

# サンドイッチ法による多様な植物種におけるアレロパシー活性の検索

班員 大松 美咲、長田 愛純、星野 遥音、松田 一輝  
担当教諭 谷野 智了

キーワード：アレロパシー、サンドイッチ法、伸長、重量増加、吸水

Allelopathy is a phenomenon in which plants use chemicals to inhibit or promote the growth of other plants in order to favor their own survival. In this study, we observed an allelopathic activity in plant species in our surroundings. Our study suggests that the allelopathic substances in many plant species are not interfering with growth by inhibiting water absorption by other plants, but are using a different method.

## 1 はじめに

アレロパシーとは、植物が自己の生存を有利に展開するために、化学物質を使って他の植物の成長を抑制または促進する現象のことを指す<sup>(1)</sup>。農業界では、雑草防除策の1つとして、化学物質の特定や、多様な植物種におけるアレロパシー活性の有無の検証がなされてきた。一方で、そのようなアレロパシー活性が吸水、細胞分裂、光合成、植物ホルモンによる反応といった様々な植物の成長過程において、どのように影響しているのかについては不明な点が多く残されている<sup>(1)</sup>。そこで、本研究では身近に生育する多様な植物種のアレロパシー活性を検証することだけでなく、アレロパシー物質が植物の成長にどのように影響しているのかを調べることを最終的な目的とした。アレロパシー活性の検証方法として、サンドイッチ法<sup>(2)</sup><sup>(3)</sup>という手法を用いた(図1)。サンドイッチ法とは、アレロパシー活性の検証に広く用いられている方法であり、供試植物の乾燥葉から溶け出した化学物質が検定植物に与える影響を芽生えの長さで評価できる方法である。

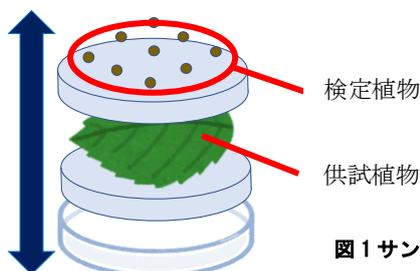


図1 サンドイッチ法(展開図)

## 2 材料と方法

1. 供試植物(表1)の生葉を60℃の環境下で2日間通風乾燥させ、密閉袋(ジップロック)中で室温下で保存した。
2. シャーレに1で用意した供試植物乾燥葉0.30gを敷き(図2)、その上に0.50%の質量パーセント濃度で寒天粉を蒸留水に溶かして作った寒天培地をシャーレの高さの半分まで流し込んだ(図3)。
3. 2で流し込んだ寒天培地が固化した後、さらに寒天培地を流し込み、葉を挟みこんだ状態で固化させた(図4)。
4. 寒天培地表面に重量を測定した検定植物の種子9個を等間隔に並べた(図5、図6)。重量に関しては、9個の種子の重量をまとめて測定した(図7)。
5. 4を湿度100%、温度20℃、暗黒下で5日間培養した。
6. 5日目に検定植物を採取し、長さ重量を測定した。長さに関しては、芽生えの長さのみを測定し、種子部分を除いた長さとした(図8)。重量に関しては、4と同様の方法で測定した。



図2 サンドイッチ法の断面図①

図3 サンドイッチ法の断面図②



図4 サンドイッチ法の断面図③

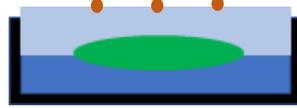


図5 サンドイッチ法の断面図④

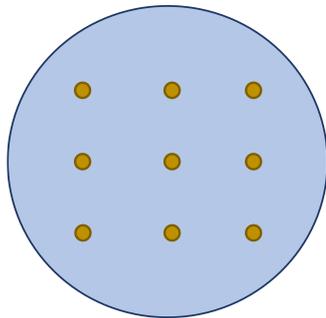


図6 種子の並べ方(培地上面)

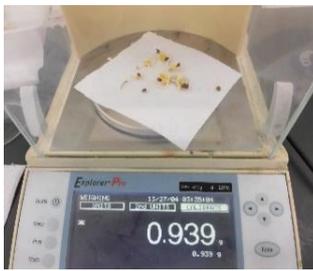


図7 重量の測定方法

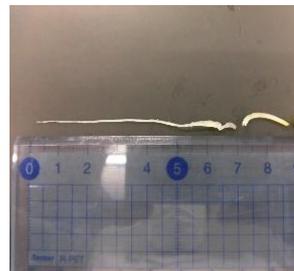


図8 長さの測定方法

表1 実験に用いた植物の科名・植物名・学名

科	植物名・学名
供試植物	
イネ	
ヨシ	<i>Phragmites australis</i>
ウリ	
キュウリ	<i>Cucumis sativus</i>
キク	
セイタカアワダチソウ	<i>Solidago altissima</i>
ハルジオン	<i>Erigeron philadelphicus L</i>
ツワブキ	<i>Farfugium japonicum</i>
クイモ	<i>Helianthus tuberosus</i>
フキ	<i>Petasites japonicus</i>
キク	<i>Chrysanthemum morifolium</i>
キンボウゲ	
ヘレボルス	<i>Helleborus</i>
ショウガ	
ミョウガ	<i>Zingiber mioga</i>
ヒルガオ	
サツマイモ	<i>Ipomoea batatas</i>
ミカン	
ミカン	<i>Citrus unshiu</i>
ミズキ	
ヤマボウシ	<i>Cornus kousa</i>
モクセイ	
ネズミモチ	<i>Ligustrum japonicum</i>
ユキノシタ	
ガクアジサイ	<i>Hydrangea macrophylla f.</i>
ヒマラヤユキノシタ	<i>Bergenia stracheyi</i>
ユリ	
アスパラガス	<i>Asparagus spp</i>
検定植物	
キク	
レタス	<i>Lettuce sativa</i>
アブラナ	
カイワレ大根	<i>Raphanus sativus L.</i>

### 3 結果

測定した検定植物の長さや重量をもとに、供試植物ごとにコントロールと比較した値を算出し、それぞれ伸長率、重量増加率とした。以下はその算出方法である。

伸長率

$$= (\text{実験群の長さ} / \text{コントロールの長さ}) \times 100$$

重量増加率

$$= (\text{実験群の重さ} / \text{コントロールの重さ}) \times 100$$

各供試植物種の検定結果は以下の通りである。

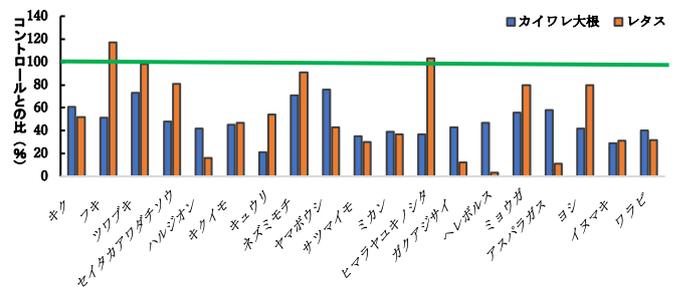


図9 各植物種における伸長に対するアレロパシー効果

ほとんどの供試植物は検定植物の伸長を抑制していた。また、一部の植物種は検定植物の伸長を促進していた(図9)。

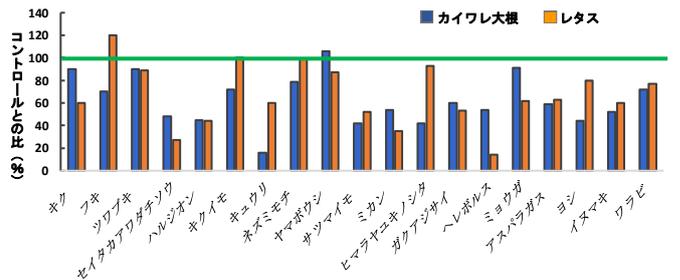


図10 各植物種における重量増加に対するアレロパシー活性

図8からほとんどの供試植物は検定植物の重量増加を抑制していた。また、一部の植物種は重量増加を促進していた。

また、図9、10のグラフを比較すると、供試植物により、検定植物の伸長が抑制されていれば、重量増加も抑制されているといった同様の傾向を示す種が多く確認できた(図11)。一方、セイタカアワダチソウ、クイモ、ミョウガ、

アスパラガスなどの一部の種は伸長と重量増加に対するアレロパシー活性の傾向が異なっていた(図12)。例えば、セイタカアワダチソウは検定植物(レタス)の伸長成長よりも重量増加を大きく抑制していた。反対に、アスパラガスは検定植物(レタス)の重量増加よりも伸長を抑制していた。これらのことは、必ずしも、伸長成長と重量増加は相関していないことを示唆している。

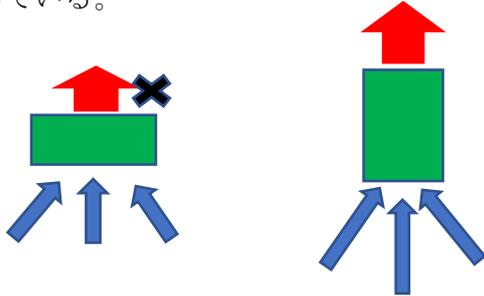


図11 同様の傾向を示すもの

図12 異なる傾向を示すもの

そこで、次の5通りの場合が考えられる。①アレロパシー物質が吸水にそもそも影響していない場合、②アレロパシー物質が吸水を促進し、吸水した分だけ検定植物が伸長成長している場合、③アレロパシー物質が吸水を促進するが、伸長成長に寄与していない場合、④アレロパシー物質が吸水を抑制し、それに伴って伸長成長が抑制されている場合、⑤アレロパシー物質が吸水を抑制するが、伸長成長は抑制されていない場合の5つである。これら5つの場合を検証するために、芽生えの長さを一定にそろえてから比較する必要があると考えた。今回は、検定植物が1cm伸長するために必要な吸水量を算出した。算出方法は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} & \text{吸水量 (g/cm)} \\ & = \text{重量増加量 (g)} / \text{芽生えの長さ (cm)} \end{aligned}$$

また、アレロパシー物質が検定植物への吸水に与える影響を評価するために吸水率を算出した。算出方法は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} & \text{吸水率 (\%)} \\ & = (\text{実験群の吸水量} / \text{コントロール群の吸水量}) \times 100 \end{aligned}$$

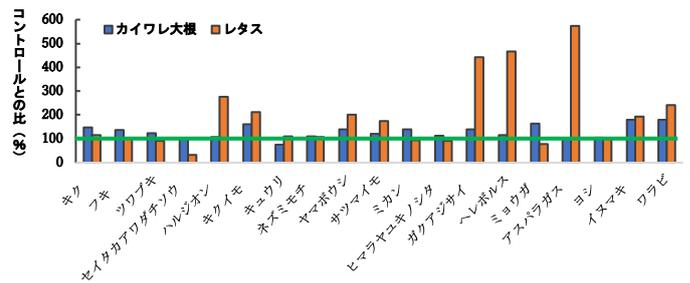


図13 各植物種における吸水率のコントロールとの比較

#### 4 考察

〈重量増加量を吸水量ととらえた理由〉

本研究では、24時間、湿度100%・温度20℃・暗黒下で検定植物を培養した。したがって、検定植物は光合成を行っておらず、寒天培地中に含まれている水分のみを吸水して重量が増加していると考えられる。したがって、重量増加量は単純に検定植物が吸水した量としてとらえることができる。

〈1cm伸長するために必要な吸水量を算出した理由〉

研究を進める過程で検定植物の伸長が抑制されているが、芽生えが横方向に太くなっている様子が観察された。芽生えの太さを測定することは手技的に困難であったため、重量を測定し、芽生えの長さで割れば、検定植物の横方向への肥大成長についても推察することができると考えた。

〈セイタカアワダチソウについて〉

図13より、セイタカアワダチソウはレタスの吸水を何らかの物質で抑制していることがわかる。また、図9と図10より、セイタカアワダチソウは伸長よりも重量増加を抑制していた。したがって、セイタカアワダチソウは吸水を抑制しているが伸長は抑制していないため、検定植物の芽生えは細長くなっていると予想される。

セイタカアワダチソウは地下茎でつながっているため、春先から夏にかけて一斉に伸長し、

秋ごろに群落を形成する。そのため、多量の水分を必要とすることから、周囲の植物の吸水を抑制することで、自身の生育環境を整えているのかもしれない。

〈アスパラガスについて〉

図13より、アスパラガスはレタスの吸水を促進していることが分かる。また、図9と10より、アスパラガスは重量増加よりも伸長を抑制している。したがって、アスパラガスは吸水を促進し、伸長を抑制しているため、検定植物の芽生えは太く短くなっていると予想される。

アスパラガスは長期間湿った土壤にさらすと生育が悪化するという報告がある。そのため、周囲の植物の吸水を促進することで、自身の生育環境を整えているのかもしれない<sup>(4)</sup>。

## 5 今後の課題

今後は、植物細胞の横方向の成長について、マイクロメーターなどを用いて測定し、定量的な解析を行っていききたい。また、外形の大きさだけでなく、内部の細胞の伸長方向も観察し、形態学的な観点からアレロパシー物質の影響について調べていききたい。細胞の伸長成長と肥大成長にはオーキシンをはじめとする複数の植物ホルモンが関与していることが広く知られている<sup>(1)</sup>。例えば、ジベレリンとブラシノステロイドは伸長成長を促進し、エチレンは肥大成長を促進することが広く知られている。そのため、形態学的な観点から、アレロパシー物質と植物ホルモンの関係について推察することができるのではないかと考えている。

また、今回、顕著なアレロパシー活性を示したセイタカアワダチソウやアスパラガスなどの供試植物については、高校の実験室レベルでも抽出可能な方法を試したり、大学の研究室と連携して成分分析(GC-MS)を行うことでアレロパシー物質の正体を絞り込んでいきたい。

さらに、それらの絞り込んだ化学物質を多様な植物にさらすことで、その化学物質が植物間の相互作用においてどのような機能を持つか解

明できると考えている。

## 6 参考文献

- (1) 藤井義晴. 植物のアレロパシー. 1990. vol. 28, no. 7, p. 471-478
- (2) 猪谷富雄, 平井健一郎, 藤井義晴, 神田博史, 玉置雅彦. サンドイッチ法による雑草および薬用植物のアレロパシー活性の検索. 雑草研究. 1998. vol. 43(3), p. 258-266
- (3) 谷口太一, 大石州紀, 岡博昭. アレロパシーの教材化とその実践—学校実習における「課題研究」の授業を中心に—. 教育実践研究. 2018. no. 12, p. 17-29
- (4) 柳井洋介, 芳賀紀之, 浦上敦子. アスパラガス連作圃場の継続的高土壌水分状態と株の生育不良が相関する. 農研機構. 園芸学研究. 2013. vol12, No. 1, p. 75-82
- (5) 猪谷富雄, 宮川良亮, 山本涼平, 妹尾拓司, 山浦 高夫. 山科植物資料館で採取した薬用植物などのアレロパシー活性. 近畿作物・育種研究会.
- (6) 藤井義晴, 濱野満子. アレロパシー ; 植物が放出する化学物質による他の生物との相互作用-とくに植物が放出する揮発性物質が他の生物に及ぼす作用-. 日本生気象学会. 日本生気象学会雑誌.

# 様々な条件下におけるダイラタンシー現象の抵抗力の变化について

班員大田 采音 干場 開晴 細谷 一心 森田 結衣  
担当教諭 北原 点

キーワード：ダイラタンシー現象 ダイラタント流体 振動数

In this experiment, in order to understand the dilatancy phenomenon, we conducted experiments focusing on the gap between the potato starch particles and the viscosity of the solvent. We investigated the change in the resistance force associated with the dilatancy phenomenon. It was found that the resistance increased with the amount of potato starch deposited and decreased with an increase in the viscosity of the solvent.

## 1 はじめに

不溶な粉粒体と液体から構成される流体は、通常時、または、与えられる衝撃が非常に弱いときは液体のような挙動を見せるが、強い衝撃を与えた際は固体のようにふるまう。この現象をダイラタンシー現象という。

この現象において、抵抗力について着目し、様々な条件を設定した上で、抵抗力に見られる変化について調べることが目的とした研究を行った。

水と片栗粉を用いて「ダイラタント流体」を作成した。流体を入れた容器を力学台車に固定し、流体内に机に固定した金属棒を挿入した状態で、滑車と糸を結び、糸との他端におもりを取り付け、滑車を介しておもりをぶら下げた。おもりが落下するときの力学台車の移動速度を測定することで、ダイラタンシー現象の抵抗力の変化を調べた。

片栗粉の沈殿量と溶媒の粘度を変化させて実験を行った結果、力学台車の移動速度の振動数と、力学台車が受ける抵抗力との間には相関があるということが分かった。

## 2 現象の説明

通常、片栗粉の粒子は、粒子間の隙間

が最も小さくなるように積まれており、衝撃が与えられると片栗粉の粒子が移動して隙間が大きくなる。片栗粉が水中にある時、粒子間の隙間が大きくなっても水はすぐに移動しないため、水が不足し、粒子間に負圧が発生する。この負圧により、粒子が固定され、固体のようにふるまう（図1）。時間が経つと、粒子間の隙間に水が十分に入り込むため、負圧がなくなり、液体のようにふるまう。

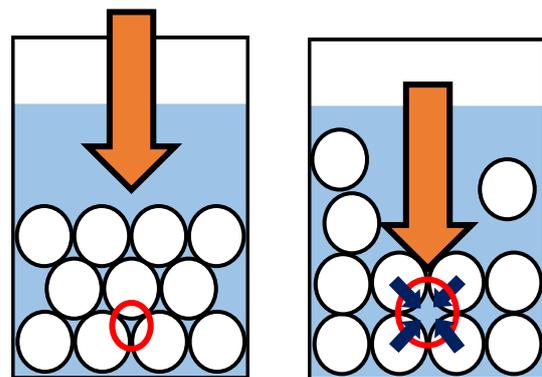


図1 粒子の模式図  
(通常時)

粒子の模式図  
(衝撃時)

## 3 実験方法

水と片栗粉でダイラタント流体を作成し容器に入れ、それを速度センサーがついた力学台車に取り付ける。そこにテーブルに固定した金属棒を底に触れさせないように挿入した（図2）。

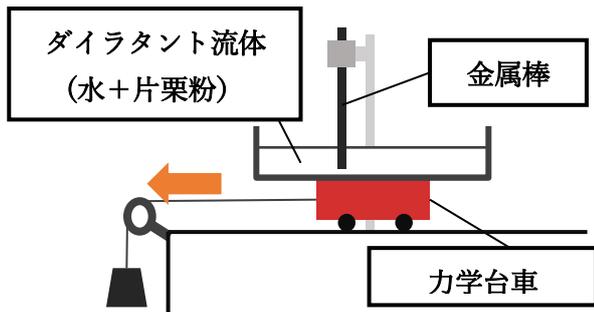


図2 装置の模式図

滑車と重りを用いて台車を移動させ、速度を測定し、データをグラフ化した(図3)。そのグラフから見られた振動に着目し、台車の速度の振動数を調べた。速度の振動数を求めるときはFFT(高速フーリエ変換)を用いた。

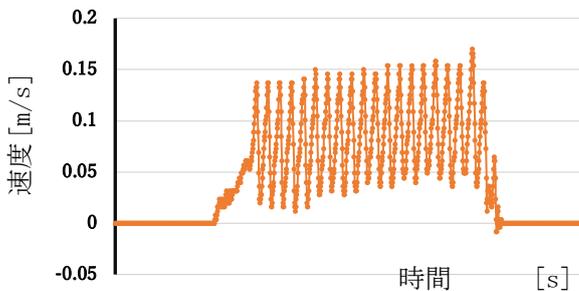


図3 力学台車の速度

また、台車の移動時間を計測し、走行距離が同じことを利用して実験ごとの台車の平均の速度を求め、ダイラタンシー現象に伴う平均の抵抗力を調べた。

#### 4 実験結果・考察

##### 〈実験Ⅰ〉

ダイラタント流体を十分に攪拌してから、台車を離すまでの待ち時間を変化させた。(水96g 片栗粉105g)

##### 結果

待ち時間が長いほど速度の振動数は大きくなった(図4)。

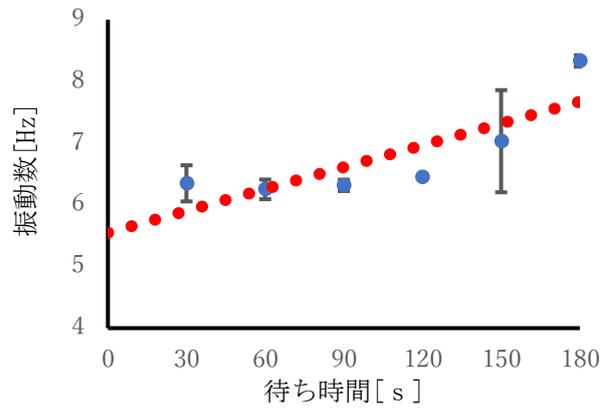


図4 待ち時間と振動数の関係

また、力学台車の平均速度が小さくなったことから、抵抗力が大きくなったことが分かった(図5)。

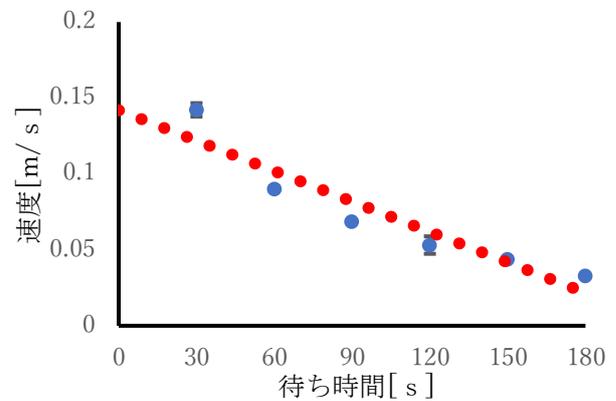


図5 待ち時間と速度の関係

##### 考察

待ち時間が長いほど、より多くの片栗粉が容器の底に堆積するため、ダイラタンシー現象が起こる部分が多くなり、抵抗力が大きくなったのではないかと考えた。

##### 〈実験Ⅱ〉

砂糖を1gずつ12gまで加え、溶媒の粘度を大きくした。(水96g 片栗粉105g 待ち時間2分)

##### 結果

溶媒の粘度が大きくなるほど振動数は小さくなった(図6)。

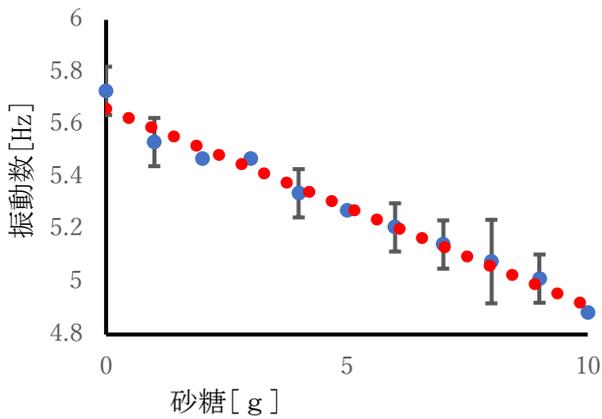


図6 溶媒の粘度と振動数の関係

また、力学台車の平均速度が小さくなったことから、抵抗力が大きくなったことが分かった(図7)。

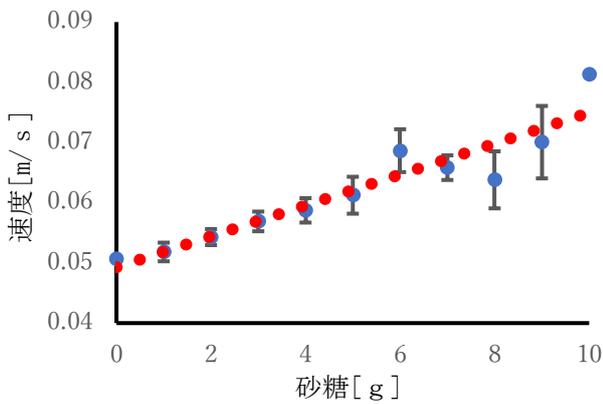


図7 溶媒の粘度と振動数の関係

### 考察

一般に溶媒の粘度が大きくなると抵抗力が大きくなるが、今回は抵抗力が小さくなった。これはダイラタンシー現象の性質だと考えられる。溶媒の粘度が大きいほど衝撃を与えた際に、片栗粉の粒子が移動しにくく、粒子間の隙間が変化しにくくなるため、発生する負圧が小さくなり、粒子が固定されにくくなったことが原因だと考えた。

実験Ⅰ・Ⅱともに平均速度と振動数には負の相関がみられた。そこから、抵抗力と振動数には正の相関があることが分かった。

### 5 結論

ダイラタンシー現象における抵抗力と台車の速度の振動数には正の相関があり、振動数か

らも現象の抵抗力を読み解くことができることが分かった。また現象の抵抗力を決める条件に、片栗粉の堆積量と溶媒の粘度があることが分かった。

ダイラタンシー現象は肉眼では観測できない粉粒体の粒子間における隙間の変化により生じる現象である。しかし私たちは、「台車の移動速度を測定するだけ」の簡単な実験で溶媒粒子の配置のような微細な構造変化を読み解くことができたと考えている。

### 6 今後の展望

研究の再現性を高めるため、挿入する棒の深さや形状を変えて実験を行いたい。また、砂糖を加える以外の方法でも溶媒の粘度を変えて実験を行いたい。

さらに、実験データから抵抗力を求め、横軸に速度、縦軸に抵抗力をとり、グラフを作成した。すると従来のダイラタント流体のグラフ(図8)とは異なる概形のグラフが得られた。(図9)。

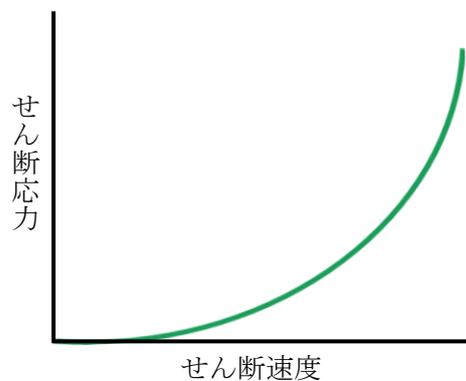


図8 従来のダイラタント流体のグラフの概形

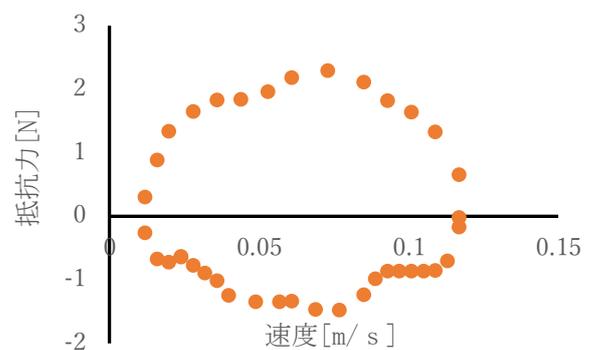


図9 抵抗力と速度の関係

衝撃を与えると抵抗力が大きくなるダイラタンシー現象に対して、抵抗力が小さくなるチクソトロピーという現象があるチクソトロピー現象では、過去にはたらいた抵抗力が変化するとヒステリシスを示し、グラフ上でループを描く(図10)。そして、そのループの大きさがチクソトロピーの大きさの尺度であることが知られている。このことから、ループの大きさがダイラタンシー現象の大きさの尺度になりうるのではないのかと考えている。

抵抗力と速度について実験を重ね、考察を深めることで、さらにダイラタンシー現象の本質に迫りたいと考えている。

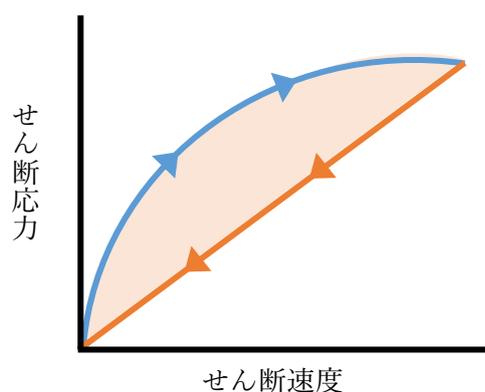


図10 チクソトロピーのグラフの概形

## 7 参考文献

- (1) 小笠原 麻友、中川 佑歌子、剣持 淳也、松田 広久、長澤 裕、岡田 正、宮坂 博. 超高速分光法による糖水溶液中の分子ダイナミクスの測定. 2004. 分子構造総合討論会 2004 講演要旨集.
- (2) 越後 奈津子、長野佑紀、中山 紘斗、宮本悠生. ダイラタンシー現象による振動とその周期. 令和元年度七尾高校課題研究論文集.
- (3) “多糖類とは 3つの主要な効果”, DSP 五協フード&ケミカル, 入手先 [https://www.tatourui.com/about/02\\_outcome.html](https://www.tatourui.com/about/02_outcome.html), 参照 2021 - 12 - 14

# 豆乳の固まり方～ミネラルによる違い～

班員 金森 かずか、久水 あかり、菅原 みゆき、山本 花  
担当教諭 池田 智恵

キーワード：豆乳、固体化、凝固、ミネラル、ゲル化

Soy milk was heated at different temperature. After that, it was added to calcium chloride, magnesium chloride, and bittern. Then, the mass of the resulting substance was measured. The mass of substance formed by bittern soy milk was the lowest. The difference in results between different mixture was not due to differences in pH or the presence of sodium.

## 1 はじめに

豆乳に塩化カルシウムや塩化マグネシウムが主成分であるにがりを加えると豆腐になる。これは、タンパク質のゲル化がおこるためである。ゲル化とは、加熱されたことによつてほどけたタンパク質に、凝固剤であるマグネシウムイオンやカルシウムイオンを加えることで液体が固体や半固体に変化することである(図1、図2)。

そこで、本研究では豆乳に塩化カルシウム水溶液や塩化マグネシウム水溶液をそれぞれ加えた場合、にがりを加えた場合との間にゲル化がおこる様子に違いはあるか、またその違いは何が原因でおこるかを調べることを目的とした。

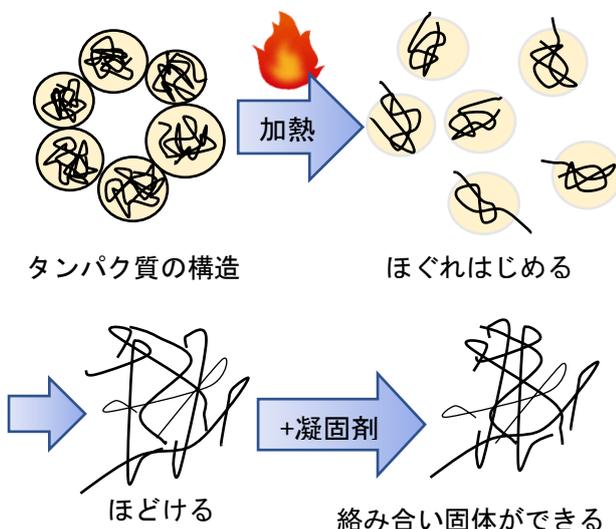


図1 豆乳の凝固特性



図2 豆乳が凝固した様子

## 2 実験に用いた材料

- ・市販の豆乳(キッコーマン調整豆乳)
- ・塩化カルシウム水溶液(1mol/L)
- ・塩化マグネシウム水溶液(1mol/L)
- ・にがり

使用したにがりの主成分が塩化マグネシウムだった。そこで、にがりに含まれるすべての物質が塩化マグネシウムだと仮定し、塩化マグネシウムの分子量を利用してにがりの濃度も1mol/Lに調整した。

## 3 実験の目的と方法

【実験1】3種類の溶液によって生成される凝固物の質量の比較

### 目的

塩化カルシウム水溶液、塩化マグネシウム水溶液、にがりによって凝固する豆乳の質量の違いを調べる。

### 仮説

凝固する質量はすべて等しくなる。

### 方法

90度に加熱した豆乳50mLに塩化カルシウム水溶液、塩化マグネシウム水溶液、にがりのいずれかの溶液を25mLずつ加えた。アルミホイルとシャーレで蓋をし、30分放置した。その後、吸引ろ過器でろ過し、凝固物のみを取り出した(図4、図5、図6)。ろ紙に残ったすべての物質を乾燥させた後、精密量りを使って質量を量った。これを4回行い、平均値を求めた(図7)。



図4 アルミホイルとシャーレで蓋をした様子

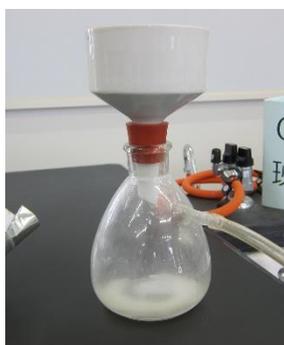


図5 吸引ろ過器



図6 生成した固体(乾燥前)

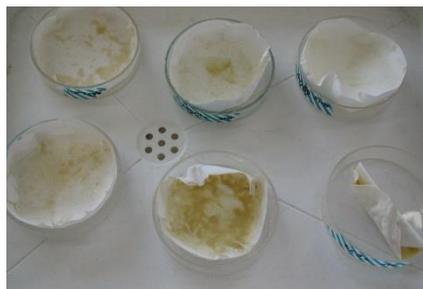


図7 生成した凝固物(乾燥後)

【実験2】 溶液のpHが生成される固体の質量に与える影響の有無

### 目的

それぞれの溶液の、pHの値と凝固した質量には関係があるのか調べる。

### 仮説

pHの値が小さいほど凝固する質量が大きくなると考えたため、塩化カルシウムのpHの値が最も小さくなる。

### 方法

実験1で用いた塩化カルシウム水溶液、塩化マグネシウム水溶液、にがりの3種類の溶液のpHをpH測定器で測った。

【実験3】 ナトリウムイオンが生成される凝固物の質量にあたる影響の有無

### 目的

にがりに含まれるナトリウムイオンが凝固した質量に影響したのか調べる。

### 仮説

塩化ナトリウムが豆乳の凝固を阻害するため、凝固する質量は実験1よりも小さくなる。

### 方法

塩化ナトリウム水溶液を加えた水溶液を、塩化カルシウム水溶液、塩化マグネシウム水溶液のかわりに用いて実験1と同様に凝固物

の量を比較した。成分規格の含量について、にがり等の海水が原料の食品に関して、ミネラルであるナトリウムの含量が6.5%未満だった場合、表記しなくてもよいというきまりがあった。そこで、使用したにがりには6.5%未満のナトリウムが含まれているのではないかと考え、実験3で溶液全体の6%を塩化ナトリウム水溶液がしめるように塩化カルシウム水溶液と塩化マグネシウム水溶液にそれぞれ加えた(図8)。

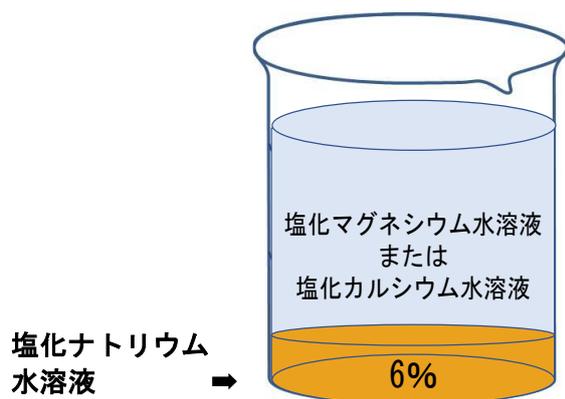


図8 実験3の溶液の調整方法

#### 4 結果と考察

##### 【実験1】

##### 結果

凝固した質量は、塩化カルシウムが $3.58 \pm 0.989$  g、塩化マグネシウムが $2.97 \pm 0.799$  g、にがりが $1.36 \pm 0.363$  gになった。

質量は、塩化カルシウムが最も大きく、にがりが最も小さくなった。

標準偏差は、にがりが最も小さくなった(図9)。

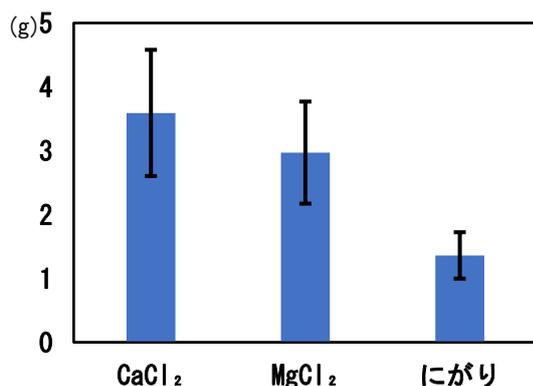


図9 生成した固体の乾燥重量

##### 考察

塩化カルシウムや塩化マグネシウムでも豆乳の凝固は起こり、その質量は、にがりよりも大きくなった。そこで、pHが豆乳の凝固する質量に影響しているため、塩化マグネシウムと塩化カルシウムの凝固物の質量が大きくなったと考えた。あるいは、にがりに含まれるナトリウムイオンが豆乳の凝固を阻害したため、にがりの凝固物の質量が小さくなったのではないかと考えた。

##### 【実験2】

##### 結果

塩化カルシウム水溶液のpHは5.28、塩化マグネシウム水溶液は4.98、にがりは4.78となった(表1)。

表1 3種類の溶液のpHの値

溶液	pH
CaCl <sub>2</sub>	4.98
MgCl <sub>2</sub>	5.28
にがり	4.78

##### 考察

pHの値は、にがり、塩化カルシウム水溶液、塩化マグネシウム水溶液の順に大きくなったが、生成した質量は、塩化カルシウム水溶液、塩化マグネシウム水溶液、にがりの順に大きくなった。このように、溶液のpHと生成される凝固物の質量に関係はみられず、したがって、pHによる影響はないと考えられる(図10)。

また、pHが豆乳の凝固する量に関係していないならば、にがりに含まれるナトリウムイオンが関係しているのではないかと考えた。

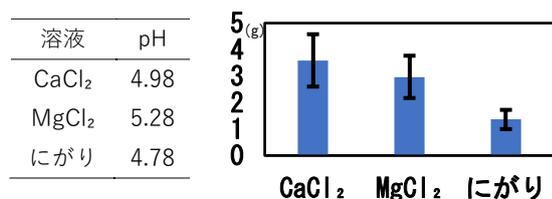


図10 実験1の結果と実験2の結果の比較

### 結果

生成された固体の質量は、塩化カルシウム水溶液と塩化ナトリウム水溶液の混合液は4.74 ± 0.36 g、塩化マグネシウム水溶液と塩化ナトリウム水溶液の混合液は4.09 ± 0.313 g となった。どちらも実験1の結果よりも大きくなった。また、標準偏差はどちらも実験1よりも小さくなった(図11)。

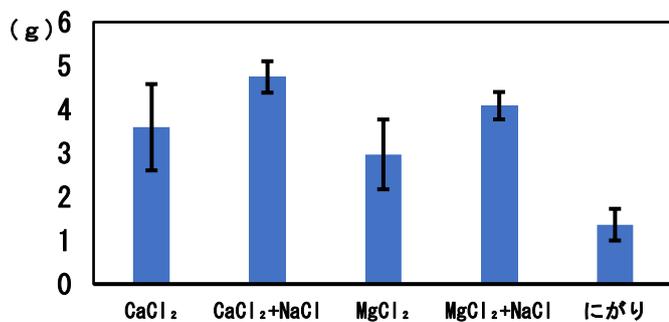


図11 生成した固体の乾燥重量

### 考察

どちらの場合も、塩化ナトリウムを加えた方が凝固物は多く生成された。このため、ナトリウムイオンは豆乳の凝固を阻害していないと考えられる。

にがりにはナトリウムイオン以外に、カリウムイオン、鉄イオンなどのミネラルが含まれており、これらが豆乳の凝固を阻害しているのかもしれない。

また、標準偏差が実験1より小さくなったことから、ナトリウムイオンには豆乳の凝固量を安定化させるはたらきがあるのではないかと考えた。

## 5 結論

にがりの主成分である塩化カルシウム、塩化マグネシウムでも反応はおこり、生成された凝

固物の質量はにがりより大きくなることがわかった。

また、pHは生成される固体の質量に与える影響はないと考えられる。

ナトリウムイオンは豆乳の凝固を阻害しているとはいえない。また、豆乳の凝固を安定しておこす可能性があると考えられる。

## 6 今後の課題

塩化ナトリウムに次いで塩化カリウムの含有量が多いので、塩化ナトリウムのかわりにミネラルである塩化カリウムを用いて実験を行い、豆乳のゲル化を阻害しているのか調べる。

ナトリウムイオンが本当に生成される凝固物の質量を安定化させる働きがあるのか確かめるために実験回数を増やして、結果をより正確にする。

## 7 参考文献

- 科学の目で見た伝統食品～豆腐の化学～.  
東工大Science Techno  
<https://tmp.t-scitech.net/history/miraikan/shokuhin/kouzou2.html>  
(参照2022-01-19)

渡辺 篤二, 阿部 和可. 各種酸類及び塩類による豆乳の凝固について. 日本食品工業学会誌第9巻第4号. 1962. p158-161.

# プラナリアの交替性転向反応

班員 市橋 侑也、遠藤 栄治、瀧本 祐介、長谷川 剛広  
担当教諭 小林 広典

キーワード：プラナリア、交替性転向反応、BALM 仮説

Turn alternation is an organisms' habit of turning left and right alternately in mazes. BARM theory says that they display turn alternation because they try to equalize the amount of movement between each side of the body. We researched whether planaria display turn alternation and whether this behavior can be explained by BARM theory. Through this experiment, it was found that planaria display turn alternation, but that this was caused by not BARM theory, but other factors.

## 1 はじめに

プラナリア (*Dugesia japonica*) は扁形動物門に属する動物の一種である (図1)。全国の水質の良い川の底の石の裏などに生息している。再生能力が高く、体を切断されても死なず、切れ端からでも再生する、という特徴を持っている。



図1: プラナリア<sup>(1)</sup>

交替性転向反応は、オカダンゴムシやミミズなどの生物が、連続する分岐路を持つ迷路内において左右交互に転向する傾向を示す反応である (図2)。これまでに、プラナリアの交替性転向反応について調べた例はあったものの、中にはその存在を肯定するものも否定するものもあり<sup>(2)</sup>、その有無は不明である。本研究ではプラナリアの交替性転向反応の有無を調べることを目的とした。さらに、プラナリアの交替性転向反応について、そのメカニズムを明らかにすることも目的とした。Bilaterally asymmetrical leg movements 仮説

(以下、BALM仮説) は、生物が左右の足の作業量を均一化しようとするために分岐点を交互に曲がり、その結果として交替性転向反応が起こるとする (図3)。オカダンゴムシの交替性転向反応はこの仮説によって説明できるとされているが<sup>(3)</sup>、同様にこの仮説でプラナリアの反応が説明できるか検証した。

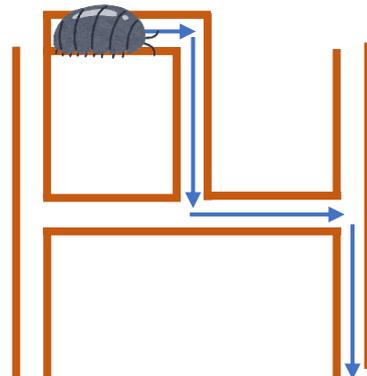


図2: 交替性転向反応

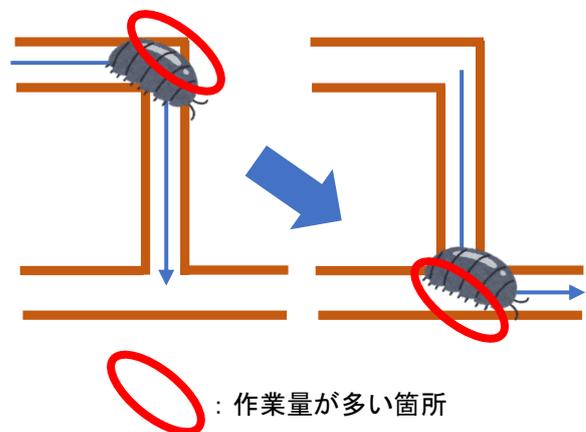


図3: BALM 仮説

## 2 方法と仮説

迷路内におけるプラナリアの動きを観察する実験を行った。プラスチック製の透明な下敷きに瞬間接着剤で木材を貼りつけ、木製迷路を作成した。この迷路を水中に沈め、スタート地点にプラナリアを入れ、プラナリアの動きを観察した。実験では、石川県七尾市大谷川で捕獲した約100匹のプラナリアを使用した。実験中、水深は約5 mm、水温は約10度に保った。

### <実験1>

プラナリアが交替性転向反応を示すのか調べた。最初にプラナリアを右に強制転向させる角があり、その先に2連続のT字分岐路がある迷路を使用した(図4)。コースの幅は4 mm、各直線コースの長さはすべて20 mmとした。図中の分岐点①を第一分岐点、分岐点②を第二分岐点とし、迷路内において、2つの分岐点でのプラナリアの転向の様子を観察した(N=119)。前の転向と逆方向に曲がったものをパターン1、同じ方向に曲がったものをパターン2と記録した(図5)。プラナリアが交替性転向反応を示すなら、プラナリアは前回と逆方向に転向しながら進むため、パターン1が繰り返される。

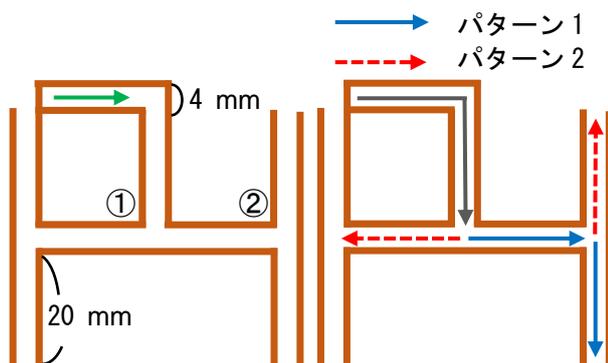


図4：実験1で使用した迷路

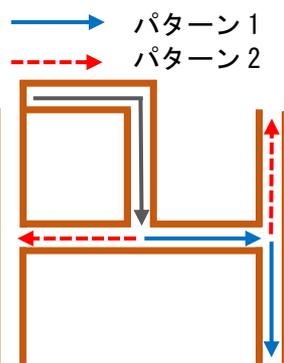


図5：実験1の記録方法

### <実験2>

プラナリアの交替性転向反応をBALM仮説によって説明できるかを検証した。最初にプラナリアを右に強制転向させる角があり、その先に第一分岐点としてY字の分岐路、第二分岐点としてT字の分岐路を持つ迷路を使用した(図6)。コースの幅は4 mmで、各直線コースの長さはすべて25 mmとした(図6)。図中の分岐点③がY字分岐点、分岐点④がT字分岐点である。木製迷路のY字分岐点の角度 $\theta$ を30度、45度、60度と変化させ、T字分岐点での転向の様子を各角度で28回ずつ観察した。このとき、Y字分岐点で、強制転向と逆の左方向に転向したプラナリアのうち、T字分岐点において、Y字分岐点での転向と逆方向、すなわち右に転向したものをパターン1、Y字分岐点での転向と同じ方向、すなわち左に転向したものをパターン2と記録した(図7)。BALM説がプラナリアの動きにも適用されるとすれば、Y字分岐点の角度が大きいとき、プラナリアが左への転向に必要な体の右側の作業量が大きいため、T字分岐点で右に曲がる傾向は強まる。一方で、Y字分岐点の角度が小さいとき、プラナリアが左に曲がるのに必要な体の右側の作業量が小さくてすむため、T字分岐点で右に曲がる傾向は弱まると考えられる(図8、9)。

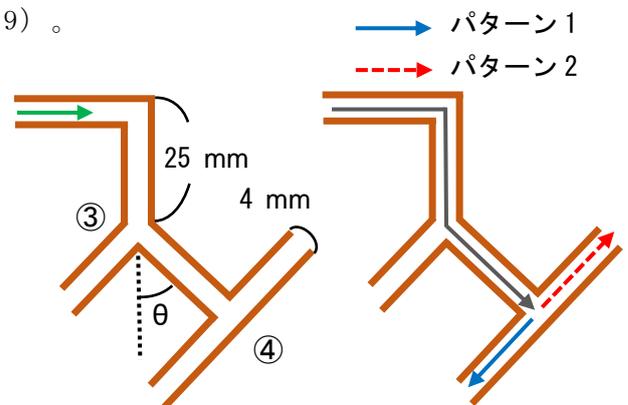


図6：実験2で使用した迷路

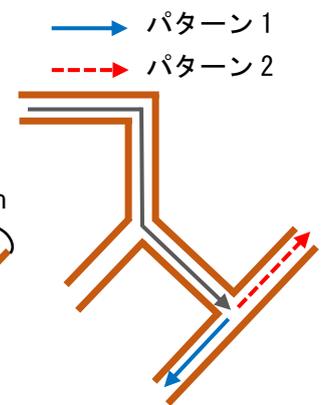


図7：実験2の記録方法

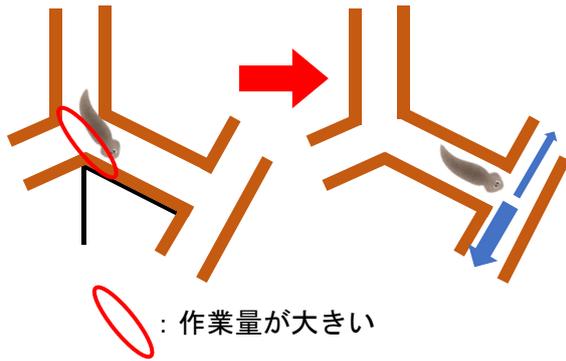


図8：実験2の仮説、BALM説が適用される場合 (角度大)

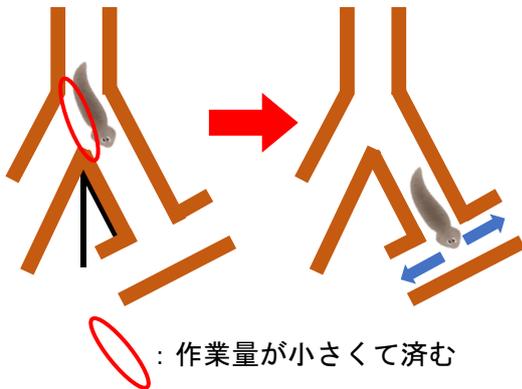


図9：実験2の仮説、BALM説が適用される場合 (角度小)

### 3 結果

< 実験1 >

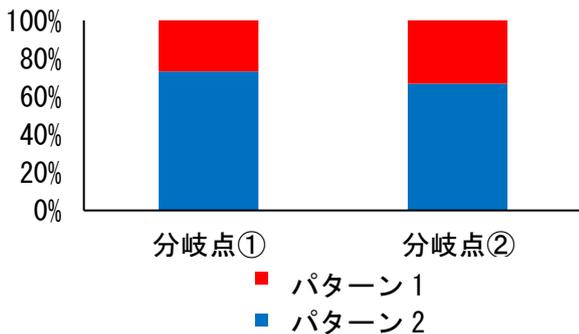


図10：2分岐点におけるパターン1、2の割合

第一分岐点では、119回の試行のうちパターン1が87回、パターン2が32回で、73.1%の確率でパターン1が記録されたことになる。第一分岐点で記録された87回のパターン1のうち、第二分岐点では、パターン1が58回、パターン2が29回で、66.7%の確率でパタ

ーン1が記録されたことになる。いずれの分岐点においても有意に前回と反対方向に曲がった (図10、正確二項検定、 $p < 0.05$ )。

< 実験2 >

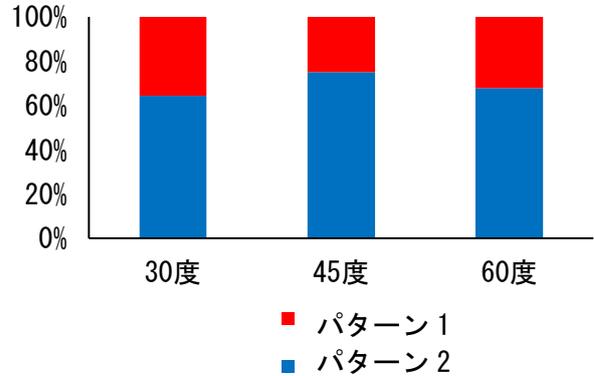


図11：各角度におけるパターン1、2の割合

Y字分岐点の角度が30度の迷路では、パターン1が18回、パターン2が10回で、64.7%の確率でパターン1が記録されたことになる。45度の迷路ではパターン1が21回、パターン2が7回で、75.0%の確率でパターン1が記録されたことになる。60度の迷路ではパターン1が19回、パターン2が9回で、67.9%の確率でパターン1が記録されたことになる。これらの各角度のY字路の迷路の結果間に有意差は認められなかった (図11、 $\chi^2$ 検定、 $p > 0.05$ )。

### 4 考察

実験1より、いずれの分岐点においてもプラナリアが有意に反対方向に曲がったことから、プラナリアは交替性転向反応を示すと考えられる。

実験2で、Y字分岐点の角度が大きくなってT字分岐点で前回転向と逆に曲がる傾向が強まらないことから、プラナリアの交替性転向反応がBALM説では説明できないと分かった。すなわち、他の要因が働いていると考えられる。

### 5 今後の展望

交替性転向反応のメカニズムを説明するBALM説以外の有力仮説に、接触走性説がある。この仮説では、左右一方の壁に沿っているとき、その壁がなくなったところ、つまり次の分岐点で沿っていた壁の方向に曲がり、その先で逆側に沿うため、次は逆方向に転向する、ということが起こるとする(図12)。今後はこの仮説の検証を行っていく必要があると考えている。プラナリアを迷路内に入れ、T字分岐点において左右どちらに沿っているか観察する。その後、転向方向を調べ、それらに関係があるか調べる(図13)。接触走性説がプラナリアに適用されるなら、沿っていた壁側に有意に転向する傾向がみられると考えられる。

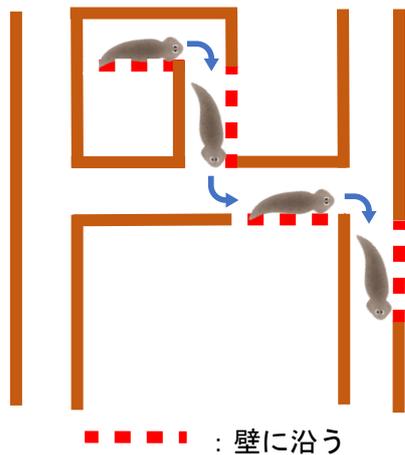


図12:接触走性説

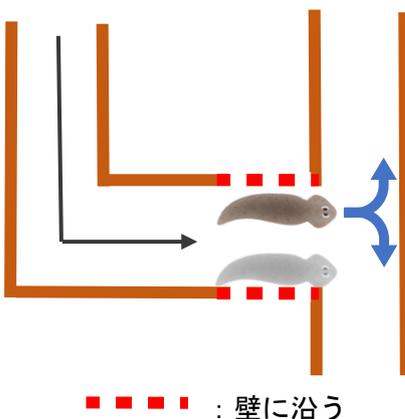


図13:接触走性説の検証

## 6 参考文献

- (1) Nakagawa. アクアリンクスタッフブログ. 水槽の厄介者?プラナリア!. 2020. 10. 02

(参照 2021-03-10)

<https://www.aqualink.tv/wp/puranaria-20200901/>

- (2) 田中凌河、畠山晃季、小宮山慧之、大橋秋月. プラナリアの交替性転向反応について. 平成31年度理数科課題研究論文集. 2021. p. 3 - 6
- (3) 草野ゆうか、新妻裕翼. オカダンゴムシの交替性転向の仕組みを探る. (参照 2021-03-10)  
[https://katosei.jsbba.or.jp/view\\_html.php?aid=336](https://katosei.jsbba.or.jp/view_html.php?aid=336)

# 卵殻と卵殻膜が菌を防ぐ機構について

班員 池野 ケイラ文、香川 泰樹、寺井 美優、寺谷 勇磨  
担当教諭 井上 翔吾

キーワード： 卵殻膜 卵殻 抗菌作用 化学物質 物理的構造

We researched a physical and chemical mechanism by which eggshells prevent fungus and bacteria from invading the inside of the egg. Eggshell membranes have a mechanism to prevent lactic acid bacteria from invading the interior of the egg. The complex and mesh structure of eggshell membranes, and small holes in the eggshell prevent bacteria from penetrating them.

## 1 はじめに

卵は生鮮食品の中でも腐りにくい食品である。そこで、私たちは卵が菌をどのように防いでいるのか疑問に思った。卵は卵殻、卵殻膜、卵白によって、菌を防いでいることが知られている。卵白では、抗菌作用があるリゾチームが働いていることが知られている。卵殻膜とは卵の内側にある0.07mmの薄い膜で、外部の微生物から内部を守るものだが、その抗菌作用についての研究は少ない。そこで私たちは、卵殻膜とその外側の卵殻が菌を防ぐ作用をさらに詳しく知りたいと考えた。先行研究では卵が菌を防ぐ仕組みについて卵殻膜はムコ多糖類似物とケラチンからなり、そのうちケラチンはタンパク質分解酵素に対して、高い抵抗性をもつことが分かっている。卵殻膜の構造については、網目状の構造をしていることが知られている。

私たちはこれらの先行研究をもとに卵殻と卵殻膜の抗菌作用を化学的観点、物理的観点から調べるため、ディスク法を用いた実験と電子顕微鏡での観察を行った。

## 2 材料・方法

### I 卵殻膜が持つ抗菌作用

卵殻に含まれる化学物質による抗菌作用を調べるため次の実験を行った。実験では真菌のイースト菌と細菌の乳酸菌を用いた。サブロー寒天培地上にイースト菌、乳酸菌を塗布し、正

方形(1辺5mm)に切った卵殻膜をその表面に等間隔に9個置いた。この寒天培地を36℃でインキュベートし、毎日デジタルカメラで撮影し菌の生え方を観察した。

### II 卵殻膜の作用の時間による変化

実験Iと同様の方法で実験を行った。実験IIでは採取後すぐと採取後2週間の卵殻膜を使用し、卵殻膜の作用が時間により変化するかを調べた。実験Iと同様に毎日観察した。

### III 卵殻と卵殻膜の電子顕微鏡での観察

卵殻と卵殻膜をそれぞれ内側、外側と、その断面から電子顕微鏡を用いて写真を撮影し観察した。

卵殻と卵殻膜の物理的構造が菌の内部への侵入を防いでいる可能性がある。これを調べるため、電子顕微鏡により撮影を行った。

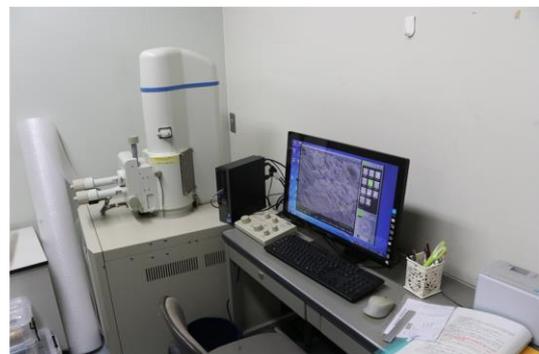


図1 使用した電子顕微鏡

### 3 結果

#### I 卵殻膜が持つ抗菌作用

どちらの菌を使用した実験でも、卵殻膜の周りに菌の拡大が止められた場合に見られる阻止円はできなかつた。次に、卵殻膜の作用を調べるために卵殻膜のどれくらいが菌に覆われているか確認し、被度を比べた。イースト菌では卵殻膜上の菌の被度に偏りはなく、膜全体が覆われた場合も多かった(図2)。一方、乳酸菌では卵殻膜上の菌の被度が半分未満のものが多かった(図3)。

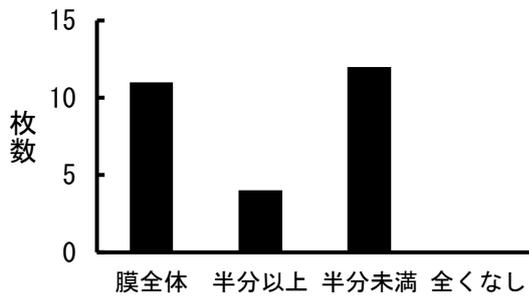


図2 卵殻膜上のイースト菌の被度

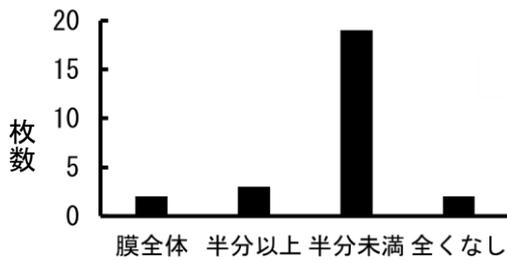


図3 卵殻膜上の乳酸菌の被度

#### II 卵殻膜の作用の時間による変化

実験Iと同様に阻止円はできなかつた(図4, 5, 6, 7)。イースト菌では新しい膜と古い膜で膜上の菌の被度に差はなかつた(図8)。乳酸菌では、新しい膜より古い膜の上に多くの菌が生え、明らかに卵殻膜の作用が時間によって異なっていた(図9)。

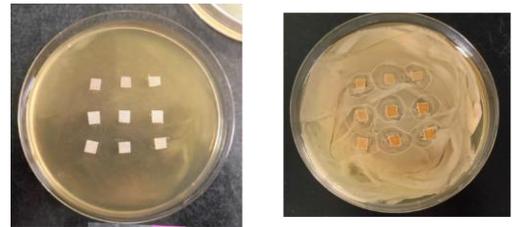


図4 イースト菌(採取後すぐ)の変化

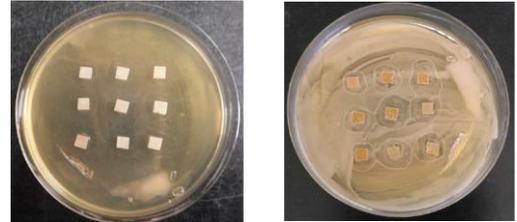


図5 イースト菌(採取後2週間)の変化



図6 乳酸菌(採取後すぐ)の変化



図7 乳酸菌(採取後2週間)の変化

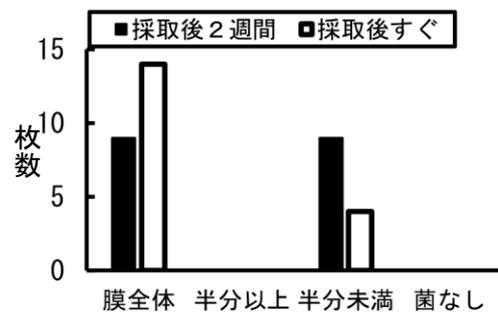


図8 卵殻膜上のイースト菌の被度

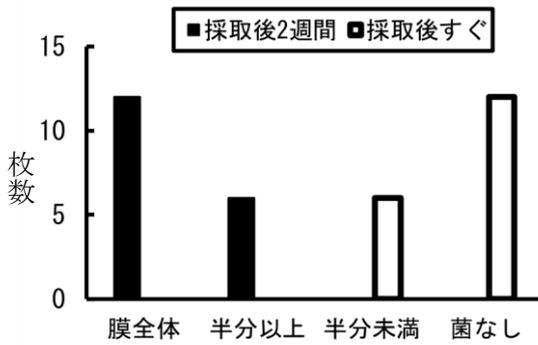


図9 卵殻膜上の乳酸菌の被度

### III 卵殻と卵殻膜の電子顕微鏡での観察

卵殻の外側の観察では卵殻に約  $0.2\mu\text{m}$  の小さな穴と約  $0.9\mu\text{m}$  の大きな穴が存在することが分かった(図10)。卵殻の内側の観察では、卵殻膜を卵殻から完全に切り除くことができていなかったため、卵殻膜と同様の構造が見られ卵殻内側の構造を観察することはできなかった。

卵殻膜の外側の観察と内側の観察で卵殻膜は繊維でできた複雑な網目構造をしていることが分かった(図11)。

さらに、卵殻膜の断面の観察からは網目状の構造が何層か重なった構造が確認された(図12)。

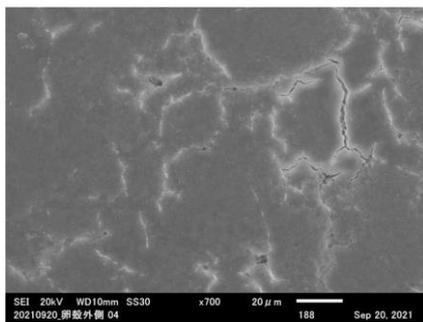


図10 卵殻外側の電子顕微鏡写真

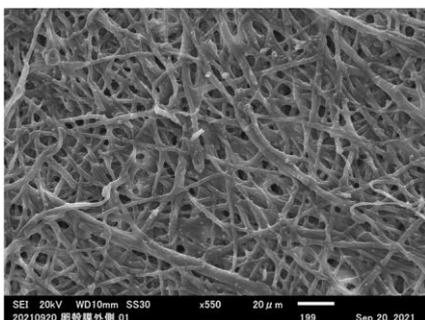


図11 卵殻膜外側の電子顕微鏡写真

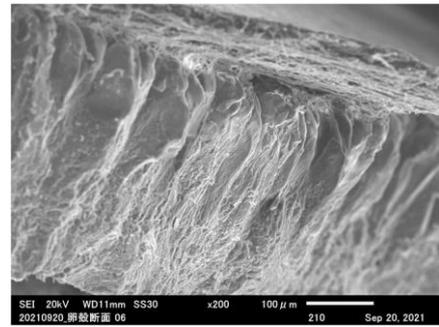


図12 卵殻・卵殻膜断面の電子顕微鏡写真

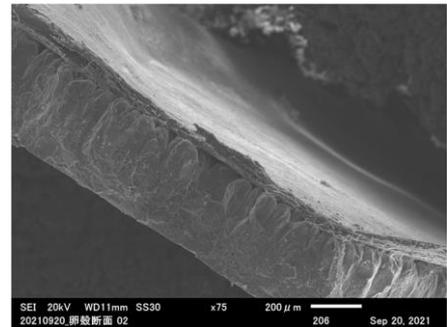


図13 卵殻・卵殻膜断面の電子顕微鏡写真

## 4 考察

### I 卵殻膜が持つ抗菌作用

イースト菌の実験では卵殻膜上の菌の被度に偏りはなかったが、乳酸菌の実験では菌の被度が小さいものが多かった。このことから、卵殻膜は膜外の菌の生育を防ぐ効果を持たないが、膜上の乳酸菌の生育を防ぐと考えられる。先行研究によると、卵殻膜はケラチンとムコ多糖類似物からなる<sup>(1)</sup>。タンパク質を分解して増殖する乳酸菌に対して、タンパク質分解酵素に高い抵抗性をもつケラチンが分解を阻害したため、卵殻膜は乳酸菌の増殖を防いだと考えられる。さらに卵殻膜の周りに多くの乳酸菌が集まっていたが、膜上で乳酸菌は生えていなかったため、卵殻膜上で乳酸菌を防ぐ作用は強いと考えられる。一方で、糖を分解して増殖するイースト菌の生育は防がなかった。これはイースト菌に対する抵抗性を持たない卵殻膜のムコ多糖類似物をイースト菌が分解して増殖したためだと考えられる。

また、卵殻膜上のイースト菌の被度の差から、1つの卵の卵殻膜の中でも効果の強さに差があると考えられる。

## II 卵殻膜の作用の時間による変化

イースト菌の実験では採取後すぐの膜と採取後2週間の膜で違いが見られなかったが、乳酸菌を使用した実験では、採取後すぐの膜に比べて、採取後2週間の膜上に多くの乳酸菌が生えていた。このことから、膜上の乳酸菌の生育を防ぐ効果は時間が経つにつれて弱くなると考えられる。

## III 卵殻と卵殻膜の電子顕微鏡での撮影

卵の構造の観察で卵殻の穴の大きさは0.2~0.9 $\mu\text{m}$ であった。細菌の大きさは0.5~5 $\mu\text{m}$ なので、卵殻はほとんどの細菌の侵入を防ぐことができていると考えられる。卵殻を通り抜けてきた細菌は、卵殻膜の層状の複雑な網目構造が、内部への侵入を防いでいると考えられる。

## 5 今後の展望

卵殻膜の膜上の乳酸菌の生育を防ぐ効果が時間によって弱まる原因を調べていきたい。また、イースト菌と乳酸菌に対する効果に違いが生じた原因について考察したが、その考察が正しいのか確かめていきたい。そして、細菌と真菌の間で卵殻膜の効果に差があるのか調べるために、菌の種類を増やして実験をしていきたい。さらに、今回の化学物質の抗菌作用について調べる実験では、卵殻膜についてのみ実験を行った。卵殻の成分の抗菌作用についても調べていきたい。また、今回電子顕微鏡で観察した卵殻は一部を取り出したものであった。卵の部位によって卵殻の構造が異なる可能性もある。今後、卵の様々な部位から卵殻を取り、それらについて電子顕微鏡写真を撮影し、比較したい。今回の実験では、鶏卵のみを使用して実験した。別の動物の卵と比較して、卵の防御メカニズムをさらに探していきたい。

## 6 謝辞

金沢大学のロバート・ジェンキンス先生には、電子顕微鏡を使う際にお世話になりました。ありがとうございました。

## 7 参考文献

- (1) 一島英治. 卵にみる生体の防御機構. 1975. 化学と生物. Vol 13 No8. 489-497
- (2) 田中美樹、小西那奈、田原早央莉、松井千佳、小林周平、可知佳晃、谷藤尚貴. 卵殻膜が食品の劣化防止剤に生まれ変わるリサイクル法の開発. 化学と生物. Vol 53 No5. 335-337
- (3) 中島肇. 乳酸菌はミルクのタンパク質をどのようにして利用するのか 日本家政学会誌 2016. Vol 67 No12. 709-713
- (4) 藤田恵理、金野智浩、清水美穂、石原一彦、杉立年弘、三宅淳、吉村浩太郎、谷脇香、桜井隆史、長谷部由紀夫、跡見順子. ホスホリルコリンポリマー上に固定化した加水分解卵殻膜は、ヒト皮膚線維芽細胞に細胞外マトリクス環境を与える. Springer .2011

# 石の発光と石の硬度や含まれる鉱物との関係

班員 伊豆 南美、大能 侑愷、楠 士門、長谷 さくら

担当教諭 井藤 龍真

キーワード：石英含有率、硬度、圧電効果、ペロブスカイト構造

The luminescence of a stone is not related to its hardness, but to its quartz content. Specifically, when two stones are struck together, the luminescence of a stone is not influenced solely by the quartz content of one of the stones, but by the quartz content of both stones. The higher their quartz content, the luminescence. It was also found that some stone do not follow this regardless of their hardness or quartz content.

## 1 はじめに

私たちは、2つの石を打ち合わせた際に見られる発光が、それらの石の硬度の違いや石に含まれる鉱物によって、どのような影響を受けるのか研究を行った。はじめに海岸で拾った石同士を暗所で打ち合わせてみたところ、石が発光した。何度か石を変えて行ってみると、組み合わせによって光る場合と光らない場合があることが分かった。不思議に思い調べてみると、石を打ち合わせた時の発光は①火打石と火打金により火花が生じる現象と②圧電効果による現象とがあることが分かった。私たちが観察した現象では、火花は生じておらず、石の内部から発光しており、圧電効果による発光と考えられた。圧電効果による発光現象では、石にかかる圧力により、石内部のペロブスカイト型結晶の構造が変化し、電圧が生じることで発光する。そこで、石の硬度と石に含まれる鉱物、特に先行研究により、発光現象には石英が関係していることが示唆されていたため、石英の影響を明らかにすることを目的とし、以下の仮説を立て、実験を行った。①石の硬度<sup>②</sup>が高いほど、石英の結晶構造が大きく歪み、圧電効果が顕著に見られる。②石英含有率が高くなるほど、石英の結晶構造が占める割合が増加し、圧電効果が顕著に見られる。これらの仮説を検証することを目的に実験を行った。

結果としては①石の硬度は一方が高いと発

光が多くみられた。②石英含有率が高いほど発光は多くみられた。これらの結果は圧電効果を用いて、発電を行う発電床などの効率を上げる際に役立つと考えられる。

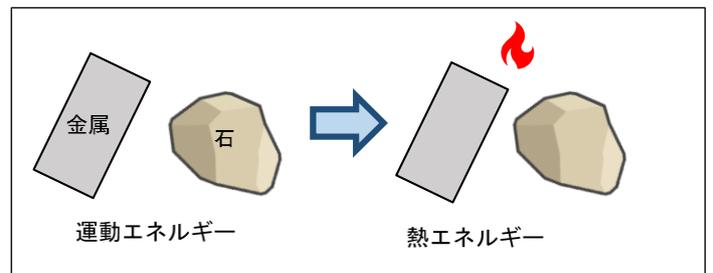


図1 火打石の原理

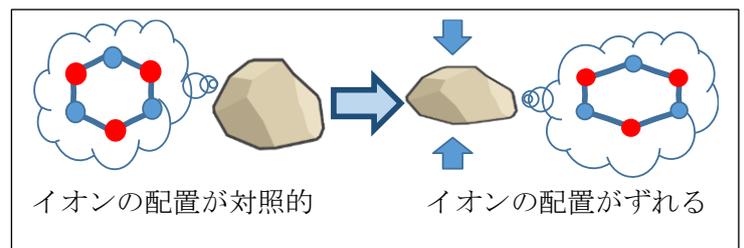


図2 圧電効果の原理

## 2 実験方法

実験で使った石は、石川県白山市の手取川河川敷で採集した。硬度や成分の違いに注目し、これらが異なる石が含まれるよう注意し、全部で25個採集した。この石に1から25までの番号を付け区別した。ただし、この番号は石どうしを見分けるためのものであり、番号の順番に硬さや成分

の違いなどの意味はない。

これらの石を2個ずつ打ち合わせ、発光の様子を観察した。石の打ち合わせは、暗室で行った。すべての組み合わせについて、人力で石を2個ずつ互いに20回打ち合わせ、発光するかどうかを目視で確認した。打ち付けた20回のうち、1回でも発光した場合に「発光する」とした。この作業を3回おこない、結果を記録した。結果の評価には、この3回のうち何回で「発光する」と記録したかを用いた。

石の硬度や石英の含有量については、目視により判定し、順位を決定した。石が発光した回数を硬度順や石英含有率順に表計算ソフトで整理し、関係の有無を判断した。

### 3 結果

#### I 石の発光と硬度、及び石英含有率との関係

石の硬度と発光回数の関係を見ると、硬度が高い石と低い石の組み合わせで発光回数が多い傾向がみられた(図3)。一方で石英含有量と発光回数の関係を見ると、石英含有率が高い石同士での組み合わせでは発光回数が多く、石英含有率が低い石同士での組み合わせでは発光回数が少ない傾向がみられた(図4)。

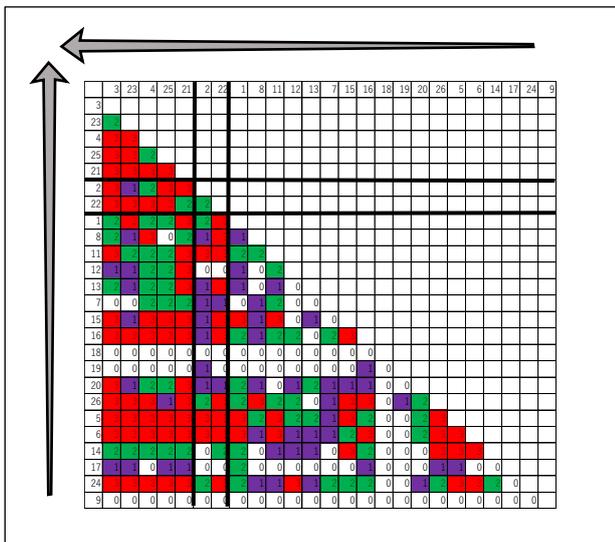


図3 石の硬度と発光回数の関係。  
太線は硬度を3段階に分けた場合の区切りを示す。

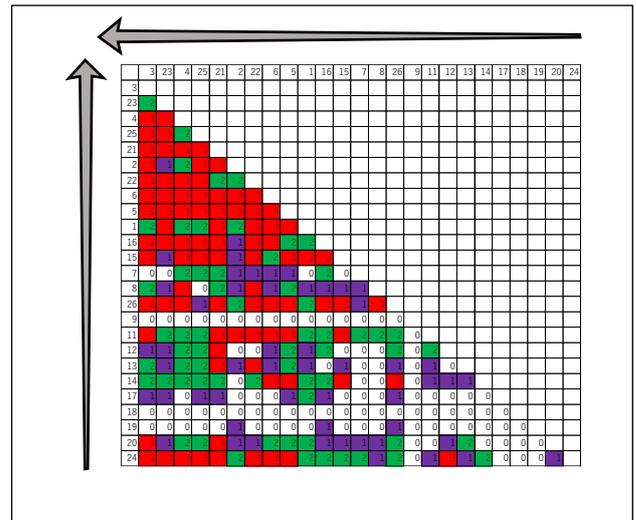


図4 石の石英含有率と発光回数の関係。

II 25個の石を硬度を高中低の3段階にランク分けし、発光頻度に基づく表を作成した(ただし硬度のランク中・高は石英含有率と分け方が同じであり、中と高の間において形成時の特徴により硬度の大きな差が見られなかったため、同じデータのまとまりとした)

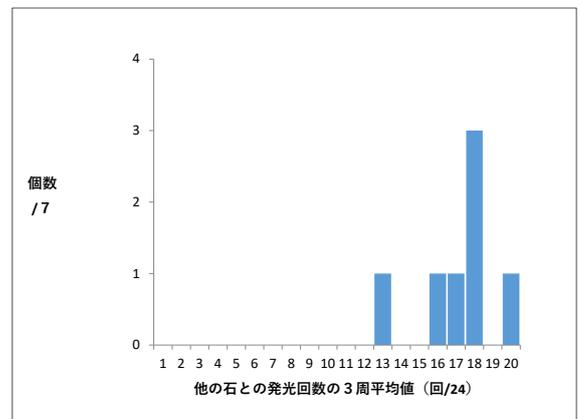


図5 硬度低の発光頻度

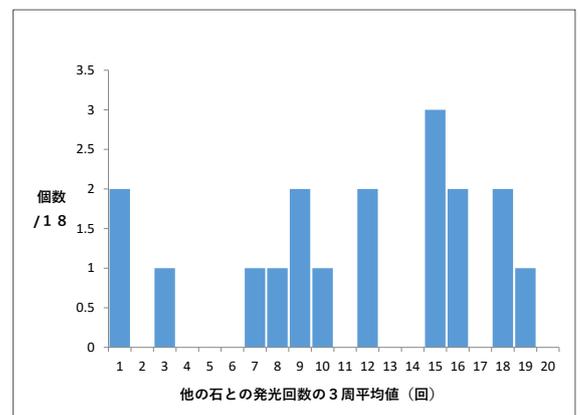


図6 硬度中、高の発光頻度

### Ⅲ 特徴的な結果が得られた

石4、21は他の石との打ち合わせで、他の石同士の組み合わせより比較的多くの発光が見られた。(図7)



図7 発光回数が多い石4、21

石17、20と他の石との組み合わせによる打ち合わせでは他の組み合わせより発光が少なかった。



図8 発光回数が少ない石18、20

石9、18は他の石との組み合わせによる打ち合わせで、発光する組み合わせがなかった。



図9 1度も発光しなかった石9、17

### 4 今後の展望

発光現象は打ち合わせる双方の石の石英含有率が影響することから、石の石英含有率を成分分析することで、2個それぞれの石の石英含有率の比率がどのような場合に発光するのかを調べていきたい。また、石英の体積は温度に影響される(図5)ことから、どのような温度において、石の発光が見られやすいのかも調べたい。

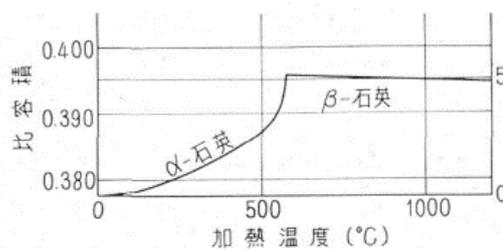


図10 石英の温度による体積変化<sup>③</sup>

### 5 謝辞

金沢大学理工研究地域社会基盤学系の森下知晃教授には研究を進めるに当たって石の成分分析等で大変お世話になりました。ありがとうございました。

## 6 参考文献

(1) 圧電効果による石英の発光実験

<https://nisimoto.wordpress.com/2016/10/17/圧電効果による石英の発行実験/>  
(参照2021 - 04 - 27)

化学大辞典編集委員会. 化学大辞典 7. 共立出版株式会社. 2001-9-20. 縮刷版第37刷  
発行p. 289

(2) 鉱物の硬度

<https://www.istone.org/hardness.html>  
(参照 2021 - 05 - 11)

(3) 熱による岩石の強度の変化あるいは破壊について

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/shigentosozai1953/86/986/86\\_986\\_346/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/shigentosozai1953/86/986/86_986_346/_pdf/-char/ja)

# 熱によってグルテンの形成阻害が起こる仕組みについて

班員 一花 颯志、川崎 水羽、中島 亜依子、谷内 亮太  
担当教員 吉村 彰志

キーワード：グルテン、グルテニン、グリアジン

We found that when flour was heated at 75 degrees and 80 degrees the gluten did not solidify. We think this is because gliadin which is included in gluten, has strong adhesion, and stretches easily, was denatured.

## 1 はじめに

グルテン（図1）とは、小麦粉に含まれる2種類のタンパク質のうち、グルテニンとグリアジンが結合することで形成される（図2）。



図1 小麦粉から取り出したグルテン

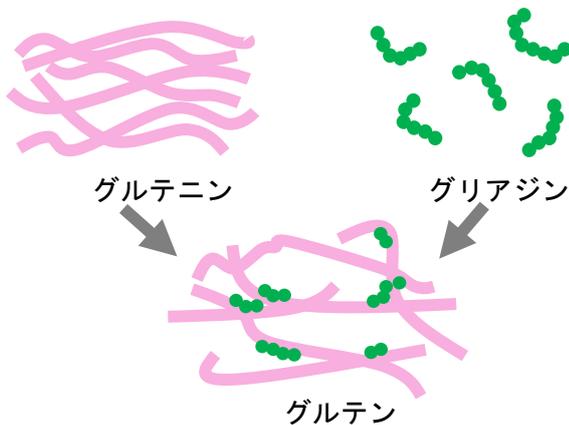


図2 グルテンの形成

グルテニンは弾力に富んでおり伸びにくい性質を持っている。一方、グリアジンは粘着力が強く伸びやすい性質を持っている。

先行研究では、水と薄力粉を練って作った生地を30℃～80℃で加熱し焙焼することで、体積やタンパク質含量が減少することが明らかになっている<sup>(1)</sup>。また、グルテンは、グルテン

に含まれているたんぱく質のうちのグリアジンを過剰に摂取することで、異常な免疫反応を引き起こすセリアック病やグルテン過敏症の症状の原因になることが知られている。そこで本研究では、生地にする前の小麦粉自体を加熱することで病気の原因となるグリアジンの形成を阻害し、症状をやわらげることが期待できると考え実験を行った。

## 2 材料と方法

### <実験1>

各温度別のグルテンの形成量を比較した。

1. 薄力粉（小麦粉）を、湯煎により、加熱した。1000mLと300mLの大小2つのビーカーを用意した。1000mLのビーカーに水を入れ、ガスバーナーで加熱した。ここに薄力粉100gを入れた300mLのビーカーを入れ湯煎により加熱した。このようにして、40℃、45℃、50℃…80℃と5℃ずつ温度を変えて加熱した薄力粉を準備した（図3）。



図3 薄力粉を湯煎する様子

- 薄力粉に蒸留水50mLを加え10分間こねること  
でグルテンを生成させた。
- 水が白く濁らなくなるまでもみ洗いしてグル  
テンを取り出した。
- この操作を各温度別に3回ずつ行った。

### <実験2>

温度別のグルテニンの含有量の変化について  
調べた。

- 実験1と同様の手順でグルテンを取り出し  
た。
- 取り出されたグルテンのうち10gを切り取  
った。
- まず、グルテン10gの両端をそれぞれ段ボ  
ールで挟み(図4)、そのグルテンを段ボ  
ールごと洗濯ばさみで固定した。次に、スマ  
ート台車(島津理科)と段ボールを糸でつ  
なぎ台車を引いた。そしてグルテンが切れ  
たときに加えられた力の大きさとグルテン  
が切れるまでの伸びを計測し(図5)、フッ  
クの法則を用いてばね定数を算出した。グ  
ルテニンは弾性力を持つため、算出したば  
ね定数を相対的な量の指標とした。
- この操作を各温度別に形成されたグルテン  
ごとに2回ずつ行った。



図4 段ボールで挟んだグルテン

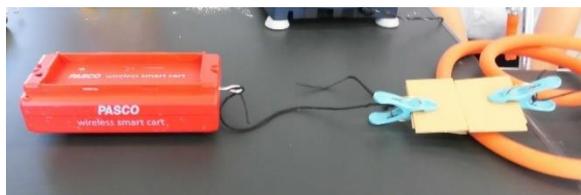


図5 スマート台車(島津理科)を用いた力の実験

### <実験3>

温度別のグリアジンの含有量の変化について  
調べた。

- 実験1と同様の手順でグルテンを取り出し  
た。
- 取り出されたグルテンのうち10gを切り取  
った。
- グルテン10gの両端をそれぞれ段ボ  
ールで挟み(図4)、そのグルテンを段ボ  
ールごと洗濯ばさみを使って一方をスタン  
ドに固定しもう一方に100gの重りを  
に吊り下げて引き、伸びを計測した(図6)。  
グリアジンは伸びやすい性質を持つため、  
計測した伸びを相対的な量の指標とした。
- この操作を各温度別に形成されたグルテン  
ごとに2回ずつ行った。



図6 重りを吊り下げた伸びの実験

## 3 結果

### <実験1>

1回目では75℃で、2回目では80℃でグル  
テンが形成されず、ばらばらになった(図7)。  
3回目では全ての温度でグルテンが形成さ  
れた(表1)。

表1 温度別のグルテン形成量

	40℃	45℃	50℃	55℃	60℃
1回目	25.5	31.9	27.5	28.5	18.9
2回目	27.7	27.8	28.2	28.7	26.0
3回目	29.1	28.7	26.5	28.7	24.8
	65℃	70℃	75℃	80℃	
1回目	22.1	25.1	-	-	
2回目	26.9	25.7	24.0	-	
3回目	27.7	25.5	26.6	21.1	

-はグルテンが生成されなかったことを示す。



図7 パラパラな状態

<実験2>

1回目と2回目のどちらもばね定数の値は約50N/m~100N/mの間に収まった。それぞれグルテンの温度とばね定数の相関係数をだしたところ1回目では約0.60、2回目では約0.29であった。これらの値は強い相関があるといえる0.7以上1.0未満の相関係数の範囲を満たしていない。このことから、温度とばね定数の間に有意な相関関係は見られないといえる(図8)。

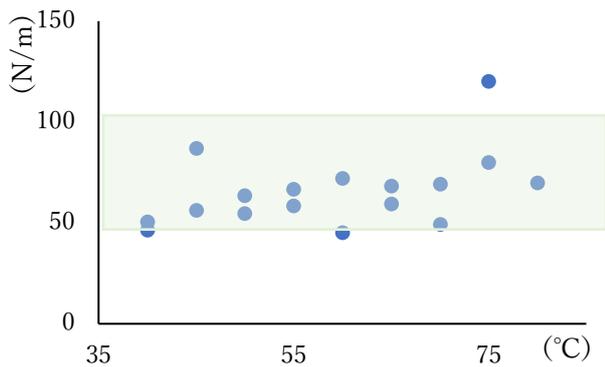


図8 加熱した温度とばね定数の関係

<実験3>

1回目と2回目で計測された伸びの値の平均をとると、温度が上がるにつれてグルテンの伸びが小さくなっていることが分かった。グルテンの温度と伸びの相関係数をだしたところ約0.78であった。この値は強い相関があると言える0.7以上1.0未満の相関係数の範囲を満たしていた。このことから、温度と加熱された伸びとの間に有意な負の相関関係が見られるといえる(図9)。

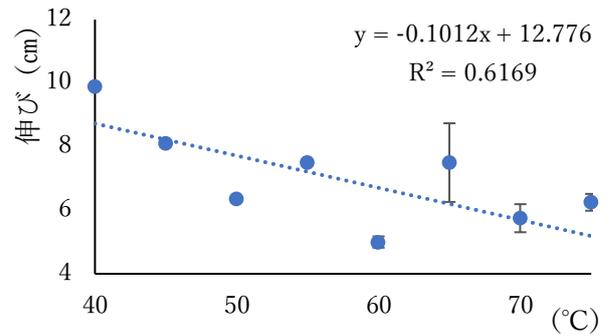


図9 加熱した温度と伸びとの関係

4 考察

実験1の各温度別のグルテン形成量を計測する実験より、75℃、80℃で熱するとグルテン生成が阻害されると考えられる。1回目、2回目、3回目で結果に差が見られたが、これは加熱する際に薄力粉をビーカーの中でうまく混ぜることができておらず、薄力粉の温まり方がまばらになった可能性がある。

実験2のグルテニンの熱変性による相対的な量の変化を調べる実験では、加熱した温度と測定したばね定数との間に有意な相関関係は見られなかった。そのため、弾性力をもつグルテニンには温度は影響しないと考えられる。

実験3のグリアジンの熱変性による相対的な量の変化を調べる実験では、加熱した温度とグルテンの伸びとの間に有意な負の相関が見られた。このことから、高い温度で加熱された薄力粉から取り出したグルテンはグリアジンの持つ性質が弱くなっており、グリアジンが熱によって変性したと考えられる(図10)。

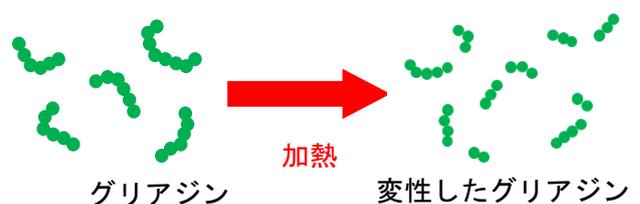


図10 グリアジンの変性のようす

これらのことから、薄力粉を75℃～80℃で加熱するとグルテンの形成が阻害されるが、それはグルテンを構成するタンパク質のうち粘着力を持つグリアジンが変性したためであると考えられる。

## 5 今後の展望

今回の実験では、グルテニンとグリアジンの性質に着目して実験を行ったが、台車を引っ張る際の力のかけ具合やグルテンの引っ張り方によって結果にばらつきが生じ、正確な値を得るのが難しかった。そこで、実際にグルテンからグリアジンとグルテニンを取り出す実験を行っている。

グリアジンは、エタノールに溶けやすい性質をもつ。これを利用して、グルテンから以下のようにしてグリアジンを取り出すことができる。グルテンにエタノールと水を混ぜ、40℃～50℃の湯浴で湯煎し、グリアジンのエタノール抽出液を得る。このエタノール抽出液をろ過し、ろ液を蒸発させると、グリアジンが得られる(図11)。



図11 取り出されたグリアジン

グルテニンはエタノールに溶けないため、前述のエタノール抽出液を得た際に出た残渣には、グルテニンが含まれている。グルテニンは酸、アルカリに溶けやすい性質をもつ。残渣に水酸化ナトリウムを加えて一晩放置し、ろ過し

て得たる液に塩酸を加えることで、グルテニンが得られる(図12)。

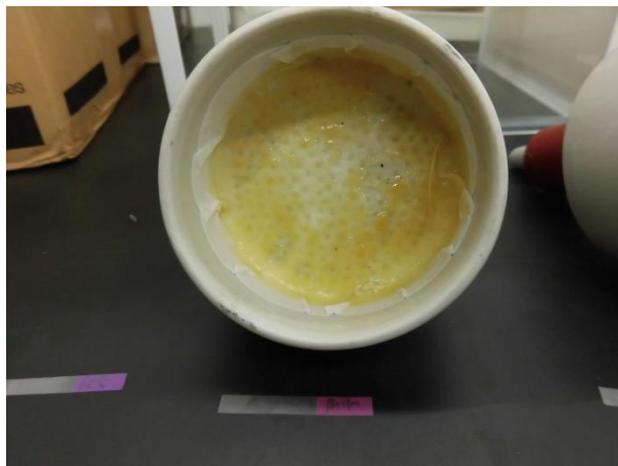


図12 取り出されたグルテニン

この実験の結果から、高い温度で熱した薄力粉から取り出したグルテンほど、グルテニンの量が少なくなっていれば熱によってグルテニンが変性したことが分かる。また、グリアジンの量が少なくなっていれば熱によってグリアジンが変性したことが分かる。さらにグルテニン、グリアジンの両方が少なくなっていれば両方ともが熱によって変性したことが分かる。

これらの実験を引き続き行っていき、それぞれ得られたグルテニン、グリアジンの量を比較しながらグルテンの形成阻害が起こる仕組みについて解明していきたいと考えている。

## 6 参考文献

- (1) 比留間トシ, 松元文子. 小麦粉の調理に関する研究(第9報)グルテンについて
- (2). 1963. Vol 14 No5. P345-350

# キレート剤で茶渋の生成を抑制する

班員 岩本 緩音、小島 悠、曾原 桜音、三井 鈴加  
担当教諭 高橋 潤哉

キーワード：茶渋、ポリフェノール、キレート剤、金属イオン、凝集物

We researched the controlling of tea stain generation with chelating agent. A chelating agent could control generation and eliminate tea stains. However, it appeared that the removal effect of chelating agent was reduced, as time elapsed after the tea stains were formed.

## 1 はじめに

紅茶やコーヒーにはポリフェノールという、植物が光合成によって生成する抗酸化物質が含まれる。水に含まれるマグネシウムイオンやナトリウムイオンなどの金属イオンがポリフェノールと結合し、「茶渋」が生成される。ポリフェノールと金属イオンの結合を阻害すると、茶渋の生成を抑制できると考え実験を行った。

## 2 材料

実験の材料は二つある。一つ目は硬水のミネラルウォーターで硬度304mg/L、pH7.2で100mLにカルシウムが8.0mg、マグネシウムが2.6mg、ナトリウムが0.70mg含まれているミネラルウォーターを使用した。硬水はより多くの金属イオンを含むため、茶渋が生じやすく、実験において茶渋が生成された時と茶渋の生成が抑制された時の違いが分かりやすいため使用した。二つ目はキレート剤である。これは金属イオンと結びつきやすい物質であるため、ポリフェノールと金属イオンの結合を阻害するのではないかと考え使用した。本実験では、阻害剤としてクエン酸とエチレンジアミン四酢酸（以下EDTAと表記する）を使用した。

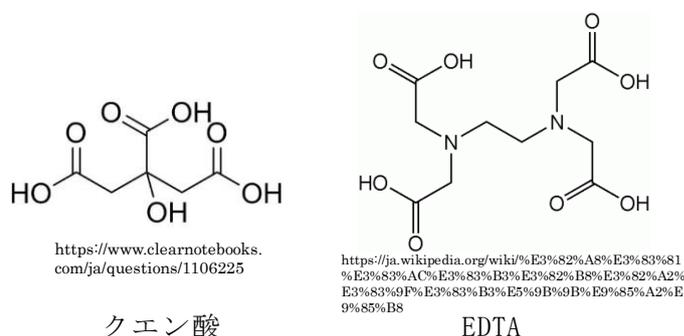


図1

## 3 実験

### ○実験1

キレート剤が茶渋の生成を抑制できる効果を調べた。まず、ミネラルウォーターにクエン酸またはEDTAを溶かし0.05mol/L水溶液250mLをつくった後、沸騰させてからティーバッグを入れ紅茶を作った。30分後にティーバッグを取り出し、紅茶の濁り、凝集物の有無などを観察した。

### ○実験2

キレート剤を加えるタイミングを紅茶を作った後にすることにより、キレート剤の効果が変化するかを調べた。沸騰させたミネラルウォーター250mLにティーバッグを入れ、その直後、15分後、30分後にクエン酸またはEDTAを0.05mol/kgとなるように加えた。そして、30分後にティーバッグを取り出し、紅茶の濁り、凝集物の有無などを観察した。

### ○実験3

クエン酸の効果の違いが温度に関係しているか調べた。沸騰させた蒸留水100gにティーバッグを入れ、10分間抽出した。そこに、ミネラルウォ

ウォーター100 gを加え、30°C、40°C、50°Cに設定したウォーターバスに入れた。その直後にクエン酸を0.05mol/kgとなるように加え、吸光光度計でクエン酸を加えた直後、15分後、30分後、45分後の4回に分けて透過率を測定した。

#### ○実験4

クエン酸の効果の違いが投入時間に関係しているか調べた。実験3と同じ手順で実験を行い、ウォーターバスに入れた直後、15分後、30分後にクエン酸を加え、クエン酸を加えた直後、15分後、30分後に透過率を測定した。

### 4 結果

#### ○結果1

キレート剤を加えなかった紅茶は濁っており、凝集物が浮いていた。しかし、クエン酸またはEDTAを加えた紅茶はどちらも透明で、凝集物はなかった。



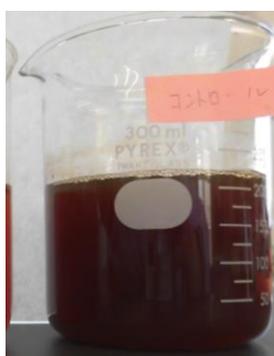
クエン酸 EDTA キレート剤なし

図2

#### ○結果2

〈キレート剤なし〉

キレート剤を加えていない紅茶は、実験1と同様に濁っていて、凝集物が浮いているのが見られた。



キレート剤なし

図3

〈クエン酸〉

クエン酸を加えた紅茶には凝集物はなく透明だった。15分後にクエン酸を加えた紅茶は直後にクエン酸を加えた紅茶よりも少し濁っていた。



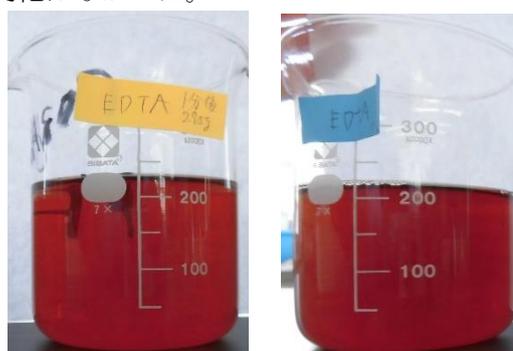
直後

15分後

図4

〈EDTA〉

EDTAを加えた紅茶には凝集物がなく透明で、濁りの変化はなかった。



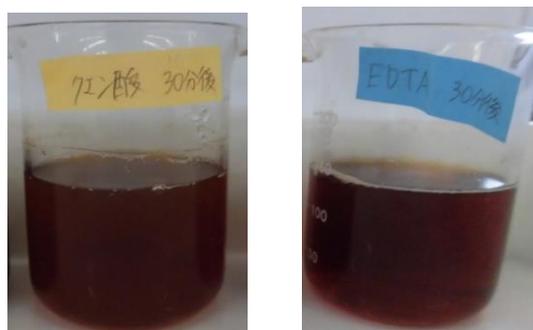
直後

15分後

図5

〈30分後にキレート剤を加えた紅茶〉

クエン酸、EDTAを紅茶に加えて混ぜると、浮いていた凝集物や濁りが消え、EDTAを加えたものは透明になった。しかし、クエン酸を加えた紅茶はEDTAを加えた紅茶より凝集物や濁りが残っていた。



クエン酸

EDTA

図6

透過率を比較するためにそれぞれの透過スペクトルを可視光波長領域 380nm~770nm の範囲で積分して面積を出し、その面積を比較した。

○結果3

クエン酸をウォーターバスに入れた直後に加えた場合、30℃と40℃のときはどちらも透過率が大きく、除去効果が共に大きかった。しかし、50℃のときには透過率が大幅に減少し、除去効果が小さかった。クエン酸を加えていない紅茶では、50℃のときの透過率の減少幅が、30℃と40℃のときより大きくなった。

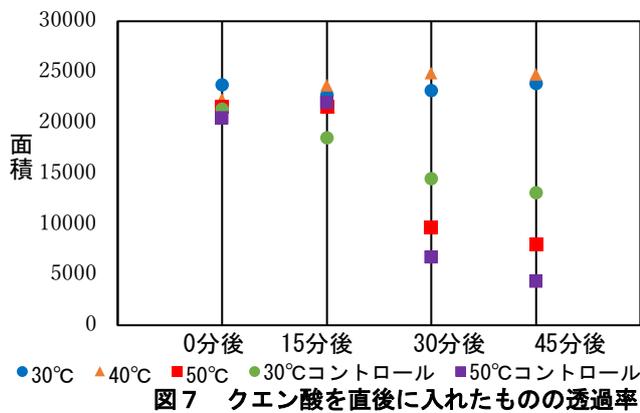


図7 クエン酸を直後に入れたものの透過率

○結果4

結果3と同じ方法で比較を行った。30℃では、どのタイミングでクエン酸を加えた場合であっても加えた直後には透過率が変化せず、15分後に透過率が上昇した。

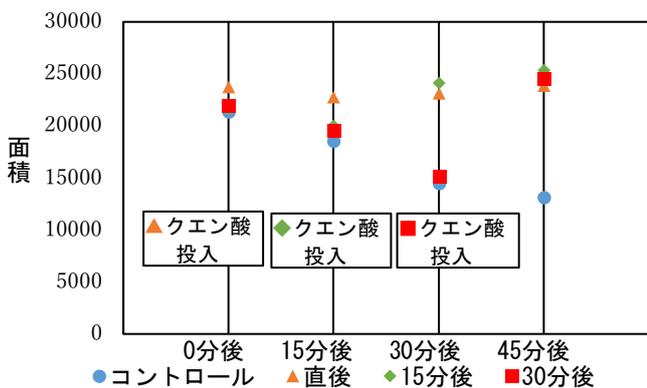


図8 30℃の透過率

40℃では、クエン酸を投入した時間が遅いほど透過率は低くなった。

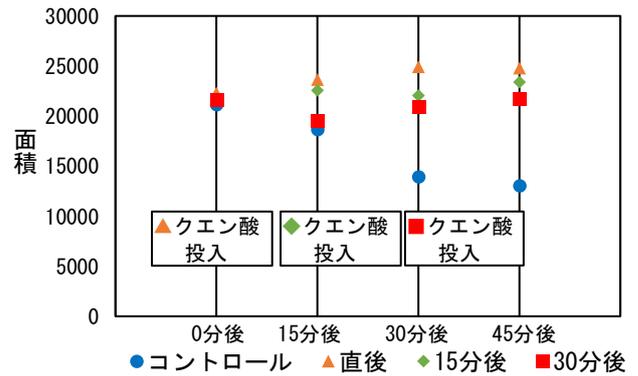


図9 40℃の透過率

50℃の場合では、30℃、40℃の時と比べてクエン酸投入後の透過率上昇が小さかった。

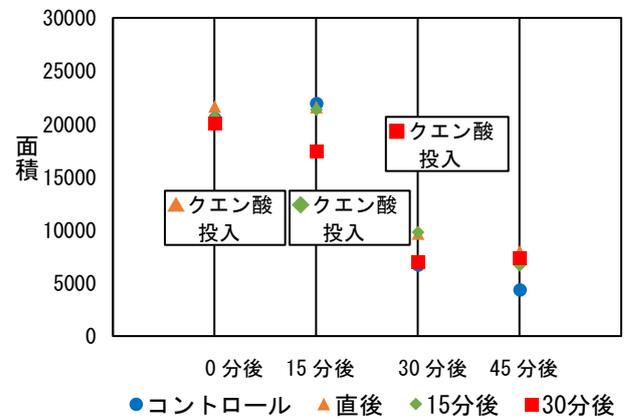


図10 50℃の透過率

〈実験で見られた現象〉

実験2、3においてクエン酸を加えた紅茶すべてに実験1で見られた茶渋のもととなっているものとは異なる凝集物が見られ、この凝集物はクエン酸の量を少なくしても現れた。この凝集物は、キレート剤を加えたことによるキレート剤と金属イオンとの塩の形成と関係しているのではないかと考えられる。

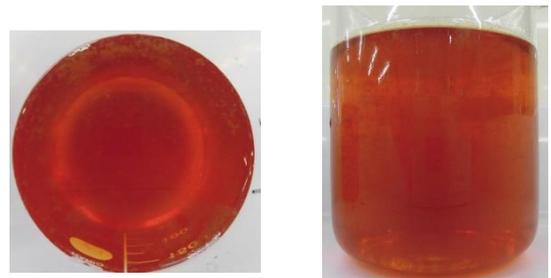


図11

## 5 考察

実験1～3で、クエン酸またはEDTAを加えたことによってポリフェノールと金属イオンが結合したものである茶渋の生成を抑制、または茶渋を除去することができたことから、クエン酸とEDTAはポリフェノールと同等以上に金属イオンと結合しやすいことが確かめられた。また、実験1においてEDTAの方がクエン酸よりも茶渋の生成を抑制できたのは、EDTAが金属イオンとの結合力が強いからだと考えられる。さらに、実験3でウォーターバスの温度が50℃の時にクエン酸を加えた場合の透過率上昇が少なく、茶渋が多く残っていたことから、高温ではクエン酸の熱運動が激しくなることで金属イオンと結合しにくくなりキレート剤として不活性化する、または茶渋の結合が安定し、クエン酸で茶渋から金属イオンを奪うことが難しくなると考えた。そして、クエン酸を投入した時間が遅いほど透過率が低く、茶渋が多く残っていたことから、生成してから時間がたち安定した茶渋からはクエン酸で金属イオンを奪いにくくなると推察した。

## 6 結論

キレート剤は茶渋の発生抑制・除去効果をもっており、茶渋は生成し始めてからの時間が短いほどキレート剤による効果は大きい。

## 7 今後の課題

クエン酸による茶渋の生成抑制・除去効果の違いが温度とキレート剤を加える時間のどちらにより深く関係しているか、50℃のときだけ低温時と異なり透過率が大幅に低下したのはなぜか、そして、クエン酸を加えたものに観察された凝集物は何がもととなっているのかを調べる。

## 8 参考文献

山田 郁 阿部 徹弥 谷沢 善明  
紅茶による茶渋の化学組成と構造に関する研究  
一般社団法人日本家政学会研究発表要旨集  
2005-12-08 57回大会  
<https://www.jstage.jst.go.jp/article/kasei/5>

7/0/57\_0\_175/\_article/-char/ja  
(参照 2021-06-15)

# タンポポの種子の特徴から見た在来種と外来種の繁殖戦略の違いについて

示野 安那、南 優太、宮田 愛彩、宮元 凜  
担当教諭 橋谷 広司

キーワード：在来種、外来種、飛距離、滞空時間

We researched the different propagation strategies between native dandelion species and invative dandelion species. Focusing on the dispersal mechanism of the seeds, we found that native species were heavier than invative species and could not travel as far. We conclude that foreign species exhibit a propagation strategy in which they disperse their seeds far away to expand their propagation area. We can also conclude that native species exhibit a propagation in which limit themselves to habitats which have favable growing conditions.

## 1 はじめに

タンポポの種子(瘦果)は綿毛(冠毛)を持ち、風で散布される。植物の種子の散布方法は、その繁殖戦略と強く関係することが知られている。例えば、タンポポの種子散布について、種子の性質と散布の関係に着目し、実験を行った。

## 2 材料と方法

＜材料＞石川県鳳珠郡能登町で採集した在来種(エゾタンポポ)と石川県珠洲市、七尾市、羽咋市で採集した外来種(セイヨウタンポポ)を使用した。採集の際には、綿毛の状態のタンポポを茎から千切り、一つ一つ容器に入れて保存した。

### ＜実験1＞ 種子の重さ

1個の種子の重さとその散布のようすを調べるため、種子の重さを計測した。タンポポの種子は軽く、学校にあるはかりでは、1個ずつ重さを計測できなかった。そのため、頭花1個から種子を10個ずつ、5回とり出し、精密ばかりで重さを計測した。これをもとに、種子1個の重さを算出した。

以下、実験2と実験3では、実験1で重さを計測したもののみを使用した。

### ＜実験2＞ 種子の飛距離

風速1.1m/sの扇風機で、高さ15cmからピンセットでつまんだ種子を飛ばし、飛距離を計測した。扇風機の渦巻き状の風を真っすぐにするために扇風機の前にストローで作った整流器を設置した(図1)。また風の影響を受けない場所で行った。



図1 実験2の装置

### ＜実験3＞ 種子の滞空時間

高さ120cm、直径6.6cmの筒の中に、ピンセットでつまんだ種子を落とし、床に着くまでの時間を計測した(図2)。種子が床に着く瞬間が見えるように、床と筒の間には隙間を作った。また、風の影響を受けない場所で行った。



図2 実験3の装置

<実験4> 種子の個数

頭花1個あたりの種子数を、種子をピンセットで摘み取りながらカウントした。

3 結果

1. 種子の重さの比較

種子の重さは在来種  $0.89 \pm 0.27\text{mg}$ 、外来種  $0.51 \pm 0.16\text{mg}$  で在来種の方が外来種より、有意に重かった ( $p < 0.05$ , t検定) (図3, 4)。

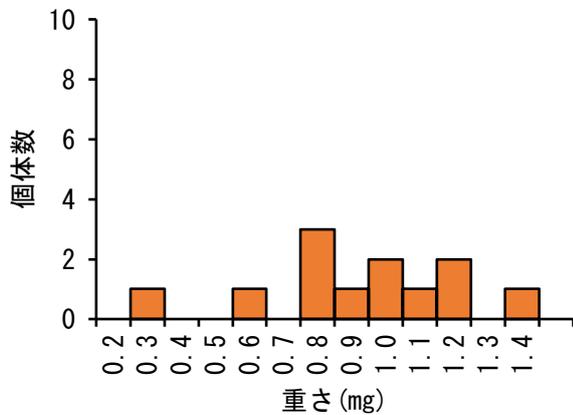


図3 在来種の重さの頻度分布

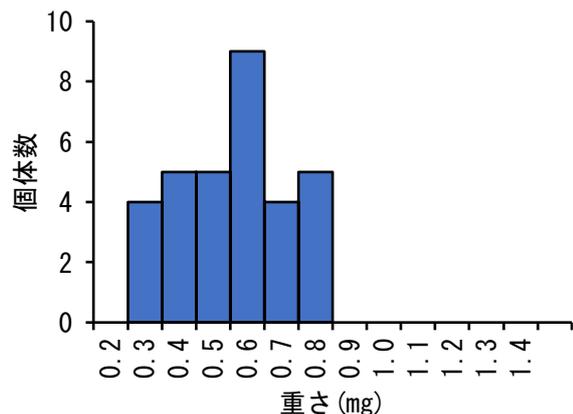


図4 外来種の重さの頻度分布

2. 種子の重さと飛距離、滞空時間との関係

種子の重さと飛距離の間で相関関係を見たところ、種子が重いほどあまり飛ばないという負の相関が見られた (図5,  $y = 13.3x + 38.9$ ,  $r = 0.51$ ,  $N = 50$ )。

また、同様に種子の重さと滞空時間の間で相関関係を見たところ、種子が重いほど早く落下するという負の相関が見られた (図6,  $y = -2.7x + 0.7$ ,  $r = 0.56$ ,  $N = 50$ )。

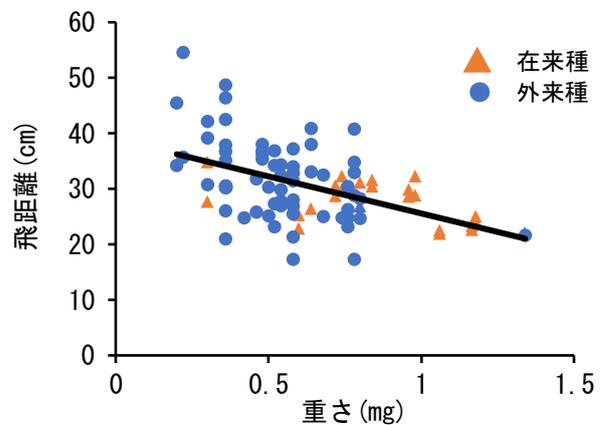


図5 種子の重さと飛距離の関係

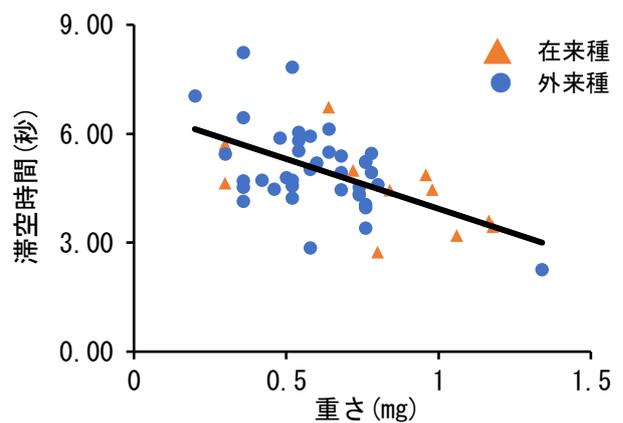


図6 種子の重さと滞空時間の関係

3. 種子数は外来種  $191 \pm 51.4$  個、在来種  $166 \pm 22.3$  個で有意差はなかった ( $p > 0.05$ , t検定) (図7, 8)。

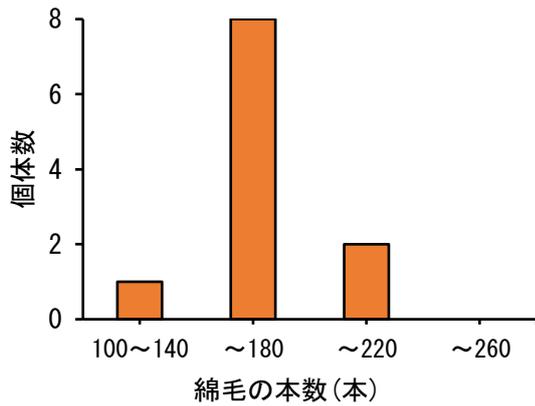


図7 在来種の種子の個数の頻度分布

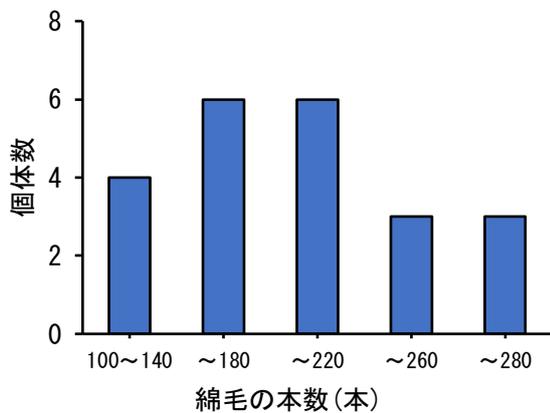


図8 外来種の種子の個数の頻度分布

#### 4 考察・仮説

在来種はあまり飛ばない重い種子を、外来種はよく飛ぶ軽い種子をつける。先行研究で在来種は肥えた土壌を、外来種はやせた土壌を好むことが分かっている。また、実験で使用した在来種（エゾタンポポ）と外来種（セイヨウタンポポ）は、いずれも3倍体以上で無融合生殖を行う種であることも分かっており、そのため生殖方法による種子の分布の違いはないといえる。以上のことから、在来種は条件の良い場所にとどまり、外来種は生息域を広げる戦略をとっていると考えられる。

#### 5 追加実験

##### ＜実験5＞種子の発芽率

これまでの実験で使ったエゾタンポポとセイヨウタンポポの種子を、バーミキュライトを敷いた



シャーレにそれぞれ10個ずつ植えたものを各種ごとに4個ずつ用意した。その際、インキュベーター内を気温20℃、湿度60%に設定した。そして、連続照明を当て、バーミキュライトが乾かない程度に水道水で湿らせ、35日間発芽した種子の個数を記録した。

＜結果＞エゾタンポポの種子の発芽率は37.5%、セイヨウタンポポの種子の発芽率は22.5%で、発芽率には有意差がなかった（ $p=0.22$ , フィッシャ

図9 教育センター周辺のタンポポの分布の正確確率検定）。

##### ＜実験6＞コドラート法※

石川県教育センター周辺のエゾタンポポとセイヨウタンポポの分布図（170m四方）を用いて、分布のようすについて調べた（図9）。

＜結果＞どちらも集中的に分布していたが、エゾタンポポの方がその傾向が強かった。また、二種類の分布の重なりは非常に小さかった。

＜考察＞私達の実験では、外来種の飛距離の方が長かったが、分布図上では分布のようすに差が見られなかった。その原因として、飛距離の実験結果の差は数十センチメートルだったが、分布図は170m四方であったため、差が十分に表れなかった

令和3年 石川県立七尾高等学校

ことが考えられる。しかし、相対的に見ればエゾタンポポの方がより集中的に分布しているため、エゾタンポポは「安全戦略」を、セイヨウタンポポは「チャレンジ戦略」をとっていると言える。また、エゾタンポポとセイヨウタンポポは生息地を共有していないと言える。

※コドラート法…ある一定の大きさの正方形の区画（コドラート）を設定し、その中に存在する個体数を調査する手法。

## 6 今後の展望

他の種類のタンポポでも実験を行い、同様のことがいえるのかを確かめる。高さや風速などの条件を変えて実験する。屋外の自然の風で実験をする。種子の養分含有量を調べるために、種子の断面を顕微鏡で観察し、胚乳の面積を調べる。

## 7 謝辞

石川県立金沢桜丘高校の中村こすも先生から「石川県教育センター周辺のタンポポの分布」の図を提供して頂きました。ありがとうございました。

## 8 参考文献

(1)小川潔. 日本のタンポポとセイヨウタンポポ. どうぶつ社. 2001

(2)渡辺幹男, 神崎護, 櫛田敏宏, 芹沢俊介. セイヨウタンポポ, ニホンタンポポおよびその雑種の発芽特性. 植物地理・分類研究. 2003-12-25. vol51, no. 2, p. 183-186

(3)平賀英児. タンポポ戦争の解明と環境調査への応用—1学級13名による共同理科研究—. <https://www.shinko-keirin.co.jp/keirinkan>

[/j-science/jissen/9804/index.htm](https://j-science/jissen/9804/index.htm)(参照2021-10-07)

(4)芝池博幸. 外来性タンポポ種群

(*Taraxacum officinale* agg.)—学名から

考える侵入・定着・交雑—. 2016

[https://doi.org/10.24463/iuws.8.0\\_64](https://doi.org/10.24463/iuws.8.0_64)(参照2022-01-23)

# 斜面上の砂が流れ出す角度を決める要因について

班員 田中 正剛、辻口 雄一朗、松原 智哉、綿谷 結太  
担当教諭 山本 一博

キーワード：安息角 粒径 傾斜法

The angle of repose is the angle at which a singular material slides down for the first time when it is piled. In this study, we measured the angle of repose and investigated what tendencies exist. It was found that the angle of repose changes depending on the variation in grain shape and the moisture content.

## 1 はじめに

近年、日本各地にて土砂災害が多発している。私たちは砂の斜面が安定した状態で水平面に対してなす角のうち、最も急な角度である安息角を用いることにより土砂災害を防ぐことができないかと考えた。自然環境にできるだけ近づいた状況で安息角を計測するため、傾斜法を用いた。

## 2 研究方法

### ◎安息角の計測方法

砂を金属製トレイ(図1)に入れ、表面が水平になるようにすりきる。それを傾斜台の上に置いて傾けスマートフォンのセンサである水平器(図2)を用いて、砂の表面が流れ出した時の傾角を計測した。



図1 金属製トレイ

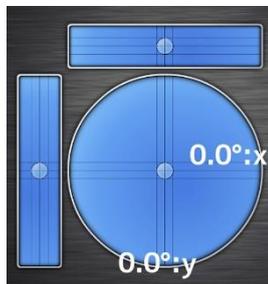


図2 水平器

### ◎粒径の計測方法

砂の長軸の長さを粒径として定義した。双眼実体顕微鏡(図3)を用いて、各砂を一粒ずつ計測した。計測の際は、それぞれの砂の粒の写真

を撮り、長軸を基準として計測を行った(図4)。結果は下のグラフ(図5)である。



図3 双眼実体顕微鏡

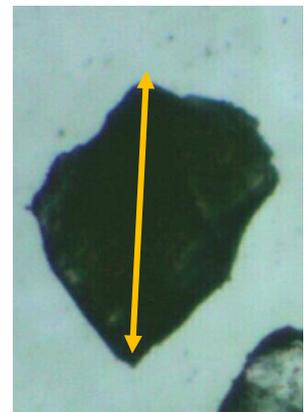


図4 長軸を基にした粒径

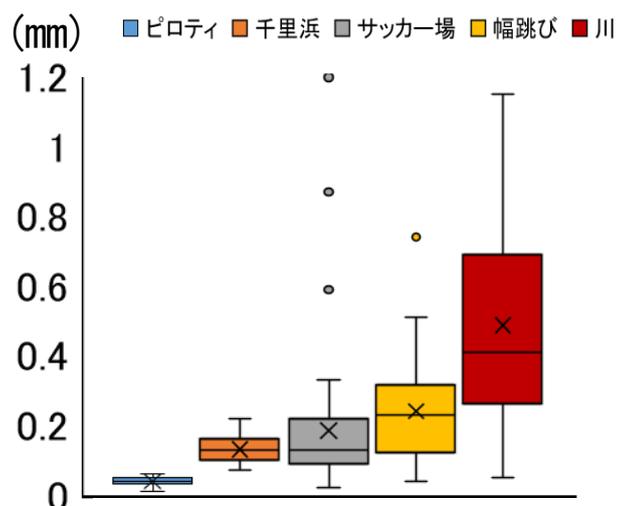


図5 粒径の分布図

◎実験に用いた砂

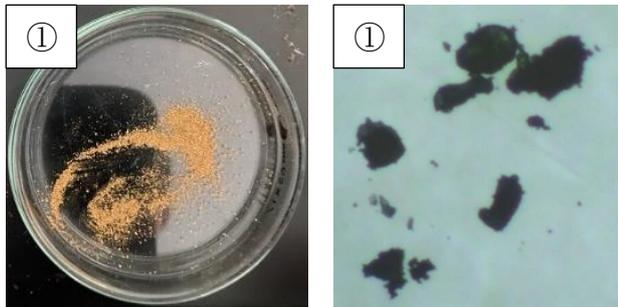
以下の場所から採取した砂を用いて実験を行った。

- ①ピロティ(体育館1階の練習場)の砂
- ②千里浜(石川県羽咋市)の砂
- ③サッカー場の砂
- ④幅跳び場の砂
- ⑤川の砂

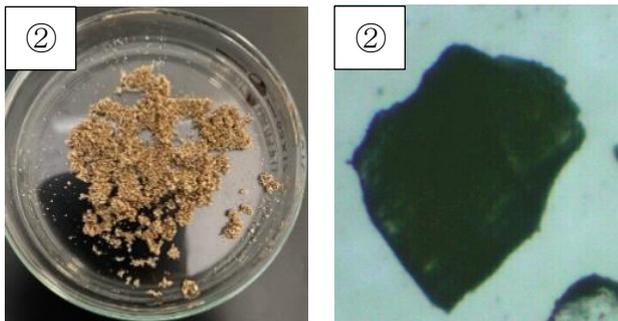
注) ①、③、④は本校敷地内にて採取したものである。

以下の画像は左が砂の全体像、右が砂の顕微鏡写真である。

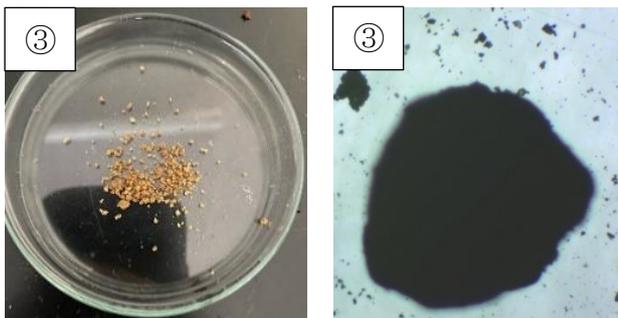
ピロティの砂



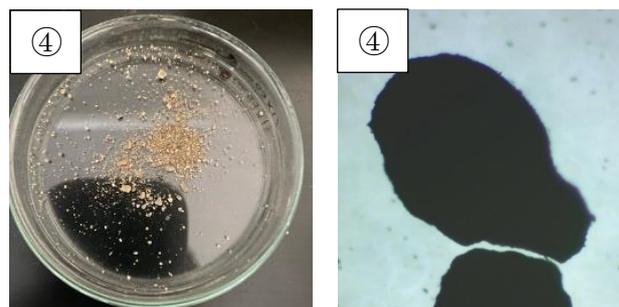
千里浜の砂



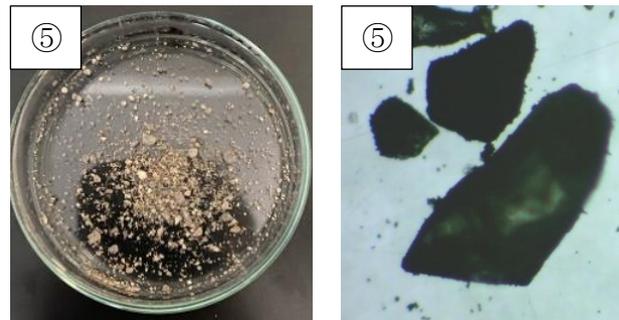
サッカー場の砂



幅跳び場の砂



川の砂



◎実験1 乾いた砂の安息角の計測

上記の5つの砂を傾斜法にて計測した。

実験の最中に傾けていくと、砂の表面が3段階で流れ出すことに気づいたので、安息角をそれぞれ下のように設定した。

- ・  $\theta_1$  : トレイの上部から砂が流れ出す角度
- ・  $\theta_2$  : トレイの中部から砂が流れ出す角度
- ・  $\theta_3$  : トレイの下部から砂が流れ出す角度

トレイ上部・中部・下部は下図(図6)において橙色線で区分した部分である。

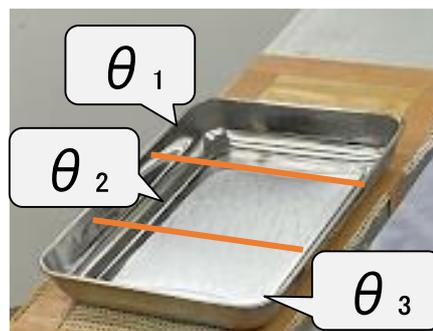


図6  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ の図

〈結果〉

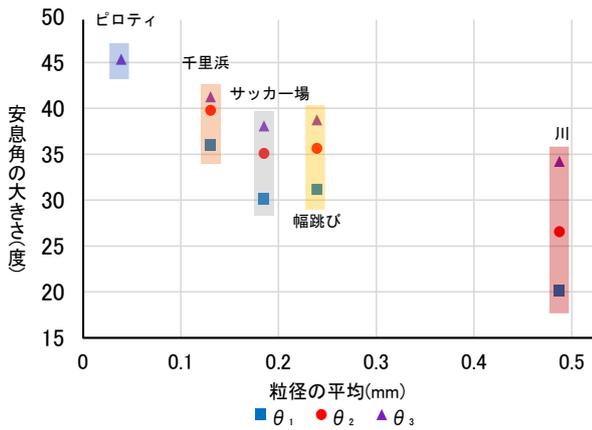


図7 乾いた砂の安息角と粒径の平均の相関

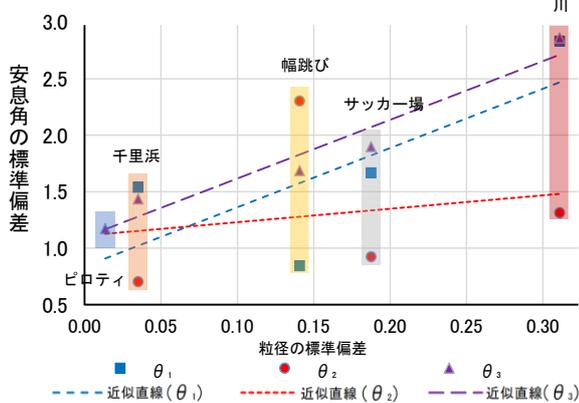


図8 乾いた砂の安息角と粒径の標準偏差の相関

〈考察〉

粒径が小さいほど、砂がトレイに充填され、砂同士の接触面が大きくなることで、摩擦が強くなる。その強い摩擦力が表面の砂に働くことで、表面の砂が流れにくくなる。そのため、砂の粒径が小さいほど、砂の安息角が大きくなると考えられる(図7)。また、 $0 < R^2 < 1$ の範囲にあり、1に近づくほど相関が強いことを示す決定係数の考え方をを用いると  $\theta_1 = 0.530$ 、 $\theta_2 = 0.0370$ 、 $\theta_3 = 0.942$ (有効数字3桁)となり、粒径のばらつき(標準偏差)と安息角の実験値のばらつき(標準偏差)に  $\theta_3$ では非常に強い相関、 $\theta_1$ では強い相関、 $\theta_2$ では相関がみられなかった(図8)。

◎実験2 湿った砂の安息角の計測

砂の体積を計り、砂と水がよく混ざり合ったと考えられる。体積比(砂:水=28:3)で混ぜ、実験1と同じ方法で計った。

〈結果〉

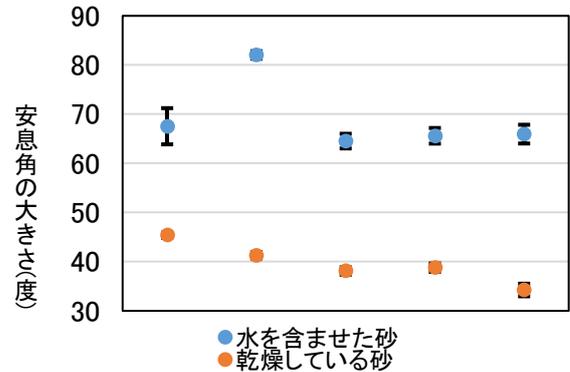


図9 湿った砂と乾いた砂の安息角の違い

図9の凡例は左から①、②、③、④、⑤の順。

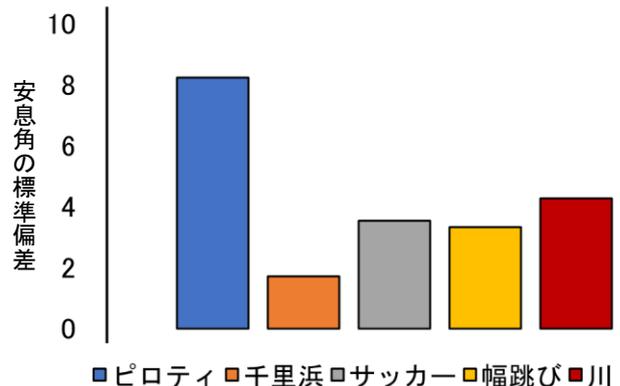


図10 水を含んだ砂の安息角の標準偏差

〈考察〉

水が砂同士を引き寄せるため、どの砂も安息角が大きくなる。また千里浜の砂は、特に安息角が大きくなり、実験値のばらつき(標準偏差)も小さくなった。これは粒径が小さく、形が角ばっているため、トレイへより充填され、さらに砂間の隙間に水がよく染み込み固体のようになったからなのではないかと考えられる。

ピロティの砂は崩れ方が毎回異なり、測定の際に安息角(標準偏差)が大きくばらついた。

これはほかの砂と違いピロティの砂が水と均一に混ざらず、乾いた部分からと湿った部分から流れる2パターンがあったからなのではないか(図11)。

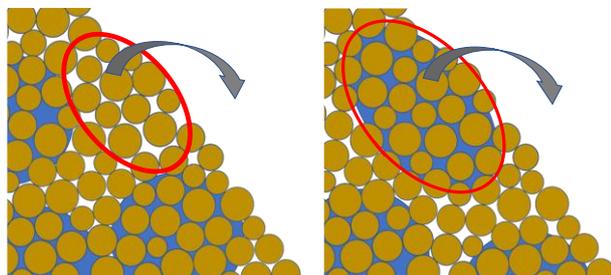


図 1 1 水を含むピロティの砂の流れ方の違

### 3 結果と考察

粒径の違いや含水量の変化による安息角の傾向を調べた結果、粒が小さく均一な砂は崩れにくいことと、水を含むと崩れの予測が困難になることが分かった。これらのことは土砂災害の予測に役立つと考えられる。

### 4 今後の展望

砂・土の安息角をさらに計測し、土砂災害の予測への活用を模索したい。また、 $\theta_1$ と $\theta_3$ の粒径と安息角の標準偏差の相関がみられたのに、 $\theta_2$ ではみられなかった理由を調べたい。形、粒径、水分量以外にもの安息角に与える影響についても考察していきたい。

### 5 謝辞

粒径の測定法を指導して下さった JAMSTEC の谷川亘様に感謝申し上げます。

### 6 参考文献

- (1) 青木隆一. 粉体の安息角および内部摩擦角の測定法. 粉体工学会. 1964. Vol 6, No. 1, P. 3-8
- (2) 松倉公憲, 恩田裕一. 安息角: 定義と測定法にまつわる諸問題. 筑波大学水理実験センター報告. 1989. No. 13, P. 27-35