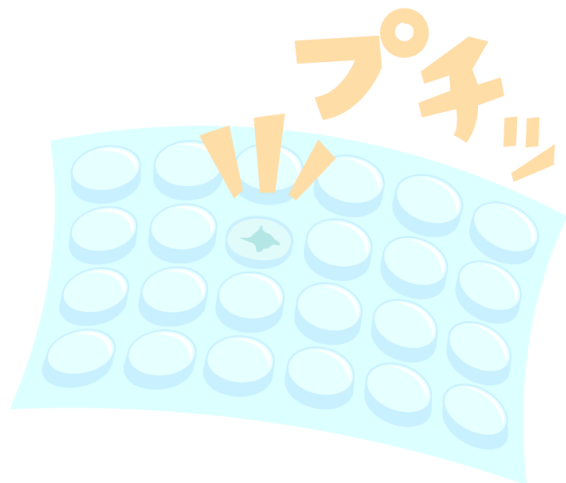
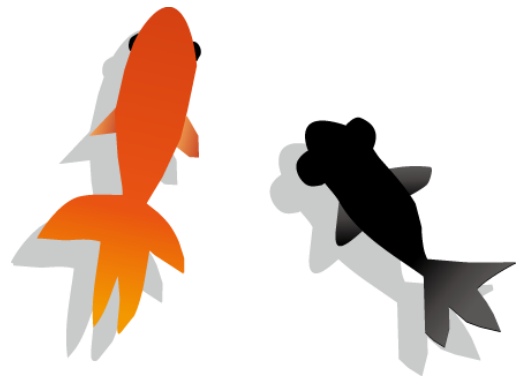
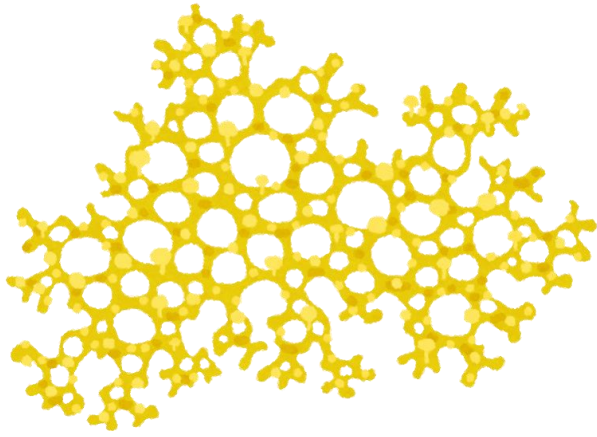


令和7年度

七尾高校課題研究論文



自然科学研究Ⅱ
(課題研究)

石川県立七尾高等学校

目 次

- ① 高分子化合物および界面活性剤が尿素結晶の形状に与える影響・・・・・・・・・・P 1
中村 陸人／干場 智貴／干場 真歩／前田 侑里 （担当教員 小湊 裕香）
- ② 密度に逆らう油中の泡～炭酸マグマ～・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・P 5
酒井 宏暉／鈴木 心羅／山崎 茉奈／山本 千尋 （担当教員 岩網健太郎）
- ③ マイクロプラスチックが大腸菌の増殖に与える影響・・・・・・・・・・・・・・・・P 9
押切 貴晴／佐竹 美洸／高田 蒼大／山本 愛佳 （担当教員 高畠 侑馬）
- ④ 千里浜海岸に流入する河川の砂の色と成分の比較・・・・・・・・・・・・・・・・P13
岡辺 紗和／坂口 友菜／松生 英己／南谷優里愛 （担当教員 谷村 勇二）
- ⑤ チンダル現象における光の道筋の長さが変わる条件・・・・・・・・・・・・P17
金井 航輝／浜田涼太郎／松永 幸子／松柳 湖愛 （担当教員 北 浩也）
- ⑥ 様々な化学物質による粘菌の行動の変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・P21
奥井 悠太／川下 瑞暉／関 陽向／竹端ひかり （担当教員 小林 広典）
- ⑦ ワキンとデメキンの嗅覚の違い・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・P25
岡部 天音／福島充希子／藤本 雅妃／本多 祐喜 （担当教員 合田 怜史）
- ⑧ 気泡緩衝材の緩衝性能の測定と比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・P29
太田 皆美／関軒康太郎／町岡 優真／室峰 充希 （担当教員 木下 和也）
- ⑨ 微生物燃料電池の電流量が増加する条件について・・・・・・・・・・・・・・P33
北口 知樹／塩谷 美喜／瀬口 将哉／中山瑠璃花 （担当教員 釜谷 智貴）
- ⑩ UV 硬化樹脂の反り返りが小さくなる条件について・・・・・・・・・・・・・・P37
酒井 煌太／谷口 瑛音／田村 芹奈 （担当教員 寺尾 知晃）

高分子化合物および界面活性剤が 尿素結晶の形状に与える影響

班員 中村 陸人、干場 智貴、干場 真歩、前田 侑里
担当教諭 小瀧 裕香

キーワード：尿素、界面活性剤、高分子化合物、針状結晶、樹状結晶

This study examined factors affecting urea crystal shape. Adding PVA produced thick crystals, and adding DBS led to dendritic crystals. The melting point matched pure urea, indicating the crystals were also pure urea with the same structure. In conclusion, adding polymers or surfactants to urea solutions alternate the shape of the crystals. The cause is probably not inclusion or adsorption.

1 はじめに

尿素水溶液に高分子化合物と界面活性剤をそれぞれ1種類ずつ添加すると、尿素が樹状結晶を形成することが分かっている(丸田 1967)。また、尿素水溶液に高分子化合物のみを添加すると尿素は針状結晶を形成し、界面活性剤のみを添加した場合も同様に針状結晶を形成することが分かっている(丸田 1967)。そして、尿素結晶が樹状結晶を形成する要因として、尿素に高分子化合物と界面活性剤を添加した際に高分子-界面活性剤錯合体が形成されることが示唆されている(丸田 1967)。以上のことから、高分子化合物と界面活性剤の割合を変化させると尿素結晶の形状が変化すると考えた。高分子化合物の割合または界面活性剤の割合を変化させたときに、尿素結晶がどのような形状の結晶に成長するのかを調べた。

2 実験方法

〈実験1〉 PVA添加

純水50 mLに尿素15 gを添加して尿素水溶液を調製した。この水溶液に高分子化合物であるポリビニルアルコール(以下、PVAとする)を全質量に対する質量パーセント濃度が0.1%から0.8%までの範囲で0.1%刻みで変化させ、添加した。調製した水溶液を、画用紙で作成した型

にかけ流し、温度を30℃、湿度を40%に設定したインキュベーター内で、シャーレに風よけをかぶせて約12時間放置した。それぞれの濃度につき4回ずつ実験を行った。その後、できた結晶の形を目視と双眼実体顕微鏡で観察した(図1)。形成された結晶を図2と図3を参考に、枝分かれの有無を基準に針状結晶と樹状結晶に分類した。

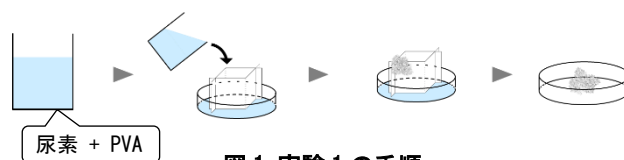


図1 実験1の手順



図2 針状結晶の例



図3 樹状結晶の例

〈実験2〉 DBS添加

純水50 mLに尿素15 gを添加して尿素水溶液を調製した。その水溶液に界面活性剤であるドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム(以下、DBSとする)を全質量に対する質量パーセント濃度が0.1%から0.8%までの範囲で0.1%刻みで変化させ、添加した。調製した水溶液を、画用紙で作成した型にかけ流し、温度を30℃、湿度

を40%に設定したインキュベーター内で、シャーレに風よけをかぶせて約12時間放置した。これをそれぞれの濃度につき4回ずつ実験を行った。その後、できた結晶の形を目視と双眼実体顕微鏡で観察した(図4)。できた結晶を図2と図3を参考に、枝分かれの有無を基準に針状結晶と樹状結晶に分類した。

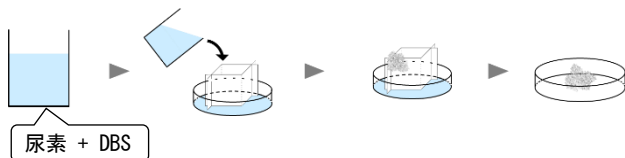


図4 実験2の手順

〈実験3〉 融点の比較

実験1の結晶のうち0.1%と0.8%の結晶、実験2の結晶のうち0.1%と0.8%の結晶、コントロールとして尿素単体を用いた。これらをメノウ乳鉢ですりつぶし、それぞれ0.010 gずつ量り取った。融点の比較対象としてアルミナを0.010 g量り取った。示差熱重量同時測定装置(STA200RV 熱分析装置)に入れ、試料の重量変化(TG)と、熱の出入り(DTA)を測定した(図5)。これらより試料の融点を決定した。

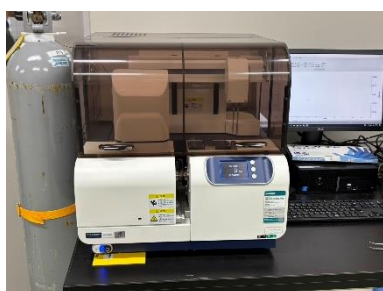


図5 示差熱重量同時測定装置 (STA200RV 熱分析装置)

〈実験4〉 X線回折測定

実験1の結晶のうち0.1%と0.8%の結晶、実験2の結晶のうち0.1%と0.8%の結晶、コントロールとして尿素単体を用いた。これらをメノウ乳鉢ですりつぶし、粉末X線回折測定装置(MiniFLEX600)で、結晶の構造を調べた(図6)。



図6 粉末X線回折測定装置 (MiniFLEX600)

3 結果

〈実験1〉 PVA添加の結晶の形

PVAの濃度にかかわらず、針状結晶が形成された(図6、図7)。濃度が高くなるにつれて太い結晶の数が増加した。

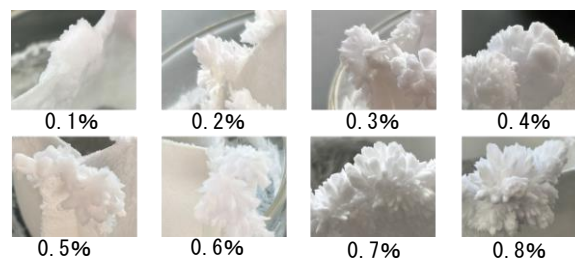


図6 加えたPVAの濃度ごとの形成された結晶の形状

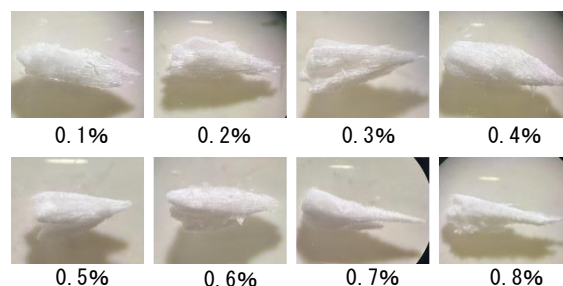


図7 加えたPVAの濃度ごとの形成された結晶の形状。双眼実体顕微鏡による観察。

〈実験2〉 DBS添加

DBSの濃度にかかわらず、樹状結晶が形成された(図8、図9)。DBSの濃度が0.2%と0.4%のときのみ、針状結晶と樹状結晶の両方が形成された(図10)。

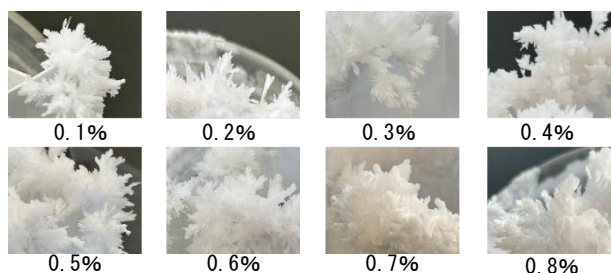


図8 加えたDBSの濃度ごとの形成された結晶の形状

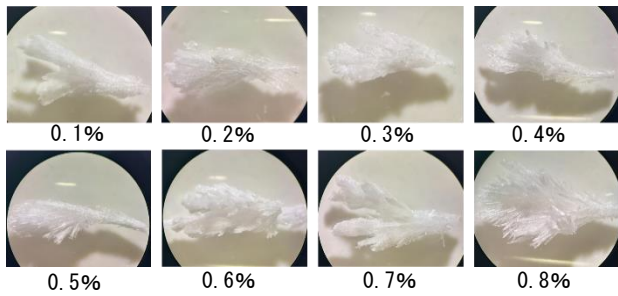


図9 加えたDBSの濃度ごとの形成された結晶の形状。双眼実体顕微鏡による観察。

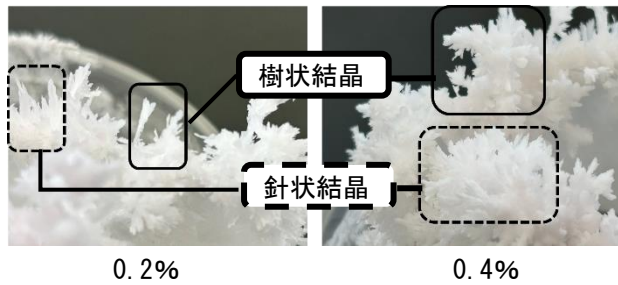


図10 実験2で形成された0.2%と0.4%の結晶の形状

＜実験3＞ 融点の比較

尿素単体の融点は133.2℃、PVA0.1%の結晶は133.4℃、PVA0.8%の結晶は133.0℃、DBS0.1%の結晶は133.2℃、DBS0.8%の結晶は132.9℃だった(表1)。

表1 尿素単体と実験で得られた結晶それぞれの融点

尿素単体	PVA0.1%	PVA0.8%	DBS0.1%	DBS0.8%	
融点(℃)	133.2	133.4	133.0	133.2	132.9

＜実験4＞ X線回折測定

実験 1、2 で形成された結晶と尿素単体でグラフの概形がほとんど変わらなかった(図11)。

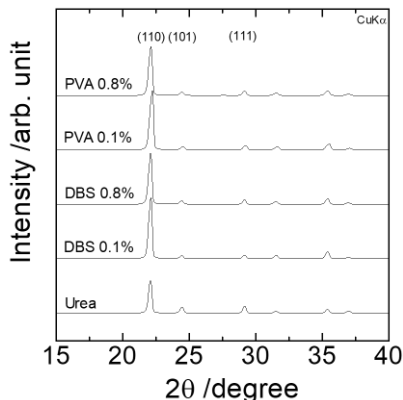


図11 実験4の結果
横軸は入射したX線と回折して出てきたX線の間角度を示し、縦軸はその角度でどれだけ強い回折X線が観測されたかを示す。

4 考察

＜実験1＞ PVA添加

PVAは高分子化合物であるため、先行研究と同様に針状結晶のみが形成されたと考えられる。太い結晶が形成された理由は、包接と吸着の二通りが考えられる。包接の場合、尿素のカルボニル基とPVAに含まれる水素分子との間に水素結合が形成されたためだと考えられる。PVA同士でも、PVAに含まれる水素分子と酸素分子との間に水素結合が形成されると考えられる。これらの水素結合により、尿素分子が横方向に配列しやすくなり、結晶の成長過程における側方成長が促進された結果、太い尿素結晶が形成された可能性がある。吸着の場合、尿素の結晶の成長方向にPVAが吸着する可能性がある。それにより、PVAが障害物のようになり吸着していない方向に尿素が成長した可能性がある(図12)。

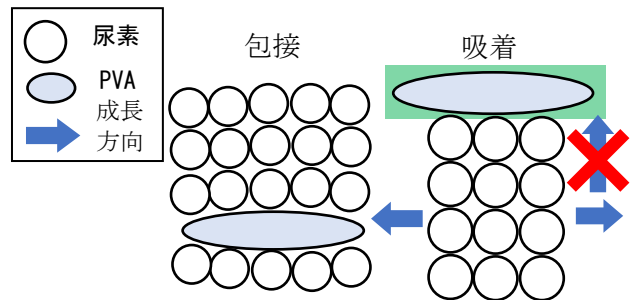


図12 実験1の考察
包接ではPVAを媒介することで尿素が並びやすくなったため、結晶が太くなり、吸着では、PVAが障害物のように働いている。

＜実験2＞ DBS添加

樹状結晶が形成された理由は、尿素の結晶構造内に異なる物質が含まれる包接と尿素の結晶表面に異なる物質が付着する吸着の二通りが考えられる。包接の場合、DBSを添加したときに、溶液中に溶解している尿素分子の一部とDBSとの間で水素結合が形成されたと考えられる。この時、尿素のアミノ基とDBSの親水基が水素結合を形成する。溶液を乾燥させる過程で結晶の成長が進行し、DBSと結合した尿素分子も同様に結晶となる。その後、結晶中の尿素分子と結合したDBSの疎水基と、別の尿素分子と

結合したDBSの疎水基どうしが会合する可能性はある。DBSは疎水基が一方に配向した分子構造をもつため、尿素の結晶が成長する方向が疎水基の配向方向へと変化し、その結果、結晶の成長に分岐が生じ、樹状結晶が形成された可能性がある。吸着の場合、尿素の結晶の成長方向にDBSが吸着する可能性がある。それにより、DBSが障害物となり吸着していない方向に尿素が成長した可能性がある（図13）。

先行研究と異なる結果となった理由には、先行研究と実験方法が異なっていたことが挙げられる。先行研究では、高濃度の界面活性剤水溶液を調製し、そこに尿素を添加して、自然乾燥させていた(丸田 1967)。今回は別の手法をとっていたため、結果に違いが生じたと考えられる。他にも、本研究と先行研究で尿素の水溶液に対する比率が大きく異なっていたことが挙げられる。

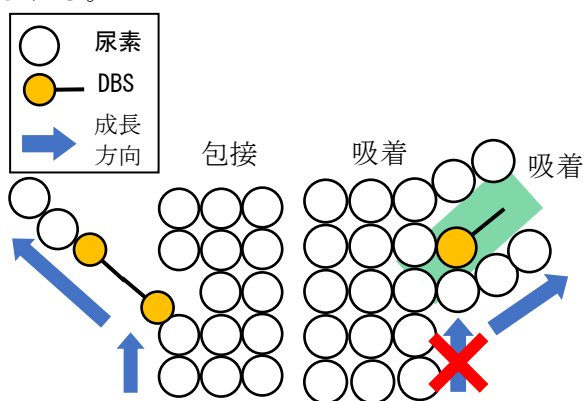


図13 実験2の考察
包接では尿素とDBSとの間に水素結合を形成することで疎水基の方向に成長方向が変化し、吸着ではDBSが障害物のように働いている。

＜実験3＞ 融点の比較

形成された結晶と尿素単体の融点がほとんど変わらなかったことから形成された結晶は混合物ではなく純粋な尿素である可能性が高い。しかし、PVAとDBSの質量パーセント濃度が小さく、尿素とPVAまたDBSの物質質量比も理論値では1%に満たないため、顕著な結果が出なかった可能性もある。

＜実験4＞ X線回折測定

グラフのピークの変動がなかったことから、形成された結晶は尿素単体と結晶の構造が同じだったと考えられる。したがって、結晶の構造内にPVAまたはDBSは含まれていないと考えられる。

5 今後の展望

実験2の結果は、先行研究と異なるものとなり、その原因は実験方法が異なるためだと考えた。先行研究では、高濃度の界面活性剤水溶液を調製し、尿素を添加して自然乾燥させていた。この実験方法の違いが、結果の違いとなった可能性が考えられる。そのため、先行研究と同じ実験方法でどのような形状の結晶が形成されるかを調べたい。

物質質量比が原因と考えられるため、この結果が正しいかはわからない(実験3)。そのため、元素分析を行い、実験2で形成された結晶に異なる物質が含まれているかどうか調べる必要があると考える。また、赤外分光法で実験2で形成された結晶内にベンゼン環がみられるか調べることも考えている。

6 謝辞

本研究にあたり、金沢工業大学の坂本宗明様には、試料の提供や研究手法の助言、研究器具の貸与等、大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます。

7 参考文献

- 丸田巖, 荒井明彦, 重弘文子, 「高分子-界面活性剤錯合体の尿素に及ぼす影響」, 1967, 工業化学雑誌 70 巻 8 号

密度に逆らう油中の泡～炭酸マグマ～

班員 酒井 宏暉 鈴木 心羅 山崎 茉奈、山本 千尋
担当教諭 岩網 健太郎

キーワード：炭酸マグマ、水泡

When a bath additive is added to two separated liquids (water and oil), the generated bubbles rise to the top before going down, staying at the liquid interface. To investigate why bubbles move in this way, experiments were conducted in which conditions such as the type of gas blown in, the blowing gas speed, the volume of water, and the temperatures of the water and oil were changed. Finally, it was concluded that water was lifted due to a flow created in the oil as the rising gas.

1 はじめに

コーラなどの炭酸飲料に商品名メントスというソフトキャンディーを入れると、炭酸中の炭酸ガスが放出され発泡現象が起こることがよく知られている。この現象に関連して油の中にメントスを入れると泡が発生する実験⁽¹⁾に注目した。下層にコーラ、上層に油を入れた容器にメントスを入れると、炭酸ガスにより発生した泡が油層の上部まで上がり、その後折り返して油とコーラの境界面に溜まる。これと似た現象で炭酸マグマ⁽²⁾と呼ばれる現象も知られている。下層が水、上層が油の液体に入浴剤を入れると入浴剤から炭酸ガスが発生し同様の現象が見られる。これらの現象において発生した泡(気泡)は一度上昇したあとに下降するが、気泡は油よりも密度が小さいため、下降しないはずである。泡が上昇した後に下降する現象の解明を目的として実験を行った。

2 材料と方法 結果

<材料>

・水(黒インク入り)

※水を見やすくするために黒インクを入れた。

・油(サラダ油)

・注射器(容量:60 mL)

・プラスチック容器(縦19.2 cm 横5.3 cm)

・メスシリンダー(250 mL)

・ビデオカメラ(iPad)

・酸素、二酸化炭素、ヘリウムのボンベ

<実験1>泡に水が含まれているのかを確認する。

●目的

発生する泡が下降する原因として泡に水が含まれていると仮説を立てた。下降する泡を観察し、下降する泡に水が含まれているか調べた。

●方法

筒状の容器に油とインク入りの水を入れ、注射器にチューブをつなぎ、水に空気を吹き込んだ(図1)。その様子をカメラで撮影し、記録した。

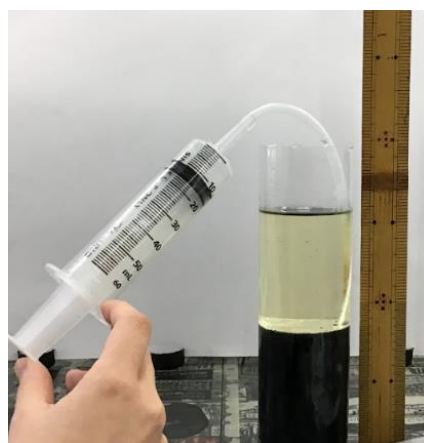


図1 実験を行う様子

●結果

油の中の泡はすべて黒い色の泡であった(図2)。



図2 実験1で色のついた泡がみられる様子

●考察

油層から折り返して下降する泡に色のついた泡が見られた。このことより、油よりも密度が大きい水を含むため、泡が油中を下降できることが分かった。以下、水が油中でまとまった泡を水泡と定義し、これ以後、気体の泡を「泡」、水を含んだ泡を「水泡」と表す。

<実験2>水泡と気体の条件

●目的

吹き込む気体の種類と、単位時間あたりに吹き込む気体の量によって、水泡の大きさが変化するかを調べる。

●方法

空気、酸素、二酸化炭素の3種類の気体を使用した。実験1で使用したインク入りの水と油をいれた筒状の容器に、気体60 mLを注射器で1 mL/s、10 mL/s、20 mL/sと変化させて吹き込み、その様子をカメラで撮影した。気体を吹き込んでから10秒後の油中にある泡の大きさを計測するために動画の一部を切り取った。油中にある水泡を無作為に10個選び、水泡の大きさを計測した。容器の横に置いたものさしを、撮影した画像から画像編集で切り取り、水泡の横に移動させて配置した。そして、ものさしの目盛りを基準として泡の大きさを測定した。実験は各条件について5回ずつ行い、平均を求めた。

●結果

気体の種類間に水泡の大きさに大きな差はみられず、気体の注入速度が20mL/sのとき

1mL/sのときに比べ水泡の大きさが約1.5倍になった(表1)。気体の注入速度による水泡の大きさをみると、気体の注入速度を大きくするほど大きな水泡が発生しやすくなった(図3)。

表1 気体別の水泡の大きさ

単位時間あたりの空気量	1 mL/s	10 mL/s	20 mL/s
空気 (mm)	1.5 ± 0.48	2.0 ± 0.49	2.3 ± 0.85
酸素 (mm)	-	2.1 ± 0.52	2.2 ± 0.60
二酸化炭素 (mm)	-	2.1 ± 0.41	2.1 ± 0.76

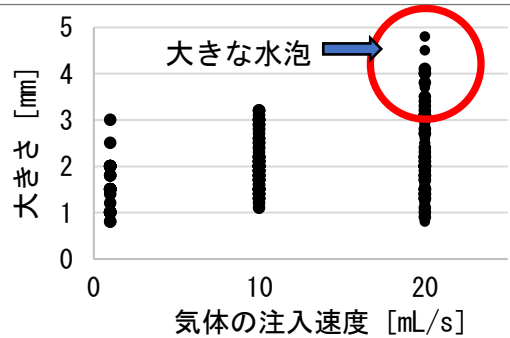


図3 気体の注入速度別の水泡の大きさ

●考察

水泡には気体があまり含まれていないため気体の種類が水泡の大きさに与える影響は小さい。また気体の注入速度を大きくすると巻き込む水の量が増えるため、吹き込む気体の注入速度が大きくなるほど水泡の大きさも大きくなると考えた。

<実験3>液体の温度を変える。

●目的

吸い上げられる水泡量が夏と冬で変化して見えた。液体の温度が水泡の総量に影響を与えるのかを調べた。

●方法

油と水が入ったメスシリンダーを湯せんし、メスシリンダー内の液体の温度が約60℃になるようにした。同様に、氷水中にメスシリンダーを入れ、液温が10℃となるようにした。それぞれの温度で水の中に注射器で空気を1秒あたり1 mLの速さで5秒間吹き込んだ。初めに上昇した水泡が再び水と油の境界面に到達した時点の様子をカメラで撮影し、実験2と同様の方

法で記録した。実験は各条件で5回繰り返した。

●結果

油と水の温度が60℃のときは水泡量は約3.18 mLであり、温度が10℃のときは水泡量は約2.99 mLであった。（表2、図4、図5）。

表2 温度別の吸い上げられる水泡の総量

水温	60℃	10℃
水泡量(mL)	3.18	2.99



図4 温度60℃の水に空気を吹き込んだ様子

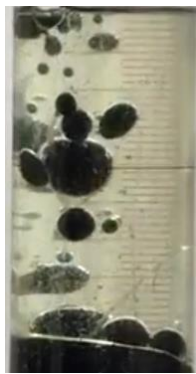


図5 温度10℃の水に空気を吹き込んだ様子

●考察

水・油の温度が高いほど、油中に吸い上げられる水が多いことが分かった。水の粘度は温度が高いほど小さくなり（図6）、水の粘度は水が受ける摩擦力と比例関係にある。そのため空気を吹き込むと気体の泡と水との間に摩擦力が生じ水泡が上昇する。これらから、水、油の温度が低く、粘度が大きいほど水泡を多く吸い上げると予想したが、それとは逆の結果になった。

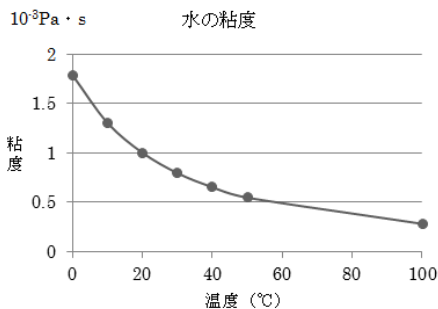


図6 機械設計エンジニアの基礎知識 粘度と動粘度

<実験4>水の流れと水泡量

●目的

泡が水中を上昇する距離が長いほど注入した気体が巻き込む水の量が増え、吸い上げられる水の量も増えると予想し、水泡が水の流れにより油層まで上昇しているのかを確認した。

●方法

水の量を50 mL, 100 mL, 150 mL と変化させることにより、泡が上昇する距離を調整した（図7）。50mlでは5cm、100mlでは10cm、150mlでは15cm上昇した。注射器で空気を1秒間に1mLの速さで10秒間吹き込み、その様子をカメラで撮影した。このとき、初めに上昇した水泡が再び水と油の境界面に到達した時点の水泡を球とみなし、体積を実験2と同様にして計測した。実験は各条件で5回繰り返した。



図7 油に水50mL（左）と水150mL（右）をメスシリンダーに入れた

●結果

水中で移動する泡の距離と水泡の体積には相関は見られなかった。また気体によるの違いも見られなかった（図8）。

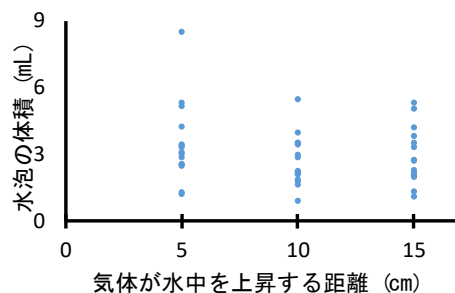


図8 水中を移動する泡の距離と水泡の総量の関係

●考察

水泡の量（これ以後、水泡の量を油中に吸い上げられた水量と判断する）は、泡が水中を移動する距離と相関がみられなかった。泡が移動する距離が長いと、水中に、より強い上向きの流れが発生する。したがって今回の結果からは水の流れによって水が油層にまで上昇しているとは考えにくい。

3 結論

泡が油層から折り返して下降する原因は、泡に水が含まれているからであることが分かった。さらに、水泡の量を変化させる要因は気体の種類、気体を発生させる水の深さ（気体の泡が水中を通過する距離）に依存しないため水が油層に上昇する現象は、水の流れによるものではないことが分かった。一方で、気体の吹き込む速度、油および水の温度に水泡の量は依存する。気体では、障害物を回り込むように流れが発生したとき、流れがない部分に負圧が生じ、障害物に物体がひきつけられるという現象がある（図9）。油の流れに注目すると、油と気体の泡でも同じように、気体の泡を油が回り込み、水が泡に吸い寄せられたのではないかと考えた（図10）。このとき、水の粘度が小さいほど水が受ける下向きの摩擦力は小さいため、泡が水を吸引する力を妨げる力が小さくなると考えられる。このように考えると実験3の結果は矛盾がない。これらより水が油層に上昇する現象は、気体が油中を上昇する際に発生する油の流れが水を持ち上げていることで起きると考えられる



図9 落下するお盆に吸い寄せられる風船（ヘリウム）考えるカラス#20

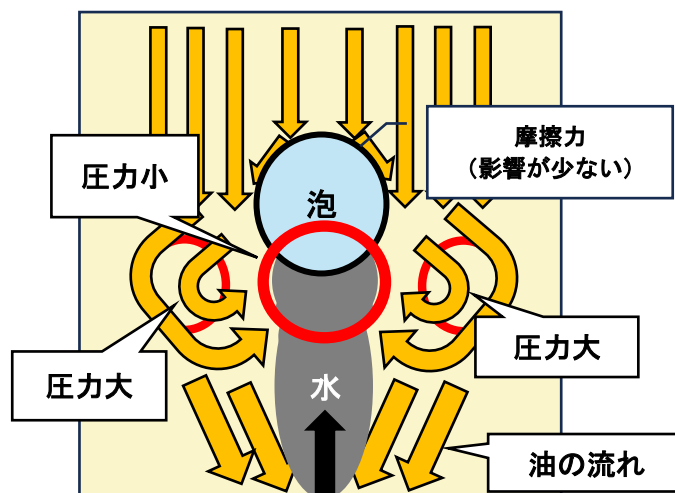


図10 油の作る流れにより水が泡に吸い寄せられる様子

4 今後の展望

水泡の大きさを計測する際、手前の水泡と奥の水泡との遠近差を考慮しないで計測したため、水泡の大きさにズレが生じたと考えられる。そのため、遠近差の影響が結果に反映されない計測方法を考案するとともに、各実験ごとの試行回数を増やし、より正確な値を求めていきたい。

5 参考文献

- (1) おるたな Channel. “メントスを油で閉じ込めたら不思議な結果に！” YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Q5hRnUGTf50>, 2016.
- (2) 吉田麻理子. “【実験遊び】ボコボコ湧き上がる！炭酸マグマ～素材/入浴剤～.” 保育と遊びのプラットフォーム [ほいくる] by 小学館. <https://hoiclue.jp/800012490.html>, 2022.
- (3) 川角博. “NHK 考えるカラス～科学の考え～.” NHKONE. https://edu.web.nhk/school/watch/bangumi/?das_id=D0005110320_00000
- (4) MONO 塾. “粘度と動粘度.” 機械粘度エンジニアの基礎知識. <https://d-engineer.com/fluid/nendo.html>.

マイクロプラスチックが大腸菌の増殖に与える影響

班員 押切 貴晴、佐竹 美洗、高田 蒼大、山本 愛佳
担当教諭 高畠 侑馬

The purpose of this study is to determine the effects of microplastics on the inhibition of *Escherichia coli* growth. Microplastics inhibited *E.coli* growth and polyurethane showed higher transmittance. Styrofoam soaked in LB medium for 48 hours showed higher transmittance. In conclusion, microplastics inhibited *E.coli* growth; their inhibitory capacity varied depending on the type of plastic and may be influenced by the amount of chemicals present.

1 はじめに

近年、プラスチック製品の大量生産と廃棄により、環境中のプラスチックゴミは急速に増加している。特に、直径5 mm以下の微細なプラスチック粒子であるマイクロプラスチックは海洋・河川・土壌・大気など様々な環境中に広く分布しており、地球規模の環境問題として注目されている。マイクロプラスチックは紫外線や物理的摩耗によって形成され、長期間分解されずに環境中に蓄積するため生態系への影響が懸念されている。さらに、マイクロプラスチックは生物に摂取されやすく、食物連鎖を通して生体内に取り込まれる可能性や、表面に有害物質を吸着して運ぶ可能性も報告されている(1)。

中でも微生物は有機物の分解や物質循環を担う、生態系の基盤となる存在である。そのため、マイクロプラスチックが微生物にどのような影響を与えるかを明らかにすることは、環境汚染の影響を理解する上で重要である。

マイクロプラスチックによる影響の対象として、海洋生物中心に研究が進められてきた。また、近年では土壌生態系への影響も注目されており、特にミミズは土壌生態系において分解や物質循環を担う重要な生物であり、マイクロプラスチックの影響を評価する指標生物として広く利用されている(2)。

一方で、マイクロプラスチックが生態系の基

盤となりうる微生物そのものの生育や代謝活動にどのような影響を与えるのかについては十分に研究されていない。そこで私たちはマイクロプラスチックが微生物群集に与える影響を明らかにすることは、環境汚染の実態を理解するうえで重要であると考えた。

本研究では、微生物の影響を検討するためのモデル生物として大腸菌に着目した。大腸菌は培養が容易であり、増殖の変化を比較的観察しやすいことから高校の課題研究の材料として適切であると判断した。

2 材料・方法

【材料・実験器具】

ポリウレタン

発泡スチロール

大腸菌 (*Escherichia coli*)



図1 シェイキングバス SB-20
アズワン株式会社



図2 PID制御
デジタル形恒温器
株式会社 日伸理化

【実験1】（大腸菌の増殖への影響評価）

まず、試験管に液体LB培地を7 ml注いだ。この試験管の中に攪拌を促し、より多くの空気を送り込むためのプラスチック片 (Jiangsu Huida Medical Instruments社製のイノキュレーションループを2 mm×2 mm×6 mmに切断)を3つ投入し、大腸菌10 μLと、菓さじ一杯分のマイクロプラスチックを培地に加えた。ポリウレタンと発泡スチロールを削って1 mm以下に選別したものをマイクロプラスチックとして培地に加えた。この試験管を振とう培養機(図1)に配置し、振とう培養機内の水の温度を大腸菌の増殖が活発に行われる37 °Cに保ち(図2)、1 分間に130 回の振動を維持したまま4 時間の培養を行った。また、培地内に酸素を多く送り込むために、試験管を振とう培養機に斜めに配置した。培養後、マイクロプラスチックを加えた培地には濾過を行ってプラスチックを取り除いた。その後、大腸菌の増殖の程度を調べるために吸光光度計を用いてそれぞれの培地の透過率を測定した。

【実験2】（マイクロプラスチックを培地に浸す時間による変化）

実験1と同様の条件にした試験管にポリウレタンと発泡スチロールを加え、培地にプラスチックを浸す時間を48 時間とした培地と0 時間とした培地の2種類を用意した。48 時間浸したものは冷蔵庫で保管した。それらを振とう培養機で水の温度を37 °Cに保ち、1 分間に130 回の振動を維持したまま4 時間の培養を行った。培養後に吸光光度計を用いてそれぞれの培地の透過率を測定した。

【実験3】（ポリウレタンの加水分解による影響の検証）

ポリウレタンは加水分解し、pHが低下することが明らかになっている(3)。2本の試験管を用意し、片方の試験管にはLB培地のみ、もう一方の試験管には、LB培地にポリウレタンを浸し、これまでの実験同様、振とう培養機で4 時間揺らし、2つの培地のpHを測定した。それぞれ3

回ずつpHを測定し、その平均値を出した。また、実験3ではポリウレタンが加水分解することにより培地のpHが変化したかに焦点を当てたため、大腸菌は入れずに実験を行った。

3 結果

【実験1】

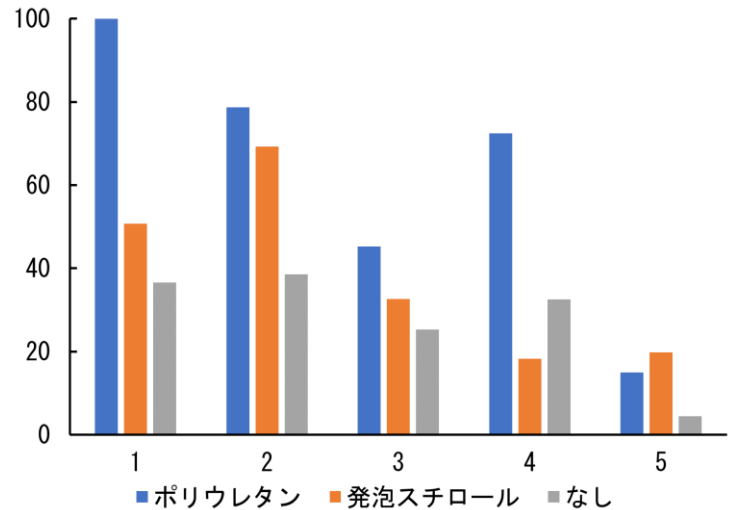


図3 1回目から5回目までの実験ごとの培養後の培地の透過率。それぞれ、培養前の培地の透過率を100とした時の相対値である。

図3が示すようにマイクロプラスチックを加えなかった培地のほうが透過率が低い傾向があった。

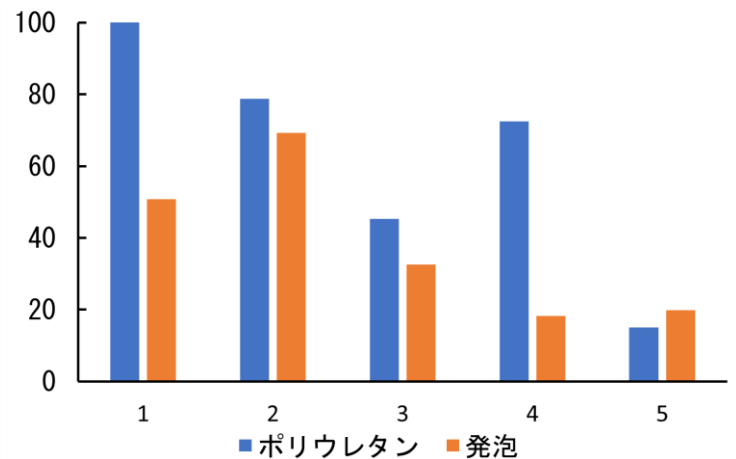


図4 1回目から5回目までの実験ごとの培養後の培地の透過率。ポリウレタンと発泡スチロールについて比較した。それぞれ、培養前の培地の透過率を100とした時の相対値である。

図4が示すようにポリウレタンを加えた培地のほうが透過率が高い傾向にあった。

【実験2】

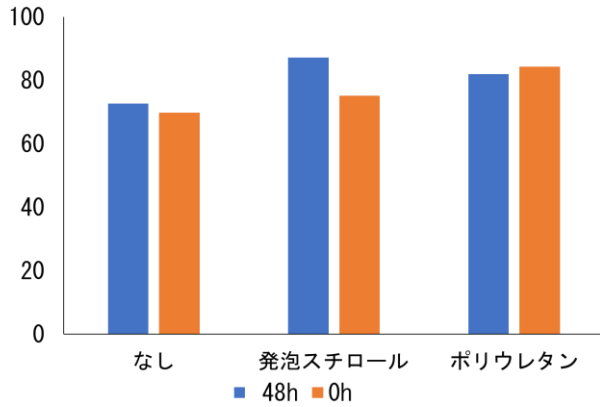


図5 48時間マイクロプラスチックを浸した培地と0時間マイクロプラスチックを浸した培地の透過率。それぞれ、培養前の培地の透過率を100とした時の相対値である。

図5が示すように発泡スチロールでは、48時間浸した培地のほうが透過率が高くなった。ポリウレタンとマイクロプラスチックなしのものでは透過率の大きな変化は見られなかった。

【実験3】

ポリウレタン …7.03
 発泡スチロール…7.02

これらはそれぞれ3回ずつ測定したpHの平均値である。ポリウレタンを加えた培地と加えなかった培地の間でpHに大きな差は見られなかった。

4 考察

【大腸菌数の定量について】

透過率とはある波長の光を当てた際にどれほどの光が通過するかを示す値である。大腸菌の数が多ほど透過率は低くなることから、大腸菌の増殖の度合いを透過率を用いて調べることができる。また、今回吸光度計は600nmの波長を用いた。これは、一般的に吸光度計で大腸菌の増殖の程度を測定する際に用いられる波長であるためである。

【ろ過操作について】

今回、マイクロプラスチックを加えた培地のみ濾過を行ったのは、濾過に使用した濾紙の目が5μmのものであったため、マイクロプラスチックのみを取り除くことができ、約3μmの大

きさの大腸菌のみが含まれる培地には濾過を行う必要がないと判断したためである。実際に行う前後での透過率の値の差は、マイクロプラスチックなしの培地では約6の差であり、マイクロプラスチックを加えた培地では約20の差があったことから、大腸菌のみが含まれる培地に濾過を行う効果が少ないと考えた。

【実験1】(大腸菌増殖への影響について)

マイクロプラスチックを加えていない培地と加えた培地では、前者のほうが透過率が低かった。つまり大腸菌がより多く増殖したことから、マイクロプラスチックは大腸菌の増殖を阻害する可能性があると考えられる。また、ポリウレタン、発泡スチロールをそれぞれ加えた培地では、ポリウレタンを加えた培地のほうが、発泡スチロールを加えた培地より透過率が高かったことから、プラスチックの種類によって大腸菌の増殖を阻害する作用機序に違いがある可能性が考えられる。

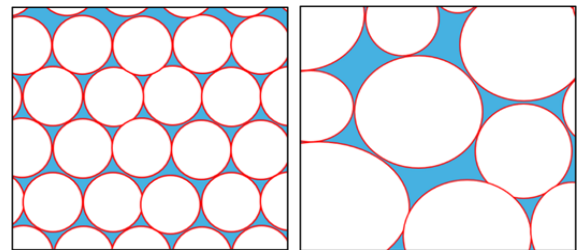


図6 ポリウレタン (左) のイメージ図
 発泡スチロール (右) のイメージ図

今回用いたプラスチックの構造の特徴として、ポリウレタンは密度が大きく、発泡スチロールは体積の大部分を空気が占める(図6)。また、先行研究よりプラスチックは含まれる化学物質が溶け出すという性質を持つことが明らかになっている(4)。これらのことを踏まえると、ポリウレタンは密度が大きいため含まれていた化学物質の量も多く、培地に溶け出した化学物質の量が発泡スチロールよりも多かったのではないかと考えられる。

【実験2】(マイクロプラスチックを培地に浸す時間による影響)

発泡スチロールは培地に浸す時間を長くすると透過率が高くなったことから、発泡スチロールを

培地に浸す時間を長くすることによって、阻害作用の程度が大きくなる可能性が考えられる。また、ポリウレタンでは透過率に大きな差は見られなかったことから、ポリウレタンと発泡スチロールでは異なる要因で阻害作用を示している可能性が考えられる。以上より、我々はポリウレタンが加水分解する性質が関係するのではないかと考えた。

【実験3】（ポリウレタンの加水分解による影響の検証）

ポリウレタンを加えた培地と加えていない培地の間で、pHに大きな差が見られなかったことから、ポリウレタンは4時間では加水分解されず、加水分解によって生成される化学物質が大腸菌の増殖を阻害した可能性は低いと考えられる。

5 展望

現時点では以下の実験を行いたいと考えている。

○化学的要因の特定実験

マイクロプラスチックから化学物質が溶け出すことは先行研究により明らかになっている。本研究ではそれらの化学物質が実際に培地に溶け出しているかどうかまでは確認できていない。しかし、化学的要因であると仮定するならば、実験3の考察より、プラスチックに含まれる化学物質が溶け出して大腸菌の増殖を阻害したことが考えられる。そのため、その物質を特定し、その物質の特性を調べることによって大腸菌の増殖に与える影響を調べることができると考えている。そこで「化学物質だけを溶かし、大腸菌の増殖阻害作用を調べる実験」として、プラスチックから溶け出すとされている物質(ビスフェノールA、フタル酸エステル類など)を培地に加えて大腸菌を培養する追加実験を行うことにより、プラスチックから溶け出る物質が実際に大腸菌の増殖に影響を与えているのかを検証すること、また、この実験結果とマイクロプラスチックを加えた結果との近似の程度を検証することができると考えている。

○物理的要因の有無特定実験

本研究では主に化学的要因に焦点を当てて研究を行ったが、実験と考察を重ねるにつれ、物理的

要因が関係する可能性も考えることができると気づいた。そのため、「マイクロプラスチック以外の微細な物質を培地に加えて、大腸菌の増殖を調べる実験」として追加実験を行うことにより、実際に物理的要因が関係しているかどうかを調べたいと考えている。具体的には、プラスチックではない、ガラスや金属を粒子化させたものを培地に加えて大腸菌の増殖を行う実験を考えている。この実験を行うことにより、加えた物質が持つ、培地を攪拌して培地に酸素を送り込む能力によって、大腸菌の増殖の程度に差が生じるかを検証することができると考えている。

6 参考文献

- (1)高田秀重.マイクロプラスチック汚染の脅威1“生態系汚染”.野鳥.2021,5・6月号.
- (2)D. Cao, X. Wang, X. Luo, G. Liu and H. Zheng. Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil. *Earth and Environmental Science* 61. 2017.p.A136
- (3)Johansen.M. tert-AmylAlcohol-Mediated Deconstruction of Polyurethane for Polyol and Aniline Recovery. *ACS Sustainable Chem.* 2022, vol10,p.11191–11202.
- (4) 江河明日香. プラスチック製品からの低分子化合物の溶出について. *生活工学研究*.2000,vol2,p.44-47

千里浜海岸に流入する河川の砂の色と成分の比較

班員 岡辺 紗和、坂口 友菜、松生 英己、南谷 優里愛
担当教諭 谷村 勇二

キーワード：千里浜、砂、岩片、元素組成

The purpose of this study was to determine which rivers supply sand to Chirihama. The presence or absence of supply was determined by examining the ratio of colored and colorless rock fragments and their elemental composition. The investigation revealed that the Hodatsu River and the Oumi River are highly likely to be supplying sand.

1 はじめに

千里浜海岸は日本で唯一車で走ることのできる砂浜として知られているが、近年、浸食による砂浜の幅の減少が大きな問題となっている。千里浜の砂は、ほとんどが千里浜より南に位置する手取川から海流に流され、堆積したものと過去の調査よりわかっている（百瀬, 2023）。しかし、手取川ダムの建設により、手取川から流出する砂の量が減少し、千里浜への砂の供給量も減少している。そのため「千里浜なぎさドライブウェイ」の維持が困難になる恐れが生じている。千里浜の浸食を防ぐため人口リーフの設置や養浜などの対策が行われている。しかしながら依然として汀線は後退し続けている。この問題について「砂の供給不足」という観点から、寄与の程度がわかっていない千里浜海岸に流入する河川に着目した。手取川からの砂の供給量については既に様々な調査が行われているが、千里浜に流入する河川については、調査はほとんど行われておらず、砂の供給の有無や寄与の程度はわかっていない。今回の調査では各河川ごとに砂の色と元素組成を調べ、比較することにより、千里浜への砂の供給の可能性を探った。

2 調査 1 河口付近の砂の比較

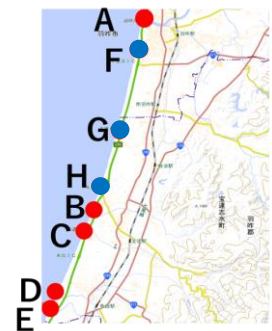
〈目的〉

流入する河川や手取川の河口付近、千里浜の複数の地点から砂を採取し、比較することで共通点や相違点を見つけ、流入する河川からの砂

の供給を明らかにする。

〈方法〉

羽咋川(A)、相見川(B)、宝達川(C)、前田川(D)、大海川(E)の河口付近の砂を採取した。また、それらと比較するために河川の河口以外のレストハウス(F)、志雄パーキング(G)、今浜インター(H)の付近からも砂も採取した。主な供給源である手取川(I)の河口付近の砂も採取した。採取地点を図1



● 流入する河川の河口
● 河川以外

図1 採集地点

に示した。地点ごとの採取地点を図2～6に示した。この写真の円内で砂を採取した。

手取川は千里浜よりも南に約40～45km離れているためこの地図には示していない。採取した砂を顕微鏡を用いて、撮影した（図7）。

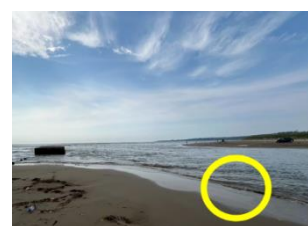


図2 採取地点 (A)



図3 採取地点 (B)



図4 採取地点 (C)



図5 採取地点 (D)



図6 採取地点 (E)



図7 撮影した写真(例)

〈結果〉

手取川 (I) の有色岩片の割合が他の河川に比べて大きいことがわかった (図9)。千里浜海岸では手取川からの砂の供給がほとんどだと言われているため有色・無色岩片の割合が手取川と類似すると推測していたレストハウス (F)、志雄パーキング (G)、今浜インター (H) の割合は手取川と異なっていた (図9)。この結果について、3つの原因を考えた。

①手取川から海流に乗って千里浜に運ばれる際に割合が変化した。手取川の砂は対馬海流によって流され、羽咋市にある滝崎という突き出た岬にぶつかり、Uターンして千里浜まで届けられる。その届くまでの間に割合が変化したと考えられる。

②養浜によって割合が変化した。現在千里浜浸食への対策として他の地点から砂を運び込む養浜が行われている。この影響で手取川からではない砂が混ざったことで割合が変化した。

③千里浜に直接流入する河川も砂を供給しており、その影響で割合が変化した。手取川



図8 砂の流れ

だけでなく流入する河川から微量であったとしても砂が供給されているため割合が変化した。

本研究では③を仮説として調査を続けた。

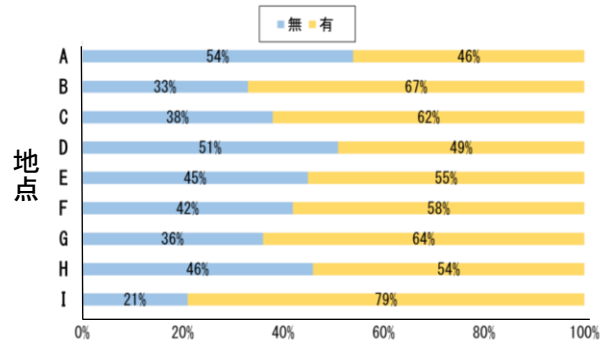


図9 有色岩片と無色岩片の割合

3 調査2 河川の区間ごとの砂の比較

〈目的〉

流入する河川の上流から河口付近にかけて複数の地点で砂を採取し、比較する。これにより流入する河川からの砂の供給を明らかにする。

〈方法〉

調査1で調べた河川の中から羽咋川 (a~d)、宝達川 (e~m)、大海川 (e~h) の3つの水系に絞り、4・5地点で砂を採取した (図10)。デジタルマイクロスコープを用いて、調査1と同様に採取した砂を撮影し、写真内にある有色・無色岩片の数を計測し割合を求めた。

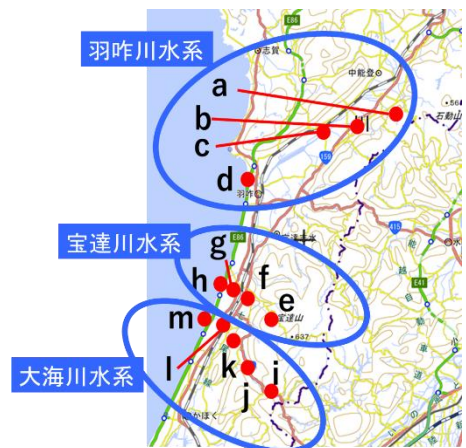


図10 採取地点

〈結果〉

羽咋川と大海川は河口のe地点とm地点で有色岩片の割合が上流、中流に比べて大きくなっていった (図11、13)。宝達川は上流から河口付近にかけて多少変化はあったが、上流、中流と河

口で有色岩片の割合は変化していなかった(図12)。

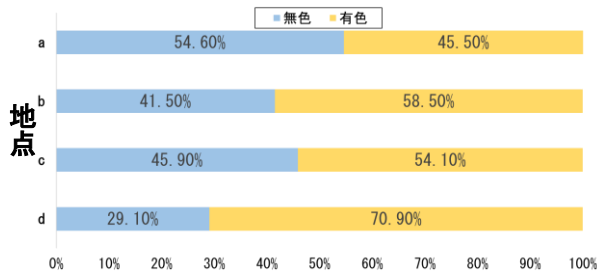


図11 羽咋川水系の有色・無色岩片の割合

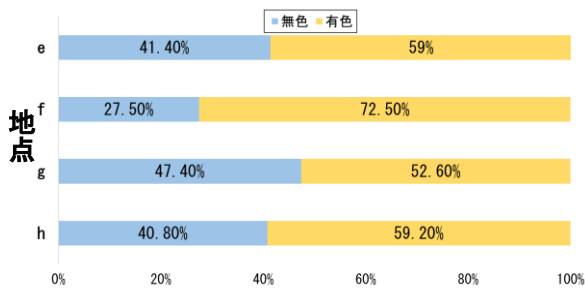


図12 宝達川水系の有色・無色岩片の割合

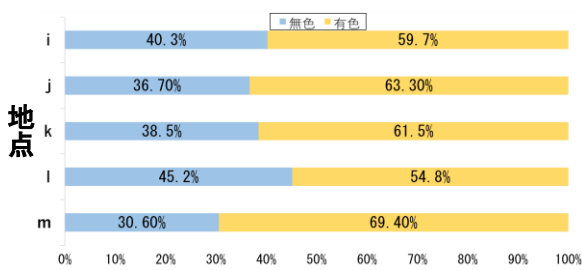


図13 大海川水系の有色・無色岩片の割合

〈考察〉

羽咋川と大海川で河口の有色岩片の割合が大きくなっていたことと、調査1より手取川の河口で有色岩片の割合が大きくなっていたことから、羽咋川と大海川の河口には手取川の砂が多く流れ込んでいる可能性が高い。これより羽咋川と大海川は千里浜への砂の供給は少ないと考えた。宝達川では上流から河口にかけて割合に大きな変化がなかったことから、宝達川では自身の川から多く砂を供給している可能性が高い。しかしながら有色・無色岩片の割合のみでは確実に千里浜に砂の供給を行っているかは判断するには情報が少ないと考えた。

4 調査3 河川の砂の元素分析

〈目的〉

砂の元素組成を調べることによって供給の有無を明らかにする。

〈方法〉

調査2で使用した砂に加え、調査1で採取した志雄パーキング付近と手取川河口付近の砂の元素組成を有色・無色岩片ごとに調べた。元



図14 JEOL 蛍光X線分析装置

素組成を蛍光X線分析装置(図14)により調べた。その結果を分析し(図15)、元素組成分析をもとにクラスター解析を行った(図16、17)。

〈結果〉

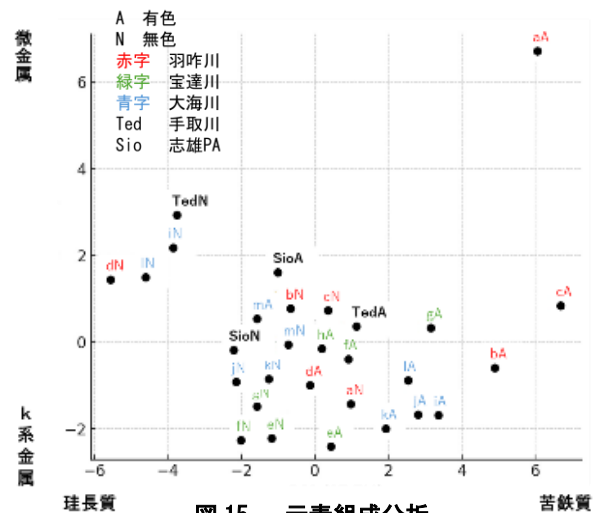


図15 元素組成分析

各河川(羽咋川の無色岩片以外)の河口の砂と手取川河口の砂が異なるクラスターに位置しており、各河川の河口と手取川河口の元素組成は異なることが分かった(図16)。羽咋川では上流～中流の地点が有色・無色岩片それぞれ同じクラスターに位置するが、河口の地点になると有色・無色岩片どちらも異なるクラスターに位置する(図17)。これより羽咋川では上流～中流にかけては同じ元素組成の岩片であるが河口で異なる元素組成になっていると分かった(図17)。また羽咋川河口の無色岩片と手取川の無色岩片が同じクラスターに位置する

ことから元素組成が類似していることが分かった(図17)。これにより羽咋川河口には手取川の砂が多く流れ込んできていると考えられる。

〈考察〉

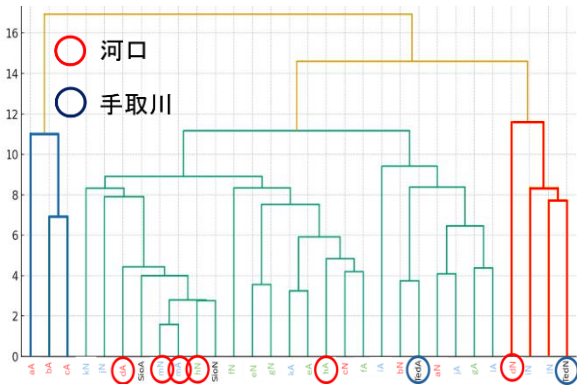


図16 クラスタ解析

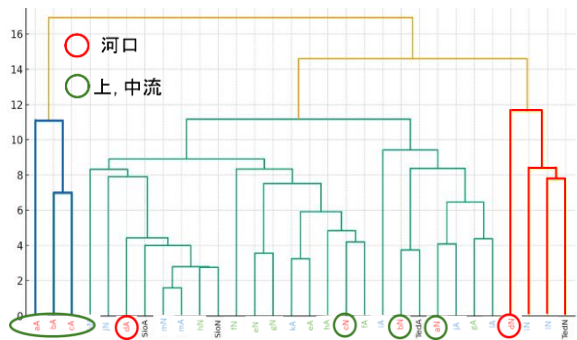


図17 クラスタ解析

羽咋川は河口で有色岩片の割合が大きくなっていたこと、無色岩片の元素組成は手取川と似ていたこと、上流・中流との元素組成と大きく異なることから千里浜へ砂を供給をしている可能性が低いと考えられた。一方、宝達川・大海川の河口は有色・無色岩片どちらも手取川の河口と元素組成が異なることから手取川の砂が河口に流れ込んできていない可能性が高いと考えられた。宝達川の河口では上～中流と河口付近で有色・無色岩片の割合に変化はなく、元素組成が手取川ではなく同じ河川の他の地点と類似しており、宝達川から砂が供給されている可能性が高いと考えられた。大海川の河口では有色岩片の割合が大きく、元素組成が、同じ河川の中流と似ていることから、大海川からも砂が供給されている可能性が高いと考えられた。

〈結論〉

砂が供給されている可能性が高いのは宝達川と大海川、可能性が低いのは羽咋川である。

〈今後の展望〉

現在は手取川の河口付近からしか砂を採取できていないため、中流、上流からも砂を採取し同様に調べて比較する。

7 謝辞

本研究にあたり機材の提供、ご助言をいただいた金沢大学ロバート・ジェンキンズ教授、金沢工業大学坂本宗明教授に厚く御礼申し上げます。

8 参考文献

百瀬年彦
千里浜にたどり着くはずの砂の行方を追う
第60回土壌物理学会, 2018, p. 78-79
千里浜浸食のメカニズムを探る新しい手法
— ルミネッセンス法 — 石川県立大学
NetworkNow, 2023, p. 6

チンダル現象における光の道筋の長さが変わる条件

班員 金井 航輝、浜田涼太郎、松永 幸子、松柳 湖愛
担当教諭 北 浩也

キーワード：チンダル現象 アインシュタインストークスの式

Tyndall phenomenon can show the path of light to reflect some minute particles in the liquid. The purpose was to research factors that causes changes in the path length of light. In conclusion, the path length of light in the Tyndall phenomenon is related to the mass percentage concentration, also there may be a particle size that can make the path length of light longest.

1 はじめに

私たちの身の回りでは、光が直進する性質をもつことはよく知られている。しかし、霧の中で車のヘッドライトの光の道筋がはっきりと見えたり、太陽光の道筋がぼんやりと見える木漏れ日などの現象を経験したことがある人も多いだろう。このように、通常は見えないはずの光の通り道が可視化される現象は「チンダル現象」と呼ばれている。チンダル現象は、溶液中に分散した微粒子による光の散乱によって生じる現象であり、真の溶液とコロイド溶液を見分ける手段としても利用されている。コロイド溶液とは、コロイド粒子が液体中に分散した溶液のことである。コロイド粒子と分子、イオンは、粒子の大きさで区別される。分子イオンの半径は $10^{-10}\text{m}\sim 10^{-9}\text{m}$ に対し、コロイド粒子は $10^{-9}\text{m}\sim 10^{-6}\text{m}$ で、コロイド溶液のほうが比較的に大きい。例えば、食塩水のような真の溶液では光の進路は見えないが、牛乳や霧のようなコロイド粒子を含む物質では、光が散乱され進路が確認できる。また、チンダル現象は自然界のさまざまな現象とも深く関係している。空が青く見える理由や、夕焼けが赤く見える現象も光の散乱と関係しており、チンダル現象を理解することは、これらの身近な自然現象を科学的に説明する手がかりとなる。さらに、近年では大気中の微粒子の観測や、液体の性質を調べる実験などにも応用されており、基礎的な物理現象でありながら、実用的な価値も高い。このようにチンダル現象は、日常生活で目にすることができる身近な現象である一方、その背景には光の性質や物質の状態に関する

重要な科学的原理が含まれている。そこで本研究では、チンダル現象が起こる条件や、その見え方に影響を与える要因について実験を通して詳しく調べ、チンダル現象の理解をより深めることを目的とする。先行研究から、チンダル現象が原因で起こるペットボトルライトの照度とコロイド溶液の濃度と関係があり、コロイド溶液の濃度を濃くするにつれて、ペットボトルライトの照度が高くなることがわかっている。本研究では、コロイド溶液に赤色レーザーを照射したときの光の道筋の長さが変わる条件について調べた。

2 実験方法

調整したコロイド溶液を、縦×横×高さ＝ $4.9\times 8.7\times 9.2$ cmのプラスチック製の容器に入れ、波長632.8nmの赤色レーザーを照射し光の道筋の長さを測定した。本実験では、容器の端から目視で光の筋が確認できるところまでを光の道筋の長さとして定義し、定規を用いて長さを測定した。

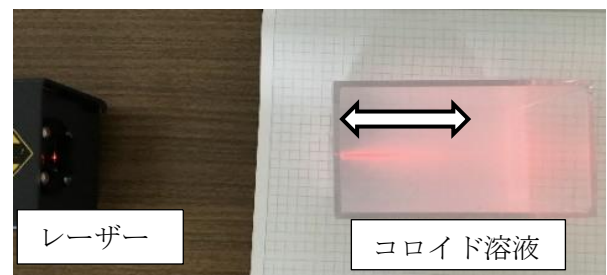


図1 レーザーをコロイド溶液に入射させたときの様子

<予備実験>

溶液の温度と光の道筋の長さの関係について

て調べた。

精製水に牛乳を質量パーセント濃度が0.5 %、1.0 %になるように入れたコロイド溶液を作った。それぞれの溶液の温度を10度から70度まで10度ずつ上げ、化学実験室で光の道筋の長さを測定した。

<実験 I >

コロイド溶液の濃度と光の道筋の長さの関係を調べた。精製水に牛乳を質量パーセント濃度が0.2%から2.0%になるように入れたコロイド溶液を作り、光の道筋の長さを暗室で測定した。この時溶液の温度は14度だった。

<実験 II >

濃度と光の道筋の長さの関係を調べた。精製水にカオリンの濃度が0.2 g/Lから2.0 g/Lまで0.2 g/L刻みになるように溶液を作り光の道筋の長さを暗室で測定した。カオリンとは水に入れても半径が変わらない粘土鉱物である。この時溶液の温度は13度だった。

<実験 III >

粒子半径と光の道筋の長さの関係について調べた。精製水に牛乳を質量パーセント濃度が0.2%から2.0%まで0.2 %刻みになるように入れたコロイド溶液を作り、光の道筋の長さを暗室で測定した。溶液の温度は14度だった。粒子半径はそれらの溶液の粘度を粘度計を用いて、作動させてから1分後の値を測定し、アインシュタインストークスの式に代入して求めた。拡散係数Dには、 $1.0 \times 10^{-11} \sim 1.0 \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$ を代入し、絶対温度Tには、287Kを代入した。

$$r = \frac{k_B T}{6\pi\eta D}$$

D: 拡散係数($[\text{m}^2/\text{s}]$)
 k_B : ボルツマン定数
 T: 絶対温度($[\text{K}]$)
 η : 流体の粘性係数($[\text{Pa} \cdot \text{s}]$)
 r: 粒子の半径($[\text{m}]$)

図2 アインシュタインストークスの式

<実験IV >

粒子半径と光の道筋の長さの関係について調べた。<実験 III >と同様に精製水に牛乳を質量パーセント濃度が0.2%から2.0%になるように入れたコロイド溶液を作り光の道筋の長さを暗室で測定した。粒子半径はそれらの溶液の粘度を粘度計を用いて、作動させてから5分後の値を測定し、アインシュタインストークスの式に代入して求めた。溶液の温度は溶液ごとに測定した。

3 実験結果

<予備実験 >

0.5 %、1.0 %のどちらも温度による大きな違いは見られなかった。

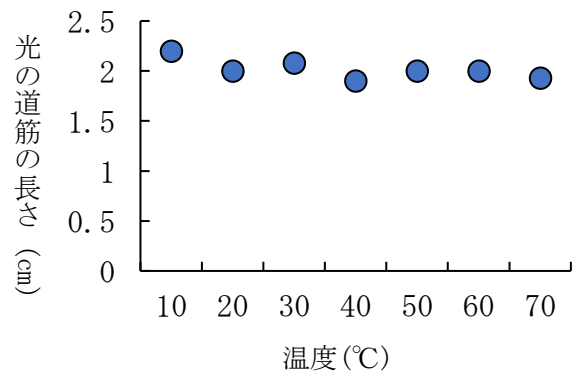


図3 溶液の温度と光の道筋の長さの関係 (濃度 0.5 %)

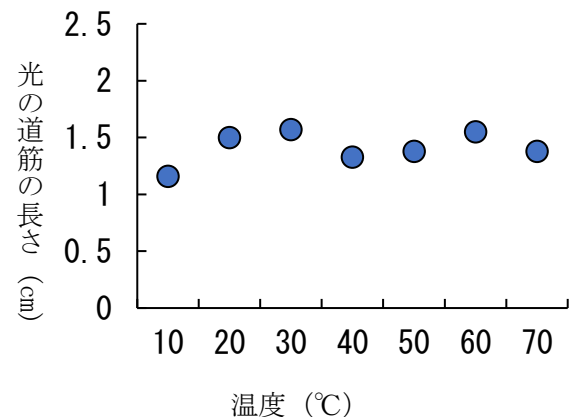


図4 溶液の温度と光の道筋の長さの関係 (濃度 1.0 %)

<実験 I >

質量パーセント濃度が大きくなるにつれ

光の道筋の長さは短くなった。また、0.2%、0.4%のときの光の道筋の長さが同じなのは光が容器を通り抜けたためである。

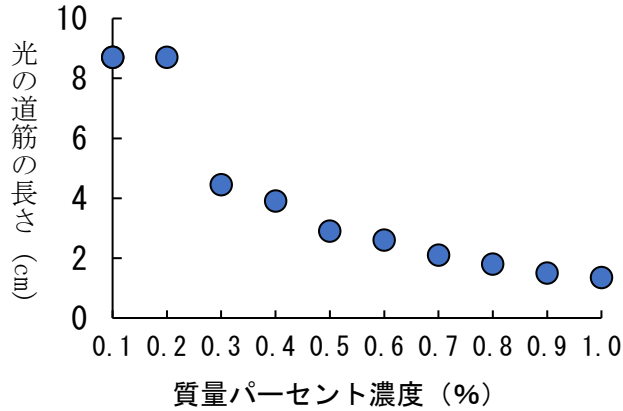


図5 溶液の質量パーセント濃度と光の道筋の長さの関係

<実験II>

濃度が大きくなるにつれて光の道筋の長さは短くなった。

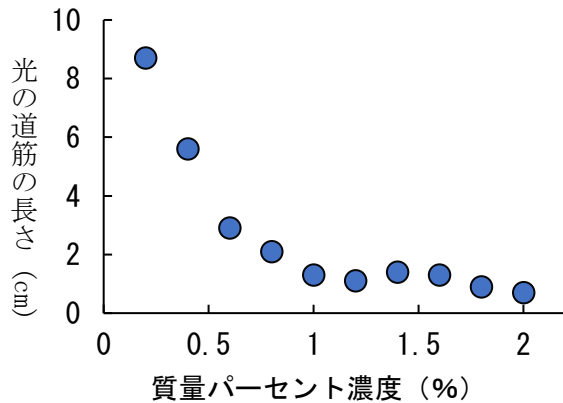


図6 溶液の濃度と光の道筋の長さの関係

<実験III>

粒子半径と光の道筋の長さには相関は見られなかった。

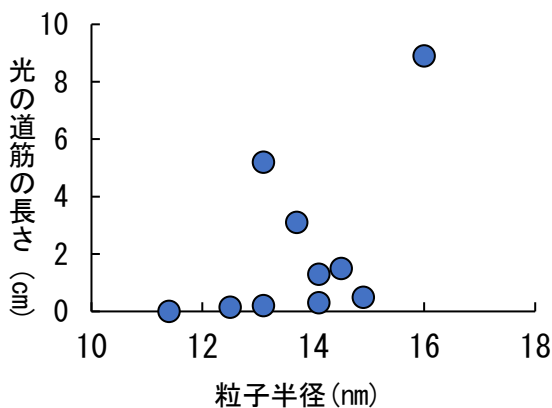


図8 粒子半径と光の道筋の長さの関係

<実験IV>

粒子半径が71nm、75nmのとき光の長さは一番長くなった。粒子半径が71nm、75nmに近づくとつれて光の道筋の長さが長くなっており、それより大きくなっていくと短くなっている。

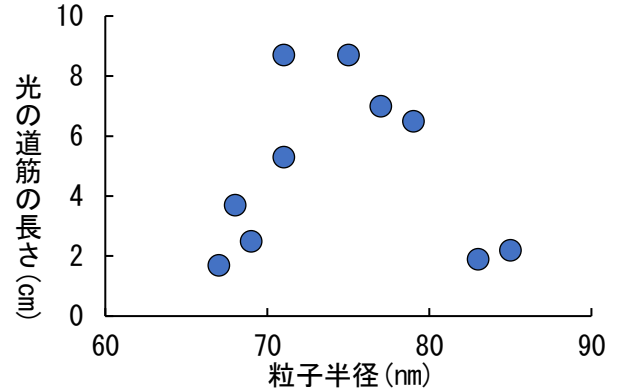


図8 粒子半径と光の道筋の長さの関係

4 考察

<予備実験>

溶液の温度による光の道筋の長さの違いはないと考えた。また、暗室と化学実験室では、光の道筋の長さの見え方が変わり、化学実験室のほうが光の道筋の長さが短くなると分かった。そこでより正確に測定するため、<実験I>、<実験II>、<実験III>では暗室で測定した。

<実験I>

質量パーセント濃度が高くなるほどコロイド粒子の数も多くなっていくため、光を散乱させすぎてしまい、光が遠くまで届きにくい傾向があると考えた。しかし、濃度を変えると粒子半径も変わってしまうため、対称実験と不十分であると分かった。

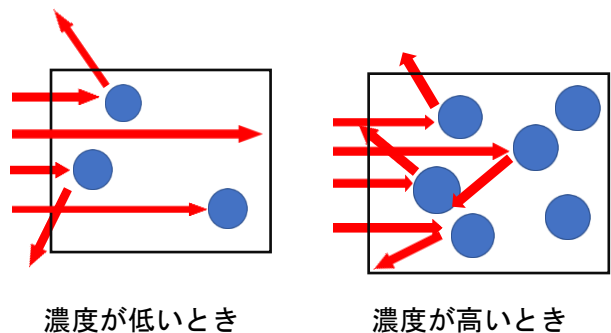


図9 濃度による光の散乱の仕方の違い

<実験Ⅱ>

光の道筋の長さは濃度が高くなるにつれて短くなり、<実験Ⅰ>の結果とグラフが類似していることから、光の道筋の長さは粒子半径よりも、コロイド粒子の数に関係しているのではないかと考えた。しかし、完全に一致しているわけではないことから粒子半径にも少し関係があると考え、<実験Ⅲ>を行った。

<実験Ⅲ>

粘度計を作動させてから1分後の粒子半径と光の道筋の長さにあまり関係がないと考えた。しかし、<実験Ⅲ>を行っているときに、粘度の値が1分間の間に大きく変化していることに気づいた。そこで、<実験Ⅳ>では、粘度の値が安定した、5分後の粘度の値を計測して行った。

<実験Ⅳ>

粒子半径が大きいときは、赤色レーザーがコロイド溶液に入射してすぐに光が滞ってしまい、粒子半径が小さいときは、光の散乱が少なく光の筋を目視で確認しにくくなるため光の道筋の長さが短くなったのではないかと考えた。(図10)そこで、光の道筋の長さを最大にするために最適な粒子半径が存在する可能性があると考えた。

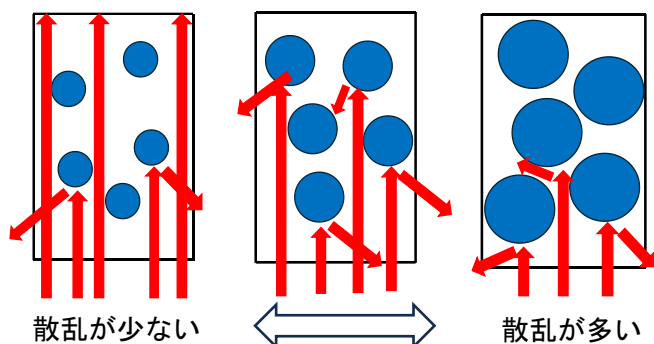


図10 粒径による光の散乱の仕方の違い

5 結論

チンダル現象における光の道筋の長さはコロイド溶液の濃度とコロイド粒子の半径に関

係がある。コロイド溶液の濃度が高くなるにつれて、光の道筋の長さは短くなる。また、光の道筋の長さが最大になるために最適なコロイド粒子の半径が存在する可能性がある。

6 謝辞

金沢工業大学坂本様から研究手法についてご助言をいただきました。感謝申し上げます。

7 参考文献

本山楓真, 長尾伊真, 各務凌. ” ペットボトルライトにおける濃度と照度の関係”. 岡山県立倉敷天城高等学校普通科2年次生課題研究論文集. 令和5年, p. 13-14.

様々な化学物質による粘菌の行動の変化

班員奥井 悠太、川下 瑞暉、関 陽向、竹端 ひかり
担当教諭 小林 広典

キーワード：粘菌、変形菌、選好性、忌避物質、誘引物質

Slime molds are organisms involved in maintaining ecosystem diversity and are known to exhibit intelligent behavior. In this study, experiments using oranges were conducted based on the hypothesis that they respond to odors. The results showed that slime molds approached the oranges in 10 out of 11 trials. Conversely, citric acid was avoided, and no clear response was observed to glucose. These findings suggest that slime molds may prefer another component contained in oranges.

1 はじめに

粘菌は、真核生物に属する生物のグループである。粘菌は、かつてその孢子形成や外見的特徴から菌類と扱われていたが、分子系統解析の進展により、菌類とは系統的に異なる進化的背景をもつ原生生物であることが明らかとなった⁽³⁾。粘菌は分類学的にも生物学的にも特異な位置づけにあり、単細胞生物と多細胞生物の境界を考える上で重要な研究対象となっている。粘菌の生活環はきわめて特徴的である。通常はアメーバ状の単核細胞として生活するが、環境条件が変化すると細胞融合を起こし、多数の核を含む巨大な変形体を形成する。この変形体は、細胞膜によって区切られた個体の集合ではなく、一つの連続した細胞質空間を共有する単一の細胞として振る舞う。変形体は土や落ち葉の表面を移動しながら細菌や有機物を捕食し、環境中の栄養資源を効率的に探索する能力を示す。粘菌は神経系や脳といった中枢的制御機構を持たないにもかかわらず、環境に応じた適応的行動を示す。例えば、餌資源の配置に応じて管状構造からなるネットワークを形成し、資源輸送の効率を高めることが報告されている⁽⁵⁾。このネットワークは、単なる物理的拡散の結果ではなく、環境条件に応じて動的に再構成される点において、高度に組織化された挙動といえる。近年、こうした粘菌の行動は、生物学的現象としてのみならず、自己組織化、分散型情報処理、適応システムといった観点から

も注目を集めている。例えば、図1のようにスタートとゴール地点に餌を設置すると、粘菌の目的地の間を最短で移動する性質を利用して、迷路の最短経路を発見することができる⁽⁴⁾。

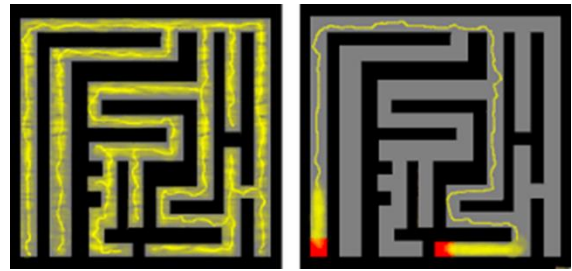


図1 情報処理モデルとしての粘菌

粘菌における行動決定は、個々の細胞や核が独立して判断するのではなく、細胞質流動や化学物質の濃度勾配などを介した局所的相互作用の積み重ねによって実現されていると考えられている⁽⁴⁾。このような仕組みは、生物における「知性」や「意思決定」の定義を再考する上で重要な示唆を与える。しかしながら、粘菌の示す適応的行動が、どのような物理的・化学的過程によって支えられているのかについては、未だ十分に解明されていない。特に、環境情報が変形体内部でどのように伝達・統合され、形態変化や運動として発現するのかという点は、現在も活発に研究が行われている課題である。

○目的

本研究では、様々な化学物質による粘菌の行動の変化に着目して様々な化学物質に対する粘菌の嗜好性について調べた。本研究を通じて、原生生物である粘菌が示す秩序だった行動の基盤を明らかにするとともに、単純な構成要素から様々な機能が作り出される生物の普遍的原理について理解を深めることを目指す。

2 研究内容

実験1(材料・方法)

オレンジ・シトラス・レモン・クミン・シナモン、ラムネを用いた。

寒天末と水を3:200の割合で混ぜて作成した。粘菌が実験対象(オレンジ、レモン、クミン、シナモン、シトラス)に対してどのような方向に動くかを観察するために培地の中央に粘菌を置き、端に実験対象を配置した(図2)。

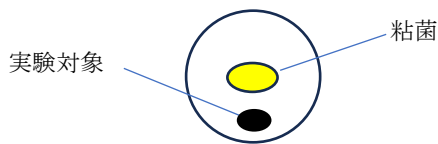


図2 培地の模式図
(中央に粘菌、端に実験対象を置き、その後の動きを見た。)

23℃の暗所で一日培養し、翌日に粘菌がどのように動いたかを記録した。粘菌は20℃~25℃で生育しやすいため、その間の23℃に設定した。1日だけ培養したのは、粘菌を同じ培地で培養し続けると培地内の環境が悪くなりカビや雑菌が増え、そのために粘菌が弱り、移動が少なくなることを防ぐためである。実験を行わない日は寒天培地を新しいものに変え、粘菌の餌であるオートミールを置き、同じ条件で培養した。試行回数はそれぞれの実験対象(オレンジ、レモン、クミン、シナモン、シトラス)で4回ずつであった。

実験1(結果)

○個々の結果

オレンジではすべての試行で粘菌がオレンジ

ジに完全に覆いかぶさった(図3)。シトラスでは粘菌はシトラスに接しているが、覆いかぶさることはなかった(図4)。また、レモンでは覆いかぶさる場合とかぶさらない場合の両方が見られた(図5)。シナモンでは粘菌はシナモンのある側に移動せず、すべての場合でシナモンから遠ざかった(図6)。クミンでは粘菌は対象に接することはあったが、覆いかぶさることはなかった(図7)。ラムネではラムネが溶け出し、粘菌が動けなくなった(図8)。

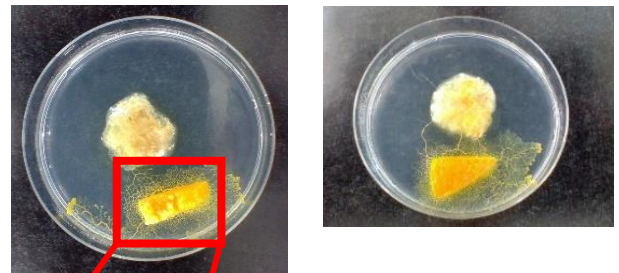


図3 粘菌のオレンジに対する行動

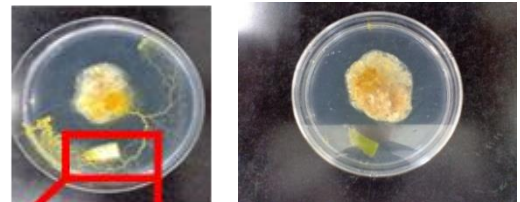
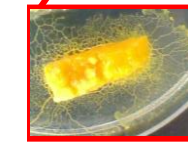


図4 粘菌のシトラスに対する行動

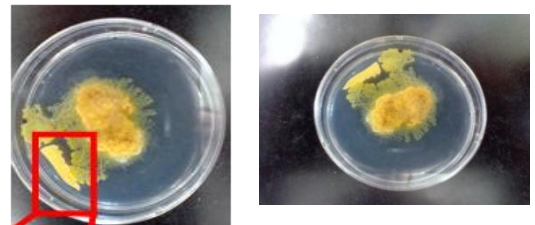


図5 粘菌のレモンに対する行動



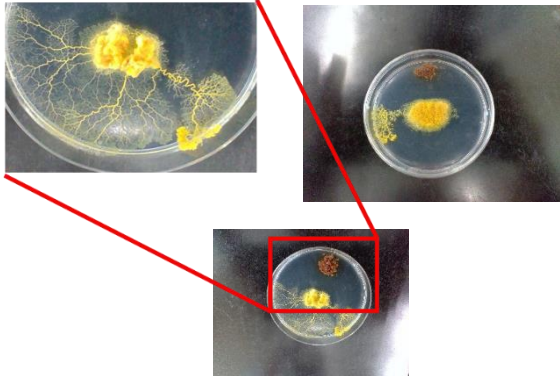


図6 粘菌のシナモンに対する行動

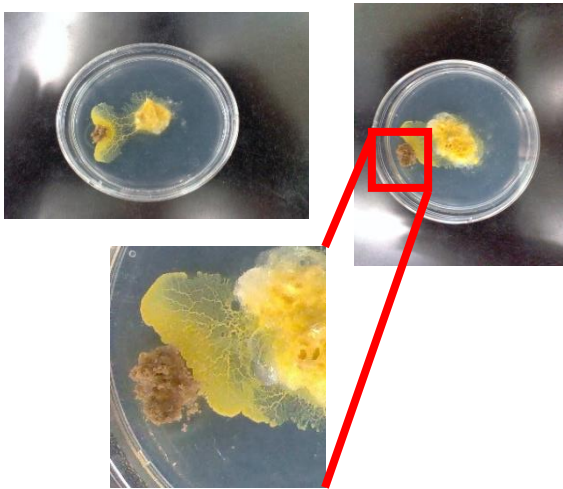


図7 粘菌のクミンに対する行動



図8 粘菌のラムネに対する行動

○実験1の結果のまとめ

オレンジ、レモン、クミンの場合は粘菌はそれらに近づいた。一方、シナモンでは粘菌は遠ざかった。シトラスでは近づいたものと、遠ざかったものと動かなかったものがあった。

ラムネの実験ではラムネが寒天培地に溶け出して、培地上の水分が多くなり、粘菌が動かず、実験がうまくいかなかった。

○考察

オレンジ、レモン、クミンに近づいたことか

ら、これらには粘菌が好む化学物質が含まれていると考えられる。一方で、シナモンから遠ざかったことから粘菌にとって有害な化学物質がシナモンに含まれている可能性がある。ラムネが溶け出した場合は、培地の状態が変化したため、正確な実験結果が得られないと考えられる。

実験2(材料・方法)

オレンジとレモンに共通して含まれる物質で比較的簡単に手に入れることができるクエン酸とブドウ糖を使って実験を行った。クエン酸0.5g、ブドウ糖1.25gを用いた。培地を縦1.0cm、横1.5cmの楕円形にくりぬいた部分に実験対象(クエン酸、ブドウ糖)を配置した。これにより、実験対象が培地に溶け出して培地上の水分量が増えることを防ぎ、正確に実験結果が得られるようにした。

○結果

クエン酸はすべての試行で遠ざかり、ブドウ糖は近づいた、遠ざかった、動かなかった、それぞれの試行が2回ずつだった(図11)。クエン酸では置かれた場所から真逆の方向に動いた。



図9 クエン酸とブドウ糖の実験前の粘菌の様子

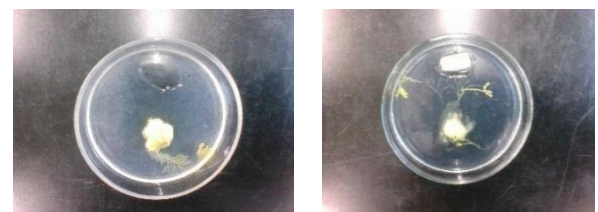


図10 クエン酸とブドウ糖の実験結果

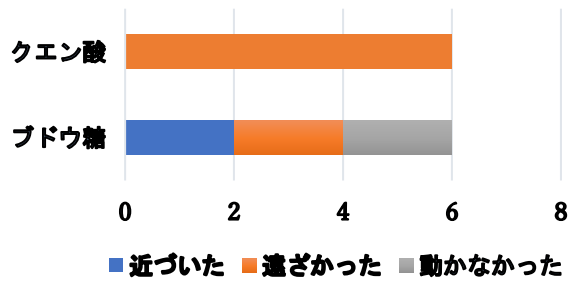


図11 クエン酸とブドウ糖の実験結果のグラフ

○考察

- ・溶けだしたことが原因である可能性

粘菌はブドウ糖に対してもクエン酸に対しても積極的に近づかなかった。これはいずれの実験対象も寒天培地に溶け出したことが原因であると考えられる。実験対象が寒天培地に溶け出すと、粘菌が急激な環境の変化に反応し、実験対象に対して遠ざかった可能性がある。実験1のラムネの実験では実験対象が寒天培地内に溶け出し、粘菌が動かなかったため、結果を得ることができなかった。動けなくなったのは培地に実験対象が溶け出したことで培地内の浸透圧が変化したためだと考えた。

- ・粘菌がほかの物質を好む可能性

実験2では粘菌がクエン酸から遠ざかる行動が見られ、ブドウ糖では様々な行動が見られた。このことから、ブドウ糖やクエン酸以外の成分に粘菌が誘引されているのではないかと考えた。そこで、実験1で粘菌が近づいた、レモン、オレンジ、クミンの3つに共通する成分を調べたところ、この3つにはビタミンB6と食物繊維が含まれていると分かった。これらの成分が粘菌の誘引に関係しているのかもしれない。

3 今後の課題

実験対象が培地内に溶け出すことにより、粘菌が動けなくなったり、正確な結果が得られなくなったりすることを防ぐために、培地の水分量を調節して粘菌の行動を阻害せずに実験を行う。培地の濃度のみを変化させた実験を行い、粘菌にとって適切な濃度を見つける。また、ブドウ糖とクエン酸の実験の試行回数を増やし、これら二つ以外の

成分でも実験を行う必要がある。

4 参考文献

(1) 中垣俊之. かしこい単細胞 粘菌. 福音館書店出版, 2015, 40p.

(2) チョボいち. “粘菌の飼い方”. 南方熊楠記念館. 2026-08-27.

<https://www.minakatakumagusukinenkan.jp/2020/11/23/10938>

(3) National Park Service. “Slime Molds”. 2020

<https://www.nps.gov/articles/000/slime-molds.htm>

(4) リケラボ. “異例のイグ・ノーベル賞2度受賞「かしこい単細胞」粘菌の驚きの行動を明らかにし、知性の本質に迫る中垣俊之教授”. 2022-08-19

<https://www.rikelab.jp/post/3252.html>.

(5) 世界の顔 “「仮想粘菌」を使用して混乱しにくい地下鉄ネットワークを設計する”. 2022

<https://jacyou.com/science/akemi/news/2022-01-virtual-slime-mold-subway-network.html>

ワキン (*Carassius auratus*) と デメキン (*Carassius auratus auratus*) の 嗅覚の違いについて

班員 岡部 天音、福島 充希子、藤本 雅妃、本多 祐喜
担当教諭 合田 怜史

キーワード：グルタミン酸ナトリウム、忌避行動、警報物質、嗅球、嗅神経

To reveal the difference in the sense of smell between Wakin(*Carassius auratus*) and Demekin(*Carassius auratus auratus*), we examined their responses to a monosodium glutamate solution (MSGS) and an alarm substances taken from zebrafish. In MSGS, Demekin exhibited more pronounced behavioral differences than Wakin. In alarm substances, Demekin tended to move a longer distance. This suggests that Demekin have a better sense of smell than Wakin.

1 はじめに

キンギョは、コイ科フナ属に属する小型の淡水魚であり、フナ類を原種として長期間にわたる品種改良によって多様な形質が形成されてきた代表的な観賞魚である。現在では体型や色彩、眼の形態などに大きな違いをもつ多くの品種が存在する。ワキンとデメキンはその中でもよく知られた代表的な金魚の品種である。ワキンはフナの体型に近い流線型が特徴であり、デメキンは眼球が外側に大きく突出していることが特徴である。魚類の嗅覚情報は、鼻腔内に存在する嗅球でにおい物質を受容し、その信号が嗅神経を通過して脳へと伝達される。一般的に嗅球が大きく、嗅神経が太い動物ほど嗅覚が優れていると言われている(P Ioalé¹, F Papi “Olfactory bulb size, odor discrimination and magnetic insensitivity in hummingbirds “, 1989)。

デメキンはワキンよりも視野が狭く、視力が弱い可能性があることが報告されている(東京農業大学第一高等学校「デメキンの視力に関する研究」, 2025)。キンギョは採餌行動の際、視覚や嗅覚などを利用している。このことから、視覚への依存度が低いデメキンの方が、ワキンよりも嗅覚が優れてい

ると予想した。本研究では、両品種の嗅覚能力を比較し、どちらの嗅覚がより優れているかを明らかにすることを目的とした。

2 実験

【実験1】

グルタミン酸ナトリウムに対する行動の観察
<材料>

- ・ワキン
- ・デメキン
- ・Y字型のトンネル (ペットボトルで作成)
- ・グルタミン酸ナトリウム
- ・蒸留水
- ・水槽 (600mm×910mm×205mm)
- ・注射器
- ・魚網

<方法>

水槽の中にY字型のトンネルを設置し、キンギョを①に魚網で留めた(図1)。無作為に選んだ分岐した片方にグルタミン酸ナトリウム水溶液10mLを投入し、それと同時にキンギョを解放した。その後、1分間キンギョが「溶液ありの方向」または「溶液なしの方向」のどちらに進んだかを記録した。1分間でどちらにも動かなかった場合は「どちらにも進まなかった」と記録した。グルタミン酸ナトリウムは金魚の

餌の主な成分となる物質であるため、金魚が好むにおいと考え、使用した。グルタミン酸ナトリウムの濃度は0.1%、1.0%、10%の3種類とした。

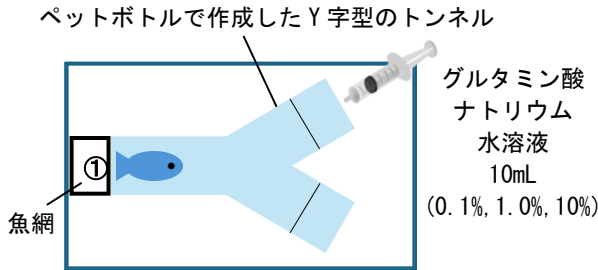


図1 実験装置の概略図
Y字型のトンネルにキンギョを入れ、グルタミン酸ナトリウム水溶液に反応するかを記録した。

<結果>

ワキンが進んだ方向の割合は異なる濃度間で有意に異なった(図2)。デメキンが進んだ方向の割合も異なる濃度間で有意に異なった(図3)。濃度0.1%では、ワキンが溶液ありの方向に進んだ割合は9%、デメキンが溶液ありの方向に進んだ割合は27%となり、デメキンが溶液ありの方向に進んだ割合が有意に大きくなった(p<0.05, カイ二乗検定)。濃度1.0%では、ワキンが溶液ありの方向に進んだ割合は22%、デメキンが溶液ありの方向に進んだ割合は44%となり、デメキンが溶液ありの方向に進んだ割合が有意に大きくなった(p<0.05, カイ二乗検定)。濃度10%では、ワキンが溶液ありの方向に進んだ割合は0%、デメキンが溶液ありの方向に進んだ割合は8%となり、どちらのキンギョも溶液ありの方向に進まない傾向がみられた。

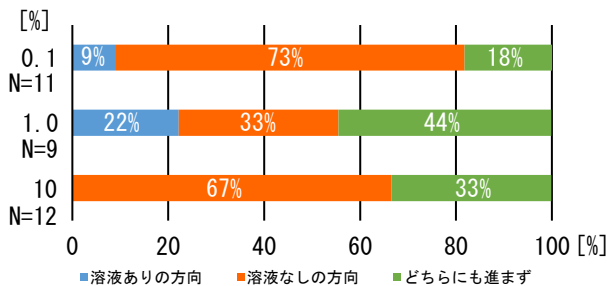


図2 ワキンが進んだ方向の割合

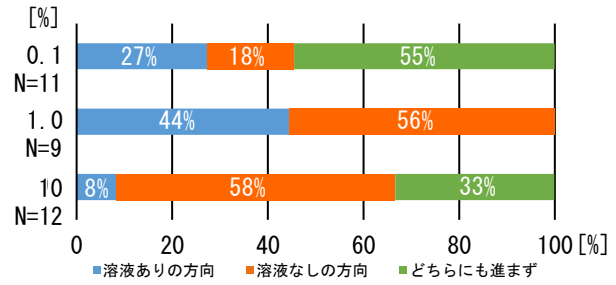


図3 デメキンが進んだ方向の割合

<考察>

各濃度においてデメキンの方がワキンより溶液ありの方向に進んだことから、デメキンの方がワキンより嗅覚を使って行動を決定している可能性があると考えられる。また、両種とも濃度1.0%のグルタミン酸ナトリウム水溶液に最も強く反応したことから、キンギョの好みの濃度が存在する可能性があると考えられる。また、いずれの濃度、種においても溶液なしの方向に進んだ個体やどちらの方向にも進まなかった個体の割合の方が高かったことから、実験条件に問題があった可能性が考えられる。

【実験2】

警報物質に対する行動の観察

<仮説>

出目金の方がワキンより強い忌避行動を示す。

<忌避行動とは>

忌避行動は危険なものを避けようとする行動であり、傷ついた魚から放出された警報物質を他の魚が受け取ることで起こる。警報物質は、同種や近縁種の魚に危険が迫っていることを知らせる化学物質である。典型的な忌避行動の流れは、まず急激な方向転換を繰り返しながらでたために泳ぐ、ダーティングと呼ばれる行動をした後、動きを止めて水底に静止する、フリージングと呼ばれる行動を行う。

<材料>

- ・ワキン
- ・デメキン
- ・ゼブラフィッシュの鱗から採取した警報物質

- ・水槽 (287mm×488mm×327mm)
- ・マイクロピペット
- ・スマホ (カメラ機能を使用)
- ・カメラスタンド

<方法>

ゼブラフィッシュは、ゼブラフィッシュから採取した警報物質に対して最も強い忌避行動を示す。キンギョもゼブラフィッシュの近縁種であるため、ゼブラフィッシュから採取した警報物質を使用した。

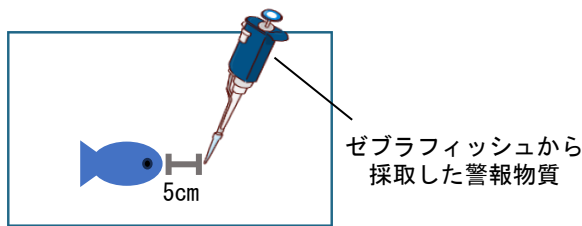


図4 実験2の様子。
離れた場所にマイクロピペットで警報物質を投入した。

ゼブラフィッシュの鱗から採取した警報物質を百倍、千倍、一万倍、十万倍に希釈し、キンギョから約5cm離してマイクロピペットで投入した(図4)。その後3分間キンギョが動いた1秒ごとの距離と移動した距離の合計をそれぞれ記録した。キンギョの泳ぐ深さが変わると移動した距離を正確に測ることができないため、ワキンは水5Lが入った水槽、デメキンは水7Lが入った水槽で実験を行い、キンギョが泳ぐ深さを制限した。水の量に合わせて、ワキンは500μL、デメキンには700μLの希釈した警報物質を投入し、濃度をそろえた(図5)。また、コントロールとして蒸留水で同様に実験を行った。

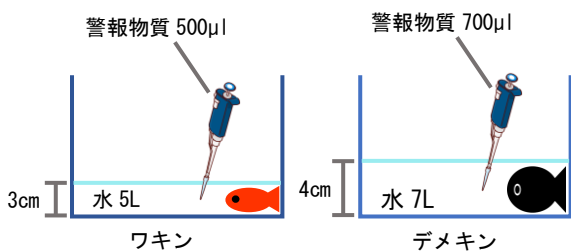


図5 実験2の様子。
ワキんとデメキンの体サイズに合わせて水深を調整した。

<結果>

濃度が低くなるにつれ、ワキンの動いた距離の平均は短くなり、デメキンの動いた距離の平均は長くなる傾向がみられた(図6)が、有意差は見られなかった(p<0.05, カイ二乗検定)。

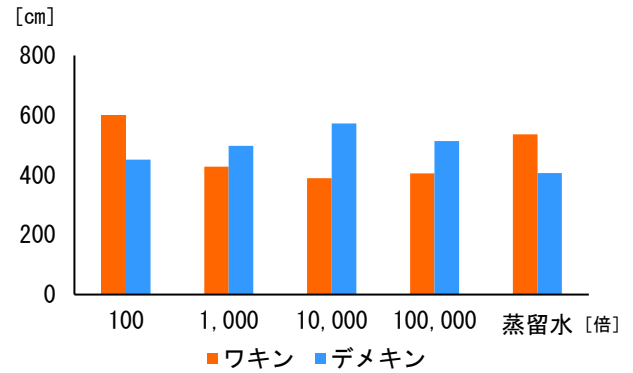


図6 3分間にキンギョが進んだ距離の平均

<考察>

ワキんとデメキンで警報物質に対する反応に違いはないと考えられる。しかし、実験中にダーティングやフリージングといった忌避特有の行動が見られず、ゼブラフィッシュから採取した警報物質に対して忌避行動を示さない可能性も考えられる。そのため、実験方法を考え直す必要がある。

【脳の形態的な観察】

<仮説>

デメキンのほうが嗅球が大きく、嗅神経が太い

<材料>

- ・ワキンの死骸 (冷凍保存)
- ・デメキンの死骸 (冷凍保存)
- ・撮影機能付き実体顕微鏡
- ・解剖用具 (メス、ピンセットなど)

<方法>

冷凍保存されたキンギョを室温で解凍し、頭部を切開して脳を露出させ、撮影機能付き実体顕微鏡で嗅球と嗅神経の形態を観察して撮影を行った。撮影した画像から、嗅球の長径と短径、嗅神経の幅を測定した。

<結果>

デメキンでは、嗅球及び嗅神経を明確に確認することができた。右嗅球の長径は190μm、短

径は69 μm であり、左嗅球の長径は207 μm 、短径は62 μm であった。また、嗅神経の幅は119 μm であった。これに対し、ワキンでは水分が失われ、組織が崩壊していたため、嗅球及び嗅神経の確認はできなかった。

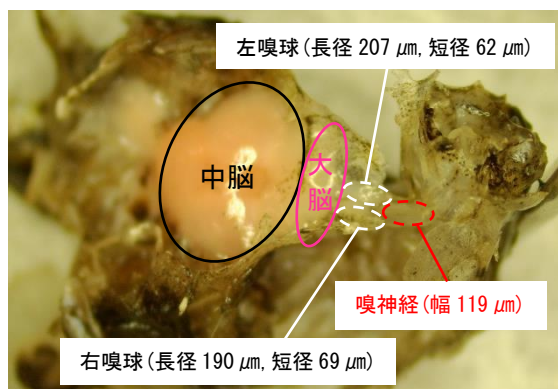


図6 解剖後のデメキンの頭部の写真



図7 解剖後のワキンの頭部の写真

この結果から、保存状態が観察結果に大きく影響することが示唆された。今後は、より適切な保存方法を検討する必要があると考えられる。

3 結論

デメキンの方がワキンより嗅覚が優れていることが示唆された。

4 今後の展望

以下の3つの実験を行いたいと考えている。

○嗅覚を一時的に失わせた状態での実験

熱した針を金魚の鼻孔の中に入れ、一時的に嗅覚機能を失わせる。その状態で実験1と同様に、グルタミン酸ナトリウムへの反応を調べる。この実験を行うことで、金魚のグルタミン酸ナトリウムへの反応にどれほど嗅覚が影響して

いたのかを明らかにできると考えられる。

○金魚から採取した警報物質に対する忌避行動の観察

実験2より両品種とも、ゼブラフィッシュから採取した警報物質に対して忌避行動を示さない可能性がある。そのため、両品種間の忌避行動の違いを比較するためには、実験対象と同種の魚から採取した警報物質を使用する必要があると考えられる。金魚の警報物質を使用することで、より明瞭な忌避行動を確認できることが期待できる。また、警報物質は、キンギョの死骸の鱗から採取しようと考えている。

○両品種間の嗅球と嗅神経の比較

キンギョの死骸の保存方法の見直しを進めるとともに、解剖するキンギョの個体数を増やし、両品種間の嗅球の大きさや嗅神経の太さの比較を行う。また、より精密な画像解析を用いて、嗅球が脳に対して占めている割合の比較も行いたい。

5 謝辞

本研究を行うにあたり、金沢大学竹内様の、ゼブラフィッシュの警報物質の提供・研究手法の助言等、多くのお力添えをいただきました。厚く御礼申し上げます。

6 参考文献

- (1) 理化学研究所. “魚の嗅覚警報物質を発見.” 理化学研究所. 2024-02-29.
https://www.riken.jp/press/2024/20240229_1/index.html, (参照2025-12-27).
- (2) 山下航平, 佐藤智恒, 畑中佑心, 青柳祐玖. デメキンの視力に関する研究. 日本水産学会. 2005, 91, 5, 467.

気泡緩衝材の緩衝性能の測定と比較

班員 太田 皆美、関軒 康太郎、町岡 優真、室峰 充希
担当教諭 木下 和也

キーワード：気泡緩衝材、緩衝性能、力センサ、粒径、粒高

In this study, a basketball was dropped onto bubble wrap placed on a force sensor, and the reduction in force applied to the force sensor was measured. The results showed the greater the thickness of the bubble wrap between the drop point and the force sensor, the higher the cushioning performance.

1 はじめに

気泡緩衝材とは、表面に多数の気泡を持つ緩衝材である。気泡がクッションとなって外部からの衝撃を吸収し分散させることで、内容物を保護する。気泡緩衝材は粒の大きさ、形、色などで様々なタイプの製品があり、用途による使い分けが推奨されている。

気泡緩衝材の圧縮・引張に対する耐久性は調べられているが、衝撃に対する性能は明らかではない。本研究では、衝撃によってかかった力のうち、気泡緩衝材によってどれだけの力が吸収・分散されるかを「緩衝性能」と定義し、タイプの異なる気泡緩衝材の緩衝性能を定量的に測定し比較することで、より緩衝性能を高くする方法を見つけることを目的に実験を行った。

実験では、株式会社ナリカ製の「ワイヤレスフォースプレートセンサGDX-FP（以下力センサ）」と連携アプリケーションの「Vernier Graphical Analysis」を使用した。

2 予備実験

〈方法〉

図1に実験装置の構成を示す。平らな床に力センサを設置し、同じ種類の気泡緩衝材を0～10枚までその上に重ねた。1.5mの高さからバスケットボールを落下させ、かかった力の最大値を緩衝材の枚数別に10回ずつ測定した。測定間隔は0.2秒に設定した。測定値の近似直線から、

枚数と力の関係を求めた。

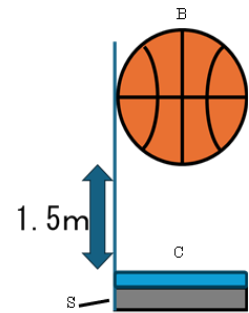
〈結果〉

気泡緩衝材の枚数 x と力センサに記録された力 F の関係は

$$F = -0.7585x + 219.21$$

で近似された(図2)。

これより、気泡緩衝材を1枚追加するごとにかかった力は約0.76N減少することがわかった。しかし、データのばらつきが大きかった。



B: バスケットボール
S: 力センサ
C: 気泡緩衝材

図1 予備実験の装置の概要

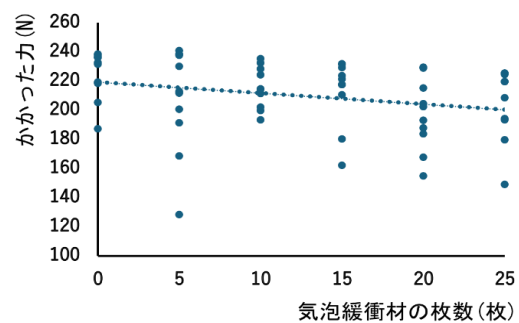


図2 予備実験の結果(n=10)。気泡緩衝材を1枚追加するごとにかかった力は約0.76N減少した。

〈考察〉

緩衝性能が枚数に比例するのは、面積当たりの気泡の個数が多くなるほど吸収できるエネルギーが大きくなるためであると考えた。

データのばらつきが大きかったことから、0.2秒では、データの測定間隔が長く、かかった力の最大値を正確に測定できていない可能性があると考えた。

3 実験1

〈実験方法〉

図3に示す粒径、粒高の異なる3種類のプチプチ(小粒、標準粒、特大粒)を用いて、予備実験と同様の方法で実験を行った。より正確に測定するために、測定間隔を0.005秒に、測定回数を20回に変更し、20回の平均値を記録した。また、かかった力の最大値に加えて、力積も測定した。

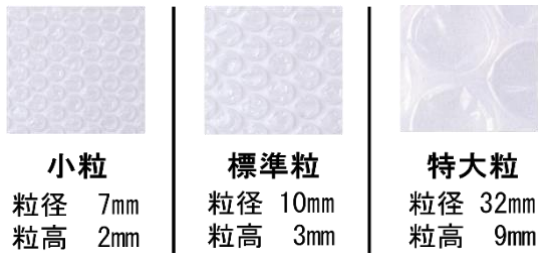


図3 実験1で使用したプチプチ。それぞれの粒の直径(粒径)と高さ(粒高)を表記した。

〈結果〉

かかった力の最大値は小さい順に特大粒、標準粒、小粒となった(図4)。また、小粒と標準粒の差の平均は3.5N、標準粒と特大粒の差の平均は7.0Nとなった。

力積も小さい順に特大粒、標準粒、小粒となった(図5)。また、小粒と標準粒の差の平均は0.091N・S、標準粒と特大粒の差の平均は0.081N・Sとなった。標準粒2枚の場合の力積は極端に低い数値となったので正確に測定できていないと考え除外した。

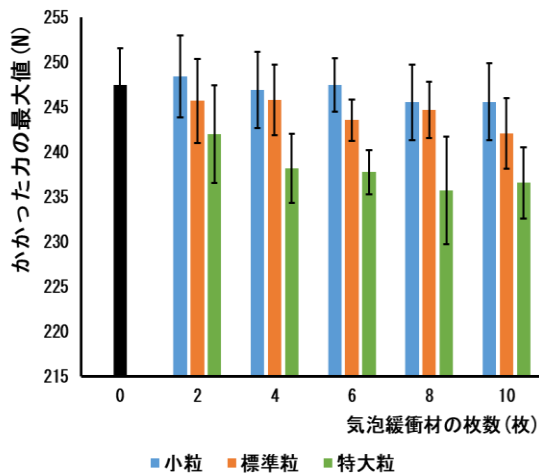


図4 3種類のプチプチのかかった力の最大値の平均値(n=20)。小さい順に特大粒、標準粒、小粒となった。

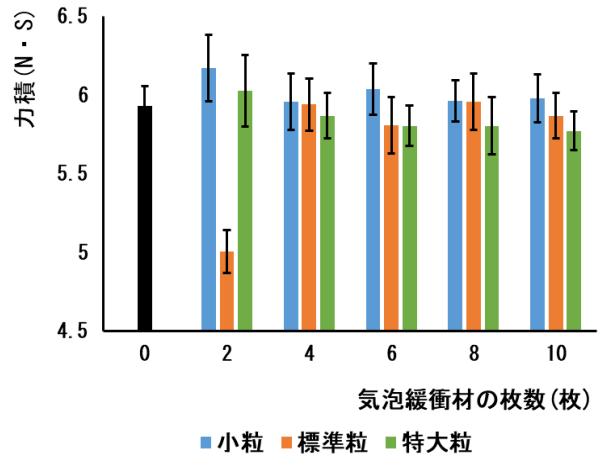


図5 3種類のプチプチの力積の平均値(n=20)。小さい順に特大粒、標準粒、小粒となった。標準粒2枚の力積は外れ値とした。

〈考察〉

2~10枚のそれぞれのときについて、プチプチの粒高とかかった力の最大値の相関係数を求めると平均して-0.98と強い負の相関があった。力積についても粒高との相関係数を調べると、-0.88と強い負の相関があった。これらのことから、粒高が大きいほど加わる力は小さくなる、つまり緩衝性能は高くなる考えた。

4 実験2

〈実験方法〉

緩衝性能と粒径の関係を明らかにするために、実験1で用いた3種類のプチプチを同じ厚さ(18mm)になるように重ね(図6)、実験1と同様に各種類20回測定した。

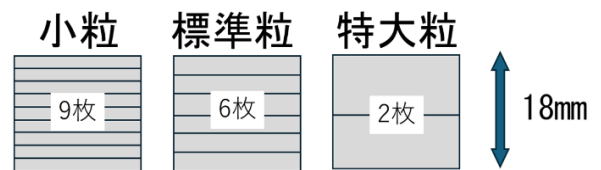


図6 3種類のプチプチの高さを18mmにそろえた図。小粒は9枚、標準粒は6枚、特大粒は2枚重ね

〈結果〉

かかった力の最大値は標準粒がほかの2種類よりも有意に大きくなった(p<0.05, HSD検定)(図7)。また小粒と標準粒の間では有意差がなかった。

力積も小さい順に特大粒、小粒、標準粒となった(図8)。また、標準粒と特大粒の間でのみ有意差があった(p<0.05, HSD検定)。

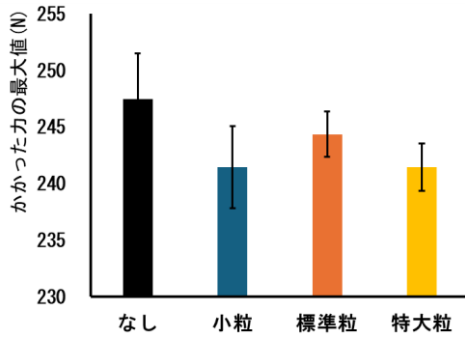


図7 厚さを18mmにそろえたときのかかった力の最大値の平均値 (n=20)。標準粒が最も大きく、次いで小粒、標準粒となった。

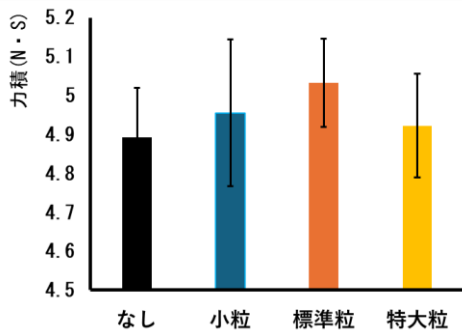


図8 厚さを18mmにそろえたときの力積の平均値 (n=20)。力積は標準粒が最も大きく、次いで小粒、特大粒となった。

〈考察〉

厚さを揃えたとき、小粒と特大粒の緩衝性能には有意差が見られなかったことから、粒径と緩衝性能の間には関係はないと考えた。

標準粒の緩衝性能が低くなったのは粒高・粒径以外の要因によるものではないかと考えた。

5 実験3

〈実験方法〉

粒が四角形で、バイオプラスチック素材でできたスパスパと、静電気対策素材でできたピンクプチという2種類の気泡緩衝材(図9)を、同じ厚さ(18mm)になるように重ね(図10)、実験2と同様に測定した。

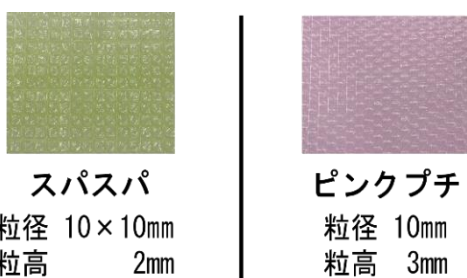


図9 実験3で使用したスパスパとピンクプチ。スパスパの粒は一辺が10mmの正方形。

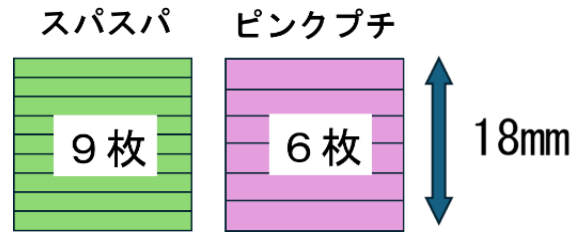


図10 実験3の模式図。実験3ではこのように各種のプチプチを重ね、高さを18mmにそろえた。

かかった力の最大値は、ピンクプチの方がスパスパよりも大きくなった(図11)が、有意差はなかった(p>0.05, HSD検定)。

力積も、ピンクプチの方がスパスパよりも大きくなった(図12)が、有意差はなかった。(p>0.05, HSD検定)。

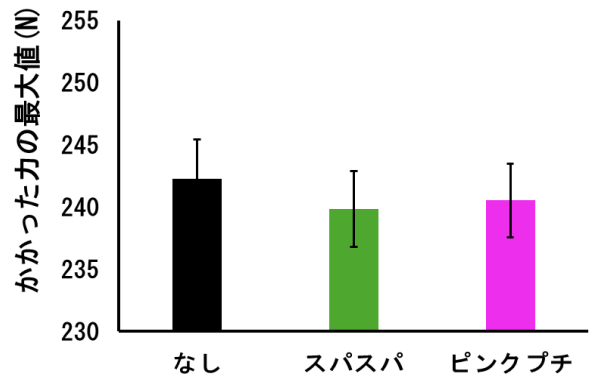


図11 実験3の結果(最大値) (n=20)。かかった力の最大値は、スパスパよりピンクプチの方が大きくなった。

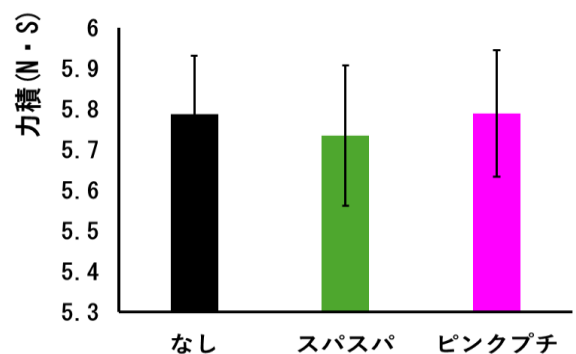


図12 実験3の結果(力積) (n=20)。力積はスパスパよりピンクプチの方が大きくなった。

〈考察〉

スパスパとピンクプチの間に有意差が見られなかったことから、素材や粒の形状は緩衝性能に影響しにくいと考えた。

6 実験4

緩衝材の厚さが緩衝材に強く影響するという結果から、厚さを揃えたとき、載せる順番を変えると緩衝性能は変化するのか調べた。

〈実験方法〉

実験1、2で使用した小粒と、新たに粒高7mm 粒径20mmの大粒を図13のように順番を変えて重ね、実験2と同様に実験を行った。

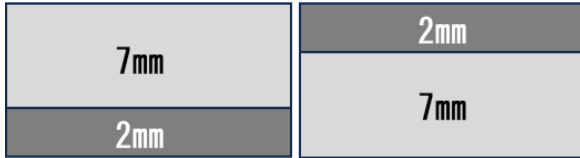


図13 実験4の模式図。示した(2mm+7mm)に加え、(3mm+7mm)、(2mm+3mm)についても実験を行った。左側が7mmを上、右側が2mmを上とした例。

〈結果〉

かかった力の最大値と力積どちらも、粒径の小さいプチプチを上にしたときのほうが小さくなった(図14から図19)が有意差はなかった($p > 0.05$, HSD検定)。

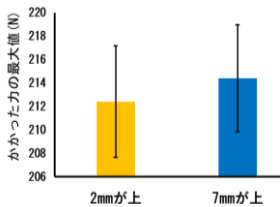


図14 2mm+7mmのかかった力の最大値の平均値(n=20)。

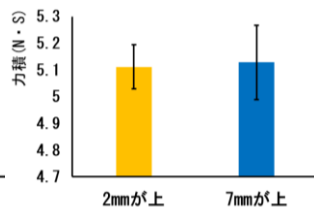


図15 2mm+7mmの力積の平均値(n=20)。

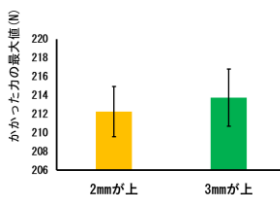


図16 2mm+3mmのかかった力の最大値の平均値(n=20)。

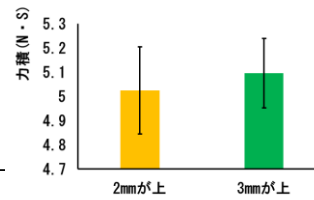


図17 2mm+3mmの力積の平均値(n=20)。

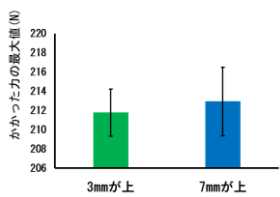


図18 3mm+7mmのかかった力の最大値の平均値(n=20)。

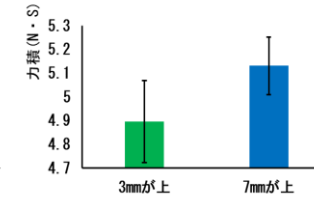


図19 3mm+7mmの力積の平均値(n=20)。

〈考察〉

粒径が小さいプチプチを上にしたときの方が高い緩衝性能を示した理由として、粒径が小さいプチプチを上にする事で、粒と粒の間にボールが落ちる可能性が低くなり、緩衝性能が高くなると考えた。

6 結論

ボールの衝突のような瞬間的な衝撃に対する気泡緩衝材の緩衝性能は、

- ・緩衝材の枚数(厚さ)に比例して高くなる。
- ・気泡緩衝材の素材や粒の形状によっても変化する。
- ・粒径の小さいタイプを外側にすると高くなる。

と考えられた。

7 謝辞

本研究を行うにあたり、プチプチの試料を提供してくださった川上産業株式会社様に厚く御礼申し上げます。また、金沢工業大学の坂本宗明先生に研究について助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

8 参考文献

1. 川上産業株式会社 “プチプチ総合カタログ” https://www.putiputi.co.jp/_assets/wp-content/uploads/2020/10/ptiputi-sogo.pdf 2025年11月10日参照。

微生物燃料電池の電流量が増加する条件について

班員 北口知樹 塩谷美喜 瀬口将哉 中山瑠璃花
担当教諭 釜谷智樹

キーワード：微生物燃料電池、マッドワット、糖、電気泳動

The effect of different types of sugar on the amount of electric current produced was investigated. Three kinds of sugar—glucose, maltose, and cellulose—were added. PCR analysis for *Geobacter* and *Shewanella* was also performed to examine the relationship between bacterial growth, the types of sugar, and the amount of electric current.

1 はじめに

現在再生可能エネルギーとして注目されている技術の一つに、微生物燃料電池がある。微生物燃料電池は、微生物が有機物を分解する際に行う代謝反応を利用して電気エネルギーを直接取り出す装置である。微生物はエネルギーを得るために有機物を酸化し、その過程で電子を放出する。通常、この電子は細胞内で利用されるが、微生物燃料電池では微生物が放出した電子を電極に移動させ、回路を通すことで電流として回収する。现阶段では微生物電池の発電出力は小さく、大規模な発電装置として利用することは難しい。その原因として、微生物から電極への電子移動効率の低さや、電極材料の性能、装置構造の最適化が十分でないことなどが挙げられる。また、発電に関与する微生物の種類によっても性能が大きく左右されることが知られている。本研究では、日常使いできるような微生物燃料電池を作ることを目的とした。

2 〈実験1〉 糖の添加による電流量の違い

先行研究より、糖とタンパク質では糖がより電力を増加させたため、実験1では糖に着目し、糖の種類による電流量の違いを調べることを目的とした。糖として単糖類のグルコース、二糖類のマルトースを用い、異なる種類での電流量の変化を見た。

〈方法〉

本実験ではマッドワットを使用した。マッドワットとは、泥や土壌中の微生物の代謝活動を利用して、有機物に含まれるエネルギーを電

気エネルギーに変換する装置である。三つのマッドワットに御祓川から採集した土300gを加えて、一つ目にはグルコース、二つ目にはマルトースを混ぜた10%水溶液50gをいれた。残り1つには糖を加えていない水50gを入れ、コントロールとした。御祓川から採集した土を利用したのは、先行研究でも使用しており、電流が発生すると分かっていたことに加え、学校に近く、採集しやすいためである。

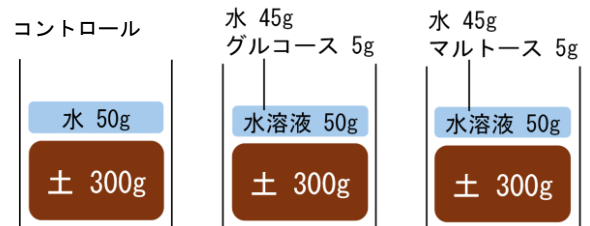


図1 各実験で加えた水溶液

〈結果〉

電流量の平均値はコントロール4.00mA、グルコース3.72mA、マルトース1.89mAとなった(図2)。糖を添加したマッドワットの電流量はコントロールより小さくなった。

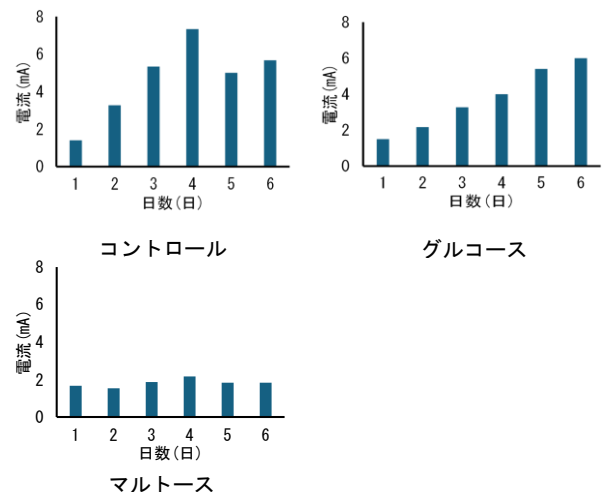


図2 コントロールとグルコース、マルトースを加えたマッドワットの6日間の電流量の変化

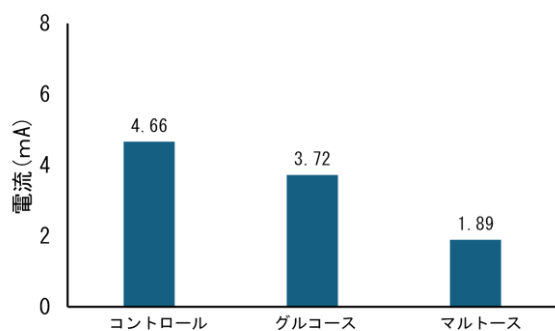


図3 6日間の電流量の平均値

〈考察〉

グルコース、マルトース水溶液を添加したマッドワットの電流量の平均値はコントロールより小さくなった。これはグルコースやマルトースが微生物による分解が容易な糖であり、短期間で糖という資源がなくなったからだと考える。そこで、分解に時間がかかるセルロースを使えば、微生物の代謝がより緩やかになると考えた。また、微生物が活動する環境の糖の濃度は0%に近く、濃度10%は微生物が活動しやすい環境よりも糖の濃度ははるかに濃かったと考え、次の実験を行った。

〈実験2〉 糖の濃度による電流量の違い

濃度による影響をみるため、水溶液の濃度を10%から1%に変えた。また、グルコース、マルトースよりも分解しにくいと考えられる多糖であるセルロースを加えた場合の電流量も調べた。

〈方法〉

3つのマッドワットに御祓川から採集した土300gを加えて、一つ目にはグルコース、二つ目にはマルトース、三つ目にはセルロースを混ぜた1%水溶液50gをいれた。残り1つには水50gを入れ、コントロールとした。

〈結果〉

6日間の電流量の平均値はコントロール0.65mA、グルコース1.70mA、マルトース2.14mA、セルロース2.25mAとなった(図5)。糖を添加したマッドワットの電流量はどの場合もコントロールより大きくなった。また、セルロース、マルトース、グルコースの順に電流量が大きくなった。

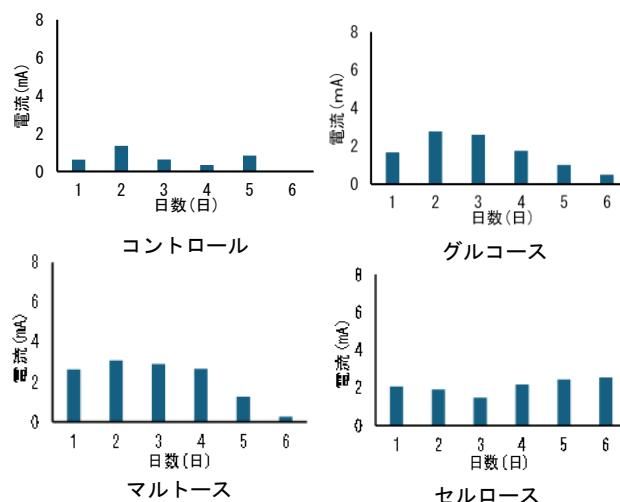


図4 コントロールとグルコース、マルトース、セルロースを加えたマッドワットの6日間の電流量の変化

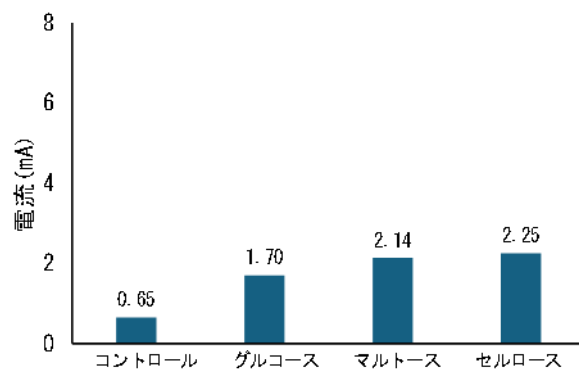


図5 6日間の電流量の平均値

1%水溶液を添加したマッドワットでは、コントロールよりも電流量の平均値が大きくなったことから、糖の添加は微生物の活動を促進し、電流量を増加させると考えられるがまた、適当な濃度が存在すると考えられる。セルロースを添加したマッドワットでは、測定日の後半にかけても電流量が持続していた。これは、セルロースが多糖であり分解に時間がかかるため、微生物が長時間にわたって有機物を利用でき、継続的に電子を放出できたからだと考えられる。これより、分解の速度が異なる糖を用いることで、電流量の変化の仕方にも違いが生じることが示唆された。

〈実験3〉 土壌中に存在する微生物の特定

土壌中に存在する微生物の特定を行った。

〈方法〉

微生物の種類として、電流発生菌であるシュワネラ属、ジオバクター属に注目した。御祓川から採集した土5gを精製水100mLに混ぜ、0.25μ

のフィルターでろ過した。このフィルターから DNA 抽出キット (NucleoSpin Tissue, タカラバイオ社) で DNA を抽出した。この DNA をシュワネラ属 ジオバクター属 に特異的なプライマーを用いて PCR を行い、その後、電気泳動をした。

〈結果〉

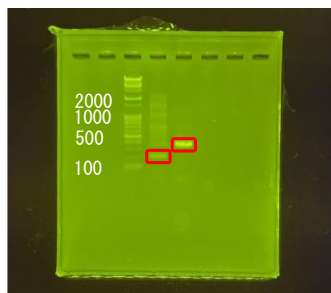


図6 シュワネラ族とジオバクター族のプライマーを用いた電気泳動の結果

シュワネラ属の目的の DNA 断片の長さである 330bpm、ジオバクター属の目的の DNA 断片の長さである 480bpm でバンドが確認できた。これより、今回使った土には、ジオバクター属、シュワネラ属のどちらの微生物も土壌中に存在することが確認できた。

〈実験4〉 電流発生菌と電流量の関係

〈方法〉

3つのマッドワットに御祓川から採集した土 300g を加えて、一つ目にはグルコース、二つ目にはマルトースを混ぜた 10%水溶液 50g を入れた。残り1つには糖を加えていない水 50g を入れ、コントロールとし、これらの4つのマッドワットから計6日間土 5g を採集し、実験3と同様の方法で、ろ過、DNA 抽出、PCR、電気泳動を行った。

〈結果〉

電気泳動で検出したバンドの濃淡をもとに、電流発生菌の量と電流量の関係の有無をみた。バンドの濃淡は数値としてははかることができなかったため、目視で判断した。電流発生菌の量が多いと、バンドが濃く光り電流量が増加する、また、電流発生菌の量が少ないとバンドが薄くなり、電流量が減少すると予想した。しかしながら、バンドの光り方の濃淡と電流量の増減を比較したが関係は

みられなかった (図7)。

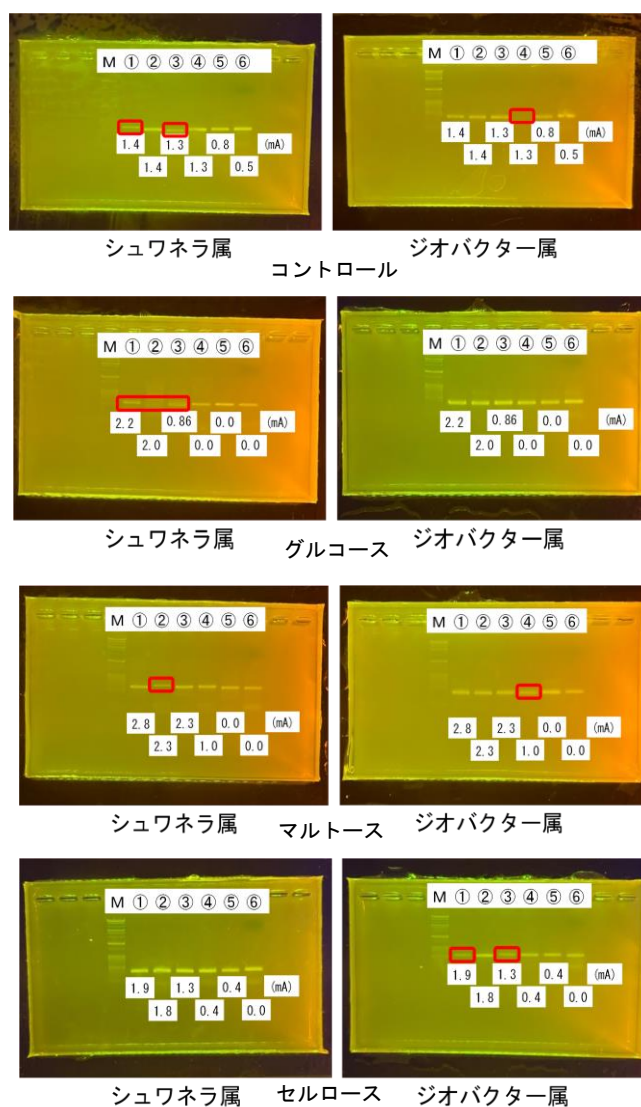


図7 各日ごとの電気泳動の結果と電流量

〈考察〉

薄いと判断したバンドは赤い枠で囲って示した。電流量の増減とバンドの光り方に関係が見られなかった理由として、電流の発生が菌の量ではなく、菌の働きや活動の強さに関係している可能性が考えられる。ジオバクター属やシュワネラ属は電極に付着して電子を電極に伝えることで発電する。そのため、DNA の量が多い、つまり、菌の量が多くても、菌が電極にうまく付着していなかったり、活動が弱かった場合には電流があまり増えない可能性がある。また、同じ菌の種類でも発電する力が違う菌が混ざっていた可能性もある。さらに電気泳動では菌がどれくらいいるかは分かるが、ど

れだけ活動しているかは分からない。今後はリアルタイム PCR を使い、菌の量と電流量の関係を詳しく調べる必要がある。

3 結論

本研究では、微生物燃料電池における糖の種類、濃度、電流発生菌の量による影響について検討した。実験1では、グルコースとマルトースを10%濃度で添加した結果、いずれもコントロールより電流量が低下した。一方、実験2では糖の濃度を1%に変え、多糖であるセルロースを用いて実験を行った。セルロースを用いたマッドワットでは電流量が持続した。実験3,4より、電流量は電流発生菌の量だけでなく、細菌の代謝や電子が電極に伝わる量に左右される可能性があると考えられる。

4 今後の展望

糖の濃度について、電流の発生に最適な糖濃度を明らかにする必要がある。また、セルロース以外の多糖や、分解速度の異なる有機物を用いることで、分解速度と電流量の関係をさらに詳しく調べる必要がある。さらに、電流発生菌の役割を明確にするためには、リアルタイム PCR などを用いて菌量を定量的に測定することが必要である。これにより、菌量と電流量の関係をより正確に評価できると考えられる。

5 参考文献

- ・七尾高等学校平成29年理数科課題研究,電流発生菌による電力の増加について
- ・井上謙吾,微生物燃料電池の発電機構の解明と有機性廃棄物処理への応用に関する生物工学研究,生物工学会誌,2024,vol.102,no.3,p.109-115.
- ・山田果歩,福島寿和,藤野健一,山田勝弘,排水処理用微生物燃料電池の電極開発,日本製鉄技報,2021,vol.417,p.98-102.

UV硬化樹脂の反り返りが小さくなる条件について

班員 酒井 煌太、谷口 瑛音、田村 芹奈
担当教諭 寺尾 知晃

キーワード：UV硬化樹脂、温度、ラジカル重合

UV hardening resin hardens when irradiate sunlight or UV light, but works made with it tended to warp. To reduce this warping, the effects of the temperature, the humidity, and the oxygen concentration were investigated. The results showed that lower temperature significantly reduced warping, while humidity and oxygen concentration levels had no significant effect.

1 はじめに

近年、UV硬化樹脂は、紫外線を照射することで短時間で硬化する特性を有する材料として、工業分野のみならず、工芸・造形分野や教育現場においても広く利用されている。UV硬化樹脂は加熱を必要とせず、常温付近で硬化が可能であること、硬化速度が速く作業性に優れることから、装飾品や模型、試作品の作成など、多様な用途で用いられている。一方で、UV硬化樹脂を用いた造形物は、硬化後に形状の変形や反り返りが生じる場合がある(図1)。UV硬化樹脂を用いた造形物における反り返りは、作品の外観や寸法精度を損なうだけでなく、意図したデザインや機能が十分に発揮できなくなる要因となる。そのため、硬化条件と反り返りとの関係を明らかにし、反り返りを抑制する手法を確立することは、UV硬化樹脂を用いた作品や製品の品質向上において重要な課題である。

先行研究より、UV硬化樹脂の硬化挙動は、周囲の環境条件に大きく影響されると考えられる(佐藤1981)。例えば、光の波長は、硬化にかかる時間に影響する。本研究では、温度、湿度、酸素濃度の3つの環境要因に着目し、UV硬化樹脂の硬化時に生じる反り返りを小さくする条件について、検討することを目的とした。



図1 UV硬化樹脂の反り返り

2 研究内容

実験方法：

シリコンの型にUV硬化樹脂を約3 g量り取り、気泡を除去するためにエンボスヒーターを10秒間当てた。次に、樹脂を温度と湿度を設定したインキュベーターの中に入れ、波長HV365 nmのUVライトを照射した。このとき、実験①と実験②では、インキュベーター内の風や水滴の影響を無くすために、型にシャーレを被せた。実験③では、型と酸素濃度計をジップロックの中に入れ、酸素と窒素を注入して酸素濃度を調整した。硬化後、デジタルノギスと、3Dプリンターで作成した治具を用いて治具の間に生じた隙間の幅を測定した(図2)。この値からUV硬化樹脂の元の厚さ2 mmを引いた値を反り返りの大きさとした。

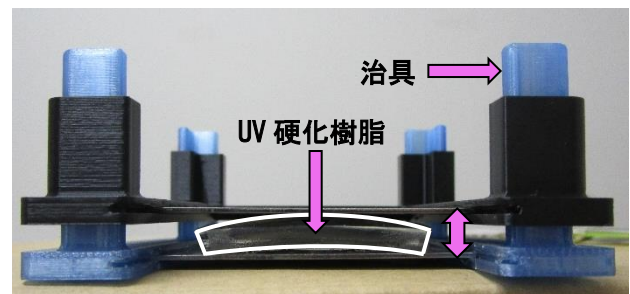


図2 使用した治具と測定の方法

〈 実験① 〉

目的：

温度と湿度の変化とUV硬化樹脂の反り返りの関係を調べる。

方法：

温度を30℃、50℃、70℃、湿度を40%、60%、80%と変化させ、合計9点で実験を行った。

結果:

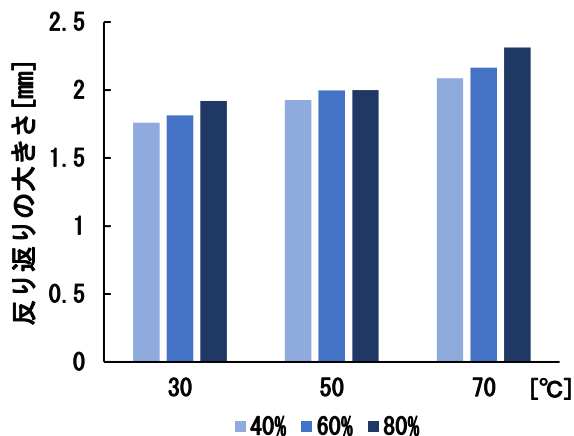


図3 湿度の変化による反り返りの変化

どの温度においても、湿度40%のときの反り返りが最も小さくなった(図3)。

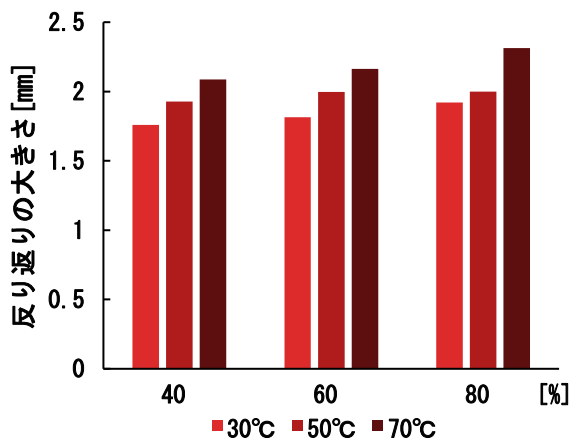


図4 温度の変化による反り返りの変化

どの湿度においても、温度30°Cのときの反り返りが最も小さくなった(図4)。

二元配置分散分析を行った結果、温度の影響が有意であった($p < 0.05$)。また、多重比較の結果、30°Cにおける反り返りは、50°Cおよび70°Cにおける反り返りと比較して有意に小さかった($p < 0.05$)。一方で、50°Cと70°Cとの間には有意差は見られなかった。

〈 実験② 〉

目的:

温度30°Cよりも低温の環境下で、UV硬化樹脂の反り返りは温度30°Cのときより小さくなるか調べる。

方法:

温度を10°C、20°Cと変化させ、湿度はすべて40%とした。

結果:

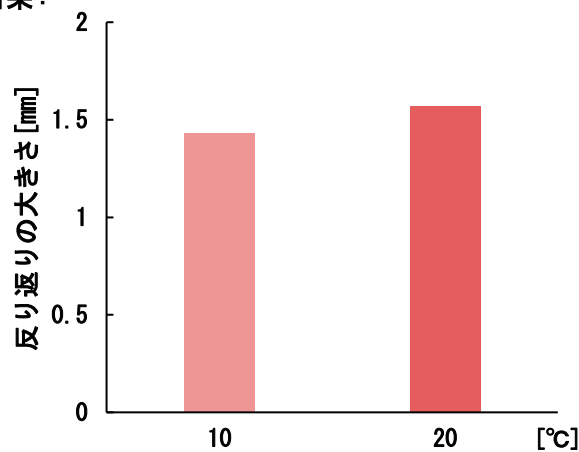


図5 低温の環境下での反り返り

10°Cのときの方が反り返りが小さくなったが(図5)、有意差は見られなかった(ANOVA, $p > 0.05$)。

考察:

実験①、実験②を基に、温度が10°C、20°C、30°C、50°C、70°Cにおける湿度40%の結果について、一元配置分散分析を行った。

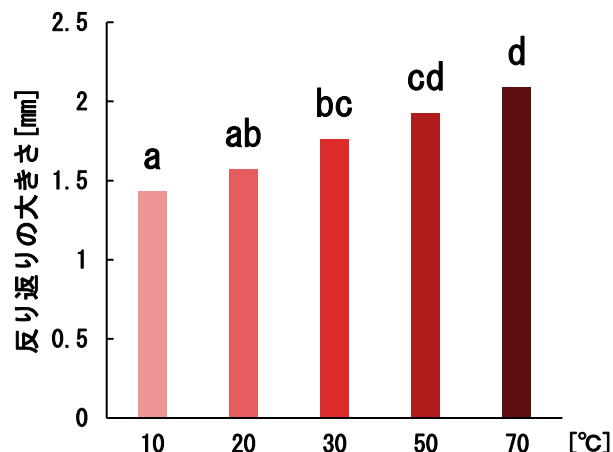


図6 温度条件ごとの反り返りの大きさの平均 [mm] 異なるシンボル間では有意差あり ($p < 0.05$)

UV硬化樹脂の反り返りは、低温であるほど小さくなった(図6)。

○温度についての考察

本研究で使用したアクリル系UV硬化樹脂は、ラジカル重合が進行することによって硬化する。一般に、化学反応は温度が低くなるほど反応速度が遅くなる。先行研究から、UV硬化樹脂の反り返りには応力に関係していると報告されている(佐藤, 荻谷2019)。応力とは、樹脂の変形に抵抗することで樹脂内部に生じる力であり、UV硬化樹脂の反り返りの原因になる力で

ある。硬化収縮応力と熱応力の2種類が、本実験で発生していると考えられる。硬化収縮応力は、UV硬化樹脂が硬化・収縮するときに発生する応力で、UV硬化樹脂の反り返りの主な原因となる。熱応力は、発熱反応であるラジカル重合が進行する過程で樹脂が膨張しようとするが、型の物理的壁に阻まれることで発生する応力である。これらの応力が樹脂内部に残留することで、反り返りが発生すると考えられる。先行研究より、応力は、硬化初期段階のゲル状態において大きく緩和され、硬化後に樹脂内部に残る残留応力が小さくなる(小栗ら2024)。

ゲル状態は、応力の発生と緩和が同時に起こる状態であるが、緩和が発生と比べて大幅に大きく作用する(佐藤, 荻谷2019)。本実験では、低温の環境下でラジカル重合の反応速度が遅くなるほど、ゲル状態の時間が長くなることで、応力が緩和される時間が長くなり、硬化後に樹脂に残留する応力が小さくなり、反り返りが小さくなったと考えられる(図7)。

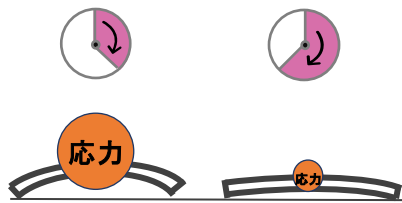


図7 ゲル状態の時間の長さと応力の関係

また、一般的な高分子化学や熱力学の知識より、本実験においても、低温の環境下で熱応力の発生が抑制され、反り返りが小さくなったと考えられる(図8)。

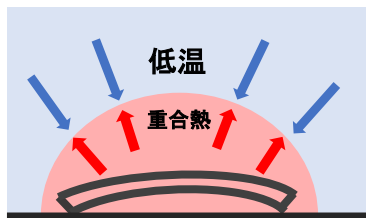


図8 重合熱が冷却されるイメージ

○湿度についての考察

今回扱った湿度は相対湿度であり、空気中に含まれる水蒸気量そのもの、つまり絶対湿度を

制御したものではない(図9)。そのため、硬化過程における水分子の影響を十分に变化させることができず、結果として湿度は反り返りに対して影響を及ぼさなかった可能性がある。

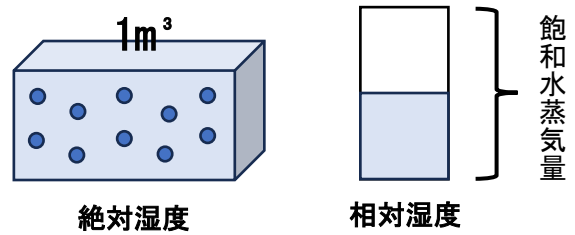


図9 絶対湿度と相対湿度の違い

〈 実験③ 〉

目的:

酸素濃度の変化によるUV硬化樹脂の反り返りの変化を調べる。

方法:

温度は30℃、湿度は40%に固定し、酸素濃度を、5%、20%、35%と変化させ実験を行った。

結果:

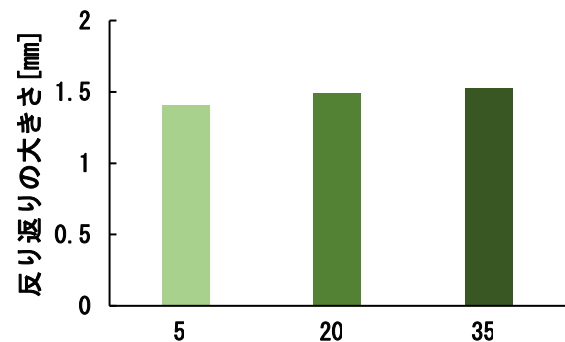


図10 酸素濃度の変化ごとの反り返りの大きさの平均[mm]

酸素濃度が5%のときの反り返りが最も小さかった(図10)が、有意差は見られなかった(ANOVA, $p > 0.05$)。

考察:

実験条件間での酸素濃度の変化量が温度・湿度の変化の幅より比較的小さかったため、反り返りに対して有意な影響が見られなかった可能性がある。酸素によるラジカル重合反応の阻害は、酸素と接触しているUV硬化樹脂表面に主に生じることが報告されている(朝田2010)。すなわち、樹脂内部における重合反応は酸素の影響をほとんど受けず、反応速度に大きな変化が生じない。このことから、本研究の条件下では、

酸素濃度の変化が樹脂全体の硬化挙動に及ぼす影響が樹脂の表面のみにはたらいだため、反り返りに顕著な差が現れなかった可能性がある。

3 今後の課題

温度条件に関しては、UV硬化樹脂の硬化過程における温度変化をより詳細に把握する必要がある。放射温度計を用いて、硬化中の樹脂の温度について、時間による変化を測定することを検討している。得られたデータと硬化挙動との関係を解析することで、当該反応における活性化エネルギーを評価し、樹脂が硬化する際に起こる反応がラジカル重合かどうか判断することも可能であると考えられる。硬化環境の温度条件をより正確に評価するため、サーモグラフィを用いてインキュベーター内部の温度分布を可視化し、インキュベーター内の温度のむらの有無を確認することも検討している。今回は反り返りの発生に関与する内部応力の大きさや作用方向等について直接的な評価を行っていない。偏光板を用いた光弾性法により、硬化後の樹脂内部に残留する応力分布を可視化・測定し、反り返り発生機構の理解を深めていきたい。

湿度条件に関しては、本研究では相対湿度を指標として実験を行ったが、反り返りに対する有意な影響は見られなかった。絶対温度に着目し、これを制御した条件で実験を行い、湿度が樹脂の硬化挙動および反り返りに及ぼす影響をより詳細に検討したい。

酸素濃度に関しては、濃度を大きく変化させて実験を行いたい。

4 謝辞

金沢工業大学の坂本宗明先生に実験道具の貸与や助言等、多くのお力添えをいただきました。厚く御礼申し上げます。

5 参考文献

(1) 沢田秀雄. 重合度の温度依存性について. 高分子化学. 1963, vol. 20, no. 221, p. 561-566

(2) 佐藤雄河, 荻谷義治. 有限要素法を用いた紫外線硬化性接着剤の硬化収縮解析の検討. 計算力学講演会講演論文集. 2019, vol. 32

(3) 小栗巧, 荻谷義治, 山本晃司. 硬化収縮応力シミュレーションによる紫外線硬化接着剤の硬化過程における緩和挙動予測. 2024, vol. 37

(4) 古市浩朗. 紫外線硬化型接着剤の硬化状態と収縮の実験的評価方法. 2021, vol. 87, no. 897, p20-00344

(5) 栗本健二, 中村正明, 藤本和秀, 染宮昭義. エポキシ/アクリル混合系樹脂の硬化反応解析と材料物性. 1989, vol. 46, no. 12, p. 809-818

(6) 佐藤弘三. 高分子材料の劣化に及ぼす充てん剤効果. 1981, vol. 54, no. 8, p490-505

(7) 朝田泰広. ハードコート用紫外線硬化型アクリル樹脂とその応用. 2010. taisei-fc.co.jp/news/pdf/press_20100614.pdf