

令和 7 年度 実施報告書

探究プログラムⅡ

CDプログラムⅡ

海外科学研修

静岡市立高等学校

科学探究科 14 期生

■探究プログラムⅡ（課題研究）

	研究テーマ	頁
1	教室の最適な座席配置の発見	1
2	ダイラタンシー現象と粒径の関係について	5
3	サボテンを用いた銅イオンの除去	9
4	シマミミズによるマイクロプラスチックの分解	13
5	食品廃棄物の再利用～リモネンの抗菌効果を高める～	17
6	任意の色の人工オーロラの生成	21
7	プラナリアの生存と金属イオンの関係	25
8	乳酸菌と酵母菌の共培養～土台と沈殿物形成量の関係～	29
9	ゲーミング反応での色のグラデーション変化	33
10	代表的抗酸化物質の機能性評価	37
11	音楽がカイワレに及ぼす成長効果	41
12	平方根の平方根連分数展開	45
13	BZ反応におけるメタノールの影響の数理解析	49

■CDプログラムⅡ（研修・フィールドワーク）

早稲田大学 先端生命医科学センター(TWIns)研修	53
つくば科学研修	55
放射線医療研究 特別講義	57

■海外科学研修

海外科学研修①	59
海外科学研修②	62

教室の最適な座席配置の発見

1 研究背景

教室で授業を受ける際、座席によって快適さに不公平が生じているのではないかと考えた。そこで、全員が快適に授業を受けられないかと考え、本研究を行った。参考文献¹⁾では、4つの要素について関数化を行っていた。その評価関数に座席の座標を代入し、算出された値の合計を各座席配置の点数とし、その点数の総和を座席配置全体の点数とした。現在の座席配置（以下、ノーマル型と表記）全体の点数と、人為的に作成した座席配置全体の点数を比較したところ、後者の座席配置全体の点数の方が高い結果となった。この結果から、参考文献の方法を用いることで、より良い座席配置を発見できると考察した。考察を踏まえ、私たちは新たに関数と条件を追加することで、より快適な座席配置を発見できると考えた。本研究の遂行にあたり、Pythonプログラムのコード作成には生成AI（ChatGPT）を利用した。生成AIはプログラミングの補助として使用し、研究のテーマ設定、設計、実験、結果の分析についてはすべて自分たちで行った。

2 研究目的

先行研究を、Pythonを用いてGoogle Colab上で再現し、さらに新たな評価関数と条件を追加することで生徒全員が快適に授業を受けられる座席配置を発見する。

3 実験方法

(1) 手順1

教室を座標空間とみなし教室のデータを取った。

(2) 手順2

参考文献¹⁾の4つの評価関数に加え、新たに評価関数⑤および⑥を追加し、それぞれの算出値を正規化したうえで重みをかけ、その合計を「座席配置の点数」とした。すべての席の座席配置の点数の総和を「座席配置全体の点数」とした。また参考文献¹⁾では、②③④の評価関数は詳しい式が明記されていなかったため、自分たちで解釈して立式を行った。

ア 評価関数① 教師の声の聞こえやすさ (図1)

$$L_p = L_w + 10 \log_{10} \{ 1 / (4\pi r^2) + 4 / R \}$$

(生徒に届く教師の声の大きさ L_p [dB]、教師の声の大きさ

L_w [dB]、教師と生徒の距離 r [m]、教室定数 $R = SP / 1 - P$ (教室
内総表面積 S [m²]、吸音率 P)、教室定数 R)



図1 評価関数①のイメージ

イ 評価関数② 黒板の文字の判別のしやすさ (図2)

$$\theta = | \arctan \{ (A_{top} - Z_{eye}) / D \} - \arctan \{ (A_{bot} - Z_{eye}) / D \} |$$

(黒板上の文字を見る視角[°]、黒板の文字上端の高さ A_{top} [cm] :

170cm、生徒の目の高さ(生徒の平均座高とする) Z_{eye} [cm] : 120cm、
生徒から黒板までの水平距離 D [cm]、黒板の文字下端の高さ
 A_{bot} [cm] : 160cm)

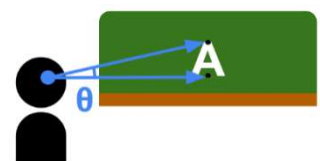


図2 評価関数②のイメージ

本式は、生徒が黒板上の文字をどの程度の大きさで見えるかを評価するものである。

ウ 評価関数③ 黒板の見やすさ (図3)

$$\cos\alpha + \cos\beta = (D / \sqrt{K^2 + D^2}) + D / r_1$$

(黒板の中心を見るための仰角 α 、黒板の中心を見るための首のふり幅の角度 β 生徒から黒板までの水平距離 D [cm]、定数 (目線から文字の中央までの高さの2乗) K^2 : 2025、生徒と文字を垂直に下ろし、目線と同じ高さになったときの文字の中央との直線距離 r_1 [cm])
本式は、生徒が黒板の特定の一点を見る際の身体的負担を評価するものである。

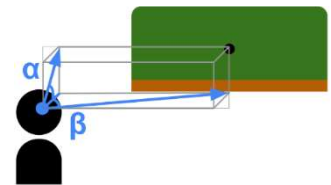


図3 評価関数③のイメージ

エ 評価関数④ 生徒が見える黒板の面積 (教師が遮蔽物) (図4)

$$T = 1 - (Occ / Aboard)$$

(重なり面積 : Occ 、黒板の総面積 : $Aboard$)

本式は、生徒が黒板全体を見る際に、教師が黒板前方に立つことによって生徒の視界から遮られる黒板面積の割合を評価するものである。

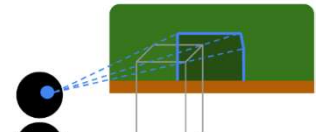


図4 評価関数④のイメージ

オ 評価関数⑤ 生徒が見える黒板の面積 (前方の生徒が遮蔽物) (図5)

S

本式は、生徒が黒板全体を見る際に、前方の生徒が視界を遮ることで見えなくなる黒板面積の割合を評価するものである。この追加した評価関数の式は、評価関数④と同じ要領で式を構築した。

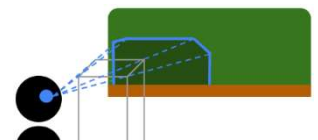


図5 評価関数⑤のイメージ

カ 評価関数⑥ ペアワークのしやすさ (図6)

$$P = \exp(-d/\sigma)$$

(ネイピア数 e : 2.71828..., 最も距離が近い座席との距離 d [cm]、定数 σ : 80.0)

本式は、生徒同士の距離が近いほどペアワークが行いやすいことを評価するものである。

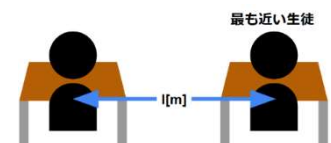


図6 評価関数⑥のイメージ

(3) 手順3

Google Colab の環境下において、座席のランダム配置を生成し、その点数を計算する試行を1000回行った。これにより、最も高い点数を得た座席配置を抽出し、これをノーマル型と比較した。

4 データの詳細と座席配置の条件

(1) 今回用いた教室のデータ

教室の幅 : 7.7m、奥行き : 8.6m、高さ : 2.8m

黒板の下端の床からの高さ : 1.1m、黒板の高さ : 1.1m、黒板の幅 : 5.4m

黒板の左端の左側の壁からの距離 : 1.1m、黒板の右端の右側の壁からの距離 : 1.2m

教師が主に立つ位置 (左側の壁からの距離) : 3.85m

評価関数④の直方体と見立てた教師の横幅、奥行き、高さ : 35cm、20cm、180cm

評価関数⑤の直方体と見立てた生徒の横幅、奥行き、高さ : 50cm、60cm、120cm

以下の値は参考文献¹⁾の値を引用した。

教室の壁の吸音率 : 50% 生徒の平均座高 : 1.2m 教室定数 R : 55.93

教師の声の大きさ：60dB 教師が書く文字の大きさ：10cm

(2) それぞれの評価関数にかけた重み

①～④のかけた重みは、参考文献¹⁾の重みの割合を保持している。⑤、⑥のかけた重みは、本研究では同じ影響力を持っていると考え、同じ値にしてある。評価関数の値と重みを掛け合わせた、重みつき1次結合により各座席の点数を算出した。

① Lp	② θ	③ cos	④ T	⑤ S	⑥ P
0.10	0.21333...	0.23333...	0.12	0.16666...	0.16666...

(3) 座席配置の条件

- ア 机同士の重なりなし。
- イ 机の後方は65cmのスペースを確保する。
- ウ 幅40cmのロッカーがあるスペースは座席を配置できない。
- エ 2つの座席を横に連結させる。

5 結果と考察

Google Colab で得られた座席配置を以下、ランダム型と表記する。ノーマル型とランダム型の座席配置全体の点数を比べると、ランダム型のほうが点数が高かった。したがって、ランダム配置は、現在の座席配置よりも良い座席配置であると考えられる。

下の座席配置を見ると、教室の前方よりも後方のほうが点数が高くなっていることから、評価関数⑤が座席配置全体の点数に大きく影響を与えていると考えた。また、教室の隅よりも中央の点数が高くなっていることから、評価関数③も点数に大きく影響を与えていると考えた。下図7、8は実際の机のNo、点数を表している。また得点の高低に応じて机の色分けを行っている。

表1 座席配置全体の点数

	点数 (点)
ノーマル型	16.773
ランダム型	20.523

6 展望

試したいことは様々あるが、1番は、実用性を高めるために座席配置の条件を追加することだ。現在の座席を配置するための条件は4つしかないが、ここからさらに条件を追加していき、さらに、授業の快適さに加え、実用性も考慮した座席配置を発見していきたいと考えている。

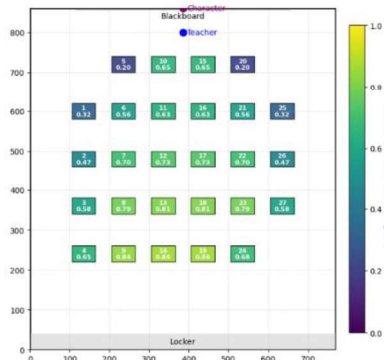


図7 ノーマル型 16.773 点

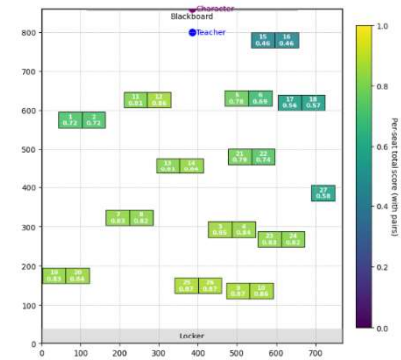


図8 ランダム型 20.523 点

7 参考文献

- 1) 広島大学付属高校、座席配置システムの開発
<https://www.musashino-u.ac.jp/academics>

教室の最適な座席配置の発見

背景

私たちの教室の座席配置は授業を受ける際の快適さで不公平が生じている。

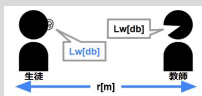
全員が快適に授業を受けることができないのか？

参考文献の研究内容

座席配置の点数化するために、4つの要素を関数化していた。以下は参考文献で使われた4つの評価関数である。

評価関数① 教師の声の聞こえやすさ

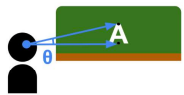
$$L_p = L_w + 10 \log_{10} \{ 1 / (4\pi r^2) + 4 / R \}$$



生徒が教師の声をどれくらい聞きやすいかを音圧によって評価する式である。

評価関数② 黒板の文字の判別のしやすさ

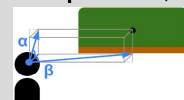
$$\theta = | \arctan \{ (A_{top} - Z_{eye}) / D \} - \arctan \{ (A_{bot} - Z_{eye}) / D \} | \times$$



生徒の見る黒板上の文字の見え方を評価する式である。

評価関数③ 黒板の見やすさ

$$\cos \alpha + \cos \beta = (D / \sqrt{K^2 + D^2}) + D / r \times 1$$

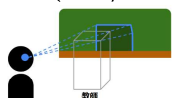


生徒が黒板のある一点を見る際の身体負担を評価する式である。

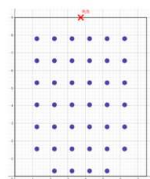
評価関数④ 生徒が見える黒板の面積

$$T = 1 - (Occ / Aboard) \times$$

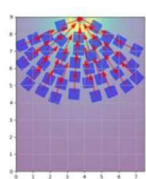
生徒が黒板全体を見る際、教師が黒板の前方に立つことによって、生徒が見ることができない黒板の面積の割合を評価する。



教室を座標空間とみなし、4つの評価関数にそれぞれの座席の座標を代入し、算出された値に正規化を行い、重みをかけた値の合計値を「座席配置の点数」としていた。



現在の座席配置



人為的に配置した座席配置

	点数 (点)
現在の座席配置	17.85
人為的に配置した座席配置	25.98

この手法を使うことで最適な座席配置が発見できると考えた。

新しい評価関数と座席配置の条件を追加することで、より良い座席配置が見つかるのではないかと考えた。

※自分たちで解釈して式を立てた

目的・仮説

目的：教室の最適な座席配置の発見

仮説：新たな関数や条件を加えると、最適な座席配置の発見ができる

参考文献

- 1) 広島大学付属高校、座席配置の評価システムの開発、(2024)
<https://www.musashino-u.ac.jp/academics>
- 2) ゼロからPython入門講座
<https://www.python.jp/train/index.html>
- 3) 階層分析法「AHP」の考え方とPythonによる実装
<https://logics-of-blue.com/ahp-concept-and-implementation-by-python>

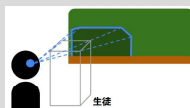
実験方法

- (1) 教室を座標空間とみなし、教室のデータを取る。
- (2) Google Colabで座席をランダムに配置するシステムを作成する。
- (3) 要素を関数化し、各席の座標を代入して値を出し、正規化、重み付けを行い、すべての席の合計点数を座席配置の点数とする。
- (4) この操作を1000回繰り返し、最も点数が高かった座席配置（以下、ランダム型）と現在の教室の座席配置（以下、ノーマル型）の点数を比較する。

<追加した評価関数>

評価関数⑤ 前方の生徒で隠れる黒板の面積

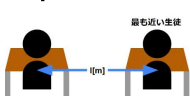
$$S = 1 - (O'cc / Aboard)$$



生徒が黒板全体を見る際、前方の生徒によって、後方の生徒が見ることができない黒板の面積の割合を評価する。

評価関数⑥ ペアワークのしやすさ

$$P = \exp(-d / \sigma)$$

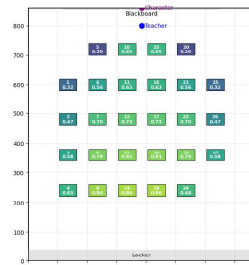


最も近い生徒との距離によって、ペアワークのしやすさを評価する式である。

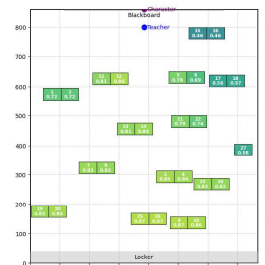
<追加した条件>

1. 机同士の重なりなし
2. 机の後方は65cm以上スペースを確保する
3. ロッカーがあるスペース（教室背面から45cm）には座席を配置できない
4. 2つの座席を連結させる

結果・考察



ノーマル配置



ランダム配置

① Lp	② θ	③ cos	④ T	⑤ S	⑥ P
0.10	0.21333	0.23333	0.12	0.16666	0.16666

かけた重みの値

	点数 (点)
ノーマル配置	16.773
ランダム配置	20.523

座席配置における合計点数

ランダム型の方がノーマル型よりも点数が上がったことより、作成したプログラムでの合計点数上では、より良い座席配置を発見することができたと言える。

しかし、本研究では生徒間の視力や聴力などを考慮せず、すべての生徒が同一の特性を持っていると仮定したため、人間の主観的な特性においては反映できていないと考えられる。

さらに、評価関数①や⑥は点数に大きな差を生じるため、これらの評価関数の物理量が妥当なものだったとは言えないと考えた。

ダイラタンシー現象と粒径の関係について

1 研究背景

流体力学に関する文献を調べたところ、非ニュートン流体（加える力の強さによって粘度が変化する液体）に分類されるダイラタンシー現象に関する論文¹⁾を見つけて興味を持った。ダイラタンシー現象とは混合物にせん断応力（物体の内部にある断面に対して平行に働く力によって生じるすべりに抵抗する内力）がかかることによって混合物中の粒子が整列し、体積が膨張することで表面の水を取り込み、混合物表面が乾燥することで流体の流動性がなくなる現象である。ダイラタンシー現象は片栗粉と水の混合物で発生することが知られており、私たちはコーンスターチやその他のデンプン粉でも同様の現象が観測されることを知り、研究を開始した。

2 目的

デンプン粉には様々な種類があり、原料になる植物によって粒径の大きさに違いが出る。そのため、粒径が異なる複数のデンプン粉を用意し、粒径の大きさとダイラタンシー現象の関係について調べるため、3種類の実験を行った。

3 仮説

一般的に用いられているダイラタンシーのモデル図（Fig. 1）から、粒子の半径によってダイラタンシー現象の起こりやすさがどのように変化するかを調べた。このとき、力を加える前と

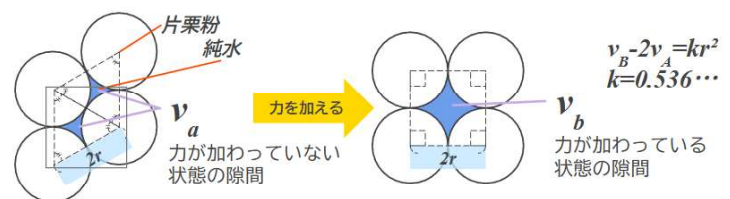


Fig. 1 ダイラタンシーのモデル図

力を加えた後での粒子間の隙間の面積の差を計算し求めたところ、粒子間の隙間の大きさは粒子の半径の2乗に比例することが分かった。粒子間の隙間が大きいほど、水をより多く取り込むことができ、より素早くダイラタンシー現象が起こると考えたため、「粒径が大きくなるほどダイラタンシー現象に関する測定値も大きくなる」という仮説を立てた。

4 本実験

(1) 実験 1

ア 方法

デンプン粉と純水の混合物を直方体状の容器に注ぎ込み、液面から 30cm 真上から鉄球を落下させた。鉄球が混合物の液面に接触し、液面から視認できなくなるまでの沈降時間をデン

ブン粉と純水の比率を変えて測定した。また、この実験を片栗粉、コーンスターチ、タピオカ澱粉で同様に行った。

イ 結果

Fig. 2 から、純水の量が 32g では粒径の大きい順に沈降時間が長く、仮説通りであった。また、それ以降はコーンスターチの沈降時間が片栗粉よりも長くなり、仮説と矛盾した。

ウ 考察

Fig. 2 より、水の量が 36g を超えると、ダイラタンシー現象が起こりにくくなる。これは、粒子間の隙間が水を取り込めなくなるためである。この実験で測定しているのはあくまで混合物の粘性であり仮説で述べたダイラタンシー現象に関する測定値とは言えないと考え、新たに圧力計を使った瞬間の圧力の測定実験を行った。

(2) 実験 2

ア 方法

デンプン粉と純水の混合物を円柱状の容器に注ぎ込み、液面から 5 cm 上空から圧力計を落下させた。デンプン粉と純水の比率を変えて圧力を測定した。また、この実験を片栗粉、コーンスターチ、タピオカ澱粉で同様に行った。

イ 結果

Fig. 3 から、純水量 75g 以外の 3 つのデータで 3 種のデンプン粉は 3.3N にデータが固まっている。

ウ 考察

3 種類のデンプン粉の測定結果はおおよそ変わらず、純水の量を変化させたとしてもかかる圧力に違いがみられないことも分かった。そのため、デンプン粉(50g)に加えた純水の量(g)と圧力計にかかる圧力 (N) の関係からはダイラタンシー現象の違いを測定できないことが分かった。

(3) 実験 3-1

ア 方法

デンプン粉 100g と純水 65 g の混合物を円柱状の容器に注ぎ込み、真上から圧力計を落下させた。液面から 4 cm、6 cm、8 cm、10cm の 4 か所から落下させ、3 種類のデンプン粉を用いて測定した。

イ 結果

Fig. 4 から、片栗粉とタピオカ澱粉の測定された圧力に違いは見られなかったものの、コーンスターチは他 2 つのデンプン粉と違いが出た。

ウ 考察

顕微鏡写真 (Fig.5) で片栗粉とタピオカ粉の共通点、2 つのデンプン粉とコーンスター

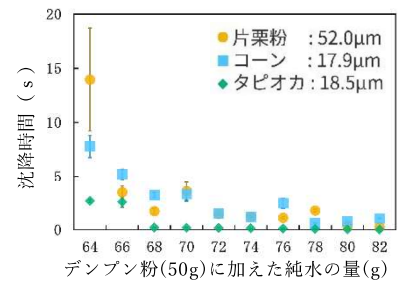


Fig. 2 実験 1 の結果

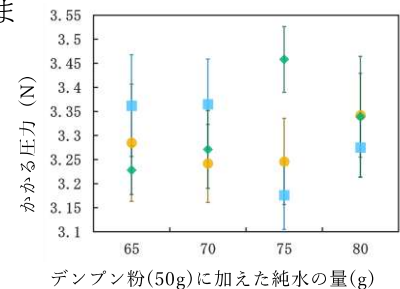


Fig. 3 実験 2 の結果

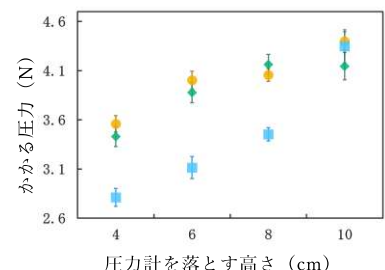


Fig. 4 実験 3-1 の結果

● 片栗粉 23.3μm (×350) ■ コーン 10.1μm (×700) ◆ タピオカ 9.61μm (×700)

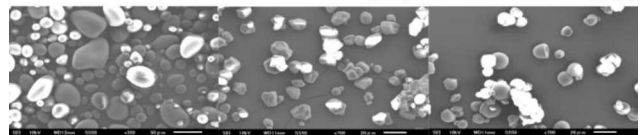


Fig. 5 デンプン粉の顕微鏡写真

チの相違点を調べたところ、片栗粉とタピオカ澱粉のデンプン粉の粒形は丸みを帯びているのに対して、コーンスターチは角ばっていることが分かった。そのことから、粒径の大きさではなく形状にダイラタンシー現象は関係しているのではないかと考えた。

(4) 実験 3-2

ア 方法

実験 3-1 と同様の方法で今度は葛粉を加えて片栗粉、コーンスターチの再測定と葛粉の測定を行った。

イ 結果

片栗粉 2 つのデータ間で分散分析・多重比較を行ったところ、2 つの実験に違いは見られなかった。またコーンスターチ 2 つのデータ間で同様に行ったところ、2 つの実験も違いがみられず、再測定した結果は片栗粉、タピオカ澱粉と測定した値にも有意差がなかった。そして片栗粉、コーンスターチ、葛粉の 3 つのデータ間で行ったところ、3 種類のデンプン粉には決定的な違いがみられなかった。

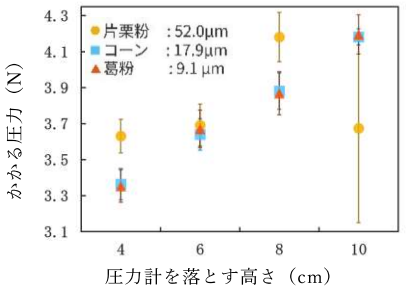


Fig. 6 実験 3-2 の結果

Table 1 実験 3-2 の多重比較

	片栗粉	コーン	葛粉
4	×	×	×
6	×	×	×
8	×	×	×
10	×	×	×

ウ 考察

粒子の形状によってダイラタンシー現象の起こりやすさに影響があるという可能性は少ないと考えられる。

5 結論

3 種類の実験の結果から粒径の大きさや形状が直接的にダイラタンシー現象に影響を及ぼしている可能性は低いと考えられる。

6 参考文献

1) ダイラタンシー～鉄球の自由落下を用いたダイラタンシー性の比較と、抵抗力を示すダイラタンシー流体の構造の考察

<https://www.kyoto-be.ne.jp/rakuhoku-hs/mt/ssh/pdf/PDFFile05263349.pdf>

最終閲覧日 2026 年 2 月 2 日(月)

ダイラタンシー現象と粒径の関係について

1.研究背景¹⁾

先行研究では、ダイラタンシー現象と流体に使うデンプン粉の粒径の関係について言及されているものがなかった。

そのため、複数の粒径の異なるデンプン粉を用意し、先行研究と同様の実験を行った。

2.ダイラタンシー現象とは

せん断応力がかかることで粒子の配列が規則的になる。すると、流体の体積が膨張する。体積が膨張したことで隙間が生まれ、流体表面の水を取り込み、表面が乾くことで流体が固くなる現象。

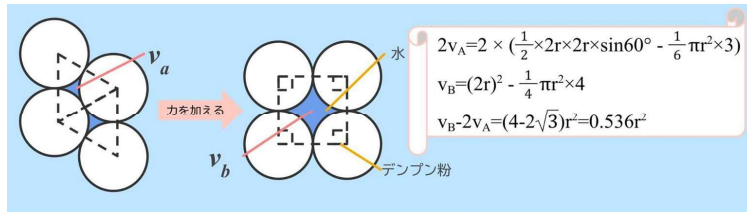


Fig. 1 ダイラタンシー現象についてのモデル図

3.研究の目的と仮説

本研究は、デンプン粉の粒径の違いに応じたダイラタンシー現象の変化について調べる事を目的とし、モデル図（Fig. 1）を参考に「粒径が大きくなるほどダイラタンシー現象に関する測定値も大きくなる」という仮説を立てた。

4.実験1 | 鉄球の沈降時間測定

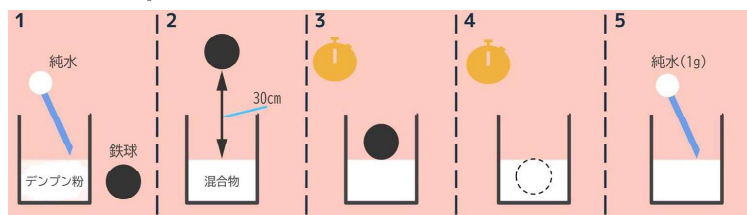
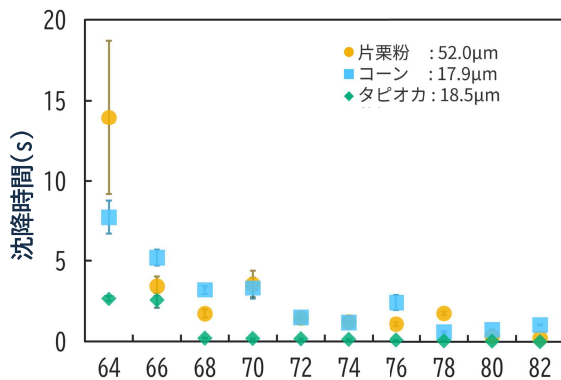


Fig. 2 鉄球の沈降時間の測定方法



デンプン粉の質量を100としたときの純水の量(単位なし)

Fig. 3 沈降時間測定の結果

～沈降時間の測定値からの考察～

コーンとタピオカは粒径の大きさがほとんど同じであるにもかかわらず、沈降時間に差がある。

そのため、粒径だけでなく他の原因がダイラタンシー現象に影響しているのではないかと考えた。

また、純水の量が72を超えると、ダイラタンシー現象が起こりにくくなり、測定値の差も見られなくなる。

さらに、実験1で測定した結果はあくまで流体の粘性であり、仮説で述べたダイラタンシー現象に関する測定値とは言えないのではないかと考えた。

5.実験2 | 圧力計による落下速度別の圧力測定

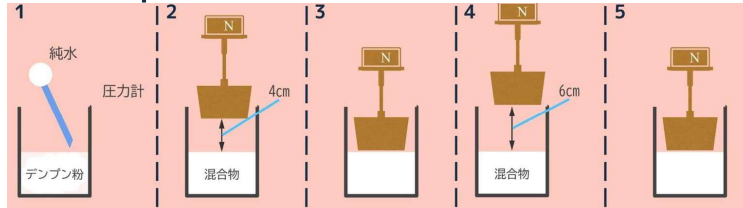


Fig. 4 落下速度別の圧力測定方法

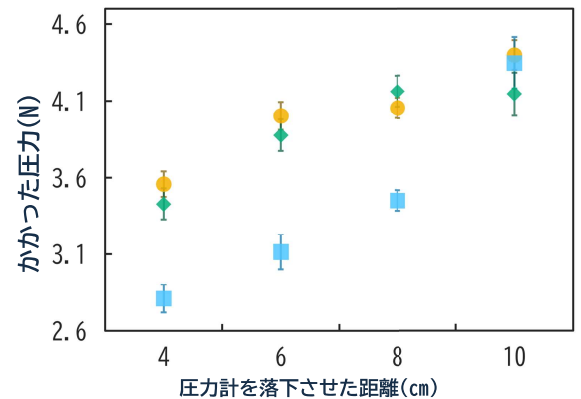


Fig. 5 1回目の圧力測定の結果

～1回目の圧力測定の結果からの考察～

片栗粉とタピオカ澱粉の有意差は見られなかったが、2つとコーンスターチの測定値には違いがみられた。その違いは粒径の大きさではなく別の要因があると考えた。

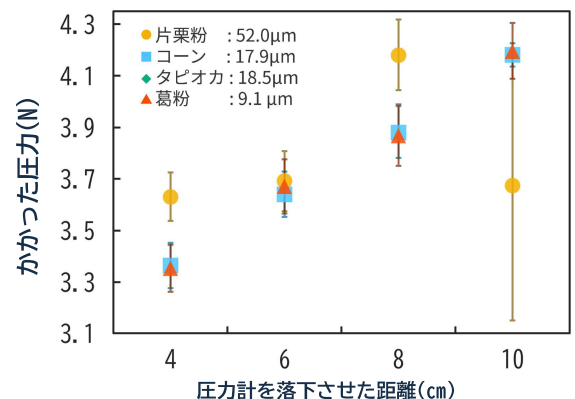


Fig. 6 2回目の圧力測定の結果

Table1 各落下距離、デンプン粉の粒径を比較した測定値の差の有無

	●	■	▲	▲	●	◆	■	◆	▲	◆
4	×	(0.570)	×	(1.000)	×	(1.000)	×	(0.513)	×	(1.000)
6	×	(0.053)	×	(0.453)	×	(1.000)	×	(0.139)	×	(1.000)
8	×	(0.737)	×	(0.310)	×	(1.000)	×	(0.840)	×	(1.000)
10	×	(0.287)	×	(1.000)	×	(0.687)	×	(0.823)	×	(1.000)

～2回目の圧力測定の結果からの考察～0.05>pで有意差有り

コーンスターチを再測定した結果、他3種類のデンプン粉との有意差は見られなくなった。また、新たに葛粉を加えて実験を行ったが、葛粉も他3種類のデンプン粉との有意差が見られなかった。

6.結論と展望

粒径の大きさがダイラタンシー現象に与える影響は小さいことが分かった。

本研究で扱った実験では圧力を一度だけかけ、データの測定を行ったが、圧力を持続的、連続的に与えたときに、測定値がどのような挙動をするのかも調べたい。

7.参考文献

¹⁾ダイラタンシー～鉄球の自由落下を用いたダイラタンシー性の比較と、抵抗力を示すダイラタンシー流体の構造の考察
<https://www.kyoto-be.ne.jp/rakuhoku-hs/mt/ssh/pdf/PDFFile05263349.pdf> 最終閲覧日2026年2月10日(火)

サボテンを用いた銅イオンの除去

1 動機

サボテンは重金属蓄積性植物の一種であり、複数の重金属に対して強い耐性を持つことが知られている¹⁾。また、近年植物の力で汚染土壌を浄化する「ファイトレメディエーション」という環境修復技術が注目されている²⁾。そこで、サボテンをこの技術に応用できるのではないかと考えた。サボテンは温度変化や環境変化に強く、実験材料としても扱いやすい。特に、ウチワサボテンの一種である金烏帽子 (*Opuntia microdasys*) は成長速度が速く、金烏帽子の重金属耐性についての研究例は見当たらなかったため、本研究ではその耐性を調べることを目的とした。

2 実験内容

(1) 実験1 重金属の違いによるサボテンの吸収量の変化

ア 目的

サボテンを異なる重金属水溶液につけた際の吸収量の違いを明らかにする。

イ 仮説

重金属の種類によってサボテンの吸収量は異なる。

ウ 方法

1. CuSO_4 、 CoCl_2 、 NiSO_4 で0.05mol/Lの水溶液100mLをそれぞれ作成し、50mLに分けて、サボテンを水耕栽培する水溶液と水耕栽培しない水溶液の2つの溶液を作った (Fig. 1)。このときサボテンの重さが約5gになるように調節した。
2. 7日間日の当たる場所で静置した。
3. 分光光度計で溶液の吸光度を計測した。また、サボテンなしの濃度を0.05mol/Lとし、それをもとにサボテンありの濃度を算出した。

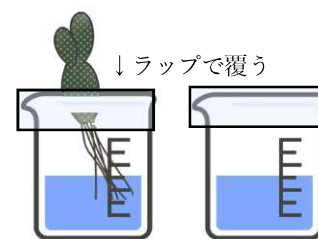


Fig.1 サンプルの様子

エ 結果

Table1 重金属の違いによるサボテンの吸収量

	サボテンなし濃度 [mol/L]	サボテンあり濃度 [mol/L]	初期濃度との比較 [%]	吸収量 [mmol]	吸水量 [mL]
CuSO_4	0.050	0.048	97	0.469	7.69
CoCl_2	0.050	0.050	100	0.190	3.80
NiSO_4	0.050	0.054	108	0.070	5.00

CoCl_2 溶液のサボテンには体表にピンク色の結晶がみられた。

オ 考察

- CuSO_4 溶液において、サボテンを入れた場合の濃度は、サボテンを入れていない場合よりも低かった。この結果から、サボテンが Cu^{2+} を選択的に吸収していると考えられる。
- CoCl_2 溶液において、サボテンを入れた場合の濃度は、サボテンを入れていない場合の濃度と同じだった。この結果から、サボテンが Co^{2+} を溶液と同じ割合で吸収していると考えられる。

- ・NiSO₄溶液において、サボテンを入れた場合の濃度は、サボテンを入れていない場合の濃度より高かった。この結果から、サボテンがNi²⁺の吸収を抑制していると考えられる。

(2) 実験2 環境基準程度の重金属濃度でのサボテンの吸収量の変化

ア 目的

環境基準程度の濃度において、サボテンによる重金属の吸収量の違いや、サボテンの状態の変化について調べる。

イ 仮説

重金属の種類によって、サボテンによる金属イオンの吸収量は異なる。

ウ 方法

1. CuSO₄、CoCl₂、NiSO₄の水溶液 100mL をそれぞれ作成し、50mL に分けてサボテンを加える溶液と加えない溶液の2つの溶液を作った (Fig. 1)。
2. 7日間日の当たる場所で静置した。
3. ICP-MS を用いて溶液の濃度を測定した。また、サボテンなしの濃度を初期濃度とし、それをもとに結果を比較した。

エ 結果

Table2 環境基準程度の重金属濃度でのサボテンの吸収量の

	環境基準濃度 ³⁾ [mmol/L]	サボテンなし 濃度 [mmol/L]	サボテンあり 濃度 [mmol/L]	初期濃度 との比較 [%]	吸収量 [mmol]	吸水量 [mL]
CuSO ₄	1.967	1.985	1.769	89	23.20	3.66
CoCl ₂	4.259×10^{-3}	4.856×10^{-3}	9.021×10^{-4}	19	0.2060	5.18
NiSO ₄	4.242×10^{-3}	4.253×10^{-3}	6.961×10^{-5}	2	0.2096	2.76

オ 考察

CuSO₄、CoCl₂、NiSO₄のいずれの溶液においても、サボテンを入れた場合の濃度は、サボテンを入れていない場合よりも低かった。この結果から、サボテンはCu²⁺、Co²⁺、Ni²⁺をそれぞれ選択的に吸収していると考えられる。

CuSO₄溶液の初期濃度比較がCoCl₂溶液やNiSO₄溶液の初期濃度比較に比べて高い割合を示したのは、銅の環境基準濃度がコバルトやニッケルの環境基準濃度と比べて非常に高いためであると考えられる（吸収量[mmol]で比較すると、Cu²⁺は他の金属と比べ100倍以上吸収されている）。

(3) 実験3 混合溶液下でのサボテンの銅の吸収量の変化

ア 目的

混合溶液中におけるサボテンの金属イオン吸収の挙動を調べる。

イ 仮説

混合溶液中においてサボテンは他の金属イオンが存在していてもCu²⁺を吸収する。

ウ 方法

1. 3種の溶液で陽イオンのモル濃度が一定になるように、CuSO₄ (0.05mol/L) と Na₂SO₄ (0.025mol/L)、CuSO₄ (0.05mol/L) と KCl (0.05mol/L)、CuSO₄ (0.05mol/L) と MgSO₄ (0.05mol/L) の混合溶液をそれぞれ 100mL 作成し、50mL に分けてサボテンを水耕栽培する水溶液と加えない水溶液を作った (Fig. 1)。

2. 7日間日の当たる場所で静置した。
3. 実験1と同様の方法で Cu^{2+} の濃度を算出した。

エ 結果

Table3 混合溶液下でのサボテンの銅の吸収量の

	サボテンなし 濃度 [mol/L]	サボテンあり 濃度 [mol/L]	初期濃度との 比較 [%]	吸収量 [mmol]	吸水量 [mL]
$\text{CuSO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$	5.000×10^{-2}	5.016×10^{-2}	100	0.2453	5.05
$\text{CuSO}_4 + \text{KCl}$	5.000×10^{-2}	4.830×10^{-2}	97	0.4090	6.71
$\text{CuSO}_4 + \text{MgSO}_4$	5.000×10^{-2}	4.793×10^{-2}	96	0.4045	6.28

オ 考察

すべての混合溶液で Cu^{2+} の吸収が確認されたことから、サボテンは他の金属イオンが存在していても銅を吸収すると考えられる。

3 結論

実験1より、サボテンは銅を他金属よりも多く吸収していると判明した。実験2より、低濃度下でも銅の吸収は顕著にみられた。実験3では、混合溶液下でも銅を吸収することが確認された。

実際の土壌は金属が低濃度で存在し、多くの種類の金属が同時に存在する。したがって、土壌中でもサボテンは銅を吸収できると考えられる。

4 展望

本研究では水溶液条件下におけるサボテンの金属吸収について明らかにしたが、実際の土壌環境での挙動については依然として不明である。水耕条件と土壌条件では、金属の形態や移動性、根圏環境が大きく異なるため、今後は実際の土壌を用いた栽培実験を実施し、サボテンが土壌中の金属に対して示す吸収特性や耐性の比較を行う必要がある。さらに、金属種および溶液濃度によってサボテンの金属吸収量の変動する要因についても詳細な検討が求められる。これらのメカニズムを解明することで、サボテンを用いたファイトレメディエーション技術の最適化や実用化に向けた基礎的知見が得られると考える。

5 謝辞

本研究の実施に際し、静岡県環境保健研究所の皆様には多大なるご支援を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

6 参考文献

- 1) 堀部貴紀ら 「サボテンの環境ストレス耐性機構に関する基盤的研究」

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-20K15629/20K15629seika.pdf>

(最終閲覧日 2025 年 12 月 18 日)

- 2) 萩野激・遠藤祐司 「植物の金属成分蓄積に関する基礎資料」

https://opac.std.cloud.iliswave.jp/iwjs0007opc/bdyview.do?bodyid=TC11110778&elmid=Body&fname=gshr80_133_139.pdf&loginflg=on&once=true (最終閲覧日 2025 年 12 月 18 日)

- 3) 環境省「土壌汚染基準 別表」

<https://www.env.go.jp/kijun/dt1.html> (最終閲覧日 2025 年 12 月 18 日)

サボテンを用いた銅イオンの除去

研究背景

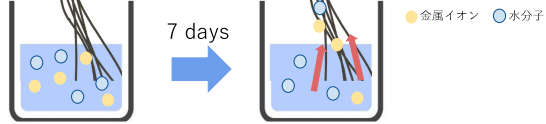
- ・植物を用いた環境修復技術がある。
(ファイトレメディエーション)
- ・サボテンは重金属を吸収し強い耐性を持つ。

重金属汚染の浄化に活用できるのではないかな。

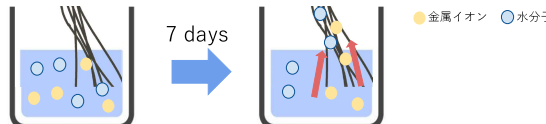
実験 1

< 目的 > サボテンはどの種類の重金属を吸収するのか調べる。

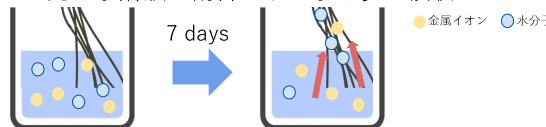
濃度が低下した → 元の水溶液の割合よりも金属を多く吸収



濃度が変化していない → 元の水溶液と同じ割合で水と金属を吸収



濃度が上昇した → 元の水溶液の割合よりも水を多く吸収



< 方法 >

1. 各水溶液を0.05mol/L に調製し、サボテンあり、サボテンなしの2種類のサンプルを作った。
2. ビーカーをラップで覆い、7日間日光の下で静置した。
3. 分光光度計で吸光度を計測し濃度を算出した。

< 結果 >



< 考察 >

- Cu²⁺を選択的に吸収している。
- Co²⁺を水溶液と同じ割合で吸収している。
- Ni²⁺の吸収が抑制され、水を多い割合で吸収している。

実験 2

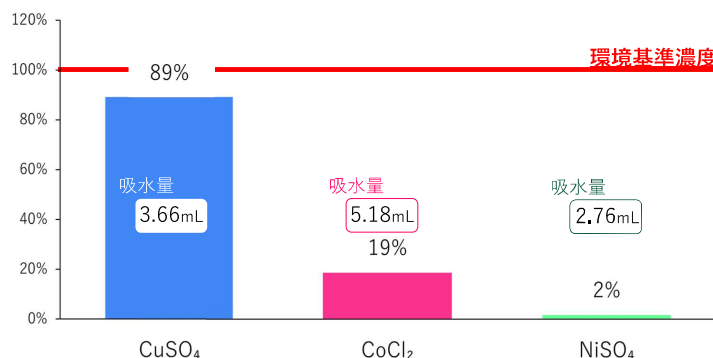
< 目的 > 環境基準程度の濃度でのサボテンの金属吸収量を調べる。

< 方法 >

CuSO ₄	0.04900g/L
CoCl ₂	0.00404g/L
NiSO ₄	0.00448g/L

1. 各水溶液で実験 1 と同様にサボテンを栽培した
2. ICP-MSを用いて濃度を測定した。

< 結果 >



< 考察 >

全ての金属において金属イオンを選択的に吸収していると考えられる。

実験 3

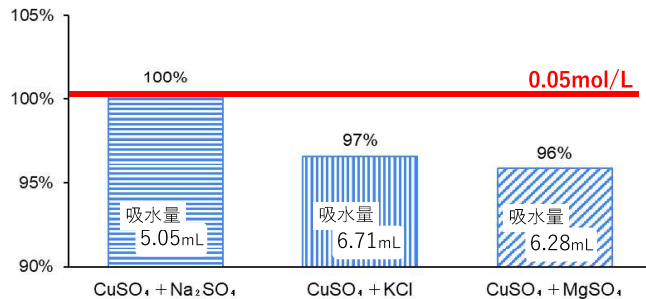
< 目的 > 混合溶液中におけるサボテンの金属イオン吸収の挙動を調べる。

< 方法 >

CuSO ₄ +Na ₂ SO ₄	0.05mol/L+ 0.25mol/L
CuSO ₄ +KCl	0.05mol/L+ 0.05mol/L
CuSO ₄ +MgSO ₄	0.05mol/L+ 0.05mol/L

1. 各水溶液で実験 1 と同様にサボテンを栽培した
2. 分光光度計で吸光度を測定し、Cu²⁺濃度を算出した。

< 結果 >



< 考察 >

すべての混合溶液でCu²⁺の吸収が確認されたことから、サボテンは他の金属イオンが存在していても銅を吸収すると考えられる。

実験 4

目的 サボテン内のどこにCu²⁺が蓄積されているか調べる。

< 方法 >

1. CuSO₄0.05mol/Lの水溶液で実験 1 と同様にサボテンを栽培した
2. サボテンを3つに分割し、ICP-MSを用いて部位ごとサボテン内のCu²⁺の濃度を測定した。



< 結果 >

	上部	下部	根付近
サボテン中Cu ²⁺ 含有濃度 (mg/g)	0.0032	0.0088	0.2980

< 考察 >

- ・上部は本来のサボテンの色に近く、下部ほど変色が見られた。
- ・水を吸収する根に近づくほど多くCu²⁺が含まれた。

Cu²⁺はサボテンに有害な影響を与える。

結論

実験 1 より、サボテンは銅を他金属よりも多く吸収していると判明した。実験 2 より、低濃度下では銅の吸収は顕著にみられた。実験 3 では、混合溶液下でも銅を吸収することが確認された。

実際の土壌は金属が低濃度で存在し、多くの種類の金属が同時に存在する。したがって、土壌中でもサボテンは銅を吸収できると考えられる。

展望

- ・サボテンが有害な重金属を吸収する理由をや仕組みを解明する。
- ・実際の汚染土壌でも今回の実験と同様に金属を吸収するか調べる。

謝辞

本実験の実施に際し静岡市環境保健研究所の皆様には多大なるご支援を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 堀部貴紀ら「サボテンの環境ストレス耐性機構に関する基盤的研究」
https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-20K15629/20K15629_seika.pdf (最終閲覧日2025年 5月26日)
- (2) 萩野激・遠藤祐司「植物の金属成分蓄積に関する基礎資料」
https://opac.std.cloud.iliswave.jp/iwjs0007opc/bodyview.do?bodyid=TC11110778&elmid=Body&fname=gshr80_133_139.pdf&loginflg=on&once=true (最終閲覧日2025年 9月24日)
- (3) 環境省「土壌汚染基準 別表」
<https://www.env.go.jp/kijun/dt1.html> (最終閲覧日2025年 9月24日)

シマミミズによるマイクロプラスチックの分解

1 背景と目的

近年、プラスチックゴミ問題が深刻化しており、5 mm 以下となった約 2200 万トンものマイクロプラスチックが土壌中や海洋中、大気中に流出しほぼ永久的に残留してしまうことで自然環境へ様々な悪影響をもたらすことが問題となっている。さらに食物連鎖を通じて人間に悪影響を与えていることも懸念されている¹⁾。

そこで、私たちは落ち葉や枯れ草などの有機物を主食とするシマミミズ (*Eisenia fetida*) に目を付けた。シマミミズは先行研究よりプラスチックを摂食することが明らかになっている¹⁾。また、このミミズの腸内から分離された放線菌の一種 (*Streptomyces fulvissimus*) が、植物由来の生分解性プラスチックである PLA (ポリ乳酸) を分解する可能性がワーヘニンゲン大学の研究で報告されている⁴⁾。またその一方で、シマミミズは高濃度のマイクロプラスチックを含む土壌に対して回避行動を示すことも分かっている²⁾。

プラスチックを分解できる生物として他にも、チャイロコメノゴミムシ (*Tenebrio molitor*) の幼虫 (ミールワーム) やハチノスツヅリガ (*Galleria mellonella*) の幼虫 (ワックスワーム) などが知られているが、シマミミズは 5~10 cm 程度で寿命が 1~2 年と長く、世界中に広く分布しており、飼育も容易で実験材料として適していると考えた。また、シマミミズは有機物に対する分解能力が高く、コンポストに利用できることで注目が集まっている。地球規模の様々な社会問題が生じている中、家庭から排出される生ゴミと身近に生息するシマミミズを利用し、プラスチックを処理することで持続可能な社会の実現につながるのではないかと考え、以下の実験を行った。

2 研究方法

(1) 実験I 非生分解性プラスチックを摂食するかを観察する

ア 実験器具と材料

- ・ PS (ポリスチレン) ビーズ (粒径: 2 mm) ・ 寒天粉 ・ スクロース
- ・ ラップ ・ シマミミズ (ミミズキングレギュラー/有限会社はなまる) 12 匹
- ・ 土 (「有機園芸の土」/刀川平和農園) ・ 恒温器 (AS ONE)
- ・ 双眼実体顕微鏡 (ケニス株式会社)

イ 手順

水 1238 mL、寒天粉 13.6 g、スクロース 108.8 g の寒天に低濃度・高濃度のポリスチレン (PS) ビーズを混合し、シマミミズを飼育した。寒天中での行動を観察した後、双眼実体顕微鏡を用いてミミズ消化管内における PS の有無を確認した。

(2) 実験II PLA が完全に分解されているかを確認する

ア 実験器具と材料

- ・ FT-IR (フーリエ変換赤外分光光度計/日本分光株式会社) ・ シマミミズ 6 匹
- ・ 恒温器 (AS ONE) ・ PLA パウダー (粒径: 300 μm)
- ・ PLA を含む土壌で育てたミミズのフン

イ 手順

PLA を含む土壌で 30 日以上シマミミズを飼育し、排出されたフンを回収した。そのフンと PLA そのものを FT-IR 分光光度計を用いて比較分析し、PLA が分解されているかを調べた。

(3) 実験Ⅲ 高濃度マイクロプラスチックに回避行動を示さない条件を探る

ア 実験器具と材料

- ・PLA パウダー（粒径：300 μm ） ・土 ・PE（ポリエチレン）パウダー（粒径：500 μm ）
- ・シマミミズ 42 匹 ・恒温器（AS ONE）
- ・生ゴミ（キャベツ、ニンジン、タマネギの皮、卵の殻、ピーマン）

イ 手順

3%低濃度 PLA 区画と 54g の生ゴミを加えた 18%高濃度 PLA 区画を設け、中央にシマミミズを 10 匹配置した。22℃・75%（ $\pm 5\%$ ）の恒温器（暗室）に入れ、24 時間後、どちらの区画に何匹いるか確認した。また、別日に別個体で同様の実験をし、PLA に加えて非生分解性プラスチックであるポリエチレン（PE）についても同様の方法で検証した。

(4) 実験Ⅳ プラスチックを含む土壌下での影響を調べる

ア 実験器具と材料

- ・PLA パウダー（粒径：300 μm ） ・PE パウダー（粒径：500 μm ） ・ガラス棒
- ・シマミミズ 12 匹 ・土 ・恒温器（AS ONE） ・電子天秤（SIHNKO）
- ・生ゴミ（キャベツ、ニンジン、タマネギの皮、卵の殻、ピーマン）
- ・容量 200 mL のプラスチックカップ 12 個 ・ミキサー

イ 手順

3 つの条件で（土のみ、土+PLA、土+PLA+生ゴミ）に合わせて、各 4 つ用意した容器でシマミミズを一匹ずつ飼育し、1 週間ごとに体重を測定してシマミミズの生育への影響を調べた。また、PE でも同様の方法で検証した。

3 結果と考察

実験Ⅰではミミズが粒径 2 mm の PS の摂食を確認できた（Fig.1）一方で翌日ミミズが死んでしまった。死亡した原因の追及にはさらなる実験が必要だと考えられる。



消化管内の PS

Fig.1 PS を摂食したミミズ

実験Ⅱではエステル結合が減少し、ヒドロキシ基が増加した。

自然界では PLA は分解されるまで数年を要すると言われているので、今回の PLA はミミズが PLA を加水分解して、24~72 時間程度で分解まで行ったと考えられ、自然条件下よりも約 230~700 倍の速さで PLA を分解できると示唆された³⁾。先行研究の結果と合わせてもこれは腸内細菌によるものだと考えられる⁴⁾。また、有機物である生ゴミがミミズの活動を促進したことから実験Ⅰでミミズが 2 mm 程度のプラスチックを摂食したことから選択的にミミズが摂食を回避しているのは考えづらい。

実験Ⅲでは χ^2 検定より高濃度の PLA と生ゴミを含む区画 B にむしろ統計的に有意に選好することが

明らかになった（ $p < 0.05$, $p = 0.029$ ）。また、PE の実験でも高濃度の PE に生ゴミを加えた区画 B に対し統計的に有意に選好する傾向が見られたことから（ $p < 0.01$, $p = 0.000003$ ）、高濃度マイクロプラスチックに対する忌避作用よりも生ゴミへの誘引作用の方が強かったと考えられる。

実験Ⅳでは PLA の場合、b は土だけの a とほぼ同様の推移だったので（Fig.2）、PLA を栄養分として利用した割合は極めて低く、また同時に PLA がミミズの生育に悪影響を与えた可能性も低いと考えられる。また、c は生ゴミを加えたことで a と b より栄養分が増えたため体重増加の



Fig. 2 PLA での選好実験

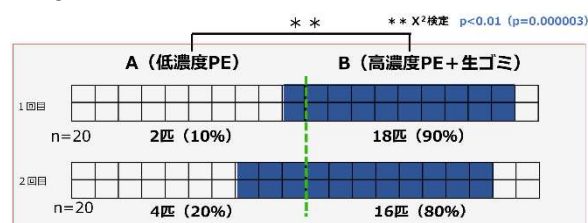


Fig. 3 PE での選好実験

割合が大きくなったと考えられる。一方で PE を加えた場合では、b では 1 週間目から体重の減少が見られた (Fig.3)。この原因として、非生分解性プラスチックである PE は加水分解されにくく、ミミズの接触行動が阻害や腸内環境の悪化の可能性があるため、今後の実験で分解しているか確認する必要があると考える。また、ワックスワームが PE を数時間以内で生分解することが報告されていることからシミミズが PE を分解することも可能性としてはあると考えている。PLA と PE の 2 週目以降の体重減少は、市販の土に化成肥料が含まれていたことや生ゴミの腐敗、土壌細菌が十分に増殖していないこと、それらによる土壌 pH の変化が原因だと考えられる。

4 結論

生ゴミを加えた土壌では、高濃度プラスチック中でも生育し、プラスチックの摂食・分解を行う。また、シマミミズは世界中に分布し飼育が容易で、高い有機物分解能力を持つことからミミズコンポストを活用することでプラスチックゴミ問題やフードロス問題を解決できる可能性が高い。

5 展望

生ゴミの腐敗では発生するアンモニアにより pH が塩基性傾くことを防ぐと考えられることから卵の殻の影響による土壌中の pH の変化とミミズとの関連を明らかにすることやシマミミズがより効率的にプラスチックを分解できるような土壌中の含水率、土壌温度、土壌肥沃度を数値化していきたい。また、非生分解性のプラスチックである PE や PS、ポリプロピレン (PP) を分解しているのかは本研究では明らかにできていないので、FT-IR やレーザーラマン分光装置を用いて分析、マイクロプラスチックを含む寒天中でシマミミズを一定期間飼育し、マイクロプラスチックの摂食量を明らかにする実験、土壌中のマイクロプラスチックの量を数値化する実験等をし、より実用的な研究につなげていきたい。

6 謝辞

静岡大学の竹本裕之先生や近藤満先生、プラスチックパウダーを無償提供していただきました日本ポリエチレン株式会社様、神戸精化株式会社様、株式会社セイシン企業様にはここに感謝を表します。

7 主な参考文献

- 1) 吉田颯人, 吉川勝由希, 原田海聖, 「ミミズによる土壌のマイクロプラスチック汚染の軽減〜ミミズは土壌汚染改善の救世主になるか〜」
- 2) 枝松伶真, 鈴木武志, 木田森丸, 藤嶽暢英, (2024), 「各種マイクロプラスチックがシマミミズ (*Eisenia fetida*) の回避行動に与える影響」『日本土壌肥料学会講演要旨集』第 70 号, 278-2 頁, 日本土壌肥料学会, 神戸大学大学院
- 3) 大澤敏, 附木貴行, 小川俊夫, (2001), 「ポリ乳酸/デンプンブレンド射出成型物の土壌中における分解制御」, 金沢工業大学大学院
- 4) Davi R. Munhoz, Ke Meng, Lang Wang, Esperanza Huerta Lwanga, Violette Geissen, Paula H, (2024), Exploring the potential of earthworm gut bacteria for plastic degradation, Elsevier B.V.

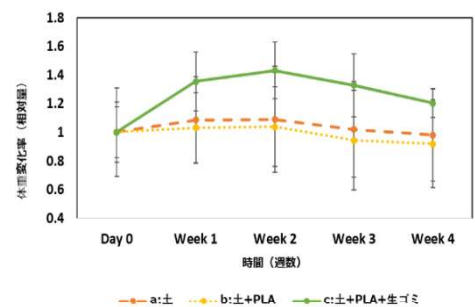


Fig. 4 PLA での成長率の変化

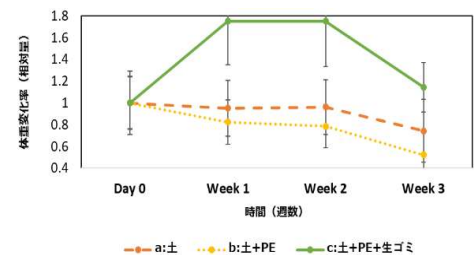


Fig. 5 PE での成長率の変化

シマミミズによるマイクロプラスチックの分解

研究背景

- プラスチックゴミ問題：人間への悪影響が懸念されている¹⁾。
- フードロス問題：CO₂排出や飢餓・貧困の悪化が見られる²⁾。
- シマミミズはプラスチックを摂食する³⁾。
- 土壤中プラスチック濃度が15%以上では回避行動が見られる⁴⁾。

結論

生ゴミを加えた土壌に対しては、高濃度のプラスチックに対して回避行動を示さず生育し、摂食・分解も行う。▶ ミミズコンポストへの応用が可能

材料 シマミミズ (*Eisenia fetida*) 環形動物門 貧毛綱 ナガミミズ目 ツリミミズ科

- 高い有機物分解能力をもち、土壌改良や堆肥化において重要な役割を担う。
- 飼育が容易である。
- 世界中に分布している。

体重：約0.45g
食性：落ち葉・腐植土等
寿命：1～4年
生殖：雌雄同体

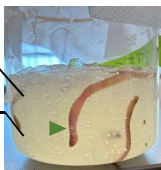


実験1・結果1

目的：摂食できるプラスチックのサイズを確認する。

温度 22℃
湿度 75%

寒天⁸⁾
PS (粒径2mm)



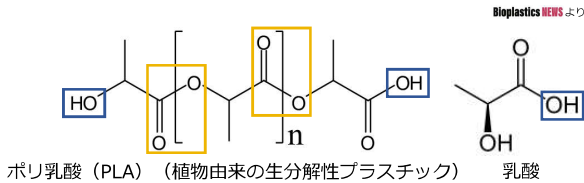
2mmのプラスチックを摂食できた

実験2

目的：PLAが本当に分解されているか確かめる。

- PLAとPLAを含む土壌で育てた30日以上飼育したミミズのフンを用意した。
- FT-IR分光光度計を用いて、各サンプルに赤外線を照射した。
- 赤外線の吸収のスペクトルから、分子の構造解析を行った。

結果2



エステル結合の減少、ヒドロキシ基の増加が見られた

考察2

- シマミミズは24～72時間程度で分解まで行っている。→腸内の放線菌 (*Streptomyces*属) によると思われる⁵⁾。
- 自然条件下よりも約230～700倍の速さで分解できる⁶⁾。

実験3-1

高濃度PLAよりも低濃度PLAに選好した

実験3-2

目的：高濃度PLAに回避行動を示さない条件を探る。

温度 22℃ 湿度 75% 暗室

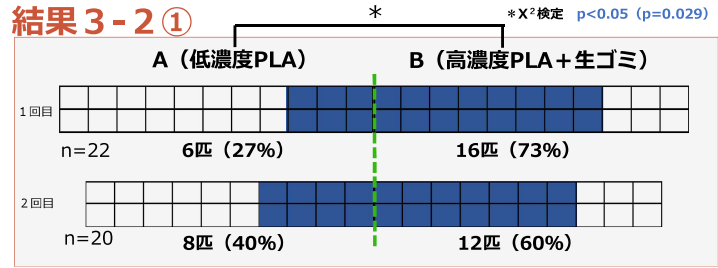
- 各区にPLA・土・生ゴミを混合した。
- 中央にシマミミズ10匹を配置した。
- 恒温器で24時間放置した。
- 各区のシマミミズ数を確認した (1回2セットを2回実施)。10匹配置



	PLA	生ゴミ	土
A	6.9g 低濃度(3%)	-	233g
B	41g 高濃度(18%)	54g	189g

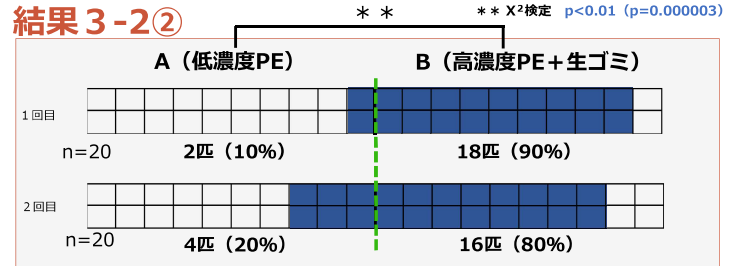
* PLAは粉末状で粒径が300μmのものを使用。

結果3-2①



高濃度PLA+生ゴミの区画 (B) に対して統計上有意に選好した

結果3-2②



高濃度PE+生ゴミの区画 (B) に対して統計上有意に選好した

考察3-2

高濃度プラスチックに対する忌避作用よりも、生ゴミへの誘引作用の方が強いと考えられる。

実験4

目的：高濃度PLAによるシマミミズへの影響を調べる。

温度 22℃
湿度 75%
暗室

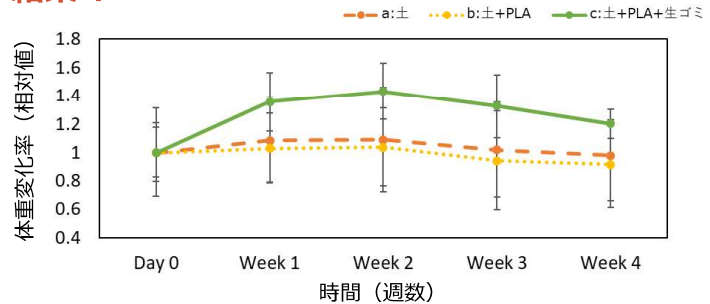
- 1匹ずつ投入 (各4セット)
- 体重を4週記録



	PLA	生ゴミ	土
a	-	-	80g
b	14g (高濃度18%)	-	80g
c	14g (高濃度18%)	14g	80g

結果4

各飼育環境における体重変化率の推移



PLAを添加しても、体重変化率の推移はほぼ変わらなかった
PLA+生ゴミの方は体重増加が見られた

考察4

- bはaとほぼ同様で、PLAがシマミミズに悪影響を与えた可能性は低い。
- cは生ゴミによって栄養分が多くなり、体重が増加した。
- 2週目以降の減少は、栄養分の減少、生ゴミの分解や腐敗によるpHの変化、市販土による土壌細菌の少なさも影響した可能性がある。

展望

- 効率的にプラスチックを分解できる条件を数値化する(pHや水分量等)。
- 生ゴミの添加による影響を検証する(種類や形状、量等)。
- 非生分解性プラスチック(PEやPS等)でもFTIRの分析や成長率の実験を行う。

主な参考文献

- 1) Yu Yang et al., 2015, Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by plastic-Eating Mealworms. 1. Chemical and Physical Characterization and Isonic Tests
- 2) 環境省・農林水産省 (2025) 「我が国の食品ロスの発生量の推計値 (令和5年度) の公表について」『報道発表資料』2025年6月27日公表
- 3) 吉田颯人・吉川勝由希・原田海聖「ミミズによる土壌のマイクロプラスチック汚染の軽減～ミミズは土壌汚染改善の救世主になるか～」
- 4) 神戸大学大学院 枝松 倫真・鈴木 武志・木田 森丸・藤嶽 暢英 (2024) 「各種マイクロプラスチックがシマミミズ (*Eisenia fetida*) の回避行動に与える影響」『日本土壌肥科学会講演要旨集』第70号, 278-2頁, 日本土壌肥科学会
- 5) Texal編集部 (2024) 「ミミズの唾液に含まれる酵素がプラスチックを驚くほど速く分解することが判明」Texal (テクノロジー情報サイト)、2024年5月7日掲載
- 6) 大澤 敏・附木 貴行・小川 俊夫 (2001) 「ポリ乳酸/デンプンブレンド射出成形物の土壌中における分解制御」『高分子論文集』第58巻第11号, 573-580頁, 高分子学会。
- 7) 田中 彩葉・平野 伊吹・遠藤 祥・増田 江里奈「組織透明化による『ミミズの消化速度研究』」静岡県立富山高等学校 自然科学系 論文集。
- 8) Davi R. Munhoz, K. Meng, Lang Wang, Esperanza Huerta Lwanga, Violette Geissen, Paula H (2024) Exploring the potential of earthworm gut bacteria for plastic degradation

謝辞

本研究を進めるにあたり、静岡大学の竹本裕之先生や近藤満先生には御指導と御助言を賜りました。心より感謝申し上げます。また、プラスチックパウダーを無償提供してくださった日本ポリエチレン株式会社様にも深く御礼申し上げます。

食品廃棄物の再利用～リモネンの抗菌効果を高める～

1 背景

現在、日本では多くの食品が廃棄されており、とりわけミカン栽培では大量の青ミカンが廃棄されている。青ミカンは抗菌性を持つリモネンを多く含んでいる。そこで本研究ではそのリモネンに注目し、黄色ブドウ球菌を抗菌することを検討した。リモネンは抗菌性を持つが、同時に親油性も持ち抗菌効果を十分に発揮されにくいという難点もある。そのため、リモネンの抗菌性がより発揮する方法を検討した。黄色ブドウ球菌は食中毒を引き起こす菌であり、抗菌をする意義があると考え、菌として使用した。

2 目的

リモネンの黄色ブドウ球菌に対する抗菌効果を高める。

3 実験 1

(1) 目的

リモネンの抗菌効果を高める。

(2) 仮説

疎水性物質と親水性物質を均一に混ぜる界面活性剤、培地の pH を低下させ菌の増殖を抑えられと考えるクエン酸をそれぞれリモネン試薬に加えることで抗菌効果が高まる。

(3) 材料・実験器具

リモネン×2.4mL、食器用中性洗剤×240 μ L、クエン酸×3 g、マンニット食塩寒天培地×111 g、精製水、1L 三角フラスコ、アルミホイル、オートクレーブ、クリーンベンチ、シャーレ、キムワイプ、マイクロピペット (20-200 μ L)、マイクロチップ (20 μ L)、マイクロチップ (50 μ L)、ペーパーディスク、恒温器

(4) 方法

ア マンニット食塩寒天培地の調整

黄色ブドウ球菌の選択培地であるマンニット食塩寒天培地(Fig. 1)を精製水 1L と共に三角フラスコにいれて混合した後、オートクレーブ (121℃・20 分) で滅菌する。その後クリーンベンチ内でシャーレに分注する。

イ 菌液の調整

精製水で濡らしたキムワイプで腕をふき (2 往復)、精製水 50mL に入れたものを菌液とする。

ウ 抗菌物質の添加と培養

菌液を 50 μ L 培地に塗布する。それぞれの培地に物質(リモネン、界面活性剤、クエン酸、リモネンと界面活性剤の混合物、リモネンとクエン酸の混合物、)を 20 μ L ずつ培地に置いたペーパーディスクに含浸する。また、試料を含浸させないものも作製する。それを恒温器 (37℃・2 日間) に入れて保温し、培地のコロニー (Fig. 2) の数を数える。なお、予備実験より結果に大きな影響を与えないことを確認したエタノールを疎水性のリモネンと親油性のクエン酸を混合させるために使用する。



Fig. 1 マンニット食塩寒天培地

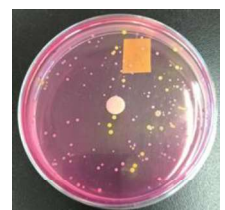


Fig. 2 菌が繁殖した培地

(5) 界面活性剤の結果と考察

ア 結果

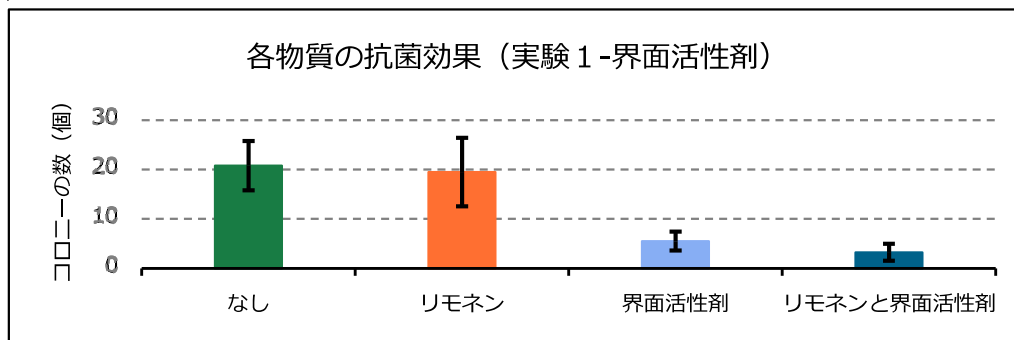


Fig. 3 各物質の抗菌効果 (実験 1-界面活性剤)

リモネン、界面活性剤のどちらの単体と比べてもリモネンと界面活性剤の混合物の方がコロニーの数が少ないため、リモネンと界面活性剤を混合することで相乗効果によって抗菌効果が高まったといえる。

イ 考察

仮説の通り、界面活性剤は親水基と親油基をもつため、親油性のリモネンを水性の培地に拡散できたことで、リモネンがより多くの菌に接触でき抗菌効果が高まったのだと考えた。

(6) クエン酸の結果と考察

ア 結果

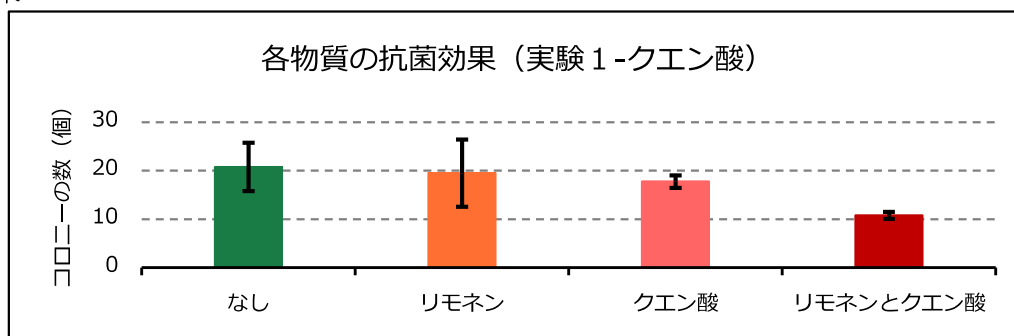


Fig. 4 各物質の抗菌効果 (実験 1-クエン酸)

リモネン、クエン酸どちらの単体と比べてもリモネンとクエン酸の混合物の方がコロニーの数が少ないため、リモネンとクエン酸を混合することで相乗効果によって抗菌効果が高まったといえる。

イ 考察

仮説ではクエン酸が菌の増殖範囲よりも培地の pH を下げるため、抗菌効果が高まると考えたが、実際に培地の pH を測ったところ有意な差はなかった。そこでキレート作用によって菌の細胞膜をつなぐ二価の金属イオンが奪われ、菌の膜が緩んだことでリモネンが効果を発揮しやすくなったのだと考えた。

4 実験 2

(1) 目的

実際に黄色ブドウ球菌が繁殖する食品下の環境で菌を採取したものに対するリモネンの抗菌効果を高める。

(2) 仮説

食品に繁殖した菌でも実験 1 と同様の方法でリモネンの抗菌効果を高められる。

(3) 材料・実験器具・方法

実験 1 と同様の材料・実験器具に加えて、手で握り恒温器 (37℃) で保存した米を使用する。菌液のみを米に繁殖した菌に変更し、その他の方法は実験 1 と同様とする。

(5) 界面活性剤の結果と考察

実験 1 と同様の結果になった。このことから菌が食品に繁殖した環境下でもリモネンに界面活性剤を加えることで抗菌効果を高めることができることが分かった。

(6) クエン酸の結果と考察

ア 結果

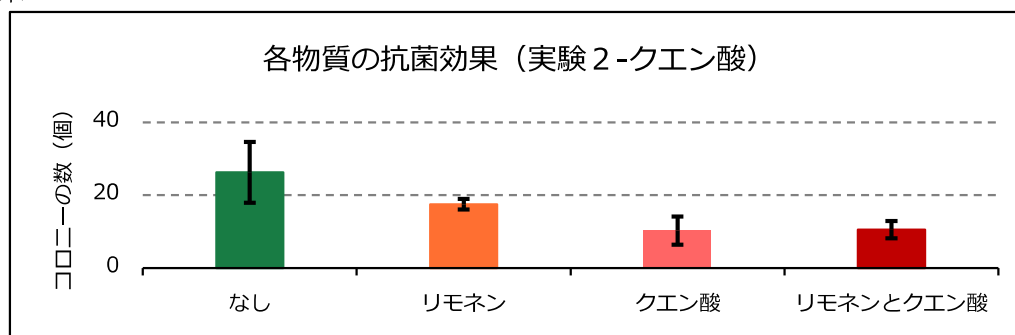


Fig. 5 各物質の抗菌効果 (実験 2-クエン酸)

リモネンとクエン酸の混合物のコロニーの数はリモネン単体と比べると減ったが、クエン酸単体と比べると大きな変化はなかった。

イ 考察

抗菌効果が高まらなかった原因として、包接作用というものを考えた。本実験で菌液として用いた米に含まれるデンプンを構成するアミロースはらせん状になって重なっているがクエン酸を加えることで、水素結合が弱まり、アミロース分子同士が離れ、輪ができる。その輪の中には親油性のため、同じ親油性のリモネンと相性が良く、輪の中にリモネンが入ってしまい、リモネンが菌に行き届かなくなり抗菌効果が高まらなかったのだと考えた。

ウ 考察の検証

考察が正しいのかを半透膜を用いて検証を行った。リモネンは低分子のため半透膜を通り抜けることができるが、デンプンは高分子のため通り抜けることができない。このことから包摂されたリモネンは半透膜を通り抜けることができなくなるといえる。検証では、まず半透膜にリモネンとクエン酸を入れたところ膜の外液にリモネンの油が確認できた。一方半透膜にリモネンとクエン酸、デンプンを入れたところ膜の外液にリモネンの油は確認できなかったことから、リモネンは包摂されたことで半透膜を通過できなかったことが分かる。よってこの検証より、考察が正しいといえる。

5 展望

今後の研究では包接の起こさない条件や、食品中の物質が抗菌成分に与える影響を調べたい。また、菌の由来や、環境条件によるリモネンの抗菌性の変化も調べたい。

6 参考文献

1) Yang Qin

Effects of Citric Acid on Structures and Properties of Thermoplastic Hydroxypropyl Amylomaize Starch Films

<https://www.mdpi.com/1996-1944/12/9/1565> (2019/12/09)

2) Ghadeer Mattar

Are Citric Acid-Iron II Complexes True Chelates or Just Physical Mixtures?

<https://www.mdpi.com/2304-8158/12/2/410>

食品廃棄物の再利用

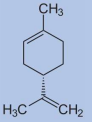
～リモネンの抗菌効果を高める～

背景

- ミカン栽培では大量の青ミカンが廃棄される
- 青ミカンは抗菌性を持つリモネンを多く含む
- 本研究ではリモネンによる黄色ブドウ球菌の抑制を検討した

● リモネン $[C_{10}H_{16}]$

- リモネンは抗菌性を持っている
- 親油性を持ち固体の表面に広がりにくい



目的

リモネンの黄色ブドウ球菌に対する抗菌効果を高める

● 界面活性剤（洗剤）

親油性物質と親水性物質を均一に分散させる

● クエン酸 $[C_6H_8O_7]$

pHを酸性に下げ、菌の増殖を抑える

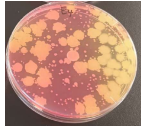
実験 1

仮説

クエン酸、界面活性剤を加えることで相乗効果によりリモネンの抗菌効果が高まる

方法

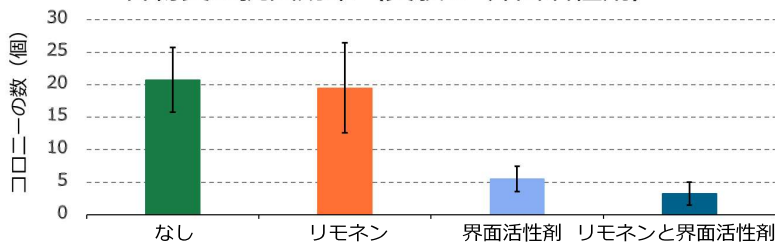
- マンニット食塩寒天培地を利用し、腕から採取した菌液を塗布した
- 培地の上に抗菌物質を塗布した



結果

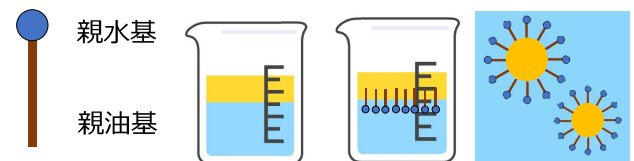
各物質の抗菌効果（実験 1 - 界面活性剤）

n = 4



リモネンと界面活性剤の混合物は、リモネンのみと界面活性剤のみに比べてコロニーの数が減った

考察

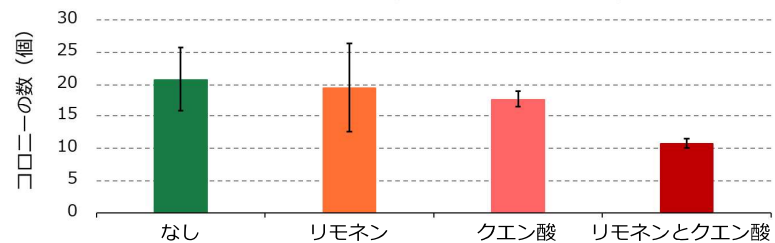


相互に溶け合わない成分を均一に分離させ、より多くの細菌表面に接触できた

結果

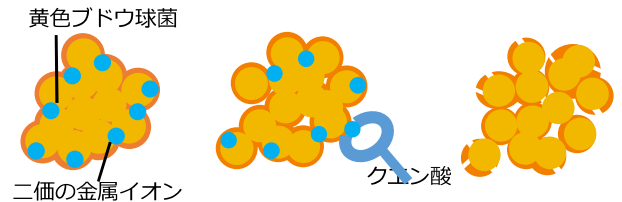
各物質の抗菌効果（実験 1 - クエン酸）

n = 4



リモネンとクエン酸の混合物は、リモネンのみとクエン酸のみに比べてコロニーの数が減った

考察



黄色ブドウ球菌の細胞膜をつなぐ金属イオンをクエン酸がキレート作用で奪う

実験 2

仮説

食品環境下でも実験 1 と同様に相乗効果によりリモネンの抗菌効果が高まる

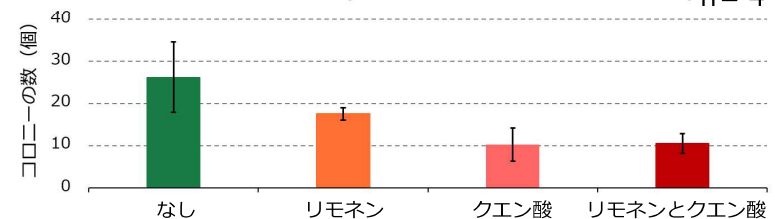
方法

炊飯した米を手で握ったものを菌液とし、その他方法は実験 1 と同様にした

結果

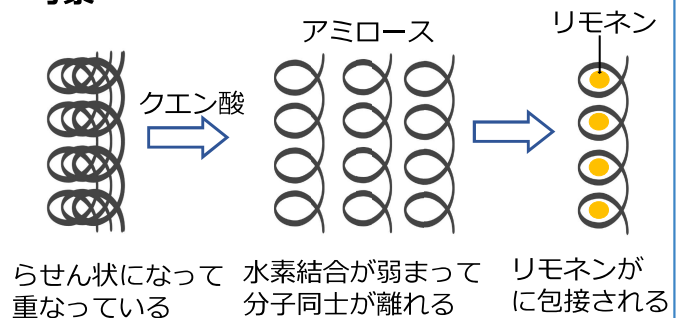
各物質の抗菌効果（実験 2 - リモネン-クエン酸）

n = 4



リモネンとクエン酸の混合物のコロニーの数は、リモネンのみと比べると減ったが、クエン酸のみと比べると大きな変化はない

考察



らせん状になって重なっている 水素結合が弱まって分子同士が離れる リモネンがに包接される

結果

実験 1 と同様にコロニーの数が減った

考察

相互に溶け合わない成分を均一に分離させた

展望

- 顕微鏡で細菌を観察し、膜への影響を見る
- 実際に食品廃棄物を利用し、研究を進める
- 農薬や、抗菌スプレーなどに応用する

参考文献

- Yang Qin
Effects of Citric Acid on Structures and Properties of Thermoplastic Hydroxypropyl Amylomaize Starch Films
- Ghadeer Mattar
Are Citric Acid-Iron II Complexes True Chelates or Just Physical Mixtures?

任意の色の人工オーロラの生成

1 研究背景

オーロラとは太陽から飛ばされてくるプラズマが地球の磁力に引き寄せられ、地球の大気とぶつかることによって起こる発光現象である。私たちはそんなオーロラが生成される条件を再現することによって人工的にオーロラを生成する実験があることを知った。しかし、その実験で生成されたオーロラはほとんどがピンク色であったため、色を変えることを目的に研究を行った。

2 人工オーロラの生成方法

真空ポンプを使い出来る限り減圧し、誘導コイルを使って高電圧をかけることで人工オーロラの生成を行った³⁾。

3 実験内容

(1) 実験 1

ア 目的

(ア) 空気によって生成されるオーロラの波長を測定する。

(イ) また特定の気体を封入して波長を測定する。

イ 仮説

気体が放出する光の波長は、気体の種類によって異なるため特定の気体を封入することによって色を変化させられる。

ウ 方法

真空デシケーターにガラス管を取り付け、窒素、酸素、二酸化炭素、ヘリウムを封入し、スペクトル測定器を使い波長を測定した。

エ 結果

以上のような結果となった。酸素、二酸化炭素、ヘリウムを封入しても視覚的な色の変化はなかったが、窒素では唯一視覚的に青色の発光が見られた。



Fig. 1 オーロラ生成装置

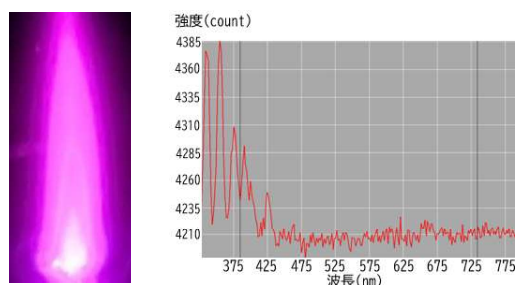


Fig. 2 空気によるオーロラとその波長

Table 1 実験 1 の結果

気体の種類	強度の高い波長 (nm)	視覚的な色
空気	320～375, 425 付近	紫
窒素	320～375, 400, 425 付近	青
酸素	高い波長が見られなかった	紫
二酸化炭素	高い波長が見られなかった	紫
ヘリウム	320～400 付近	紫

オ 考察

空気中に含まれている気体の割合や、窒素のみ強度の高い波長が見られたことから人工生成のオーロラの実験は主に窒素の発光によるものだと考えられる。また、気体を封入することによって色を変えるためには窒素と同程度の強い光を放出する気体を入れる必要がある。

(2) 実験 2

ア 実験背景

自然のオーロラの緑色の発光は酸素の発光によるものだが、実験 1 で酸素を封入しても緑色の発光は見られなかった。そのことから私たちの装置では自然のオーロラが生成される条件とは異なる点があると考え、人工生成のオーロラに影響を与えていると考えられる条件を考え、それがどのように影響を与えているのかを調べた。

イ 目的

気圧、磁力、温度、電圧の条件を調べる。

ウ 仮説

- (ア) 残留気体が多いと気体の発光が阻害されてしまう可能性があるため、残留気体の影響をなくせば本来の気体の発光スペクトルを見ることができる。
- (イ) 磁力が大きいほど光が 1 点集まり、線のようになる。
- (ウ) 温度を変化させるとデシケーター内の気体の熱運動が変化するため、オーロラの色に影響を与える。
- (エ) 光のエネルギーが高いと、紫色の波長が出やすくなるため弱い電圧をかけることで別の色のオーロラを作ることができる。

エ 実験方法

- (ア) 静岡大学の工学部で使われている、RF マグネトロンスパッタリング用の真空チャンバーを使用し高真空をつくり、窒素、アルゴン、酸素をそれぞれ毎分 10cm³ 注入するように設定し、1. 0Pa、3. 0Pa、5. 0Pa、10. 0Pa、20. 0Pa の状態での発光スペクトルを記録する。
- (イ) デシケーター内に入れる磁石の数を増やす。
- (ウ) 電気ヒーター、保冷剤を使用しデシケーター内の温度を変化させる。
- (エ) 真空管用放電装置を使い、600V の電圧でオーロラを生成した。

オ 結果

以下のような結果となった。気圧や、磁力では、オーロラの視覚的な色の変化が見られず、温度では温めると赤く広がり、冷やすと細く青色に変化することが分かった他、電圧を変化させた実験では、電流が流れた瞬間針の先端は緑色に半球付近は赤色に発光した。

Table 2 実験 2 の結果

変更した条件	波長の変化	視覚的な色の変化
気圧	なし	なし
磁力	なし	なし
温度	なし	あり
電圧	測定不可	あり

カ 考察

実験の結果から人工生成のオーロラの色に影響を与える条件は温度と電圧であることが分かった、理由としては温度を変化させるとデシケーター内の気体の熱運動が変化するため色が変わっていることが考えられる。電圧を変化させた実験で見られた、発光については赤色や緑色の発光は酸素の代表的な発光スペクトルであるため、酸素の発光であることが考えられる。

(3) 実験 3

ア 実験背景

実験 2 で電圧を 600V にした際に、緑色と赤色の発光が見られたが発光が数秒しか見られず、波長を測定することが出来なかった。色の変化があったというには波長を測定する必要があるため、発光を安定させる必要がある。そのことから発光を安定させるために以下の実験を行った。

イ 目的

緑色と赤色の発光を安定させ、波長をとる。

ウ 仮説

ヘリウムはエネルギーを受け取ると準安定状態となり、他の気体にエネルギーを渡し、発光を助ける働きがある⁶⁾。そのことから、酸素とヘリウムを混合することで緑色と赤色の発光が安定すると考えた。

エ 実験方法

酸素とヘリウムを混合し、600V でオーロラを生成する。

オ 結果

実験 3 の時より、6 秒ほど長く発光し、波長は 375nm と 425nm の波長が強いことが分かった。

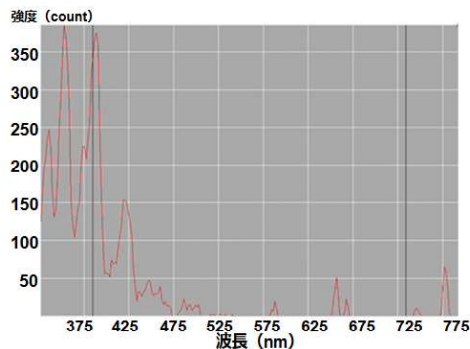


Fig. 2 緑色と赤色の発光の時の波長



Fig. 3 赤色と緑色の発光

カ 考察

発光時間が延びたことからヘリウムによって酸素の発光が安定したことが考えられる。測定した波長では、緑色や赤色の発光は見られなかったが、私たちの装置では十分に減圧できず窒素の発光の影響を大きく受けてしまうことが分かっているため、窒素の発光を測定してしまっており、酸素の発光をとらえることが出来なかったことが考えられる。

4 展望

今回の実験では視覚的に緑色の発光を数秒出すことに成功したが、波長や発光原理などはまだ解明していないため、今後は波長の測定と、発光原理、また温度による視覚的な色の変化の仕組みを調べる他、緑色の発光をより長く安定させる方法を探したい。

5 参考文献

- 1) Frederick M. III, Phelps. “MIT WAVELENGTH TABLES Volume2: Wavelengths by Element”. Massachusetts Institute of Technology (MIT).1982.
- 2) ヤムナスカ・マウンテン・ツアーズ. “大気との衝突による発光”. ヤムナスカのオーロラ完全ガイド. 2022 年. <https://auroranavi.com/aurora/emission.html>.
- 3) SS 探究チャンネル【静岡市立高等学校】. “人工的にオーロラを生成するための実験動画！【静岡市立高校 SS 探究 2 年普通科】”. YouTube. 2024 年 1 月 17 日. <https://youtu.be/gr2Tb3wJxUg?feature=shared>.
- 4) 小野陽・佐藤漣・猿田杏樹・高橋航太. “人工オーロラの発生と色の変化”. 山形県立酒田東高等学校. 2023 年.
- 5) 稲葉凜・十川理世. “人工的なオーロラ発生の最適条件と色の再現性”. 学校法人市川学園市川中学校・高等学校.
- 6) 岸本直樹・大野公一. “2 次元ペニングイオン化電子分光法による衝突反応の立体ダイナミクスの研究”. 東北大学大学院理学研究科. 2005 年 2 月 12 日

6 謝辞

御指導ご鞭撻いただいた静岡大学工学部電子物質科学科の脇谷尚樹教授並びに、本研究にかかわってくださったすべての皆様に心より感謝申し上げます。

任意の色の人工オーロラの生成

研究背景

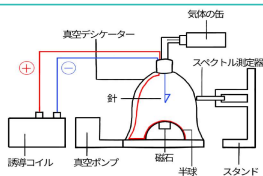
人工生成のオーロラの多くが自然界でみられるオーロラと異なり紫色であることに疑問を持った。¹⁾

目的

任意の色のオーロラを生成する

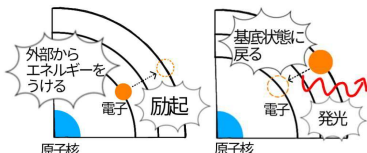
生成方法

- ① 真空デシケーター内を減圧する
- ② 真空デシケーター内に放電する
- ③ 特定の気体を封入する
- ④ スペクトル測定器で測定する



発光原理

電子が外部からのエネルギーを受け取ることで、気体の原子は一時的に励起した状態になり、基底状態に戻る際に発光する。



実験 1

〈目的〉

封入する気体の種類によるオーロラの色の変化をみる。

〈仮説〉

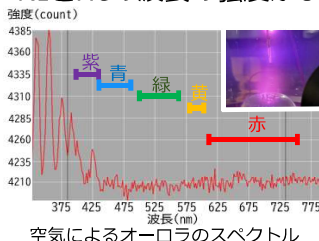
封入した気体の代表的な発光スペクトルの色のオーロラになる。

〈実験方法〉

ロータリーポンプ（低～中真空を作れる真空ポンプ）を使用し N_2 と O_2 と CO_2 と He によるオーロラのスペクトルを記録する。

〈結果〉

320nm～375nmの波長は N_2 と He でしか見られなかった。
 N_2 と He の波長の強度が O_2 と CO_2 に比べて高かった。



気体	強度が高い波長	視覚的な色
N_2	350 nm 付近	青色
O_2	なし	紫色
He	325 nm 付近	紫色
CO_2	なし	紫色

※なし...全体的に波長の強度が低かった
気体を封入した際の強度が高い波長と視覚的な色

〈考察〉

N_2 によるオーロラの波長の強度が高いため、
空気によるオーロラの色は主に窒素によるものである。
多少の残留気体が存在するため、残留気体が少ない状態でも
同じ結果になるかみる必要がある。

実験 2

〈目的〉

残留気体の影響が少ない状態で、オーロラの色の変化をみる。

〈仮説〉

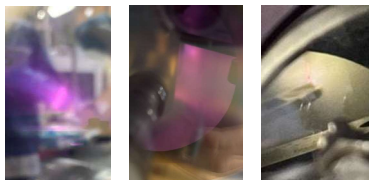
残留気体が少ない状態では本来の気体の発光スペクトルをみる
ことができる。

〈実験方法〉

RFマグネトロンスパッタリング用の真空チャンバーを使用し、
 N_2 と Ar と O_2 を一定量入れ続け、1.0 Pa、3.0 Pa、5.0 Pa、
10.0 Pa、20.0 Pa の状態でスペクトルを記録する。

〈結果〉

気圧によってオーロラの波長は変化しなかった。残留気体の有
無でオーロラの色が変化した。



N_2 , 20Pa Ar, 20Pa O_2 , 20Pa

気体	強度が高い波長	視覚的な色
N_2	390 nm 付近	紫色
Ar	750 nm 付近	赤色
O_2	なし	白色

※なし...全体的に波長の強度が低かった
気体を封入した際の強度が高い波長と視覚的な色

〈考察〉

残留気体がオーロラの色に与える影響は大きい。

実験 3

〈目的〉

電圧を下げることで緑色のオーロラを生成する。

〈仮説〉

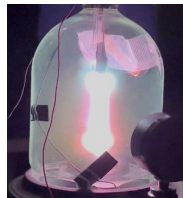
電圧が低いと低エネルギー（長波長）の励起が起こりやすくなるため、紫色（380 nm～430 nm）よりも
緑色（500 nm～570 nm）の発光が出やすくなる。

〈実験方法〉

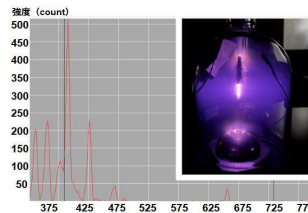
減圧し、600 V の低電圧をかけ、酸素を封入し波長を測定する。

〈結果〉

赤色と緑色の発光が点滅状態で見られた後、紫外線が強く出た。



赤色と緑色の発光の様子



紫外線が強い紫色の発光のスペクトル

〈考察〉

緑色と赤色の発光は酸素の代表スペクトルであるため、酸素による発光の可能性がある。それを示すには発光を安定させ、
波長をとらなくてはならない。

実験 4

〈目的〉

混合気体の封入で緑色と赤色の発光を安定させ、波長をとる。

〈仮説〉

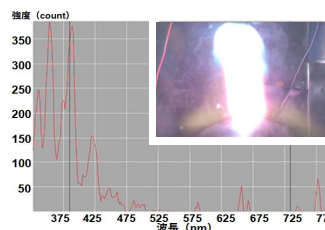
ヘリウムは励起されると準安定状態になりやすいため²⁾、
ヘリウムと酸素を封入することで酸素の励起が助けられ、
酸素による発光が安定する。

〈実験方法〉

実験 3 と同じ方法で生成し、ヘリウムと酸素を封入した。

〈結果〉

375 nm(紫外線)
425 nm(紫)
付近の波長の強度が高いが、
視覚的には緑と赤の発光になった。
実験 3 よりも約 6 秒長く点滅した。



混合気体によるスペクトル

〈考察〉

酸素の代表的な発光スペクトルが赤と緑であるため、酸素による発光の可能性が高い。
しかし、油回転式ポンプは窒素による影響を強く受けるため、
強度が低い酸素の発光を分光器が拾えなかった可能性がある。

まとめ

人工生成のオーロラは窒素分子の発光が支配的となり、
赤紫色に見えることが多い。
電圧や残留気体といった条件を制御することで緑色の
オーロラを生成することが可能である。

展望

視覚的に緑色のオーロラを作ることには成功したが波長では
緑を示すことができていないため、波長でも緑を記録する。

謝辞

ご指導ご鞭撻いただいた静岡大学工学部電子物質科学科の
脇谷尚樹教授並びに、本研究に関わってくださったすべての
皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- (1) SS探究チャンネル【静岡市立高等学校】“人工的にオーロラを生成するための実験動画”【静岡市立高校SS探究2年普通科】、2024年1月17日。
- (2) 岸本直樹・大野公一、“2次元ベンゾイオン化電子分光法による衝突反応の立体ダイナミクスの研究”、東北大学、2004年12月。
- (3) Frederick M.III, Phelps, “MIT WAVELENGTH TABLES Volume2: Wavelengths by Element”, Massachusetts Institute of Technology, 1982.
- (4) ヤムナスカ・マウンテン・ツアーズ“大気との衝突による発光”、ヤムナスカのオーロラ完全ガイド、2022年。
- (5) 小野隆・佐藤謙・猿田杏樹・高橋航太、“人工オーロラの発生と色の変化”、山形県立酒田東高等学校、2023年。
- (6) 稲葉源・十川理世、“人工的なオーロラ発生の最適条件と色の再現性”、学校法人市川学園市川中学校・高等学校。

プラナリアの生存と金属イオンの関係

1 実験の動機と目的

プラナリアはレバーを好み、カルシウムイオンがあると摂食行動が増加することが分かった (Mori, 2019)。プラナリアは特定の金属イオンが多いと生存に有利であるとの仮説を立て、水中の金属イオン濃度とプラナリアの生存や分裂のしやすさを探ることを目的とした。

2 実験 1

- (1) マイナスイオンを揃えるために、塩化物の金属塩 (CaCl_2 , FeCl_3 , CuCl_2 , NaCl , KCl , MgCl_2) を用いて、各金属が 10mM になるように水溶液を調整した。
- (2) 各金属溶液の 10 倍希釈を繰り返して、1 mM~0.001mM まで水溶液を調整した。
- (3) 各水溶液と絶食プラナリア (3 匹) をシャーレに入れ 15℃の恒温機に 30 日間保管した。
- (4) 何もイオンが入っていない純水を使い、(3) と同様の実験をした。

3 結果 1 と補足

各金属イオンに入れた 3 匹のプラナリアのうち、30 日間経過しても 3 匹中 2 匹以上生存していた結果を○、30 日間経過して 3 匹中 1 匹以下となった結果を×で Fig. 1 に示す。Fig. 1 の () 内は各溶液の pH を示す。金属イオンによってプラナリアの生存のしやすさは異なる結果となった。

	KCl	CaCl_2	FeCl_3	CuCl_2	MgCl_2	NaCl
1mM	×(7)	×(6)	×(3)	×(4)	○(5)	○(6)
0.1mM	×(6)	○(分裂) (5)	×(3)	×(4)	○(5)	○(6)
0.01mM	○(7)	○(7)	×(4)	×(5)	○(5)	○(6)
0.001mM	○(7)	○(7)	○(6)	○(5)	○(5)	○(6)

Fig. 1 実験①の結果

この実験では、塩化カルシウム水溶液 (0.1 mM) 中で飼育した個体においてのみ分裂が確認された。カルシウムについては異なる濃度で分裂のしやすさの比較を行うために、1つのシャーレにプラナリアを 1 匹ずつ入れたものを 0.5mM CaCl_2 の溶液で 10 個、0.1mM CaCl_2 の溶液で 10 個用意して 20 日間保管した。0.5mM では 10 匹中 4 匹、0.1mM では 10 匹中 1 匹が分裂したため、この濃度範囲ではカルシウムは高濃度の方が分裂に有利と考えた。

塩化銅水溶液および塩化鉄水溶液で Fig. 1 の×で全滅した要因については、水溶液の pH による影響であるのか、あるいは銅イオンおよび鉄イオンへの耐性の低さなのか判断できなかった。しかし、pH 4~5 の塩酸溶液を用意し各溶液と絶食プラナリア (3 匹) をシャーレに入れ 15℃の恒温機では 30 日間生存できた。そのため、プラナリアは pH で死んだのではなくイオンの耐性が低く死んだことが分かった。

4 追加実験の目的

結果 1 より、河川や池などでプラナリアが多い場所と少ない場所の違いは pH ではなく金属イオンが主に関係していると考えた。当初はプラナリアがいない (少ない) 場所は銅イオンや鉄イオンが多いと考え、静岡大学の吸光光度計をお借りして調べたところ、自然水の鉄や銅のイオン濃度が低濃度で測定できなかった。カリウムイオンは高校の吸光光度計で分析を試したが、自然水は低濃度で測定不能だった。マグネシウムイオンやナトリウムイオンは、結果 1 よ

りプラナリアの生存にそれほど影響しないと考えた。よって高校でも測定可能なカルシウムイオンに私たちは注目した。

カルシウムイオンがあると摂食行動が増加するとの先行研究 (Mori,2019) を踏まえて、結果 1 よりカルシウムは高濃度で分裂したことから、プラナリアの多い地点はプラナリアが少ない地点よりカルシウムイオン濃度が高いとの仮説を立てて、実験を行うことにした。

5 実験 2

(1) 調査地点の選択

静岡市立高校の先輩達がプラナリアの採集を行ってきた場所である二つ池を選んだ。池では個体がほとんど確認されず、普段は川で採集していた (Fig. 2)。

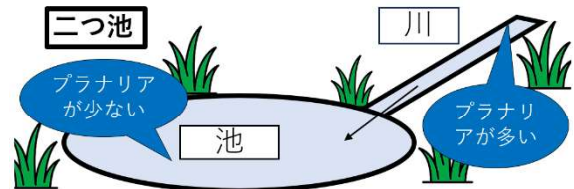


Fig. 2 二つ池の略図

プラナリアの採取方法は、ペットボトルの中に同量のレバーを入れ、川や池に沈めて 20 分放置して取り出したものである。プラナリアをこの方法で 3 回採集したところ、池と川のプラナリア量は、池より 4 倍から 5 倍ほど多く、調査地点として適していると判断した。そのため、プラナリアが多い地点と少ない地点として、Fig. 2 の川と池を調査対象と選び、夏と冬でカルシウムイオン濃度を比較した。

(2) 実験手順

カルシウムイオン濃度を以下のキレート滴定により測定した。

- ア ホールピペットで検水を 50ml 正確に測りとり、コニカルビーカー (100ml) に入れた。
- イ 水酸化ナトリウム水溶液、1.25mol/L 5 ml を (ア) に加えた。
- ウ 5 % の硫化ナトリウム水溶液を 2mL (ア) に加えた。
- エ ナフチルアゾ-ナフト工酸(NN 指示薬)約 0.0003g(薬さじ ¼ 杯)を (ア) に加えた。
- オ ビュレットに 0.01mol/L の EDTA 溶液 を入れ、滴定を行った。赤紫色が青色になったときが終点なので滴定を中止した。
- カ ア〜オの作業を 最低 3 回繰り返し平均をとることにした。
- キ キレート滴定の結果に基づいて、以下の式より、炭酸カルシウム量(mg/L)を求めた後、含まれているカルシウム濃度 (mM) を計算した。

$$CaCO_3 = a \times \frac{1000}{50} \times 1.001 \times f$$

a : 0.01mol/L EDTA の平均滴定量(mL)

f : 0.01mol/L EDTA のファクター(f=1.000) 同仁化学研究所製造

1.001 : 0.01mol/L EDTA 1mL に含まれる CaCO₃ 量

6 結果 2

河川と川のプラナリアの濃度比較を Fig. 3 に示す。この図より夏はプラナリアが多い地点 (川) はプラナリアが少ない地点 (池) よりカルシウム濃度が高く、冬のプラナリアが多い地点 (川) は、プラナリアが少ない地点 (池) よりカルシウム濃度が低かった。

7 考察

実験 1、実験 2 より、プラナリアは銅と鉄に対する耐性が低い。また、プラナリアは純水下では生存できなかった。純水にはほとんどイオンが存在しないため、体表を介した水の出入り

が制御できず、体内と体外の浸透圧バランスが崩れたためであると考えた。さらに、実験1では唯一カルシウムの存在下で分裂が見られた。カルシウムはプラナリアの行動を活発にさせると考え、分裂も促進されたと考えた。「プラナリアの多い地点はプラナリアが少ない地点よりカルシウムイオン濃度が高い」との仮説を立てて実験2を行ったが、夏は仮説の通りで冬は仮説に反した結果となった。

冬のカルシウム濃度が川と池で逆転した理由として、川への地下水の影響があるのではないだろうか。夏季は降水量が多く地下水が多量に流入するため、カルシウム濃度が高くなるが、冬季は降水量が少なく地下水の供給量が減少し、カルシウム濃度が低くなったと考えた。プラナリアが冬の川でも多い理由として、池では冬季に水温低下や溶存酸素量が減少することが、プラナリアの生存に不利に働いたと考える。

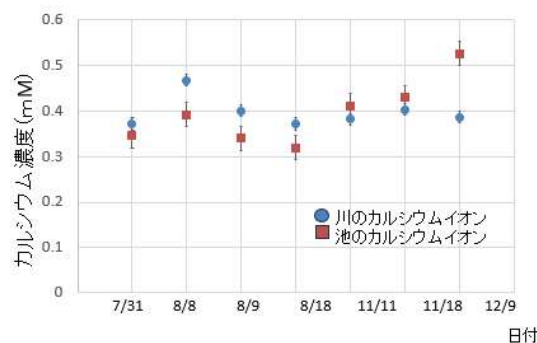


Fig. 3 川と池のカルシウム濃度

8 まとめと展望

プラナリアは清浄な水環境を示す指標生物として知られている。本研究では、季節変動に伴う水中カルシウムイオン濃度の変化が、プラナリアの生息数に影響したことを考察した。また、金属イオンの種類によってプラナリアの生存率が大きく異なったことから、プラナリアは水中の化学的水質や毒性を評価する生物指標として応用可能ではないだろうか。今後は、試行回数の増加による統計的信頼性の向上や、低濃度の金属イオンがプラナリアに与える影響を調べたい。

9 謝辞

水中の鉄イオン、銅イオンの分析の際には、静岡大学・静岡共同利用機器センター分子構造解析部/技術部の吸光光度計をお借りして、職員の竹本裕之氏に有益なご助言を賜りました。ここに深謝の意を表します。

10 参考文献

- 1) Masato Mori. Calcium ions the aquatic environment drive planarians to food. Zoological Letters. 2019, vol5, Article number 31
- 2) 板垣 航平. “水棲環境中のカルシウムはプラナリアの生育と再生に必要な金属元素である” 北海学園学術情報.2025.
_http://hokuga.hgu.jp/dspace/bitstream/.pdf. (参照 2025-06-30)

プラナリアの生存と金属イオンの関係

目的

プラナリアを用いて水質評価を行う。

背景

(先行研究と観察結果より)

- ・プラナリアは Ca^{2+} があると摂食行動が盛んになる。
- ・プラナリアはレバーを好み、レバーを食べると摂食行動が盛んになる。

プラナリアは特定の金属イオンを好むのでは？

当初の仮説

プラナリアは特定の金属イオンが多いと、プラナリアの生存に有利である。

実験1の結果

	KCl	CaCl_2	FeCl_3	CuCl_2	MgCl_2	NaCl
1mM	× (7)	× (6)	× (3)	× (4)	○ (5)	○ (6)
0.1mM	× (6)	○ (分裂) (5)	× (3)	× (4)	○ (5)	○ (6)
0.01mM	○ (7)	○ (7)	× (4)	× (5)	○ (5)	○ (6)
0.001mM	○ (7)	○ (7)	○ (6)	○ (5)	○ (5)	○ (6)

純水 ×

○...生存可能 ×...生存不可
()の数字...pH
どの水溶液にも3匹ずつ入れた

追実験1の結果

pH	4	5	6	7	8
生存	○	○	○	○	○

HClとNaOHのみで調整した溶液
どの水溶液にも3匹ずつ入れた

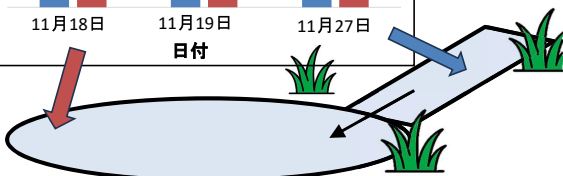
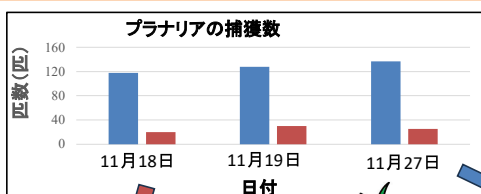
実験1から考えたこと

Cu^{2+} と Fe^{3+} 濃度が高いと生息できない。

試料水中の金属イオン濃度が低く静岡大学でも測定できなかった。

新たな仮説

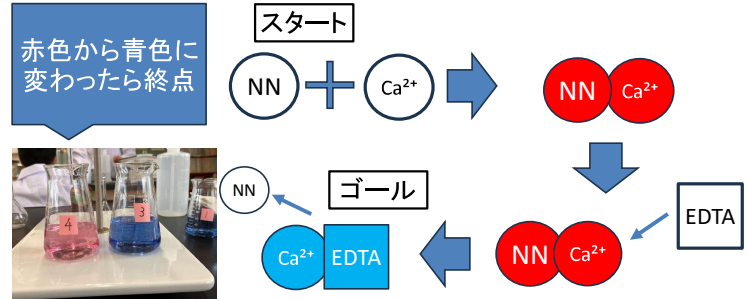
プラナリアが多い地点は少ない地点より水中の Ca^{2+} 濃度が高い。



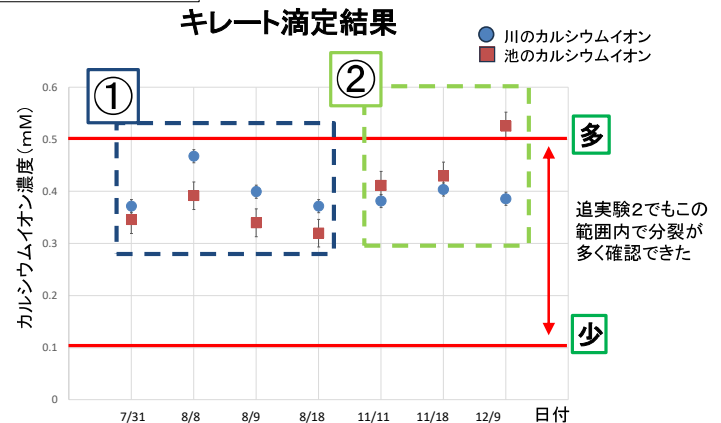
実験2

キレート滴定を行って、プラナリアが多い地点(川)とプラナリアが少ない地点(池)のカルシウムイオン濃度を測る。

実験方法2(キレート滴定)



実験2の結果



① 夏の結果は、川のほうが池より Ca^{2+} 濃度が高かった。

② 冬の結果は、池のほうが川より Ca^{2+} 濃度が高かった。

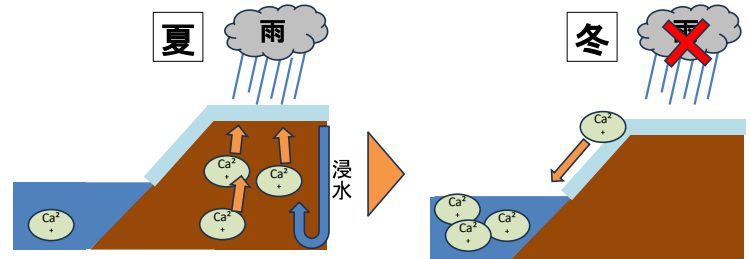
考察

・実験1より

・プラナリアは銅や鉄イオンに耐性がないことから、プラナリアを使った水質調査や毒性検査が可能ではないか？

・プラナリアは純水で生存できなかったことから、生存するには水溶液に何か(特に Ca^{2+})溶けている必要があるのではないかな？

・実験2より



夏は川のカリウム濃度が高く、水温も高いので分裂しやすいと考えられる。

池の Ca^{2+} は多かったが、エサや溶存酸素が川の方が多く、川のプラナリア生息数が多かったと考えられる。

展望

試行回数を増やし、カルシウム抜き飼育水や鉄や銅など重金属のプラナリアへの影響を調べる。

参考文献

・Masato Mori. Calcium ions in the aquatic environment drive planarians to food. Zoological Letters. 2019, vol.5, Article number 31
・板垣 航平. "水棲環境中のカルシウムはプラナリアの生育と再生に必要な金属元素である" 北海道学術情報 2025. <http://hokuga.hgu.jp/dspace/bitstream/pdf/>. (参照 2025-06-30)

乳酸菌と酵母菌の共培養～土台と沈殿物形成量の関係～

1 研究背景

先行研究から、乳酸菌と酵母菌は培養の条件次第で共生関係にあることが分かった。本研究では2つの菌を効率的に共培養させるための培養条件を検討した。予備実験で遠沈管を用いた共培養を行ったとき、菌体が遠沈管の下に沈殿してしまうことが分かった。そこで効率良く培養するためには、菌が液体培地の栄養分と触れる表面積を大きくするべきだと考え、菌を付着させる土台に着目した。

2 目的

土台が共培養によって生成した沈殿物量にどのような影響をもたらすか検討する。

3 実験

(1) 実験 1

ア 目的

乳酸菌と酵母菌の付着に適した土台を検討する（ガーゼ、カバーガラス、ポリプロピレンの網（以下 PP と呼ぶ））。

イ 仮説

3種類の土台の中でポリプロピレンが一番網目がはっきりしているので、菌体が付着しやすい。

ウ 方法

(ア) クリーンベンチ内で、ヤクルト（乳酸菌）を MRS 寒天培地に 10 μ L 入れコンラージ棒で広げた。

ドライイースト（酵母菌）約 100mg を蒸留水 1 mL に溶かし、LB 寒天培地に 10 μ L 入れコンラージ棒で広げた。

(イ) 各シャーレはパラフィルムで密封し、37 $^{\circ}$ C の恒温機で 2～3 日培養した。

(ウ) (イ) の培養で出来たコロニー 2, 3 粒をそれぞれ 50mL の遠沈管に入った MRS 液体培地、LB 液体培地に入れ、37 $^{\circ}$ C の恒温機で約 1 週間培養した。

(エ) 50mL 遠沈管に沈殿や濁りが確認できたらそれぞれ 50 μ L ずつ同じ MRS 液体培地、MRS 液体培地と LB 液体培地の混合培地に入れ一緒にガーゼで出来た形の異なる 2 種類の土台を入れて培養を進めた。

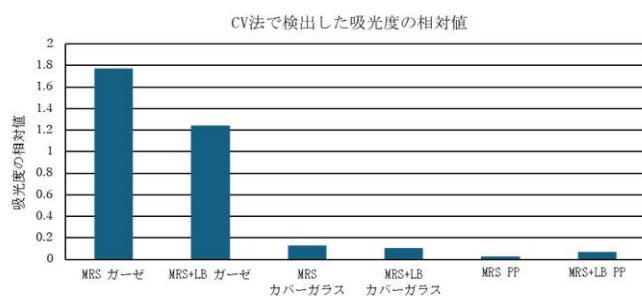
(オ) 37 $^{\circ}$ C の恒温機で約 3 週間培養した。

(カ) 3 種の異なる土台に付着した菌体量をクリスタルバイオレット法（以後 CV 法と呼ぶ）を用いて、確認した。

エ CV 法

CV 法とは、培養の結果生じた付着物をクリスタルバイオレット溶液で染色し、その後に染色された色素を溶出させ、溶出液の吸光度を測定することで生じた菌体量を評価する方法である。

オ 結果



3 種の土台の相対値は、PP、カバーガラス、ガーゼの順で大きくなっていることがわかった。また、PP とカバーガラスは大きな差がないのに対し、カバーガラスとガーゼには約 10 倍の差が見られた。

Fig. 1 吸光度の相対値を表すグラフ

オ 考察

CV 法による吸光度測定の結果、3 種の試験片の中ではガーゼにおいて最も高い吸光度が確認され、菌の付着量が最も多いことが示された。これは、ガーゼが細かい天然繊維から成る凹凸の大きい構造を持ち、菌が付着・定着しやすい表面特性を有していたためであると考えられる。一方、カバーガラスおよび PP は表面が比較的平滑であり、菌が付着しにくかったと考えられる。また、液体培地の比較では、MRS 液体培地の方が MRS 液体培地と LB 液体培地の混合培地よりも吸光度が高く、沈殿物の形成がより促進されていた。MRS 液体培地は乳酸菌の増殖に適した栄養組成を持つため、菌の増殖および沈殿物形成が活発になったと考えられる。

(2) 実験 2

ア 目的

共培養培地内の土台の有無や、土台の形状の違いが、菌体重量に与える影響を調べる。

イ 仮説

土台を培地と触れる表面積を大きくする工夫により、菌体量が増える。

ウ 方法

(ア) 実験 1 の (ア) ～ (ウ) の作業を行った。

(イ) 遠沈管②に沈殿や濁りが確認できたら、それぞれ 50μL ずつ同じ MRS 液体培地に入れた。遠沈管①②に単独培養の乳酸菌、遠沈管③④に酵母菌をそれぞれ 100μL 異なる MRS 液体培地に入れた。遠沈管⑤⑥では共培養を行い、遠沈管⑦⑧⑨⑩では、共培養を行い、ガーゼでできた形の異なる 2 種類の土台入れて培養を進めた。このとき、土台写真の Fig. 2 をガーゼ A、Fig. 3 をガーゼ B とする。また、遠沈管⑪は、土台から培地成分の重量を引くために菌体を入れずに、MRS 液体培地に 2 種類のガーゼ③を入れた。



Fig. 2 ガーゼの土台 A



Fig. 3 ガーゼの土台 B

(ウ) 37℃の恒温機で約 3 週間培養した。

(エ) 超音波洗浄機を、60Hz で 3 分間用いて培養期間を終えた遠沈管の壁面に付着した菌を落とした。ガーゼで出来た土台を、ピンセットを用いて取り出した。

(オ) 遠心分離機を 10,000 g で 10 分間用いて、遠沈管の沈殿物を集め、上澄み液を捨て培地を追加で入れるという工程を培養液が無くなるまで繰り返し、沈殿物を集めた。

(カ) デシケーターを用いて取り出した沈殿物と、ガーゼで出来た土台を乾燥させた。

(キ) 乾燥させた沈殿物を遠沈管ごと量り、元々の遠沈管の重量を引いて沈殿物の重さとした。また、菌体ではなく培地成分で土台の重量が増えている可能性があるため、ガーゼで出来た土台も重量を量り、菌体は何も入っていない培地に入れておいた同じ形の乾燥させた土台の重量を引き、土台の重さとした。

Table 1 遠沈管の割り振り

	培養菌体	土台の有無
遠沈管①	乳酸菌①	無し
遠沈管②	乳酸菌②	無し
遠沈管③	酵母菌①	無し
遠沈管④	酵母菌②	無し
遠沈管⑤	乳酸菌 + 酵母菌①	無し
遠沈管⑥	乳酸菌 + 酵母菌②	無し
遠沈管⑦	乳酸菌 + 酵母菌③	ガーゼ A①
遠沈管⑧	乳酸菌 + 酵母菌④	ガーゼ A②
遠沈管⑨	乳酸菌 + 酵母菌⑤	ガーゼ B①
遠沈管⑩	乳酸菌 + 酵母菌⑥	ガーゼ B②
遠沈管⑪	無し	ガーゼ A③ + B③

エ 結果

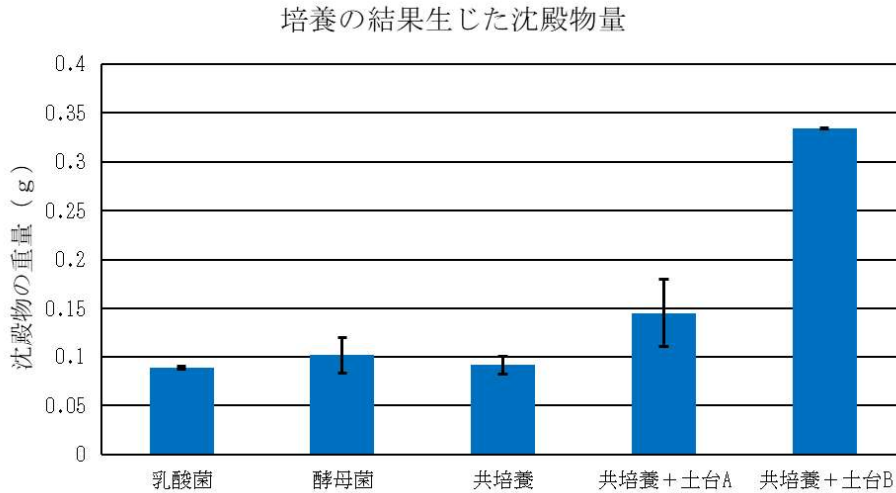


Fig. 4 沈殿物量のグラフ

乳酸菌と酵母菌の単独培養による沈殿量と、共培養による沈殿量に大きな差が見られなかった。また、土台を入れた共培養培地は、土台を入れなかった培地と比較して、沈殿量が多かった。さらに、土台 A の結果にはばらつきが見られ、土台 B の結果は安定して多くの菌体が付着した。

カ 考察

上段 A-C が参考文献¹⁾の画像で、下段 A'-C' が私達が撮影した写真である。A が乳酸菌、B が酵母菌、C がそれらを共培養したものである。まず、乳酸菌と酵母菌の単独培養で十分な培養を確認したが、共培養にしたことで菌体数が増えたとはいえなかった。また、参考文献では乳酸菌と酵母菌が集まって凝集反応を起こす記載されていたが、参考文献のような凝集反応は起こらなかった。これは培地に十分な栄養があったため、相手に頼る必要がなかったからだと考えた。他にも、乳酸菌と酵母菌の中にも凝集反応が起こる特定のペアが存在し、今回の組み合わせでは起こらないのではないかと考えた。

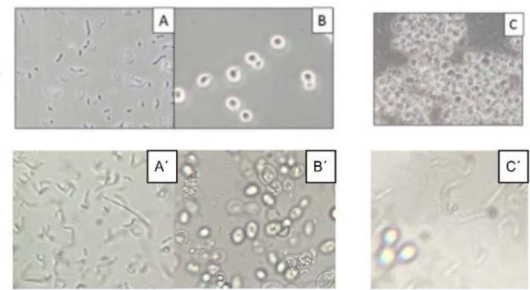


Fig. 5 顕微鏡による菌の様子

4 展望

今回の実験では単独培養に土台を入れるということをしなかったため、単独培養と共培養の比較という観点で比較できなかったことが、データに不足している部分であると感じた。また、土台の比較という観点では、土台の種類による質量の差が、土台の形状によるものなのか、土台の質量によるものなのかを今回の実験で判明しなかったため、対照実験を用いて調査したい。

また、底の面積が大きい細胞培養フラスコを用いて、バイオフィルムが膜を張りやすい環境を作ることと、共培養によるバイオフィルムの形成の効率性が変わるのか調べたい。

5 参考文献

- 1) 古川壮一 酵母、乳酸菌及び酢酸菌の複合バイオフィルム形成
日本大学・生物資源科学部・食品生命学科 (参照 2025 年 12 月 18 日)
https://www.sapporoholdings.jp/foundation/old_record/list/2009/pdf/list_2009_05.pdf
- 2) 乳酸菌と酵母の共存と共生
https://www.sbj.or.jp/wp-content/uploads/file/sbj/9004/9004_yomoyama-1.pdf
- 3) 古川壮一 酵母、乳酸菌および酢酸菌の複合バイオフィルム形成とその利用
日本生物工学会 (参照 2025 年 9 月 11 日)
https://www.sbj.or.jp/wp-content/uploads/file/sbj/8908/8908_tokushu_5

乳酸菌と酵母菌の共培養 ～土台と沈殿物形成量の関係～

背景

先輩達の研究や参考文献から、乳酸菌と酵母菌は培養の条件次第で、共生関係にあることが分かった。本研究では、2つの菌を効率的に共培養させるにはどうすればいいか、培養条件を検討した。

共培養とは

2種類以上の微生物を同じ培地で同時に培養すること。乳酸菌と酵母菌をそれぞれ寒天培地で培養し、液体培地に移し、1つの液体培地にまとめ、共培養を開始した。

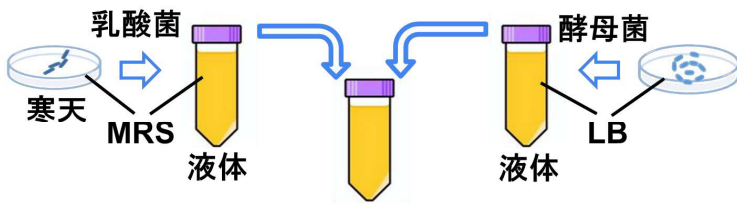


Fig. 1 共培養に至るまでの工程

予備実験

本実験を行うにあたり、共培養に最適な乳酸菌と液体培地の検討を行った。

- ・最適な乳酸菌の検討（R-1、クレモリス菌、シロタ株）
→**シロタ株**が最適
- ・共培養に最適な液体培地の検討
（MRS液体培地、MRS+LBの混合液体培地、LB液体培地）
→**MRS液体培地**が最適

また、遠沈管を用いた共培養を行ったとき、菌体が遠沈管の底に沈殿してしまうことが分かった。

実験①

背景

効率良く培養するためには、菌が液体培地の栄養分と触れる表面積が大きくなるべきだと考えた。

目的

乳酸菌と酵母菌の付着に適した土台を検討する。

仮説

3種類の土台（ガーゼ、カバーガラス、ポリプロピレンの網（以後PPと呼ぶ））ではPPに最も菌体が付着する。

方法

遠沈管にガーゼ、カバーガラス、PPを入れ共培養を行った。その後、土台に付着した菌体量を、CV（クリスタルバイオレット）法で調べた。

結果

CV法で検出した吸光度の相対値

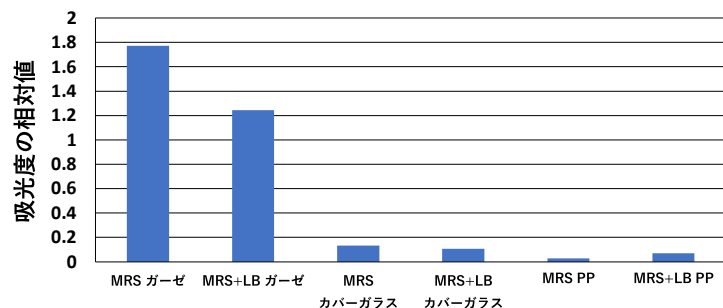


Fig. 2 菌体量と吸光度の関係

考察

菌体がガーゼに最も付着した理由は、他の土台の表面がなめらかなのに対し、ガーゼは天然素材の繊維で出来ているため、凹凸があり、菌が付着しやすい質感であったからだと考えた。

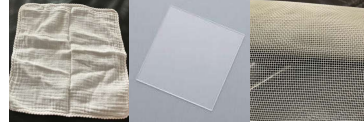


Fig. 3 3種類の土台

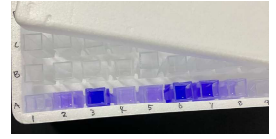


Fig. 4 CVによる染色

実験②

目的

土台の有無や形状の違いにより、増殖する菌体の量を調べる。

仮説

土台の形状を変えることで付着する菌体数が変化する。

方法

- ①超音波洗浄機にかけた。（60Hz, 3分）
- ②遠心分離器にかけた。（10,000g, 10分）
- ③上澄みを捨て、溶液を足し繰り返し沈殿物を溜めた。
- ④ガーゼは個別で取り出し、沈殿物と共に乾燥させた。



Fig. 5 ガーゼ入り培養液



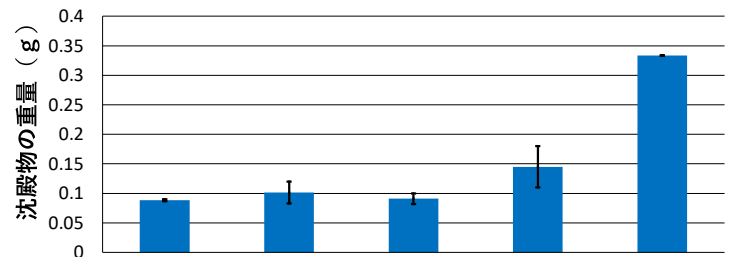
Fig. 6 土台A



Fig. 7 土台B

結果

培養の結果生じた沈殿物量



考察

Fig. 8 沈殿物の重量の比較

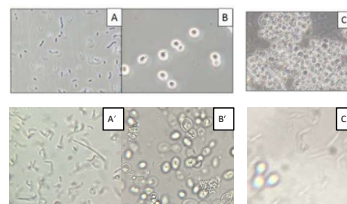


Fig. 9 A-乳酸菌・B-酵母菌・C-共培養
上段-参考文献・下段-本実験

参考文献のように凝集反応が起こらなかった。培地に十分な栄養があったため、相手に頼る必要がなかったことや、今回の組み合わせでは凝集反応が起こらないことが考えられた。

展望

栄養分の少ない培地を用いて共培養を行い、凝集反応が起こるか検討したい。また、乳酸菌と酵母菌の組み合わせについても、他の菌を用いて調査したい。さらに、液面が広い培養フラスコの特性を活用して、バイオフィームが膜を張りやすい環境を作ることによって共培養によるバイオフィームを形成させたい。

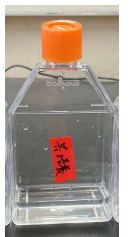


Fig. 10 貧栄養培地

参考文献

- 古川社一 片倉啓雄 乳酸菌と酵母の共存と共生 日本生物工学会（参照2025年12月18日）
https://www.sbj.or.jp/wp-content/uploads/file/sbj/9004/9004_yomoyama-1.pdf
古川社一 酵母、乳酸菌および酢酸菌の複合バイオフィーム形成とその利用 日本生物工学会（参照2025年9月11日）
https://www.sbj.or.jp/wp-content/uploads/file/sbj/8908/8908_tokushu_5.pdf
古川社一 多菌種複合バイオフィームを利用した物質生産 J-STAGE（参照2025年9月11日）
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jbrewsocjapan/107/5/107_292/_pdf
古川社一 酵母、乳酸菌及び酢酸菌の複合バイオフィーム形成 日本大学・生物資源科学部・食品生命学科（参照2025年12月18日）
https://www.sapporoholdings.jp/foundation/old_record/list/2009/pdf/list_2009_05.pdf

ゲーミング反応での色のグラデーション変化

1 研究背景

ゲーミング反応とは、青色の食用色素であるインジゴカルミン（IC）が酸化還元されることで水溶液の色がグラデーション状に変化する反応である。IC が塩基性下のグルコースによって還元されると、緑、赤、黄色の順に変化する。また、酸化されると黄色、赤、緑の順に変化する（Fig. 1）。私たちは、異なる形の容器でゲーミング反応を行ったところ、容器によって色の変化の仕方に違いがあることを見出した。この原因を調べるために、色のグラデーション変化に影響を与える要因として温度、溶液中の酸素、空気中の酸素、紫外線に注目して研究した。



Fig. 1 IC の構造と色

2 実験1 温度

(1) 目的

同じ試薬を使う信号反応では、温度が高いと反応が早く進むことが分かっている。そのことから、ゲーミング反応も温度の影響を受けるのではないかと考え、温度が与える影響を調べることにした。

(2) 実験方法

1%IC 溶液 1 mL、グルコース 1.2g、NaOH 0.2g、純水 80mL、攪拌子を大型試験管に入れた。そしてマグネティックスターラーを用いて攪拌し、熱湯で溶液を温めながら色の変化を観察した（Fig. 2）。

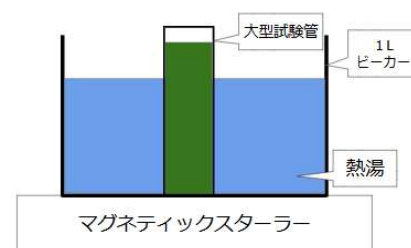


Fig. 2 実験装置 1

(3) 結果

溶液はすぐに緑色から黄色になり、赤色が見えないほど速かった（Fig. 3）。

(4) 考察

ゲーミング反応は温度の影響を強く受ける。

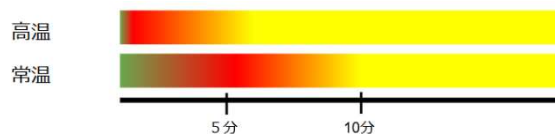


Fig. 3 色の変化の仕方

3 実験2 溶液中の酸素

(1) 目的

ゲーミング反応が酸化還元反応であることから、酸素が IC を酸化することで、還元反応の速度が遅くなると考え、溶液中の酸素による影響を調べた。

(2) 実験方法

1L ビーカーを用意し、SPARK を用いて溶存酸素を測定する電極を溶液につけて測定した (Fig. 4)。この実験では電極がしっかりつかるように試薬を実験 1 の 6 倍にした。

(3) 結果

溶存酸素量は反応を開始するとすぐにほぼ 0 になり、溶液の色が変化しても値は変化しなかった。

(4) 考察

溶存酸素はゲーミング反応に影響しない。

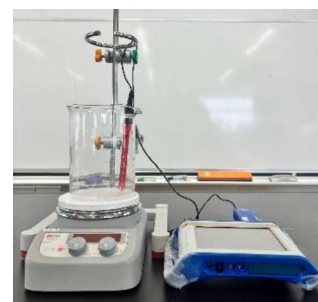


Fig. 4 実験装置 2

4 実験 3 空気中の酸素

(1) 目的

空気中の酸素の影響を調べるためにアルゴン (Ar) 下と酸素下でのゲーミング反応について調べる。Ar は安定しており、反応しにくく、空気より重いので、反応における酸素の影響を少なくすることができる。

(2) 実験方法

大型試験管、1L ビーカー、金魚鉢を用意し、実験 1 と同様の試薬、撹拌子を入れ、マグネティックスターラーを用いて撹拌した。まず、気体を通すチューブを溶液内に入れ、溶液中の気体を追い出す。その後、チューブを溶液から出し、溶液の水面上部に気体を流した。それぞれの容器をパラフィルムで蓋をして、できる限り外部から空気が流れ込まないようにして反応させた (Fig. 5)。反応が終わり、溶液が黄色になったところで IC が残っているか確認するため、溶液内に気体の酸素を加え、赤や緑に変化するか確認した。



Fig. 5 実験装置 3

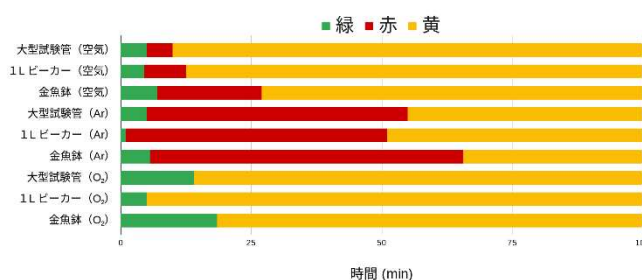


Fig. 6 色の变化

Table 1 酸素を加えた時の色の变化

○…赤や緑に戻る ×…変化なし

大型試験管 (Ar)	○
1L ビーカー (Ar)	○
金魚鉢 (Ar)	○
大型試験管 (酸素)	×
1L ビーカー (酸素)	×
金魚鉢 (酸素)	×

(3) 結果

Ar 下では赤色の時間が長くなり、酸素下では赤色の時間が無くなった (Fig. 6)。反応後、黄色になった溶液に酸素を加えると、Ar 下のものは色が赤や緑に戻り、酸素下のものは色の変化はなかった (Table 1)。

(4) 考察

Ar 下では、黄色になるまでの時間が全体的に伸び、特に赤色や橙色の時間が長くなった。酸素下では、酸化反応が起こり、色の变化に時間がかかると予想したが、結果は逆になった。反応後の溶液が普段観察している溶液の黄色よりも薄い黄色だったことから、IC とは別の物質が生成されていると考えた。このことを確かめるために、酸素下で反応させた後の薄い黄色の水溶液に、酸素を加えて観察したところ色の变化はなかった。IC は条件によって分解されることがあると報告されているため、赤色の IC のラジカルと酸素のラジカルが反応し、IC の C-C 結合が切れることで分解され、別の物質になっていると考えられる (Fig. 7)。Ar 下では赤色の IC のラジカルが酸素のラジカルと反応する機会が少なく、IC は分解されにくい。

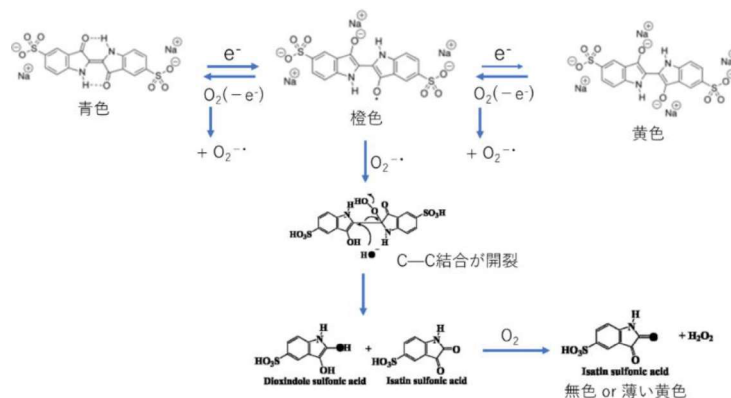


Fig. 7 反応時の IC の構造変化

5 実験 4 紫外線

(1) 目的

紫外線により、IC の分解が促進されるか調べる。

(2) 実験方法

大型試験管に実験 1 と同様の試薬、攪拌子を入れ、マグネティックスターラーを用いて攪拌した。ブラックライトに当てるものと当てないもので比較した (Fig. 8)。溶液が黄色になったところで実験 3 と同様に酸素を加えた。

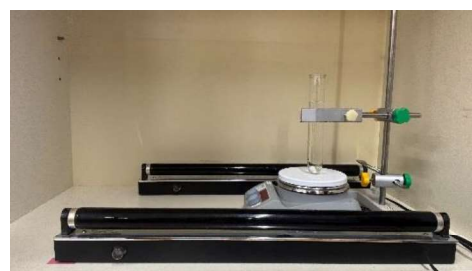


Fig. 8 実験装置 4

(3) 結果

ブラックライトありのものとなしのものでは、色の変化に違いがみられなかった。また、溶液が黄色になった後に酸素を加えたところ、どちらも赤色や緑色に変化したので、IC は分解されていない。

(4) 考察

紫外線により、ラジカルが活性化され、分解が進むと予想したが、ゲーミング反応に影響しないと考えられる。

6 結論

ゲーミング反応の色のグラデーション変化に大きく影響する要因は、温度と空気中の酸素である。

7 展望

IC が分解されてできた物質がどんな物質なのかを分析をする。また、色を視覚的にしか判断できていないため、光・色センサを利用し、色の変化をグラフ化する。

8 参考文献

1) 奈良県立教育研究所、” 信号反応とゲーミング反応の比較”

<https://www.e-net.nara.jp/hs/nara/index.cfm/7,2986,c,html/2986/20231024-132829.pdf>

2) 愛媛県立宇和島東高等学校、” 信号反応の研究”

<https://uwajimahigashi-h.esnet.ed.jp/uploads/h272nen04.pdf>

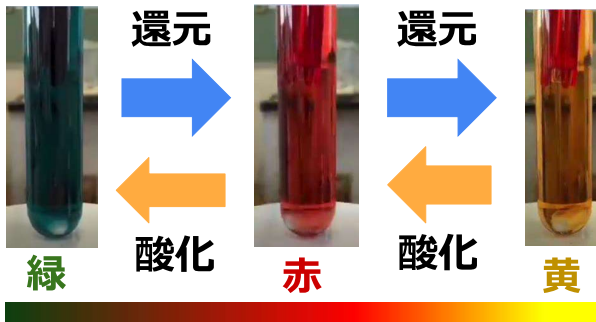
3) 横浜国立大学、木村朋恵、インジゴカルミンを用いた酸化還元反応と化学教材への応用

<https://share.google/of5hB7GCEK3KN2Eyx>

ゲーミング反応での色のグラデーション変化

背景 ゲーミング反応とは

インジゴカルミン(IC)の酸化還元反応による水溶液の色のグラデーション変化



目的

同じ試薬でも使う容器により色変化の仕方が異なった色のグラデーション変化に影響を与える要因を探る

各実験で注目した要因

1.温度 2.溶液中の酸素 3.空気中の酸素 4.紫外線

実験1 温度

仮説

温度を上げると、ゲーミング反応は速く進む

方法

- 1) 装置(Fig.1)を用意した
- 2) 試薬を入れて攪拌した
NaOH 0.2g
グルコース 1.2g
純水 80mL
- 3) 熱湯で溶液を温めて、1%IC溶液を1mL加えた

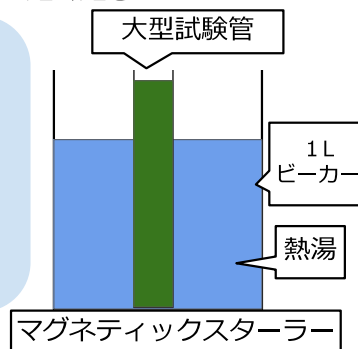


Fig. 1 実験装置 1

結果

溶液はすぐに緑色から黄色になった
緑から赤への変化は見られないほど速かった

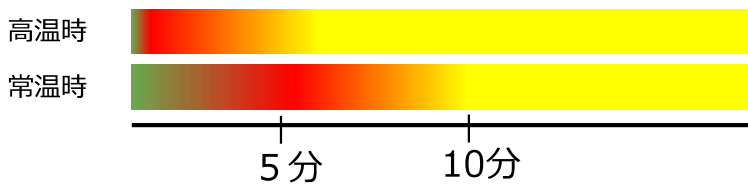


Fig. 2 色の変化の仕方

考察

- ・温度が高いと反応が速くなる
- ・ゲーミング反応は温度の影響を大きく受ける

実験2 溶存酸素

仮説

溶液中の酸素が色変化に影響を与えている

方法

- 1) 1LビーカーとSPARKを用いて溶存酸素を測定する電極を用意した
- 2) 試薬の量を6倍にして攪拌した
- 3) 1%IC溶液を6mL加えた

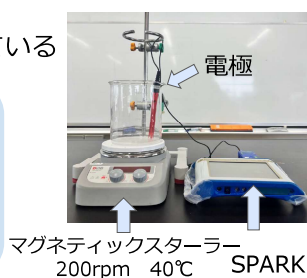


Fig. 3 実験装置 2

結果 考察

溶液の色が変化しても溶存酸素量は0 → 溶存酸素は影響していない

実験3 空気中の酸素

仮説

空気中の酸素が色変化に影響を与える

Ar...空気より密度大、安定している

方法

- 1) 実験2と同じ装置を準備した
- 2) 実験1の試薬を加え、攪拌した
- 3) ArまたはO₂を溶液と液面上部に流した
- 4) 1%IC溶液を1mLを加える
- 5) 溶液が黄色になった後、酸素を加えた(ICの残存を確認するため)



Fig. 4 気体で置換する様子

結果

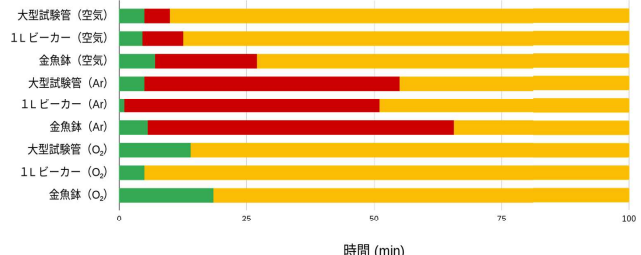


Fig. 5 反応中の色の変化

Table 1 反応後の色の変化

○: 赤や緑に戻る ×: 変化無し

大型試験管 (Ar)	○
1Lビーカー (Ar)	○
金魚鉢 (Ar)	○
大型試験管 (O ₂)	×
1Lビーカー (O ₂)	×
金魚鉢 (O ₂)	×

Ar置換下(酸素が少ない状態)
赤の時間が伸び、黄色になった後に酸素を加えると、色は赤や緑に戻る
O₂置換下(酸素が多い状態)
赤の時間がなくなり、黄色になった後に酸素を加えても色の変化はなかった

考察

- ・空気中の酸素の影響がなければ、赤色の時間が長くなる
- ・ICが分解されて別の黄色の物質へと変わった

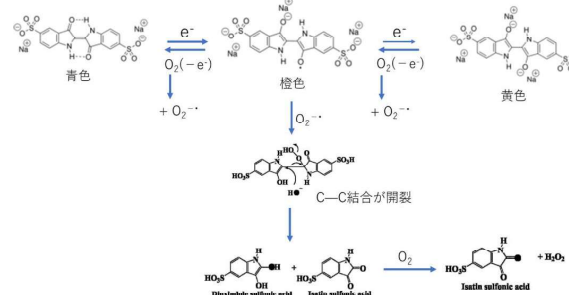


Fig. 6 反応時のICの構造変化

実験4 紫外線

仮説

紫外線(UV)を当てることでICの分解が促進される

方法

- 1) 装置(Fig. 7)とIC溶液を準備した
- 2) 溶液を作り、攪拌した
- 3) IC溶液を加えて、UVを当て、溶液の色変化を観察した

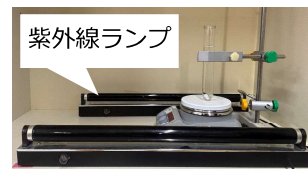


Fig. 7 実験装置 3

結果 考察

UV無しの時と反応時間に差は出ず、酸素を加えて色が戻った
UVは影響ない 活性酸素を増加するにはUVが弱かった

結論

温度と空気中の酸素がグラデーション変化に影響している

展望

イサチンスルホン酸の生成分析、光・色センサでグラフ化する

参考文献

奈良県立教育研究所, "信号反応とゲーミング反応の比較", <https://www.e-net.nara.jp/hs/nara/index.cfm/7,2986,c/html/2986/20231024-132829.pdf>
横浜国立大学木村朋恵"インジゴカルミンを用いた酸化還元反応と化学教材への応用", <https://share.google/of5hB7GCEk3KN2Eyv>

代表的抗酸化物質の機能性評価

1 動機

アスコルビン酸よりも高い抗酸化力を有する抗酸化物質を使用することで、より効果的な酸化抑制が可能になると考え、本研究を着想した。

2 研究目的

- ・アスコルビン酸と他の抗酸化物質の抗酸化力を比較、評価する。
- ・抗酸化物質によって生鮮食品の酸化を抑えられるかを調べる。

3 実験

(1) 実験 1

ア 目的

代表的な水溶性抗酸化物質の抗酸化力の強さに順列を付ける。

イ 仮説

使用する水溶性抗酸化物質の中では、没食子酸、アスコルビン酸、カテキンの順で抗酸化力が高い。

ウ 実験方法

- (ア) レモン液 20 mL とレモン液と濃度をそろえたアスコルビン酸水溶液 20 mL を作る。
- (イ) アスコルビン酸水溶液に各水溶性抗酸化物質を質量パーセント濃度 0.5% になるように入れる。
- (ウ) レモン液とアスコルビン酸水溶液を混ぜ、約 6 時間放置し、自然酸化を進行させた。
- (エ) 放置した溶液を、ヨウ素酸カリウム、ヨウ化カリウム、メタリン酸、でんぷんを用いた酸化還元滴定を行い、アスコルビン酸濃度を調べる。

エ 結果

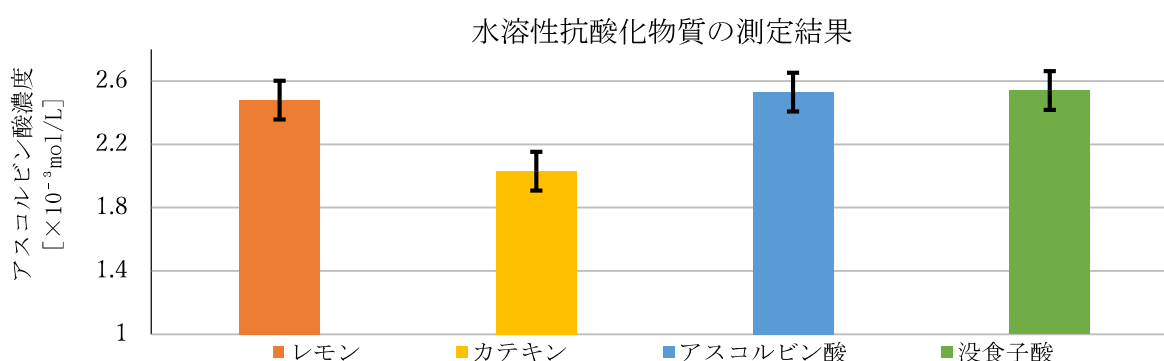


Fig. 1 水溶性抗酸化物質使用時の VC 濃度

オ 考察

2 種類の抗酸化物質が同時に存在すると、単独の場合とは異なり、互いに酸化反応へ影響を与えた。特に電子供与能力の高い抗酸化物質が優先的に酸化されることで、他の抗酸化物質の酸化を抑制する相乗効果を示すことがある。本実験では、没食子酸がこの役割を担い、アスコ

ルビン酸の酸化を抑制したと考えられる。

(2) 実験 2

ア 目的

水溶性抗酸化物質と脂溶性抗酸化物質の抗酸化力を比較する。

イ 仮説

使用するアスタキサンチン、ポリフェノール（ワイン）リコピン、没食子酸の中で、アスタキサンチンが最も高い抗酸化力を示す。

ウ 実験方法

(ア) DPPH 試薬をエタノールに溶解し、DPPH 溶液を調製した。

(イ) 各試料を(ア)の DPPH 溶液と混合し、一定時間（本実験では 30 分間）静置して反応させた。

(ウ) 反応後、分光光度計を用いて波長 571 nm における吸光度を測定し、吸光度の低下率を抗酸化力の指標として評価した。

エ 結果

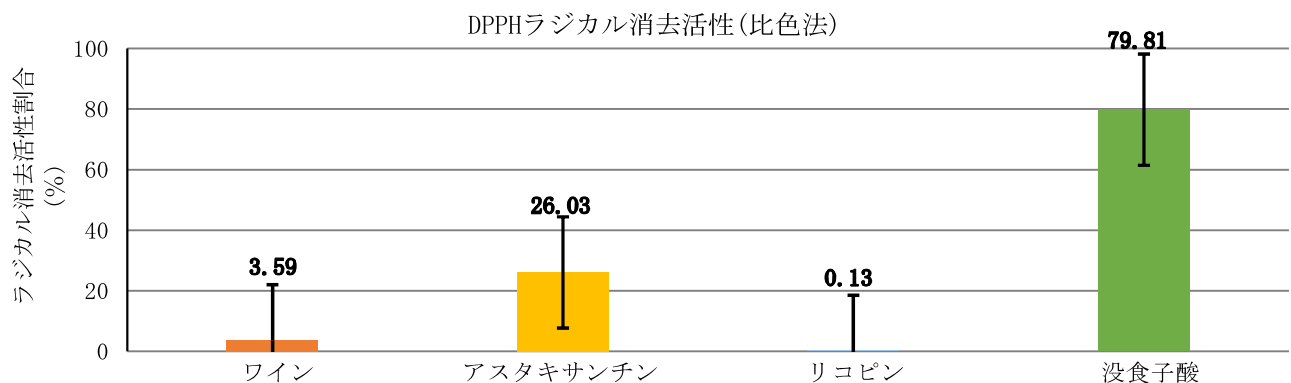


Fig.2 DPPH ラジカル消去活性(比色法)

オ 考察

没食子酸の抗酸化力が一番高くなった要因としては、今回使用したアスタキサンチンの濃度が低い可能性が考えられる。また水溶性抗酸化物質の抗酸化力を測定する方法で脂溶性抗酸化物質を使用したため、単純に比較をすることができなかったと考えられる。

(3) 実験 3

ア 目的

キトサン膜を作成し、生鮮食品の酸化の抑制が可能かを調べる。

イ 仮説

キトサン膜を付けた生鮮食品の酸化が抑制される。

ウ 実験方法

(ア) キトサン 4.0 g を 1 % 酢酸水溶液に入れ、約 4 時間攪拌する。

(イ) シャーレに流し入れ、恒温乾燥機(45 °C)で約 15 時間乾燥する。

(ウ) 乾燥させた後、蒸留水(15 mL)を加え、ふやかして取り出す。

(エ) レモンを二等分し、断面に膜を被せる。(Fig.3)

(オ) 6 時間放置した後、実験 1 と同じ滴定方法で滴定を行う。

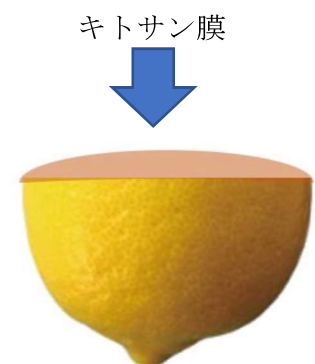


Fig.3 キトサン膜を付けたレモン

エ 結果

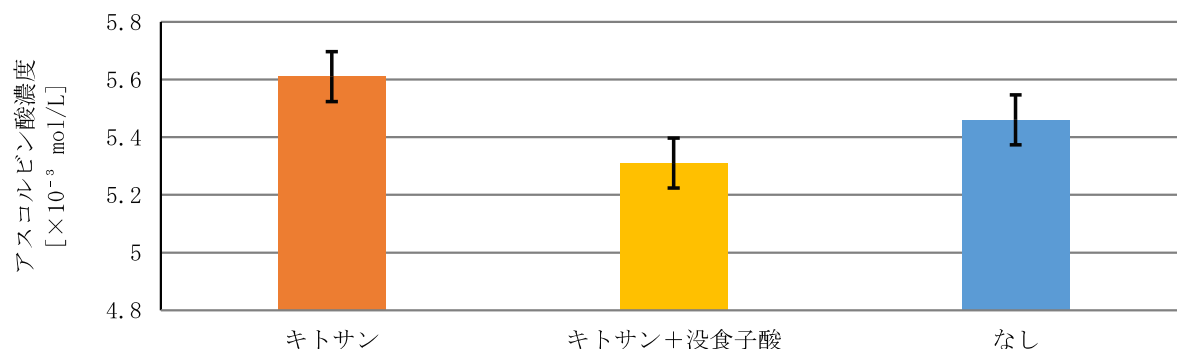


Fig. 4 キトサン膜使用時の VC 濃度

オ 考察

キトサン膜の結果からキトサン自体が抗酸化力を持っていると考えられる。キトサンと没食子酸が混ざることによって水素結合が発生し、耐久性の向上は見られた。しかしキトサン膜に没食子酸が混ざることによって、キトサン膜本来の緻密さが失われ、酸素を通しやすくなってしまった可能性がある。

4 展望

本研究では、代表的な抗酸化物質を対象として、その抗酸化力を比較・評価した。実験 1 では水溶性抗酸化物質に着目し、没食子酸が高い抗酸化力を示すことが明らかとなった。一方、カテキンは他の物質と比較して抗酸化力が低く、その要因として分子構造の違いが関与している可能性が示唆された。実験 2 では脂溶性抗酸化物質を含めた評価を行ったが、抗酸化物質の抽出条件や溶解性の違いにより、正確な比較が困難であることが明らかとなった。また、水溶性抗酸化物質と脂溶性抗酸化物質は性質や用途が大きく異なるため、同一手法で抗酸化力を比較することには限界があることが示された。実験 3 ではキトサン膜を用いて生鮮食品の酸化防止を試みた。その結果、キトサン膜自体に一定の抗酸化力があることが確認されたが、没食子酸を混合する過程において膜の緻密性が低下するという課題が生じた。また、キトサン膜単独では抗酸化力がアスコルビン酸などと比較して弱く、耐久性も十分ではないため、キトサン膜のみでの実用は困難であると考えられる。

以上の結果から、生鮮食品の酸化防止にキトサン膜を用いる場合には、没食子酸のように水素結合によって耐久性を向上させつつ、膜の緻密性を損なわない生成方法を確立すること、あるいは他の水溶性抗酸化物質を併用することで、より効果的な酸化防止が可能になると考えられる。

5 参考文献

- 1) http://www.mac.or.jp/mail/070701/03_list1.shtml
食品分析開発センター
- 2) <https://x.gd/9HqT5>
酸化防止剤力価評価のための各種抗酸化活性測定法の共同試験
- 3) <https://www.jftrl.or.jp/storage/file/768.pdf>
日本食品分析センター
- 4) <https://president.jp/articles/-/80619?page=1>
ビタミン E の約 500 倍…認知症予防が期待できる”史上最強の抗酸化物質”を多く含む「魚の名前」

代表的抗酸化物質の機能性評価

研究背景

- ・アスコルビン酸よりも強力な抗酸化物質を使用することで、より効果的な酸化の抑制ができると思ったため。

研究目的①

- ・水溶性抗酸化物質の強さを測定する。
- ・抗酸化力の序列と調べる方法について確認する。¹⁾
- ・抗酸化物質を用いて生鮮食品（レモン）の酸化を防ぐ。

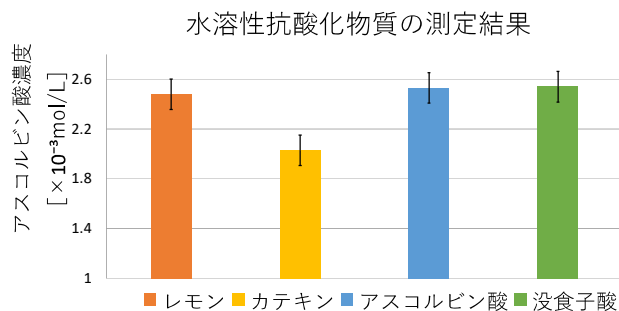
仮説①

水溶性の抗酸化物質（アスコルビン酸、カテキン、没食子酸）では没食子酸が一番抗酸化力強い。²⁾

実験方法①

- 1.レモン液に各抗酸化物質を同濃度になるよう入れる。
- 2.レモン内のアスコルビン酸を酸化させるため6時間放置する。
- 3.酸化還元反応滴定を行いアスコルビン酸濃度を測定する。

結果①



- ・カテキンが一番濃度が小さい。
- ・アスコルビン酸、没食子酸の抗酸化力はほぼ同じ。

考察①

- ・没食子酸もフェノール性水酸基を複数有しており、水溶液中で高い抗酸化作用を示すことから、没食子酸とアスコルビン酸、両者の抗酸化作用は互いに影響を与えないと考えられる。
- ・2種類の抗酸化物質が同時に存在すると、単独の場合とは異なり、互いに酸化反応へ影響を与えた。特に電子供与能力の高い抗酸化物質が優先的に酸化されることで、他の抗酸化物質の酸化を抑制する相乗効果を示すことがある。この実験では、没食子酸がこの役割を担い、アスコルビン酸の酸化を抑制したと考えられる。

実験②目的

分光光度計を用いてアスタキサンチン、ワイン（ポリフェノール）、没食子酸、リコピンの抗酸化力を調べる。³⁾

仮説②

参考文献より、アスタキサンチンが一番抗酸化力が強く、ワイン（ポリフェノール）が一番弱い。

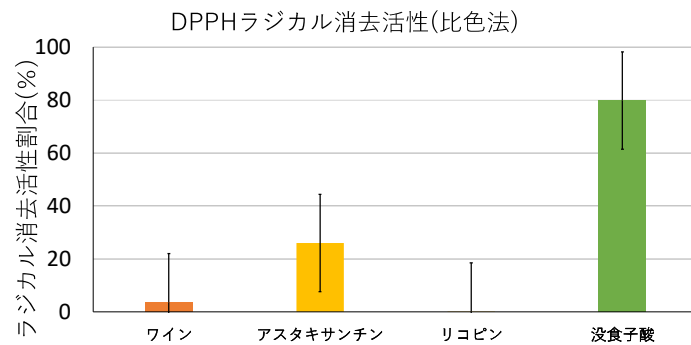
実験方法②

- 1.DPPH試薬をエタノールで溶解する。
- 2.試料を(1)と混合させ、30分放置し、反応させる。
- 3.分光光度計を用いて吸光度を測定し、吸光度の低下率を評価する。

展望

- ・レモン以外の生鮮食品に応用し、酸化（劣化）を防ぐのか確認する。
- ・試薬を用いて抗酸化力を測定する。
- ・キトサン膜の強度の向上など更なる改良をする。

結果②



- ・リコピンが一番ラジカル消去活性割合が低い。
- ・アスタキサンチンよりも没食子酸の方が割合が高かった。

考察②

- ・リコピンの割合が異様に低かった。
- ➡ リコピンはDPPHラジカル消去活性を利用出来なかった。
- ・なぜアスタキサンチンよりも没食子酸の方が抗酸化力強いのか。
- ➡ 分からない。

考えられる原因

- ・アスタキサンチンの量が少なかった（純度が低かった）。
- ・水溶性の抗酸化物質を調査する方法で脂溶性の抗酸化物質を使用したため、単純に比較できなかったから。

実験③目的

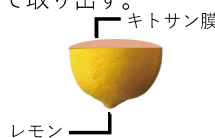
キトサン膜を使用し、生鮮食品の酸化を防ぐ。

仮説③

何もしない生鮮食品より、キトサン膜を付けた生鮮食品の方が酸化が抑制される。

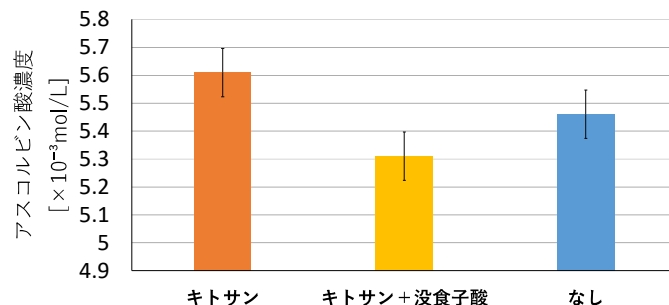
実験方法③

- 1.キトサン4.0 g を 1 %酢酸水溶液に入れ、約4時間攪拌する。
- 2.シャーレに流し入れ、恒温乾燥機(45 °C)で約15時間乾燥する。
- 3.乾燥させた後、蒸留水(15 ml)を加え、ふやかして取り出す。
- 4.レモンを二等分し、断面に膜を被せる。
- 5.6時間放置した後、レモンを搾り滴定をする。



結果③

キトサンを使った抗酸化作用



- ・キトサン膜に没食子酸を加えたものは何もなかったものに比べ、濃度が低くなった。

考察③

- ・なぜキトサン+没食子酸が「なし」よりも値が低くなったのか。
- ➡ 没食子酸が混ざること、キトサン膜の緻密さが失われ、酸素を通しやすくなってしまった可能性がある。

参考文献

- 1) http://www.mac.or.jp/mail/070701/03_list1.shtml 食品分析開発センター
 - 2) <https://x.gd/9HqT5> 酸化防止剤力価評価のための各種抗酸化活性測定法の共同試験
 - 3) <https://www.jfrl.or.jp/storage/file/768.pdf> 日本食品分析センター
 - 4) <https://president.jp/articles/-/80619?page=1>
- ビタミンEの約500倍…認知症予防が期待できる"史上最強の抗酸化物質"を多く含む「魚の名前」

音楽がカイワレに及ぼす成長効果

1 概要

音楽熟成とは植物に音楽（一般にクラシック音楽）を聞かせると、成長の促進や糖度の増加がみられるという現象である。この現象については様々な研究が行われ、効果も認められているものの、原理について分かっていることは少ない。私達はこの現象の原理を明らかにすることを目標に、カイワレを用い実験を始めた。先行実験では、音楽の音量は 45dB 程度が適しており成長を促進するが、60dB 程度まで音量を上げてしまうと逆に成長を抑制してしまうと分かったため、本実験では音量を 45dB 程度に固定し、音色を増やし実験を行うことにした。

2 研究目的

音楽熟成の原理を探るとともに、効果がより促進される条件を発見する。

3 実験 1

（1）目的

音楽の種類の違いによるカイワレの成長の度合いの違いを調べる。

（2）使用した音楽

- ・ヒーリング音楽（フリーBGM「新緑の丘」<https://dova-s.jp/bgm/play940.html>）
- ・環境音（流水音 <https://vsq.co.jp/plus/sound/category/environment/>）
- ・クラシック（J.C. フィッシャーのメヌエットによる 12 の変奏曲ハ長調）

（3）実験方法

ア カイワレを 15 本ずつ、音楽を聞かせる集団（以下、音あり）音楽を聞かせない集団（以下、音なし）の 2 つに分けた。

イ 音あり・音なし両方とも 22℃の恒温機内にセットし、10 日間栽培した。このとき、音ありには 45dB の各音源（ヒーリング音楽、環境音、クラシック）を 7時から 19 時まで送波し、太陽光を再現するため音楽の送波と同じ時間 LED ライトの光を当てた。



Fig. 1 栽培環境

（Fig. 1）

ウ 実験開始から 10 日後、音あり・音なしの長さを測定し平均値を計算した。

<実験日程>

- | | |
|-------------|-------------------|
| ヒーリング音楽&音なし | 8 月 9 日～8 月 19 日 |
| 環境音&音なし | 8 月 21 日～8 月 31 日 |
| クラシック&音なし | 9 月 19 日～9 月 29 日 |

季節をまたぎ、複数回行う実験であったため、実験ごと音なしも栽培し、それぞれの音あり（ヒーリング音楽、環境音、クラシック）と音なしの長さの平均と比較した。

<音楽の種類について>

先行研究から、リラクゼーション音楽であるクラシック音楽がカイワレの成長を促進させることが分かっていることから、同じくリラクゼーション音楽である環境音、ヒーリング音楽を

採用し、クラシックとの結果と比較することにした。

(4) 結果

すべての音源で音ありが音なしよりも成長が促進された。(Fig. 2) また、先行研究で結果の示されているクラシックよりもヒーリング音楽のほうが音なしとの長さの差が大きかった。しかし、どの集団も個体ごとの長さにはばらつきが見られた。(Fig. 3) なお、各集団での音なしの平均長さのばらつきは個体差であると考え考慮していない。

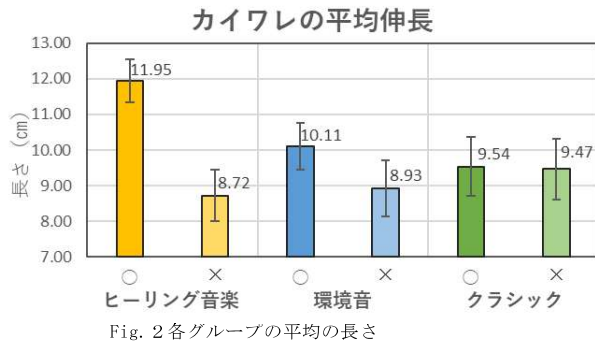


Table1 各グループの最長・最短数値

		音なし(cm)	音あり(cm)
ヒーリング音楽	最長	11.7	14.5
	最短	4.6	8.4
環境音	最長	11.8	13.5
	最短	8.0	7.5
クラシック	最長	14	13
	最短	7.0	5.5

(5) 考察

音楽の種類により長さの差が生じるのは、植物に音を受容する受容体があり、音楽の周波数の違いによって受容の仕方が異なるため、植物内の代謝に違いが生まれ、成長が促進されるのではないかと考えられる。

代謝に変化が生じれば、代謝物にも変化が生じるのではないかと考え、最も成長が促進されたヒーリング音楽の音ありと音なしの代謝物の違いを測定することにした。

4 実験 2

(1) 目的

音ありと音なしのそれぞれに含まれる代謝物を測定する。

(2) ガスクロマトグラフ (GC) 分析について

GC の装置は主に試料気化室、カラム、検出器の 3 つで構成されている。化合物が混合された液体試料を試料気化室で加熱・気化し、カラムで各化合物に分離する。その後、検出器が各化合物を検出し、成分量を電気信号に変えてデータ処理装置に送ることで、試料にどのような成分がどれだけの量含まれているかを測定することができる。本実験では試料であるカイワレを液状にした上で、GC を用いた代謝物測定を行った。

(3) 実験方法

ア カイワレの種子を 60 粒×2 集団用意し、音楽を聞かせる集団を○、聞かせない集団を×とした。

イ ○には 7 時から 19 時までの 12 時間、実験 I で用いたヒーリング音楽を送波した。

この間、どちらの集団にも LED ライト光を照射した。

ウ 上記の状態です 10 日間育成した後、○・×両集団のカイワレを処理し、GC を用いて代謝物測定を行った。

(4) 結果

○のカイワレのバリン・グリシン・マンノース量が、×を大きく上回った。(Fig.3～5)

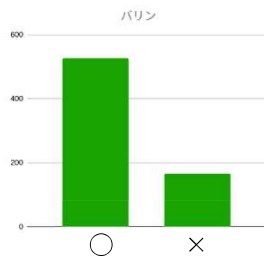


Fig.3 バリン量(Area/mg)



Fig.4 グリシン量

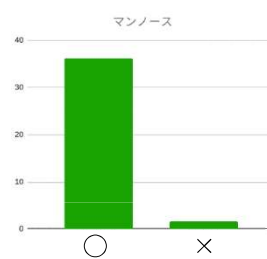


Fig.5 マンノース量(Area/mg)

(5) 考察

バリンとグリシンはどちらも生体内において、非常に多くの用途で用いられるアミノ酸である。これらは植物の光合成機能や ATP の生成にも大きな影響を与え、成長に欠かせない物質であるため、ストレスを感知した時、それに応答する形で多く生成される。すなわち、結果から考えて、音を聞かせたカイワレが聞かせていないものと比べて成長しているのは、音の刺激による弱いストレスに応答してバリンやグリシンが生成されるからであると考えられる。

また、上記のストレス応答は元々植物に備わっている環境適応能力である。植物はストレス刺激の受容をトリガーとして遺伝子発現を起こし、DNA の転写・複製による酵素の生成を行うことで生体内を変化させ、ストレスへの耐性をつけることができる。酵素には様々な種類があるが、その内の一つとして、前駆物質から生成物への化学反応の触媒となり、物質の生成を手助けするというものがある。マンノースは単糖の一種であり、合成経路は多岐にわたる。そのため私達は、音を聞かせたカイワレのマンノース量が増加した要因として、遺伝子発現によって生体内の酵素量が増加し、マンノース生成を促進したためであると考えた。

5 結論

カイワレは熱や光と同様に音を感知する受容体を持っているが、人間とは違い音楽をストレス刺激として認識していると考えられる。その結果、ストレス応答によりカイワレの内部でバリンやグリシンが生成される、遺伝子発現によりマンノースの生成が促進される、等の現象が起こり通常よりも伸長したのではないだろうか。

すなわち、カイワレにおける音楽熟成は音刺激に対するストレス応答反応であると考えられる。

6 展望

カイワレに直接マンノース水溶液を滴下し、マンノースにも植物の成長を促進させる効果があるかを調査したい。また、実際に遺伝子発現によって酵素量が増加しているか確認するために酵素量の測定を行いたい。また、より植物を成長させやすい（ストレスを与えやすい）音楽、周波数を発見したい。

7 謝辞

本研究の実験 2 を行うにあたり、御協力・御助言をくださった静岡大学理学部 竹本 裕之先生、農学部 原 和正 先生に深く感謝します。

8 参考文献

¹⁾ 坂本憲昭, 計測自動制御学会産業論文集, 平成 18 年

²⁾ 東京大学 植物分子生理学研究室, <https://park.itc.u-tokyo.ac.jp/pmp/research/Res-1-j.html>

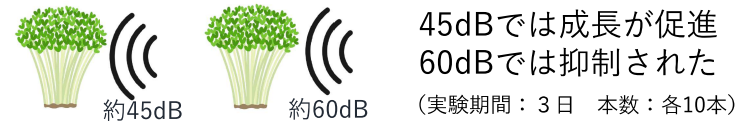
音楽がカイワレに及ぼす成長効果

「音楽熟成」とは

植物にリラクゼーション音楽を聞かせると成長の促進や糖度の増加が見られるという現象

- どのような条件下で成長が促進されるのか
- どのような原理で影響を及ぼすのか

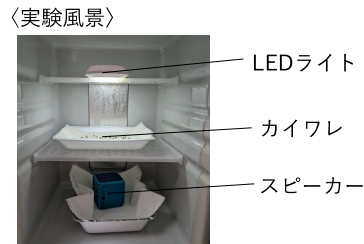
予備実験 音量に着目した実験



実験1 音色に着目した実験

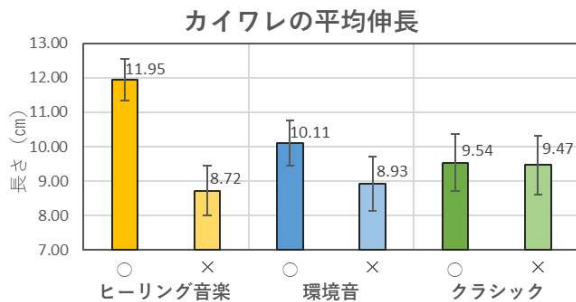


- 〈使用音楽〉
- ヒーリング音楽 (フリーBGM「新緑の丘」)
 - 環境音 (流水音)
 - クラシック音楽 (J.C.フィッシャーのメヌエットによる12の変奏曲ハ長調)



仮説 すべての音源で成長が促進される

結果



すべての音源において成長が促進された

考察

- カイワレはリラクゼーション音楽を心地よく感じ、代謝が活性化しているのではないかな
- 参考研究からメタル音楽では成長抑制 = 不快に感じているのでは？

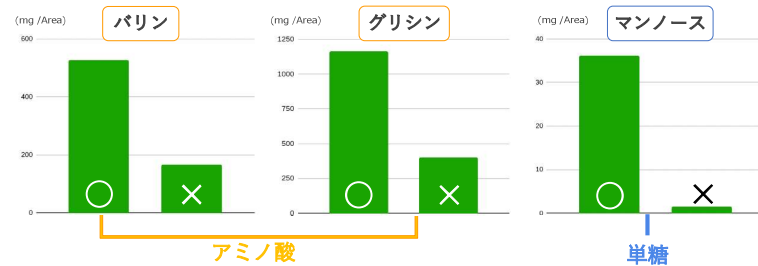
実験2 代謝物に着目した実験

ガスクロマトグラフィー



結果

音を聞かせたカイワレのマンノース、バリン、グリシン量が聞かせていないものより多かった



考察

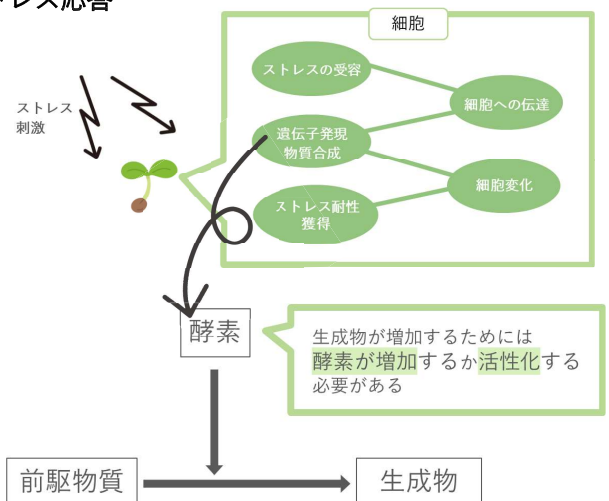
バリン ATPの生成、光合成促進、化学反応の触媒となる酵素の構成などストレス状況下で多く使われるアミノ酸

グリシン 植物のストレス耐性向上や、生育促進・保護に役立つアミノ酸

ストレス環境下で生き延びるために生成される

カイワレは音楽をストレスに感じている

ストレス応答



ストレス応答によって酵素が増加したことでマンノースも増加したのではないかな？

結論

- カイワレは熱や光と同様に音を感知する受容体を持っている
- 音をストレス刺激として受け取り、ストレス環境に適応するために生成される代謝物によって成長が促進される

カイワレにおける音楽熟成は、音刺激に対するストレス応答反応であると考えられる

展望

- 実験回数を増やす
- 音楽のどの要素が成長に影響するか調べる
- 酵素量が増加しているかを調べる
- マンノースを直接滴下して成長するか調べる

参考文献

兵庫県立神戸高等学校 総合理学科二年 「音の伸長への影響とそのメカニズム」.2019
音の植物の伸長への影響とそのメカニズム
坂本憲昭 「音刺激によるかいわれ大根の成長促進について」.2006
音刺激によるカイワレダイコンの生長促進について
東京大学 植物分子生理学研究室

平方根の平方根連分数展開

1 研究背景

数の展開には様々な方法があり、同じ数でも様々な表現をすることができる。 $\sqrt{3}$ の場合、小数展開、連分数展開は展開が無限に続くことが知られているが、平方根連分数展開では展開は有限になる。複数の先行研究¹⁾²⁾³⁾において、この展開が有限である数について触れられていたが、どれも具体的な数のみで、展開が有限となる条件は不明であった。以下、平方数でない自然数の平方根を、省略して平方根と呼ぶ。先行研究¹⁾より、 $\sqrt{2}$ から $\sqrt{3000}$ の間で整数でない平方根のうち、平方根連分数展開が有限である平方根は $\sqrt{3}$ と $3\sqrt{5}$ のみであった。しかし、他にも展開が有限な平方根があるのではないかと考えた。そこで、他の平方根を探すためには条件が必要だと考え、本研究では、平方根連分数展開が終わる平方根の条件を調べることを目的とした。

2 平方根連分数展開の定義

初めに、実数 m の平方根連分数展開を定義する。実数 α の整数部分、すなわち $\beta \leq \alpha < \beta + 1$ を満たす整数 β のことを $[\alpha]$ と表す。 $r = [m]$ とし、 $x_0 = m - r$ と定める。加えて、 $a_n = \left\lfloor \frac{1}{x_{n-1}^2} \right\rfloor$,

$x_n = \frac{1}{x_{n-1}^2} - a_n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) と定義する。このとき、 m は (2.1) という平方根連分数である。

$$(2.1) \quad m = r + \sqrt{\frac{1}{a_1 + \sqrt{\frac{1}{a_2 + \sqrt{\frac{1}{a_3 \dots}}}}}}$$

また、この平方根連分数は $[r, a_1, a_2, a_3, \dots]$ と表すことができる。このとき、 $r, a_1, a_2, a_3, \dots$ を項と呼ぶ。さらに、 $x_n = 0$ のとき、展開が第 $(n + 1)$ 項で終了すると定める。

3 第4項で展開が終了する平方根が満たす条件

先行研究より分かっていた、平方根連分数展開が有限な平方根に着目した。 $\sqrt{3}$ と $3\sqrt{5}$ において、展開は第4項で終了していたため、 r, a_n を自然数とし、 m を (3.1) と仮定する。

$$(3.1) \quad m = r + \sqrt{\frac{1}{a_1 + \sqrt{\frac{1}{a_2 + \sqrt{\frac{1}{a_3}}}}}}$$

(3.1) を変形すると、(3.2) となる。

$$(3.2) \quad \frac{1}{a_2 + \sqrt{\frac{1}{a_3}}} = a_1^2 + \left\{ \frac{4a_1mr}{(2mr)^2 - (m^2 + r^2)^2} - \frac{4m^2r + 4r^3}{m^2(4m^2r + 4r^3)^2 - (m^4 + 6m^2r^2 + r^4)^2} \right\} m \\ + \frac{2a_1(m^2 + r^2)}{(2mr)^2 - (m^2 + r^2)^2} - \frac{m^4 + 6m^2r^2 + r^4}{m^2(4m^2r + 4r^3)^2 - (m^4 + 6m^2r^2 + r^4)^2}$$

ここで、 $\sqrt{3}$ と $3\sqrt{5}$ において $a_2 + \sqrt{\frac{1}{a_3}}$ が有理数だったことから、 $a_2 + \sqrt{\frac{1}{a_3}}$ が有理数になる場合を考える。 m が平方根となるためには、(3.2)において左辺が有理数であるから、 m の指数が奇数の項の和が0となればよい。よって、(3.3)が立てられる。

$$(3.3) \quad \frac{4a_1mr}{2m^2r^2 - m^4 - r^4} - \frac{4m^3r + 4mr^3}{4m^6r^2 + 4m^2r^6 - 6m^4r^4 - m^8 - r^8} = 0$$

(3.3)を変形すると(3.4)となる。

$$(3.4) \quad a_1(m^2 - r^2)^2 - (m^2 + r^2) = 0$$

さらに $\sqrt{3}$ と $3\sqrt{5}$ において $a_1 = 1$ になっているため、 $a_1 = 1$ と仮定する。また、 $M = m^2$, $R = r^2$ と仮定すると(3.5)が成り立つ。

$$(3.5) \quad M^2 - M(2R + 1) + R^2 - R = 0$$

二次方程式の解の公式と、 $r < m$ より、(3.6)となる。

$$(3.6) \quad M = \frac{2R + 1 + \sqrt{8R + 1}}{2}$$

(3.6)において、 m は平方根であるため、 M は自然数であり $\sqrt{8R + 1}$ も自然数となる。 $k = \sqrt{8R + 1}$ とし、両辺を2乗すると $k^2 - 8r^2 = 1$ が成り立つ。これはペル方程式⁴⁾である。ペル方程式とは、 D を平方数ではない自然数として、 $x^2 - Dy^2 = 1$ で表される未知整数 x, y についての方程式である。ペル方程式の解の中で $x + \sqrt{D}y$ を最小にするような解を (x_0, y_0) とおくと、自然数 t を用いて $x + \sqrt{D}y = (x_0 + \sqrt{D}y_0)^t$ という形で書くことができる (x, y) もまたペル方程式の解である。また、ペル方程式は解が無限に存在するという定理を持つため、展開が第4項で終了する平方根も無限に存在することが証明できた。

4 $a_1 = 1$ のとき、(3.4)を満たす m の展開が定義に従っていることの証明

3の仮定を引き継ぐ。(3.4)について、 $a_1 = 1$ と仮定すると、(4.1)となる。

$$(4.1) \quad (m^2 - r^2)^2 - (m^2 + r^2) = 0$$

(4.1)を変形すると(4.2)となる。

$$(4.2) \quad \frac{1}{(m - r)^2} = 1 + \frac{2mr}{m^2 + r^2}$$

平方根連分数展開の定義から(4.3)となる。(4.2)、(4.3)より、(4.4)が成り立つ。

$$(4.3) \quad \frac{1}{x_0} = \frac{1}{(m - r)^2}$$

$$(4.4) \quad \frac{1}{x_0} = 1 + \frac{2mr}{m^2 + r^2}$$

また、(4.5)より $\left\lfloor \frac{1}{x_0^2} \right\rfloor = 1$ が成り立つ。したがって、 $a_1 = 1$ は展開の定義に従う。

$$(4.5) \quad 1 < 1 + \frac{2mr}{m^2 + r^2} < 2$$

また、(3.5)を用いて(3.1)を変形すると、(4.6)が成り立つ。 m^2, r^2 は自然数であるため、 $a_2 = 1$ 、(4.7)となり、 $x_3 = 0$ となる。よって、 r と a_n は展開の定義に従う。

$$(4.6) \quad a_2 + \sqrt{\frac{1}{a_3}} = 1 + \frac{1}{m^2 + r^2 - 1}$$

$$(4.7) \quad a_3 = (m^2 + r^2 - 1)^2$$

5 第4項以外で展開が終了する平方根について

プログラミングソフトのSageMathCellを用いて、展開が第10項以内に終了する平方根を $\sqrt{10000}$ まで調査した。その結果、第4項で展開が終了する平方根以外の数は見つからなかった。これより、第4項以外で展開が終了する平方根は存在しないことを仮説とし、一部その証明を行った。

まず、 m は第2項で展開が終了する平方根であると仮定する。第2項で終了する平方根の展開は(5.1)であり、(5.2)が成り立つ。しかし、左辺は有理数であり、右辺は無理数であり、矛盾が発生するため、第2項で展開が終了する平方根は存在しない。

$$(5.1) \quad m = r + \sqrt{\frac{1}{a_1}}$$

$$(5.2) \quad a_1(m^2 + r^2) - 1 = 2a_1mr$$

次に、 m を第3項で展開が終了する平方根と仮定する。第3項で終了する平方根の展開は(5.3)であり、(5.4)が成り立つ。

$$(5.3) \quad m = r + \sqrt{\frac{1}{a_1 + \sqrt{\frac{1}{a_2}}}}$$

$$(5.4) \quad (2a_1m^2 + 2a_1r^2 - 1)^2 = (4a_1mr)^2 + 1$$

この等式は、(5.5)のときのみ成り立つ。

$$(5.5) \quad 2a_1m^2 + 2a_1r^2 - 1 = 1, \quad 4a_1mr = 0$$

$a \neq 0, m \neq 0, r \neq 0$ より、 $4a_1mr \neq 0$ であり、矛盾が発生したため、第3項で展開が終了する平方根は存在しない。

6 展望

第4項で展開が終了する平方根の条件を求める過程で $a_2 + \sqrt{\frac{1}{a_3}}$ が有理数の場合のみしか考えられていなかったため、無理数となる場合についても考えたい。また、第4項でのみ展開が終了することの証明に加えて、展開が無限に続くとき、 n を増加させると、展開した値と元の値との差がどのように変化するかを調べたい。さらに、 $a_1 = 1$ 以外の場合、展開が有限な平方根は存在しないことも証明したい。

7 参考文献

¹⁾鯨坂もっちよ, (2019 年), 連分数展開について考えてたらやばい式が出てきてやばい, アジマティクス, <https://www.ajimatics.com/entry/2019/01/25/080528>, (参照 2025-06-10)

²⁾Greg Martin, (2004 年), THE UNREASONABLE EFFECTUALNESS OF CONTINUED FUNCTION EXPANSION, J. Aust. Math. Soc

³⁾Dixon J. Jones, (2015 年), Continued reciprocal root, Ramanujan J

⁴⁾ 難波博之, (2023 年), ペル方程式に関する基本的な性質まとめ, 高校数学の美しい物語, <https://manabitimes.jp/math/836>, (参照 2025-06-23)

最後に、本研究に協力していただいた静岡大学の足立真訓先生に厚く御礼申し上げます。

平方根の平方根連分数展開

展開とは

小数展開

$$\sqrt{3} = 1.7320508 \dots$$

展開が無限に続く

連分数展開

$$\sqrt{3} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}$$

平方根連分数展開

$$\sqrt{3} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{\sqrt{9}}}}}$$

展開が有限である

平方根連分数展開

n は自然数とし、実数 m を展開する。

$$r = [m], x_0 = m - r, a_n = \left\lfloor \frac{1}{x_{n-1}^2} \right\rfloor, x_n = \frac{1}{x_{n-1}^2} - a_n$$

$$m = \underbrace{r}_{\text{項}} + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{a_3 + \dots}}}$$

m を $[r, a_1, a_2, a_3, \dots]$ と表す。

$[\alpha] \dots \alpha$ の整数部分, すなわち $\beta \leq \alpha < \beta + 1$ を満たす整数 β のこと。
また、 x_n が0になったとき、展開が第 $(n+1)$ 項で終了すると定める。

先行研究¹⁾

$\sqrt{2}$ から $\sqrt{3000}$ までの整数でない平方根のうち、
展開が有限になる平方根は $\sqrt{3}$ と $3\sqrt{5}$ のみである。

目的 平方根連分数展開が終わる平方根の条件を調べる。

導出 1-a 第4項で展開が終わるときの条件を求める。

$\sqrt{3}$, $3\sqrt{5}$ は、どちらも第4項で終了するため、

r, a_n は独立した自然数であるとし、

$$m = r + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{a_3 + \dots}}}$$

と仮定する。

$a_2 + \sqrt{\frac{1}{a_3}}$ が有理数であるとき、

$$a_1(m^2 - r^2)^2 - (m^2 + r^2) = 0 \quad \dots(1)$$

が成り立つ。

導出 1-b $a_1 = 1$ のときの M を求める。

導出 1-a の仮定を引き継ぐ。

$\sqrt{3}$, $3\sqrt{5}$ において $a_1 = 1$ であるため、

$a_1 = 1$ と仮定する。また、 $M = m^2$, $R = r^2$ とおく。

(1)より

$$M = \frac{2R + 1 + \sqrt{8R + 1}}{2} \quad \dots(2)$$

($M = \frac{2R+1-\sqrt{8R+1}}{2}$ は、 $m < r$ となり不適。)

導出 1-c ペル方程式を用いた証明。

導出 1-b の仮定を引き継ぐ。(2)において、 M は自然数なので、
 $\sqrt{8R + 1}$ も自然数になる。 $k = \sqrt{8R + 1}$ とする。

これより、

$$k^2 - 8r^2 = 1 \quad \dots(3)$$

が成り立つ。

これはペル方程式²⁾である。

➡ 展開が第4項で終了する平方根が無限に存在する。

導出 1-d 導出 1-a, b の必要条件の証明。

導出 1-b の仮定を引き継ぐ。

m の展開は定義に従い、 $a_2 = 1$ となる。

導出 2 第4項以外で展開が終了する平方根について。

SageMathCell を用いて、

展開が第10項以内に終了する平方根を $\sqrt{10000}$ まで調査した。

➡ 第4項で展開が終了する平方根しか見つからなかった。

仮説: 第4項以外で展開が終了する平方根は存在しない。

現在は、第2項、第3項で展開が終了する平方根が存在しない
ということのみ証明できている。

展望 ・ $s \geq 5$ のとき (s は自然数)、第 s 項で展開が終わる平方根は存在しないことを証明したい。

・展開が無限に続くとき、展開した値が元の値にどのように近づくのかを求めたい。

・ a_1 が1以外の値をとるとき、展開が終わる平方根は存在しないことを証明したい。

参考文献 ¹⁾ 鰐坂もっちょ, (2019/1/25), 連分数展開について考えてたらやばい式が出てきてやばい, <https://www.ajmatics.com/entry/2019/01/25/080528>

²⁾ 難波博之, (2023/06/23), ペル方程式に関する基本的な性質まとめ, <https://manabitimes.jp/math/836>

BZ 反応におけるメタノールの影響の数理解析

1 研究目的

Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応は、4 種類の化合物を混合することで観測される周期的な酸化還元反応であり、各成分の濃度変化に伴って溶液の色や電位などが周期的に変化する。また、溶液を薄く広げると幾何学的な空間パターン（ターゲットパターン）が形成される（パターン形成現象）ことが知られている。本科の 11 期生は、BZ 反応にメタノールを添加すると振動周期が短縮するという不思議な現象を発見した³⁾。しかし、多くの実験を重ねたものの、その反応機構の解明には至らなかった。そこで私たちは、先輩による化学的なアプローチとは異なり、実験結果を反応の数理解モデルに応用した新たなアプローチによって、この現象の解明を試みた。

2 実験

(1) パターン形成現象におけるメタノールの影響

ア 目的

パターン形成現象におけるメタノールの影響を調べる。

イ 方法

資料²⁾を参考に、シャーレに A 溶液 (2.0 mL)、B 溶液 (1.0mL)、C 溶液 (2.0mL)、D 溶液 (1.0mL) を加えた (Table 1)。ここで臭素が生成され溶液が黄色になるため、透明になるまでシャーレをゆすり、メタノール水溶液 (0.5mol/L, 15 μ L)、E 溶液 (1.0mL) を加えた。再度ゆすり、溶液が青色になったら放置した。

ウ 結果

Fig. 1 は、反応を開始させてから 3 分後の様子である。通常の反応よりもメタノールを添加した反応において発生した波（ケミカルウェーブ）の波長が短くなった。

エ 考察

メタノールはターゲットパターンにおいてケミカルウェーブの波長を短縮する。その要因としてケミカルウェーブの速度の減少が考えられるため、実験 (2) ではケミカルウェーブの速度を測定する。

(2) ケミカルウェーブの速度測定

ア 目的

メタノールを添加した際のケミカルウェーブの速度を測定する。

イ 方法

1.0cm 間隔の点が書かれた紙をシャーレの下に敷き、発生したターゲットパターンの中心に一つの点を慎重に合わせた。中心から 1.0cm 離れた点を A、2.0cm 離れた点を B とし、3

Table1 試薬

	試薬名	mol/L
A	臭素酸ナトリウム	0.830
B	臭化ナトリウム	0.240
C	マロン酸	0.240
D	濃硫酸	3.120
E	1.10-フェナントロリン	0.075
	硫酸第一鉄	0.046



Fig. 1 通常時 (左) とメタノール添加時 (右)

つ目に生成されたケミカルウェーブが点 A と点 B の間 (1.0cm) を移動する時間を測定した。

ウ 結果

添加したメタノールの濃度の増加に伴って、ケミカルウェーブの速度が減少した (Fig. 2)。

エ 考察

ケミカルウェーブの速度は $v = 2\sqrt{KD[BrO_3^-][H^+]}$ ¹⁾⁴⁾ で表されるため、メタノールが BrO_3^- と反応して BrO_3^- の濃度を減少させたと考えられる。BZ 反応においてこの反応が起こること確かめるため、実験 (3) ではメタノールと BrO_3^- を混合することで BrO_3^- の濃度が減少するのかを明らかにする。

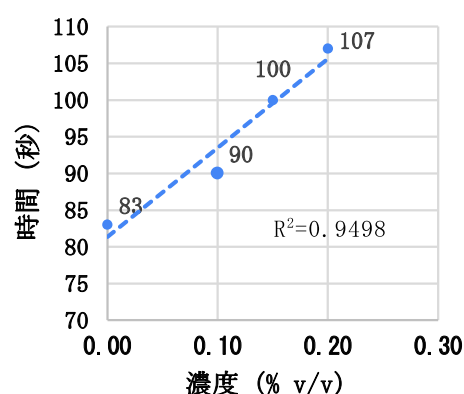


Fig. 2 溶液に添加したメタノールの濃度とケミカルウェーブの速度

(3) ホルムアルデヒドの検出

ア 目的

メタノールは BrO_3^- と反応し、 BrO_3^- の濃度を減少させるのかを調べる。

イ 方法

DNPH テストと呼ばれる 2,4-ジニトロフェニルヒドラジン (DNPH) がアルデヒドのカルボニル基 (本実験ではホルムアルデヒド) と反応し沈殿を生じることを利用した試験を用いた。メタノール水溶液 (0.50mol/L, 15 μ L)、 $NaBrO_3$ (0.83mol/L, 2.0mL)、濃硫酸 (3.12mol/L, 1.0mL) を混合した A 溶液、および蒸留水 (3.0mL) とメタノール水溶液 (0.50mol/L, 15 μ L) を混合した B 溶液に、DNPH (0.40g) に濃硫酸 (2.0mL)、蒸留水 (3.0mL) を振り混ぜながら少しずつ加えた試薬を添加した。

ウ 結果

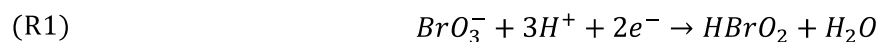
試薬を添加した A 溶液からは沈殿が生じ、試薬を添加した B 溶液からは沈殿が生じなかった (Fig. 3)。メタノールは BrO_3^- と反応してホルムアルデヒドを生じることが確認された。



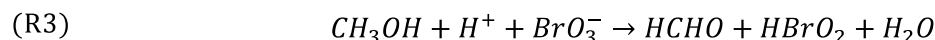
Fig. 3 A 溶液 (左) と B 溶液 (右) に試薬を添加した様子

エ 考察

試薬を添加した A 溶液からは沈殿が生じたことから、メタノールは BrO_3^- と反応してホルムアルデヒドを生じることがわかる。すなわち、



これらの半反応式より、



メタノールを添加した溶液内ではこの反応が起こっていると考えられる。なお、反応による H^+ の濃度変化はごくわずかであり、ケミカルウェーブの速度に影響を与えない⁴⁾。この結果に基づいて、BZ 反応においてメタノールを添加することによって (R3) の反応がおこることを、数理モデルにより検討する。

4 数理解析

BZ 反応は主要な反応過程 (オレゴネータ¹⁾) に基づいて、反応速度式 (微分方程式) を構築することができる。私たちは実験結果より、メタノールを添加した際の反応に関する数理モデ

ルを構築するために、(R3) による変化を表す反応項（下線部）を導入した。なお、(D4)、(D5) は反応項の導入に伴って、オレゴネータに基づいて構築した。このモデルの示すグラフは、通常時のモデルより振動周期が短縮された (Fig. 4)。したがって、(R3) の反応により振動周期が短縮されることを明らかにした。

$$(D1) \quad \frac{dX}{dt} = 4k_3H^2AY - k_2HXY + 2k_5HAX - 4k_4HX^2 + \underline{k_7AM}$$

$$(D2) \quad \frac{dY}{dt} = -4k_3H^2AY - k_2HXY + k_6BZ$$

$$(D3) \quad \frac{dZ}{dt} = 4k_5HAX - k_6BZ$$

$$(D4) \quad \frac{dA}{dt} = -4k_3H^2AY - 2k_5HAX + 4k_4HX^2 - \underline{k_7AM}$$

$$(D5) \quad \frac{dM}{dt} = \underline{-k_7AM}$$

X : [HBrO₂] Y : [Br⁻] Z : [Ce⁴⁺] A : [BrO₃⁻] B : [CH₂(COOH)₂] H : [H₂SO₄]

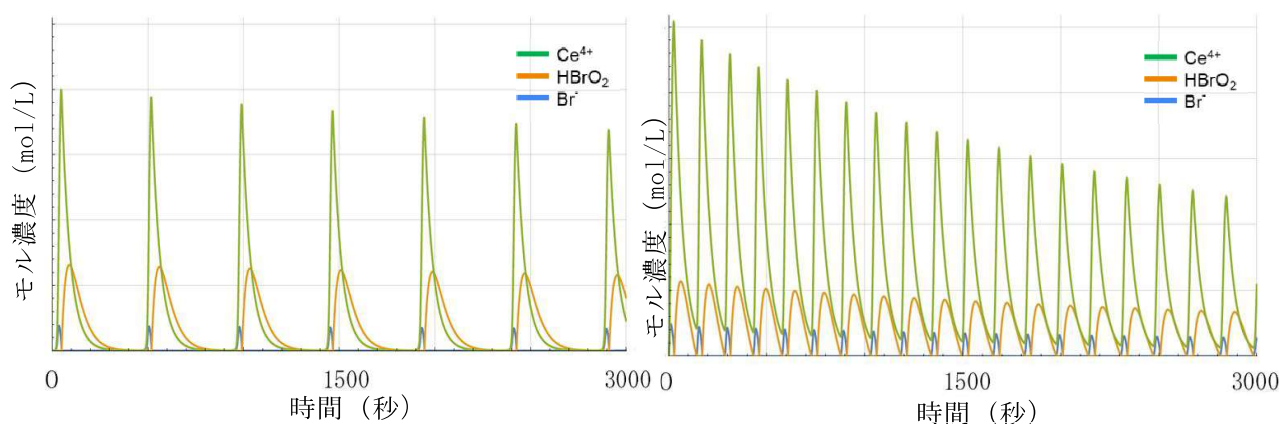


Fig. 4 通常時 (左) とメタノール添加時 (右) の数理モデルの示すグラフ

5 結論

実験に基づいたメタノールを添加した際の BZ 反応の数理モデルの検討により、メタノールは BrO₃⁻と反応し、HBrO₂を生成することで振動周期を短縮させることを解明した。

6 謝辞

研究に助言をくださった静岡大学理学部 近藤 満 先生に深く感謝します。

7 参考文献

- 1) 三池秀敏他, 非平衡系の科学Ⅲ, 講談社サイエンティフィク, 1998
- 2) 阿部二郎, 「夢・わくわく化学展 2001 実験 DVD 時間と空間のリズム反応, (社) 日本化学会 科学教育協議会事務局 https://www.chemistry.or.jp/edu/magic-dvd/chemical_05rythm.html (最終閲覧日 2025 年 8 月 17 日)
- 3) 加藤颯都他, 静岡県理科学研究論文集, 令和 5 年度 <https://gakusyu.shizuoka-c.ed.jp/science/sonota/ronnbunshu/R5/233009.pdf> (最終閲覧日 2026 年 1 月 18 日)
- 4) Titikan Somboon 他, An instrument-free method based on visible chemical waves for quantifying the ethanol conteKalyan, 2018
- 5) Kall Sen Gupta 他, Kinetics and mechanism of oxidation of methanol by acid bromate, 1988
- 6) 江崎貴裕, データ分析のための数理モデル入門 本質をとらえた分析のために, ソシム株式会社, 2020
- 7) 高橋一郎, 環境問題を視野に入れた化学系の人材養成に関する一工夫 (2) 生物応用化学科学生実験「有機定性分析」の光と影., 2004

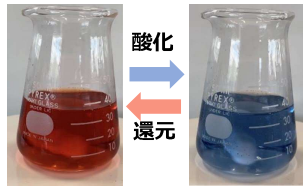
BZ反応におけるメタノールの影響の数理解析

背景 Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応とは

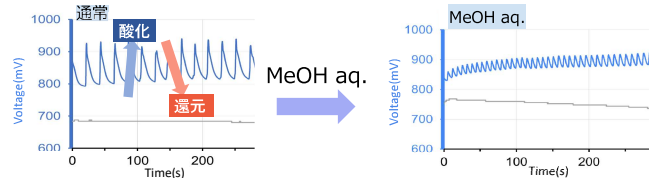
4種類の化合物を混合して観測される、周期的な酸化還元反応¹⁾

BZ反応のレシピ¹⁾

- ・金属触媒
(セリウムイオンやフェロイン)
- ・酸化剤
(臭素酸ナトリウムや臭素酸カリウム)
- ・還元剤 (マロン酸)
- ・酸 (硫酸)



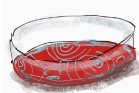
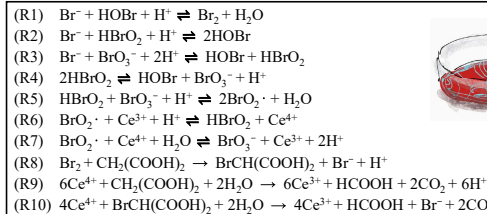
<先行研究³⁾>



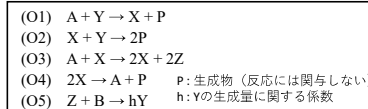
✓メタノール (MeOH aq.) を添加すると振動周期が短縮された
しかし、詳しい要因は解明されなかった

<数理モデル>

FKNメカニズム¹⁾



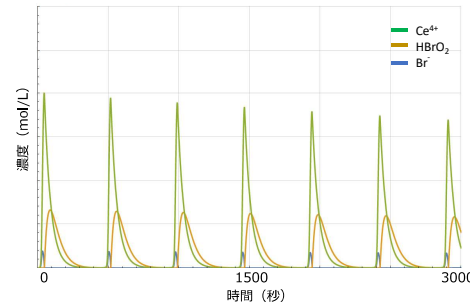
オレグネータ¹⁾



微分方程式¹⁾

$$\frac{dX}{dt} = 4k_3H^2AY - k_2HXY + 2k_5HAX - 4k_4HX^2$$
$$\frac{dY}{dt} = -4k_3H^2AY - k_2HXY + k_6BZ$$
$$\frac{dZ}{dt} = 4k_5HAX - k_6BZ$$

濃度変化のグラフ



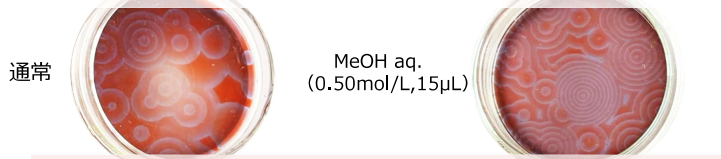
X: [HBrO₂] Y: [Br⁻] Z: [Ce⁴⁺] A: [BrO₃⁻] B: [CH₂(COOH)₂] H: [H₂SO₄] k₂=10⁶ k₃=2.0 k₄=2.0×10³ k₅=10 k₆=1.0×10⁻¹

研究目的 MeOHを加えた際の振動周期の短縮の要因を解明する

仮説 数理モデルに基づいて、MeOHがBZ反応の振動周期の短縮にどのように影響するのかを解明することができる

予備実験 パターン形成現象

自発的に規則的な模様 (ターゲットパターン) を作り出す現象



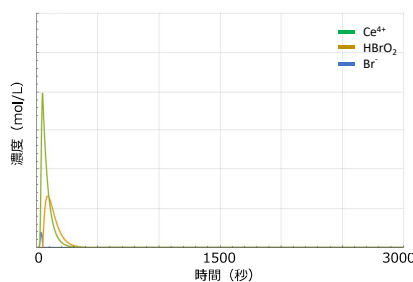
✓ターゲットパターンの波長が短縮された
ケミカルウェーブの速度が遅くなったのではないかな?

数理モデル 1

BrO₃⁻の減少に関する項を追加

$$\frac{dX}{dt} = 4k_3H^2AY - k_2HXY + 2k_5HAX - 4k_4HX^2$$
$$\frac{dY}{dt} = -4k_3H^2AY - k_2HXY + k_6BZ$$
$$\frac{dZ}{dt} = 4k_5HAX - k_6BZ$$
$$\frac{dA}{dt} = -4k_3H^2AY - 2k_5HAX + 4k_4HX^2 - k_7AM$$
$$\frac{dM}{dt} = -k_7AM$$

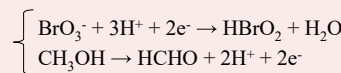
濃度変化のグラフ



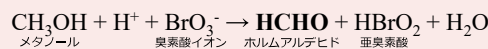
X: [HBrO₂] Y: [Br⁻] Z: [Ce⁴⁺] A: [BrO₃⁻] B: [CH₂(COOH)₂] H: [H₂SO₄] M: [CH₃OH] k₇=1.0×10⁻³

✓グラフが振動しなくなった

MeOHはBrO₃⁻の減少以外にも影響している?



これらの半反応式より



この反応が起こっているのでは?

実験 2 DNPHテスト⁷⁾

方法 沈殿の有無により、HCHOの存在を確認する

	A溶液	B溶液
材料	MeOH aq. (0.50mol/L, 15μL) 臭素酸ナトリウム aq. (0.83mol/L, 2mL) 硫酸 aq. (3.12mol/L, 1mL)	MeOH aq. (0.50mol/L, 15μL) 蒸留水 (3mL)
結果	 沈殿が生じた	 沈殿は生じなかった

✓CH₃OH + H⁺ + BrO₃⁻ → HCHO + HBrO₂ + H₂O

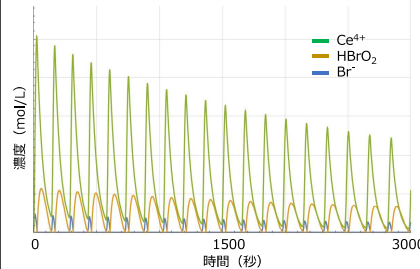
数理モデル 2

HBrO₂の増加に関する項を追加

濃度変化のグラフ

$$\frac{dX}{dt} = 4k_3H^2AY - k_2HXY + 2k_5HAX - 4k_4HX^2 + k_7AM$$
$$\frac{dY}{dt} = -4k_3H^2AY - k_2HXY + k_6BZ$$
$$\frac{dZ}{dt} = 4k_5HAX - k_6BZ$$
$$\frac{dA}{dt} = -4k_3H^2AY - 2k_5HAX + 4k_4HX^2 - k_7AM$$
$$\frac{dM}{dt} = -k_7AM$$

X: [HBrO₂] Y: [Br⁻] Z: [Ce⁴⁺] A: [BrO₃⁻] B: [CH₂(COOH)₂] H: [H₂SO₄] M: [CH₃OH] k₇=1.0×10⁻³



✓振動周期が短縮された

HBrO₂に関する反応項を導入することで、実験結果を再現できた

結論

実験に基づいた数理モデルの検討により、メタノールはBZ反応において、BrO₃⁻と反応しHBrO₂を生成することで振動周期を短縮させることを明らかにした

謝辞

研究にご助言くださった
静岡大学理学部 近藤 満 先生に深く感謝します

参考文献

- 1) 三池秀敏他, 非平衡系の科学, 講談社サイエンティフィク, 1998
- 2) 阿部二郎, 『夢・わくわく化学館2001実験DVD 時間と空間のリズム反応』, (社) 日本化学会 科学教育協議会事務局
https://www.chemistry.or.jp/edu/magic_dvd/chemical_05rythm.html (最終閲覧日2025年8月17日)
- 3) 加藤雄一郎, 静岡県理科学論文集, 令和5年度https://gakusyu.shizuoka-c.ed.jp/science/sonota/ronbunshu/R5/233009.pdf (最終閲覧日2026年1月18日)
- 4) Titikan Sombonhe, An instrument-free method based on visible chemical waves for quantifying the ethanol content Kalyan, 2018
- 5) Kall Sen Gupta他, Kinetics and mechanism of oxidation of methanol by acid bromate, 1988
- 6) 江崎真希, データ分析のための数理解析入門 本書をどう活用するためにシム株式会社, 2020
- 7) 高橋一朗, 環境問題を視野に入れた化学系の人材養成に関する工夫 (2) 生物応用化学科生実験『有機定性分析』の光と影, 2004

早稲田大学 先端生命医科学センター (TWIns) 研修 報告書

1 目的

- (1) 最先端科学に触れ、現代社会において科学がどのように活用され、社会の発展に貢献しているのかについて学ぶ。
- (2) 研修での学びや科学者との出会いを通して視野を広げ、自己の在り方生き方について考える機会とする。

2 研修日

令和7年4月30日(水)

3 研修場所

早稲田大学 先端生命医科学センター (TWIns)

4 講師

早稲田大学 生命医科学 梅津 光生 先生
慶應義塾大学 理工学 小林 真里 先生

5 講義タイトル

- ・ツインズへようこそ
- ・ロボット工学による人間科学と社会実装
- ・生物分野の研究紹介
- ・▽型人材のススメ
- ・ツインズにおける医工連携の足跡

6 講義内容

(1) ロボット工学による人間科学と社会実装

ア WABOT-1 とロボット工学的人間科学の始まり

1973年に高西研究室で開発された WABOT-1 は、世界初の本格的なヒューマノイドロボットであり、ロボットを通じて人間の身体や動作の仕組みを理解しようとする「ロボット工学的人間科学」の先駆けとなった。この分野では、単なる機械の模倣ではなく、人間そのものを科学的に捉えることが目的とされている。例として、ランニングが可能なロボットや、感情を表現できるロボットが挙げられ、これらは人間理解を深めるための研究対象でもある。

イ 社会実装としてのロボット技術の活用

ロボット技術は、研究室内の理論にとどまらず、社会に役立つ形で実際に応用されることが求められる。これを「社会実装」と呼び、実際に使うことで初めて分かる課題や不便さを発見することができる。例えば、宇宙探査ロボットや農作業支援ロボットは、厳しい環境や人手不足といった現実的な課題に対する解決策として開発されている。



Fig.1 感情表現が可能な
ロボット

ウ ロボット研究における未来志向の視点

ロボットの研究においては、目の前の技術的課題だけでなく、「将来どのように使われるのか」という視点を持つことが非常に重要である。一步引いた観点から社会全体との関係を考えることで、より本質的で持続的な研究や開発が可能になる。未来を見据えた設計思想こそが、ロボット技術を人間社会に根付かせるための鍵となる。

(2) ▽型人材のススメ

ア 常識を変えるイノベーションと▽型社会

イノベーションとは、技術の発展によって社会の常識を根本から変える力である。例えば、自動運転のように、これまでの「当たり前」を覆す技術がその象徴だ。こうした変化に対応するには、深い専門性（縦軸）と幅広い教養（横軸）を兼ね備えた「T型人材」が求められる。さらに、知と知を結びつける「▽型」の発想が、ミクロ（個人）とマクロ（社会）をつなぎ、イノベーションを実現する土台となる。

イ 多様化する生き方と幸せの再定義

人生 100 年時代において、「正解のある幸せ」はもはや存在しない。仕事も生き方も一つに縛られず、「エクスプローラー」や「パラレルキャリア」のように、自分の価値観に基づいた働き方が重要視されるようになってきた。組織に依存せず、個人で自由に働く力や、幅広い経験を積む柔軟性が、自分らしい生き方を形づくる鍵となる。

ウ AI 時代における人間の役割と可能性

生成 AI の登場によって、知的作業の多くが効率化される一方で、人間にしかできない「創造力」や「倫理的判断力」が一層重要になる。また、AI をうまく使いこなすには、質の高い指示を与える言語力＝アウトプット力が不可欠であり、ここに文系的スキルの強みが活きる。人間と AI は対立するのではなく、補完し合う関係として進化していくべきである。

7 感想

今回の講義を通して、ロボット技術や AI の進化が単なる科学技術の発展ではなく、「人間とは何か」「社会とどう関わるか」という深い問いに繋がっていることに気づかされた。また、イノベーションを生み出すには、単に知識や技術を積み上げるだけでなく、効率や常識にとらわれない経験をすることが大切だと感じた。

特に印象的だったのは、「非常識を経験すること」が▽型のような新しい結びつきを生み、イノベーションの種になるという考え方だ。予期しない失敗や、自分の中の「当たり前」が崩れる体験は一見遠回りに見えるが、それこそが自分らしい発想や成長に繋がる。本当に価値のある実績とは、効率だけで得られるものではなく、自分なりに咀嚼し、意味づけていくプロセスの中で形づくられていくものなのだった。

今後、技術を学ぶだけでなく、「未来にどう使われるか」「何のために使うのか」という視点を持ちながら、自分の好奇心や発想を大切にしていきたい。

つくば科学研修 報告書

1 目的

- (1) 最先端の科学技術に触れ、科学的な視野を広める。
- (2) 各研究所で働く研究者等との交流や施設見学を通して、進路意識の高揚を図り、職業決定の一助とする。

2 実施日

令和7年7月23日(水)、24日(木)

3 研修場所

1日目

地質標本館、JAXA 筑波宇宙センター、気象研究所

2日目

高エネルギー加速器研究機構(KEK)、物質・材料研究機構(NIMS)

4 研修内容

(1) 地質標本館

地質標本館では、地震や火山、地下資源など、地球に関する幅広いテーマが最新の研究成果とともに、体験型の展示を通じて紹介されていた。実際の展示では、あられ石の大型薄片を観察する体験があり、偏光板を使って光を当てることで、岩石中の鉱物が特有の色彩を放つ様子を観察できた。観察角度を変えると、結晶の成長方向の違いにより色が変化する様子も見ることができ、鉱物の構造について理解を深められる内容だった。

(2) JAXA 筑波宇宙センター

JAXA 筑波宇宙センターでは、宇宙科学研究の歴史が、実物の人工衛星やロケットとともに時系列に沿って展示されていた。人工衛星の表面は金色や銀色のシートで覆われていた。これは多層断熱材(Fig. 1)と呼ばれる特殊な素材で、 -250°C から 290°C といった温度にも耐えられるポリイミド樹脂が使われている。また近年では、断熱性を高めるためにフィルムの間に細長いスペーサーを挟んで空間を保つ構造が採用されている。



Fig. 1 多層断熱材

(3) 気象研究所

気象研究所では、気象庁の業務改善に役立つ基礎技術の研究を行っている。現在、世界的な課題となっている地球温暖化の原因物質である温室効果ガスの測定もその一つである。温室効果ガスの測定には、NDIR や CRDS といった赤外線を利用する方法があるが、これらはコストが高く、また上空のデータが不足するという課題を抱えている。そこで、CONTRAIL プロジェクトの一環として、航空機を利用した測定が進められている。航空機の外部から空気を採取して、大気の実行を行う。具

体的には、ASE（複数地点で空気を採取）やCME（離陸直後から着陸直前まで連続してCO₂を採取）などの自動装置を、手動装置であるMSEに加えて運用し、より効率的な温室効果ガスの観測を目指している。

（４） 高エネルギー加速器研究機構（KEK）

KEK では、加速器を用いて素粒子を高速に加速・衝突させ、宇宙・物質・生命の起源などに関する研究を行っている。KEK は周長 3km を超える大型加速器を備えた広大な敷地を有している。

物質構造科学の分野では、加速器で高エネルギーの電子を発生させ、その運動エネルギーを利用して強力な放射光を作り出している。極微小な構造を観測するには、観測対象の大きさに近い波長の光が必要であるため、この放射光が重要な役割を果たす。さらに、電子と陽電子を衝突させる実験では、物質が誕生した初期宇宙の状態を再現し、ビッグバン直後の物理現象の解明を目指している。こうした研究は、材料科学や生命科学の発展に貢献している。

（５） 物質・材料研究機構（NIMS）

NIMS では、新しい物質や材料の開発を行っている。光ファイバの研究では、直径わずか 0.01mm のガラス製信号線の中で全反射を利用し、光を閉じ込めて毎秒 25GB の情報を送ることができる技術を開発している。電話通信などがその応用例である。



Fig. 2 クリープ試験

また、材料の長期的な変形を調べるクリープ試験（Fig. 2）も行っている。クリープとは、目に見えないほどゆっくりと進む変形現象であり、これを調べるため、材料が破損するまで数年にわたる試験が行われる。試験では車一台分の重さで引っ張り、条件を変えて繰り返し実験する。

さらに、疲労実験室では疲労破壊に関する研究や事故原因の究明を行っている。過去にはジャンボ機墜落事故やH-II ロケット 8 号機の打ち上げ失敗などの解析にも関わっている。

6 研修の成果

私は現在、ミミズによる PLA の分解条件を探る研究を行っており、その成果をプラスチックごみ問題やフードロス問題の解決に結びつけたいと考えている。そのため、今回、各研究機関が基礎研究を土台としながらも、環境問題や安全性向上、通信インフラの発展など具体的な社会貢献につなげている姿勢を目の当たりにし、自分の研究でもより信頼性の高いデータの取得方法や分析精度の向上が重要であると再認識した。また、気象研究所の広報の方は大学ではなく気象大学校に進学されており、職業によっては幅広い進路の選択肢があると知ることができた。

7 感想

今回の研修で基礎研究の重要性を強く感じた。KEK の研究者の方が「基礎の積み重ねが生活に役立つ」と話していたように、日々の実験や観察の蓄積が成果につながることを実感した。また、自分の探究プログラムも高校生の枠にとらわれず、環境問題解決など社会貢献につなげられる可能性があると考えた。各研究所の具体的な実験手法や装置の仕組みに触れ、課題解決の方法や科学的アプローチの幅を学ぶことで、科学的に考える力が高まった。

放射線医療研究 特別講義 報告書

1 目的

- (1) 医療を軸に多方面で活躍する研究者の講演を聞くことで、科学技術への関心を高める。
- (2) 自らの進路についての視野を広げ、「国際社会で活躍・貢献できる人材」のイメージを具体化する。

2 実施日

令和7年8月25日(月)

3 研修場所

静岡市立高校 視聴覚ホール

4 講師

Stanford University Physical Science Research Scientist 松浦 由佳 先生

茨城県立医療大学 放射線技術科学科 五月女 康作 先生

5 講義タイトル

松浦先生「多様性・国際化の時代に生きる～理系人材のキャリア形成～」

五月女先生「東日本大震災が引き起こした複合災害とその後」

6 講義内容

(1) 多様性・国際化の時代に生きる～理系人材のキャリア形成～

世界で多様性・国際化が叫ばれている現代にどんな人材が必要なのか学んだ。必要とされる人材になるためにはまず、日本(母国)のことをよく知っている必要がある。なぜならば、日本語が得意な人ほど英語を習得しやすいためである。日本語を軸にほかの言語を学ぶことで現地の文化に触れ日本との違いを実感することができる。そうすることで自分が世界の中でどのような立ち位置なのかを認識することができる。自分を知ること、自分の良さを最大限に引き出すパフォーマンスをすることができるようになる。また、言語を複数習得することで情報を立体的にとらえることができるようになる。これもまた、グローバルな人材には欠かせない大切な要素の一つである。国際化とは海外へ行くことではなく、海外を知ることによって自分のアイデンティティを確立させることである。

まだ科学がそれほど発達していなかった時代は、純粋に科学の発展を探求することができた。しかし、現代では科学の発展に負の側面が表れてしまう。例として、オゾン層破壊や公害などがあげられる。だからと言って、科学の発展を止めてしまうわけにもいかない。そのため、様々な視点(分野)から見た時、皆が納得できる結果に落とし込むレギュラトリーサイエンスが必要とされる。これは、違う視点を持つもの同士が直接意見を言い合う必要があり難しい点も挙げられる。新型コロナウイルス流行時に外出が自粛されたことがあったが、それにより経済界に混乱を招いてしまった。本来ならば、政府と医療界と経済界で話合うべきだった。しかし、実際は政府・医療界と経済界を仲裁する形で介入したためこのような事態が起きてしまったといえる。この、直接関係ない分野同士が話し合うことも一種の多様性の在り方である。また個人における多様性

とは自分だけのキャリアを作り上げることである。同じ職業の人たちも過去に何を経験し、何を得意とするのかが異なっている。それらを生かして、この仕事ができるのはこの人しかいないというキャリアを積むことが多様性といえる。

(2) 東日本大震災が引き起こした複合災害とその後

五月女先生は映画化もされた漫画作品「ラジエーションハウス」の原案者である。普段あまり目立つことがない放射線技師という仕事がいかに面白い仕事なのかを伝えるため漫画を作ろうと思ったらしい。その後、集英社に企画を4年間売り込み続け、ついに企画が採用されることとなった。その後、連載が始まり、ドラマ化、映画化もされ国民の多くに放射線技師がどんな職業なのか知ってもらえることができた。

東日本大震災で福島第一原発事故により、周辺が放射線で汚染されてしまった。そのとき住民が浴びた放射線の平均量は5.5mSvで、この値は一年間で人が浴びる放射線の量である2mSvの2倍ほどの値となっている。しかしこの値が原因でがんになることはほとんどなく、何ら人体に影響はない。事故当時被爆した地域では、土地の放射能汚染により強制立ち退きに加え、立ち入ることが禁止された。現在ではその多くが解除され安全な土地だと認められているが、当時のその地域に住民票を持つ人のわずか2.5%ほどしか戻ってきていない。人は科学的に安全だと頭で理解していても心が拒んでしまうことがある。その例として福島第一原発事故によりできたデブリは放置されている。デブリとは、発電所の事故の熱で溶けた金属が放射線を浴び、自ら放射線を発するようになってしまった金属の塊のことである。このデブリを安全には外部に運び出す技術は開発されつつあるが、運び出したデブリを受けとってくれる自治体が見つからない現状にある。もちろんデブリは放射線が外に漏れ出ないように分厚いコンクリートで覆われ地下に埋められる。この受け取り手が見つからない現状は日本国民全員が当事者としてどうすべきか考えていかななくてはならない問題である。

7 感想

私が持っていた国際化のイメージは人種に関係なく多く国に様々な人が行きかうものだったけれど、本来の国際化は国同士の壁をなくすことで世界を知り己を知ることだと知った。これにより、消えかけている文化や伝統を多くの人を知ることによって守っていきやすくなるのではないかと思った。数十年前は国をまたぐ移動にはとても高いハードルがあった。そのハードルが低くなったことを認識するとともに、それによって得られるチャンスを逃すことがないように、また、自分からチャンスをつかんでいきたいと思った。

福島原発事故ではもう安全なのにもかかわらず人が寄り付かないのは、人の心理として当然なことだが、その負の偏見を次の世代に伝えていくことがないようにしたいと思った。

前例のない緊急事態が起きた時必ずしも国が信頼できる情報を発信しているとは限らない。そういう状況に陥った時のために、情報の信頼性を吟味する力とある程度の知識を持っておきたいと思った。

海外科学研修 報告書

1 目的

- (1) 台湾の大学や研究機関において、最先端の研究や学術に触れる機会を通して科学・技術への好奇心や探究心を高める。
- (2) 現地高校生との交流を通して台湾の文化に触れ、コミュニケーション能力と英語力の一層の向上を図る。
- (3) 研修を通して出会う人たちとの交流を通じて自らの進路について視野を広げ、「国際社会で活躍・貢献できる人」のイメージを具体化する。

2 研修日

令和7年12月1日（月）～12月5日（金）

3 研修先

台湾（新竹、台北、桃園）

4 研修内容

(1) 国立新竹科学園區実験高級中学（NEHS）

生徒交流で生物の授業を共同で受講した。植物の光合成速度の違いについての実験を班ごとで行い、結果を記録した。植物の種類によって光合成速度は異なり、最終的な光合成量も植物によって多いものと少ないもので別れた。

また、これまでの課題研究の集大成として、スライドを用いて英語でプレゼンを行った。NEHSの学生は普段中国語で話すが、英語も第二外国語として使われる。発表では質疑応答などを含めて英語で交流することが出来た。

(2) 台北科技大学での講義

ア 半導体プロセス及び装置

半導体とは、電気をよく通す導体と通しにくい絶縁体の中間の性質を持ち、電気の流れやすさを制御することが出来る物質のことである。これはスマートフォンやパソコンなどの精密機械から飛行機などの社会インフラまで幅広く使われており、私たちの生活に欠かせないものである。

ICは半導体を用いて形成される電子部品で、これは酸化や成膜など微細な工程を経て作られる。フォトリソグラフィはその過程の一つで、ウェーハという高純度なシリコンなどでできた薄い円盤状の基盤の表面に細かい回路パターンを形成するものである。ウェーハの表面に均一なSiO₂の薄い膜を形成し、その上に塗布されたフォトレジストの特定の部分に紫外線を照射することによって、フォトレジストはマスクとよばれる型のようなものができる。その形に沿ってウェーハなどを、エッチングという手法で削り取ることで微細な回路や構造が形成される。

イ TSMC はなぜ世界のトップ？

台湾の新竹には世界シェアトップを誇る TSMC という企業がある。そもそも台湾は半導体産業において世界の市場シェアの5割以上を占めており、半導体の世界で唯一無二の地位を確立

している。時価総額は1.53兆米ドルに上り、世界9位となっている。

ICチップは用途によって大きさが異なる。これは、用途に適した大きさにすることで作業効率の向上や省エネに繋がるからである。台湾では10nm以下のものが92%、10～22nmのものが28%、28～45nmのものが47%、45nm以上のものが31%の世界シェアを占めている。

台湾が世界の半導体産業をリードしている要因として、最先端プロセス技術の開発、チップ製造の多様化、先端製造設備への投資、持続可能な技術革新などがある。現に、1987年時点でのICチップの大きさの最小値は3.0μmだったが、現在は1.4nmのものを研究中である。また、日本は台湾に対し設備や材料のサポートを行っており、TSMCは熊本に工場を構えるなど、日本と台湾は互いに半導体産業を推進する協力関係にある。

ウ Introduction to Artificial Intelligence and Applications.

AIとは人間における脳の役割を果たす技術であり、これには膨大なデータが必要である。従来のシンプルなプログラムと違う点として、従来のものはデータやルールに則って決めていたのに対し、AIはそのデータやルールから独自に思考をするようになったということが挙げられる。

また、AIの思考には大きく分けて「機械学習」と「深層学習」の2つがある。機械学習は、インプットした後に特徴抽出を行い、そこから予測・判断を行うが、深層学習ではインプットした後に抽出した特徴を分類し、法則などを見つけることで自ら他の特徴などを生成することが出来る。

AIがどんどん進化していく現代において、私たちはこれらを使う際、どのような問題を解決したいのか、それに対する十分な量のデータはあるか、というような点に気を付けて使っていく必要がある。

(3) Taiwan Healthcare EXPO

ここでは多くの企業が健康に関する商品・研究を展示しており(Fig. 1)、中には体験したり研究についてのプレゼンを聞くことが出来たりするものもある。展示の中で特にお茶を取り扱うものが多かったが、企業によってその効果やアプローチ方法も異なっていた。



Fig.1 Taiwan Healthcare EXPO の写真

(4) 台湾大学・開南大学での交流とキャンパスツアー

ア 台湾大学

台湾大学は115haという広大な学内面積を誇る、台湾トップの国立総合大学である。「品性を磨き、学問を学ぶ」という教育理念のもと、高い教育レベルで充実した設備が特徴となっている。学内には自然・動物も多く、生物の調査にも使われる。3月にはつつじ祭りというイベントが行われたり、敷地内ではレンタル自転車やバイクが走行していたり、歴史資料が見られたりするなど、独自の特色が様々なところで見られた。

イ 開南大学

開南大学は1917年に開校した、台湾で最も日本人学生が多い大学である。現在は156名の日本人がこの大学に所属し、6つの学部、17の学科で学んでいる。また、164校以上の姉妹校と連携している。台湾に留学する日本人が多い理由として金銭面の負担が少ないことや、食べ物の味が比較的日本に近いことが挙げられる。共同での調理実習では日本とは違った調理方法、味付けで、それぞれの国の違いを感じながら班ごとに調理をした。

5 国際社会で活躍できる人物とは

これまでの研修に加え今回の研修を経て私は、国際社会で活躍できる人物とは、柔軟にコミュニケーションを取り、答えのない問いに対しても深く考えることが出来る人物だと考える。

今回の研修では、私たちはまだ拙い英語で話していたため、台湾の人たちからすれば理解することが難しかったかもしれない。それでもこちらに歩み寄って、様々な表現の仕方で伝えようとしてくれる人がたくさんいた。開南大学の日本語学部の学生の方々と話すときはそれとは逆に、私たちが歩み寄ることもあったと思う。異なる言語使用者とも、サイエンスコミュニケーションによる双方向の会話をすることによって意図が通じたり、より相手のことや相手の持つ情報について知ったりすることが出来る。今回の研修で特に Taiwan Healthcare EXPO でこのサイエンスコミュニケーションを多く目撃した。この EXPO ではほとんど中国語が使われていて、他の研修場所のように英語を使う人たちがばかりではなかった。しかし、私たちが英語で話しかけると丁寧に言葉を返してくれて、こちらに合わせて英語で説明してくれたり、日本語で挨拶をしてくれたりする人がたくさんいた。他国の言語を学ぶことは重要だし、自分の意見を表す表現方法をいくつか持っているべきだと考える。

また今回の研修で、研究だけでなく様々な国の文化の違いも知ることが出来た。少し場所が違っただけでも価値観が大きく異なり、全く違う視点で物事を見ていることもある。科学的な視野を広げると、一つの物事に対して答えが一つに定まらないものもあり、明確な答えが出てこないことがある。国際社会で活躍するには、それに対して自分なりの価値観・考え方のもと議論をしたり、深めたりすることが出来る必要があると考える。

国際社会に進出する際には、様々な国の、それぞれ違う言語や価値観を持った人たちと協力することを避けては通れない。そのため、コミュニケーションの種類をたくさん持っていてその場にあった方法を使うことが出来る人や自分の価値観を上手く伝えることが出来る人は、大きなアドバンテージを有することが出来ると思う。

6 海外研修を終えて

今回の科学研修を通して、海外への興味が強まったと思う。

NEHS ではプレゼンの他に学生交流で台湾ならではの遊びや、学校の仕組みについて知ることが出来た。例えば、台湾では出席番号の決まり方が日本と違い、生年月日であったり男女混合の番号ではなかったりするということを教えてもらった。また、違うところだけでなく同じところもあり、同じところで話が盛り上がることもあった。

大学での講義やキャンパスツアー、学生交流では自分の進路にも通じることが多くあった。大学では日本語を話せる人も多く、言語というのは人が関わるうえで意思疎通以外にも、相手への敬意の示し方に繋がる部分があると感じた。

Taiwan Healthcare EXPO では高校や大学よりもコミュニケーションを取るのが難しかったが、英語が通じる場ではサイエンスコミュニケーションを生かすことが出来たと思う。

その他にも夜市やホテルでコミュニケーションを取る機会があり、文化の違いを知り、研修以外でも学ぶことが出来る場面が多かった。これまで日本にいただけでは知ることができなかった世界を知って、自分の常識を広げることが出来たと思う。

今回の研修で、何かを説明するときに表現の方法をいくつか用意しておくことで会話の中で相手や自分の理解度が格段に上がると実感したので、今後は私も意識的に実践してみようと考えた。物事を科学的に見るためには経験も必要であり、様々な経験を得るためにこの科学探究科では講義や研修プログラムが多く組まれていて、科学的視点を育ててきた。今後の自分の進路を決めるときに、これまでの経験や視点を生かしつつ、もっと多くの経験を得られるような進路を選んでみたいと思った。

海外科学研修 報告書

1 目的

- (1) 台湾の大学や研究機関において、最先端の研究や学術に触れる機会を通して科学・技術への好奇心や探究心を高める。
- (2) 現地高校生との交流を通して台湾の文化に触れ、コミュニケーション能力と英語力の一層の向上を図る。
- (3) 研修を通して出会う人達との交流を通して自らの進路について視野を広げ、「国際社会で活躍・貢献できる人」のイメージを具体化する。

2 研修日

令和7年12月1日（月）～12月5日（金）

3 研修先

台湾（新竹、台北、桃園）

4 研修内容

- (1) 国立新竹科学園區実験高級中学（NEHS）での課題研究英語プレゼン

英語で私たちの研究内容を報告した。現地高校生からの質問があまりなかったため、研究内容がよく伝わらなかったとわかった。

- (2) 台北科技大学での講義

ア 半導体プロセス及び装置学士プログラム

(ア) 半導体の製造プロセス

半導体とは電気を通す導体と通さない絶縁体の中間的な性質を持つ物質である。価電子帯と伝導帯と呼ばれる電子の通り道にバンドギャップと呼ばれる空間があり、その幅を調節することで導電性を調整している。つまりバンドギャップが広いと電子が通りにくくなるため導電性が低くなり、これが狭いと電子が通りやすくなるため導電性が高くなる。また、半導体を用いて作られたトランジスタと呼ばれる電子部品がある。これは、n型半導体という負の電荷の電子が移動することで電流が生じる半導体と、p型半導体という正の電荷の電子が移動することで電流が生じる半導体によって構成されていて、p型半導体を土台にn型半導体を2つ積層させそこに金属触媒をくっつけた構造をしている。n型半導体のそれぞれには電荷の源であるソース、電荷を排出するドレイン、金属部分には制御のためのゲートという端子が接続されている。例えば、ソースとドレインだけに電流を流しても流れることはない。しかし、ソースとドレインに電流を流し、かつゲートに電圧を加えることで電流が流れるようになる。これは、金属触媒からp型半導体がプラスの電圧を感知してp型半導体部分の自由電子が金属触媒部分に集まることでn型半導体間での電子の移動ができるようになるためである。また、ゲートにかける電圧が大きくなればなるほど集まる自由電子が増えるためより多くの電流を流すことができる。また現在は、このトランジスタを小型化するための開発がなされている。FinFETと呼ばれる構造では電流の通り道をゲートで3方向から覆う構造をしている。また、将来的に量産が予定されているGAAと呼ばれる構造では、電流の通り道を極めて薄くし、それをいくらかの

層にすることでゲートに立体的に覆われている。これによって、必要な電圧を最小限に抑えることができ、小型化につながっている。

(イ) 作り方

高温で加熱し不純物を取り除いたシリコンの結晶の塊を薄くスライスして、ウェーハと呼ばれる基盤をつくる。次にウェーハの表面を酸化させることで絶縁体にし、その上にフォトレジストという感光剤を塗布して、切り取りたい形にしたマスク越しに光を照射することで回路パターンを焼き付ける。そしてこれにより形成されたパターンに沿って酸化膜を取り除く。その方法としてプラズマなどを用いて精密に加工ができるプラズマエッチングと化学薬品を用いるウェットエッチングがある。結果として、フォトレジストに覆われた部分が残し、ウェーハが模られる。さらにそれにドーパントという不純物を混ぜることで、電導性など半導体の性質を調整することができる。最後にトランジスタに配線を付け、小さなチップにして、それをパッケージに包むことで半導体が完成する。

イ 半導体産業の日台協力 台積電 (TSMC) は何故世界トップ?

TSMC は世界最大の半導体受託製造企業で、自社製品は持っていないが半導体業界においてファブリティ市場のシェアが約 70%を占めていて、最先端半導体の分野では約 90%を占めている。この世界的な競争力を支えている背景には、いくつかの強みがある。1つ目はチップ製造の多様さである。今までの製品に加えて、AI 向けの高性能チップなどの開発を進めている。2つ目は最先端の技術開発である。R&D や設備に対する巨額な投資や、大学との共同研究などオープンイノベーションを行っている。それにより、2 nm や 3 nm の微細な半導体や GAA 構造の高性能な半導体など最先端の開発、量産が可能となっている。3つ目は半導体の設計は行わず、製造を専門的に行うファブリティであるということ。製造技術に特化することで水平分業を可能にしている。そのほかにもパッケージやシリコンフォトリソグラフィ、持続可能な技術の開発にも着手している

ウ Introduction of AI and Applications

AI の基本的な構造やメカニズムを説明していただいた。AI は特定の仕事に特化しているため、使用する際には、どんな問題を解きたいのか、十分なデータがあるか、普通のやり方で解決するか、ハードウェアやソフトウェアなど、プログラムを実行するために必要な資源があるかを確認する必要がある。また講師の方は AI を用いた交通事故の分析について研究している。

エ Application of AI-driven robots

AI を活用したアームロボットや人のジェスチャーをカメラで読み取り動作するロボットに関する研究の説明をしていただいた。

(3) Taiwan Healthcare EXPO

最先端の医療機器メーカーが集まる展示会を見学した。私たちが見学した「Huede」という企業では AI を用いた急性腎障害という疾患を予知するソフトウェアに関する研究を行っていた。まず急性腎障害とは数時間～数日の間に腎機能が急激に低下する状態で、尿から老廃物が排出できなくなり、体内の水分量や塩分量が調節できなくなってしまう。研究によると急性腎障害発症後 7 日間で腎機能が完全に回復する患者は約 3 割、慢性腎臓病へと移行する患者は約 6 割、悪化する患者は約 1 割であり、また、集中治療室の患者における急性腎障害の発生率は約 30%で、死亡率は 50%を超えるという。この疾患を早期発見し、適切な治療を提供するために AI を用いたソフトウェアが開発された。このソフトウェアは機械学習により 24 時間以内の患者の急性腎障害の発生率を予測し、高リスク患者に対する治療方法の提案も行うことができる。

他にも様々な研究機関や企業の展示を見学したが、それらの多くが AI を活用した医療機器を紹介していた。医療需要が高まっている現在、AI を活用することによって医療の質を向上させ、さらに医療従事者の負担を軽減することができるため、医療における AI の応用が進んでいる。

5 国際社会で活躍できる人物とは

私は、自信と勇気を持っている人物だと考える。今回の研修を通して、この自信と勇気の重要さと関係について深く考えた。私が今回の研修で特に意識したのは、いろいろな方と積極的に交流することである。はじめは、空港で出会った老夫婦と勇気を出して会話をした。そこで私は、見知らぬ人の優しさや、言いたいことがちゃんと伝わっていることに気がついた。これが私の中で自信に繋がり、滞在中に中華料理店のホールスタッフの方やホテルで出会った方に話しかけてみたり、スーパーやコンビニで地域住民の方におすすめのお菓子を聞いてみたり、講義や EXPO で積極的に質問してみたり、自分からアクションを起こす原動力につながった。この経験から言えることは、もちろん自信と勇気が大事ということなのだが、それ以上に自信と勇気は相互に支え合っている、つまり、自信が勇気をつくり、勇気が自信を育むということである。具体的には、「自信が少ししかなくて怖いけど、一歩踏み出してみる。」のが勇気で、一歩踏み出してみても得た経験が自信を大きくする。自信が大きくなれば、更に勇気が湧き、新たな行動ができる。翻って言えば、勇気を出して挑戦しないと、自信は生まれない。そのため、自信がなくても、完璧でなくても、小さな勇気を出し最初の一歩を踏み出すことがとても重要であり、自信と勇気は互いを強化し合う循環をつくることができると思う。

これは、国際社会で活躍する人物に関しても同じことが言えるだろう。世界に踏み出すという大きな一歩は積み重ねてきた自信と勇気があるからこそ起こせる行動である。そして、国際社会での成功体験が更にそれを強化する。この自信と勇気の循環が国際社会での活躍につながると私は考える。

6 海外科学研修を終えて

この研修で大切さに気づいたものがいくつかある。まず普段の環境である。過去に松浦先生が講義してくださったように、外国に滞在して、様々な日本との違いを知ることができ、例えば日本食がとても美味しいところや日本はトイレなど公衆衛生が良好であることなど、日本を俯瞰して初めて分かる、日本の良さに改めて気がついた。次に感謝である。周知の事実だが、感謝することで損することはなく、言うだけで自分と相手を少し幸せにできる魔法の言葉だと感じた。親しい間柄でも、日頃から感謝の気持ちを忘れないようにしたい。更に、弱いつながりである。滞在中は、現地の方とのインタラクションが研修をよりよいものにしてくれた。例えば、現地の方との会話は言うまでもなく、バスから手を振って振りかえしてもらったときや、逆に大学のキャンパスで手を振られたとき、ホテルのメモ帳の落書きが増えていたときなど、たとえコミュニケーションでなくてもこういった小さなつながりを持てることが楽しかった。以前の講義で教わった「弱いつながりが世界を広げる。」ということの意味が分かったように感じた。

また、国立新竹科学園區実験高級中学でのプレゼンなどから、自分の英語力の未熟さが露呈した。例えば、質疑応答などの咄嗟に答えなければいけない場面で稚拙な表現になってしまうことがあったことから、たとえ英語の成績が良かったとしても、話すという本来の使い方ができていなければ英語を学ぶ意義がないと感じたため、英語を勉強科目としてではなく、コミュニケーションのツールとして使えるように学んでいきたい。

最後に、今回の研修を通して将来は海外で学び、働きたいという気持ちが一層強まった。今までは漠然とした憧れだけがあったが、実際に海外の大学などへ訪問することで、世界の広さを感じることができた。これからは広い世界に身をおいて国際的に活躍できるようになりたいと考えた。