の構築を試みた。

## 2. はじめに

従来法では、一つのフラスコの中で起こる反応は普通1つである。しかし、連続的な反応では、一つのフラスコ内で2段階から多段階起こり、そのために、各反応での精製段階や使用溶媒が削減できる。従って、工程、時間的に効率的、および反応溶媒や精製のために使う石油由来の有機溶媒を節約できる。その結果、環境負荷が少なくなる。ただし、一つのフラスコ内で多段階の反応を起こすためには、基質の構造や反応条件をうまく調整する必要がある。また、新規な反応を設計する際、できるだけ高価、希少、または有毒な金属を使わない、メタルフリーの条件を目標とした。

連続的に起こる、効率の良い新規な分子内環形成反応として、クネーフェナーゲル縮合反応を用いて縮合と環化が連続的に起こるような反応は興味深い。クネーフェナーゲル縮合とは、活性メチレン化合物 ( $E-CH_2-E'$ ,  $E, E'$ =電子吸引基) **2** を、アルデヒドまたはケトン **1** と脱水縮合させてアルケン **3** を得る手法である。触媒として塩基が通常用いられる (図1)。

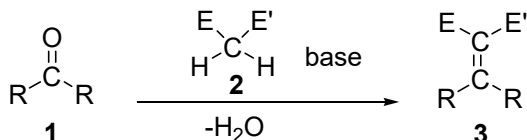


図1. クネーフェナーゲル縮合反応

最近、連続的クネーフェナーゲル縮合/共役付加による環化反応が発表された<sup>1</sup>。さらにアミン触媒下で、活性メチレン化合物としてメルドラム酸(2,2-ジメチル-1,3-ジオキサン-4,6-ジオン) **2a**、ジメドン(5,5-ジメチル-1,3-シクロヘキサジオン) **2b**(図2)を用いた連続的5員環形成反応に展開している<sup>2</sup>。

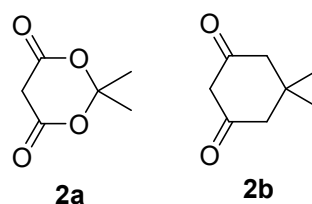


図2. 活性メチレン化合物の例

## 3. 実験

本研究では、活性メチレン化合物と2-ベンジルベンズアルデヒド誘導体 **8** との連続的縮合-環化反応による炭素六員環の形成を試みた。その原料となる化合物の合成を行った。まず、文献<sup>3</sup>に従って市販の2-シアノベンジルブロミド **4** をDIBAL-H (水素化ジイソブチルアルミニウム) **5** を用いて還元し、2-プロモメチルベンズアルデヒド **6** とした。パラジウム触媒によるカップリング反応で2-ベンジルベンズアルデヒド誘導体 **8** を得た。2-ベンジルベンズアルデヒド誘導体 **8** のベンジル ( $CH_2Ph$ ) 部分の芳香族置換基について、電子供与基(3,5-diOMe)を導入するなど、効率的環化反応が進行するように工夫している(図3-1)。メトキシ基(OMe)は

非共有電子対による共鳴効果により電子供与性を示す。

#### 4. 考察

現在、2-ベンジルベンズアルデヒド誘導体 **8** と環状活性メチレン化合物であるメルドラム酸 **2a** との縮合反応を試みている (図 3-2)。環化生成物 **9** の精製および安定性について、検討が必要である。ジメドン **2b** との縮合反応も試みる予定である。

#### 5. まとめ

炭素環などの環骨格は、医薬品などの有用物質に多く含まれる。その環境負荷の少ない合成法の開発は、既知の医薬品の大量で安価な合成や新規な生物活性、物性をもつ化合物の開拓に役立つと考えられる。

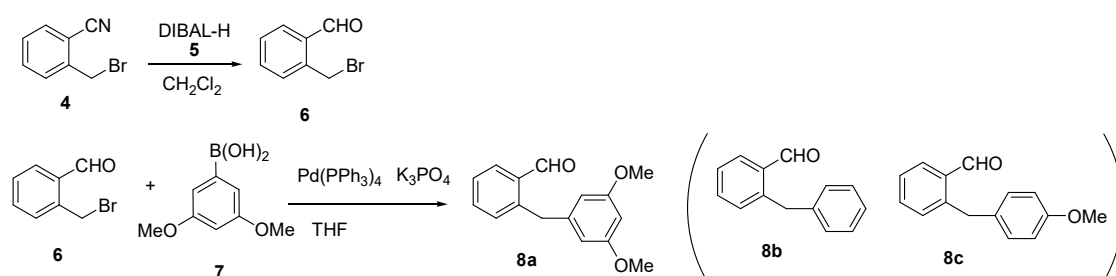


図 3-1. 2-ベンジルベンズアルデヒド誘導体 **8** の合成

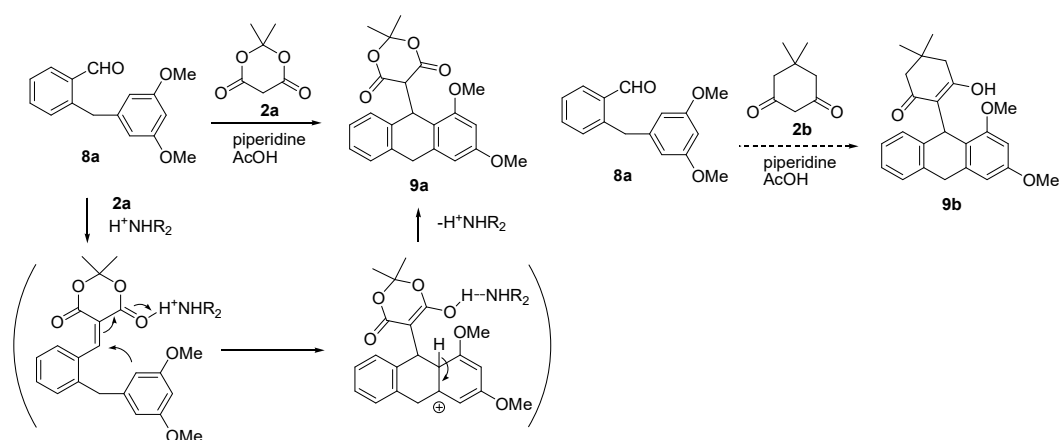


図 3-2. 2-ベンジルベンズアルデヒド誘導体 **8** の連続的縮合-環化反応

#### 6. 参考文献

- (1) Yamazaki, S.; Katayama, K.; Wang, Z.; Mikata, Y.; Morimoto, T.; Ogawa, A. *ACS Omega* 2021, 6, 28441-28454.
- (2) 山崎, 片山, 岩滝, 北野 (奈良教育大学) 未発表
- (3) Shah, J. R.; Mosier, P. D.; Peddi, S.; Roth, B. L.; Westkaemper, R. B. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 2010, 20, 935-938.

#### 7. 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(理科教育講座)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。

# “AI”および“ヒト”の構造認識を活用した HDAC 阻害薬の探索

—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 瀬理 心菜

5年B組 辻本 理菜

(参加者：5年 神田真見, 瀬理心菜, 辻本理菜, 西川真奈, 廣谷美羽, 福留菜月)

指導教員 鵜飼 哲真

## 1. 要約

2023年8月7~9日の3日間、本校の5年生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、2023年11月13日に名古屋大学豊田講堂で開催された第40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、「“AI”および“ヒト”の構造認識を活用した HDAC 阻害薬の探索」という題目でポスター発表した。

## 2. 研究の背景

ヒストン脱アセチル化酵素（HDAC）は細胞の核内に存在し、ヒストン末端のアセチル化されたリジン残基からアセチル基を除去するはたらきがある（図1）。



図1. HDACによる脱アセチル化反応

HDACはがん遺伝子やがん抑制遺伝子の転写に影響を与えることから、がんの発生と進行に関わっている。

これら HDAC のはたらきを制御する阻害薬は抗がん剤として有望であり、創薬ターゲットとして注目されている。しかしながら、既知の HDAC 阻害薬の多くはヒドロキサム酸骨格を有しており（図2）、変異原性を引き起こす恐れがあることから、非ヒドロキサム酸系 HDAC 阻害薬の創製が求

められている。

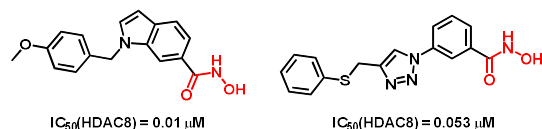


図2. ヒドロキサム酸骨格の HDAC 阻害薬

今回の研究では、すでにデータベースに登録されている既存の有機化合物の中から、非ヒドロキサム酸系 HDAC 阻害薬として期待できる化合物を予測し、それらが実際に阻害薬としての活性を有するか、検証を行った。

## 3. 活動内容

1日目は人工知能AIを用いて薬物をスクリーニングする方法について、研究室の山下泰信先生に講義をして頂いた（図3）。深層学習（ディープラーニング）による画像認識や、機械学習のアルゴリズムであるラン

ダムフォレストについて学習し、理解を深めた。

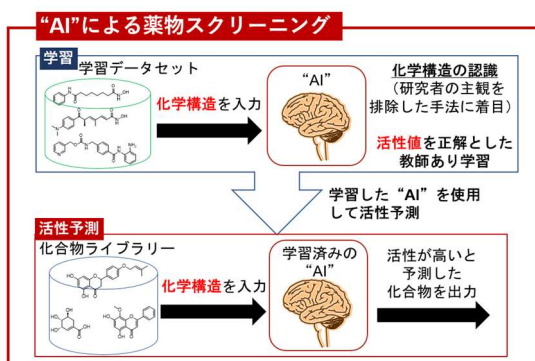


図3. “AI”による薬物スクリーニング

その後、AIが予測した結果と、ヒトが予測した結果を比較検証するために、自分たち（ヒト）で予測を行って見た。有機化合物の二次元画像から阻害活性を予測するグループ（図4上）と、三次元分子モデルから予測するグループ（図4下）に分かれ、活動を行った。

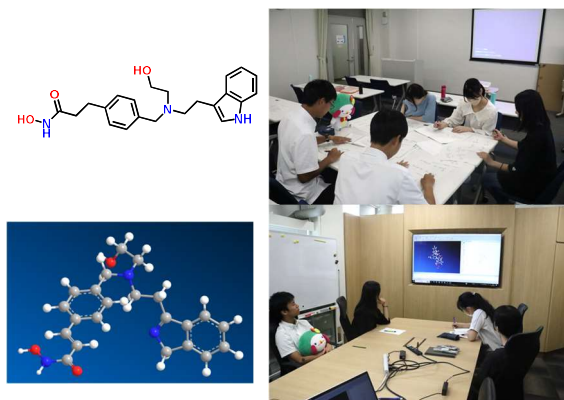


図4. “ヒト”による薬物スクリーニング

2日目は前日の2グループで予測した結果について、評価を行った。

HDAC阻害薬の活性を評価する方法について、研究室の高田悠里先生に講義をして頂き、学習後、私たちが予測した化合物に活性が認められるかどうか、検証した。

3日目は、ヒトやAIが予測した化合物に活性が認められるか、実際に検証実験を行

った。活性試験の際には研究室の設備や測定機器を紹介され、実際に使用させていただいた。休憩時間には、大学院生と交流する機会を設けていただき、進路や大学院に関する貴重なお話を頂いた。午後からは、研究の内容と成果をまとめ、学会（メディシナルケミストリーシンポジウム）発表に向けてポスター作成などの準備を行った。

#### 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行われた。私たちは、「AI”および“ヒト”の構造認識を利用した HDAC 阻害薬の探索」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頂くことができた。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、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。

# 塩化ナトリウムの結晶について

1年B組 鈴木 里緒  
1年B組 松森 晴香  
1年B組 内藤 遙奏  
1年B組 長砂 拓実  
指導教員 鵜飼 哲真

## 1. 概要

食塩の主成分である塩化ナトリウムの水溶液をシャーレに入れ、ゆっくり時間をかけて水分を蒸発させると、塩化ナトリウムの結晶が析出する。塩化ナトリウム水溶液を用意し、蒸発による結晶作りを行ったところ、正方形やピラミッド形の構造の他に、六角形の結晶が確認された。

キーワード 再結晶 塩化ナトリウム 結晶構造 ミョウバン

## 2. はじめに

中学1年の理科の授業で、水に溶けている物質から固体をとりだす「再結晶」について学習した。ミョウバンや硝酸カリウムは温度による溶解度の差が大きいため、温めた飽和水溶液をゆっくり冷やすことで、大きな結晶を取り出すことができる。一方で、塩化ナトリウムは温度による溶解度の差が小さいため、上記の方法で大きな結晶を取り出すことはできない。そのため、水溶液の水分を蒸発させて結晶を取り出すのが一般的な方法である。

今回の実験では、蒸発による塩化ナトリウムの結晶づくりを行い、種結晶を入れたときと、そうでないときで結晶の大きさや形に違いが見られるか、調べることにした。

## 3. 実験方法

### (1) 種結晶を用いた再結晶

塩化ナトリウムの粉末を純水に溶かし、濃度約9%の塩化ナトリウム水溶液を

30mL 作った。この水溶液をシャーレに移し、5mm 四方の塩化ナトリウムの種結晶をいくつか入れ、ふたをせずに室内（気温10～20℃）で1週間放置し、水分を蒸発させた。水分がすべて蒸発した後、シャーレに残った結晶を観察した。

### (2) 種結晶を使わない再結晶

実験(1)と同様に、濃度約3%の塩化ナトリウム水溶液50mLをシャーレに入れ、種結晶を入れずに水分を蒸発させた。

## 4. 結果と考察

実験(1)と(2)で、シャーレにできた塩化ナトリウムの結晶を図1と図2に示す。



図1 実験(1)の結晶



図2 実験(2)の結晶

実験(1)では、大きめの結晶がいくつかできた。図1を拡大して見ると、きれいな板状の正方形であることがわかる(図3)。

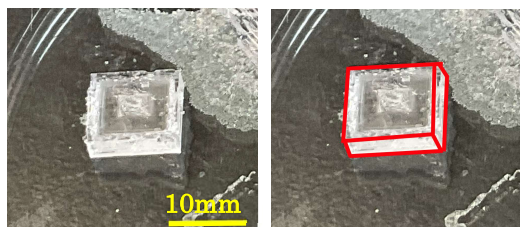


図3 実験(1)の結晶を拡大したようす

公益財団法人塩事業センターのホームページによると、塩化ナトリウムを主成分とする食塩の結晶の基本の形はサイコロ状(正六面体)であると紹介されている<sup>1)</sup>。しかしながら、成長するときの環境や、条件の違いによってさまざまな形の結晶ができるようだ。今回できた塩化ナトリウムの結晶は、横方向にうすく広がった板状の構造になっていた。種結晶が重さで底に沈んだため、下方向に成長できなくなり、逆側である上方向にもなかなか成長できず、横方向に広く成長した板状になったと考えられる(図4)。

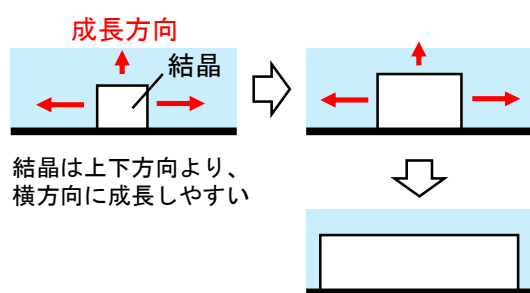


図4 結晶が板状に広がっていくようす

実験(2)では小さな結晶がたくさん現れた。図2を拡大して見ると、主にピラミッド形の結晶と六角形の板状の結晶が見られた(図5)。

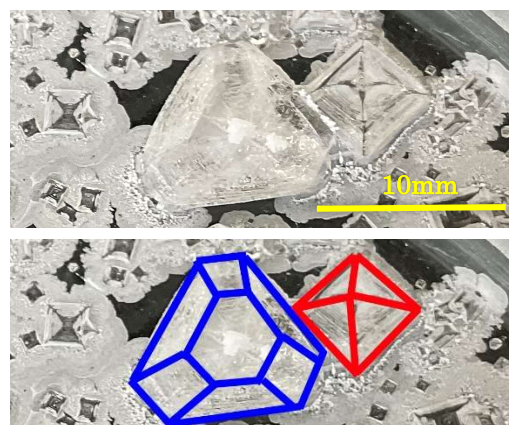


図5 実験(2)の結晶を拡大したようす

実験(2)では種結晶がないため、1つの結晶が大きくなるのではなく、広い範囲で小さな結晶がたくさん現れた。水溶液の濃度が小さかったため、水分がたくさん蒸発するまで結晶が析出せず、結晶が出始めるころには水面の高さが非常に低くなっていた。さらに水分の蒸発が進むと、水面は徐々に下がっていくため、上方向にはあまり成長できず、底の方だけが最後まで成長して広がっていく。その結果、ピラミッド形になったと考えられる(図6)。

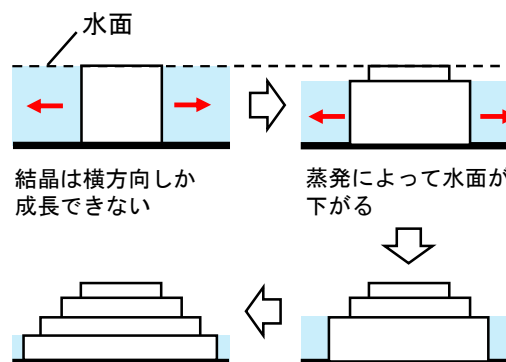
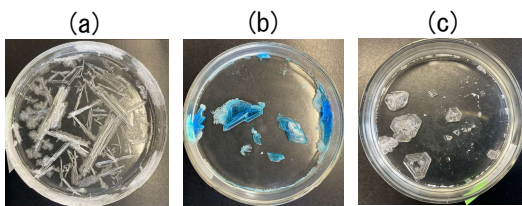


図6 結晶がピラミッド形になるようす

また実験(1)の再結晶では、小さな結晶が核となって大きく成長していったが、実験(2)では水溶液の濃度が小さいため、核となる結晶がなかなか現れず、小さい結晶がた

くさんできてしまったと考えられる。

実験(2)で確認された六角形の板状の結晶については、詳しい報告例が見つからず、なぜこのような形になったのか疑問である。そこで、他の物質でも同様の実験を行い、六角形の結晶ができないか、調べてみた。その結果を図7に示す。



(a)硝酸カリウム (b)硫酸銅(Ⅱ)五水和物 (c)カリミョウバン

図7 蒸発による再結晶の結果

教科書や資料集<sup>2-3)</sup>では、(a)硝酸カリウムは細長い柱状、(b)硫酸銅(Ⅱ)五水和物は平行四辺形の結晶であることが記載されており、実験結果においても同様であることが確認された。一方、(c)カリミョウバンの結晶は八面体構造(図8)が広く知られているが、今回の実験では図5の塩化ナトリウムとよく似た、六角形の結晶になった(図9)。



図8 八面体のカリミョウバン結晶

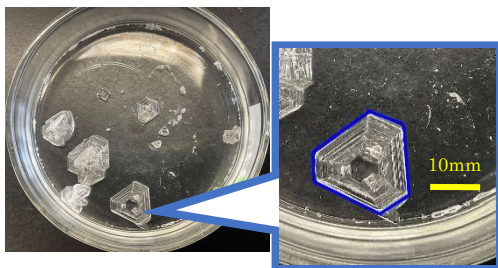


図9 六角形のカリミョウバンの結晶

カリミョウバンは温度による溶解度の差

が大きいため、一般的には、温めた飽和水溶液の中に小さな結晶の核を入れ、ゆっくり冷やすことで再結晶する。文献によると、八面体を構成するそれぞれの面は、六角形が成長することで段階的に三角形へと近づき、八面体の構造になっていく<sup>4)</sup>。

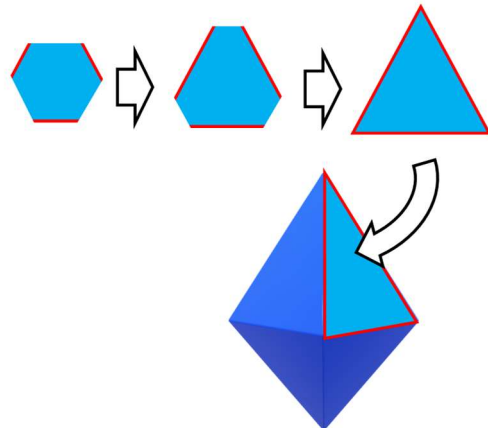


図10 ミョウバンの八面体構造ができるようす

今回、六角形の結晶ができたのは、水分の蒸発により、八面体になる前に結晶の成長がとまってしまったからと考えられる。

塩化ナトリウムの結晶においても、成長中に水分が蒸発したことで、不完全な形となって現れた可能性がある。そこで、発泡スチロール球を用いて、塩化ナトリウムの結晶が成長するようすをシミュレーションしてみた(図11)。

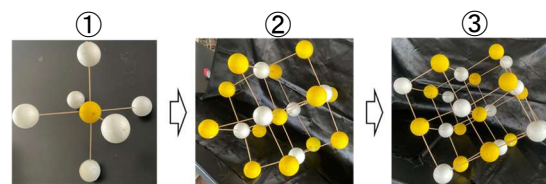


図11 塩化ナトリウムの結晶が成長するようす(シミュレーション)

黄色の球が $\text{Na}^+$ 、白色の球が $\text{Cl}^-$

図11において、黄色の球は正の電荷を帯びたナトリウムイオン $\text{Na}^+$ 、白色の球が負



の電荷を帯びた塩化物イオン  $\text{Cl}^-$  を表している。図 11-①のように、正の電荷をもつ  $\text{Na}^+$  (黄) の周りには  $\text{Cl}^-$  (白) が集まってくると考えられる。次に図 11-②のように、 $\text{Cl}^-$  (白) の周りに  $\text{Na}^+$  (黄) が集まり、黄と白が交互に並びながら成長していくとする。図 11-③において、上部の球が水面にあるとすると、それより上方には成長できなくなる (図 12)。

ここが水面とすると、これより上に球は増えない (成長できない)

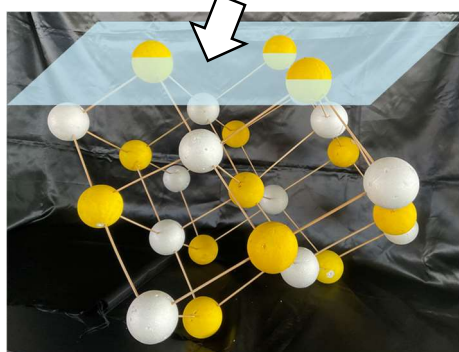


図 12 結晶が水面まで成長したときの様子 (図 11-③の拡大図)

したがって、結晶は横に成長し、図 13 のようになると考えられる。

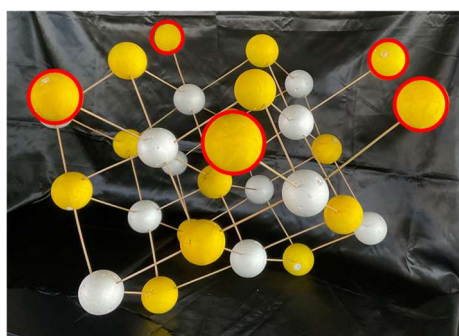


図 13 結晶が横に成長していくようす (赤丸は、図 11-③から新たに増えた球)

ここで、図 13 の上方 (水面) にある 6 つの  $\text{Na}^+$  (黄) に着目するため、それらを青色の球と置き換えてみた (図 14)。

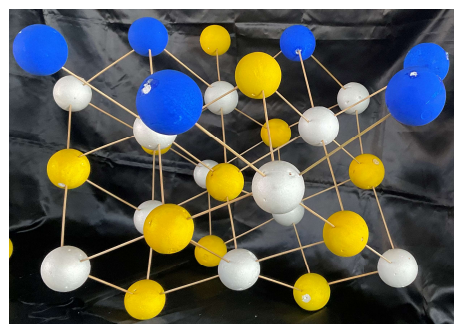


図 14 水面にある  $\text{Na}^+$  (青球)

図 14 を上からのぞきこんで見ると、青球は図 15 のような配置になっており、これらを線で結ぶと六角形の面になっていることがわかる。

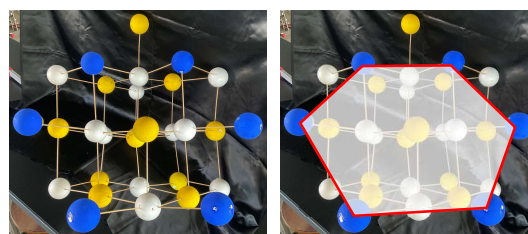


図 15 上からのぞきこんだ図 14 のようす

以上のしくみにより、塩化ナトリウムの結晶が水面で成長できなくなると、六角形の面が現れると考えられる。

## 5. まとめ

塩化ナトリウムの結晶には、正方形やピラミッド形の他に、六角形の結晶が確認された。六角形の構造については教科書などでも紹介されておらず、なぜこのような構造になるかわからないため、今後も調査を続けていきたい。

## 引用文献

- 1) 塩百科 (公益財団法人 塩事業センター)  
<https://www.shiojigyo.com/siohyakka/>
- 2) 中学校科学 1. 学校図書, (2023) 89-95
- 3) 最新理科便覧. 浜島書店, (2020) 206-207
- 4) Cai Y. Ma, et al., *Powder Technology*. 227(2012)96-103.

# 抗原多様性がアレルギー病態発症に与える影響

5年B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或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 背景

近年、主に日本国内でアレルギー患者が急増しており、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。またアレルギーは、日本だけではなく様々な国で社会問題となりつつある<sup>\*1</sup>。急増の原因について、衛生仮説や化学物質説、腸内環境説、家屋密閉説など様々な説が提唱されているが、詳細なメカニズムは未だ解明されていない。そこで、父が田舎に住んでいた頃はアレルギー体質ではなかったが、都会に移り住んでから数々のアレルギーを発症したという経験に基づき、抗原多様性説を提唱した。

## 3 アレルギー反応のメカニズム

アレルギーは免疫応答の違いによって5種類に分類される。I型アレルギーの代表疾患はアナフィラキシーや花粉症などがあげられ、IgEや肥満細胞を介して反応が起こる。II型アレルギーやIII型アレルギー、V型アレルギーは、溶結性貧血や皮膚血管炎など自己免疫が細胞や身体が破壊することにより発症する。一方IV型アレルギーは、他

の反応は体液性免疫が働くのに対し、細胞性免疫によって炎症が誘導される。本研究では主に、I型とIV型アレルギー反応に注目した。

I型アレルギーでは、まず樹状細胞がアレルゲンを捕食し、Th細胞に抗原提示を行う。Th細胞は抗原を提示された場合Th1に、アレルゲンを提示された場合はTh2に分化する。Th2に分化したTh細胞が増殖し、IL-4などのサイトカインを産出し、B細胞のIgE抗体産生を促進する。産生されたIgE抗体が肥満細胞に結合し、そのIgE抗体にアレルゲンが結合することで架橋する。最終的に肥満細胞からヒスタミン等が放出され、粘膜の炎症を引き起こされる(図2)。一方IV型アレルギーでは、まずマクロファージがアレルゲンを捕食し、Th細胞に抗原提示を行う。Th細胞は分化後、曝露患部に遊走し、リンフォカインを放出する。リンフォカインによってマクロファージや肥満細胞の働きが活性化される。活性化したマクロファージはケモカインを放出し、炎症の原因となる好酸球や好塩基球を患部に集める。(図3)。

#### 4 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なかった。一方、大学から奈良県での生活を始めた頃、衛生環境が改善され、消毒や手洗いも一般的になったが、花粉症など各種アレルギーを発症した(図 4)。また、一般的にアレルギー患者は 1960 年以降 2020 年代に至るまで増加の一途をたどっている。この経験をもとに、これまでに提唱されている各種仮説の妥当性を検証した。

まず、化学物質説<sup>\*2</sup>については、大気中の化学物質の量は奈良のほうが多いことから、一定の根拠があると考えたが、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。次に、現状有力とされる衛生仮説<sup>\*4</sup>は、家畜などで排出されるエンドトキシンの減少を原因とするが、父の育った田舎町は畜産業がなかったことから、この仮説にも疑問がある。さらに、腸内環境説や家屋密閉説は、いまだデータが不十分であることに加え、機序も不明確である。

これらの検討から、近年のアレルギー患者の増加には、これまでに提案されている仮説とは別の要因が存在し、その一つとして、抗原多様性が影響しているのではと考

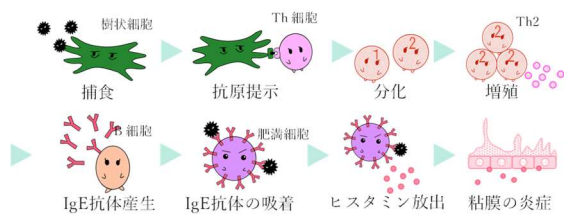


図 1: I型アレルギー反応の機序

えるに至った。

そこで、抗原多様性がアレルギーの抑制に影響する可能性について検討した。まず、清潔な環境では、免疫がアレルゲンに集中して反応を起こし、アレルギー反応が起きやすくなる。一方で、抗原多様な環境では、免疫が様々な抗原に対して一様に働くため、アレルギーが起こりにくくなるという仮説を立てた。先行研究により、アレルギー反応は、Th 細胞が特定のアレルゲンに対応する Th2 細胞に分化することで、Th1/Th2 バランスが Th2 優位になることによって発症することが知られている。様々な抗原が存在することで、Th1/Th2 のバランスが正常になり、アレルゲンが侵入してきた際も、Th2 が優位になることなく、アレルギー反応が起こりにくくなる可能性がある。また、マスト細胞の周囲に IgE 抗体が結合し、IgE とアレルゲン間で架橋が起こることにより、ヒスタミン等のサイトカインが放出され、アレルギー反応が発現することも知られている。IgE 抗体は抗原特異的に産生されるため、抗原多様な環境下では複数種類の抗体が生成される。マスト細胞に隣接して結合する IgE 抗体の種類が異なると、架橋が起こりにくくなり、アレルギー反応が抑制される可能性がある。今回行った実験の目的は、これらの仮説の妥当性を検証することにある。

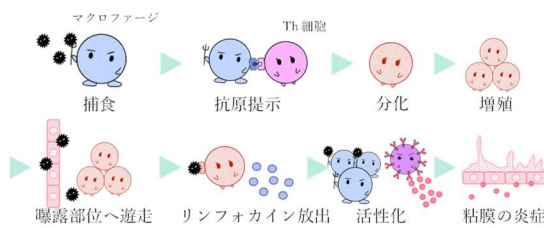


図 1: IV型アレルギー反応の機序

## 5 実験方法

### マウス

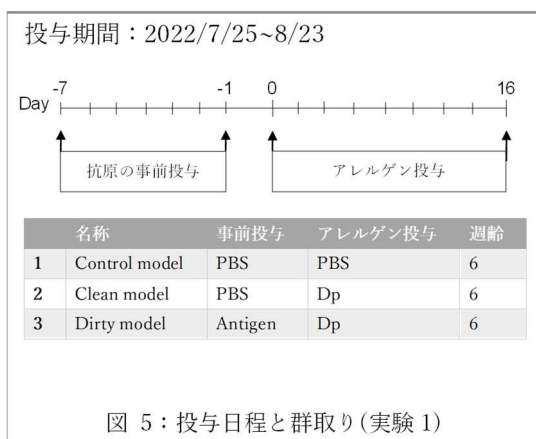
生後 3 週齢および 6 週齢の雌 NC/Nga マウスを日本エスエルシーより購入した。通常のマウスでアレルギーを発症させるためには、投与期間を長くする必要があり困難だった。そのため、先行研究を参考にし、ダニにアレルギー反応を示しやすいノックアウトマウスを用いて実験を行った。また免疫形成前後の、アレルギー反応や抗原多様性の影響の違いを確認するため、2種類の週齢で実験を行った。動物の倫理的取り扱いを確保するため実験は大阪大学の施設ガイドラインに従って行った。

### 試薬

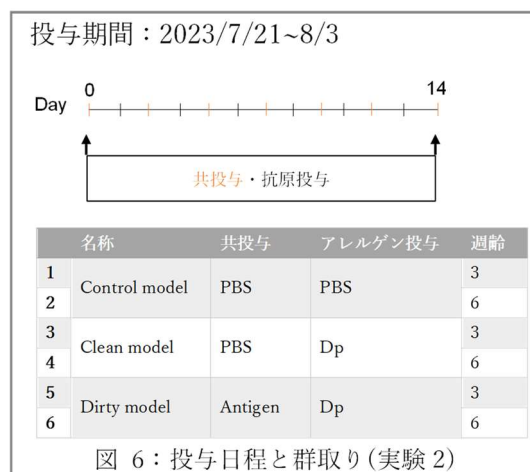
抗原試薬は、150  $\mu\text{l}$  の 1  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$  アルテルナリアおよび 1000  $\mu\text{l}$  の 1  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$  クロゴキブリを使用して調製した。さらに、ヤケヒョウヒダニ(Dp)を 0.375  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$  に 3 週間分のアレルギー試薬を調製した。また、6 週間のアレルギー試薬には 0.625  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$  の Dp を使用した。試薬濃度は体重の平均値に従って投与量を決定した。また試薬は関東化学株式会社から購入した。

### 投与

実験 1 では、抗原多様な環境で生育した後のアレルギー反応の影響を検証した(図



5)。まず首の皮下に 1ml テルモシリンジ(針 25G) を用いて、抗原試薬を投与した。その後、先行研究に従い耳の皮内にマイジェクターを用いて、Dp (アレルギー) を投与した。抗原投与による炎症と、アレルギー投与によるアレルギー反応を区別するため、抗原投与を耳ではなく首の皮下に投与した。実験 2 では、抗原多様な環境におけるアレルギー反応の影響を検証した(図 6)。投与は抗原を毎日、アレルギーを 2 日に 1 回行った。



実験 1 では、田舎から都会に移りすみ、抗原多様性を失った状況でのアレルギー反応を再現した。一方、実験 2 は、成人と赤ちゃんが田舎に住み続けている状況でのアレルギー反応を再現した。

以後、PBS のみを投与した群を control model、PBS と Dp を投与して清潔な環境を模擬した群を clean model、抗原と Dp を投与して抗原多様を模擬した群を dirty model と表す。

### 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- $\gamma$ ) を ELISA 法で測定した。

#### 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 °C 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 °C で保存した。

#### ELISA

血漿中の IgE 抗体は、LBIS ELISA アッセイキット (富士フイルム和光純薬株式会社)、IgG1 および IgG2a は、ELISA キット (LS Bio) を使用して測定した。耳のサイトカインを、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、18000 g 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後、ELISA キット (CUSABIO) を用いて測定した。

#### 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  $\mu$ M 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  $\mu$ m 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 4 °C 300 g で 10 分間遠心した。そして得られた細胞ペレットを NH<sub>4</sub>Cl, KHCO<sub>3</sub>, EDTA  $\cdot$  2Na  $\cdot$  2H<sub>2</sub>O を含む ACK 3 mL 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  $1 \times 10^6$  cells に調製し、4 °C 300g 5 分間遠心した。そして、活性化培地 1 mL 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 Biotec) を使用して分析した。

#### RT-PCR

脾臓の IL-21 と Foxp3 の遺伝子量を先行研究<sup>5</sup>を参考に測定した。脾臓約 20~30mg に 2-ME と RL の混合液を添加し、ホモジナイザーでホモジナイズした。次に FastGene™ RNA Basic kit を用いて RNA 抽出を行った。次に Nano Drop を用いて総 RNA 量を測定した。測定結果に基づき、サンプルを 1  $\mu$ g/ $\mu$ l に調整し PCR を行った。統計処理は  $\Delta\Delta$ Ct 法を用いた。

## 6 結果

### 実験 1

炎症の重症度を、耳の厚さ、IgE 抗体、ヘモグロビンから判断した。耳の厚さは、アレルギーを投与したすべてのマウスで増加した (図 7A)。このことから、アレルギー反応を起こすのに十分な量の Dp であったことが確認された。一方、dirty model では clean model に比べてわずかに耳の厚みが抑制されていたが、有意差は認められなかった (図 7A,B)。また IgE 抗体価は、clean model は control model よりも大幅に高かった (図 7C)。対照的に、dirty model の抗体価はアレルギーを投与していない control model とほぼ同程度にまで抑制さ

れていた。また、耳にマイジェクターで投与を行う際、**clean model** は明らかに皮膚が固く穿刺が難しかった。よって **dirty model** は、抗原事前投与により炎症が抑制された可能性が高い。なお、ヘモグロビンは過度の希釈をしたことにより閾値に達しなかったため、測定できなかった。さらに、多様性説のメカニズムを明らかにするために、IgG 抗体および Th 細胞を測定した。しかし、各群間で IgG(図 7D), IgG1(図 7E), IgG2a (図 7F) において有意差は検出されなかった。また、脾臓で測定した脾細胞中の Th1/CD4+(図 7G), Th2/CD4+(図 7H)、Th17/CD4+(図 7I) の割合にも有意差は認められなかった。リンパ節における Th1/CD4+(図 7J)および Th1/Th2(図 7K)は、アレルゲン投与によってそれぞれ増加したが、**clean model** と **dirty model** との間に差はなかった。また Th1/Th2 バランス(図 7L)はどの群間にも有意差は認められなかった。

## 実験 2

炎症の重症度を耳の厚さ、IgE 抗体から判断した。まず、耳の厚さはアレルゲンを投与すべてのマウスで増加しており、アレルゲン投与によるアレルギー反応が確認された(図 8,9A)。一方、3 週齢のマウスにおいて **dirty model** は **clean model** に比べて耳の厚さが大幅に抑制されていた(図 8A)。6 週齢のマウスにおいても、**dirty model** の耳の厚さがわずかに抑制されていた(図 9A)。よって、抗原共投与により炎症が抑制された可能性が高いと考えられる。しかし、IgE 抗体価はどちらの週齢においても **dirty model** において他の群より増加傾向にあった(図 8,9C)。これらの結果より、Th2、IgE などによって引き起こされる I 型ではなく、

マクロファージによって引き起こされる IV 型アレルギーを発症しているのではないかと考えた。さらに、IgG1 (図 8,9D) , IL-4 (図 8,9F) , Foxp3 (図 8,9I) どの群間においても有意差は認められなかった。また IL-17 (図 9G) は 6 週齢のみアレルゲン投与によって増加した一方で、IgG2a (図 8E) と IL-21 (図 8H) は 3 週齢のみ抗原投与によって増加した。

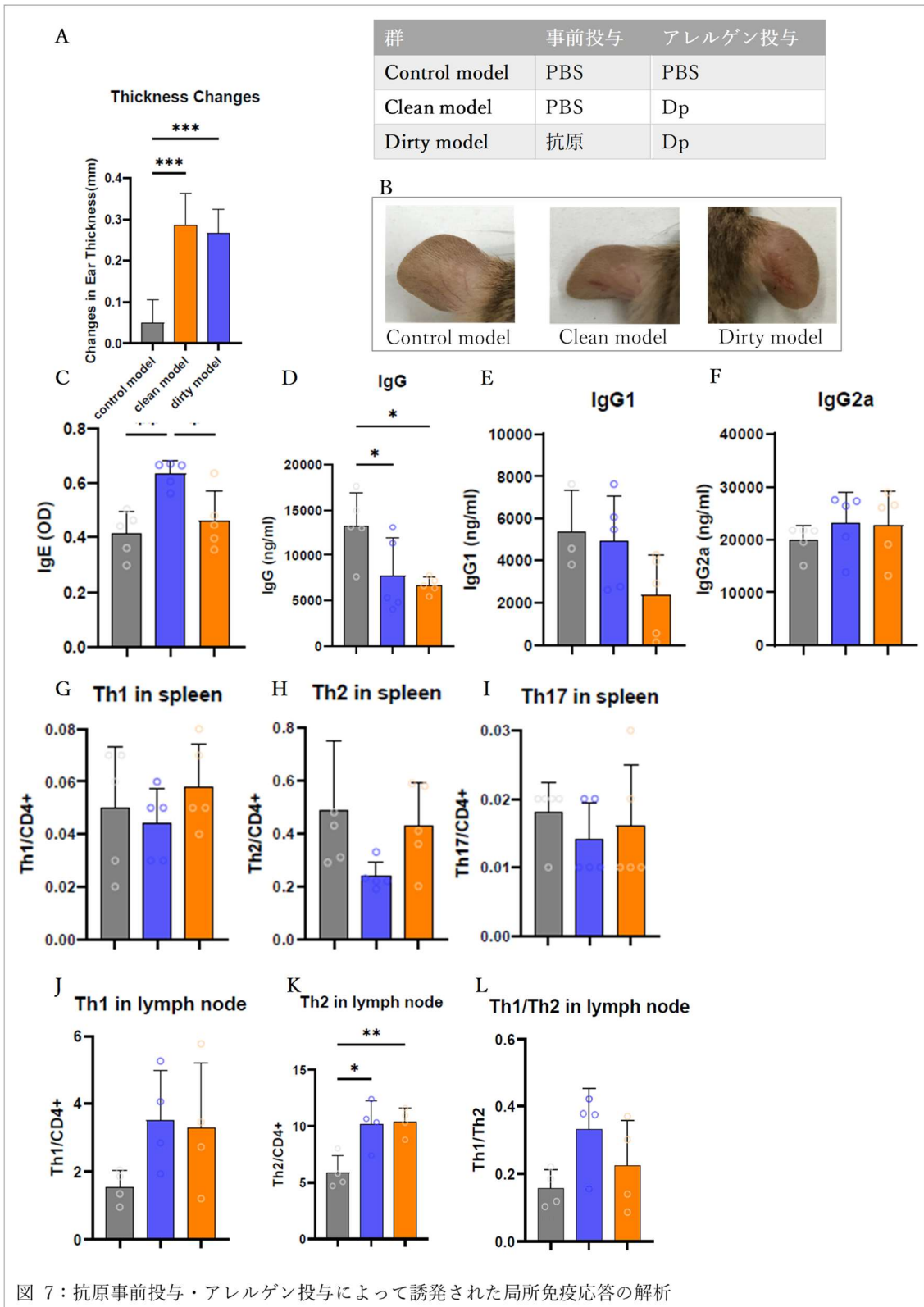
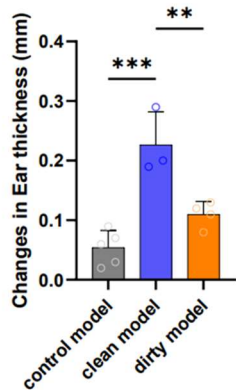


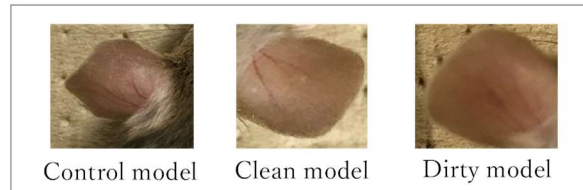
図 7：抗原事前投与・アレルゲン投与によって誘発された局所免疫応答の解析

**A Thickness changes 3weeks**

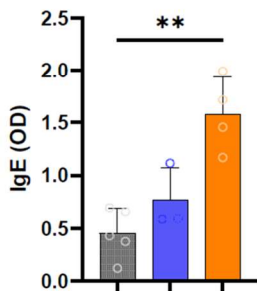


群	共投与	アレルギー投与
Control model	PBS	PBS
Clean model	PBS	Dp
Dirty model	抗原	Dp

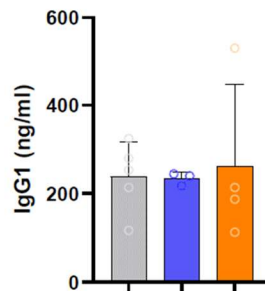
**B**



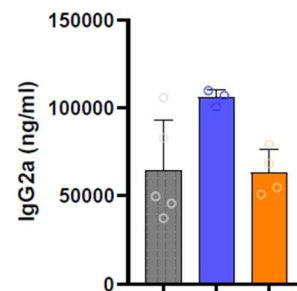
**C IgE 3weeks**



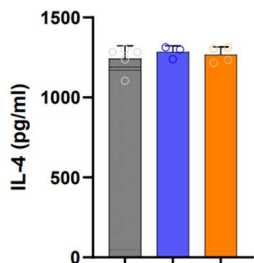
**D IgG1 3weeks**



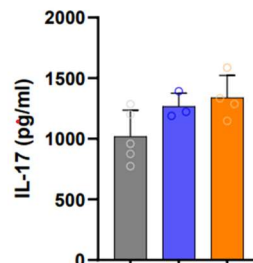
**E IgG2a 3weeks**



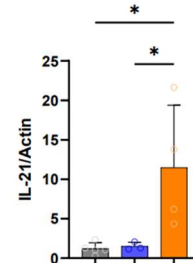
**F IL-4 3weeks**



**G IL-17 3weeks**



**H IL-21/Actin 3weeks**



**I Foxp3/Actin 3weeks**

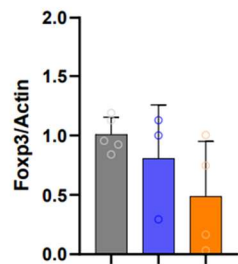
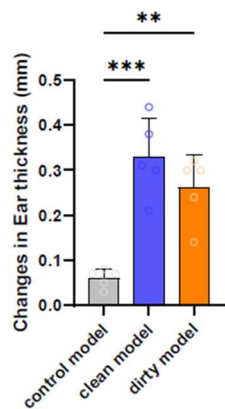


図 8：共投与・抗原投与によって誘発された局所免疫応答の解析(3 週齢)

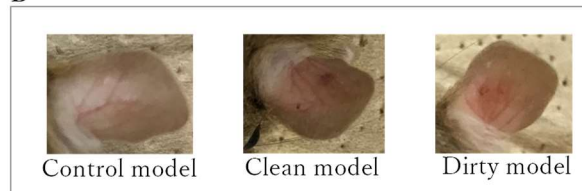


**A Thickness changes 6weeks**

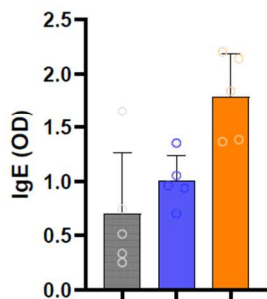


群	共投与	アレルギー投与
Control model	PBS	PBS
Clean model	PBS	Dp
Dirty model	抗原	Dp

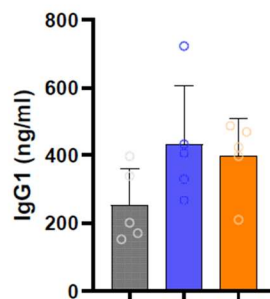
**B**



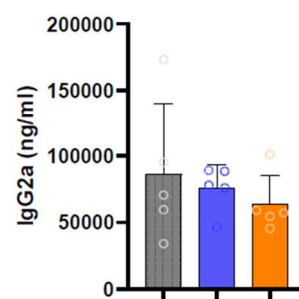
**C IgE 6weeks**



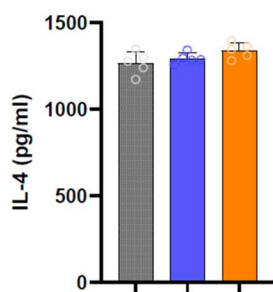
**D IgG1 6weeks**



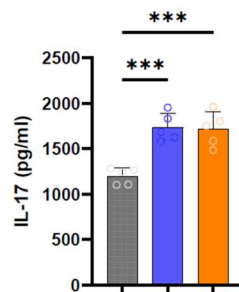
**E IgG2a 6weeks**



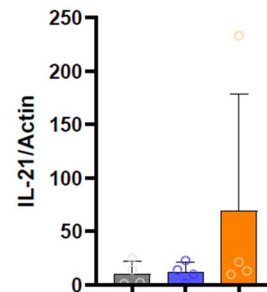
**F IL-4 6weeks**



**G IL-17 6weeks**



**H IL-21/Actin 6weeks**



**I Foxp3/Actin 6weeks**

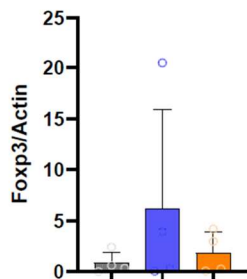


図 9 : 共投与・抗原投与によって誘発された局所免疫応答の解析(6週齢)

## 7 考察

抗原事前投与の実験1では、アレルギーの患部である耳の腫れについて、**dirty model**と**clean model**とで有意差は認められなかったのに対して(図7A)、抗原共投与の実験2では、特に3週齢において有意な改善が認められた(図8A)。すなわち、抗原多様な環境に置くことは耳の腫れに一定の抑制効果を与える一方、メモリー効果は期待できないことを示唆している。このことは、田舎で居住している間はアレルギーを発症しなかったが、田舎から都会に移り住んだ場合にアレルギーを発症した経験とも符合する。

また、IgE抗体価は、実験1では、**clean model**に比べて**dirty model**が低く、**control**と同程度に抑制されているのに対し(図7C)、実験2では、**dirty model**が他の群に比して有意に高い結果となった(図8,9C)。今回は試薬入手の関係上、IgE抗体の総量を計測したのみで、抗原特異的IgEの多様性について測定できなかったが、実験2では、耳の腫れが抑制されているにもかかわらずIgE抗体価が増加していることから、抗体の多様性によって例えばマスト細胞に結合した際の架橋の程度が抑制されるなど、何らかの現象が生じている可能性がある。

一方、IgG2a抗体価は、実験2の6週齢では有意差が認められなかった(図9E)が、実験2の3週齢では、**clean model**に対して**dirty model**が抑制される傾向にあった(図8E)。この結果は、抗原多様な環境下で、6週齢は耳の腫れの抑制効果について有意差までは確認できなかったのに対して、3週齢では有意差が認められた点と共通の傾向にある。

さらに、Th1,Th2細胞が、脾臓中では**control model**に対する有意差は認められなかった(図7G,H)のに対し、所属リンパ中では、**control model**に対して**clean model**と**dirty model**がいずれも有意に増加した(図7J,K)。このことは、アレルギー反応が進行している間は、Th細胞からTh1,Th2への分化が、脾臓ではなく所属リンパ中で起こるという機序を正確にトレースできている。その結果、実験1における**dirty model**は、**clean model**と比較してTh2への分化割合が増加傾向にあることから、抗原事前投与によりTh2への分化を抑制するという仮説は成立しない可能性が高まった。

以上を踏まえ、考えうる抗原多様性によるアレルギー反応の抑制効果の機序を次に考察する。

## 8 考えうる多様性説の機序

B細胞はどのような抗原やウイルスに対してもIgM抗体を産生する。その後、継続的にアレルゲン投与を行うことで、一般的にIgMからIgG2aへのクラススイッチが起こることが知られている。そして、IgG2aはアレルゲンに付着すると、オプソニン化によりマクロファージによる捕食を促進する作用がある。捕食を行い活性化したマクロファージはケモカインを生成し、炎症反応を起こす好酸球や好塩基球をはじめとする様々な免疫細胞を患部に呼び集める。これらの免疫応答によって、IV型アレルギー反応が引き起こされる。今回の実験では、3週齢の**dirty model**において、耳の厚さとIgG2a抗体が抑制傾向にあった。よって、抗原投与によってクラススイッチの頻

度が減少し、マクロファージの捕食活動が抑制されることで、炎症が抑制されているのではないかと考えられる（図 10）。

## 9 まとめ

本研究では、炎症の基準である耳の厚さが抗原事前投与ではわずかしこ抑制されなかったが、共投与を行うと大幅に抑制された。また、成人期より幼少期のマウスに抗原投与を行う方が、炎症を抑制することができることが明らかとなった。よって幼少期に抗原多様な田舎で過ごしている際はアレルギーを発症しなかった経験と一致する結果となった。

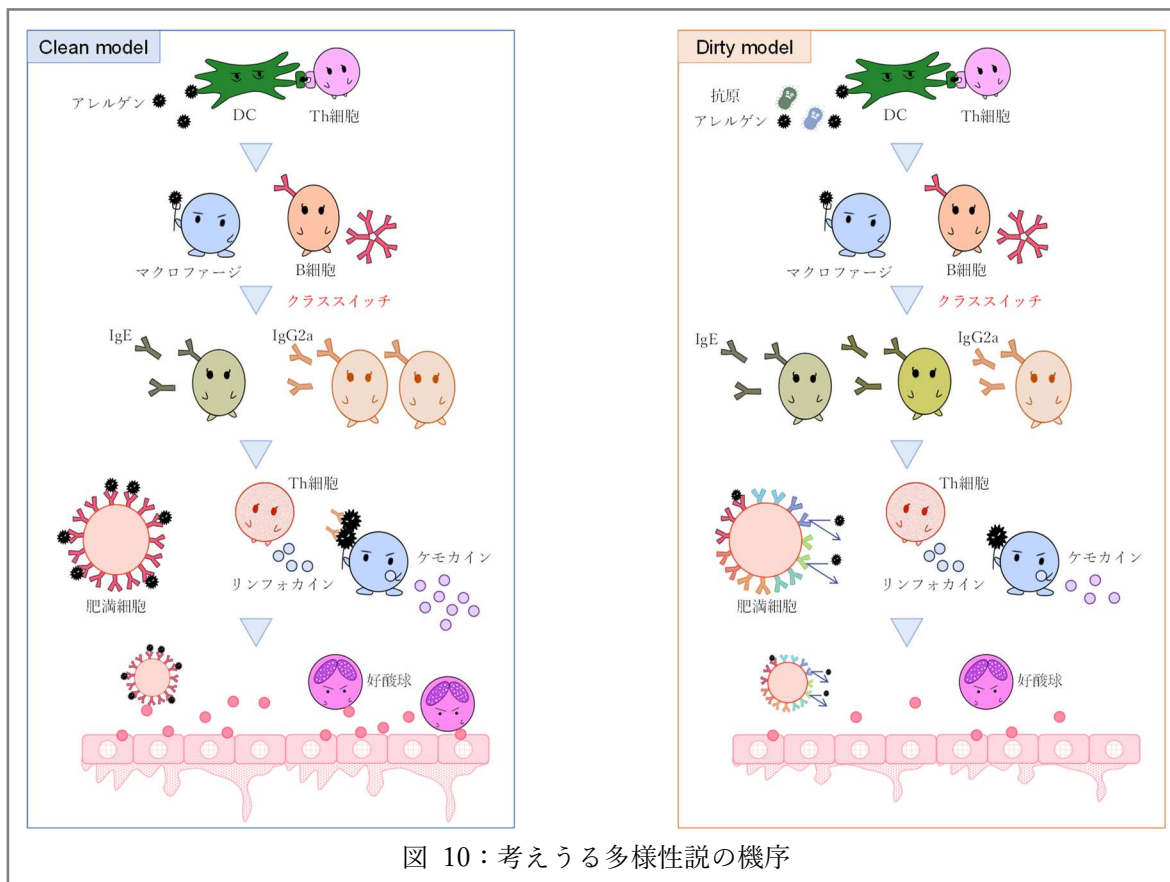
## 10 今後の展望

抗原多様な環境が 6 週齢より 3 週齢のマウスにおいて、炎症抑制の効果が認められ

たメカニズムについて解明する。また、耳の腫れと重症度、IgE 抗体の関係が明確ではないことが明らかにするため、病理解析や抗原特異的な IgE 抗体の測定を行う必要がある。本研究は、アレルギー体質の予防法や治療法の開発につながることを期待される。

## 11 謝辞

堤康央先生には有益な議論をしていただきありがとうございました。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科毒理学分野の皆様のご尽力に感謝いたします。本研究は SEEDs にご支援いただいております。



# 神経細胞の突起伸長に対する大豆成分の効果

5年A組 栗山穂実

指導教員 櫻井 昭

## 1. 要約

認知症患者は年々増加していることが知られている。そこで先行研究により効果が示されていた大豆成分を神経細胞に添加し実験した。その結果、大豆成分であるアミノ酸(ロイシン、メチオニン)に突起伸長および細胞生存率を上昇させる効果は見られなかったが、大豆に含まれるダイゼインには、細胞生存率の回復が見受けられた。ダイゼインが神経細胞に作用する可能性を示すことができた。

キーワード 神経細胞 認知症 糖尿病 大豆エキス

## 2. 背景と目的

認知症は脳の神経細胞が通常より早く減少することで認知機能が低下する病気である。認知症の患者は年々増加していることが知られている。認知症を発症することで、記憶障害が起こり、日常生活が困難になる。以上のことから認知症の改善方法を探したいと思い、老化により減少した神経細胞のうち、残った神経細胞を保護し、突起を伸ばす物質を発見できれば、神経細胞が減少することで起きる記憶障害を遅らすことができるのではないかと考えた。そこで神経細胞に物質を加えると神経細胞に良い効果をもたらしたという先行研究がないか調べたところ、アルツハイマー病態の神経細胞に対して大豆発酵エキスを添加すると、神経突起形成細胞を増加させたという先行研究<sup>1)</sup>を見つけた。しかしこの先行研究では大豆発酵エキスのどの物質が神経細胞に影響を及ぼしているのかわからなかったため、先行研究で注目されていた大豆発酵エキスや、脳に良いと言われる食材に多く含まれているアミノ酸(ロイシン、メチオニン)の神経細胞への影

響を検討することにした。また先行研究ではPC-12細胞を用いていたが、今回の実験では、認知症の記憶障害にも着目したかったため、記憶に関係する脳部位である海馬の神経細胞株(HT-22)を使用した。実験Ⅰでは神経細胞にアミノ酸(ロイシン、メチオニン)の濃度を変えて添加し、神経突起が伸長しているか調べた。実験Ⅱでは、神経細胞の生存率を低下させ、アミノ酸(ロイシン、メチオニン)をそれぞれ添加し細胞生存率の低下が改善するか測定した。また、添加する物質に、大豆イソフラボン(ダイゼイン)を追加した。神経細胞の生存率を低下させるために、神経細胞を高グルコース環境においた。これを糖尿病病態モデルとした。糖尿病の病態モデルは、糖尿病になると認知症になるリスクが上昇する点からも有用と考えた。

## 3. 実験方法

### 海馬の神経細胞(HT-22)

マウスの海馬の神経細胞株

### 試薬

L-Leucine と L-Methionine を、濃度を変

えて添加した。これらの試薬は東京化成工業から購入した。

### Fiji

神経細胞の突起伸長を測るために使用したアプリケーション

### 3.1 実験 I 【神経突起伸長の測定】

4 ウェルカルチャースライドに  $1.0 \times 10^4$  cells/ml に調節した HT-22 を 500  $\mu$ L ずつ添加し、37  $^{\circ}$ C、5%CO<sub>2</sub> で 24 時間培養した。その後、培養液をすて、各ウェルに各濃度に調整したアミノ酸(ロイシン、メチオニン)を添加した培養液 500  $\mu$ L を加え、37  $^{\circ}$ C、5%CO<sub>2</sub> で 24 時間培養した。その後、光学顕微鏡 10 倍で写真を撮影した。写真は各ウェルで 10 枚撮影した。撮影した写真のうち、細胞の全体を測れるものを選定して神経突起の長さを測定した(図 1)。

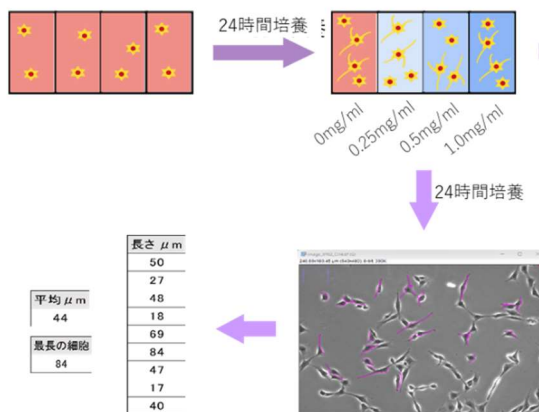


図 1：神経細胞突起伸長の測定方法

### 3.2 実験 II 【細胞生存率の測定】

XTT アッセイ法を用いた。96well plate に  $5.0 \times 10^3$  cells/well の濃度で細胞を撒き、24 時間培養した。アミノ酸(ロイシン、メチオニン)、ダイゼインを添加した培地に交換し、24 時間培養した。その後、各 well に 50  $\mu$ L ずつ試薬を入れ培養した。この時、

細胞内で添加した試薬がミトコンドリアで代謝される。代謝されると試薬の色が変化し、色が濃いほど細胞が生存している。4 時間後、吸光度により色の濃淡を測定した(図 2)。

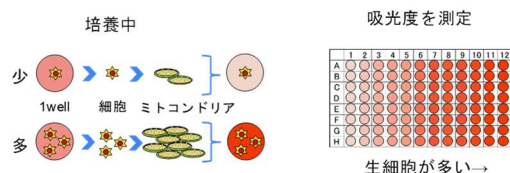


図 2：XTT アッセイ法

## 4. 結果及び考察

### 実験 I 【神経突起伸長の測定】

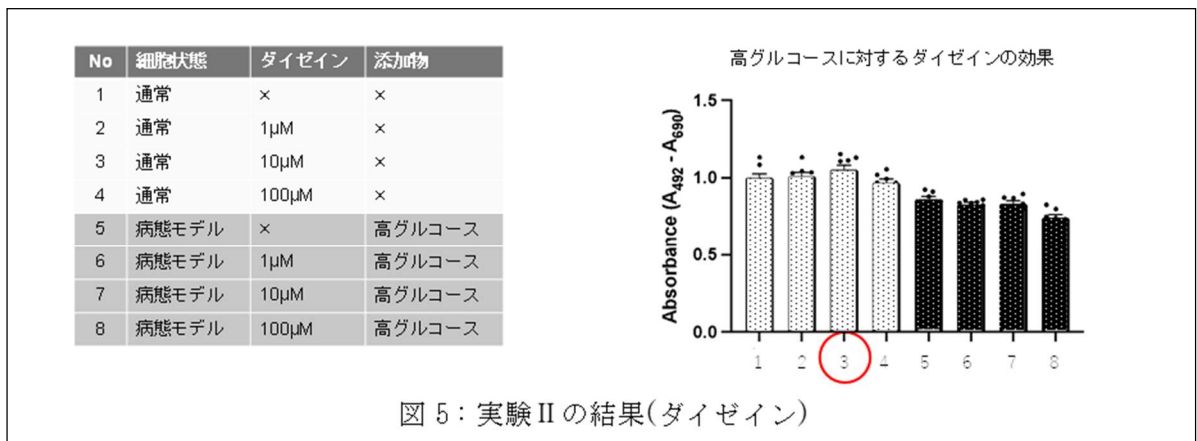
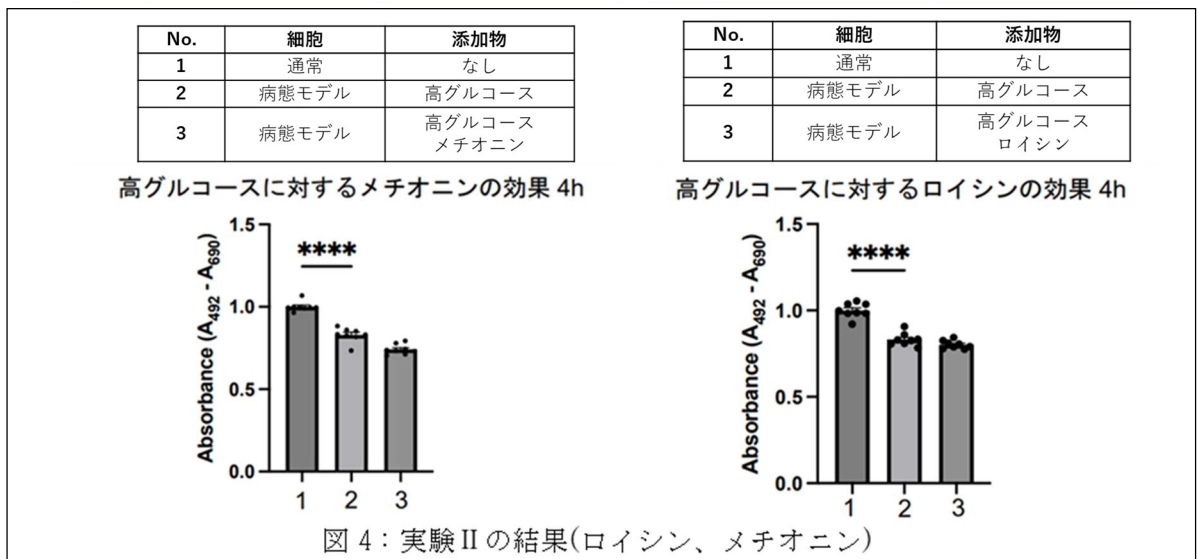
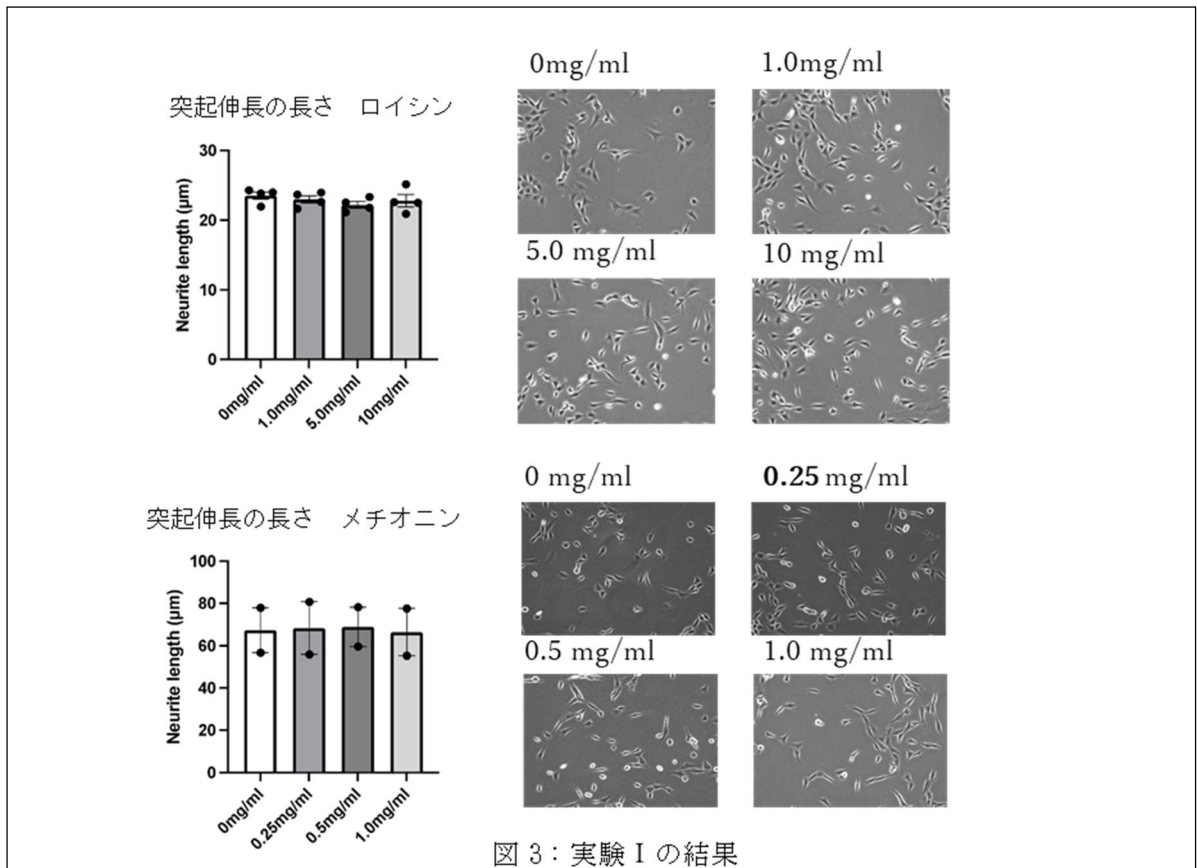
突起伸長の差に有意差はなかった。これはデータがばらついていたこと、培地に一定のアミノ酸が含まれていたため、変化が見にくかったと考えられる(図 3)。

### 実験 II 【細胞生存率の測定】

糖尿病の病態モデルにアミノ酸(ロイシン、メチオニン)を添加した結果、細胞生存率の低下を改善する効果は無かった(図 4)。また、通常の細胞状態、糖尿病の病態モデルにそれぞれダイゼインを添加した結果、通常の細胞状態にダイゼイン 10  $\mu$ M を添加したとき細胞生存率がわずかに改善した(図 5)。このことから、10  $\mu$ M のダイゼインは神経細胞の生存率を増加させる可能性がある。

## 5. 今後の展望

脳に良いと言われている食品に多く含まれている成分(ビタミン E)を HT-22 に添加し、細胞生存率が改善するか調べる。神経突起伸長の測定にウェスタンブロッティング法を用い、ダイゼインが神経突起伸長の抑制を抑えるか実験する。



## 6. 謝辞

本研究を進めるにあたり、全般にわたりの確なご指導をいただいた山下教授に深謝いたします。本研究に対して、実験のご指導をいただいた、宇野さん、櫻井先生、阿久津さん、研究室のみなさまに感謝いたします。SEEDS 事務局のみなさまには貴重な機会をいただき感謝いたします。

## 7. 参考文献

- [1] 富永 隆生ら、「大豆発酵エキスのアルツハイマー病態に対する *in vitro* での評価」、日本健康開発雑誌、2021
- [2] 文部科学省、「日本食品標準成分表 2020 年版(八訂)」、文部科学省、2020
- [3] 公益財団法人日本豆類協会、「健康づくりに果たす豆の役割」、公益財団法人日本豆類協会、2023

# 植物細胞融合と培養

5年B組 浦 大貴

指導教諭 櫻井 昭

## 1. 要約

植物細胞から、セルラーゼなどの酵素液を用いて、プロトプラストを作成することができた。そして、細胞融合技術（PEG法）を用いて、ブロッコリースプラウトのプロトプラストとカボチャやニンジンなどのプロトプラストを融合させることができた。この融合細胞を培養することでカルスの形成を目指した。

キーワード：細胞融合、プロトプラスト、カルス

## 2. 実験背景・目的

植物の論文について調べているとポマトという植物を見つけた。ポマトとはポテトとトマトの細胞を融合することで開発された。ポマトは、一つの植物体から両方の実を収穫できる上にジャガイモの耐寒性を備えている。そのため、より広い地域での栽培が可能になると考えられている。そこで、成長の遅い野菜に成長の早い植物の細胞を融合することで、短期間で収穫できる野菜を開発したいと考えた。植物細胞から細胞壁を取り除いたプロトプラストは、細胞膜のみで包まれているため、細胞膜が融合して1つの細胞になる「細胞融合」が生じやすいといわれている。この細胞融合技術を用いて新しい植物を作成したいと考えた。

本研究は、短期間で大量生産できるようにすることで、飢餓に苦しむ地域の改善が期待される。

## 3. 材料と方法

### 種子

成長の早い植物(ブロッコリースプラウト、シロイヌナズナ)の細胞と、成長を早めたい野菜(カボチャやニンジン、キュウリ、ピーマン)の種子を購入し発芽させた。

### 種子の滅菌と無菌操作

種子を 100 ppm のジベレリン溶液に 5 分間浸した。その後種子を 70%エタノール溶液に移して 30 秒浸して 3% (v/v) アンチホルミン溶液 (10 倍液) に 20 分浸した。これ以降はクリーンベンチで行ったため、使用した用具はすべて滅菌処理を行った。シャーレに脱脂綿を入れ蒸留水(8 mL)で湿らし、種子を等間隔に配置した。アルミ箔に包んで 25℃、暗黒条件化の恒温室で 15 日間育成した。

### プロトプラストの作成

発芽した種子の胚軸を 3 mm 角にカミソリで切り取り、酵素液(表 1)の入ったマイクロチューブに浸けて 1 日置いた。



試薬名	重量
マンニトール	4.6g
セルラーゼ・オノズカ	0.5g
マセロザイム	0.1g
ペクトリアーゼ	5mg
KCl	1.75g
CaCl <sub>2</sub>	0.25g
H <sub>2</sub> O	約100ml
計	100ml

表 1：酵素液の組成

### 細胞融合(PEG 法)

マイクロチューブからマイクロピペットで 10  $\mu$ L 取り出し、血球計算盤でプロトプラストの数を測定した。測定では、双眼実体顕微鏡を用いて、プレートの四隅を観察し、観察された個数 $\div 4 \times 2 \times 10^4$ 個を液中に存在する細胞数とした。細胞数を約  $1.5 \times 10^5$  cells/mL に調整し、 $2 \times 2$  mm のナイロンメッシュ (70  $\mu$ L) に通して別のマイクロチューブに移した。そして 600 rpm で 2 分間遠心した。チューブを傾けてプロトプラストがあると思われる底以外の酵素液を、マイクロピペットを使って取り除いた。洗浄液(w-5)を 800  $\mu$ L チューブに入れ、600 rpm で 2 分間遠心を 3 回行った。

チューブを傾けてプロトプラストがあると思われる底以外の洗浄液をマイクロピペットを使って取り除いた。残ったプロトプラスト溶液から 20  $\mu$ L、PEG(200)液を 10  $\mu$ L ずつ取り出しホールスライドガラスの上でガラス棒を使って混濁させ細胞融合を行った。ホールスライドガラスの上で混濁させた溶液を吸い取り、マイクロウェルプレート (96 穴) に 1/2 濃度の MS 液体培地 (I 液 20 mL, II 液 2 mL, III 液 2 mL, IV 液 0.2 mL, 2,4-D 1 mg/L, NAA(オーキシン) 1 mg/L, カイネチン 1 mg/L, 1 % ショ糖

2 g, 0.4M マニトール 14.57g, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 200 mg/L) を入れ、そこに溶液を入れ、ラップに包んで 25°C の恒温震とう機に入れて培養を行った。

I 液 (10倍)	
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	16.5g
KNO <sub>3</sub>	19.0g
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	4.4g
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	3.7g
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1.7g
II 液 (100倍)	
MnSO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	446mg
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	172mg
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	124mg
KI	489mg/30ml
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	150mg/30ml
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	15mg/30ml
CoCl <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O	15mg/30ml
III 液(100倍)	
Na <sub>2</sub> - EDTA	412.95mg
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	278mg
IV 液 (1000倍)	
ミオイノシトール	5g
グリシン	100mg
塩酸ピリドキシン	25mg
ニコチン酸	25mg
塩酸チアミン	5mg

表 2：MS 培地の材料

### 細胞の培養(プロトプラストの培養)

培養開始から 7 日後に 2,4-D 0.8 mg/L, NAA(オーキシン)0.8 mg/L, マニトール 10.93 g を含む 1/2 濃度の MS 液体培地を 1 mL 追加した。一週間後 2,4-D, 0.4 mg/L NAA(オーキシン)0.4 mg/L, マニトール 10.93 g を含む 1/2 濃度の MS 液体培地を 1 mL 追加した。

さらにその一週間後 2,4-D 0.1 mg/L, NAA(オーキシン)0.1 mg/L, マニトール

7.28 g を含む 1/2 濃度の MS 液体培地を 1 mL 足した。

#### 細胞の再分化

2~3 mm に成長したカルスを、ゼアチン 4 mg/L, IAA 0.1 mg/L を含む再分化培地 (ショ糖 3% を含む 1/2MS 寒天培地) に移植した。

#### 4. 実験結果

種子のカルス誘導で行ったジベレリン処理によって発芽を促進することができた。さらに酵素液を使ったことでプロトプラストを得て、細胞融合を行うことができた。今回この実験を三回程行った。一回目は細胞が見えずカビが生えてしまった。二回目は細胞を見られたがカルスらしきものは無かった。そして三回目の今現在は培養から 20 日程経過し、カルスと思われる細胞が顕微鏡で発見できた(図 1)。



図 1: カルスの形成

#### 5. 考察

1 回目の実験は初回だったこともあり色々と試行錯誤したため、ジベレリン処理時に菌が入ってしまった可能性がある。2 回目は酵素液でプロトプラストを取り出したとき必要な量の細胞数に達していなかったため、細胞分裂が起きずカルスを形成することが不可能だったと考えられる。そし

て 3 回目の現在は、2 回目に比べ必要な細胞数に十分達していたため細胞分裂が起こり、カルスを形成できたと思われる。

#### 6. 今後の展望

今現在培養から 20 日程経過し、カルスと思われる細胞が顕微鏡で見つかったため、この細胞を上記で示した通りに培養していきより大きなカルスを育て再分化させたい。

#### 7. 参考文献

太田次郎, 本川達雄(2004 年). 高等学校生物 II  
稲葉幸司(1988 年). 「植物組織培養—培地の調整法」・化学と生物 Vol.26, No.6  
稲葉幸司, 「細胞融合・細胞培養による特産ナスの品種改良」・京都府農業総合研究所

#### 8. 謝辞

科学探求の活動において、奈良女子大学理学部奈良久美準教授に、シロイヌナズナの栽培方法を教えていただきました。櫻井先生には多大なご指導を賜りました。この場で深く感謝申し上げます。

# マルチモーダル対照学習を応用した

## 五感から感情を推測、制御する手法の提案

5年B組 岡本 晃朋  
指導教員 守本 寛治

### 1. 要約

マルチモーダル空間における対照学習を応用することで、五感が感情にどのような影響を与えるかを推測し、特定の感情状態を再現することを目的としている。五感情報を離散的なデータとして扱い、表情から抽出した感情との対照学習を行うことで実現する。

キーワード

Constructive Learning Matrix Approximate nearest neighbor search Multimodal

### 2. 研究の背景と目的

私は他人と話をする時、知識に関わらず話の内容が伝わらない、理解されないことがある。この原因は私と他人が話に対して持つ感情(≒感覚)の違いにあると考えた。そこで、他人に話に対して同じ感情を持たせることができれば会話が成立するのではと考えた。感情に最も影響を与えるものは五感であるという仮説を立て、五感を得る情報と感情の関係性をマルチモーダル空間における対照学習を用いて学習・推論することで、特定環境下での感情のシミュレーション及び特定の感情を作り出す状況の算出を目的としている。

### 3. 予備実験

仮説検証のために同学年 120 名に対してアンケートを行い、回答のあった 20 人のデータを示す。

#### 3.1 五感と感情の関係性

感情を五感から感じたことがあるかにつ

いて二択調査を行った。Figure1 に示す通り、全ての感覚において 75%以上の人が五感に感情に影響を与えていると回答した。

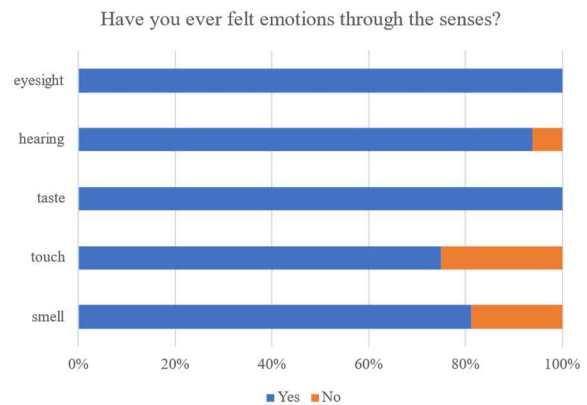


Figure 1: 感覚と感情の関連性

#### 3.2 視覚情報と感情の関連性

視覚情報について、物体の色や形などがどのような影響を与えるかについても調査を行った。

##### 3.2.1 物体の形状における影響

Figure 2 に示す画像についてそれぞれの形状自体が感情に影響を与えるかについて実験を行った。結果を Figure 3 に示す。

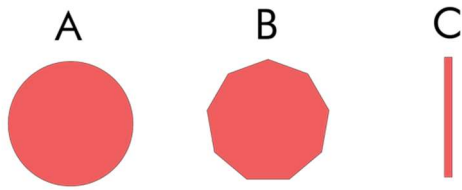


Figure 2: 形状による感情変化

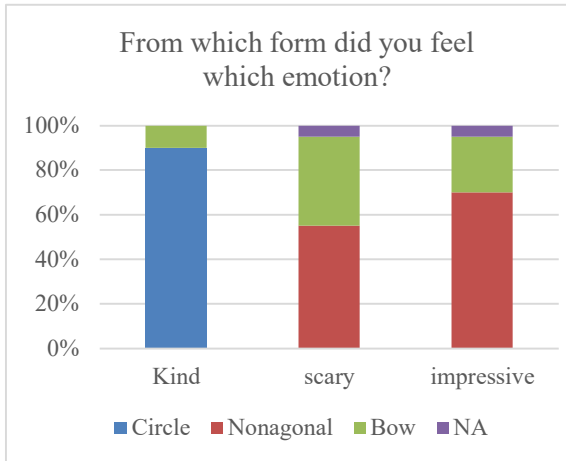


Figure 3: Percentage of feelings toward the form

結果として、90%以上の人が円について”Kind”と感じた。しかし、他の二つの形状にはあまり特徴が見られなかった。

### 3.2.2 物体の色における影響

Figure 4 に示す画像について、それぞれのグラデーションに対してどのような感情を持つかについて実験を行った。

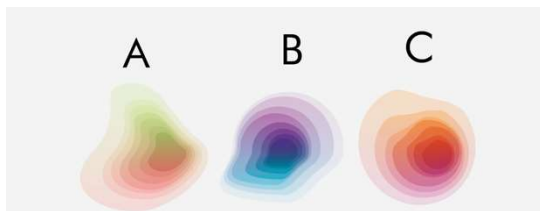


Figure 4: 色による感情変化

左から A(淡い赤-緑), B(紫-青), C(オレンジ-赤)

結果として全ての感情に 50%以上の人が同じ図形を選択したが、色からの判別は難しいと考える。

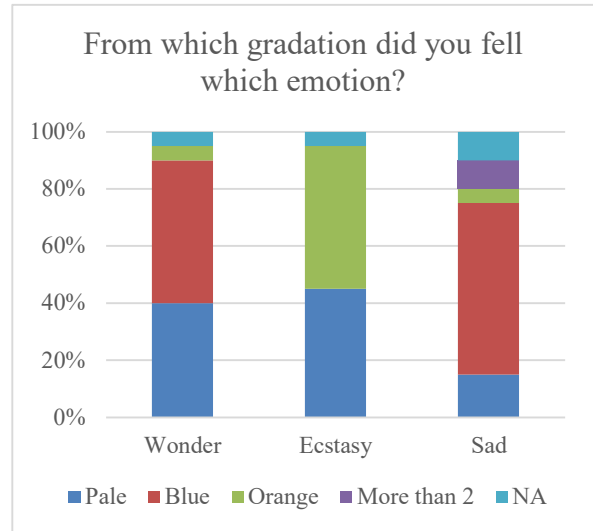


Figure 5: Percentage of feelings toward the color

## 4. 関連研究

感情の算出などが可能な参考研究を挙げる。

### 4.1 感情極性辞書

言語情報から感情を判断するものであり、それぞれの言葉に”Positive”と”Negative”のラベルをアノテーションすることで作成される。NLPなどで利用されるが、単語からスコアを算出するため、感情の多様性や一般性の欠如が問題である。

### 4.2 Word2vec

単語を固定端のベクトルで表現することを目指したものであり、CBOW や skip-gram を採用したモデルである。「単語の意味は周囲の単語によって形成される」という分布仮説に基づいて構成されており、単語の類似性などの発見が可能だが、多義語や固有名詞への対応が難しい。

### 4.3 BERT

Transformer を利用したモデルで、単語を単位としてではなく単語の接合部や単語

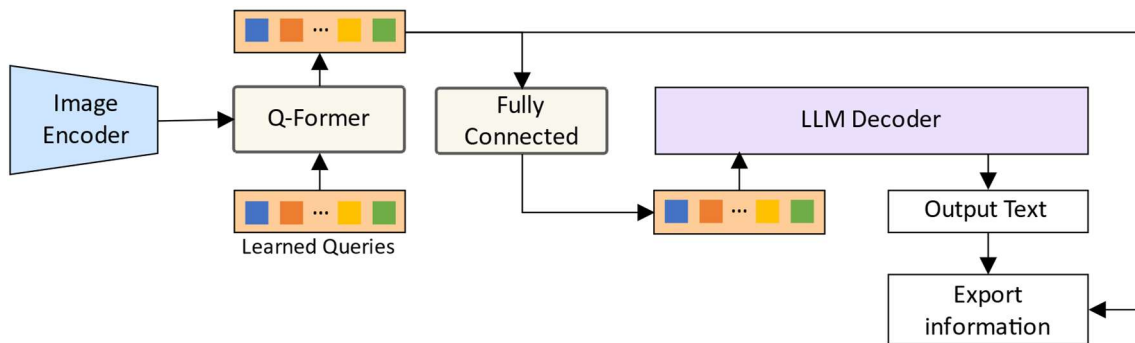


Figure 6: Vision-to-Language Generative Learning の概要

全結合層を用いて出力クエリを LLM のテキスト埋め込みと同じ次元に線形放射することで、Q-Former の解釈を LLM に伝えている。本研究では Q-Former からの出力を含めるようにし、学習に使用している。

の一部分など、文中の token を同時に処理することができる。“POSITIVE”, “NEUTRAL”, “NEGATIVE”の三種類の観点からのスコアを出すことが可能だが、そこから感情を推定するのは難しい。

成した。Figure 6 に示すように、Q-Former からの出力を含めるようにすることで画像特徴量を同時に扱えるようにした。結果を Table 1 に示す。

## 5. 研究内容

予備実験 3.1 にて五感の情報が感情に影響を与えることがわかった。しかし、予備実験 3.2 から、全ての場合において実際に見えているものの形状や色彩が感情に影響を与えているとは考えにくい。これは、色や形は人が物体を認識するのに必要な要素に過ぎないからだと考えられる。そこで、五感の情報を物体の識別子として捉えることで五感の捉える 2 次情報の再現を試みた。

### 5.1 感覚刺激の再現

五感の受ける感覚刺激を再現するために視覚や聴覚などの情報を離散的なデータと見做し、識別子の作成を行なった。

#### 5.1.1 視覚識別子の作成

##### 5.1.1.1 Q-Former による特徴推論

視覚情報から視覚識別子を作成するために、BLIP2[7]を応用したエンコーダーを作



a tall wooden tower with lights on top of it in the middle of a city street at night.

Table 1: Q-Former を用いて生成したテキスト Figure 6 にて示したテキストには画像の特徴が多く反映されていると考えられる。しかし、文章形式であるため学習に流用するのは難しい。

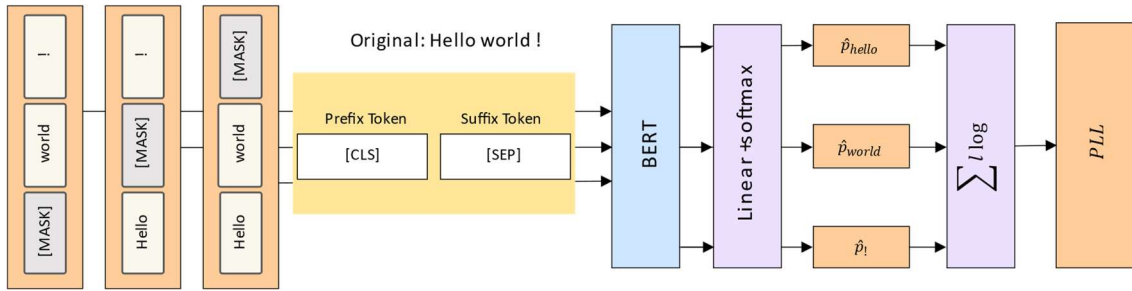


Figure 7: pseudo-log-likelihood scores によるスコアリング

各単語 $w_n$ に対して MASK をかけ、その位置にくる単語を予測し、実際の単語の予測順位から $\hat{p}$ を計算し、それらの対数尤度の和を文章のスコアとする。[CLS]トークンの後には事前学習させた MLM の PLL によって線形マップを教師あり学習を行っている。

### 5.1.1.2 PLL による文章補完

PLL[10]を用いて Q-Former を用いて生成した文章における代名詞などを補完する。(Figure 7)

PLL では、単語の列

$$W_{\setminus t} := (\omega_1, \dots, \omega_{t-1}, \omega_{t+1}, \dots, \omega_{|W|})$$

に対し、単語を Mask で隠して予測した時の条件付き確率の対数尤度の和

$$PLL(W) := \sum_{t=1}^{|W|} \log P_{MLM}(w_t | W_{\setminus t})$$

をスコアとして用いる。実際の計算スコアを Table 2 に示す。

### 5.1.1.4 CLIP による識別子の最小単位の決定

PLL にて補完したテキスト情報から、最も意味が強く影響する最小単位へ変換する。CLIP[12]を用いて画像とテキストでの Zero-Shot Image Classification を行い、分割前と分割後の image-text similarity score を比較し、値の大きい方を使用する。この処理は文章全体に対して行い、すべての要素から原文が復号できるようにしている。

	<i>Pseudo-log-likelihood:</i>
	Evaluation Score
tower	-28.120616793632507
lights	-29.078521132469177
top	-31.276191599667072
tall	-31.34084489569068
street	-31.35562378168106
wooden	-33.037727903574705
middle	-33.079763650894165
night	-36.80495597422123

Table 2: PLL によるスコアリング

Table 1 にて生成した文章中の it に入る単語を推測している。Figure 7 で示した手法のように、it に文中にある単語を入れたスコアを計算している。この場合、tower が正解であり、結果も tower が最も高いスコアを示している。また、スコアが負の値なのは対数尤度をとっているからである。

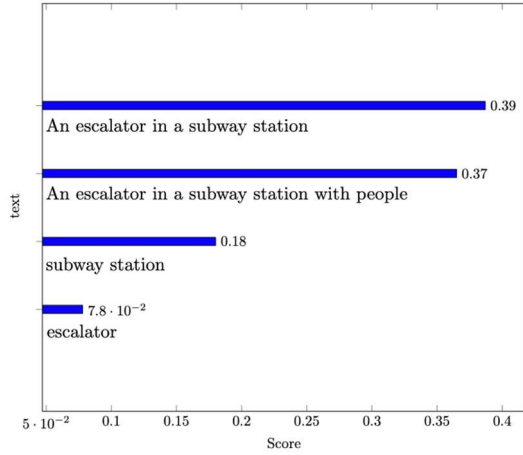


Figure 8: CLIP によるスコアリング

生成した文章を分割し、CLIP を用いてスコアリングを行った。この場合、状況を最も強く表す文章として、“An escalator in a subway station”が最も強い。

### 5.1.3 CLAP による聴覚識別子の作成 聴覚識別子の作成に CLAP[8]:

(Contrastive Language-Audio Pretraining)を利用した。音声エンコーダーには transformer ベースの HTSAT[12] を採用し、テキストエンコーダーには BERT[13]を採用した。CLAP では損失関数

$$\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left( \log \frac{\exp\left(\frac{E_i^a \cdot E_j^t}{\tau}\right)}{\sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{E_i^a \cdot E_j^t}{\tau}\right)} + \log \frac{\exp\left(\frac{E_i^t \cdot E_j^a}{\tau}\right)}{\sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{E_i^t \cdot E_j^a}{\tau}\right)} \right)$$

$E^a$ : audio embedding

$E^t$ : text embedding

$\tau$ : learnable temperature parameter

が最小になるように学習している。つまり、audio 埋め込み  $E_p^a$  に対して最も近いテキスト  $E_q^t$  を M までのテキスト間  $E^t = \{E_1^t, \dots, E_M^t\}$  からコサイン類似度関数を用いて見つけることができる。こちらも CLIP と同様に Zero-Shot Classification を利用した。(Figure 9)

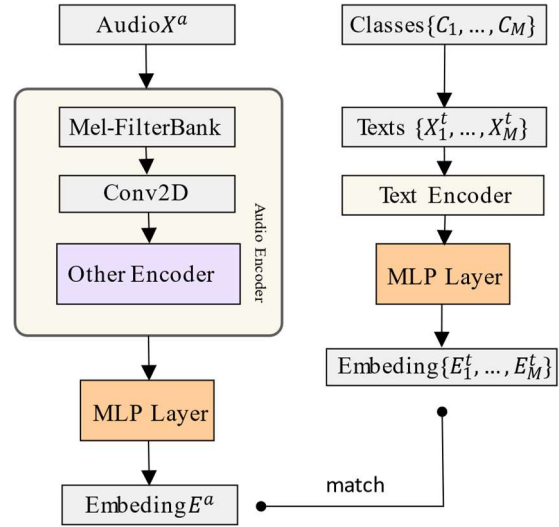


Figure 9: CLAP における Zero-Shot

#### Classification

MLP:多層パーセプトロンを用いて  $E^a$  と  $E^t$  の同じ次元を得ている。損失関数の値が最小になるように学習を行っているので、 $E^a$  と  $E^t$  のペアでコサイン類似度が 1 になるのが全く同じ意味を持つことになる。

### 5.2 EmoCo による感情推定

特定状況における表情から感情を抽出する。画像をエンコードして得た特徴量ベクトルに対し Softmax(Sm)

$$\text{Sm}(\mathbf{z}) = \frac{e^{z_i}}{\sum_i e^{z_i}}$$

SparseMax(Sp)

$$\text{Sp}(\mathbf{z}) = \underset{\mathbf{p} \in \Delta^d}{\text{argmin}} \|\mathbf{p} - \mathbf{z}\|^2 \text{softmax}(\mathbf{z})$$

を利用して注意領域と不注意領域を生成する。EmoCo[1]では Sp は神経注意メカニズム、Sm は顔から注意情報を得るのに使用している。(Figure 10)を施している。

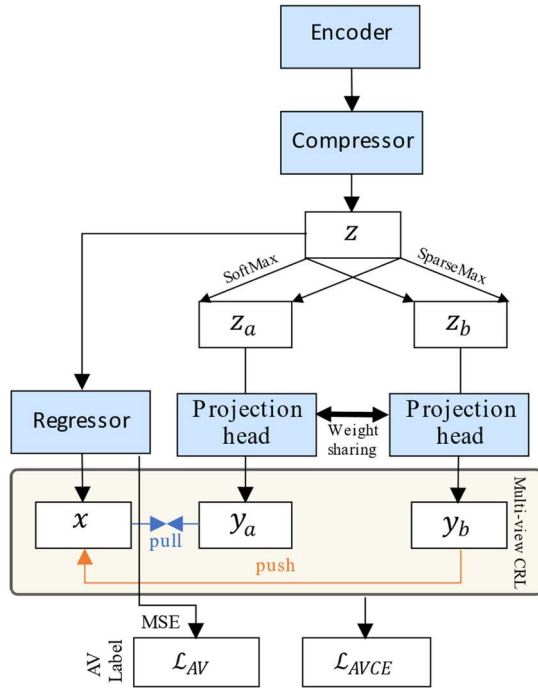


Figure 10: EmoCoによる感情推定  
MLP:多層パーセプトロンを用いて $E^a$ と $E^t$ の同じ次元を得ている。損失関数の値が最小になるように学習を行っているので、 $E^a$ と $E^t$ のペアでコサイン類似度が1になるのが全く同じ意味を持つことになる。

### 5.2.1 SoftMax と SparseMax の比較

SoftMax は

$$\text{Softmax}(\mathbf{z}) = \frac{e^{z_i}}{\sum_j e^{z_j}}$$

と先ほど説明したが、 $\text{argmax}$  を使用して

$$\text{softmax}(\mathbf{z}) := \max_{\mathbf{p} \in \Delta^d} \mathbf{p}^T \mathbf{z} + H^S(\mathbf{p})$$

$$\text{where } H^S(\mathbf{p}) = \sum_j p_j \log p_j$$

と表すことができる。この表記から、Softmax は  $\text{argmax}$  にシャノンのエントロピーが加わっているのが分かる。

同様に SparseMax は

$$\text{sparsemax}(\mathbf{z}) := \max_{\mathbf{p} \in \Delta^d} \mathbf{p}^T \mathbf{z} + H^G(\mathbf{p})$$

$$\text{where } H^G(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \sum_j p_j (1 - p_j)$$

と表せる。どちらも右辺に  $\text{argmax}$  が入っているが、SoftMax では値が極大、極小出会っても出力が0にならないのに対して、SparseMax は  $-1 \leq t \leq 1$  以外の値をすべて0または1に切り捨てる。(Figure 11)

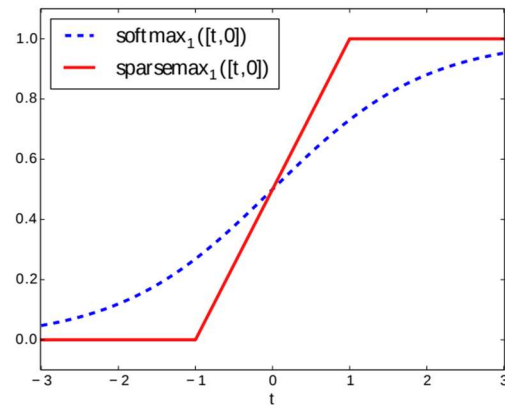


Figure 11: Softmax と Sparsemax の比較

2次元における Softmax と Sparsemax を表す。Softmax が全体に値を与えているのに対して、sparsemax は  $-1 \leq t \leq 1$  以外での値が切り捨てられているのがわかる。また、2次元における Softmax はシグモイド関数と同値である。(A sparse model of attention and multi-label classification. International conference on machine learning[9], p3 Figure1 より引用)



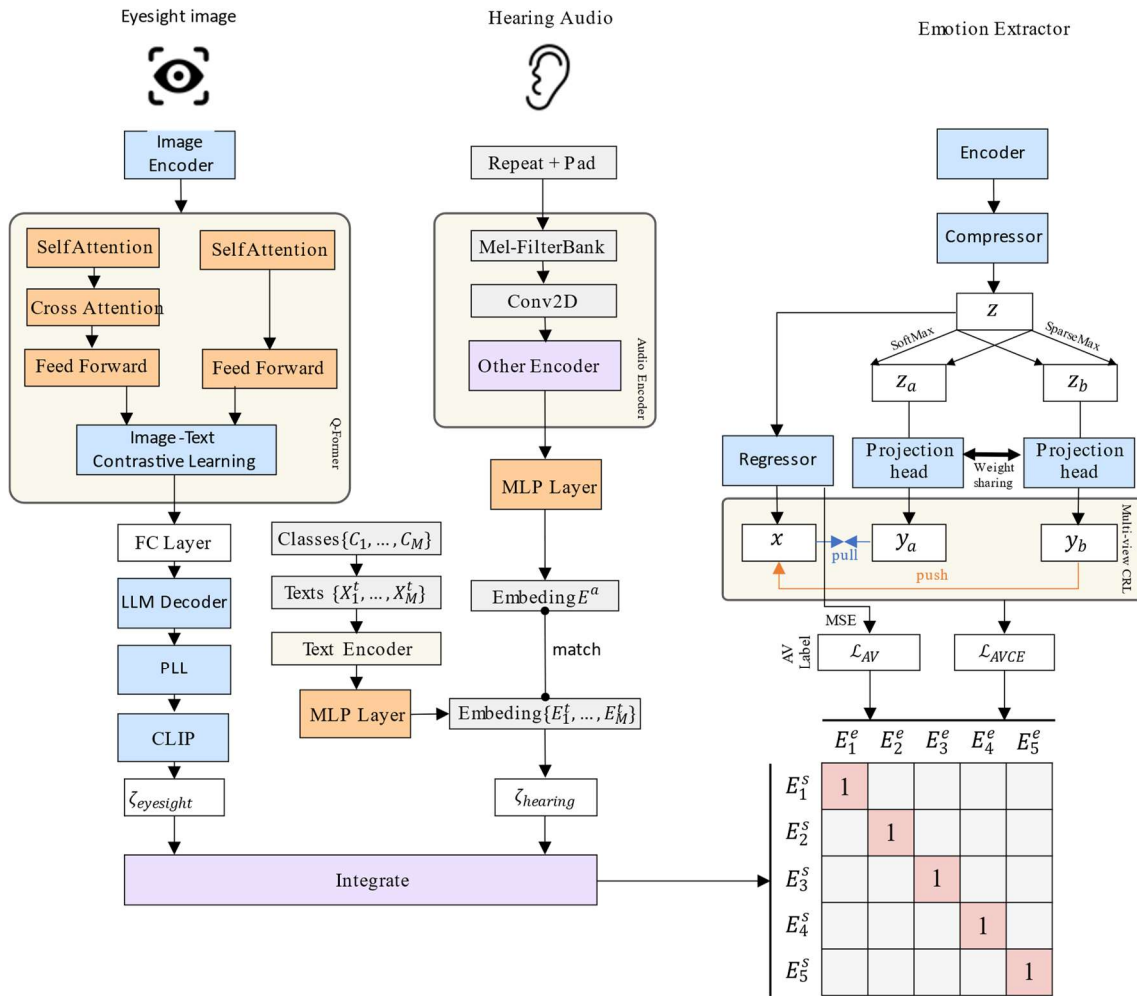


Figure 12: EmoSense-MMC のアーキテクチャ

5.1 で作成した識別子と 5.2 の EmoCo を用いて作成した感情についてコサイン類似度が 1 になるよう

に学習を行う。損失関数は  $\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left( \log \frac{\exp(\frac{E_i^s \cdot E_j^e}{\tau})}{\sum_{j=1}^N \exp(\frac{E_i^s \cdot E_j^e}{\tau})} + \log \frac{\exp(\frac{E_i^e \cdot E_j^s}{\tau})}{\sum_{j=1}^N \exp(\frac{E_i^e \cdot E_j^s}{\tau})} \right)$

### 5.3 モデルアーキテクチャの概要

これまで作成してきたものから、感情と感覚のマルチモーダルな対照学習を行う。Figure12 に示すように、視覚識別子と聴覚識別子の作成と EmoCo が組み込まれている。また、学習に用いるデータには画像、テキストの両方を使用しており、マルチモーダル空間での処理を行うことでより感覚刺激を学習時に再現しようと試みている。

### 6. 問題点

本手法の問題点として、マルチモーダル間での対照学習において、データセットの自作が大きな問題となっている。利用できるデータセットがないため、現在自作しているが、規模の大きさや一貫性の問題でまだ完成に至っていない。そのため、まだ本手法の検証が完了していません。学習方法の変更などを考えています。

## 7. 今後の展望

### 7.1 entmax の導入及び応用

5.2.1 で述べた Softmax と Sparsemax の代わりに、entmax を導入する。先ほどの表記と同じように argmax を用いて

$$\text{entmax}(\mathbf{z}) := \max_{\mathbf{p} \in \Delta^d} \mathbf{p}^\top \mathbf{z} + H_\alpha^T(\mathbf{p})$$

where

$$H_\alpha^T := \begin{cases} \frac{1}{\alpha(\alpha-1)} \sum_j (p_j - p_j^\alpha), & \text{if } \alpha \neq 0 \\ H^s(p), & \text{if } \alpha = 0 \end{cases}$$

となる。ここで、 $\alpha$  を温度パラメータとして最適化するように学習することができれば、より実際の感覚に近い活性化関数にできると考えている。

### 7.2 物体による視覚識別子の追加

現在、3.2 の結果から物体の名前などから視覚識別子を作成している。これは実在論という名詞に対応した者自体が存在するという考え方と一致する。それに相反する形而上学的唯名論の観点から、物体の色や形から未知の物体などの補完を行うことで、より正確に視覚に映るものを表現することが可能だと考える。U3HS フレームワーク[4]では、既知のオブジェクトと未知を事前知識なしで区分することが可能であるため、未知に対するキャプションの生成を行えると考えられる。

### 7.3 識別子の合成

現在作成した識別子はテキストであり、他の感覚のテキストと結合しているだけの状態である。そこで、テキストの tokenize を行い、ベクトルとしてそれらを合成することを考える。五感すべての情報があるとき、ベクトルを複素数平面に拡張すると考えると、

$$\zeta = \exp\left(\frac{2\pi i}{5}\right)$$

を  $0 \leq |\zeta| \leq 1$  の範囲で定義する。このとき、 $\zeta^2$  や  $\zeta^3$  はオイラーの公式より  $\theta$  が  $\frac{2\pi}{5}$  動いた場所に位置する。(Figure 13)

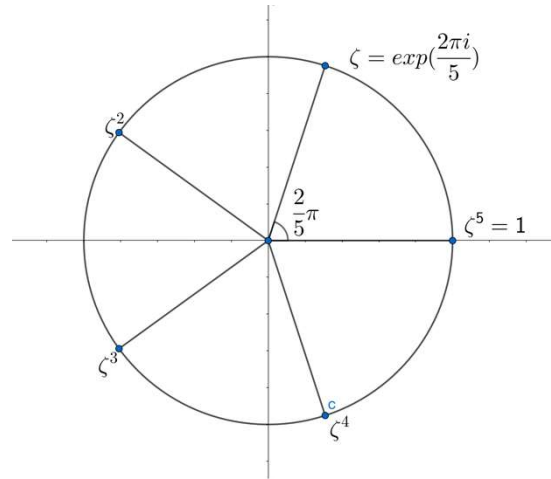


Figure 13: 単位円上の  $\zeta$  の位置

この  $\zeta$  ベクトル上に変換したベクトルを適用することで、異なる部位から得た情報を傾きと表しながら合成することができる。(Figure 14)

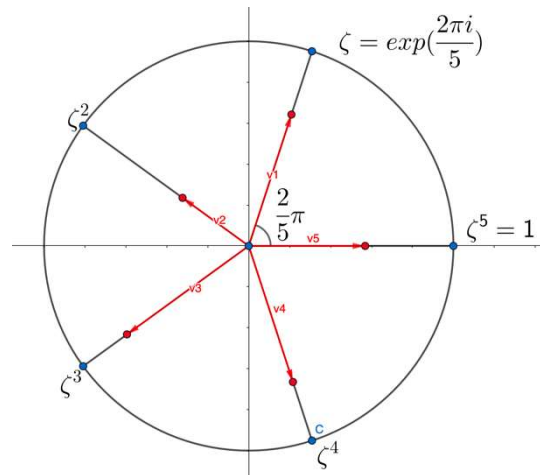


Figure 14: ベクトルを  $\zeta$  上に展開する

また、すべての  $|\zeta|$  の値が等しいとき、 $\zeta$  と  $\zeta^4$ ,  $\zeta^2$  と  $\zeta^3$  は複素共役になり、

$$\zeta + \zeta^2 + \zeta^3 + \zeta^4 + \zeta^5 = 0$$

となる。

次に、それぞれのベクトルの加法によって得られた原点 $O$ からのベクトル $\vec{O\xi} = \vec{V}$ について考える。(Figure 15)

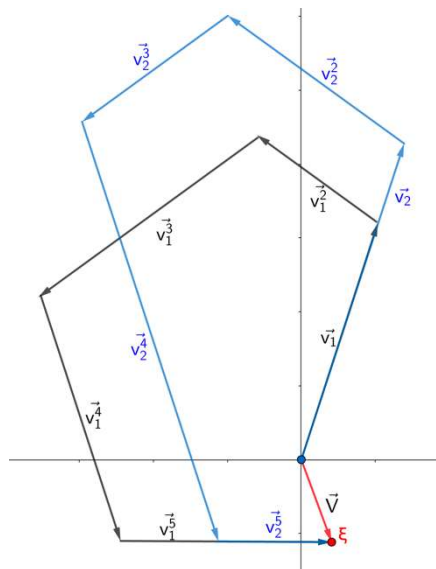


Figure 15: ベクトルの加法

Figure 15 に示すように、

$$\begin{aligned} \vec{v}_1^1 + \vec{v}_2^1 + \vec{v}_1^2 + \vec{v}_2^2 + \vec{v}_1^3 + \vec{v}_2^3 + \vec{v}_1^4 + \vec{v}_2^4 + \vec{v}_1^5 + \vec{v}_2^5 \\ = \vec{v}_2^1 + \vec{v}_2^2 + \vec{v}_2^3 + \vec{v}_2^4 + \vec{v}_2^5 \\ = \vec{V} \end{aligned}$$

のように、各ベクトルの長さを調節することで、特定の感情 $\vec{O\xi}$ を表す感覚値を作り出すことが可能になり、感情の逆算がより簡単に実現できると考える。

## 7.4 他感覚の追加

現在、視覚と聴覚を用いた推論を行っており、他三つの感覚の手法を模索中である。

### 7.4.1 嗅覚・味覚

これらの仕組みについて調べてみると、化学的なプロセスが多く、再現は難しいと考える。五味やヘニングの嗅覚プリズムなどを用いるとなると、匂いや味を事前に調査する必要があり、本研究には向いていない。そこで、これらの情報を視覚から抽出できないかと考えている。

### 7.4.2 触覚

触覚は嗅覚・味覚とは違い、明確に分かれているため、比較的再現が簡単だと考える。温覚・冷覚などは外気温などから流用し、触覚・痛覚を視覚から抽出できないかと考えている

## 7.5 Faiss を用いた個人差の調整

近傍探索ライブラリである Faiss [6] を用いてそれぞれの結果に対し調整を行う。事前学習として個人の index を作成し、後ほど重みつき結合を行うことで結果を個人の感覚へと寄せることが可能だと考える。

## 8. 参考文献

1. Daeha Kim and Byung Cheol Song. "Emotion-aware multi-view contrastive learning for4 facial emotion recognition." In Lecture Notes in Computer Science, Lecture notes in computer science, pages 178-195. Springer Nature Switzerland, Cham, 2022, doi: 10.1007/978-3-031-19778-9\_11.
2. Ali Mollahosseini, Behzad Hasani, and Mohammad H. Mahoor, "AffectNet: A New Database for Facial Expression, Valence, and Arousal Computation in the Wild," IEEE Transactions on Affective Computing, 2017.
3. D. Kollias, S. Zafeiriou: "Expression, affect, action unit recognition: Aff-wild2, multi-task learning and arcface." In: 30th British Machine Vision Conference 2019, BMVC 2019, Cardiff, UK, September 9-12, 2019. <https://bmvc2019.org/wp-content/uploads/papers/0399-paper.pdf>.
4. Stefano Gasperini, Alvaro Marcos-Ramiro, Michael Schmidt, Nassir Navab, Benjamin Busam, Federico Tombari: "Segmenting Known

- Objects and Unseen Unknowns without Prior Knowledge.”  
<https://arxiv.org/abs/2209.05407>, 2022.
5. “A Neural Algorithm of Artistic Style” by Leon A. Gatys, Alexander S. Ecker, and Matthias Bethge.  
<https://arxiv.org/abs/1508.06576>, 2015.
  6. The Faiss library, Matthijs Douze, Alexandr Guzhva, Chengqi Deng, Jeff Johnson, Gergely Szilvassy, Pierre-Emmanuel Mazaré, Maria Lomeli, Lucas Hosseini, Hervé Jégou.  
<https://arxiv.org/abs/2401.08281>, 2024
  7. BLIP-2: Bootstrapping Language-Image Pre-training with Frozen Image Encoders and Large Language Models Junnan Li, Dongxu Li, Silvio Savarese, Steven Hoi.  
<https://arxiv.org/abs/2301.12597>, 2023.
  8. CLAP: Learning Audio Concepts From Natural Language Supervision Benjamin Elizalde, Soham Deshmukh, Mahmoud Al Ismail, Huaming Wang. <https://arxiv.org/abs/2206.04769>, 2022.
  9. Martins, Andre, and Ramon Astudillo. From softmax to sparsemax: A sparse model of attention and multi-label classification. International conference on machine learning. PMLR, 2016.  
<https://arxiv.org/abs/1602.02068>
  10. Masked Language Model Scoring, Julian Salazar, Davis Liang, Toan Q. Nguyen, Katrin Kirchhoff, ACL 2020.,  
<https://arxiv.org/abs/1910.14659>
  11. Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision, Alec Radford, Jong Wook Kim, Chris Hallacy, Aditya Ramesh, Gabriel Goh, Sandhini Agarwal, Girish Sastry, Amanda Askell, Pamela Mishkin, Jack Clark, Gretchen Krueger, Ilya Sutskever,  
<https://arxiv.org/abs/2103.00020>, 2021
  12. HTS-AT: A Hierarchical Token-Semantic Audio Transformer for Sound Classification and Detection. Ke Chen, Xingjian Du, Bilei Zhu, Zejun Ma, Taylor Berg-Kirkpatrick, Shlomo Dubnov.  
<https://arxiv.org/abs/2202.00874>, 2022
  13. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. Jacob Devlin, Ming-Wei Chang, Kenton Lee, Kristina Toutanova.  
<https://arxiv.org/abs/1810.04805>, 2019

## 9. 謝辞

本研究において仮説検証のアンケートに答えて頂いた20名の方、大会の応募などを手伝っていただいた守本寛治先生に感謝をこの場で申し上げます。

# 強力な音場を透過した音波の振る舞い

6年D組 黒川 陸

指導教諭 藤野 智美、守本 寛治、米田 隆恒

## 1. 要約

音源から発射された音波の進行方向を自由に操作する技術は、多くの音響工学の分野にとって重要である。本研究では、強力音場を空気中に作り、その領域で音波を反射させることによる音波の方向操作を検討した。

初めに、強力な定在波に対してインパルスを入射させる有限差分法のシミュレーションを行ったところ、反射波が発生する結果を得た。そして、複数の超音波振動子を用いて空気中に強力音場を発生させ、そこへ別の振動子から音波を入射させるシミュレーション及び実験を行った。双方で同様の結果が得られ、強力音場を透過した音波の強度が減少し、強力音場の外で音波の強度が増加した。これは、強力音場が存在する領域を境界として反射が起こり、反射した音波が強力音場の外に移動したことを示している。以上の結果から強力音場へ入射した音波が反射することが示された。

**キーワード** 強力音場, 超音波, 反射, 波動方程式, シミュレーション

## 2. はじめに

音源から発射された音波の進行方向を自由に操作する技術は、多くの音響工学の分野にとって重要である。従来の手法の一つは、物理的な反射板で音波を反射させたり、物理的なレンズで音波を屈折させたりして方向を操作することである。しかし、物理的な構造物の構築には相応の時間と労力が必要とされる。また、物理的な構造物には様々な制約があり、瞬時にその設置位置、サイズ、物理的特性などを変化させることは困難である。

この問題を解決する先行研究として、物理的な構造物を使用せずに音波の進行方向を操作する技術が Kazal DS らによって提案されている<sup>1)</sup>。彼らは一酸化炭素レーザー光(波長 $5.5\mu\text{m}$ ,出力 $250\text{W}$ )を気体媒質に吸

収させることで空気中に局所的に温度が高い領域を作り出し、その領域が音波に対して90%以上の反射率を持つことを実験で示している。

本研究では、強力音場を空気中に作り、その領域で音波を反射させることによる音波の方向操作を検討する。超音波を用いて強力音場を作ることで、人間にとって無音、無臭、無色透明な反射板を実現することができる。また、レーザー光より強力音場の方がエネルギー的に安全である可能性がある<sup>2)</sup>。本論文の目的は、強力音場が入射波を反射させる能力を持つことの実証である。なお、「強力音場」がどの程度の音圧であるかを具体的に求めることは本研究では行わない。

### 3. 基本的な考え方

通常、音波の反射は異なる媒質の境界で起きる。ここで、媒質 1 を進行していた音波が媒質 2 へ垂直入射する際に反射が起きる状況を考える。このときの反射率 $R$ は媒質の固有インピーダンスを用いて(1)式で与えられる。

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

媒質 1 の固有音響インピーダンス: $Z_1$  [ $\text{kg}/\text{sm}^2$ ]

媒質 2 の固有音響インピーダンス: $Z_2$  [ $\text{kg}/\text{sm}^2$ ]

固有音響インピーダンス $Z_i$ は媒質の音速と密度の積で与えられる。

$$Z_i = c_i \cdot \rho_i \quad (2)$$

媒質 $i$ の音速: $c_i$  [ $\text{m}/\text{s}$ ] 媒質 $i$ の密度: $\rho_i$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

例えば、空気中を進行していた音波が、空気の 2 倍の固有音響インピーダンスを持つ媒質へ入射した際の反射率は 1/3 である。

$$R = \frac{2Z_0 - Z_0}{Z_0 + 2Z_0} = \frac{1}{3} \quad (3)$$

空気の固有音響インピーダンス: $Z_0$  [ $\text{kg}/\text{sm}^2$ ]

このときの透過率は 1 から反射率を引いて 2/3 である。

ここで、音波が粗密波であり、媒質の密度変化が伝播する現象であることに注目する。音波の音圧と密度の関係は(4)式で表される。

$$\rho_i = \frac{P_i}{R_0 T} \quad (4)$$

媒質 $i$ の密度: $\rho_i$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] 媒質の気体定数: $R_0$  [ $\text{m}^2/\text{s}^2\text{K}$ ]

媒質 $i$ の圧力: $P_i$  [Pa] 媒質の熱力学温度: $T$  [K]

また、音波の非線形特性として、音圧に従い音速が変化することも知られている。<sup>3)</sup>

$$c_i = c_0 + \frac{P_i}{\rho_0 c_0} \quad (5)$$

媒質 $i$ の音速: $c_i$  [ $\text{m}/\text{s}$ ] 媒質の静音時の音速: $c_0$  [ $\text{m}/\text{s}$ ]

媒質 $i$ の音圧: $P_i$  [Pa] 媒質の静音時の密度: $\rho_0$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

強力な音場であるほど密度変化と音速変化が大きいと考えられるため、十分強力な音場内では固有音響インピーダンスが無視できないほど変化すると予想できる。つまり、空気中に存在する強力音場の領域は空気とは異なる媒質のように振る舞い、そこへの入射波を反射させることが期待できる。似た現象として、音波による媒質の密度変化が光の屈折率を変化させることは Raman-Nath 回折などで知られている。<sup>4)</sup>

近年、大出力の超音波を効率良く空中に発射する技術の開発が進められ、6000Paの超音波音源が報告されている。<sup>5)</sup>一例として、1気圧15°Cの空気中に存在する音圧振幅6000Paの強力音場への入射波を考察してみる。音波が存在しない静圧状態での空気の密度を $\rho_0 = 1.22\text{kg}/\text{m}^3$ 、音速を $c_0 = 340\text{m}/\text{s}$ とする。強力音場の音圧に依存して変動する密度と音速を(4)、(5)式より求め、そこから固有音響インピーダンスの変化を計算する。ここで、静圧状態の媒質を進行していた音波が局所的に存在する強力音場に対して垂直入射することを考えると、(1)式より反射率が概算できる。音圧が最小・最大になる瞬間の計算を下表に示す。音圧が最大の瞬間(換言して、密な状態)にちょうど入射した音波は5%程自端反射する。音圧が最小の瞬間(換言して、疎な状態)に入射した音波は5%程固定端反射を起こす。また、ちょうど静圧状態になっている音場へ入射した音波は反射率0%で完全に透過する。つまり、強力音場はその音圧変化に連動して周期的に反射率が変動する空間であることがわかる。

	最小	静圧	最大
音圧[Pa]	-6000	0.00	6000
密度[kg/m <sup>3</sup> ]	1.15	1.22	1.30
音速[m/s]	326	340	354
固有音響インピーダンス[kg/sm <sup>2</sup> ]	375	416	460
反射率[%]	-5.21	0.00	4.95

## 4. シミュレーション

有限差分法を用いて3次元空間の波動方程式を計算し、強力音場が入射波を反射させることを予測する。強力な音波に関する計算を行う場合、非線形の波動方程式を使用することが好ましいが、本研究では計算を簡略化し、線形の波動方程式に非線形の影響を補正する独自の方法で計算を行う。なお、媒質による音波のエネルギー損失はないものとする。計算は $x, y, z$ 軸から成る三次元直交座標系を対象に行い、入射波の進行方向が $z$ 軸方向になるように音源を設置する。計算結果は $xz$ 平面についてヒートマップで可視化して図として示す。

### 4.1 シミュレーションの安定性

波動のシミュレーションで計算が発散しないためには、「情報が伝播する速度」が「実際の現象での音速」よりも速い必要があり、具体的な条件はフォン・ノイマンの安定性解析より導かれる。満たすべき条件は(6)式であり、以降のシミュレーションでは安定性を $\alpha$ で評価する。

$$\alpha = c\Delta t \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{\frac{1}{2}} \leq 1 \quad (6)$$

媒質の音速: $c$ [m/s]

離散格子の時間幅: $\Delta t$ [s]

離散格子の空間幅: $\Delta x$ [m],  $\Delta y$ [m],  $\Delta z$ [m]

### 4.2 シミュレーション手順

本研究のすべてのシミュレーションに共通する手順を以下に示す。

#### ① 強力音場の計算

均一媒質中に任意の音源を設定し、音源から発射される音波が作る音場を計算する。このとき使用する波動方程式では音速を定数 $c_0$ とする。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_0^2 \nabla^2 u \quad (7)$$

媒質内の微小体積の変位: $u(x, y, z, t)$ [m] 時間: $t$ [s]

媒質の静音時の音速: $c_0$ [m/s]

#### ② 強力音場が媒質に与える影響の計算

①で計算した強力音場が媒質の音速へ与える影響を(5)式を利用して計算する。(5)式において必要な音圧[Pa]は、(7)式を解くことで得られる変位 $u$ と比例しているため、任意の比例定数 $k$ を用いて与える。さらに密度と音速の定数もまとめて $k'$ とし、 $k'$ のみで強力音場が音速へ与える影響をコントロールする。

$$c = c_0 + \frac{ku}{\rho_0 c_0} = c_0 + k'u \quad (8)$$

強力音場の影響を適用した媒質の音速: $c(x, y, z, t)$ [m/s]

媒質内の微小体積の変位: $u(x, y, z, t)$ [m]

$k'$ は0以上の実数の範囲で設定できるが、安定性の条件よりその値に上限がある。 $k'$ を大きくするにつれ、強力音場の影響による音速変化が顕著になり、ある値以上で安定性の条件を満たさなくなる。

なお、強力音場が媒質密度へ与える影響は、(5)式の導出で考慮されている。

#### ③ 入射波の計算

強力音場の影響による音速変化を適用した媒質中に、入射波の音源を設置

し、この音源から発射される音波の伝播を計算する。このとき使用する波動

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u \quad (9)$$

媒質内の微小体積の変位: $u(x, y, z, t)$ [m]

強力音場の影響を適用した媒質の音速: $c(x, y, z, t)$ [m/s]

方程式は、(8)式の音速が代入されており、これにより強力音場の影響が反映される。

### 4.3 プログラミング

上で述べたシミュレーションを Python で実装した。有限差分法では計算する空間を離散格子系として扱うため、どの程度の幅で離散化するかが重要である。細かい幅で離散化するほど計算は具体的になるが、計算量が膨大になってしまう。実際のシミュレーションでは 100 億個から 500 億個程の格子点数になり、これはメモリサイズでは 70GB から 350GB 程度である。本研究の実行環境ではシステムメモリが 32GB であるため、それを超える配列は扱えない。そこで、メモリマップ化した全体の配列をハードディスクに保存し、小さなセグメントごとにメモリ上に展開して計算を行い、これを繰り返すことで解決した。

### 4.4 強力な定在波が成す音場への入射

向かい合わせた二つのスピーカーを用いて定在波を形成し、これが作る音場を強力音場とする(図 1)。実際の実験で再現することを考慮し、強力音場の周波数を 40kHz とした。40kHz の超音波振動子の入手性が高いからである。強力音場に対して垂直にインパルスを入射させた結果を図 2(a)に示す。比較のため、強力音場を放出していない場合の結果を図 2(b)に示す。シミュレーショ

ンの安定性について、 $\alpha = 0.25 \leq 1$ であり条件を満たしている。

(a)と(b)を比較すると、強力音場へ入射したときのみ反射波が確認できる。ここで、入射波はその進行方向に平行な軸で線対称であり、この対称の軸上の変位をグラフにすると結果がわかりやすい(図 3)。強力音場の領域へ入射したことで、入射波の進行方向と逆側に反射波が出現し、透過波の振幅が減少している。



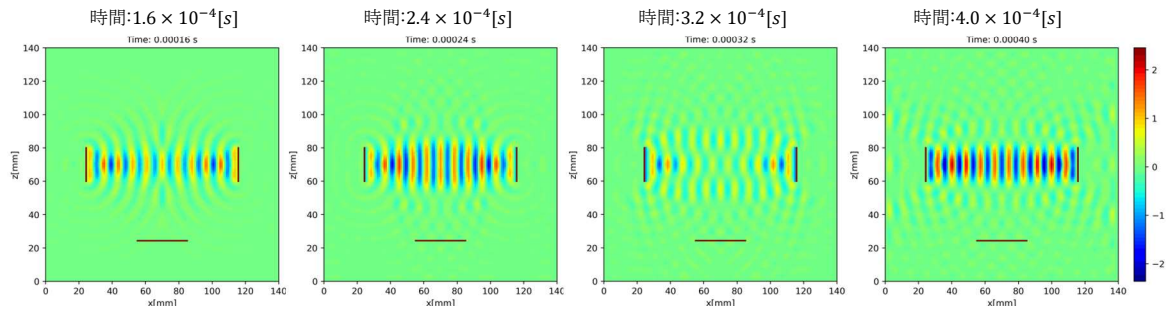
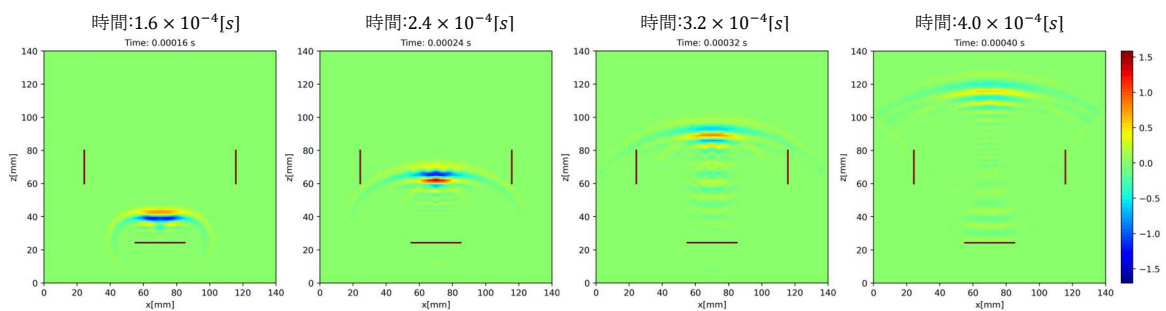


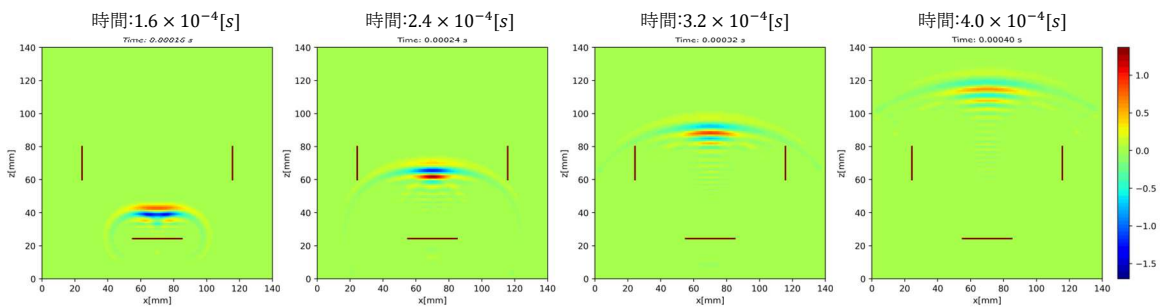
図1 強力な定在波が作る音場

向かい合わせた二つのスピーカーにより 20mm 程度の幅を持つ定在波が形成されている。



(a)強力音場を放出している場合

図の中に強力音場は描画していないが、媒質には強力音場による音速変化が適用されている。強力音場に対してインパルスを垂直入射させたところ、その進行方向と逆側に反射波が発生していることがわかる。



(b)強力音場を放出していない場合

図2 強力音場による反射を調べるためのシミュレーション比較

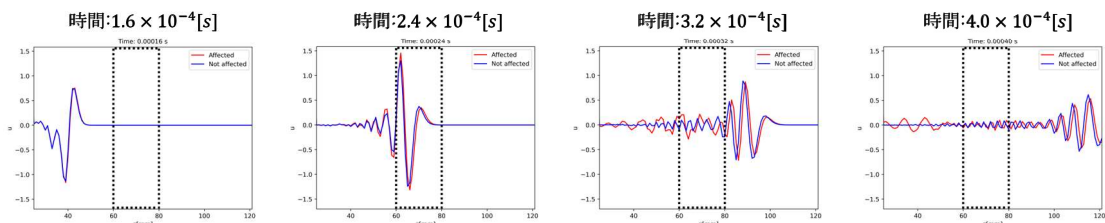


図3 波形グラフによる強力音場の影響比較

図2における $x=70$ の直線上(入射波の対称の軸上)の変位変化をグラフにした。横軸が $z$ 軸方向の距離で、縦軸が変位である。赤色の線が強力音場の影響を受けている場合で、青色の線が強力音場の影響を受けていない場合である。強力音場の領域を点線で図中に示した。グラフより、強力音場の影響で反射波が発生し、透過波の振幅が減少していることがわかる。

#### 4.5 焦点化された強力音場への入射

シミュレーション結果を実験で再現するとき、十分強力な音場を実際に形成する必要がある。シミュレーションにおいては自由に音場の強度を設定できるが、実際は一つの振動子が出力できる音圧に限界がある。そのため、複数の振動子から発射される音波を重ね合わせることで強度を高める必要がある。さまざまな振動子の配置が考えられるが、発射される音波が一つの焦点へ集まるように配置すると効率的である。ここでは、中心に焦点を形成するように半球状に振動子を並べたモデルを扱う(図4)。半球の直径は60mmである。

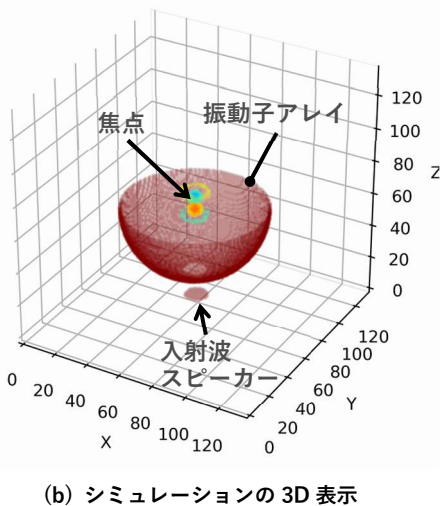
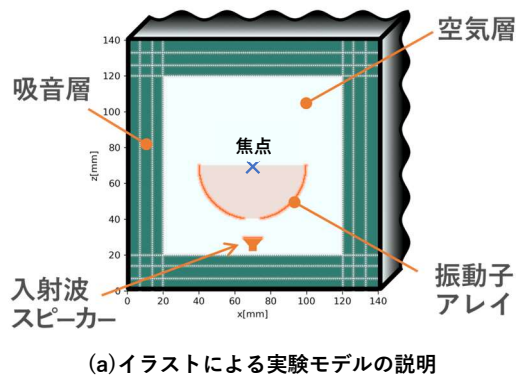


図4 実験のシミュレーションモデル

半球状に並べられた振動子からは42kHzの超音波が発射され、これが作る焦点を強力音場とする。半球状の振動子アレイの底には直径10mmの穴があり、入射波が通過できるようになっている。実際の実験では

FFTを用いて強力音場と入射波を分離して結果を解析するため、強力音場と入射波は異なる周波数でなければならない。そこで入射波は25kHzの正弦波とした。

振動子アレイが形成する強力音場を図5に示す。6mm程度の幅を持つ焦点が形成されていることがわかる。強力音場の有無による入射波の変化を図6に示す。シミュレーションの安定性について、 $\alpha = 0.068 \leq 1$ であり条件を十分満たしている。

実際の実験ではLDV(レーザードップラー振動計)を用いて音波の強度分布を測定する。LDVはレーザー光が音場を通過するときに受ける屈折率変化を測定することができ、この屈折率変化が音場の音圧に比例していることから音圧強度を得ることができる。<sup>6)</sup>このとき得られる音場の音圧強度は、レーザー光路上の音圧の積分値の時間微分値である。<sup>7)</sup>そこで、シミュレーション結果の音圧強度をレーザー光路方向(y軸)に沿って合計することで実験結果に対応させた(図7)。図7(a)と(b)の違いを分かりやすくするために(a)から(b)を減算した(図8)。これを見ると、強力音場を透過した入射波の強度が減少し(領域A)、強力音場の外で強度が増加していることがわかる(領域B)。このことから、強力音場が存在する領域を境界として反射が起こり、反射した音波が強力音場の外に移動したと考えられる。

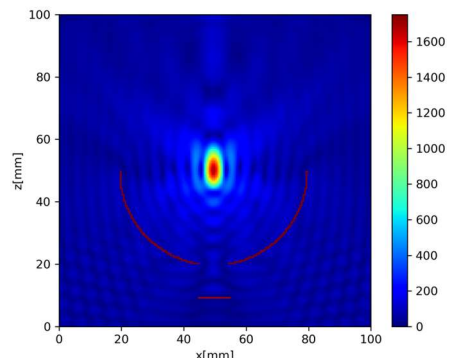


図5 振動子アレイが形成する強力音場

変位を1周期分の時間積分することで得られる強度分布を表示している。

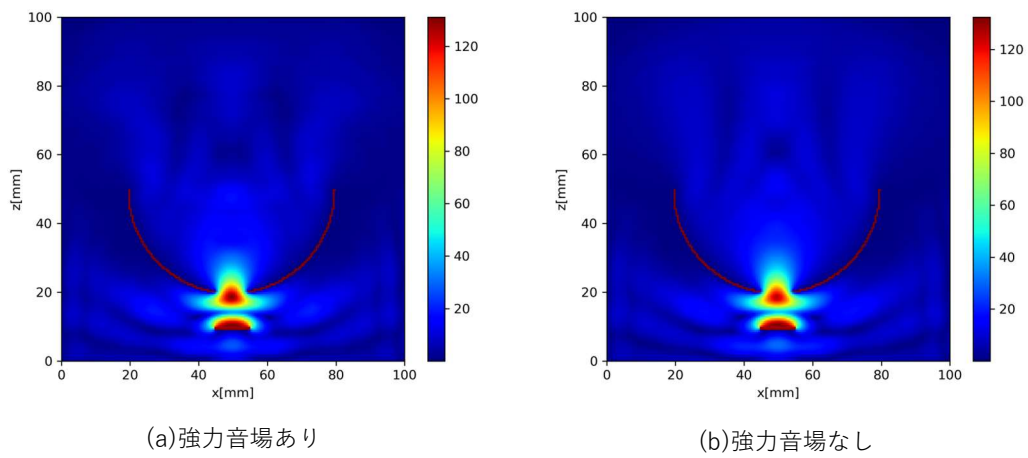


図 6 入射波の強度分布

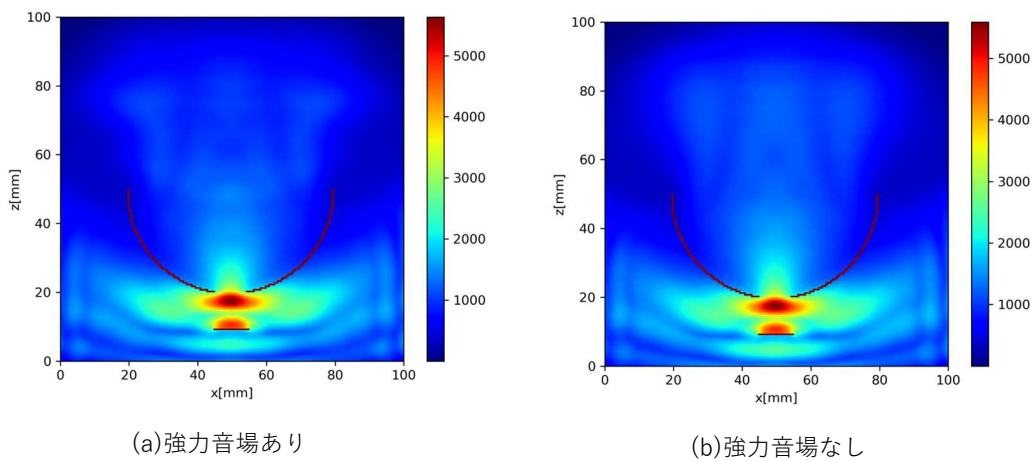


図 7 入射波の強度分布のレーザー光路上積分

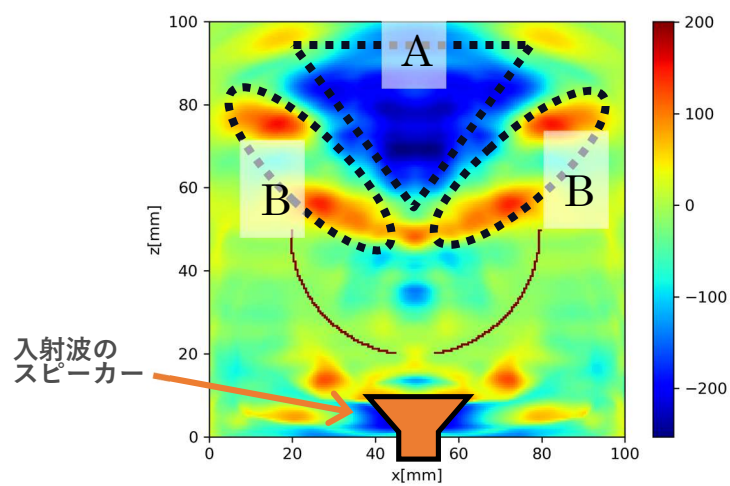


図 8 強力音場による入射波の変化量

## 5. 実験

シミュレーション 4.5 の結果を検証するために、シミュレーションモデルと同じ実験系を用意する(図 9)。複数の超音波振動子で強力な焦点を形成し、そこへ別の音波を入射させる。このとき入射波が強力音場から受けた影響を LDV で測定する。LDV は音場を乱さずに測定ができる点が優れている。シミュレーションでは半球状の振動子アレイ内部の様子を調べることができたが、LDV はレーザー光が通過できる部分しか測定できないので、測定範囲は振動子アレイの上部となる。

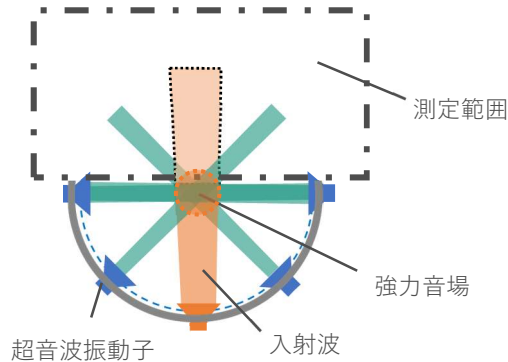
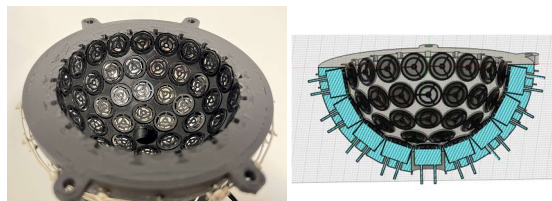


図 9 実験系の概略図

強力音場を形成するための半球状の超音波アレイを 3D プリンターで作成した(図 10)。半球の直径は 60mm である。超音波振動子は SPL 社製の UT1007-Z325R(中心周波数 42kHz)を使用した。



(a)実際の写真

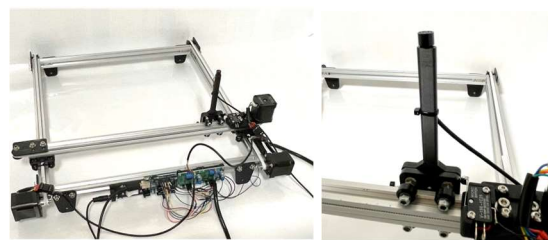
(b)断面図

図 10 製作した振動子アレイ

### 5.1 焦点が形成されることの確認

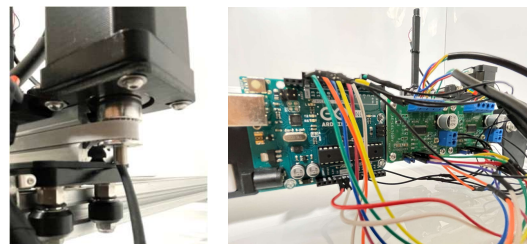
実験の前に、自作した振動子アレイが焦点を形成することを確認する。焦点は振動子アレイの内部に形成されるため、レーザー光が通過できず、LDV を測定に使用できない。そこで、マイクロホントラバースを用いて測定を行った。製作したマイクロホントラバースを図 11 に示す。ステッピングモ

ーターでマイクロホンを動かすことで二次元平面の測定ができる。x軸とy軸のモーターが個別のモータードライバで制御されており、マイコンとデジチェーン接続されている。また、マイクロホンからの信号はオシロスコープで読み取られる。オシロスコープとマイコンは Python に接続されており、自動測定ができる。測定システムの構成図を図 12 に示す。



(a)全体写真

(b)マイクロホン



(c)モーター

(d)制御部分

図 11 製作したマイクロホントラバース

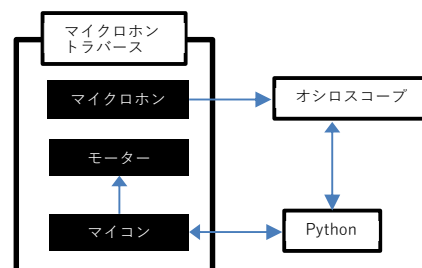


図 12 測定システムの構成図

マイクロホントラバースを用いて測定した音圧強度分布を図 13 に示す。直径 6mm 程度の焦点が形成されていることを確認できる。焦点の音圧を計測用マイクロホンで測定したところ、16400Pa 程度であった(178dB)。マイクロホンを焦点に近づけた影響で音場が乱れるため参考値であるが、強力音場が形成されていることがわかる。

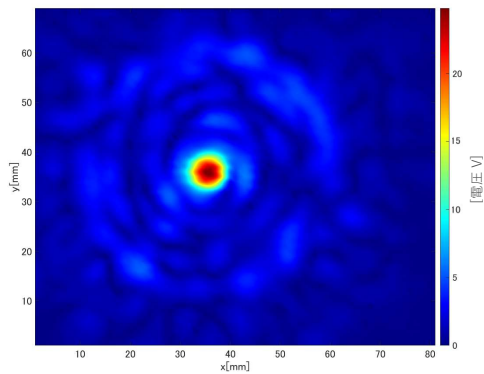


図 13 超音波アレイによる音場の強度分布

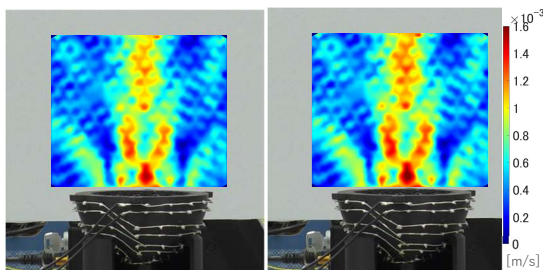
## 5.2 実験結果

LDV をデジタルネイチャー開発研究センターでお借りし、入射波が強力音場によって受ける影響を測定した(図 14)。



図 14 実験風景

入射波の周波数は 25kHz である。測定データを FFT し、入射波のみの強度分布を図 15 に示す。図 15(a)と(b)の違いを分かりやすくするために、(a)から(b)を減算した(図 16)。図 16 において、領域 A では音圧が 0dB から 10dB 程度減少し、領域 B では音圧が 0dB から 8dB 程度増加している。これはシミュレーション 4.5 と同様の結果を示して



(a)強力音場あり (b)強力音場なし

図 15 入射波の強度分布

おり、強力音場へ入射した音波が反射したため、領域 A で音圧強度が減少し、その反射波が領域 B へ移動したと考えられる。

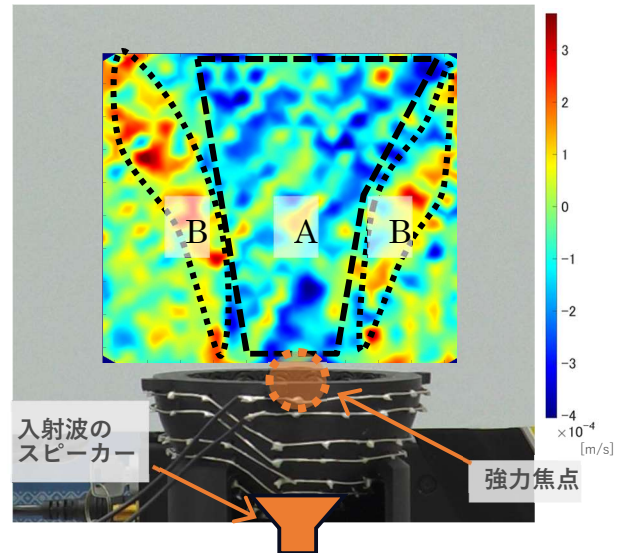


図 16 強力音場による入射波の変化量

## 6. まとめ

本研究では、強力音場がそこへの入射波を反射させる能力を持つことについて検討を行った。初めに、強力な定在波に対してインパルスを入射させるシミュレーションを行ったところ、反射波が発生する結果を得た。そして、焦点化された強力音場に対する入射波について、シミュレーション及び実験の双方で同様の結果が得られ、強力音場による入射波の反射が可能であることが示された。

## 7. 今後の展望

### 7.1 シミュレーションの改良

本研究で行った波動シミュレーションで無視していた条件を新たに組み込むことでシミュレーション結果を実験結果に近づけたい。具体的には、空気の粘性と熱伝導性による音波のエネルギー損失、非線形衝撃波による影響、パラメトリック差音による周波数成分の遷移を計算に適用しようと考えている。また、本論文のシミュレーションは波動方程式を直接差分法を使用して解く方式の FDM(Finite Difference Method) を使用していた。音波の解析でより一般的に使用さ

れている FDTD(Finite Difference Time Domain)法を既に実装しているが使用していない。この手法の方が PML(Perfectly Matched Layer)といった境界条件の開発が発展している。今まで使用してきた手法と FDTD の精度・位相誤差について比較調査していく予定だ。

また、振動子アレイやマイクロホンといった計測装置のオブジェクトをより扱い易くするため、STL 形式のデータの読み込み機能を実装している(図 17)。3D データの表面を再帰的に三角形のサブディビジョンに分割し、スタガードグリッドと呼ばれる格子上の点に離散化するアルゴリズムだ。今後はこれを強力音場発射装置の音響設計に役立てたい。

さらなる展望として、強力音場の非線形効果を摂動法で解析的に推定し、非線形シミュレーションの整合性を確認することを目指したい。

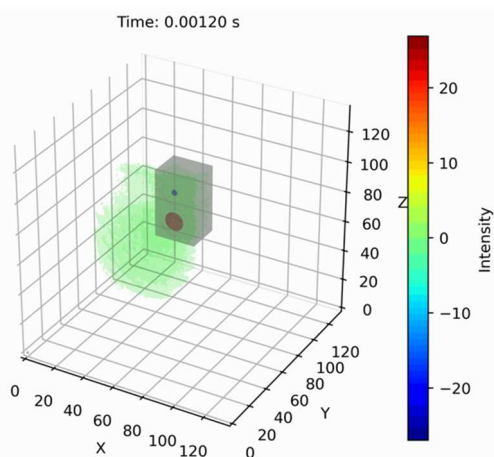


図 17 読み込んだ 3D モデルを用いたシミュレーション

## 7.2 強力音場の強度と反射の関係の検証

強力音場の強度と反射率の関係を具体的に調べることは重要である。そのために、強力音場を形成する超音波振動子の出力を 0 から最大値まで変化させ、それに伴う反射率の変化を調べる実験を行う。そのための予備実験として、強力音場を透過した音波の透過率と強力音場の強度の関係を調べた(図 18)。なお、計測用マイクは立命館大学の西浦教授にお借りした。

残念ながら予備実験の結果では、強力音場の強度と反射率の関係を示すことはできなかった。その原因は、強力音場の音圧が計測用マイクの最大許容音圧を超えてしまい、そもそも測定できないことだった。本研究には音圧の計測が必須なので、高音圧の入力に耐えられるマイクを調達するか自作する予定だ。



図 18 球状の振動子アレイとマイクロホン

## 7.3 強力音場の幾何光学特性の検証

強力音場の音圧や周波数と反射率の関係について具体的な関係式を求めたい。また、本研究では強力音場への垂直入射のみを問題としたが、強力音場への斜め入射について、幾何光学のスネルの法則に相当する関係が得られないか検討したい。

今後の実験のために底が抜けたリング型の音場形成装置を作った(図 19)。半球状の音場形成装置に比べて開放的なので、様々な角度から入射波を通す実験が可能である。



図 19 リング型の音場形成装置への斜め入射

## 7.4 安全性の検証

強力音場による反射技術の安全性について議論する必要がある。強力音場の量子(フォノン)としての安全性や、人間の内部へ透過した際の熱的作用について調べたい。安

全性を明らかにすることができれば、レーザー光を用いた音波操作技術よりも広い場面で使用できる可能性がある。

### 7.5 多重層を持つ強力音場

本研究で行った概算では、6000Paの音波出力で得られる反射率は約5%であり、これはレーザー光を用いた音波操作技術よりもかなり低い値である。強力音場の出力を高めることによる反射率の向上も期待できるが、強力音場を複数重ねた層を持つ構造を利用し、最大出力を上げることなく反射率を改善できないか検討したい。

### 7.6 既存の音響技術への応用

音響浮揚や音響ベッセルビームの分野では、複数の振動子を並べてそれぞれの位相を個別に制御するフェーズドアレイ技術が採用されている。フェーズドアレイによる位相制御に加えて、強力音場による空間の固有音響インピーダンス制御を組み合わせることで、形成できる振動モードを拡張できる可能性がある。そこで、強力音場を用いた空間の固有音響インピーダンス制御によって、形成できる振動モードがどのように変化するか調べたい。

### 7.7 新しい音響技術の開発

強力音場による音波の方向操作を応用することで、空間内に自由に音源を設置できるスピーカーを開発できないか検討したい。

また、強力音場を用いて騒音を反射させることによる新しい防音技術を開発できるかどうか検討したい。強力音場の音圧分布をコントロールすることで、任意の周波数を選択的に反射・透過できる可能性がある。

## 8. 参考文献

- 1) D. S. Kazal, A. J. Reardon and B. M. Cullum, *Appl Spectrosc* **76** [11], 1346 (2022).
- 2) 篠田裕之, *日本音響学会誌* **78巻9号**, 502 (2022).

- 3) 渡辺好章, *応用物理* **76巻7号**, 742 (2007).
- 4) 宮木浩仲 and 渡辺好章, *日本音響学会誌* **56巻2号**, 85 (2000).
- 5) 平野翔一 and 伊藤洋一, *日本大学理工学部 学術講演会論文集* 1007 (2010).
- 6) 滝澤俊和, 齋藤直毅, 小西雅 and 山崎芳男 (早大), *日本音響学会研究発表会講演論文集 春季1*, 595 (2003).
- 7) 石川憲治, 矢田部浩平, 池田雄介 and 及川靖広 (早稲田大学表現工学科), *日本音響学会誌* **72巻7号**, 430 (2016).

## 9. 謝辞

本研究を行うにあたり、サイエンス研究会顧問の藤野智美先生、守本寛治先生、米田隆恒先生にご指導を賜りました。また、同研究会のメンバーやOBには普段から非常に有用なアドバイスをいただきました。また、奈良女子大学の佐藤克成先生には種々貴重なご意見をいただきました。立命館大学の西浦敬信先生、耿毓庭先生には計測用マイクロホンを使用させていただき、研究についての多様なアドバイスをいただきました。筑波大学デジタルネイチャー開発研究センターではLDVを使用させていただき、伏見龍樹先生に装置の使い方やその原理の解説をしていただくなど、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。

# FM音源を搭載した和音の出力可能な電子ピアノの製作

1年A組 森田 湊  
指導教員 守本 寛治

## 1. 要約

本研究の内容は和音の出力が可能な電子ピアノを製作したものである。Arduino, YMF825を用いて、タクトスイッチが押されたときに全音, 半音, 和音出力できるようにプログラムした。

キーワード Arduino YMF825 電子ピアノ 和音

## 2. 研究の背景と目的

私は幼いころからピアノを習っていて、ピアノを演奏することが好きである。しかし、市販の電子ピアノでは演奏した時のクオリティーが低かったり、機能が不十分であると考えたため、自分が演奏しやすいような電子ピアノの製作に取り組んだ。

また、私が利用している理科講義室ではみんなが楽しめるような設備や器具が無いため、そのような道具を作ろうと考えた。

## 3. 研究内容

### 3. 1. 単音の出力

#### (1)プログラム

「Tone 関数」を利用し、周波数によって全音や半音を出力できるようにした。

また、「digitalRead」を利用し、タクトスイッチが押されたときにピンの値を読み取るようにプログラムした。

#### (2)構造

Arduino mega を用いてブレッドボードにピンをさし、タクトスイッチが押されたときにスピーカーから音が出るように製作した。

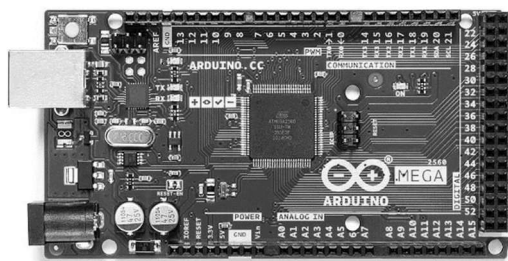


図1 Arduino mega

### 3. 2. 和音の出力

#### (1)プログラム

YMF825 のライブラリを使用し、「pinMode」を利用して2~31番ピンまでを「INPUT」に設定し、「digitalRead」を利用してピンの値を読み取るようにプログラムした。

#### (2)構造

16和音の同時発音可能なYMF825を使用し、3.3V Audio, RST\_N, 5V GND, SCK, MISO, MOSI, SSのピンをArduino megaに接続し、Arduino megaの2~31番ピンをブレッドボードに接続することでタクトスイッチが押されたときに音が出るようになり、また複数のタクトスイッチを同時に押すことで和音出力できるようにした。



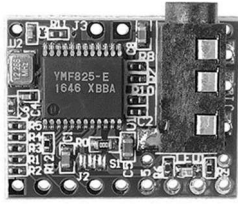


図2 FM音源のYMF825



図3 フォトリフレクタ

### 3. 3. 鍵盤の製作

3Dプリンターを用いて、黒のPLAと白のABSの素材を使い、電子ピアノの鍵盤部分を製作した。また、製作した鍵盤をタクトスイッチにグルーガンで取り付け、鍵盤を押したときに音が出るようにした。

### 4. 考察

まだ機能は少ないが、全音、半音、和音が出力できるピアノの製作に成功した。

### 5. 今後の展望

#### 5. 1. バッテリーの搭載

USBケーブルを繋いだままでは持ち運びなどが自由に行えないため使い勝手が悪くなってしまう。そのため、今後の研究で、バッテリーを搭載し、持ち運びができるようにした。

#### 5. 2. ビブラート機能の追加

市販の電子ピアノでは、ただ音を伸ばすことしかできないため演奏のクオリティーが低くなってしまう。そこで、ビブラート機能を加えると、演奏の幅が広がる。ビブラート機能を搭載するためには、フォトリフレクタを用いて、タクトスイッチを押すと同時にフォトリフレクタに触れると、ビブラートができるようにしようと考えている。

### 5. 3. 押した鍵盤が光る機能

押した鍵盤が光ることで、押した鍵盤の位置が分かることにより自分が何を演奏しているのかがわかりやすくなる。そうするためにタクトスイッチの下にLEDを搭載しようと考えている。

### 5. 4. 鍵盤部分の拡張

今の鍵盤の形では少し演奏がしにくいので、3Dプリンターで形を整えて演奏しやすい形にしたい。

### 5. 5. 音を振動に変える機能

市販の電子ピアノでは、鍵盤を押したときに音しか鳴らないが、鍵盤を押したときに音を振動に変えることができれば、耳が聞こえない人でも音楽を感じることができ、様々な人が音楽を楽しめると思う。

### 6. 参考文献

FM音源 YMF825 を使ってみる；

[https://umek.topaz.ne.jp/mameduino/ymf825\\_assemble/](https://umek.topaz.ne.jp/mameduino/ymf825_assemble/)

YMF825 サンプル[Github]；

[https://github.com/hasebems/YMF825\\_sample](https://github.com/hasebems/YMF825_sample)

### 7. 謝辞

今回の研究を行うにあたり、顧問の守本先生にご指導を賜りました。また同研究会の先輩方に多くの助言をいただきました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

# QRコードによる開け閉めが可能なスマートロックの作成

1年B組 水野 太陽

指導教員 守本 寛治

## 1. 要約

本研究の内容は、QRコードを使った開け閉めが可能なスマートロックを作成したものである。Pythonを用いて、QRコードを読み取ることで、LINEに入退室を通知するシステムを開発した。

キーワード Python OpenCV スマートロック 入退室管理

## 2. 研究の背景と目的

私は物理班で活動する際に、理科講義室を利用している。理科講義室は、高額な機材や、研究のプロトタイプなどがおいてあり、授業がある平日は、いつでも鍵が空いている状態で、誰でも入ることができる。そのため、安全上の問題があると考えた。

また、誰が理科講義室にいるかを記録することによって、物品の管理がしやすくなると考えたので、課題解決のため、スマートロックを開発することにした。

## 3. システム作成までの過程

### 3.1 QRコードリーダーの作成

パソコンのOpenCVを利用しQRコードが検出された場合、周りに縁を描き、文字を表示するプログラムを作成した(図

1)。



図1 QRコードリーダー

(QRコードを読み込ませてSSHと表示させている)

### 3.2 文字列の検証をし、サーボモーターを動かす

Raspberry Piを使い、QRコードから検出された文字列が、パスワードと一致しているかを検証し、サーボモーターを動かすことができるようにした。

参照：コード①

mydataに検出したデータをUTF-8エンコーディングでデコードした文字列を代入し、その文字列が、“text”尚且つ、“t”という変数が1だったらサーボモーターを180度回転させて開錠、“text”尚且つ、“t”という変数が0だったらサーボモーターを90度回転させて施錠する。

まず、最初にパスワードが鍵と一致しているかを確認、次に変数の記録から、過去に開錠もしくは、施錠が行われていたかを判断し、それによって開錠状態から施錠状態にしたいのか、それとも施錠状態から

開錠状態にしたいのかを判断し、QR コード一つで、ロック操作をできるようにした。

QR コードを認識することができる時間を認識してから 3 秒間にすることで連続した QR コードの検出が起き、サーボモーターの動きが不安定になるのを防止した。

※あらかじめサーボモーターを制御するライブラリはインストール済み、コード①はプログラムの一部である。

```
import pigpio
import time as tm
mydata = barcode.data.decode('utf-8')
if mydata == "text" and t == 1:
    set_angle(180)
    tm.sleep(3)
    t = 0
elif mydata == "text" and t == 0:
    set_angle(90)
    tm.sleep(3)
    t = 1
```

コード① サーボモーターを動かす



図2 鍵をかけるレバーのところにはめるアタッチメント

### 3.2.1 サーボモータによるドアの開けしめについて

理科講義室のドアの鍵のところに図2のようなアタッチメントをつけることで、サーボモーターによる鍵のロック操作がスムーズに行われるようにした。サーボモーターの羽を図2の針金の部分に引っ掛けて設置することでドアのロック操作ができるようにした。

## 3.3 LINE による入退室の管理

### 3.3.1 システムの概要

LINE による入退室の管理システムを作成した。QR コードが読み込まれた際に事前に登録しておいた人のスマホに時刻と画像が通知される仕組みである。ここでは、LINE Notify というサービスを利用することにした。

### 3.3.2 LINE Notify とは

LINE Notify とは LINE が提供するサービスの一つで、設定を行うことで、ユーザーが通知を受け取ることができるサービスである。基本的に、送信しかすることができないため、スマホから LINE を使用したロック操作ができないが、簡単に実装することができるという点で、LINE Notify を利用することにした。

### 3.3.3 LINE Notify を実装する

3.2 で作成した、サーボモーターを動かすプログラムに LINE Notify の通知を送るプログラムを組み込んだ。

参照：コード②

このプログラムは、あらかじめ登録しておいた LINE Notify の URL に取得した日付、分とともに画像付きメッセージを送るプログラムである。コード②は、鍵が開けられた時に実行するプログラムなので、閉められた時も同様に通知するようにした。  
※token のところの “ ” の空白は、登録情報によって違う、個人情報のため、開けている。

```
import requests
import datetime

time = datetime.datetime.today()
time = time.replace(microsecond = 0)
url = "https://notify-
api.line.me/api/notify"
token = ""
headers = {"Authorization": "Bearer
" + token}
message = "鍵が開けられました。時刻は、" + str(time) + "です。"
payload = {"message": message}
files = {"imageFile":
open("nowphoto.jpg", "rb")}
r = requests.post(url, headers,
params=payload, files=files)
```

コード②LINE Notify で通知

### 3.4 スマートロックの外観の作成

作った状態のままでは、設置しにくかったり、見た目が悪かったりするので、スマ

ートロックのカバーを 3D プリンターで作成した (図 3, 4)。

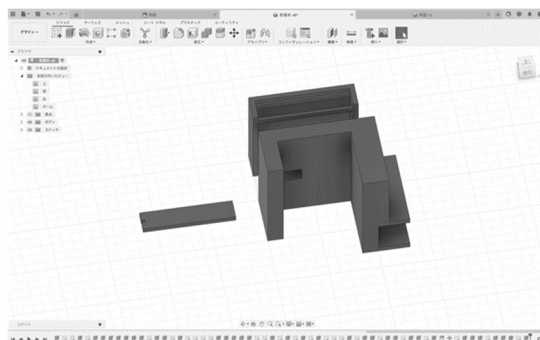


図 3 モデルの 3D データ

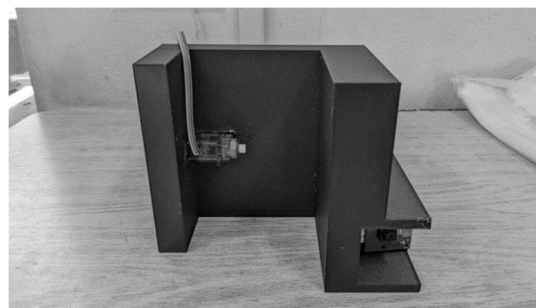


図 4 実際にセットした時の様子

## 4.結果

実際に設置して、試してみたものを図 5、図 6、図 7 に示す。今回の研究により QR コードによるロック操作ができるようになった。



図 5 LINE Notify による通知

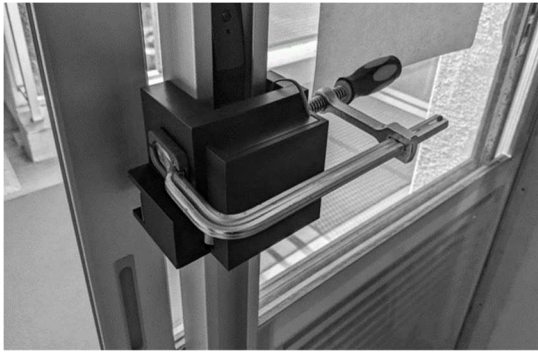


図6 実際に設置した様子



図7 正面から見た様子

## 5. 今後の展望

今回の研究では、LINE Notify を使ってスマホへの入退室の通知機能を実装したが、スマホによるロック操作や、QR コードを作成し、ユーザーを追加することなどができないため、今後は、スマホからの操作を充実させていけるようにしたい。

また、図6からもわかるようにドアに設置するときに、今はクランプを使っているため、見た目が悪くなってしまっているため、設置方法を改良していきたい。

今回の研究で、QR コードを使って鍵を開けるということに成功した。今回は、鍵として利用することで、ユーザーの登録を複数可能にするドアを作ったが、次の研究では、QR コードを使った技術を発展させ

て、QR コードを壁や机に貼ることで家電製品や、機械のコントロールを目指す。家電製品の現状としては、ボタンを内蔵したり、スマートホームデバイスなどを装着することで、スマートフォンのアプリからの操作や、手動での操作を実現させているが、QR コードをスイッチとして、画像認識から、QR コードへの当たり判定を調べ、ボタンやスマートホームデバイスなどを装着しなくても、QR コード自体がデータを記録しているボタンの役割になるものを作成したい。

## 6. 参考文献

[1]サーボモーターを制御する方法

<https://sozorablog.com/servo/>

[2]OpenCV

<https://opencv.org/>

[3]今日の日付や時刻を python で取得する

<https://atmarkit.itmedia.co.jp/ait/articles/2111/02/news019.html>

[4]LINE Notify

<https://notify-bot.line.me/ja/>

## 7. 謝辞

今回の研究を行うにあたり、物理班顧問の守本先生、物理班の先輩方にご指導を賜りました。この場を借りて御礼申し上げます。

# 二輪で駆動する球体型ロボットの制作

1年 B組 松野 一輝

指導教員 守本 寛治

## 1. 要約

本研究では左右の二輪で駆動する動力内蔵型の球体ロボットを制作する。Arduinoを使って内部から動力を加えて自動で転がりながら前後、方向転換の動きをするようにプログラムした。

## 2. 研究の背景と目的

私は、衝撃に耐えられる構造のロボットを作ろうと考えていた。周りからどんな攻撃を受けても耐えられるようにすることであらゆる環境に適応することができるからだ。球体ロボットは機体の全方向が耐久性の高い球で覆われているため衝撃に強いと考えた。そのため私は球体ロボットを製作した。

## 3. 制作の過程について

### 3-1. 試作品1

#### (1) 動作

球体の中で転がる二輪の車を作った。左右にタイヤを付けて全身



のタイヤを正回転させ、後退する時は両方のタイヤを逆回転させ、方向転換する時は双方のタイヤを別の方向に回転させて動く。試運転として前進、右に方向転換、後退、左に方向転換、前進、の順番に動かした。

#### (2) 機体の構造

Arduino UnoとL298Nモータードライバ

ーを木の板にビニルテープで接着してその裏にタイヤ付きギアボックスを取り付け、Arduino Unoの上に小型ブレットボードを取り付け配線した。

#### (3) 改善点

各部品同士の接着を全てビニルテープで行ったため耐久性が低かった。また、機体が軽すぎたために球体が転がらず、機体が球体の中でひっくり返ってしまった。そのため、動くことが出来なかった。

### 3-2. 試作品2

#### (1) 動作

試作品1と同じ。

#### (2) 機体の構造

部品同士の接着をグルーガンで行った。また、3階構造にして下からモーター、バッテリー、制御装置を取り付け、機体を大きくした。さらに機体の下部に重りを取り付けた。

#### (3) 改善点

機体の中が整理されて配線が組みやすくなり、重りを付けたことで動くことができた。しかし、動いたときにひっくり返ってしまった。さらに、タイヤが小さいため、球体を動かすほどの馬力が出なかった。



### 3-3. 試作品3

#### (1) 動作

試作品1と同じ。

#### (2) 機体の構造

タイヤを大きくして、馬力を上げた。また、機体がひっくり返らないように、機体の上部にローラーを付けた。

#### (3) 改善点

プログラム通り動作したが、タイヤが大きすぎたため、方向転換の動きが困難になっていた。さら



に、前進、あるいは後退から方向転換のプログラムに移るとき、球体全体が大きく揺れて、意図しない動きをすることがあった。

### 3-4. 試作品4

#### (1) 動作

試作品1のプログラムに、動きが変わる時に1秒待つプログラムを加えた。

#### (2) 機体の構造

タイヤを少し小さくした。そして揺れを抑えるために重りの重さを重くした。

#### (3) 改善点

揺れも少なく、しっかりとプログラム通



り動作することができた。

### 4. 結果

二輪で駆動する球体ロボットを製作することができた。

### 5. 今後の展望

今回製作した球体ロボットは、動くことはできるが、坂道や段差を登るなどが難しい。そのため、将来的には段差なども超えられるようにしたい。また、今は自動制御で動いているが、無線通信モジュールを使って、リモコン操作を行いたい。

### 6. 今後の展望

[1] 【Arduino入門編②】 ArduinoでDCモーターを制御する。【L298Nデュアルモータードライバ】

<https://burariweb.info/electronic-work/arduino-learning/arduino-motor-driver-l298n.html>

[2] まるでBB-8!?球体ロボットの作り方【3Dプリンター】

<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=ogRtvZYXVos>

### 7. 謝辞

本研究においてご指導して下さった顧問の守本先生、物理班の先輩方に感謝します。本当にありがとうございました。

# 折り紙における無理数の折り方

5年C組 坂本 悠  
指導教員 石賀 勇樹

## 1. 概要

折り紙を用いて円周率を折る方法について2通り述べていく。

## 2. 研究目的

以前の研究で $\sqrt{2} \sim \sqrt{8}$ を折り紙で折る研究を行っており、他の無理数も折ることが可能なのではないかと考え、円周率 $\pi$ を折ろうと考えた。

## 3. 研究内容

折り紙上で円周率の長さを表すために、円周率を式で表し、 $n$ の式で表し、円周率の近似値を求める。

また、式の導出には、直径1の円に内接する正多角形の周の長さを用いた方法と、同様の円に対して外接する正多角形の周の長さを用いた方法の二つを使用した。

### 3-1. 円に内接している正多角形の周の長さをを用いた場合の式の導出

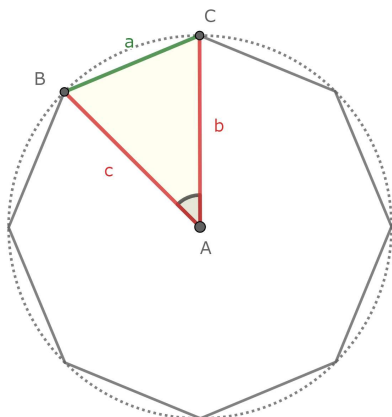


図1

## 定理1

直径1の円において、その円に内接する正 $n$ 角形の周の長さを $L$ とすると、

$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} n \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{n}\right)}$$

が成立する。

## 定理1の証明)

図1の $\triangle ABC$ に余弦定理を用いると、

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \frac{2\pi}{n}$$

$$b = \frac{1}{2}, \quad c = \frac{1}{2}$$

より

$$a^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} - 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \cos \frac{2\pi}{n}$$

$$= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \cos \frac{2\pi}{n} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{n} \right)$$

$a > 0$ より

$$a = \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{n} \right)}$$

よって

$$L = n \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{n} \right)}$$



$N = \frac{2\pi}{n}$ とすると、三角関数の極限の公式

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin}{n} = 1$  より、

$$\begin{aligned} & \lim_{n \rightarrow \infty} n \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{n}\right)} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \sqrt{\frac{(1 - \cos \frac{2\pi}{n})}{2}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \sqrt{\frac{(1 - \cos \frac{2\pi}{n}) \cdot (1 + \cos \frac{2\pi}{n})}{2 \cdot (1 + \cos \frac{2\pi}{n})}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \sqrt{\frac{(1^2 - \cos^2 \frac{2\pi}{n})}{2(1 + \cos \frac{2\pi}{n})}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \sqrt{\frac{\sin^2 \frac{2\pi}{n}}{2(1 + \cos \frac{2\pi}{n})}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \sin \frac{2\pi}{n} \sqrt{\frac{1}{2(1 + \cos \frac{2\pi}{n})}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \sin \frac{2\pi}{n} \sqrt{\frac{1}{2 + 2 \cos \frac{2\pi}{n}}} \\ &= \lim_{N \rightarrow 0} \frac{\pi}{2N} \cdot \sin N \sqrt{\frac{1}{2 + 2 \cos N}} \\ &= \lim_{N \rightarrow 0} \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sin N}{N} \sqrt{\frac{1}{2 + 2 \cos N}} \\ &= 2\pi \sqrt{\frac{1}{4}} \\ &= 2\pi \cdot \frac{1}{2} \\ &= \pi \end{aligned}$$

以上より、

$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} n \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{n}\right)}$$

が成り立つ。 ■

### 3-2. 円に外接している正多角形の周の長さを用いた場合の式の導出

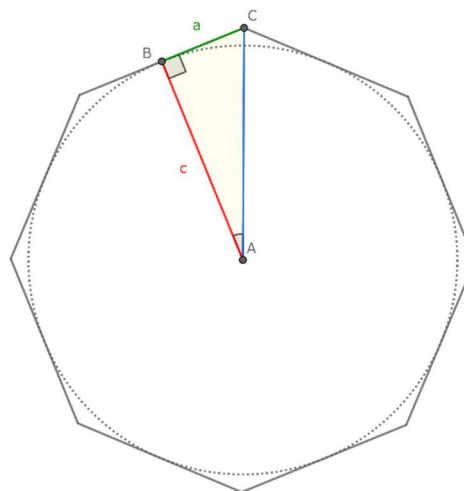


図 2

#### 定理 2

直径 1 の円において、その円に外接する正  $n$  角形の周の長さを  $L$  とすると、

$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot \tan \frac{\pi}{n}$$

が成立する。

#### 定理 2 の証明)

図 2 の  $\triangle ABC$  について、

$$a = \frac{1}{2} \cdot \tan \frac{\pi}{n}$$

$$L = n \cdot 2 \left( \frac{1}{2} \cdot \tan \frac{\pi}{n} \right)$$

$$L = n \cdot \tan \frac{\pi}{n}$$

$N = \frac{\pi}{n}$  とすると、三角関数の極限の公式

$$\lim_{n \rightarrow 0} \frac{\tan n}{n} = 1 \text{ より}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot \tan \frac{\pi}{n}$$

$$\lim_{N \rightarrow 0} \frac{\pi}{N} \cdot \tan N$$

$$= \lim_{N \rightarrow 0} \pi \cdot \frac{\tan N}{N}$$

$$= \pi$$

以上より、

$$\pi = \lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot \tan \frac{\pi}{n}$$

が成立する。■

### 3-3. 折り紙でのそれぞれの式の表し方

前述にて導出した式を折り紙で表す。

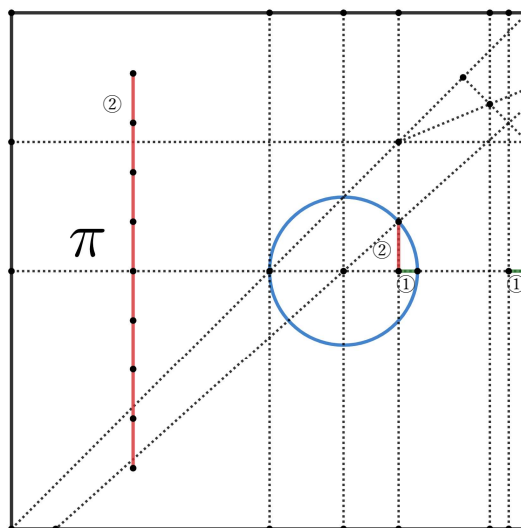
その際での折る上の条件は以下の4つとする

- A)  $N$  に  $2^n$  を代入する
- B) 折り紙公理で示されている操作である
- C) コンパス、分度器等の道具を使用しない
- D) 折り紙の一边を4とする

Aの条件において $N$ に代入する値として $2^n$ に限定するのは、どちらの式においても角度を $N$ 等分することになり、その際折り紙を用いた角の $2^n$ は操作が行いやすいためである。

3-1にて導出した式の折り図

$$(N = 2^3 = 8)$$



①の線分の長さは

$$\frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{N} \right)$$

のため、②の線分の長さは  
方べきの定理を用いると

$$\sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{N} \right)}$$

②の線分を $N$ 倍したものが

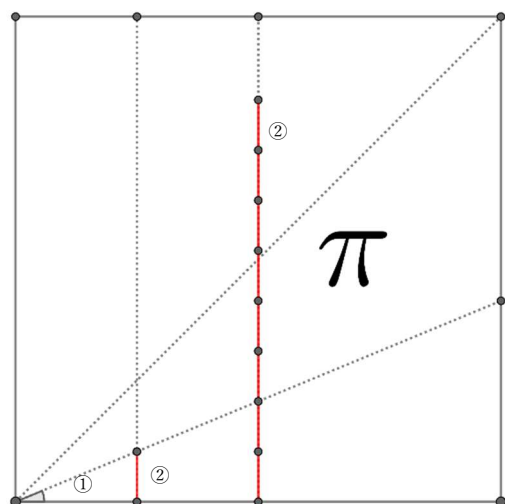
$$N \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{N} \right)}$$

となる。

この時 $N$ の値を大きくしていくほど $\pi$ に近づく。

3-2にて導出した式の折り図

$$(N = 2^3 = 8)$$



①の角度の大きさは

$$\frac{\pi}{N}$$

のため

②の線分の長さは

$$\tan \frac{\pi}{N}$$

②の線分を $N$ 倍したものが

$$N \tan \frac{\pi}{N}$$

となる。

この時 $N$ の値を大きくしていくほど $\pi$ に近づく。

#### 4. 考察

今回は円周率の近似値を折ることが出来た。しかし、 $\sqrt{2} \sim \sqrt{8}$ のように正確な値を折ることはできなかった。これについては、 $\pi$ が超越数であることが関係していると考えられる。

#### 5. 今後の展望

今後は他の無理数（ネイピア数，対数等）の折り方を考えていきたい。

また、超越数とそれ以外の数について折り紙で折ることにより生じる違いを考えていきたい。

#### 6. 参考文献

西村 保三(2014). 「コンパスと折り紙による作図公理」. 『福井大学教育地域科学部紀要』. 4. 67-79

# コラッツ予想の分析と拡張

5年B組 高橋 侑里

5年C組 石川 諒

指導教諭 川口 慎二

## 1. 概要

$21 \times 2^x$  ( $x \in \mathbb{Z}$ ,  $x \geq 0$ ) について、コラッツ予想が成立することを証明した。また、コラッツ写像の  $n$  が奇数のときの条件を  $g(n) = 3n + a$  ( $a \in \mathbb{N}$ ) に変更しても、コラッツ予想が成り立つことを、python を用いて検証した。

## 2. 目的と背景

数学の未解決問題を調べている中で、コラッツ予想というものがあるのを知った。そして、四則演算のみで定式化されているという点や一見単純そうに見えるのに 80 年間も未解決であることに興味を持ち、研究を始めた。

コラッツ予想とは、「自然数  $n$  に対して  $n$  が偶数のとき、 $n$  を 2 で割り、 $n$  が奇数のとき、 $n$  を 3 倍して 1 を足す」

という操作を有限回繰り返すと、いずれ必ず 1 になるという予想である。

Lothar Collatz が 1937 年に本予想を提唱した。現在、カリフォルニア大学の Terence Tao が「ほとんどすべての正の整数において正しい」と発表しているが完全な証明は発見されていない。

本研究では  $21 \times 2^x$  ( $x \in \mathbb{Z}$ ,  $x \geq 0$ ) と  $2^y$  ( $y \in \mathbb{N}$ ) の形の数についてのコラッツ予想の証明とコラッツ写像の  $n$  が奇数のときの条件を  $f(n) = 3n + a$  ( $a \in \mathbb{N}$ ) に拡張しても同様にコラッツ予想が成り立つか検証を行った。

## 3. 研究内容

ここでは、 $21 \times 2^x$  ( $x \in \mathbb{Z}$ ,  $x \geq 0$ ) の形の数についてコラッツ予想が成立するか  $2^6$  を 3 を法として調べる。

$2^6$  についてコラッツ予想の逆の操作を考え、「逆の操作をする数から 1 を引き、3 で割る」という操作が可能なときは優先的に行う。

以下、「逆の操作をする数から 1 を引き、3 で割る」という操作を①、「逆の操作をする数に 2 倍する」という操作を②と表現する。すると、

$$2^6 = 64 \xleftarrow{\text{①}} 21 \xleftarrow{\text{②}} 42 \xleftarrow{\text{②}} 84 \xleftarrow{\dots}$$

となり、1 回目の①の逆算操作後の数は 3 の倍数となる。その後は、操作②しか行うことができない。

すなわち、コラッツ予想の操作で  $2^6$  に到達する数は、 $21 \times 2^x$  ( $x \in \mathbb{Z}$ ,  $x \geq 0$ )、 $2^y$  ( $y \in \mathbb{N}$ ,  $y \geq 6$ ) から出来るため、 $21 \times 2^x$  となる数はコラッツ予想の操作より 1 に到達するといえる。

そこで、 $2^{6t}$  ( $t \in \mathbb{N}$ ) についても上記と同様のことが言えるのではないかと考えた。

【補題 1】  $64^t - 1$  は 9 の倍数となる。

(証明) 3 を法とする。

$$\begin{aligned} 64^t - 1 &= 4^{3t} - 1 \\ &= (4^t - 1)(16^t + 4^t + 1) \dots \text{①} \end{aligned}$$

ここで、 $4^t - 1 \equiv 0 \dots \text{②}$

$$16^t + 4^t + 1 \equiv 1 + 1 + 1 \equiv 0 \dots \text{③}$$

②, ③より、 $4^t - 1$  と  $16^t + 4^t + 1$  はともに 3 の倍数である。よって、①の式は 9 で割り切れる。 [終]

【命題 1】  $21 \times 2^x$  ( $x \in \mathbb{Z}$ ,  $x \geq 0$ ) について、コラッツ予想が成立する。

(証明)  $2^{6t} = 64^t$  に①の逆算操作を行うと得られる  $\frac{64^t - 1}{3}$  は補題 1 より、3 の倍数である。そのため、逆算操作で②の操作しか行うことができなくなる。これにより、 $2^{6t}$  は  $\frac{2^x \{(64^t - 1)\}}{3}$ ,  $2^u$  ( $u \in \mathbb{N}$ ,  $6t \leq u$ ) からのみ出現するということがわかる。よって、 $21 \times 2^x$  はコラッツ予想の操作を行うことにより、1 に到達することがいえる。

[終]

#### 4. コラッツ予想の拡張

はじめに、コラッツ写像を定義する。

【定義 1】 任意の正の整数  $n$  に対して、コラッツ写像  $f$  を次のように定義する。

$$f(n) = \begin{cases} \frac{n}{2} & (n: \text{偶数}) \\ 3n+1 & (n: \text{奇数}) \end{cases}$$

コラッツ予想は、コラッツ写像を用いると「任意の自然数に対して、コラッツ写像を繰り返し用いると、いずれは 1 に到達する。」と言い換えることができる。

【仮説】  $a$  を自然数として、

$$g(n) = \begin{cases} \frac{n}{2} & (n: \text{偶数}) \\ 3n+a & (n: \text{奇数}) \end{cases}$$

のように拡張されたコラッツ関数  $g$  を定義する。このとき、任意の自然数に対して、関数  $g$  を繰り返し用いるといずれは 1 に到達するのではないかと考えた。以下、これを「拡張されたコラッツ予想」と呼ぶことにする。ただし、今回は 1 から 1000 までの範囲で拡張されたコラッツ予想を確認する。

【命題 2】 拡張されたコラッツ写像

$g(n) = 3n + a$  ( $n: \text{奇数}$ ) の  $a$  は必ず奇数でなければならない。

(証明)  $n$  が奇数のとき、 $a$  を偶数する  $g(n)$  は奇数となる。よって、 $n$  が奇数ならば、 $g(n)$  は増加関数となるため、拡張されたコラッツ予想が成立することはない。よって、 $a$  は奇数である。 [終]

そこで、Python を用いて操作を行った。

【仮説 2-1】

拡張されたコラッツ操作を行う数を  $a$  を除いて関数  $g$  を繰り返し用いると、全ての数が 1 に到達する数が存在する。

【結果 2-1】

$3 \leq a \leq 299$  のとき、そのような数は存在しないことがわかったが、 $m$  を任意の自然数とし、 $g(am)$  の計算後の結果が  $g(am)$  になっていた。

ここで次のような仮説を立てる。

【仮説 2-2】

コラッツ操作を行う数を  $a$  の倍数を除いて上記と同様の方法で計算を行うとすべての数が 1 に収束する数が存在する。

【結果 2-2】

プログラム (図 1) を作成し、検証してみると定数項が 41, 43, 107, 113 のとき、コラッツ予想と似た法則が見られた。

```

try:
    try:
        print('計算する値を入力してください')
        num = int(input())
        count = 0
        if num > 0:
            while True:
                num1 = num + 1
                ### if num1 % ??? == 0: の???を変更する ###
                if num1 % 41 == 0:
                    num1 = num1 + 1
                else:
                    num1 = num1
                    print(str(num)+ 'の計算をします')
                    while num != 1:
                        if num % 2 == 0:
                            num = num // 2
                            count = count + 1
                        else:
                            ### num = num * 3 + ??? の???を変更す
                            num = num * 3 + 41
                            count = count + 1
                    print(''+str(count)+'回計算しました')
                    num = num1
                    count = 0
            except ValueError:
                print('---ERROR---正しい値を入力してください')
    except KeyboardInterrupt:
        print()

```

図1 Python での検証画面

また、Python を用いて以下のプログラムを作成した。このプログラムにより、コラッツ操作を行う際に人力よりも計算の正確性が向上したため、確認する際にはこれを使用した。

```

num = int(input("整数を半角で入力してください>"))
count = 0
print(num)
while True:
    if num % 2 == 0:
        num = num // 2
        print(num)
        count = count + 1
    elif num % 2 != 0 and num != 1:
        num = num * 3 + 1
        print(num)
        count = count + 1
    else:
        break
print(str(count)+"回計算しました")

```

図2 Python によるプログラム

## 5. 考察

コラッツ予想を Python と mod を用いて一部の証明や、拡張を行った。今回は  $2^6$  から考えたが、今後は別の始点からの逆算の操作を行えるか検討したい。また、拡張ではオイラー素数との関係について言及したが、オイラー素数とはまったく関係ない数も結果として現れた

め、今後これらの数にはどのような規則性があるのか、また規則性はないのかを検討していきたい。さらに  $g(am)$  がなぜ 1 に収束しないのかについても考えていきたい。

## 6. 参考資料

[1] 数学の景色

<https://mathlandscape.com/collatz/>

## 7. 謝辞

本研究にあたり協力してくださいました小川翼さん、中村一葉さん、熱心なご指導を頂いた顧問の川口慎二先生に感謝の意を表します。

# $n$ 次元における中線定理

6年D組 井上 友裕  
指導教員 川口 慎二

## 1. 概要

余弦定理の対象を  $n$ 次元図形に拡張した定理を用いることにより、中線定理を  $n$ 次元図形へと一般化した。また、 $n$ 次元中線を定義して、 $n$ 次元図形の重心の関係を明らかにした。

## 2. 研究の背景と先行研究

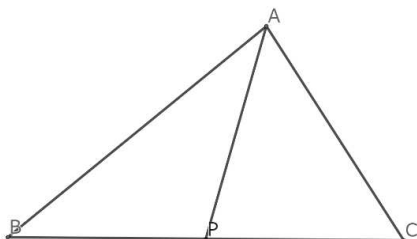
### 2-1. 研究の背景

三平方の定理の応用として、次の中線定理はよく知られている。

#### 中線定理

$\triangle ABC$  と辺  $BC$  の中点  $P$  について次のような式が成り立つ。

$$AC^2 + AB^2 = 2(BP^2 + AP^2)$$



中線定理は三平方の定理だけでなく余弦定理を用いても証明できる。

#### 余弦定理

$\triangle ABC$  において、

$$AB^2 = BC^2 + CA^2 - 2BC \times CA \cos \angle ACB$$

が成り立つ。

### 2-2. 先行研究

三平方の定理を 3次元に拡張した「四平方の定理」が存在する。

#### 四平方の定理 (デカルト・グアの定理)

([1])

$\angle AOB = \angle BOC = \angle COA = 90^\circ$  である三角錐  $OABC$  においては、

$$|ABC|^2 = |OAB|^2 + |OBC|^2 + |OCA|^2$$

が成り立つ。

先行研究[2]は余弦定理を 3次元に拡張したものとして次の主張を掲載している。

#### 主張 ([2])

四面体  $ABCD$  において、  
平面  $ABC$  と平面  $ACD$  のなす角を  $\theta_{12}$ 、  
平面  $ACD$  と平面  $ABD$  のなす角を  $\theta_{23}$ 、  
平面  $ABC$  と平面  $ABD$  のなす角を  $\theta_{13}$ 、  
平面  $ABC$  と平面  $BCD$  のなす角を  $\theta_{14}$ 、  
平面  $ACD$  と平面  $BCD$  のなす角を  $\theta_{24}$ 、  
平面  $ABD$  と平面  $BCD$  のなす角を  $\theta_{34}$ 、  
とすると、

$$\begin{aligned}
|BCD|^2 &= |ABC|^2 + |ACD|^2 + |ABD|^2 \\
&\quad - 2|ABC| \times |ACD| \cos \theta_{12} \\
&\quad - 2|ACD| \times |ABD| \cos \theta_{23} \\
&\quad - 2|ABC| \times |ABD| \cos \theta_{31}
\end{aligned}$$

が成り立つ。

先行研究[2]において、主張に誤りがあることに気付いた。実際に、平面と平面のなす角は必ず 0 以上  $\frac{\pi}{2}$  以下であるから、四面体 ABCD において点 A から平面 BCD におろした垂線の足が三角形 BCD の外部にあるとき、主張は成り立たない。

そこで面と面のなす角を四面体の内部で測ることにより、主張を修正した。

**定義 1** (面と面が立体の内部でなす角)

四面体  $P_1P_2P_3P_4$  において点  $P_1$  から辺  $P_3P_4$  におろした垂線の足を  $H_1$ 、点  $P_2$  から辺  $P_3P_4$  におろした垂線の足を  $H_2$  とおくと、 $\overline{P_1H_1}$  と  $\overline{P_2H_2}$  のなす角を面  $P_1P_3P_4$  と面  $P_2P_3P_4$  が立体の内部でなす角という。

**定理 1** (主張の修正)

四面体 ABCD において面 ABC と面 ACD が内部でなす角を  $\theta_{12}$ 、面 ACD と面 ABD が内部でなす角を  $\theta_{23}$ 、面 ABC と面 ABD が内部でなす角を  $\theta_{13}$ 、面 ABC と面 BCD が内部でなす角を  $\theta_{14}$ 、面 ACD と面 BCD が内部でなす角を  $\theta_{24}$ 、面 ABD と面 BCD が内部でなす角を  $\theta_{34}$ 、とすると

$$\begin{aligned}
|BCD|^2 &= |ABC|^2 + |ACD|^2 + |ABD|^2 \\
&\quad - 2|ABC| \times |ACD| \cos \theta_{12} \\
&\quad - 2|ACD| \times |ABD| \cos \theta_{23} \\
&\quad - 2|ABC| \times |ABD| \cos \theta_{31}
\end{aligned}$$

が成り立つ。

(証明)

まず、一般的に

$$\begin{aligned}
|BCD| &= |ABC| \cos \theta_{14} + |ACD| \cos \theta_{24} \\
&\quad + |ABD| \cos \theta_{34}
\end{aligned}$$

が成り立つ。すなわち、

$$\begin{aligned}
|BCD|^2 &= |ABC| |BCD| \cos \theta_{14} \\
&\quad + |ACD| |BCD| \cos \theta_{24} \\
&\quad + |ABD| |BCD| \cos \theta_{34} \quad \dots \textcircled{1}
\end{aligned}$$

同様に、

$$\begin{aligned}
|ABC|^2 &= |ABC| |ACD| \cos \theta_{12} \\
&\quad + |ABC| |ABD| \cos \theta_{13} \\
&\quad + |ABC| |BCD| \cos \theta_{14},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
|ACD|^2 &= |ABC| |ACD| \cos \theta_{12} \\
&\quad + |ACD| |ABD| \cos \theta_{23} \\
&\quad + |ACD| |BCD| \cos \theta_{24},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
|ABD|^2 &= |ABC| |ABD| \cos \theta_{13} \\
&\quad + |ACD| |ABD| \cos \theta_{23} \\
&\quad + |ABD| |BCD| \cos \theta_{34}
\end{aligned}$$

が成り立つ。

式を変形すると、それぞれ



$$\begin{aligned}
& |ABC||BCD|\cos\theta_{14} \\
&= |ABC|^2 \\
&\quad - |ABC||ACD|\cos\theta_{12} \\
&\quad - |ABC||ABD|\cos\theta_{13} \dots \textcircled{2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& |ACD||BCD|\cos\theta_{24} \\
&= |ACD|^2 \\
&\quad - |ABC||ACD|\cos\theta_{12} \\
&\quad - |ACD||ABD|\cos\theta_{23} \dots \textcircled{3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& |ABD||BCD|\cos\theta_{34} \\
&= |ABD|^2 \\
&\quad - |ABC||ABD|\cos\theta_{13} \\
&\quad - |ACD||ABD|\cos\theta_{23} \dots \textcircled{4}
\end{aligned}$$

ここで、②、③、④を①に代入すると、

$$\begin{aligned}
|BCD|^2 &= |ABC|^2 + |ACD|^2 + |ABD|^2 \\
&\quad - 2|ABC|\cdot|ACD|\cos\theta_{12} \\
&\quad - 2|ACD|\cdot|ABD|\cos\theta_{23} \\
&\quad - 2|ABC|\cdot|ABD|\cos\theta_{31}
\end{aligned}$$

を得る。(Q.E.D.)

四平方の定理は定理 1 の特別な場合である。また、定理 1 は余弦定理を三次元に拡張した定理といえる。そこで、本論文では「余弦定理」を  $n$  次元に拡張することにより、「中線定理」を  $n$  次元に拡張することを目指す。

### 3. 研究内容

ここでは、「 $n$ 次元図形」は  $n$ 次元空間で  $(n+1)$ 個の点を線分で結んだ図形であり、各頂点の位置ベクトルは一次独立であるものを指す。

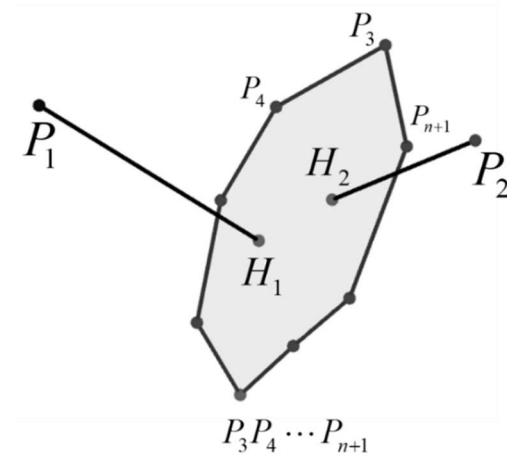
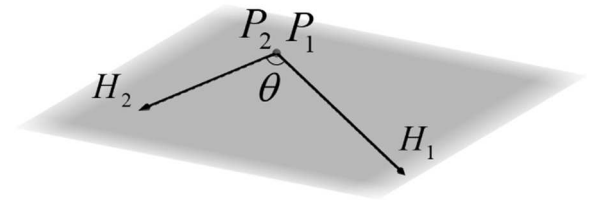
**定義 2** ( $n$ 次元図形の内部でなす角)

点  $P_1, P_2$  から  $(n-2)$ 次元図形  $P_3P_4\cdots P_{n+1}$  へ下した垂線の足をそれぞれ  $H_1, H_2$

とするととき  $\overrightarrow{P_1H_1}$  と  $\overrightarrow{P_2H_2}$  がなす角  $\theta$  を

$(n-1)$ 次元図形  $P_1P_3P_4\cdots P_{n+1}$  と  $(n-1)$ 次元図形  $P_2P_3\cdots P_{n+1}$  が  $n$ 次元図形  $P_1P_2\cdots P_{n+1}$  の内部でなす角という。

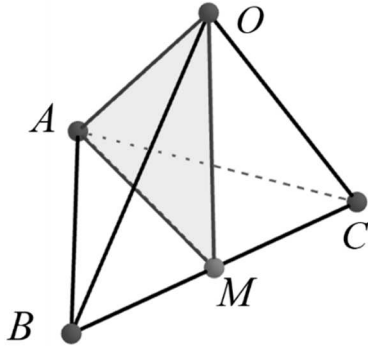
$$\cos\theta = \frac{\overrightarrow{P_1H_1} \cdot \overrightarrow{P_2H_2}}{\left| \overrightarrow{P_1H_1} \right| \left| \overrightarrow{P_2H_2} \right|}$$



**定義 3** ( $n$ 次元中線)

$n$ 次元図形のある 2つの頂点の組に対し、その 2本を結んだ線分の midpoint と、残り  $(n-1)$ 個の頂点を含む面を、 $n$ 次元中線という。

下図の場合、辺 BC の定める 3 次元中線 (中面) は面 OAM である。



**定義 4** (符号付き  $n$  次元体積)

$U_n$  を点  $P_1, P_2, \dots, P_{n+1}$  によって一意に定められる  $n$  次元空間、 $W_k$  を点  $P_k$  以外のすべての点によって一意に定められる  $(n-1)$  次元空間、 $D_k$  を  $U_n$  が  $W_k$  により分割されて生ずる 2 つの領域のうち点  $P_k$  を含むものとする。

$U_n$  上の任意の図形  $F$  について、 $D_k$  に含まれる部分の  $n$  次元体積を正、 $D_k$  に含まれない部分の  $n$  次元体積を負と定める。これを  $F$  の点  $P_k$  に関する符号付き  $n$  次元体積という。

**定理 2**

$V_n$  を  $n$  次元図形  $P_1P_2 \cdots P_{n+1}$  の  $n$  次元体積、 $\text{sgn} VQ_k$  を  $U_n$  内の  $n$  次元図形  $QP_1P_2 \cdots P_{k-1}P_{k+1} \cdots P_{n+1}$  の点  $P_k$  に関する符号付き  $n$  次元体積とすると、

$$V_n = \sum_{k=1}^{n+1} \text{sgn} VQ_k \quad \cdots (*)$$

が成り立つ。

(証明)

$n=1$  のときは明らかである。

$n \geq 2$  のとき、ベクトル方程式

$$\sum_{t=1}^{n+1} a_t \overrightarrow{QP_t} = 0 \quad \cdots \textcircled{1} \quad (a_t \in \mathbb{R})$$

を考える。

$$\textcircled{1} \Leftrightarrow -a_s \overrightarrow{P_s Q} + \sum_{t=1, t \neq s}^{n+1} a_t (\overrightarrow{P_s P_t} - \overrightarrow{P_s Q}) = 0$$

$$(s \in \mathbb{N}, 1 \leq s \leq n+1)$$

$$\Leftrightarrow \sum_{t=1}^{n+1} a_t \overrightarrow{P_s Q} = \sum_{t=1, t \neq s}^{n+1} a_t \overrightarrow{P_s P_t}$$

$$\Leftrightarrow \overrightarrow{P_s Q} = \frac{\sum_{t=1, t \neq s}^{n+1} a_t \cdot \sum_{t=1, t \neq s}^{n+1} a_t \overrightarrow{P_s P_t}}{\sum_{t=1}^{n+1} a_t \cdot \sum_{t=1, t \neq s}^{n+1} a_t}$$

$$\Leftrightarrow \overrightarrow{P_s Q} = \frac{\sum_{t=1, t \neq s}^{n+1} a_t}{\sum_{t=1}^{n+1} a_t} \cdot \overrightarrow{P_s R}$$

$$\left( \overrightarrow{P_s R} = \frac{\sum_{t=1, t \neq s}^{n+1} a_t \overrightarrow{P_s P_t}}{\sum_{t=1, t \neq s}^{n+1} a_t} \right)$$

$$\Leftrightarrow \overrightarrow{QR} = \frac{a_s}{\sum_{t=1}^{n+1} a_t} \cdot \overrightarrow{P_s R}$$

$n=1$  のときも(\*)が成り立つので、

$$\textcircled{1} \Leftrightarrow \text{sgn} VQ_s = \frac{a_s}{\sum_{t=1}^{n+1} a_t} \cdot V_n$$

$$\text{ゆえに、} \sum_{k=1}^{n+1} \text{sgn} VQ_k = \sum_{k=1}^{n+1} \frac{a_k}{\sum_{t=1}^{n+1} a_t} \cdot V_n = V_n \cdot$$

よって、題意は示された。 (Q.E.D.)

定理 2 を用いて、次の定理 3 を導くことができる。

定理 3

H を  $n$  次元図形  $P_1P_2\cdots P_{n+1}$  において点  $P_k$  から  $C_k$  へ下した垂線の足、 $C_k$  を点  $P_k$  以外のすべての点を頂点とする  $(n-1)$  次元図形、 $S_k$  を  $C_k$  の  $(n-1)$  次元体積として、 $\theta(l, m)$  を  $C_l$  と  $C_m$  が  $n$  次元図形の内部でなす角とすると、

$$\overline{P_k H} = \sum_{t=1, t \neq k}^{n+1} \frac{S_t}{S_k} \cos \theta(k, t) \overline{P_k P_t}$$

が成り立つ。

(証明)

定理 2 より、

$$\begin{aligned} \sum_{t=1, t \neq k}^{n+1} \operatorname{sgn} V H_t \overline{H P_t} &= 0 \\ \Leftrightarrow \sum_{t=1, t \neq k}^{n+1} \operatorname{sgn} V H_t \overline{P_k P_t} &= \sum_{t=1, t \neq k}^{n+1} \operatorname{sgn} V H_t \overline{P_k H} \\ \Leftrightarrow \sum_{t=1, t \neq k}^{n+1} \operatorname{sgn} V H_t \overline{P_k P_t} &= S_k \overline{P_k H} \\ \Leftrightarrow \overline{P_k H} &= \sum_{t=1, t \neq k}^{n+1} \frac{\operatorname{sgn} V H_t}{S_k} \overline{P_k P_t} \\ &= \sum_{t=1, t \neq k}^{n+1} \frac{S_t}{S_k} \cos \theta(k, t) \overline{P_k P_t} \end{aligned}$$

となる。(Q.E.D.)

また、定理 2 から直ちに次の定理が導出できる。

定理 4

$$S_t = \sum_{k=1, k \neq t}^{n+1} S_k \cos \theta(t, k) \quad (t \in \mathbb{N}, 1 \leq t \leq n+1)$$

定理 5 ( $n$  次元余弦定理)

$n$  次元図形  $P_1P_2\cdots P_{n+1}$  において、 $C_k$  を点  $P_k$  以外のすべての点を頂点とする  $(n-1)$  次元図形、 $S_k$  を  $C_k$  の  $(n-1)$  次元体積、 $\theta(l, m)$  を  $C_l$  と  $C_m$  が  $n$  次元図形の内部でなす角とすると、

$$2S_k^2 = \sum_{t=1}^{n+1} S_t^2 - 2 \sum_{\substack{l < m \\ l \neq k \\ m \neq k}} S_l S_m \cos \theta(l, m)$$

が成り立つ。

(証明)

正射影を用いると、

$$S_k = \sum_{\substack{1 \leq l \leq n+1 \\ l \neq k}} S_l \cos \theta(l, k) \cdots \textcircled{1}$$

が成り立つ。両辺に  $S_k$  をかけると

$$S_k^2 = \sum_{\substack{1 \leq l \leq n+1 \\ l \neq k}} S_k S_l \cos \theta(l, k) \cdots \textcircled{2}$$

①と同様に考えると、

$$\begin{aligned} S_k S_l \cos \theta(k, l) \\ = S_l^2 - \sum_{\substack{1 \leq m \leq n+1 \\ m \neq k, m \neq l}} S_l S_m \cos \theta(l, m) \end{aligned}$$

②に代入して、

$$\begin{aligned} S_k^2 &= \sum_{\substack{1 \leq l \leq n+1 \\ l \neq k}} \left\{ S_l^2 - \sum_{\substack{1 \leq m \leq n+1 \\ m \neq k, m \neq l}} S_l S_m \cos \theta(l, m) \right\} \\ &= \sum_{\substack{1 \leq l \leq n+1 \\ l \neq k}} S_l^2 - 2 \sum_{\substack{1 \leq l < m \leq n+1 \\ l \neq k, m \neq k}} S_l S_m \cos \theta(l, m) \end{aligned}$$

すなわち、

$$2S_k^2 = \sum_{l=1}^{n+1} S_l^2 - 2 \sum_{\substack{l < m \\ l \neq k \\ m \neq k}} S_l S_m \cos \theta(l, m)$$

を得る。 (Q.E.D.)

$n$ 次元余弦定理の特殊な形として、次の定理が導かれる。

**定理 6** ( $n$ 平方の定理)

点  $O$  まわりのどの角も直角であるような  $n$ 次元図形  $OP_1P_2 \cdots P_n$  について、 $S$  を  $(n-1)$ 次元図形  $P_1P_2 \cdots P_n$  の  $(n-1)$ 次元体積、 $S_k$  を  $(n-1)$ 次元図形  $OP_1 \cdots P_{k-1}P_{k+1} \cdots P_n$  の  $(n-1)$ 次元体積とすると、

$$S^2 = \sum_{k=1}^n S_k^2$$

が成り立つ。

(証明)

$(n-1)$ 次元空間  $P_1P_2 \cdots P_n$  の長さ 1 の法線ベクトルを  $(E_1, E_2, \dots, E_n)$  とおく。 $(n-1)$ 次元空間  $P_1P_2 \cdots P_n$  と  $(n-1)$ 次元空間  $OP_1 \cdots P_{k-1}P_{k+1} \cdots P_n$  が  $n$ 次元図形  $OP_1P_2 \cdots P_n$  の内部でなす角を  $\theta_k$  とおくと、 $(n-1)$ 次元空間  $OP_2P_3 \cdots P_n$  の法線ベクトルは  $(1, 0, 0, \dots, 0)$  なので、

$$\cos \theta_1 = E_1 \quad \dots \textcircled{1}$$

となる。

さらに、 $S \cos \theta_1 = S_1$  ゆえ、 $SE_1 = S_1$ 。同様に  $SE_k = S_k$  であるので、

$$\sum_{k=1}^{n+1} S_k^2 = \sum_{k=1}^{n+1} S^2 E_k^2 = S^2$$

を得る。 (Q.E.D.)

そして、 $n$ 次元余弦定理により  $n$ 次元中

線定理が示される。

**定理 7** ( $n$ 次元中線定理)

$n$ 次元図形  $P_1P_2 \cdots P_{n+1}$  において、 $M_{k,l}$  を線分  $P_kP_l$  の中点、 $CM_{k,l}(r,s)$  を  $(n+2)$ 個の点  $P_1P_2 \cdots P_{n+1}M_{k,l}$  のうち  $P_r$  と  $P_s$  以外を頂点とする  $(n-1)$ 次元図形とする。

$SM_{k,l}(r, s)$   $SM_{k,l}(r,s)$  で  $CM_{k,l}(r,s)$  の

$(n-1)$ 次元体積を、 $\theta_r(s, t)$  で  $CM_{k,l}(r,s)$  と  $CM_{k,l}(r,t)$  が内部でなす角を表すと、

$$\begin{aligned} S_i^2 + S_j^2 &= 2 \sum_{m \neq i} SM_{i,j}^2(i, m) \\ &\quad - 4 \sum_{\substack{g < h \\ g \neq i, j \\ h \neq i, j}} SM_{i,j}^2(i, g) SM_{i,j}^2(i, h) \cos \theta_i(g, h) \end{aligned}$$

が成り立つ。

(証明)

$n$ 次元図形  $P_1P_2 \cdots P_{i-1}P_{i+1} \cdots P_{n+1}M_{i,j}$  について、 $n$ 次元余弦定理より、

$$\begin{aligned} S_i^2 &= \sum_{\substack{1 \leq t \leq n+1 \\ t \neq i}} SM_{i,j}^2(t, i) \\ &\quad - 2 \sum_{\substack{1 \leq g < h \leq n+1 \\ g \neq i, h \neq i}} SM_{i,j}(i, g) \cdot SM_{i,j}(i, h) \cos \theta_i(g, h) \end{aligned} \quad \dots \textcircled{1}$$

次に、 $n$ 次元図形  $P_1P_2 \cdots P_{j-1}P_{j+1} \cdots P_{n+1}M_{i,j}$  について  $n$ 次元余弦定理より

$$\begin{aligned} S_j^2 &= \sum_{\substack{1 \leq t \leq n+1 \\ t \neq j}} SM_{i,j}^2(t, j) \\ &\quad - 2 \sum_{\substack{1 \leq g < h \leq n+1 \\ g \neq j, h \neq j}} SM_{i,j}(j, g) \cdot SM_{i,j}(j, h) \cos \theta_j(g, h) \end{aligned} \quad \dots \textcircled{2}$$

①+②を計算すると、

$$\begin{aligned}
& S_i^2 + S_j^2 \\
&= \sum_{\substack{1 \leq t \leq n+1 \\ t \neq i}} SM_{i,j}^2(t,i) \\
&\quad + \sum_{\substack{1 \leq t \leq n+1 \\ t \neq j}} SM_{i,j}^2(t,j) \\
&\quad - 2 \sum_{\substack{1 \leq g < h \leq n+1 \\ g \neq i, h \neq i}} SM_{i,j}(i,g) \cdot SM_{i,j}(i,h) \cos \theta_i(g,h) \\
&\quad - 2 \sum_{\substack{1 \leq g < h \leq n+1 \\ g \neq j, h \neq j}} SM_{i,j}(j,g) \cdot SM_{i,j}(j,h) \cos \theta_j(g,h) \\
&= 2 \sum_{m \neq i} SM_{i,j}^2(i,m) \\
&\quad - 4 \sum_{\substack{g < h \\ g \neq i, j \\ h \neq i, j}} SM_{i,j}^2(i,g) SM_{i,j}^2(i,h) \cos \theta_i(g,h)
\end{aligned}$$

となる。 (Q.E.D.)

また、平面において三角形の重心は三本の中線の交点である。したがって、 $n$ 次元においても中線と重心には関係があると考えた。

#### 定義 4 ( $n$ 次元図形の重心)

点  $P_k$  ( $1 \leq k \leq n+1, k \in \mathbb{N}$ ) の位置ベク

トルを  $\vec{p}_k$  とおくと、 $n$ 次元図形  $P_1P_2 \cdots$

$P_{n+1}$  の重心の位置ベクトルは  $\frac{1}{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} \vec{p}_k$

と定義される。

#### 定理 8

- (1)  $n$ 次元図形  $P_1P_2 \cdots P_{n+1}$  の  ${}_{n+1}C_2$  個の  $n$ 次元中線は重心を共有する。
- (2)  ${}_{n+1}C_2$  個の  $n$ 次元中線はただ 1 点を共有する。

(証明)

(1) 点  $P_1$  を含まない  $n$  個の  $n$  次元中線が重心を含むことを示せばよい。

線分  $P_1P_k$  の中点を  $M_k(\vec{q}_k)$  とおくと、

$n$  次元中線  $P_2P_3 \cdots P_{k-1}P_{k+1} \cdots P_{n+1}M_k$  上の

任意の点  $Q_k(\vec{q}_k)$  は

$$\vec{q}_k = \sum_{\substack{t=2 \\ t \neq k}}^{n+1} s(k,t) \vec{p}_t + s_k \vec{m}_k \quad \dots \textcircled{1}$$

$$\left( 0 \leq s(k,t) \leq 1, 0 \leq s_k \leq 1, \sum_{\substack{t=2 \\ t \neq k}}^{n+1} s(k,t) + s_k = 1 \right)$$

と表せる。

ここで、 $s(k,t) = \frac{1}{n+1}$ ,  $s_k = \frac{2}{n+1}$  と

すると、 $\sum_{\substack{t=2 \\ t \neq k}}^{n+1} s(k,t) + s_k = \frac{n-1}{n+1} + \frac{2}{n+1} = 1$

を満たし、 $\vec{q}_k = \frac{1}{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} \vec{p}_k$

よって、題意は示された。

(2)  $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots, \vec{p}_{n+1}$  は一次独立である。

点  $P_1$  を含まない  $n$  個の  $n$  次元中線について考えればよい。

いま、点  $R(\vec{r})$  がすべての  $n$  次元中線の

上にあるとき、

$$\vec{r} = \sum_{i=1}^{n+1} \alpha_i \vec{p}_i \quad \dots \textcircled{2}$$

$$0 \leq \alpha_i \leq 1, \sum_{i=1}^{n+1} \alpha_i = 1 \quad \dots \textcircled{3}$$

①, ②からベクトルの一次独立性より、

$$\sum_{t=1}^{n+1} \alpha_t \overline{p_t} = \sum_{\substack{t=2 \\ t \neq k}}^{n+1} s(k, t) \overline{p_t} + s_k \overline{m_k}$$

$$\Leftrightarrow \left( \alpha_1 - \frac{s_k}{2} \right) \overline{p_1} + \left( \alpha_k - \frac{s_k}{2} \right) \overline{p_2} + \sum_{\substack{t=2 \\ t \neq k}}^{n+1} (\alpha_t - s(k, t)) \overline{p_t} = 0$$

$$\Leftrightarrow \alpha_1 = \alpha_k = \frac{s_k}{2}, \quad \alpha_t = s(k, t).$$

これが、すべての  $2 \leq k \leq n+1$  について成立するため、③より

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \cdots = \alpha_{n+1} = \frac{1}{n+1}.$$

したがって、すべての  $n$  次元中線の上にある点  $\mathbf{R}$  は 1 つである。 (Q.E.D.)

#### 4. 結果・考察

$n$  次元余弦定理、 $n$  次元中線定理、 $n$  平方の定理を証明し、また  $n$  次元中線が重心を共有することを示した。今後は  $n$  次元中線と重心の関係を  $n$  次元図形の計量などに応用したい。

#### 5. 参考文献

- [1] 井上友裕, 「中線定理の高次元への拡張」, 奈良女子大学附属中等教育学校令和四年度 SSH サイエンス研究会生徒研究論文集(2023)
- [2] 「余弦定理の拡張」,  
<http://www25.tok2.com/home/toreta/te/cos01.html>
- [3] 高校数学の美しい物語, 「四平方の定理(図形の面積と正射影)」,  
<https://manabitimes.jp/math/1003>
- [4] 高校数学の美しい物語, 「四面体の重

心の存在証明と応用例」,

<https://manabitimes.jp/math/1123>

#### 6. 謝辞

今回の研究にあたり、ご指導くださいました顧問の川口先生ありがとうございました。

# 純正律における和音の数値解析

5年C組 辻 漣

5年A組 笹志馬

指導教員 河合士郎

## 1.要約

和音の周波数を分析し、音と感情の関係性を数理的に調べることを目的とした。

## 2.研究の背景と目的

クラシックやポップスといったアートとしての音楽や、それに限らない商業音楽や映画音楽など、我々の日常には多種多様な形で音楽を聞く機会がある。音楽が人々にもたらす感情は幅広く、高揚感を与える目的で作られたものや、恐怖心を煽るために計算されたものもある。

音が生み出す感情に興味を持ち、音の響きとそこから誘起される感情を分析するため、和音の協和度合の比較方法について分析した。また、既存の音楽と感情の関係についての研究では主にアンケート調査が用いられており、被験者によって結果が左右してしまう恐れがあったため、数値を用いた分析を行い客観的に調査することも目標とした。

## 3.研究内容

### 3.1 概要

音とそれによって引き起こされる快不快との関係性を、周波数をもとにした数値解析によって調べた。

### 3.2 前提条件

単純に“音”といっても様々な要素があるが、今回の研究では特に音の響きや協和性

を重視するため振動数に着目した。また、感情の種類や程度を定義することは難しく主観的になってしまう可能性があるため、感情を単純化し快不快の量的違いで表した。

また、和音と快不快の関係について、「協和音は構成音同士が調和して安定感をもたらす音であり、不協和音は調和がなくその不安定な響きから不快感をもたらす音である」と定義した。

### 3.3 仮説

ピタゴラスの「和音を構成する音の周波数の比が単純であれば協和音であり、複雑であれば不協和音である」という説に基づけば、構成音の周波数比の複雑さを比較すべきである。しかし、比の複雑さの比較に関しては定義されていないため、比の複雑さを比較する方法に類似した手法で、ピタゴラスの説に沿った比較が行えると考えた。

そこで、純正律の周波数の定義に用いられている基準音からの周波数比を元に、波形がサインカーブを描く純音のみで構成された和音の波の周期を用いることで、比の複雑さを判断できるのではないかと考えた。構成音の周波数比が複雑であれば各音

の周期が一致しにくくなり和音の音波（各構成音の合成波）の周期が長くなる、という仮説を立て研究を行った。

### 3.4 方法

一般に純正律の定義で用いられる完全5度と長3度の組み合わせからなる基準音からの周波数比を元に、A4 (440Hz)を基準とした各音の周波数と、純音のA4の波形を  $f(x) = \sin x$  とした場合の各音の周期を求めた(図 a)。(本来、純音のA4の波形は  $f(x) = \sin 440x$  で表されるべきであるが、簡単のために上のようにした。)

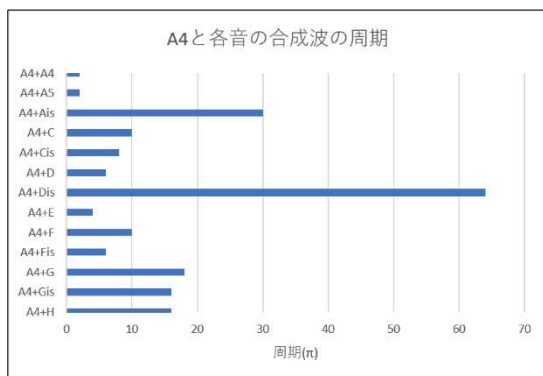
(図 a)

音名	A4	Ais	H	C5	Cis	D	Dis
A4との周波数比	1	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{45}{32}$
周期	$2\pi$	$\frac{15\pi}{8}$	$\frac{16\pi}{9}$	$\frac{5\pi}{3}$	$\frac{8\pi}{5}$	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{45\pi}{32}$
音名	E	F	Fis	G	Gis	A	
A4との周波数比	$\frac{3}{2}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{16}{9}$	$\frac{15}{8}$	2	
周期	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{6\pi}{5}$	$\frac{9\pi}{8}$	$\frac{16\pi}{15}$	$\pi$	

### 4.結果

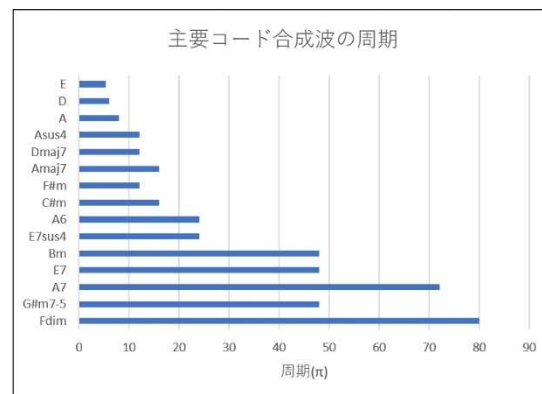
以上の定義よりA4と各音との合成波の周期を求めると、協和する順に完全五度、完全四度と長六度、長三度、短二度と短六度、(以下省略)となり、一般的に考えられている協和度合と概ね一致した。(図 b)

(図 b)



次に、主に曲中で使用されるコードについて同様の操作を行った。(図 c)

(図 c)



最も協和すると言われる主要三和音の周期が短くなり、一般に不協和音になるとされるノンダイアトニックコードの周期が長くなった。

また、最も協和すると考えられるAΔ (スケール内のIの和音)よりもEΔ (スケール内のVの和音)、DΔ (スケール内のIVの和音)の周期が下回った。

### 5.考察

結果より、主要三和音の数値が小さく、ノンダイアトニックコードの周期が長くなったことから、今回用いた方法で、概ね和音の協和度合を分類できたといえる。

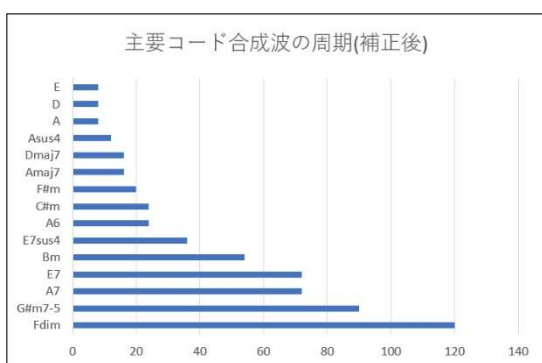
しかし、AΔと比べてEΔ、GΔの方がより周期が短いという結果が出た。これらの和音は主音からの各構成音の周波数の比率が一致しており、本来同一の複雑さであることが想定されるものである。周期を求めるといって今回の方法は根音の違いに対応できないということが分かった。和音の構成音の周波数が高くなれば波長が短くなり、それに応じて合成波の周期も短くなっ



てしまう。根音の高さに左右されやすいという問題は、より厳密な和音の分類に支障をきたすと思われる。

以上を踏まえて、数値の補正を行う。コードの波形の周期を求める方法では、各構成音の比率はそのままに根音の周波数を高くした場合、周波数の上昇と反比例して周期が短くなり、比較に不都合が生じたため、根音をスケールの主音と一致させ、またそれに応じて構成音の周波数も同比率で変化させ、補正することにした(図 d)。この操作により構成音の周波数の比率のみを抽出し比較することが出来るが、「合成波の周期を求める」という点では相違するため、以降の値は実際の周期とは異なる。

(図 d)



この補正により AΔ、EΔ、GΔ がそれぞれ同一の値をとり、他の根音が違う和音に関しても比較する際に正確な値をとることが確認できた。

また、一連の操作で得られた数値の正確性を確認するため、Amaj7 にアヴェイラブルテンションを使用した和音 Amaj7(9,13) と、アヴォイドノートを使用した和音 Amaj7(9, ♭13) を比較した。アヴェイラブルテンションとは、和音に対して役割を変えることなく追加できる音を指す。和音の

いずれかの構成音に対して長九度音程にあること、調性内の音であること、の二つを満たしている必要があり、この条件を満たさない音は用いられるべきでない音 (アヴォイドノート) と呼ばれる。また、同様の条件である IV の和音の Dmaj7(9,13) と Dmaj7(9, ♭13) についても比較を行った。双方において、それぞれの後者は不協和音となり普通曲中では使用されることのない和音となっている。

結果として、補正後の合成波の周期について、Amaj7(9,13) は 48、Amaj7(9, ♭13) は 80 となり、後者の値がより大きくなった。また、Dmaj7(9,13) は 16 (補正前 12)、Dmaj7(9, ♭13) は 40 (補正前 30) となり、こちらも後者の値がより大きくなった。以上より、根音を一致させた場合、和音の協和度合は合成波の周期に比例すると言えることがわかった。

今回の研究では純正律を用いたが、現代で一般的に使用されているのは平均律である。そのため、平均律を前提とした音楽理論を今回の手法に引用すると、音律の違いによる誤差が発生するのではないかという懸念が生じた。これらの手法で和音の協和度合を比較することで、和声論、コード理論などの数理的な分析が可能になり、特定のコードがもたらす不快感や、複雑なコードの配置規則をさらに細かく分析することができるだろう。

## 6.謝辞

本探究活動においてご指導頂いた教員の皆様、活動について評価をくれた同講座の友人に御礼申し上げます。

# 音のテンポと人の感情や行動の関係

5年B組 足立 夕奈

指導教員 中川 雅子

## 1. 背景

テンポの速い曲を聴いていると、体を動かしたくなるという実体験から、体を動かすモチベーションはどこからきているのか疑問を持った。津山ら<sup>1)</sup>によると、テンポの速さが自律神経に影響を与えていることが、村上ら<sup>2)</sup>の研究では、テンポの速さが脈拍に影響を与えていることがわかっている。また、阿部ら<sup>3)</sup>は、割り算の計算問題を課題としてテンポの速さが作業効率に影響を与えるのか調査したが、用いた課題が難しく、音のテンポと作業効率の明確な因果関係が明らかになっていない。

## 2. 目的

単純な計算作業を課題とし、テンポの速さが心身および作業効率に影響を与えているか明らかにする。

## 3. 仮説

テンポが遅いと副交感神経が優位になり心拍数は低くなり、リラックスして作業効率が下がる。対して、テンポが速いと交感神経が優位になり、心拍数は高くなり、活動的な状態により作業効率が上がる。

## 4. 実験方法

### 4-1. 被験者

健康な女性4名（年齢 36.5±13.3）

### 4-2. 実験条件

被験者に対して、無音条件、60bpm条件、200bpm条件の3条件を、それぞれ異なる日に実験を行った。また、順序の効果をなくすため、被験者ごとに実施する条件順をランダムにし、条件間を1週間以上空けて実施した。

#### 【BPMの選定について】

世界で一番リラックスできる曲とされている「Weightless」のテンポが60bpmである。また、

安静時心拍数の平均値は60回/分であり、最大心拍数は20歳を基準とした200拍/分（220-年齢）とし、60bpmと200bpmの2条件を選択した。

### 4-3. 課題

単純計算課題として、クレペリン検査<sup>4)</sup>を15分間行った。

### 4-4. プロトコル

実験前に主観的アンケートを行い、心拍計を装着した後、各条件下で課題に取り組み、終了後に再び主観的アンケートおよび課題についての感想を聴取した。

### 4-5. 測定項目および実験装置

- ・心拍数  
光電式脈拍モニターを用い安静と課題時を計測。
- ・VAS評価を用いた主観的評価  
【感情について】  
眠さ・疲れ・緊張・落ち着き・気分の良さ・すっきり・楽しさ・焦り・イライラ  
【課題時の状態や課題への印象について】  
身体の調子・達成感・実験の長さ・作業の運びの良さ・集中力
- ・課題や音に対する感想アンケート
- ・音のテンポはヘッドフォンを装着し、KORGメトロノームを用いる。

#### 4-6. データ処理

クレペリン検査から1分間ごとの回答数を集計し、作業効率を測った。また、作業時の心拍数は安静時を基準とし、そこからの変化量を算出した。

### 5. 実験結果

〈作業量〉

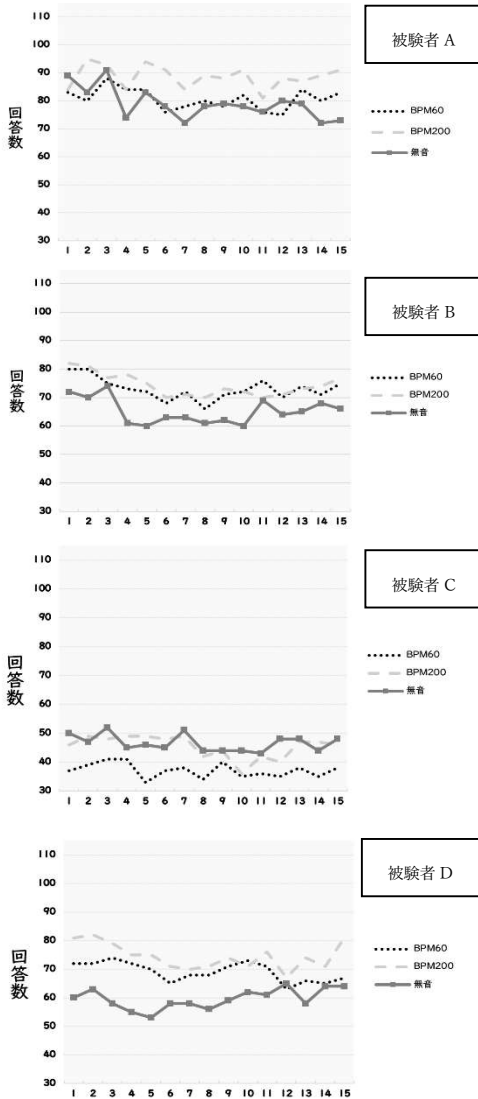


図1. 計算課題の回答数の変化

3条件の中で200bpmにおいて、回答数が多く作業量は多くなる傾向を示した(図1)。

〈心拍数〉

図2は作業時における安静時からの心拍数の変化量を示している。

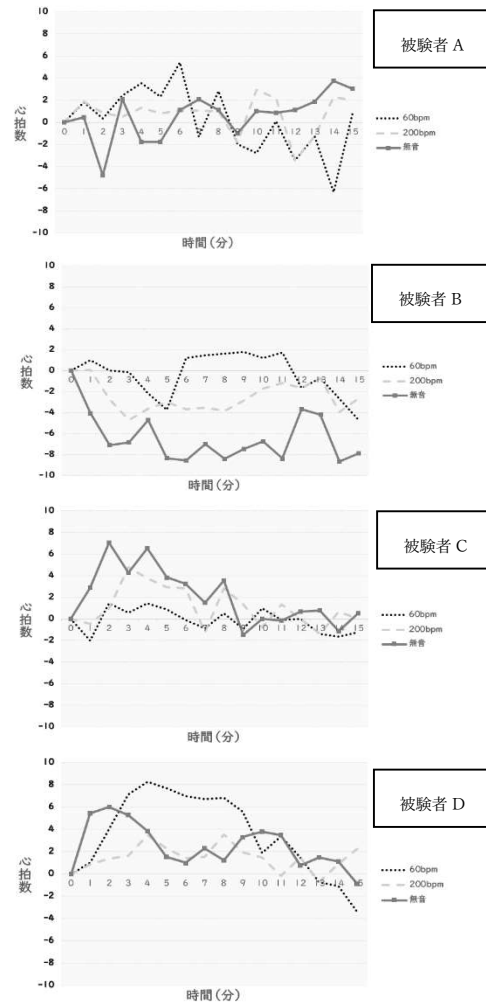


図2. 安静時からの作業時における心拍数の変化

心拍数は200bpmの方が60bpmよりも変動が少ないように見えるが、被験者間で条件における相違はみられなかった。

〈VAS値〉

課題前後の感情について、被験者全員に見える傾向としては、200bpmにおいてイライラについての評価が増加し、落ち着きについての評価が減少していた。また、無音において眠さと楽しさについての評価が減少していた(図3)。

一方、課題時の状態や課題への印象を示すVAS値は、無音より60bpm、200bpmの方が作業の運びの良さについての評価が高かった。しかし、そのほかの項目では共通点が見つからなかった(図4)。

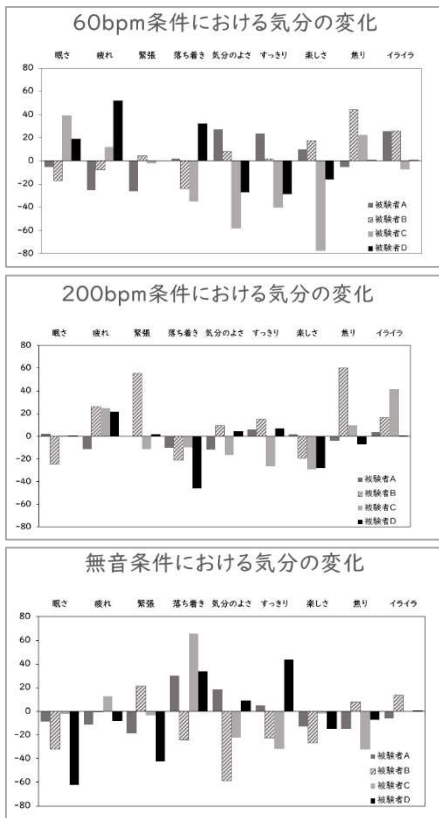


図3. 実験の気分における主観的評価の変化

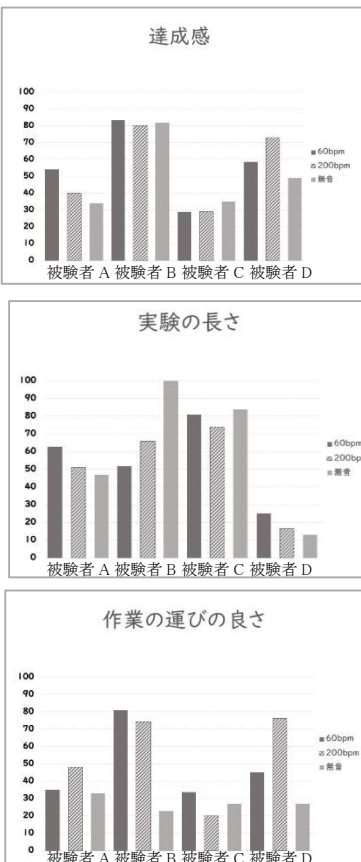


図4. 実験に関しての主観的評価

### 〈被験者の感想〉

テンポに作業速度がつけられていることがある。また、無音よりも 60bpm 条件や 200bpm 条件の方が集中できる時間が多い。身体的疲労を感じることも多い。

## 6. 考察

テンポが速いと作業量が増加し、作業の運びの良さに関する評価も無音と比べて 60bpm と 200bpm の方が高かったことから、単純計算課題においてテンポが作業に影響していると考えられる。テンポが速いとイライラが増加し、落ち着きが減少することがわかった。これは、津山ら<sup>1)</sup>の研究において、曲のテンポが心理指標に影響を与え、テンポが速い方が、遅い、等倍よりも、イライラの値が高く、落ち着きの値が低いという結果と一致した。しかし、被験者間のテンポの速さによる心拍数の関係性が見出せなかったことから、作業量と心拍数において仮説を立証できなかった。

## 7. 課題

正確なデータを取るために被験者数を増やす必要がある。テンポの速さと自律神経との関係を示すためには、心理的ストレスを示すような感情を評価する項目を増やす必要がある。また、単純計算課題ではない作業でも同様の結果が出るのか調べる必要がある。

## 参考文献・注釈

- 1) 津山美紀, 古堅佐規子, 音楽による癒しの追求, 九州女子大学紀要, 第 51 巻, 2 号.
- 2) 村上昌志, 坂本隆, 加藤俊一, 背景音楽のテンポが休息時の作業者に与える効果: 生理的指標の評価, 情報処理学会研究報告 Vol.2017, No.1, 2017.
- 3) 阿部麻美, 新垣紀子, BGM のテンポの違いが作業効率に与える影響.
- 4) 隣り合う 1 桁の数字の足し算をして、下一桁の数を記述する計算課題.

# 奈良の鹿と人間の共生社会の在り方

5年A組 足立 和奏

指導教員 坂田 博信

## 1. 要約

国の天然記念物である奈良の鹿は、野生でありながら古くから人間のすぐそばで暮らしている。しかしその一方で、鹿の健康が脅かされる事件や事故が後を絶たないのも事実である。そこで、鹿と人間の双方にとってより良い共生社会の構築を目的とした調査を行った。その中で、奈良公園内にゴミ箱が置かれていないことが原因で鹿の被害が多数出ていることを確認した。この事実を踏まえて、鹿の被害減少に効果的なゴミ箱及びシステムを提案する。

キーワード 奈良の鹿 ゴミ ポイ捨て ゴミ箱 システム

## 2. はじめに

奈良の鹿に関する問題の一つとして、奈良公園内でのゴミのポイ捨てによる鹿の誤飲が挙げられる。ニュースなどでも度々見かけ、改善の必要性を感じていた。以前の奈良公園にはゴミ箱が設置されていたが、鹿による誤飲を防ぐため撤去された。しかしその結果ポイ捨てが多発するという矛盾した結果となっている。新型コロナウイルスにより一時的に観光客数が減少していたが、近頃観光客数が徐々に回復してきているため、それに伴ってゴミの量も増加すると予想される。この状況を少しでも改善するための方法を検討した。その中で効果的と考えたゴミ箱設置に関する提案をする。

ビューを行った。主な内容として、ゴミを誤飲したとみられる衰弱した鹿が公園内に散見されるが、胃の中のゴミを除去するための手術等を行うことはできないという話があった。一度誤飲したゴミを取り除くことはできないため、ゴミの誤飲自体を減らすことでしか鹿を守ることはできない、とのことだった。

## 3.2. 実態調査

奈良公園内に捨てられたゴミの量や種類を実際に確かめるため、奈良公園内の清掃ボランティア「ゴミゼロウォーキング」に参加した。特にゴミが多く見られたのは、自動販売機や売店の周辺、常夜灯の後ろや溝の中などだった。実際にゴミが捨てられていた様子を図



図1 ゴミの様子

## 3. 調査内容

### 3.1. 実態の聞き取り

奈良公園や奈良の鹿の実態を知るため、奈良の鹿愛護会の方にインタ

1に示す。特に売店の近くには鹿せんべい売り場もあるため多くの鹿が集まってきており、誤飲の危険性が特に高いと感じた。ここで、このボランティア活動による2023年9月までの過去一年間のゴミの回収量を図2に示す。おおよそ一か月に一度実施されているのにも関わらず、毎月3000gから多い月で8000g以上のゴミが回収されていることが分かる。また、ゴミの種類としてはペットボトルやビニール袋など一単位当たりだと非常に軽いものが多いことから、いかに多くのゴミが捨てられているかが分かる。

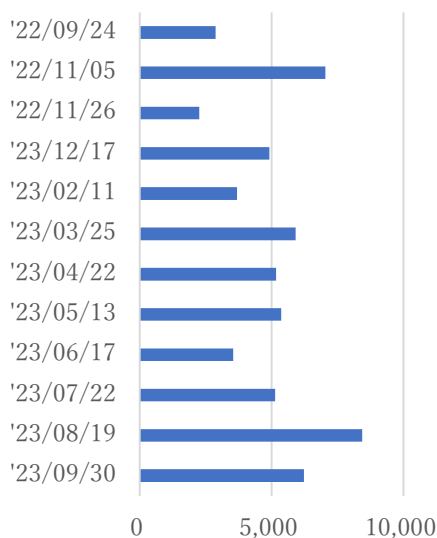


図2 ボランティアでのゴミの回収量

#### 4. 提案

##### 4.1. ゴミの誤飲を減らす方法の検討

###### ① 条例の制定や厳罰化

奈良公園は奈良県に管理されているが、県の条例には現在、ポイ捨てを禁止するような記載は

見当たらなかった。そこで、条例の作成を検討した。しかし、一般的な過去の条例の制定や厳罰化について調べたところ、ポイ捨てに限らずこのような手法は必ずしも事態の改善には繋がっていない。その理由の一つとして、厳罰化（罰金額の引き上げ等）が行為の代価として認識されるケースが多いからだということが挙げられる。また、全ての外国人観光客がゴミ箱にゴミを捨てる文化を持っているわけでもない。このことから、適切な方法ではないと判断した。

###### ② ゴミ箱の再設置

以前の奈良公園内にはゴミ箱が設置されていたが、現在は撤去されている。その理由は「ゴミ箱の中のゴミを鹿が食べてしまう」からであった。ここから、鹿がゴミ箱の中のゴミを食べられないようにすることができればゴミ箱の再設置は可能だと考えた。そこで、公園内でのゴミの誤飲を防ぐため以下を提案する。

- ・鹿の誤飲を防ぐ構造のゴミ箱
- ・観光客がゴミを捨てやすいシステム

#### 4.2. ゴミ箱再設置に関して

##### ① 誤飲を防ぐゴミ箱の設計

鹿がゴミ箱の中を漁ることができないような設計のゴミ箱を検討した。詳細については、以下の通りである。

###### (ア) 端末使用のゴミ箱システム (図3)

ゴミ箱の表面に書かれた暗証番号を入力することでゴミ箱が開く、という方法を採用。また、そこに書かれた番号を専用サイト等で入力することによ

ってスマートフォンの壁紙がもらえるなどといった特典も用意することで、多くの人に利用してもらえ、公園内に捨てられるゴミの総量を減らすことができると考えた。

(イ) アナログのゴミ箱システム (図4)

主に端末を持っていない利用者や小さい子どもを対象としたゴミ箱。顔出しパネルに引き出せるゴミ箱を取り付ける。扇形に開き、パネルの裏側に取り付けられた箱にゴミがたまる仕組み。(ア)で示したような特典はないが、より多くの人を対象にした場合(イ)の案の方が適していると考える。

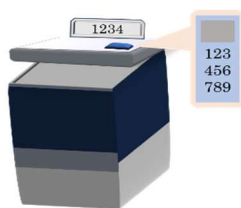


図3



図4

② ゴミ箱設置に関わるシステム設計

広大な敷地を持つ奈良公園において、設置されたゴミ箱を短時間で見つけるのは容易ではない。そこでゴミ箱の位置を示した地図の作成を考えた。(図5) 地図が表示される。さらに記載されているゴミ箱をタップすると、その場所の様子の写真、周辺の施設情報などを



図5 地図

閲覧できる。

③ 課題

本提案の課題として、設置やゴミの収集、維持にある程度のコストがかかるということが挙げられる。

5. 今後の展望

今後は、現在作成中の地図の改善を行ったうえで、今回提案したゴミ箱が実際に鹿の誤飲を減少させることができるのか試行したい。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり、指導教員の坂田博信先生には多大なご指導を賜りました。また、奈良の鹿愛護会スタッフの方には本調査にご協力いただきました。この場をお借りして御礼申し上げます。

7. 参考文献

- [1] 広報啓発. 一般財団法人奈良の鹿愛護会.  
<https://naradeer.com/>
- [2] お知らせと活動報告. 奈良公園ゴミゼロプロジェクト  
<https://nara-gomi-zero.com/>
- [3] 2022年奈良市観光入込客数調査結果について. 奈良市  
<https://www.city.nara.lg.jp/site/press-release/183111.html>

# キョウチクトウからのオレアンドリンの抽出 —オレアンドリンの薬品としての利用に向けて—

5年B組 瀬理 心菜  
5年C組 狩野 玉葉  
指導教員 鵜飼 哲真

## 1. はじめに

オレアンドリンは強い毒性をもち、摂取すると様々な中毒症状を起こす。その一方で、強心作用や老化防止作用があり、医薬品として利用できることが立証されている。しかしながら、入手が困難なことからあまり研究が進んでおらず、実際に医薬品としての実用的な利用には至っていない。そこで、キョウチクトウから容易にオレアンドリンを抽出する方法がないかを模索した。薄層クロマトグラフィーを用いて、キョウチクトウに含まれる成分の分離を試みた結果、オレアンドリンだと推測される物質を発見できた。

キーワード オレアンドリン, 抽出, 薄層クロマトグラフィー

## 2. 目的

オレアンドリンは極めて危険な物質で致死量は0.3mg/kgである<sup>1)</sup>。医薬品としての効果が立証されているが<sup>2)</sup>、キョウチクトウからの抽出方法は確立されていない。本研究は安価で容易にオレアンドリンを抽出する方法を確立し、医療分野での活用について検討することを目的としている。

## 3. オレアンドリン (Oleandrin) について

オレアンドリンは夾竹桃(キョウチクトウ)という樹木に含まれており、花、葉、枝、根、果実の全てと、その周辺の土壤に毒性をもたらす<sup>3)</sup>(図1)。ステロイド骨格を有する配糖体の一種で、心不全や不整脈の改善に利用できることが立証されている(図2)。強い毒性を持つため、摂取すると吐き気、下痢、視覚障害などの症状を起こし、場合によっては死に至る。薬用量と毒性量の差が極めて小さいため、摂取するのは危険である。一方で、強心作用や利尿剤、麻酔薬としての効果もある。



図1 校庭のキョウチクトウ

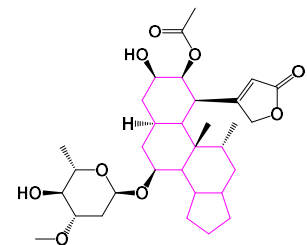


図2 ステロイド骨格を有する  
オレアンドリン

## 4. 実験方法

本研究では、学校に植えられているキョウチクトウの葉を検体として使用した。オレアンドリンは強い毒性をもつため、白衣、ビニール手袋、保護メガネ、マスクを着用して実験を行った。



### (1) キョウチクトウの葉の採取

葉 15 枚 (約 20g) を採取した。  
(文献 4)より、葉 15 枚にオレアンドリン約 18mg が含まれると推測される。)

### (2) 葉の粉碎

葉をハサミで細かく切った後、水を加えながら葉をミキサーで粉碎した。

### (3) 成分の抽出

吸引濾過 (図 3) で固形物を取り除き、細かい固形物は遠心分離機にかけて沈殿させた。分液漏斗 (図 4) を用いた抽出操作により、瀘液から有機物を取り出した。抽出操作では、ジエチルエーテル 30mL を溶媒として用いた。



図 3

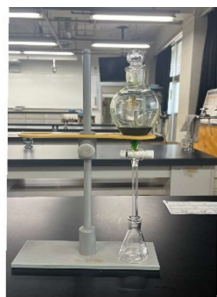


図 4

### (4) 薄層クロマトグラフィーによる分離

薄層クロマトグラフィー (シリカゲル) により、成分の分離を行った。展開溶媒には①エタノールとヘキサンの混合溶液、②ベンゼンとアセトンの混合溶液、③酢酸エチルとヘキサンの混合溶液などを用いた。

## 5. 結果と考察

エタノール：ヘキサン=1：9 の割合で混合した展開溶媒を用いて、薄層クロマトグラフィーによる分離を試みた (図 5)。目視で確認できる薄い黄色の色素 (Rf 値 0.9~1.0) と近い位置に、UV ライトを当てることで検出できる物質 (Rf=0.9) の存在が確認できた (図 6)。



図 5



図 6

この物質をカラムクロマトグラフィーで単離したところ、無色透明のオイル状の物質が得られた。<sup>1</sup>H NMR を測定したところ油脂と思われるスペクトル (図 7) が観測され、オレアンドリンとは異なる物質であることが分かった。

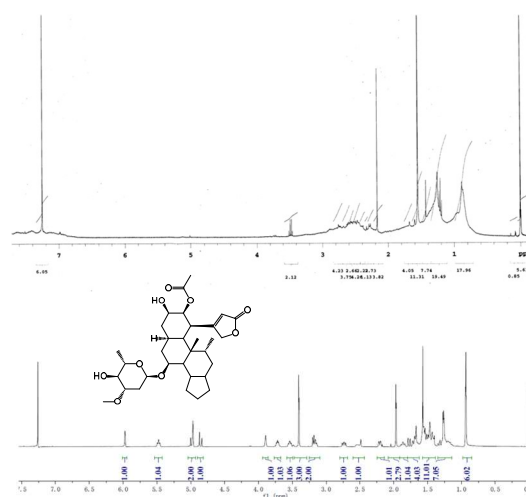


図 7 <sup>1</sup>H NMR のスペクトル

上：単離した化合物  
下：オレアンドリン (文献値<sup>5)</sup>)

Rf=0.1 付近は緑色の色素が集まっており、これらはクロロフィルであると予想される。この成分を分離して<sup>1</sup>H NMR による測定を行ったところ、オレアンドリンと思われる特徴的なスペクトルが確認された。しかしながら、複数の色素や成分を含んでいるため、その部分を更に細かく分離しようと試みた。

ベンゼン：アセトン=5~15：1 の割合でそれぞれ混合した溶液を用いて薄層クロマトグラフィーによる分離を試みた。同様に、酢酸エチル：ヘキサン=1：1~2 の割合でそれぞれ混合した溶液を用いて薄層クロマトグラフィー

による分離を試みた。その結果を図8に示す。

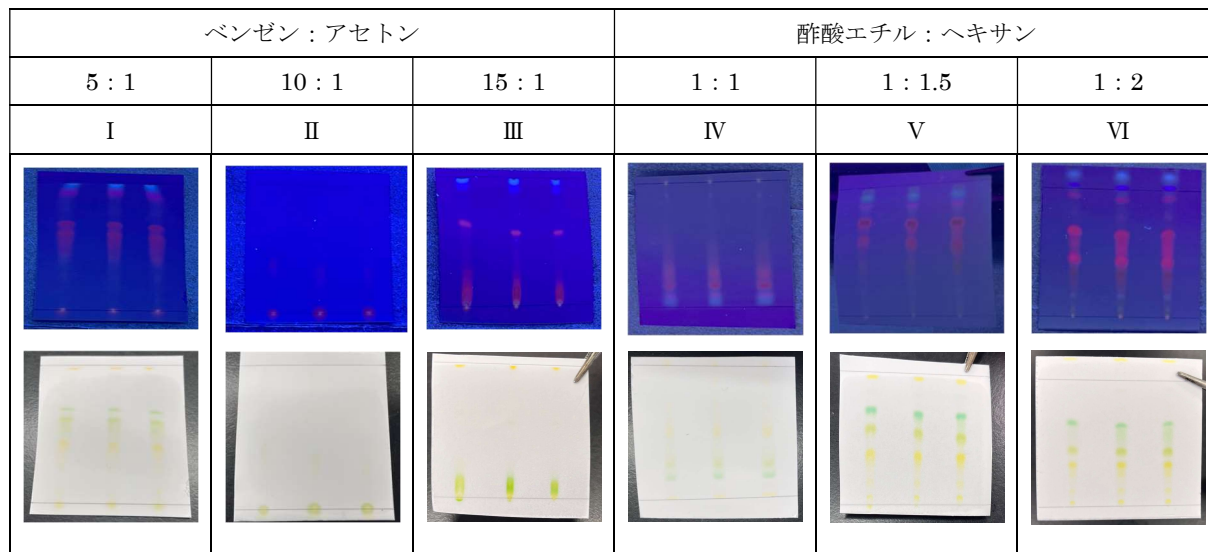


図8 TLCによる色素の分離

図8-VIにおいて、文献のRf値より、βカロテン、油脂、クロロフィルa、クロロフィルb、ルテイン、ビオラキサンチン、ネオキササンチンの存在が確認できた(図9)。UVライトを当てることで検出できる赤く発光している物質(Rf=0.8)は色素ではなく、オレアンドリンではないかと予想される。

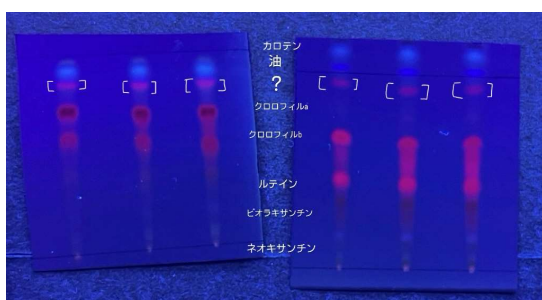


図9 展開後のTLCによる色素の同定

## 6. まとめ

今回の研究では、キョウチクトウからオレアンドリンを完全に単離することはできなかった。しかしながら、薄層クロマトグラフィーを用いることでオレアンドリンと思われる物

質を発見することができた。今後はUVライトにより検出できるRf=0.8の化合物を単離し、<sup>1</sup>H NMRの測定によるオレアンドリンの同定を行いたい。

## 7. 参考文献

- 1) 医薬品情報21, 夾竹桃(Oleandrin)の毒性  
<http://www.drugsinfo.jp/>
- 2) やさしいまち, 野草・薬草のボタニカルアート【キョウチクトウ】  
<https://yasashiiimachi.co.jp/botanicalart/1151>
- 3) 石館守三, 田村善藏, Nerium odorum 葉の成分研究-オレアンドリンの分離-, 日本薬学会, 1950.
- 4) Tatsuo Yamauchi, *US 3833472 A, 1972.*
- 5) ChemicalBook,  
[https://www.chemicalbook.com/SpectrumEN\\_CB8104351\\_NMR.htm](https://www.chemicalbook.com/SpectrumEN_CB8104351_NMR.htm)

# 飲料中の酸化防止剤の含有量とそれに伴う味覚変化について

5年A組 岩本 陸

5年C組 太田 吏音

指導教員 鵜飼 哲真

## 1. 概要

私たちが普段口にして飲んでいる飲料には様々な食品添加物含まれており、その中の1つであるビタミンC (*L*-アスコルビン酸  $C_6H_8O_6$ ) には酸化防止剤として腐敗を防ぐはたらきがある。飲料が空気中の酸素と触れることにより、含まれるアスコルビン酸はどの程度消費され、飲料の味覚にどのような変化が生じるのか、調査した。

## 2. はじめに

アスコルビン酸 (ascorbic acid) はラクトン構造の持つ有機化合物の一種であり、還元型の *L*-アスコルビン酸は栄養素の一つであるビタミンCとして、世界中で広く知られている。アスコルビン酸には還元型と、その二電子酸化酸物であるデヒドロアスコルビン酸の2つが存在し、還元型であるアスコルビン酸が何らかの酸化剤によって酸化されると、酸化型であるデヒドロアスコルビン酸が生成される (図1)。

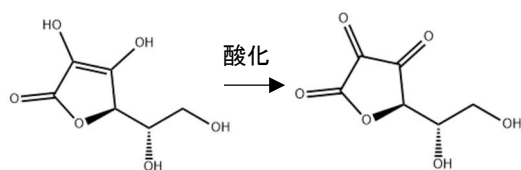


図1 アスコルビン酸の酸化

飲料中に含まれている *L*-アスコルビン酸は、空気中の酸素から飲料の成分をまもる酸化防止剤としての役割があり、食品中で酸化されると酸化剤のはたらきも持つため、品質改良剤としても使用される。

## 3. 実験方法

酸化還元滴定により、還元剤である *L*-アスコルビン酸の含有量を求めた。

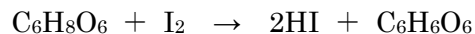
### ●調べた試料

- $4.0 \times 10^{-3}$  mol/L のアスコルビン水溶液 (0.07g のアスコルビン酸を純水に溶かして 100mL にしたもの)
- 市販の緑茶 (お〜いお茶@伊藤園)
- 市販のレモン水 (キレートレモン @POKKASAPPOROFOOD& BEVERAGE LTD.)

### (1) ヨウ素を用いた酸化還元滴定

酸化剤にヨウ素を用いて滴定実験を行い、アスコルビン酸の含有量を測定した。

○反応式



時間経過や外的環境と含有量との関係を考察するため、3つの試料 (アスコルビン水溶液、緑茶、レモン水) を以下の条件1~4で保存し、1日ごとに滴定による定量を試みた (図2)。

	容器のふた	保存方法
条件 1	有り	冷蔵
条件 2	有り	常温
条件 3	無し	冷蔵
条件 4	無し	常温

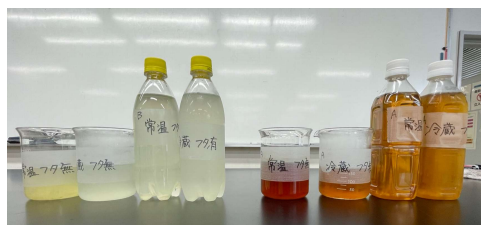


図 2 測定した試料

**[実験操作]**

- ① 試料の水溶液を 1mL はかり取り，コンカルビーカーに入れた。
- ② 操作①の水溶液に指示薬として 1%デンプン水溶液を数滴加えた。
- ③  $5.71 \times 10^{-3} \text{mol/L}$  ヨウ素ヨウ化カリウム水溶液をビュレットに入れ，操作②の水溶液に滴下した（図 3）。水溶液の色がかすかに青紫色を呈したところを終点とした（図 4）。



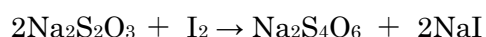
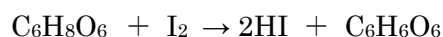
図 3



図 4

**(2) チオ硫酸ナトリウムを用いた逆滴定**

○反応式



**[実験操作]**

- ① 試料の水溶液を 1mL はかりとり，コンカルビーカーに入れた。

② 操作①の水溶液に含まれるアスコルビン酸をすべて酸化させるのに十分な量の  $3.17 \times 10^{-3} \text{mol/L}$  ヨウ素ヨウ化カリウム水溶液（緑茶には 5mL，レモン水には 10 mL）を加えた。

③ チオ硫酸ナトリウム水溶液の標準溶液（緑茶は  $6.32 \times 10^{-2} \text{mol/L}$ ，レモン水は  $3.16 \times 10^{-2} \text{mol/L}$ ）をビュレットに入れ，操作②の水溶液に滴下した。水溶液の色が無色に近づいたところで，指示薬として 1%デンプン水溶液を数滴加えた。標準溶液の滴下を再開し，水溶液の青色が消えたところで終点とした。

**(3) 官能調査**

人間の五感を利用して食品の品質を評価する官能調査を用いて味覚変化について測定した。具体的な方法として，2点嗜好試験法を開封直後と3日間常温保存した緑茶で試みた。加えて，苦味・甘味・香り・色をそれぞれの尺度で評価するプロファイル法も用いた。

**4. 結果**

各実験において，室内の気温は 10.1～16.0℃であった。

**(1) ヨウ素を用いた酸化還元滴定の結果**

実験(1)の結果を図 5～7 に示す。（各グラフは，3回の滴定結果の平均を用いて作成）

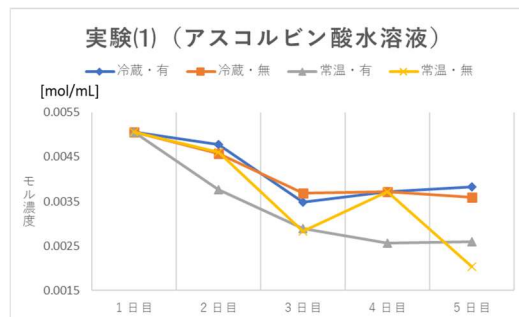


図 5

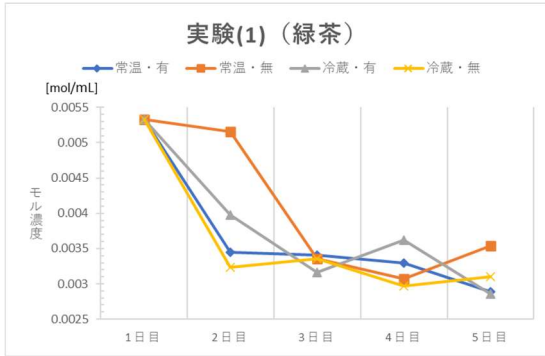


図 6

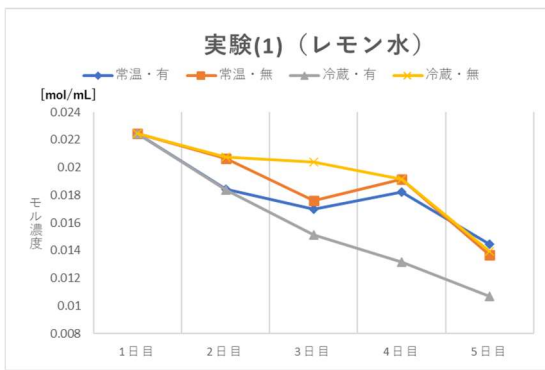


図 7

(2) チオ硫酸ナトリウムを用いた逆滴定の結果

実験(2)の結果を図 8 に示す。

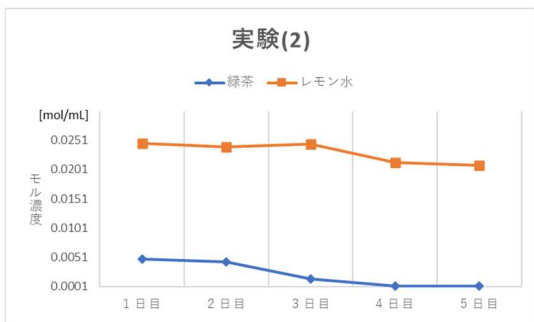


図 8

(3) 官能調査の結果

プロファイル法では、以下の通りに回答を求めた。

- とても苦い 4 ⇨ 1 苦くない
- とても甘い 4 ⇨ 1 甘くない
- 香りが強い 4 ⇨ 1 香りが弱い
- 色が濃い 4 ⇨ 1 色が薄い



図 9 官能調査のサンプル

表 1 官能調査の結果

		被験者 1		被験者 2		被験者 3	
		開封直後	3日放置	開封直後	3日放置	開封直後	3日放置
2点識別法	味の好み		○		○		○
プロファイル法	苦味	3	2	4	3	1	2
	甘味	1	1	1	2	3	2
	香り	3	2	2	1	4	2
	色	2	2	2	2	3	4

※2点識別法(2点嗜好試験)で好ましいと選択された方に○印。

5. 考察

図 5~7 のグラフから、飲料中のアスコルビン酸の含有量は日数の経過と共に減少していくことが分かる。調製したアスコルビン酸水溶液と緑茶のグラフに差異は見られず、3日目までは大きく減少し、それ以降は緩やかであった。一方で、レモン水は5~6日目まで直線的に減少した。これは緑茶に比べてレモン水の方がアスコルビン酸濃度は大きく、1日あたりの平均の反応速度はレモン水の方が大きくなるためと考えられる。

各試料に共通して、初期値(1日目の含有量)の50%ほど下回った日以降は、減少が緩やかになるようすが見られた。また、保存条件の違いとアスコルビン酸減少率に相関は見られなかった。

実験(1)では外れ値が多数存在した。その理由として、アスコルビン酸でない別の含有成分が影響した可能性と、標準溶液であ

るヨウ素溶液の濃度が保存環境により安定しなかった可能性が考えられる。

そこで、標準溶液としてより安定なチオ硫酸ナトリウムを用いて実験(2)を行った。図 8 と実験(1)の結果を比較すると、緑茶は緩やかな減少となり、3~4 日目にかけて減少率が大きくなった。レモン水は実験(1)と同様のグラフになった。実験(1)に比べて正確な定量ができ、実験の精度は向上したことから、図 8 に示すグラフは信用性が高いと考えている。

以上の結果より、緑茶は開封初日から 3 日目にかけて、アスコルビン酸濃度が大きく変化することがわかった。そこで、緑茶を用いて官能調査(実験(3))を計画した。表 1 に示す通り、2 点識別法の結果、全員が「3 日放置した緑茶を好む」を選択した。プロファイル法の結果では「苦味」と「香り」の点で評価が分かれていた。憶測の域を出ないが、3 日間放置した飲料は開封直後の飲料と比べてアスコルビン酸が減少しており、それが味の変化に影響を与えているのではないだろうか。この考察が正しければ、飲料メーカーはなるべく良質な味を保つために、商品には酸化防止剤として最小限必要な量のアスコルビン酸しか添加されていないのではないかと考えられる。

## 6. 今後の展望

今回、本研究が身近な社会に貢献するための核なると考えている、「酸化防止剤の変化による味覚変化」を統計的に結論づけるには不十分な結果であった。飲料が製造されてからの日数や、気温や湿度などの外的環境、実験で用いる溶液の濃度など、様々な条件の影響を受けて実験結果に誤差が生じ、

正確なデータを収集するのが困難であった。今後は本研究で行った実験をもとに、どんな環境下でも容易かつ正確なアスコルビン酸含有量を測定できる実験方法を確立したい。

また、今回はアスコルビン酸の酸化還元反応という化学的視点から実験を行い、飲料の酸化(腐敗)について考えたが、今後はそれに伴う味覚の変化や、飲料としての腐敗についても考えていきたい。そのためには、飲料には、アスコルビン酸以外の酸化防止剤が含まれている可能性も考慮する必要がある。飲料の成分分析が必要になってくることから、将来的には食品学のアプローチも取り入れていきたい。特に、実験(3)の官能調査においては被験者数(標本)が少なかったため、今後は調査の安全性を確保し、多くのサンプルを収集していきたい。

## 7. 参考文献

- 1) 衛藤大青, 「市販緑茶飲料中に含まれる還元型ビタミン C の保存状態における酸化速度の違い」, 別府大学短期大学部紀要 2011, 第 30 号.
- 2) 石井謙二ほか, 「L-アスコルビン酸とその酸化分解」, 栄養学雑誌, 1990, Vol.48 No.4 149~156.
- 3) 水品善之ほか, 「食品学 I ~食べ物と健康-食品の成分と機能を学ぶ(栄養科学イラストレイテッド)」羊土社.

# Processing を用いた感染シミュレーターの作成

5年C組 笠谷 悠豪

5年C組 坂本 悠

指導教員 高森 智子

## 1. 概要

Processing を用いてライフゲームの仕組みを利用した感染シミュレーターを作成した。その後、新型コロナ感染症と条件を等しくしてシミュレーションを行い、その結果と実際の感染状況を比較してシミュレーターの精度の評価を行った。

## 2. 研究理由

新型コロナウイルスの感染拡大の際、身近に使える感染シミュレーターがあれば、どのような感染が予想されるかを個人で知ることができ、感染症に対する評価をできると考えた。そこで、動作が軽く、誰にでも使用しやすいシミュレーターの開発を行うことにした。

## 3. 研究内容

### 3-1 Processing について

Processing とはプログラミング言語の一種である。Java を単純化しておりグラフィックに特化している。

Processing を用いた理由としては、視覚的な表現が行いやすい点と様々な OS

(Windows・Mac・Android 等) に対応している点などが挙げられる。

### 3-2 シミュレーションについて

今回のシミュレーターは、人をマスで表しており、そのマス目を正方形に生成している。人は以下の3つの中のいずれかの状態を取る。

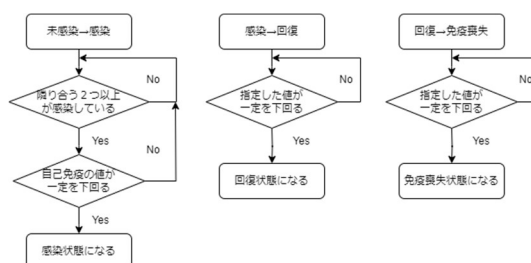
未感染者	感染しておらず免疫がない
感染者	感染している
回復者	回復し免疫を持っている

この3つの状態はそれぞれ対応した色に変化するようになって入る。

また、作成するパラメータとしては次の6つを設定している。

- ・マスクの大きさ
- ・初期の感染者の割合
- ・回復速度
- ・免疫喪失の速度
- ・世代変更の間隔
- ・自己免疫

またプログラムは以下のフローチャートに従って作成した。

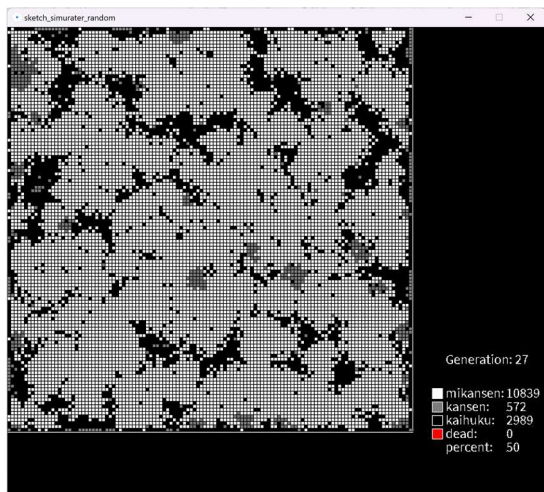


回復速度、免疫喪失の速度については指定した範囲で乱数を取り、指定した値を超えたら状態が変更されるという仕様になった

ている。また、自己免疫とは感染する確率を表したものであり、この値も同様に指定した値の中で乱数を取り、その乱数が指定した値を下回っていた際に感染するという仕様になっている。

### 3-3 シミュレーションの様子

先行研究のシミュレーターは各パラメーターが微分方程式で表されており、その確率に応じて他に感染していくという仕様だったのに対して、作成したシミュレーションには、隣り合う感染者の数に応じて感染するというようなわかりやすいアルゴリズムとなっている。また、それぞれの人の状況が色で区別されているため全体の変化が視覚的にわかりやすいという利点を得ることができた。(図1)しかし、第0世代においての感染者がランダムに生成されることによりシミュレーション結果に大きな差が出ることもあった。それに加え、ライフゲームの原理を利用しているため規則的な変化が生まれる場合もあった(図2)。



(図1) シミュレーションの様子



(図2) 円状に広がる感染者

## 4. シミュレーション結果と実際の感染状況との比較

今回は日本での第一波(2020年第13週~2020年第20週)での新型コロナ感染者の数値と感染シミュレーターの第1世代~第55世代の比較を行った。下の表は7日間の移動平均の値である。

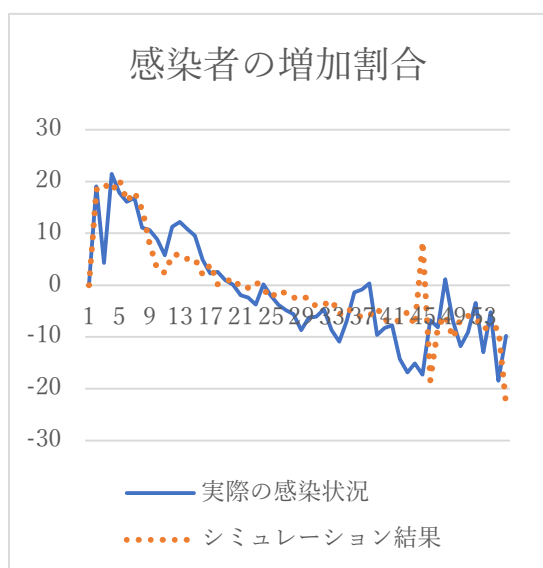
2020/3/22	93.14286	2020/4/10	533.7143	2020/4/29	213.4286
2020/3/23	110.8571	2020/4/11	523.2857	2020/4/30	195.7143
2020/3/24	115.5714	2020/4/12	510.8571	2020/5/1	180.4286
2020/3/25	140.4286	2020/4/13	491.7143	2020/5/2	154.7143
2020/3/26	165.4286	2020/4/14	492.2857	2020/5/3	128.5714
2020/3/27	192	2020/4/15	482.1429	2020/5/4	109.1429
2020/3/28	224.2857	2020/4/16	463.5714	2020/5/5	90.28571
2020/3/29	249.1429	2020/4/17	440.8571	2020/5/6	84.14286
2020/3/30	275.7143	2020/4/18	416.1429	2020/5/7	77.28571
2020/3/31	300.1429	2020/4/19	379.8571	2020/5/8	78.14286
2020/4/1	317.4286	2020/4/20	355.8571	2020/5/9	72.71429
2020/4/2	353.1429	2020/4/21	334	2020/5/10	64.14286
2020/4/3	398.1429	2020/4/22	318.4286	2020/5/11	58.28571
2020/4/4	438.7143	2020/4/23	290.7143	2020/5/12	56.28571
2020/4/5	480.5714	2020/4/24	258.8571	2020/5/13	49
2020/4/6	504	2020/4/25	240.8571	2020/5/14	46.42857
2020/4/7	515.1429	2020/4/26	237.4286	2020/5/15	37.85714
2020/4/8	528.2857	2020/4/27	235.4286	2020/5/16	34.14286
2020/4/9	533.2857	2020/4/28	236.1429		

(表1) 日本での第一波における感染者数の推移の移動平均

新型コロナ感染症において、発症2日前~発症10日後まで感染させることが可能であり、免疫は4か月から8か月持つと仮定しこの条件でシミュレーションを行った。なお、感染による死亡については、考えないものとしてシミュレーションを行っ



ている。結果は下のグラフのようになった。



(グラフ 1) 感染者の比較結果

グラフ 1 より実際の感染状況とシミュレーション結果はかなり近い値を取った。

## 5. 考察

シミュレーション結果と実際の感染状況がかなり近くなったため、作成したシミュレーションは十分な精度であると考えられる。この結果は、回復速度、免疫喪失のランダム化を実装する前のシミュレーターの誤差がかなり大きかったため、これらの仕様によって得られたものだと考えられる。

一方で、第 0 世代における結果の差異については今後改善方法を考えていく必要がある。

## 6. 今後の展望

シミュレーターとしての精度をさらに上げるために、感染におけるワクチンやクラスターなどの外部的要因の導入や感染者との距離に応じた感染率を変化させるなどの仕様も作成していきたい。

## 7. 参考文献

西浦 博・稲葉 寿(2006). 「感染症流行の予測：感染症数理モデルにおける定量的課題」. 『統計数理』. 54(2). 461-480

坂本 啓法(2017) 「SIR 感染症モデルのシミュレーター」

<https://sakapon.wordpress.com/2017/12/19/epidemic-simulator/>  
(2023-04-26)

厚生労働省, 新規陽性者数の推移 (日別), 2023-05-08

<https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/open-data.html>  
(2024-1-24)

国立感染症研究所感染症疫学センター, 日本における新型コロナウイルス感染症の流行波ごとの性別・年齢的特徴の疫学的検討, 2022-12-23

<https://www.niid.go.jp/niid/ja/typhim/iasr-reference/2605-related-articles/related-articles-514/11696-514r01.html>  
(2024-1-31)

土谷隆. “新型コロナウイルス感染症の広がりに関する一考察.” 2020-05-30 2020. 2020-05-30 (2020).

# カルマン渦と地球温暖化

5年B組 岸部 春輝  
指導教員 米田 隆恒  
藤野 智美

## 1. 要約

本研究では、地球の温暖化による地球の平均気温の上昇に伴うカルマン渦の挙動を考える。温度変化によるレイノルズ数への影響と、それをふまえた本渦体の運動、周波数の変化について調べた。

キーワード:カルマン渦, 地球温暖化, NS 方程式, アンドレードの粘度式

## 2. 研究の背景と目的

カルマン渦は規則的に発生し、建築物などに影響を及ぼすため、現在はそれを考慮した対策が講じられている。ところが、近年の地球温暖化による異常気象の急増により、様々な対策を見直す必要が出ている。カルマン渦の実被害は現在あまり見慣れないが考慮するべきだと思い本研究に至った。

## 3. 研究内容

### 3.1 カルマン渦の計算環境

#### 3.1.1 方針

カルマン渦のシミュレーションにあたり本研究で重要な数をおく。

慣性力と粘性力の比:  $Re$ (レイノルズ数)

周波数:  $f$

#### 3.1.2 計算するもの

本稿で用いる方程式は 2 次元非圧縮であるので

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ただし  $(u, v)$  は速度場の 2 次元ベクトル

$t$  は時間である。

(1) (2) を無次元化して整理すると

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu} \text{を用いることによって}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5)$$

のように整理できる。

これを、Mac 法 (時間ステップを 2 つに分解して解を更新) を利用してポアソン方程式をつくり計算解析をさせると、 $p$  についてポアソン方程式は

$$\nabla^2 p = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) p = - \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right\} = f \quad (6)$$

である。これを計算環境で再現した。

### 3.2 $Re$ に対する温度変化の影響

一般的に  $Re$  は動粘性係数  $\nu [m^2/s]$ 、密度を  $\rho [kg/m^3]$  流速代表値の円柱の直径か

ら  $Re = \frac{Ud}{\nu}$  である。また粘性係数  $\mu$  と動粘性係数  $\nu$  には  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

雲を単に液体の水であるとしてここでは考えるとアンドレードの粘度式を用い  $B$  比例定数、 $E_v$  粘性流動の活性化エネルギー、 $R$  気体定数、 $T$  絶対温度を用いて

$$\mu = B \exp\left(-\frac{E_v}{RT}\right) \quad (7)$$

表される方程式について

ある温度での粘度  $\mu_0$ 、温度変化後の粘度  $\mu'$  について計算すると

$$\mu_0 = B \exp\left(-\frac{E_v}{RT}\right) \quad (7^1)$$

$$\mu' = B \exp\left(-\frac{E_v}{RT'}\right) \quad (7^2)$$

とすると整理してまとめると

$$\ln \mu' = \frac{T}{T'} \ln \mu_0 \quad (8)$$

となるので  $T$  と  $\mu$  は反比例的に変化することがわかる。ここで  $Re$  は  $U, d$  が一定の時  $T$  が増加すると値が大きくなることがわかる。

### 3. 3 $Re$ と $St$ の関係

$St$  (ストローハル数) はカルマン渦が生成される時円柱で約 0.2 の値をとることが一般的に知られている。また  $St$  は  $f$  の導出過程であるので  $St$  を求めることにより周波数を求めることができる。ここで円柱の  $St$  数は  $Re$  数に対し依存性があるのでロシュコ (Roshko) の実験から約  $10^5$  までの値に対して以下の推測式は

$$St \approx 0.2035 \left(1 - \frac{21.0}{Re}\right) \quad (9)$$

が成り立つといわれていることから  $Re$  の値が増加すると  $St$  の値は増加することがわかる。ここで  $Re$  の値を変化させたときの周波数は

$$f = St \frac{U}{d}$$

から  $U, d$  が一定の時 (9) を踏まえて

$f, St, Re$  は一定の比をとるので

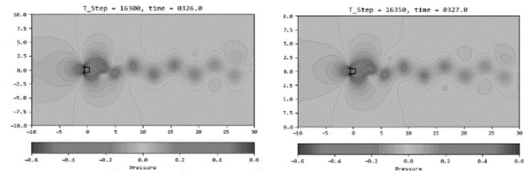
**周波数とレイノルズ数の関係**

( $Re = 70$  を基準とし  $f$  を 1 とする)

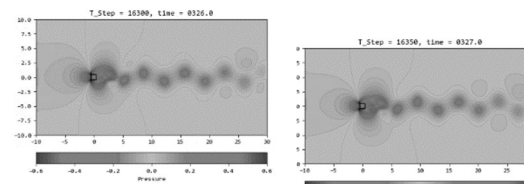
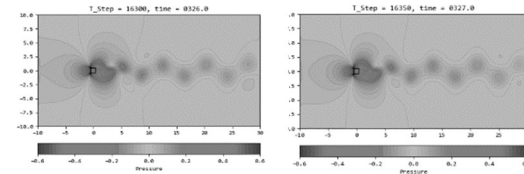
$Re$	50	70	80	200
$f$	0.9286	1	1.054	1.279

となった。これは  $Re$  の値に依存するので計算環境上で  $Re$  の値を変えて実装することにより確かめられる。

$Re = 70$

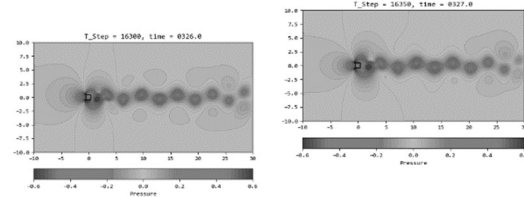


$Re = 60$



$Re = 80$

$Re = 120$



$Re$  の値が大きくなればなるほど渦の間隔が小さくなっていることがわかる。ここからカルマン渦の周波数は間接的に  $Re$  に支配されていることがわかる。

## 4. 結果

$T$  の値が増加することにより  $Re$  の値が大きくなりその結果  $f$  の値が微少だが変化するということが分かった。

## 5. 考察

今回は無次元数 $Re$ について温度変化による影響を考えたがこれでは外力としての熱エネルギーを考慮できていない可能性がある。

そのため 2次元非圧縮の外力項を含む NS 方程式を実装するべきだと思う。

## 6. 今後の展望

実装ができなかったが建物の固有振動数と $Re$ についての予測を立てる。

共振条件と $Re$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega_{Re}}{2\pi}$$

となることは一般的に知られている。

そこである物体（建築物）を仮想したときこの物体の固有振動数をフックの法則から

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (10)$$

から減衰係数を $c[N \cdot s/m]$ としたとき

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (11)$$

このときの減衰固有振動数 $\omega_d$ は

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

として求められるのでここで減衰を伴う強制振動に従うと求める強制振動による力の大きさ $F$ は

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F \sin \omega_{Re} t \quad (12)$$

定常振動の式を

$$x = x_a \cos(\omega t - \varphi) \quad (13)$$

から振幅 $x_a$ と位相 $\varphi$ について

$$x_a = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega_{Re}}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left\{2\zeta\left(\frac{\omega_{Re}}{\omega_n}\right)\right\}^2}} \frac{F}{k} \quad (14)$$

ここで一般的に $\frac{F}{k} = x_s$ とし $\frac{x_a}{x_s}$ の比をとるが

ここでは $F$ の値を求めるために振幅 $x_a$ を一定とすると(14)は以下のように

$$F = x_a k \sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega_{Re}}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left\{2\zeta\left(\frac{\omega_{Re}}{\omega_n}\right)\right\}^2} \quad (15)$$

ここから $\frac{\omega_{Re}}{\omega_n} = a$ とすると

$F$ に対しての変数 $a$ の変化を表す代表式は

$$(1 - a^2)^2 + (2\zeta a)^2 \quad (16)$$

ここで

(i)  $0 < a \leq 1$ のとき

(16)の値は $a \rightarrow 0$ になるにつれ1に近づきまた $a = 1$ で最小値をとる

(ii)  $1 \leq a$ のとき

(16)の値は $a$ の値の増加につれ発散するしたがって $F$ は $\omega_{Re}$ つまり $f$ の増加につれ大きくなる。

∴ $F$ の値と $T$ の温度上昇は相関関係が見られると予想できる。

## 7. 参考文献

栗田 良夫 カルマン渦流量計(1979)

京都大学 2次元粘性流体のシミュレーション(1999)

構造計画研究所 固有振動数とは

(株)小野測器 減衰特性を表す係数

量子プロセス理工学専攻 強制振動

FC2 Home 流体力学

N.Miyamoto FE-19-TM-007 種々の断面形状における渦励振のストローハル数

二次元・非圧縮性・完全流体の力学(ラグランジュの渦定理とは何か)

気象庁気象研究所 雲の微物理過程の研究

## 8. 謝辞

今回の研究にあたり、顧問の米田先生、藤野先生にご指導いただきました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

# 紙飛行機の形状の最適化

5年A組 西畑 匠翔  
指導教員 藤野 智美  
米田 隆恒

## 1. 要約

本研究は風洞装置を用いて紙飛行機の翼にかかる揚力を求め、紙飛行機がより長く滞空することのできる形状を模索した。

## 2. 実験の背景と目的

探究のきっかけは幼少期のころに何度も製作し、投げたことのある紙飛行機が、どのような力の作用を受けて滑空しているのか、どのような形状が最も長く飛ぶのか疑問に思ったことである。

そこで飛行機が滑空する理由に揚力が大きく関係していることを知り、風洞装置を用いてどのような条件で最も揚力が大きくなるのかを求め、長く飛ばすことに特化した形状を模索することを目標とした。

## 3. 研究内容

### 3-1 紙飛行機に作用する力

紙飛行機が滑空する原理には、機体にかかる「揚力」「抗力」「重力」「推力」の4方向の力が関係している。「推力」は流体の中を移動する時に進行方向に作用する力、「重力」は機体にかかる下方向の力、「抗力」は流体の中を移動する時に空気の流れと平行で同じ向きに作用する力、「揚力」は流体の中を移動する時に機体の進行方向に対して垂直に作用する力である。

### 3-2 研究概要

紙飛行機の水平に対する角度や形状を変

え、揚力の大きさを測定する。使用する折り紙は1辺150mm、厚さ0.1mmの正方形の紙を使い、図2の形状を基準として実験を行う。ストローを用いた風洞装置を利用することで扇風機による乱れた風を一定にし、装置内の電子天秤の皿の中心に紙飛行機をのせて、重さの変化を測定する。

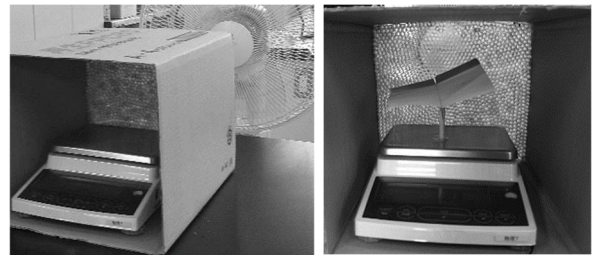


図1 風洞実験の様子

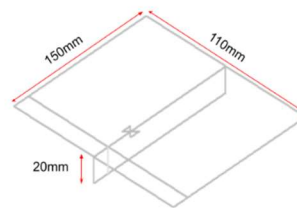


図2 基準となる紙飛行機の形状

### 3-2-1 実験1

紙飛行機が水平となす角度の違いによる揚力の違いを測定する。紙飛行機は図3の①を使用する。紙飛行機と水平の角度が30°、35°、40°、45°、50°、60°のそれぞれについて測定する。機体を電子天秤の皿の中心に

取り付け、扇風機を使用して弱い風を送り、しばらくしてから 10 秒ごとに電子天秤の値を記録する。図 4 の縦軸（揚力）は、機体がある場合の測定値から、電子天秤のみの場合に風を当てた場合の測定値の平均値 1.69g を引いた値である。横軸を角度、縦軸を変化した重さ（揚力）とするグラフにプロットして、揚力が大きくなる角度を見る。

	重量 (g)	翼弦 (mm)	翼幅 (mm)	胴体 (mm)
①	1.36	100	110	20

図 3 実験 1 で使用する機体

[実験 1 の結果]

角度が 45° の時に最も揚力が大きくなった。0° <  $\theta$  < 45° の時はグラフは上昇していき、45° <  $\theta$  になると徐々に減少した。

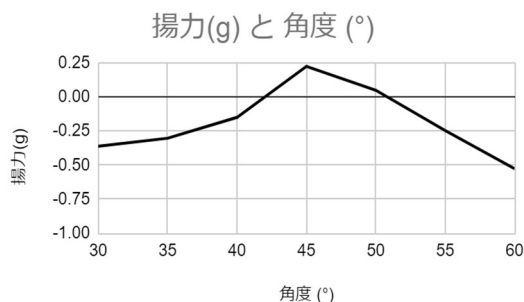


図 4 角度と揚力の関係

### 3-2-2 実験 2

翼弦の長さによる揚力の違いを求める。図 5 の①～⑤のように展開時の翼幅が 110mm で翼弦がそれぞれ 80mm、90mm、100mm、110mm、120mm の紙飛行機を電子天秤の皿の中心に水平に設置し、扇風機を用いて風を送る。しばらくしてから動画を撮影し、撮影した動画から 0.1 秒ごとの値を記録する。図 4 と同様に測定した値と電子天秤自身の風による値の変化の差を求め、縦軸を変化した重さとし、横軸を時間と

するグラフにプロットして揚力が大きくなる翼弦の長さを見る。

	重量(g)	翼弦(mm)	翼幅(mm)	胴体(mm)
①	1.36	100	110	20
②	1.36	80	110	20
③	1.36	90	110	20
④	1.36	110	110	20
⑤	1.36	120	110	20

図 5 実験 2 で使用する機体

[実験 2 の結果]

翼弦 (mm)	80	90	100	110	120
平均(g)	-0.24	0.42	0.22	0.09	0.54

図 6 翼弦と揚力の関係の平均

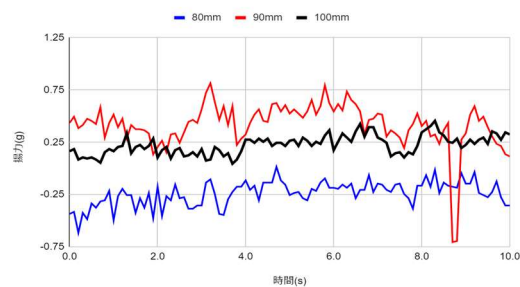


図 7 翼弦と揚力の関係  
(80mm,90mm,100mm)

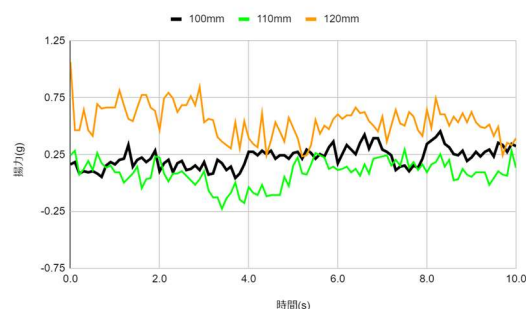


図 8 翼弦と揚力の関係  
(100mm,110mm,120mm)

翼弦の長さが 120mm の時、最も揚力が強く働いた。一方翼弦の長さが 80mm の時は

最も揚力が弱くなった。しかし、翼弦が110mmの時も100mm時に比べて揚力が弱く働いているので翼弦が長くなると揚力が大きくなるわけでもないことが分かる。

### 3-2-3 実験3

翼幅による揚力の違いを求める。機体の翼幅をそれぞれ90mm、100mm、110mmとする。図8の①、⑥、⑦の機体を水平に電子天秤の皿の中心に設置し、扇風機を用いて風を送る。しばらくしてから動画を撮影し、撮影した動画から0.1秒ごとの値を記録する。測定した値と電子天秤の風による値の変化との差を求め、時間を横軸とし、変化した重さを縦軸とするグラフにプロットして翼幅による揚力の差を見る。

	重量(g)	翼弦(mm)	翼幅(mm)	胴体(mm)
①	1.36	100	110	20
⑥	1.36	100	100	20
⑦	1.36	100	90	20

図9 実験3で使用する機体

[実験3の結果]

翼幅の長さが90mmの時に最も揚力が強く働いた。しかし翼幅が100mmの時は110mmに比べて揚力は弱く働いた。

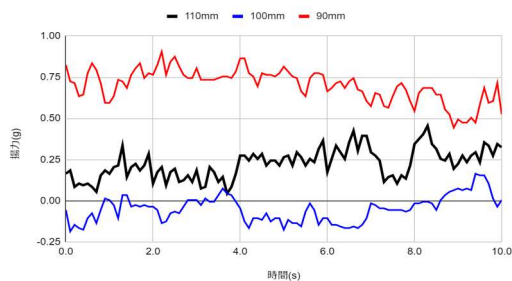


図10 翼幅と揚力の関係

## 4. 考察・今後の展望

実験2、実験3の結果より翼が水平の場

合の翼弦の長さや翼幅と揚力は相関がなく、別の要因が関係していると考えられる。しかし、翼弦と翼幅の比率が1:1である④と⑥の機体では揚力の値が基準としている①の機体よりも低くなる結果となった。そこで、縦軸を揚力、横軸を翼弦/翼幅となるグラフにプロットすると、図10の3次関数のような形をとるグラフになった。以上のことから翼の縦横比をできるだけ大きくするか、揚力が極大値となる縦横比の形状にし、地面から45°の角度をつけて投げるとより長く飛ぶと予想する。

今後の展望として翼弦と翼幅の比と揚力のグラフが3次関数または4次関数のようなグラフになるのか調べていきたい。また、翼の形状を長方形だけではなく三角形や円の場合の揚力の変化を調べていきたい。

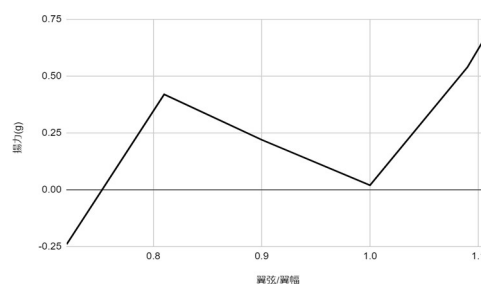


図11 翼弦と翼幅の比率と揚力の関係

## 5. 謝辞

本研究にあたり、藤野先生、米田先生には多大なご指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。

## 6. 参考文献

- [1]国土交通省 飛行の航空力学
- [2]河内啓二 揚力と抗力
- [3]翼の形状の違いによる揚力・抗力の違い  
<http://oishi.info.waseda.ac.jp/odawara2016/H10.pdf>

# Unity の強化学習を用いた学校の避難経路の最適化

5年B組 妙井 柁太  
指導教員 高森 智子

## 1. 要約

本研究では地震が発生した際にどの経路が最適な避難経路となるかについて、Unity を用いて本校を再現し、機械学習を用いて、シミュレーションを行う。

## 2. 研究の背景と目的

本校の避難訓練において、階段付近で生徒が混雑していたことがあったため、より早く避難することのできる経路があると考えた。また、本校の避難経路として使用されていない屋上を使用したほうが早く避難が完了するのではないか、二次災害で使用できなくなる可能性のある通路のうち、最も影響が大きくなる通路はどこであるのかと考えた。これらを踏まえ、地震発生時においてどの経路が最適となるかを検証することを目的とする。

## 3. 研究内容

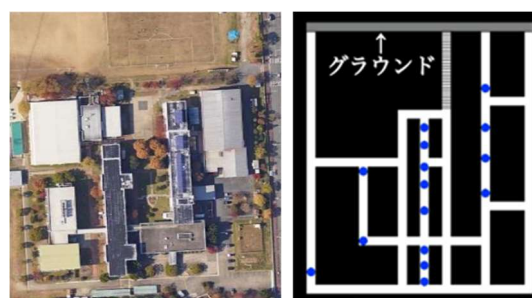
### 3-1. 強化学習とは

強化学習とは、AI を用いて、報酬を得たり失ったりする条件を定められた学習環境で反復試行をし、経験を元に学習を重ね、報酬を最大化する行動を取るようになっていくという機械学習の1つである。強化学習には様々な種類があるが、今回は深層強化学習を用いる。

### 3-2. 設定

#### ①通路の作成

Unity 内で校内の通路を簡略化したものを作成する(図1)。



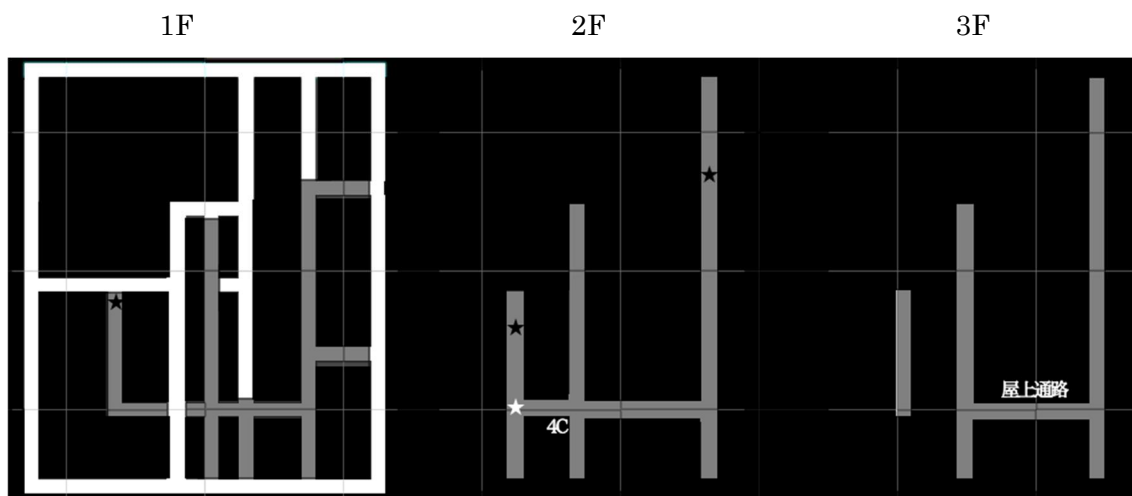
(図1)本校の航空写真(左)と Unity 内の本校(右)

#### ②生徒の移動について

避難の際は、生徒がクラス単位で避難すると定義し、クラスを玉として Unity 内で扱う。すべての生徒が同時に避難を開始し、移動速度は等しく一定である。通路の幅が広いと考えられる百年広場(図の横線部分)を通過している最中は、生徒の移動速度が2倍に上昇する。

生徒は乱数により1~4の数を常に決定し続けており、次に進む方向を1~4の数に対応する上下左右から選び続けている。分岐に到達したり、他の生徒と接触したりすると、選んだ方向へと進行方向を変更する。ただし、学習の進行に連れて、乱数ではなく経験に基づいて1~4の数字を決定するようになる。また、グラウンドまで一直線の通路などの一部の通路は一方通行である。





(図 2)Unity 内の本校 1~3 階

### ③報酬について

各生徒は、避難中の生徒の人数分だけ負の報酬を常に受け取る。また、建物の内部(図 2 の灰色の部分)にいる生徒の人数分だけより多い負の報酬を受け取る(建物外にいる生徒の約 4 倍の負の報酬を受け取る)。グラウンド(図 1 右上)に到達した生徒は消えて避難完了となる。よって、生徒は避難中の生徒の数がより少なくなるような経路を選ぶようになっていく。

### ④試行について

10 回の試行につき 1 回判断を更新し、約 1 万回試行を行う。

また、二次災害で使用できなくなる通路として、英語科準備室、多目的ホール及び多目的ホール前、図書室、化学教室前を設定した(図 2 の★☆の箇所)。これらの箇所が使用できない場合についても検証する。

### 3-3. 結果

強化学習で得られた最適な避難経路は、本校の実際の避難経路と比較して、概ね一致しているということが分かった。

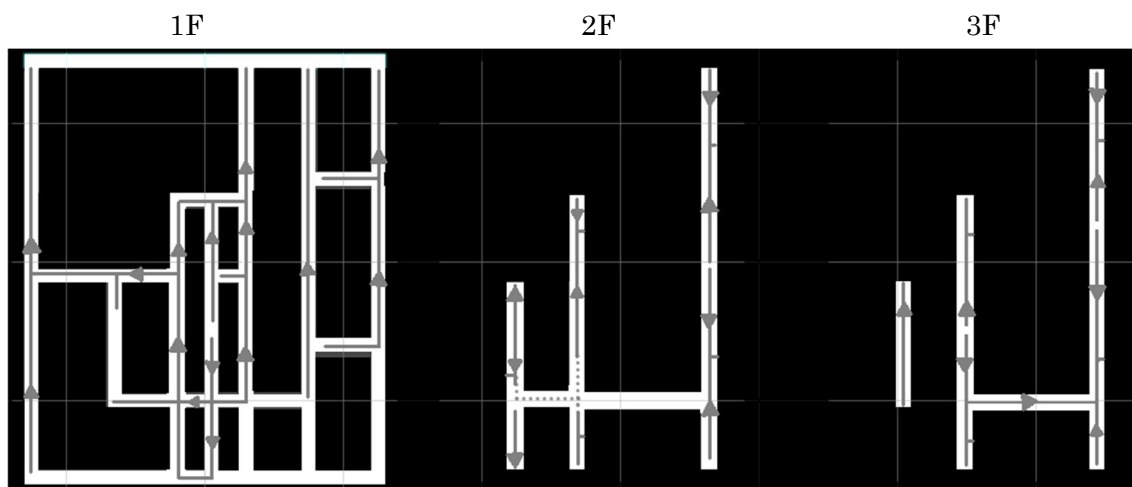
3 階にいる生徒の一部は屋上を通る経路を利用した方がよく、1 階で生徒は非常に混雑するため、複数の通路から分散して避難するとよい。

本校の避難経路について、使用できなくなった際に最も遅延が生じるのは多目的ホール及び多目的ホール前(図 2 の☆の箇所)であったが、本校の避難経路と比べて今回の経路は 4C の生徒が多目的ホール前を通らずにそのまま 1 階に降りる経路を選択したため、あまり影響がなかった。

避難に所要した時間については、本校の避難経路で避難した場合に、避難完了まで約 20 秒かかり、強化学習で得られた避難経路を使用した場合、約 2 秒短縮される。

## 4. 考察

今回の結果と実際の避難経路を比較すると、今回の結果では生徒が混雑してでも強引に 1 階まで降りてから避難しようとしている様子が見えたため、生徒の報酬の設定や、Unity 内での設定を改良し、現実により近い状況を作成して検証する必要があると考えられる。



(図 3) 本校の避難経路(点線)と、強化学習後の避難経路(実線)

今回のシミュレーションの結果から、屋上を使用できる場合については使用したほうが避難完了が早くなるという結果ではあったが、屋上につながる扉が災害の影響で使用できない状態にあった場合は使用できない。また、屋上に繋がる扉が、横に並んだ生徒2人が問題なく同時に通れる広さではないため、屋上を使用することで混雑してしまう可能性もあるので、実際に人が通るとどうなるかについては現実で検証する必要があると考えた。

## 5. 今後の展望

シミュレーション内の動きと現実の動きを比較した際に、上記のような課題が見つかったため、改善して再び検証していく必要がある。具体的には、混雑を避けるよう行動させるために生徒同士の接触でも負の報酬を与えたり、強引に外に出ようとする行動を減らすために建物内に生徒がいる場合の負の報酬を緩和したり、現実における避難に近づけるために階段の使用にクールタイムを設けたりすることで、現実に近い検証を行う。その一方で、機械学習は設

定次第である程度希望通りの結果を出すことができってしまうため、報酬の設定については今後も改善を重ねる必要がある。

また、今回の研究では建物を本校に指定したが、設定のみを移植して建物を変更することで、様々な建物で避難経路を最適化することができると思う。

## 6. 参考文献

- [1] 布留川英一、Unity で始める機械学習・強化学習 Unity ML-Agents 実践ゲームプログラミング、株式会社ボーンデジタル(2020)
- [2] STUDIO SHIN、たのしい2Dゲームの作り方 Unity ではじめるゲーム開発入門、翔泳社(2021)
- [3] 藤田零・吉田秀典・堀宗朗・M. L. L. Wijerathne、土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 71, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 18), I\_643-I\_654, 2015.  
地震による建物被害を考慮した 避難行動シミュレーション  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/71/2/71\\_I\\_643/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/71/2/71_I_643/_pdf)

2023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

2024年(令和6年)3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/>