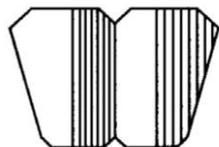


令和7年度指定 スーパーサイエンスハイスクール

令和7年度

# 研究活動報告集

第1年次



令和8年3月

京都府立洛北高等学校

# 目次

## 課題探究Ⅱ（高校2年）

### 【化学】

希薄溶液と濃厚溶液の凝固点降下度の違い.....	1
平原 史織・中山 文・吉藤 真愛・安良 萌	
酸化チタン結晶型の違いによる光触媒活性の評価 ～メチレンブルーを用いた複数条件下での比較～.....	8
竹川 さくら・弘中 結実子・松井 亜珠	
高吸水性ポリマーを用いた保冷効果の高い蓄冷材の作製.....	15
短田 理紗・高橋 采花・河野 里咲・白井 咲花	
デンプンを原料としたプラスチックの代替品の開発.....	20
穴澤 来未・益田 真帆・足立 讚映・水嶋 環	
紙から繊維を作ることは可能か ～銅アンモニアレーヨンの強度測定による再生繊維の可能性～.....	26
岡本 優汰・松永 拓磨・山形 郁弥・横山 幹・吉田 悠貴	

### 【環境】

色の組み合わせが人に与える印象と、それによってもたらされる利点 ～学校パンフレットの表紙を例に～.....	32
藤井 香梅・内田 早貴	
豆乳によるバイオプラスチックの物性評価と実用化の検討 ～酸添加条件による強度・耐水性・においの改善～.....	36
近藤 史奈・佐藤 美咲・清水 桜帆	
こんなに溜まっちゃって・・・そのゴミ，みんなで処理しよう！ ～そのゴミ，箱まで我慢できませんでした～.....	43
濱口 玲弥・林 俊輔・山口 穰・中田 悠斗	
換気を用いた避難所における暑熱環境の低減 ～体育館模型実験での開口条件による換気効率の検討～.....	47
黒川 映瑠和・近藤 華・野口 紗矢子	
アレルギー対応プリンの開発 ～卵・牛乳不使用プリンの作製と評価～.....	53
水谷 由布・今井 眞香・奥田 涼菜	
高校生を対象とした利用規約の内容理解度向上への取り組み ～絵文字を用いた試み～.....	60
藤澤 那帆・武田 七菜未	

### 【数学】

片想い空間 ～距離空間に対称律を仮定しない場合の考察～.....	65
青山 真河	

## 【生物】

アオジソの香気成分であるペリルアルデヒドの殺菌効果の検証.....	71
布目 春菜・天野 桜果・平岡 悠・福井 絢音	
デュビアの走光性及び情報共有能力に関する研究	
～デュビアは負の走光性や集合フェロモンによる情報共有能力を保持しているのか～.....	79
磯田 皓一・深見 珠貴	
魚類の顔認識に関する主要な要素の検討	
～ゼブラフィッシュを用いた図形の認識と識別の学習～.....	84
八穴 実咲・鈴木 さやか	

## 【物理地学】

渦励振発電の効率化.....	89
山下 あまね・幡山 巧・土生 敦樹・藤澤 真那	
効率よくビー玉の運動方向を変える曲線 ～最速降下曲線は逆向きにも最速なのか～.....	95
尾崎 大馳・桂 幸生・沢邊 耕一・高橋 佑齊・松本 捷一・山田 洸瑛	
双曲面構造の強度を探る	
～パスタを構造材料とした模型の鉛直および水平方向に対する強度評価～.....	102
坂本 有彩・今井 泉・谷口 実咲・鶴飼 留美・平田 千羽・渡邊 美月	
回転攪拌流におけるダイラタント流体のトルク応答と冪乗則モデルの適用限界の検証およびその有効モデルの考察.....	108
橋本 煌平・洞谷 和寿・村井 恵伍・佐々木 陽子・中司 莉々夏	
ツーハーフヒッチはなぜ解けないのか ～絶対に解けない結び方～.....	115
加嶋 伸弥・隠岐 僚太・鳥嶋 浩大・彦惣 一翔・藤原 顕太	
指向性のいいメガホンの作り方.....	119
清川 隼輝・横川 智洋・木村 耕平・坂田 頼謙・杉原 実	

# 希薄溶液と濃厚溶液の凝固点降下度の違い

中山文 平原史織 安良萌 吉藤真愛

## 要旨

本研究では、塩化ナトリウム水溶液と硝酸ナトリウム水溶液を冷却し、濃度の違いが凝固点降下に及ぼす影響を検討した。希薄溶液では凝固点降下度はほとんど濃度と比例関係であった一方で、濃厚溶液では理論値よりも高い温度での凝固点が計測される傾向が大きくなり、比例関係は成立しなくなった。

### 1. はじめに

水に不揮発性の物質を少量溶かしたときに、水溶液(希薄溶液)の凝固点は溶質粒子の質量モル濃度に比例して下がる。その凝固点降下度は

$$\Delta t = K_f \cdot m \quad (1)$$

( $\Delta t$ :凝固点降下度(°C),  $K_f$ :溶媒のモル凝固点降下度(°C・kg/mol),  $m$ :質量モル濃度(mol/kg))

により求められる。式(1)は、凝固を妨げる溶質が少量である、希薄溶液において成立する。凝固点降下度は式(1)によって正確に計算することができる。

先行研究では塩類と糖類の溶液における凝固点降下度について調べられており、塩類ではモル濃度が 3.0 mol/L を超えると式(1)より算出される値(以下、理論値という)よりも明らかに測定値が小さくなると報告されている<sup>1)</sup>。しかし、先行研究では、二種類(1.0 mol/kg, 3.0 mol/kg)の質量モル濃度のみが対象であり、理論値からの差が生じる濃度域や、各濃度ごとの差の大きさを十分に評価できていないため、本実験を図 1 のように行った。

本研究では、塩化ナトリウムと硝酸ナトリウムを用いて濃厚溶液(本実験では塩化ナトリウム、硝酸ナトリウムどちらの場合においても、飽和溶液となる濃度が 6.0 mol/L であるため、その半分の濃度である 3.0 mol/L 以上が濃厚溶液であると仮定した)と希薄溶液(本実験では 0.5 mol/L 以下と仮定し、1.0 mol/L~2.0 mol/L を準希薄溶液とし

た)の凝固点降下を測定し、式(1)からの差がどのように変化するかを明らかにすることを目的とした。凝固点降下の式(1)は、溶質粒子間の相互作用を無視できる理想溶液を前提としている。純溶媒に溶質を溶かすと、溶液中では溶質粒子の存在により凝固に参加できる溶媒分子の割合が相対的に小さくなり、その結果凝固点が低下する。希薄溶液では、この前提がよく成り立つため、凝固点降下度は溶質の種類に無関係で、溶液中の粒子数に主に依存し、溶液の質量モル濃度に比例関係を示す<sup>2)</sup>。一方、濃厚溶液では溶質粒子同士の相互作用や水和の影響が無視できなくなる。

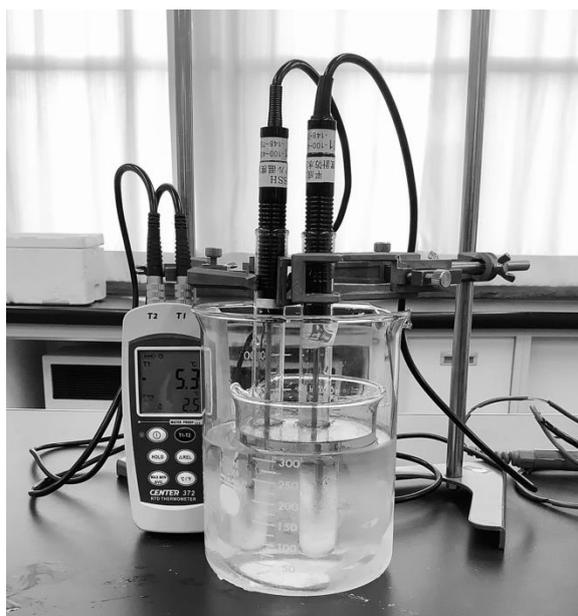


図 1. 実験の様子

変性エタノールを用いて試料を冷却し、温度変化を測定している様子。

これにより水分子の自由度が低下し、理論式が仮定する独立に振舞う粒子数が実質的に減少するため、理論値ほど凝固点下がらず、理論値より高い凝固点となると我々は仮説を立てた。さらに、硝酸ナトリウム水溶液では、溶質が電解質としてイオンに解離し、イオン間の静電相互作用は、水分子と相互作用しやすい親水基を多く持つ分子ほど水に溶けやすいため、多原子イオンである硝酸イオンが水和されやすく<sup>3)</sup>、式(1)が厳密に成立する理想溶液を前提とした凝固点降下の理論式が成り立ちにくくなることにより、塩化ナトリウムよりもズレの値は大きくなるという仮説を立てた。また、希薄溶液および濃厚溶液について温度変化を測定し、希薄溶液では凝固点降下の濃度の依存性を検証するとともに、濃厚溶液では実測値と理論値との差を比較した。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究方法1 塩化ナトリウム希薄溶液 0.1~0.5 mol/L, 準希薄溶液 0.5~2.0 mol/L の凝固点測定

希薄溶液の凝固点変化を観測するため、使用した器具は、200 mL ビーカー、試験管 2 本、スタンド 2 本、デジタル温度計で、図 1 のように設置した。試料は塩化ナトリウムを用いて、それぞれ 0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 2.0 mol/L の塩化ナトリウム水溶液を調製した。200 mL ビーカーに水 40 mL, 氷 120 g, 食塩 40 g を入れて攪拌し、水溶液の温度を $-10^{\circ}\text{C}$ まで下げた。これを冷却浴とした。スタンド、温度計を用いて、調製した塩化ナトリウムが入った試験管二つを 200 mL ビーカーに作った $-10^{\circ}\text{C}$ の冷却浴に同時に入れ、およそ 900 秒後までの温度変化を観察した。この時、冷却浴は $-10^{\circ}\text{C}$ を保てるよう攪拌した。これらの操作を各濃度において 2~3 回繰り返した。そして 10 秒ごとの温度変化をグラフ化し、各濃度(0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 2.0 mol/L)ごとの凝固点を求めた。

### 2-2. 研究方法2 塩化ナトリウム濃厚溶液 3.0, 4.0, 5.0 mol/L の凝固点測定

研究方法 2 は、主に濃厚溶液の凝固点を調べることが目的とした。濃厚溶液の凝固点の理論値に十分対応できるように変性エタノールを冷却し、 $-40^{\circ}\text{C}$ 前後を保ちながらも、冷却水が凝固することなく、安定して試料液を冷却することを可能にした。使用する器具として、研究方法 1 の器具に加えて、冷却浴用の 300 mL ビーカー、安全面の観点から発泡スチロール箱、保護メガネ、軍手を用いた。冷却水として、研究方法 1 から変更し、氷水ではなく、変性エタノールを 500 mL 三角フラスコ 2 個に入れて、冷凍庫に保管して使用した。試料は研究方法 1 と同様、塩化ナトリウムを用い、3.0, 4.0, 5.0 mol/L の塩化ナトリウム水溶液を調製した。300 mL ビーカーに変性エタノールを入れ、およそ $-40^{\circ}\text{C}$ まで下げた。スタンド、温度計を用いて、その試験管二つを同時に 200 mL ビーカーに作った図 1 の冷却浴に入れ、600 秒後までの温度変化を観察した。これらの操作を各濃度 2~3 回繰り返した。そして 10 秒ごとの温度変化を Excel でグラフ化し、各濃度(3.0, 4.0, 5.0 mol/L)ごとの凝固点を求めた。

### 2-3. 研究方法3 硝酸ナトリウムの凝固点測定

研究方法 3 は試料を変え、硝酸ナトリウムの凝固点を計測した。しかし、研究方法 2 にしたがって進めると、塩化ナトリウム水溶液を冷却させることによって膨張し、試験管が耐えられず割れてしまった。そこで、対策として、試料液を減らして 5 mL にすることで、実験を安全に行うことができた。方法について、300 mL ビーカーにおよそ $-30^{\circ}\text{C}$ の変性エタノール 300 mL を、1000 mL ビーカーにおよそ $-40^{\circ}\text{C}$ の変性エタノール 300 mL を入れ、二重冷却浴を作った。急冷による溶液の膨張で、試験管が破損することを防ぐために、段階的に冷却できるこの冷却浴を用いた。硝酸ナトリウムを濃度分(0.5, 1.0, 2.0 mol/L)だけ測りとり純水 5 mL に溶かし、試験管に入れた。スタンド、温度計を用

いて、その二重冷却浴(図 2)に同時に入れ、600秒までの温度変化を観察した。これらの操作を各濃度 2~3 回繰り返した。そして 10 秒ごとの温度変化をグラフ化し、濃度ごとの凝固点を求めた。



図 2. 実験 3 の図解

#### 2-4. 評価方法

温度変化をグラフ化したところ、(1)温度低下後、再上昇が見られた場合(凝固点降下含む)、(2)再上昇がなく、単調に温度が低下した場合が見られた。それぞれの場合において、以下の方法で凝固点を定めた。

##### (1)再上昇が見られた場合(図 3)

- ①温度の急激な変動が見られなくなり、グラフの傾きが緩やかになった範囲で、同じ傾きの直線を結果に沿って引く。
- ②温度上昇前の結果のグラフと、①の直線との交点をとる。この時の縦軸の値を、凝固点とする。

##### (2)再上昇がなく、温度が単調減少した場合(図 4)

- ①温度の急激な変動が見られなくなり、グラフが緩やかな傾きで平衡になった範囲で、同じ傾きの直線を結果に沿って引く。
- ②グラフが緩やかな傾きになる前の、急な傾きで一定に減少している範囲で、同じ傾きの直線を結果に沿って引く。
- ③①と②の直線との交点をとる。この時の縦軸の値を、凝固点とする。

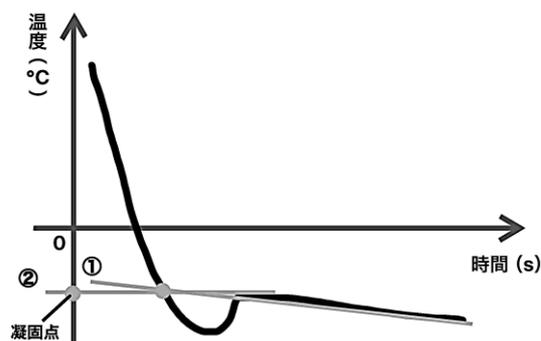


図 3. 一般的な冷却曲線と凝固点の決定方法

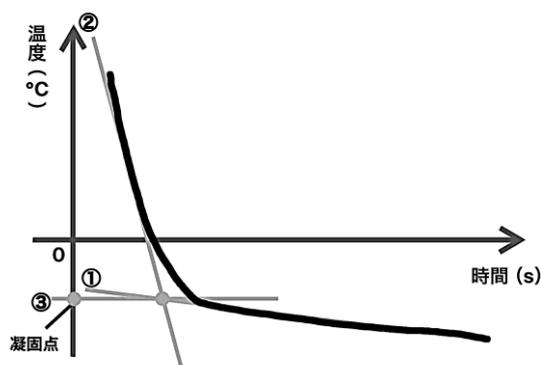


図 4. 温度が単調減少した場合の冷却曲線と凝固点の求め方

### 3. 研究結果

#### 3-1. 研究結果 1 塩化ナトリウム希薄溶液 0.1, 0.3, 0.4 mol/L の凝固点測定

0.1 mol/L の溶液は開始から約 140 秒後に 0°C に達し、0.3 mol/L は 80 秒後、0.4 mol/L は 120 秒後に 0°C に達した(図 5)。0.1 mol/L では開始からおおよそ 420 秒後に、0.3 mol/L のおおよそ 160 秒後に温度の再上昇が見られ、0.4 mol/L はゆるやかに冷却していく様子が確認された。実測値と理論値の差について、0.1 mol/L では 0.075°C、0.3 mol/L では -0.131°C、0.4 mol/L では -0.227°C となった。希薄溶液である 0.1 mol/L と 0.3 mol/L の溶液では大きな差はなかったが、0.4 mol/L では理論値よりも計測値のほうが値が低くなった(表 1)。

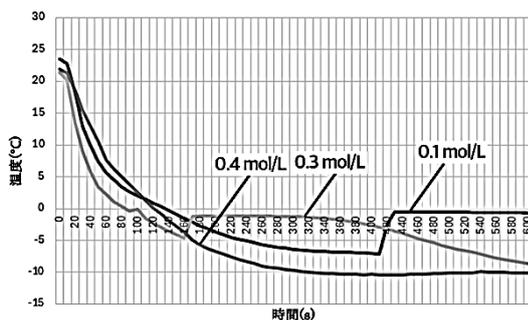


図 5. 0.1, 0.3, 0.4 mol/L の温度変化

### 3-2. 研究結果 1 塩化ナトリウム準希薄溶液 0.5~2.0 mol/L の凝固点測定

0.5, 1.0 mol/L の溶液では、開始から約 2 分で 0 度に達し、2.0 mol/L は急速に温度の低下が見られ、30 秒後に 0°C に達した。2.0 mol/L を除いて、ゆるやかな温度低下がみられた。(図 6) どの濃度の溶液も、300 秒経過以降、-9.0°C から -11°C で温度変化は安定した。なお、0.5 mol/L では見られた 410 秒経過後の温度の再上昇は、過冷却によるものと考えられる。また、実測値と理論値の差について、0.5 mol/L では -0.223°C、1.0 mol/L は 0.39°C、2.0 mol/L は 0.19°C となった。濃度が高くなるにつれて差が大きくなる結果はみられなかったが、濃厚溶液での差と比較すると、理論値との差は小さくなった。

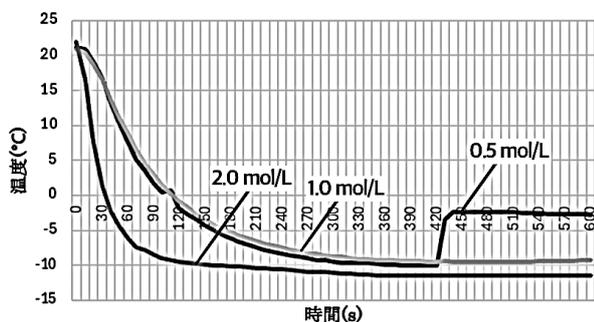


図 6. 0.5, 1.0, 2.0 mol/L の温度変化

### 3-3. 研究結果 2 塩化ナトリウム濃厚溶液 3.0, 4.0, 5.0 mol/L の凝固点測定

どの濃度の溶液においても、開始から 20~40

秒後に 0°C に達し、過冷却はほとんど見られなかった(図 7)。3.0 mol/L においては、開始から 50 秒ほどで温度の再上昇が見られ、400 秒経過後は -30°C に落ち着いた。4.0 mol/L, 5.0 mol/L においては、300 秒経過後は、およそ -22°C 程度に落ち着いた。実測値と理論値の差に関しては、3.0 mol/L では 0.598°C、4.0 mol/L では 1.017°C、5.0 mol/L では 1.09°C の差が見られるように、濃度が高くなるにつれて大きくなり、理論値よりも高い温度での凝固点が計測された。多少グラフが滑らかでない部分が見られた。

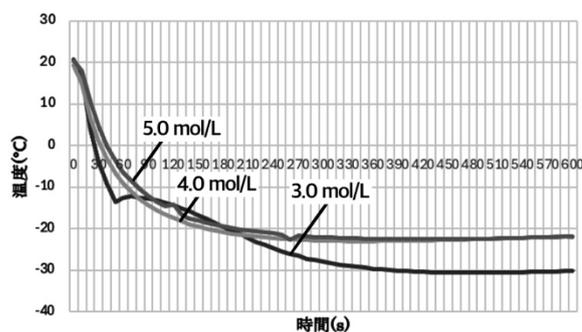


図 7. 3.0, 4.0, 5.0 mol/L の温度変化

表 1. 塩化ナトリウムの濃度別計測値・理論値の値

濃度(mol/L)	計測値(°C)	理論値(°C)	差(°C)
0.1	-0.297	-0.372	0.075
0.3	-1.247	-1.116	-0.131
0.4	-1.715	-1.488	-0.227
0.5	-2.083	-1.86	-0.223
1.0	-3.33	-3.72	0.39
2.0	-7.25	-7.44	0.19
3.0	-10.56	-11.16	0.598
4.0	-13.86	-14.88	1.017
5.0	-17.51	-18.6	1.09

### 3-4. 研究結果 3 硝酸ナトリウム希薄溶液 0.5, 1.0, 2.0 mol/L の凝固点測定

どの濃度の硝酸ナトリウム水溶液においても、開始からおよそ 40~80 秒後に 0°C に達した。0.5 mol/L の溶液では過冷却により、360 秒後に温度が再上昇した。再上昇が起こった後、温度変化は安定した。一方で、2.0 mol/L の溶液では過冷却が見られず緩やかに温度は下降していった。温度変化が細かく変動する傾向が見られたのは、試験管が割れないよう均一に凝固させるために攪拌し続けていたからである。凝固点は 0.5, 1.0, 2.0 mol/L でそれぞれ、-1.48°C, -3.24°C, -7.23°C と計測された。実測値の理論値との差は、0.5 mol/L では 0.38°C, 1.0 mol/L では 0.48°C, 2.0 mol/L では 0.19°C と凝固点は理論値よりも高い値となった。0.5 mol/L と 1.0 mol/L においては同濃度での塩化トリウム水溶液よりも理論値との差は高い値が計測された。

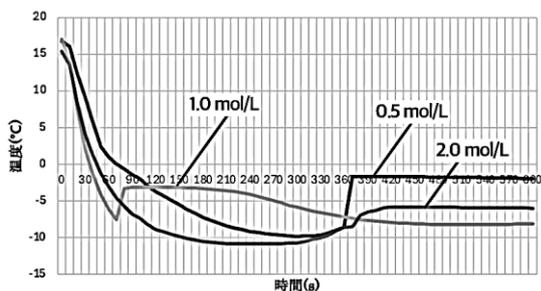


図 8. 硝酸ナトリウム水溶液 0.5, 1.0, 2.0 mol/L の温度変化

#### 4. 考察

##### 4-1. 塩化ナトリウム希薄溶液 0.1~0.5 mol/L, 準希薄溶液 0.5~2.0 mol/L

まず、図 9 に示すように、2.0 mol/L までは、理論値に則して比例関係が見られたため、緒言より、「希薄溶液では理論値とほぼ等しい値となり、濃度と凝固点降下度が比例関係をとる」という仮説は正しいと言える。また、純溶媒では過冷却が起こりやすい<sup>4)</sup>ことから、希薄溶液でも同様だと考えていたが、全試行回数 23 回のうち、過冷却が起こったのは 9 回で、予想に反して少なかった。これ

は、希薄溶液の実験でも扱いやすかったエタノールでの冷却を行ったことに原因がある。エタノールは、希薄溶液の冷却においては平均 -20°C にして冷却浴に用いたが、これは希薄溶液の各凝固点の理論値よりも大幅に低いいため、急激な冷却につながったと考えられる。また、核生成率は、温度を横軸にとった時のグラフの形が「山形(nose)型」になるとされている<sup>5)</sup>。このことから、過度な低温での急冷により、分子運動が極端に遅くなることで、核生成率が低下したと考えられる。

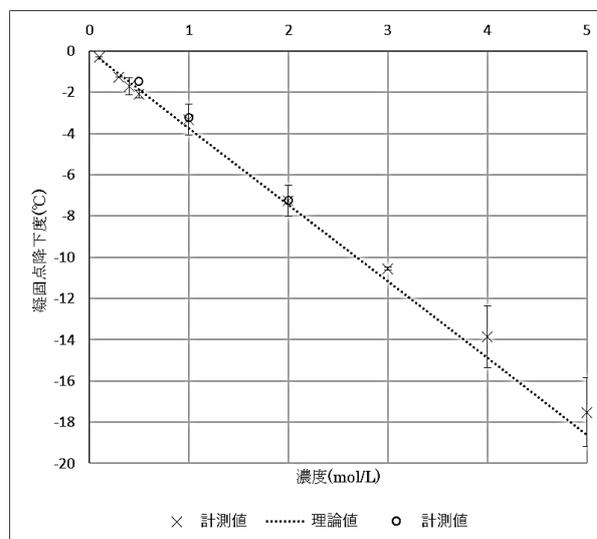


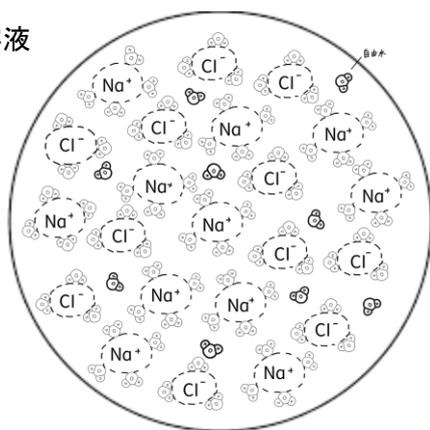
図 9. 塩化ナトリウム×と硝酸ナトリウム○の濃度変化による実測値と理論値との差

##### 4-2. 塩化ナトリウム濃厚溶液 3.0, 4.0, 5.0 mol/L

濃厚溶液での実験では、結果と理論値を比較すると、3.0 mol/L では 0.6°C, 4.0 mol/L では 1.02°C, 5.0 mol/L では 1.09°C と大きく差が生じた。差はどの濃度も理論値よりも高く測定され、濃度が大きくなるにつれ、差は大きくなっていった。この結果より、希薄溶液で成立する式(1)が、適用できない要因があると考えられる。まず濃厚溶液の冷却において、実験 3 の全試行回数 22 回のうち、過冷却が起きたのは 2 回のみで、過冷却がほとんど見られなかった。これは、不均一核生成の過程を経たからだと考えられる。

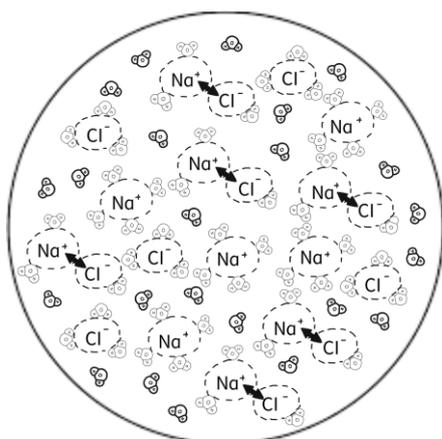
希薄溶液と比べて大幅に差が生じる原因として、まず考えられることは、濃厚溶液では冷却過程において、水が先に氷として析出するため、未凍結の液相中では塩化ナトリウムの濃度が時間とともに上昇する。そのため凝固途中での温度計の測定している部分の溶液では濃度が初期濃度よりも高くなったと考えられる。これは希薄溶液でも共通して言えることだが、高濃度の濃厚溶液の方が、それが大きく影響したと考えられる。3度目以降の実験ではそのことも考慮して試料を攪拌しながら凝固させたが、完全に均一にすることは不可能で

#### 理想溶液



イオン間距離が短く、電気的相互作用が強い。自由水が少ない。

#### 実在溶液



イオン間距離が大きく、電気的相互作用は弱い。自由水が多く存在。

図 10. イオン間の電気的相互作用と自由水

あり、濃度が高くなるにつれて溶質を多く含むようになるため、溶液の均一にすることはできなかつたと考えられる。その結果、理論値が仮定する均一なモル濃度の条件が崩れ、理論式(1)が成り立たなくなつたと考えられる。

二つ目に、電解質溶液においては、イオンが独立に存在するという仮定は成り立たず、イオン間の電気的相互作用が生じることである。具体的には、 $\text{Na}^+$ と  $\text{Cl}^-$ が独立していればそれぞれが氷の生成を妨げることができるが、 $\text{Na}^+$ と  $\text{Cl}^-$ の間に電気的相互作用が生じることでそれらが一体となり見かけの粒子の数が減るため氷の生成を阻害する効果が弱まり、その結果、凝固点降下度は理論値よりも小さくなると考えられる。Debye-Hückel が発表した論文<sup>6)</sup>によると、電解質溶液中の各イオンは周囲に形成されるイオン雲(反対符号のイオンが平均的に分布する領域)を介して他のイオンと電気的に相互作用しており、濃度の増加に伴って理想法則からの乖離が生じると説明されている。イオンが対をなすことで電荷を打ち消し合うことで水和する水分子の数が減るため、自由水が増加し凍ることのできる溶媒が増えるため凝固点は高くなる(図 10)。よって、凝固点降下度における式(1)はイオンが独立に存在するという仮定で成り立っているため、塩化ナトリウムは電解質であることにより、理想法則から外れ、差が生じたと考えられる。

#### 4-3. 硝酸ナトリウム希薄溶液 0.5, 1.0, 2.0 mol/L の凝固点測定

硝酸ナトリウム水溶液と、塩化ナトリウム水溶液の凝固点降下度について、理論値と実測値との間の差は、塩化ナトリウムよりも硝酸ナトリウムの方が小さいという結果が得られた。それぞれの凝固点降下度の関係について、実験を十分に繰り返せなかつたため、判断材料が不足している。塩化ナトリウムと硝酸ナトリウムはいずれも水中で二つの粒子に電離するために、同濃度では同程度の凝固点降下が起こると考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では塩化ナトリウムおよび硝酸ナトリウムを用いて水溶液の濃度による凝固点降下度への影響を調べることを目的として実験を行った。仮説は濃度が濃くなっていくに連れて理論値からの差が大きくなるというものであった。結果としては、希薄溶液では比較的理論値に近い値が得られ、濃度と凝固点降下の間に比例関係が確認された。一方、濃厚溶液になるにつれて実測値は理論値よりも高い値となり、理論式(1)が成り立たなくなった。これは、冷却過程で水が先に凝固して液相中の塩化ナトリウム濃度が上昇したことや、イオン間相互作用の増大などが要因と考えられる。また、硝酸ナトリウム水溶液では、実験の試行回数が少なく、また、希薄溶液のみを対象として行ったため、塩化ナトリウムの濃厚溶液で見られたような大きな差は確認されなかった。そのため、溶質の違いによる影響については、濃度範囲を揃えた追加実験が必要であると考えられる。

今後の展望としては、濃度の高い水溶液において凝固点がどのように決まるのかを調べたい。本研究では濃厚溶液では理論値から大きくずれることがわかったが、これは冷却中に水が先に凝固して濃度が変化することや、溶質粒子同士の影響が関係していると考えられる。今後は凝固直前の温度変化に注目し、できるだけ溶液が均一な状態で凝固点を測定する方法を取りたい。また、溶質の種類による違いを明確にするために電解質と非電解質を同じ条件下で比較し、イオンの有無が凝固点降下に与える影響を調べたい。これにより、濃度だけでなく溶質の性質も凝固点に関わっているのかを明確にできると考えられる。この研究は、融雪剤や不凍液のように、凍結を防ぐことに利用される身近な物質の適性を考えることにつながる。実際の使用環境では、単に凝固点を下げれば良いのではなく、物質の性質や濃度によって適した物質が選ばれているが、凝固点降下がどのような条件で理論通りにならないのかを調べることで、本研究はなぜ特定の物質が融雪

剤や不凍液として用いられているのかを理解するとともに、将来的には使用条件に応じた最適な凍結防止物質の提案に発展すると考えた。

## 6. 参考文献

- 1)静岡県立清水東高等学校 自然科学部化学班, 2016年, 凝固点降下の測定において見つかった理論値と測定値のズレについて 2025.9.12 <https://gakusyu.shizuoka-c.ed.jp/science/sonota/ronnbunshu/h28/163048.pdf>
- 2) 辰巳敬, 令和6年1月31日, 化学, 数研出版, p.74
- 3) <水の科学7>水は物質を溶かす液体, 2018年10月17日 <https://media.aqua-sphere.net/<水の科学6>圧力によって融点・沸点は変わる> 2026.2.6
- 4)日本冷凍空調学会 過冷却水 1999年11月 <https://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/48.htm> 2026.2.6
- 5)Yasui Shibuta, Kanae Oguchi, Tomohiro Takaki, Munekazu Ohno, 2015年8月17日, Homogeneous nucleation and microstructure evolution in million-atom molecular dynamics simulation, 2026.1.16 <https://www.nature.com/articles/srep13534>
- 6)Debye, P. & Hückel, E. (1923): „Die Abweichungen von den idealen Gesetzen sind auf die elektrischen Wechselwirkungen der Ionen zurückzuführen.“ Physikalische Zeitschrift, 24, 185–206. 2026.1.8 <https://www.pdf-archive.com/2019/09/23/untitled-pdf-document-2/>

# 酸化チタン結晶型の違いによる光触媒活性の評価

## ～メチレンブルーを用いた複数条件下での比較～

竹川さくら 弘中結実子 松井亜珠

### 要旨

本研究では、様々な条件下での  $\text{TiO}_2$  の結晶型の違いによる光触媒活性を評価することを目的とした。アナターゼ型およびルチル型の  $\text{TiO}_2$  を用い、添加物、焼成温度、照射する紫外線の波長を変化させ、メチレンブルー溶液が分解され青色から無色になるまでの時間を測定した。反応速度は、メチレンブルー溶液の分解反応を擬一次反応として近似し、反応速度定数を算出することで比較した。その結果、塩基性下、高温での焼成、光触媒のバンドギャップを満たす波長の紫外線を照射したときにより高い光触媒活性を示した。

### 1. はじめに

近年、光触媒は太陽エネルギーや光を用いた有害物質の分解や水素生成などを可能にする、環境負荷の低い技術として注目されている<sup>1)</sup>。その中でも酸化チタンは光触媒活性が高く、化学的に安定していることが報告されている<sup>1)</sup>。酸化チタン( $\text{TiO}_2$ )の光触媒の作用は、 $\text{TiO}_2$  に紫外線があたると、 $\text{TiO}_2$  内部で電子と正孔が生じ、それらが水や空気と反応して強力な活性酸素が生成されることで起こる<sup>2)</sup>。これらの活性酸素は有機物を分解する作用があり、メチレンブルーはこの活性酸素によって分解され無色になる<sup>3)</sup>。 $\text{TiO}_2$  は主にアナターゼ型およびルチル型の結晶構造を持ち、結晶型の違いによりバンド構造や光触媒活性が異なることが知られており、アナターゼ型はルチル型よりも光触媒活性が高いことが報告されている<sup>4)</sup>。先行研究では、アナターゼ型  $\text{TiO}_2$  のみ、あるいは限られた条件下での色素分解反応について主に報告されてきた。一方、ルチル型  $\text{TiO}_2$  を含め、結晶型の違いに着目して同一条件下で比較した研究は限られており、紫外線の波長や焼成温度などの複数の因子の観点から反応速度に及ぼす影響を評価した例は多くない。そこで本研究では、アナターゼ型およびルチル型  $\text{TiO}_2$  を用い、添加

物、焼成温度、および紫外線波長の条件を変化させ、メチレンブルーの光触媒による色素分解反応の進行を比較し、 $\text{TiO}_2$  の結晶型による光触媒活性の違いを明らかにすることを目的とした。光触媒活性の違いは、メチレンブルー溶液の吸光度の変化から反応速度定数を算出することで比較した。仮説として、アナターゼ型の方が、光触媒活性が高いため、ルチル型よりも反応速度は速くなると考えた。また、添加物としてグリセリンを加えると正孔に電子を供給し、犠牲剤として働くためどちらの結晶構造でも反応が進みやすくなり<sup>5)</sup>、 $\text{NaOH}$  を加えると液体が塩基性になることでメチレンブルーの色素分解が進みやすくなるため<sup>6)</sup>、結晶構造に関係なく反応速度は速くなると考えた。アナターゼ型とルチル型のバンドギャップは異なり、反応する波長がアナターゼ型のほうが短い<sup>2)</sup>。そのため、短波長の光を当てた場合、アナターゼ型の方がより反応が進みやすいと考えた。予備実験として、粉末の  $\text{TiO}_2$  を用いた際はルチル型よりもアナターゼ型の方が反応が進みやすかったが、焼成した場合はルチル型のほうが反応が進みやすくなったため、焼成することによって光触媒活性が妨げられる可能性があると考え、反応速度は  $\text{TiO}_2$  の焼成温度に影響されると考えた。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 器具・試料

本研究では、富士フィルム和光の酸化チタン(IV)ルチル型をルチル型  $\text{TiO}_2$  として、東京化成工業の酸化チタン(IV), AEROXIDE P25 をアナターゼ型  $\text{TiO}_2$  として用いた。なお、AEROXIDE P25 はアナターゼ相約 80%, ルチル相約 20% から成る混合型酸化チタンであることが知られているが、本研究では一般に「アナターゼ型」として広く用いられている実用光触媒<sup>7)</sup>として扱い、ルチル型  $\text{TiO}_2$  との光触媒活性の比較を行った。紫外線の照射は、外光が遮断されるように内側をアルミホイルで覆った段ボール箱に、 $\text{TiO}_2$  等の試料を入れることで行った。照射する光には、主波長 396 nm の UV LED テープライト(GREENIC, 消費電力 10 W), 主波長 365 nm の紫外線ランプ(UVGL-15)を用いた。UV LED テープライトはアルミホイルの上に貼り付け、紫外線ランプは段ボール箱に穴を開けてはめこんだ。前者を照射箱 1, 後者を照射箱 2 とした。装置の概略図を図 1 に示す。

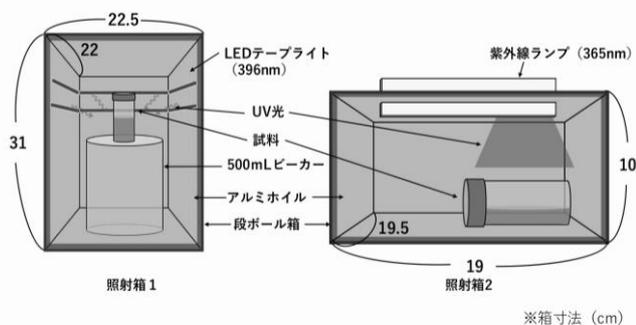


図 1 UV 照射装置の構成概略図

照射箱で紫外線を照射したメチレンブルー溶液は小型の瓶に取り出し、紫外可視分光光度計(UVmini-1240, SHIMADZU)で吸光度を測定した。粉状の  $\text{TiO}_2$  は、溶液中に分散して溶液が濁ると吸光度の計測が不可能になるため、電気炉で粒状に固めて焼成した上で行った。 $\text{TiO}_2$  を粒状に焼成するときには、 $\text{TiO}_2$  と水の割合をアナターゼ型は 2 g/3.5 mL, ルチル型は 2 g/2 mL でシャーレ内で混ぜ、ガラス板に直径 5 mm の

粒を作り条件により温度と時間を変えて焼成した。これを一試料として用いる量とした。添加物にはグリセリン, 2 mol/L の NaOH 水溶液を用いた。メチレンブルー溶液は、メチレンブルー 0.0145 g を水に溶かして 100 mL の溶液にし、これを 10 倍に希釈して作製した。

### 2-2. 方法

添加物の有無,  $\text{TiO}_2$  の焼成温度及び UV ライトの波長の違いによる影響を調べるために、次の 2-2.1~2-2.3 の方法で実験を行った。各試料溶液の吸光度は、メチレンブルーの極大吸収波長である 663 nm の波長で測定した。得られた吸光度の経時変化からそれぞれの条件における光触媒活性を評価するために、以下の解析を行った。光触媒によるメチレンブルーの色素分解反応は、高濃度域では反応速度が濃度に比例しなくなるが、低濃度域では擬一次反応としてみなせることが知られている<sup>8)</sup>。本研究では、先述した方法でメチレンブルー溶液を十分に希薄な条件で用いたため、反応を一次反応と仮定し、反応速度定数を算出した。

一般に、一次反応の積分速度式は溶液の初濃度  $C_0$ , 濃度  $C$ , 反応速度定数  $k$ , 時間  $t$  を用いて  $\ln[C]/[C_0] = -kt$  で表される。

また、ランベルト・ベールの法則より、 $A = \epsilon CL$  ( $A$ : 吸光度,  $\epsilon$ : モル吸光係数,  $C$ : 溶液の濃度,  $L$ : 光路長) が成立するため、溶液の濃度は吸光度に比例する。したがって、 $\ln[C]/[C_0]$  を  $\ln[A]/[A_0]$  に置き換えた次式に基づき、照射時間  $t$  に対して  $\ln[A]/[A_0]$  をプロットして得られる近似直線の傾きから速度定数  $k$  を求めた。

$$\ln[A]/[A_0] = -kt$$

あわせて、擬一次反応として近似することの妥当性を評価するために、決定係数  $R^2$  を求めた。

#### 2-2.1 添加物による影響

空試験として、スクリー管にメチレンブルーの溶液のみを 20 mL, メチレンブルー溶液 18.8 mL

と NaOH 水溶液 1.2 mL(2.0 mol/L)を入れて、照射箱 1 で主波長 396 nm の光を照射した。昼(13:15)に照射開始後、4日間夕方(16:30)と朝(8:10)にメチレンブルー溶液の色の变化を観察し、それぞれの吸光度を測定した(表 1 の①②)。なお、この空試験は焼成温度による影響と UV ライトの波長による影響についての空試験も兼ねる。次に、作製したアナターゼ型とルチル型の TiO<sub>2</sub> の粒をそれぞれ一試料ずつ 3 本のスクリー管に入れ、計 6 本のスクリー管を作製した。両方の結晶型のスクリー管 1 本ずつに、メチレンブルー溶液のみを 20 mL、メチレンブルー溶液 18.8 mL と NaOH 水溶液(2.0 mol/L) 1.2 mL、メチレンブルー溶液 18 mL とグリセリン 2.0 mL を加えた。表 1 の③~⑧に示すスクリー管 6 本を照射箱 1 で紫外線を照射し開始から 2.5 時間後、3 日後にメチレンブルー溶液の色の变化を観察し吸光度を測定した。

**表 1 添加物による影響の比較**

①②は 396 nm の光を照射開始後半日毎に測定

③~⑧は照射開始から 2.5 時間後に吸光度を測定

試料	TiO <sub>2</sub> の結晶型	添加物	体積 [mL]
①	なし	なし	20
②	なし	NaOH	20
③	アナターゼ	グリセリン	20
④	アナターゼ	NaOH	20
⑤	アナターゼ	なし	20
⑥	ルチル	グリセリン	20
⑦	ルチル	NaOH	20
⑧	ルチル	なし	20

## 2-2.2 焼成温度による影響

両方の結晶型の TiO<sub>2</sub> を 200℃で 20 分、300℃で 15 分焼成し、それぞれ 2 種類の試料を作製した。それぞれの試料とメチレンブルー溶液 20 mL をスクリー管に加えた。照射箱 2 で表 2 の⑦~⑩に示すスクリー管 4 本に紫外線を照射した。昼(13:15)に照射開始後、4 日間夕方(16:30)と朝

(8:10)にメチレンブルー溶液の色の变化を観察し、それぞれの吸光度を測定した。加えて、上記の実験とは別日に、焼成の条件を 300℃で 15 分、450℃で 10 分にし、加えるメチレンブルー溶液を 40 mL にして同様の方法で測定を行った(表2の⑪~⑭)。

**表 2 焼成温度による影響の比較**

396 nm の光を照射開始から半日毎に吸光度を測定

試料	TiO <sub>2</sub> の結晶型	焼成温度 [°C]	焼成時間 [分]	体積 [mL]
⑨	アナターゼ	300	15	20
⑩	アナターゼ	200	20	20
⑪	ルチル	300	15	20
⑫	ルチル	200	20	20
⑬	アナターゼ	300	15	40
⑭	アナターゼ	450	10	40
⑮	ルチル	300	15	40
⑯	ルチル	450	10	40

## 2-2.3 UV ライトの波長による影響

作製したアナターゼ型とルチル型の TiO<sub>2</sub> の粒を一試料ずつスクリー管に入れ、計 2 本のスクリー管を作製した。それぞれに 40 mL のメチレンブルー溶液を加え、照射箱2で主波長 365 nm の光を照射した。昼(13:15)に照射開始後、4 日間夕方(16:30)と朝(8:10)にメチレンブルー溶液の色の变化を観察し、それぞれの吸光度を測定した(表 3 の⑰⑱)。

上記の方法で、焼成の条件はそれぞれ 450℃で 10 分にし、加えるメチレンブルー溶液 40 mL にして行った。

**表 3 UV ライトの波長による影響の比較**

365 nm の光を照射開始から半日毎に吸光度を測定

試料	TiO <sub>2</sub> の結晶型	焼成温度 [°C]	焼成時間 [分]	体積 [mL]
⑰	アナターゼ	450	10	40
⑱	ルチル	450	10	40

### 3. 結果

表 1~3 の条件で実験し、算出した反応速度定数  $k$  と決定係数  $R^2$  の値を以下の表 4~6 に示す。なお、各実験の  $\ln[A]/[A_0]$  と照射時間  $t$  [h] の関係を示すグラフは添付資料の図 7~10 に示す。図 2~6 に各実験の試料の色の変化を示す。

表 4 添加物による影響の比較結果

試料	TiO <sub>2</sub> の結晶型	添加物	$k$ [/min]	$R^2$
①	なし	なし	0.0038	
②	なし	NaOH	0.0606	
③	アナターゼ	グリセリン	0.0025	0.856
④	アナターゼ	NaOH	0.0608	0.976
⑤	アナターゼ	なし	0.0655	0.999
⑥	ルチル	グリセリン	0.0083	0.906
⑦	ルチル	NaOH	0.0641	0.980
⑧	ルチル	なし	0.0476	0.988

表 5 焼成温度による影響の比較結果

試料	TiO <sub>2</sub> の結晶型	焼成温度 [°C]	焼成時間 [分]	$k$ [/min]	$R^2$
⑨	アナターゼ	300	15	0.0810	0.860
⑩	アナターゼ	200	20	0.0586	0.867
⑪	ルチル	300	15	0.0817	0.923
⑫	ルチル	200	20	0.0245	0.904
⑬	アナターゼ	300	15	0.0507	0.994
⑭	アナターゼ	450	10	0.0591	0.991
⑮	ルチル	300	15	0.0660	0.971
⑯	ルチル	450	10	0.0742	0.917

表 6 UV ライトの波長による影響の比較結果

試料	TiO <sub>2</sub> の結晶型	焼成温度 [°C]	焼成時間 [分]	$k$ [/min]	$R^2$
⑰	アナターゼ	450	10	0.0863	0.937
⑱	ルチル	450	10	0.0470	0.975



図 2 空試験の結果

左が照射前, 右が照射終了後の様子 (以下同様)

各図の左から順に①②の試料を示す。



図 3 添加物による色の変化の違い

各図の左から順に③④⑤⑥⑦⑧の試料を示す。



図 4 200・300°Cで焼成した場合の色の変化

各図の左から順に⑨⑩⑪⑫の試料を示す。



図 5 300・450°Cで焼成した場合の色の変化

各図の左から順に⑬⑭⑮⑯の試料を示す。



図 6 365nm の光を照射した場合の色の変化

各図の左から順に⑰⑱の試料を示す。

#### 3-1. 添加物による影響

結果は表 4 の通りである。アナターゼ型の反応速度定数は TiO<sub>2</sub> のみ, NaOH 有り, グリセリン有りの順に大きくなった。また, ルチル型の反応速度定数は NaOH 有り, TiO<sub>2</sub> のみ, グリセリン有りの順に大きくなった。

### 3-2. 焼成温度による影響

結果は表 5 の通りである。両方の型において 200°C から 300°C に焼成温度が 100°C 上がることでアナターゼ型、ルチル型それぞれの反応速度定数は約 1.4 倍、約 3.3 倍大きくなった。

さらに、両方の型とも 300°C から 450°C に焼成温度が 150°C 上がることでアナターゼ型、ルチル型それぞれの反応速度定数は約 1.2 倍、約 1.1 倍大きくなった。

### 3-3. UV ライトの波長による影響

結果は表 6 の通りである。アナターゼ型の方がルチル型より反応速度定数が 0.04 大きくなった。

## 4. 考察

本実験において、決定係数  $R^2$  は空試験の試料以外は全て 0.8 以上であったことから、 $\ln[A]/[A_0]$  は時間に比例し、メチレンブルー濃度に関する一次反応として近似できる。

### 4-1. 添加物による影響

アナターゼ型において、算出された反応速度定数は試料⑤の  $\text{TiO}_2$  のみが最も大きかった。しかし、図 7(b) より吸光度の時間変化を検討すると、2.5 時間後では  $\text{TiO}_2$  のみよりも  $\text{NaOH}$  を添加した場合に、吸光度が急降下していたが、3 日後にはどちらも吸光度が等しかった。このことが影響し、 $\text{TiO}_2$  のみの方が近似直線の傾きが大きくなり反応速度定数も大きく算出されてしまったと考える。また、図 3 でアナターゼ型の  $\text{NaOH}$  を添加した場合は 3 日後に無色になっていたのに対して、 $\text{TiO}_2$  のみは少し色がついていたことから  $\text{NaOH}$  を添加した場合のほうが光触媒活性は高いと言える。ルチル型においては、 $\text{NaOH}$  を添加した場合が最も反応速度定数が大きかった。総合的に判断すると、アナターゼ型とルチル型両方において塩基性下で光触媒活性が高くなるといえる。これは、 $\text{NaOH}$  水溶液を添加すると溶液の pH が上がり  $\text{TiO}_2$  表面が負に帯電し<sup>2)</sup>、メチレンブルー

が正に電荷を持つ<sup>6)</sup>ことで吸着が促進されるため、また、 $\text{OH}^-$ が増えることで活性種である  $\cdot\text{OH}$  の生成が加速するためであると考えられる。

一方、グリセリンを添加した場合は、アナターゼ型・ルチル型ともに、反応速度定数がほぼ 0 に近く、 $\text{TiO}_2$  のみの場合よりも小さくなった。このことから、グリセリンを添加することでメチレンブルーの分解速度は遅くなったことがわかる。これは、有機物であるグリセリンが酸化チタンによって優先的に分解されたことでメチレンブルーの分解が進行しにくくなったためだと考えられる。

### 4-2. 焼成温度による影響

アナターゼ型とルチル型の両方とも 200°C で焼成したときよりも 300°C のときの方が、反応速度定数が大きいことから、光触媒の活性を高めるためには、型に関わらず焼成温度は 200°C よりも 300°C が適していると言える。また、両方の型とも 300°C よりも 450°C のときの方が、反応速度定数が大きいことから、型に関わらず 300°C よりも 450°C の方が適していると言える。よって最も適している焼成温度は、どちらの型も 450°C であると言える。200°C で焼成した場合アナターゼ型の  $R^2$  が 0.87、ルチル型の  $R^2$  が 0.90 と比較的低い数値を示しておりこれは吸光度の数値が安定しておらず、ばらつきがあることを示している。このことから 200°C での焼成では  $\text{TiO}_2$  が完全に結晶化しなかった可能性があると考えられる。同様に、300°C での焼成よりも 450°C での焼成を行ったときの方が、より結晶化が進み光触媒活性も高くなったのだと考える。また、同じ焼成温度 300°C の試料の各型⑨・⑬および⑪・⑮を比較すると、反応速度定数は⑨、⑪の方が大きい一方で、 $R^2$  は⑬、⑮の方が高い値を示した。試料⑨、⑪は溶液量が 20 mL と少なく、吸光度測定のために溶液を採取したことで後半では溶液量がさらに減少し、単位体積当たりの  $\text{TiO}_2$  量が相対的に増加した。その結果、後半で反応速度が速くなり、直線

性が崩れたため  $R^2$  が小さくなったと考えられる。一方、試料⑬, ⑭は溶液量が 40 mL と多く、体積減少の影響が小さかったため直線性が保たれ  $R^2$  が高くなった。しかし、 $\text{TiO}_2$  に対する溶液量が多い分、触媒濃度が低くなり、反応速度定数は試料⑨, ⑩より小さくなったと考えられる。

#### 4-3. UV ライトの波長による影響

主波長 365 nm の光を当てた実験では、アナターゼ型の方がルチル型よりも反応速度定数が大きいことから 365 nm の UV ライト下ではアナターゼ型の方が強く反応し光触媒活性が高いと言える。アナターゼ型のバンドギャップが 3.2 eV(385 nm)、ルチル型のバンドギャップが 3.0 eV(413 nm)<sup>2)</sup>であり本実験で用いた 365nm の UV ライトは両型の  $\text{TiO}_2$  が活性化する波長領域内である。仮説でも示した通り本来アナターゼ型の方がルチル型の方よりも光触媒活性が高い。表 4, 表 5 で示した結果からは、アナターゼ型よりもルチル型の方が光触媒活性が高くなったと言えるが、それは 396 nm の UV ライトを用いており、波長がルチル型のバンドギャップしか超えていなかったからだと考えられる。本実験ではどちらの結晶型のバンドギャップも超えており、双方が反応可能な 365 nm の光を用いたことで同一条件下での比較となった。その結果、アナターゼ型が本来持つ高い光触媒活性を発現し、理論通りの結果が得られたと考える。

#### 5. まとめと今後の課題

本研究では、 $\text{TiO}_2$  の光触媒活性について、条件を絞り実験を行った。その結果、塩基性下で、または、結晶化しやすい高温での焼成を行うことで両方の型の光触媒活性が高くなった。両方の型のバンドギャップを満たす波長の紫外線を照射したとき、元々の光触媒活性が高いアナターゼ型が高い反応を示した。

今後の展望としては、今回、各実験が 1 回ずつしか行えなかったため、より正確なデータを得るた

めに追加実験を行うこと、 $\text{TiO}_2$  の結晶の可視化、完全に結晶化させて光触媒活性をより高めることができる焼成温度を探ること、本研究で使用した UV ライト波長よりも短い波長の紫外線を照射したときの光触媒活性の高低を探ることである。また、本研究で得た結果をもとに  $\text{TiO}_2$  の高い光触媒活性を用いた条件下での効率的な水素生成を目指す。

#### 6. 参考文献

- 1) 村田義彦, 1999, 酸化チタンの光触媒反応を利用した大気浄化技術の開発動向. *Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan*, 7, 50-56.
- 2) 埴田博史, 2002, トコトンやさしい光触媒の本. 日刊工業新聞社, 160.
- 3) 桑畑周司・毛塚智子, 2014, 酸化チタン光触媒によるアズール色素水溶液の脱色. *東海大学紀要工学部*, Vol.54, No2, 9-14.
- 4) 藤嶋昭, 1999, 光触媒と環境. *環境と光*, 29, 1, 2
- 5) 野坂芳雄・野坂篤子, 2018, 光触媒基礎講座 (VI) 光触媒の活性評価, *会報光触媒*, 56, 18-41.
- 6) 向井知大・大場茂, 2010, 青いフラスコの実験におけるメチレンブルーの脱色と分解. *慶應義塾大学日吉紀要, 自然科学*, 48, 11-30.
- 7) 大谷文章, JRC-TIO-4, ARC-TIO-4 および Evonik (Degussa)P25 からアナターズおよびルチルの単離に関する注意点, <https://catsj.jp/jnl/jrc/lit/141TIO-4Treatment.html>, 2026.1.30
- 8) Ovhall, Sheetal D.; Thakur, Pragati. Kinetics of Photocatalytic Degradation of Methylene Blue in a  $\text{TiO}_2$  Slurry Reactor. *Research Journal of Chemistry and Environment*. 2010, vol. 14, no. 4, p. 9-13.

#### 7. 添付資料

グラフは全て縦軸が  $\ln [A]/[A_0]$ , 横軸が時間

$t$  で、メチレンブルーの光触媒反応における  $\ln[A]/[A_0]$  と照射時間  $t$  [h] の関係を示す。

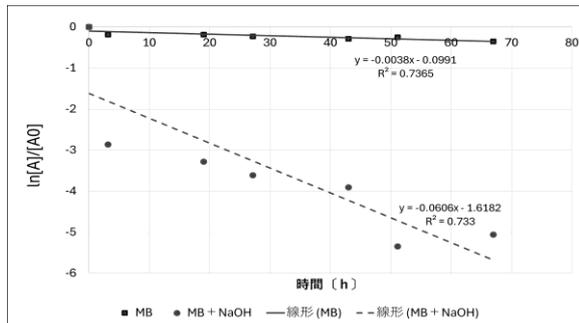


図 7 (a) 添加物の影響 (空試験)

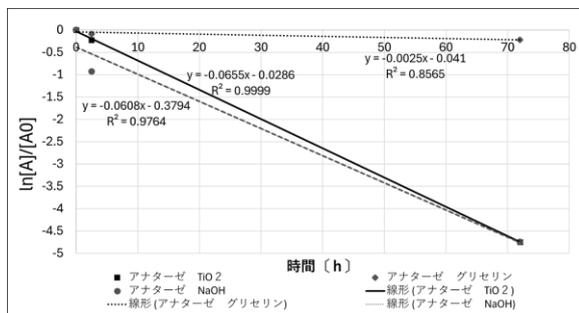


図 7 (b) 添加物の影響 (アナターゼ)

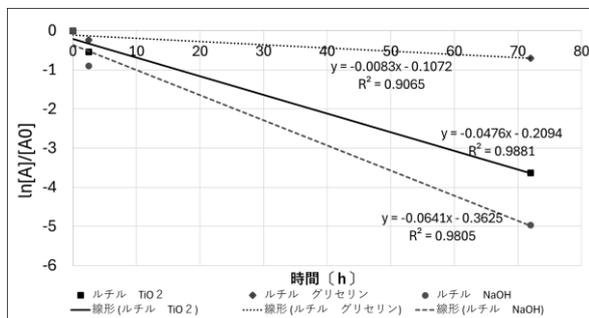


図 7 (c) 添加物の影響 (ルチル)

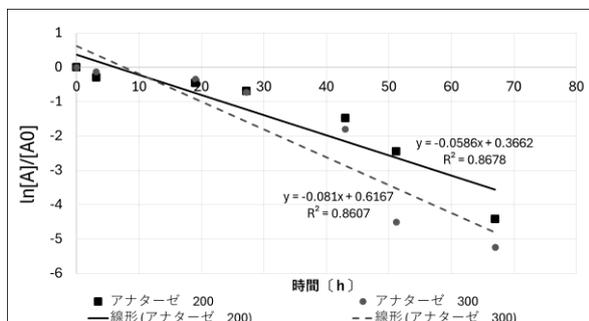


図 8 (a) 焼成温度の影響  
(200°C・300°C, アナターゼ)

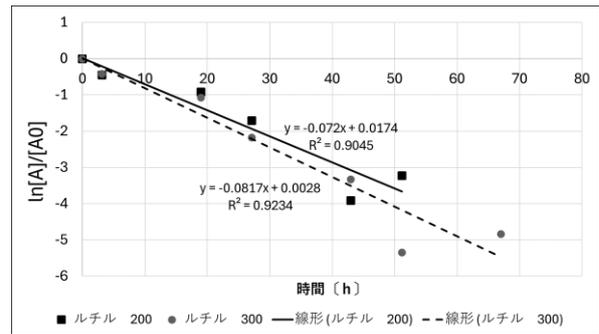


図 8 焼成温度の影響  
(200°C・300°C, ルチル)

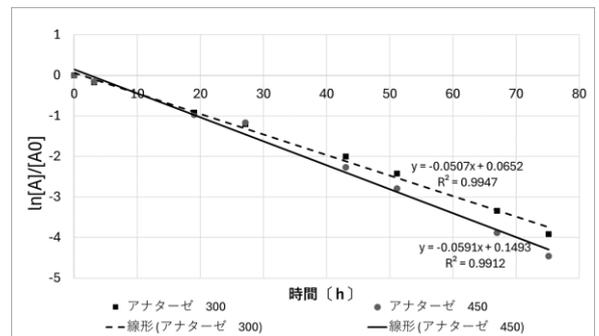


図 9 (a) 焼成温度の影響  
(300°C・450°C, アナターゼ)

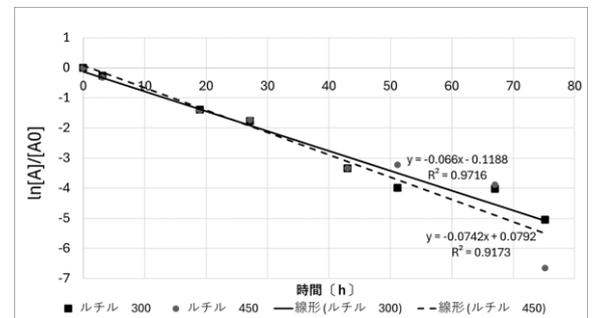


図 9 (b) 焼成温度の影響  
(300°C・450°C, ルチル)

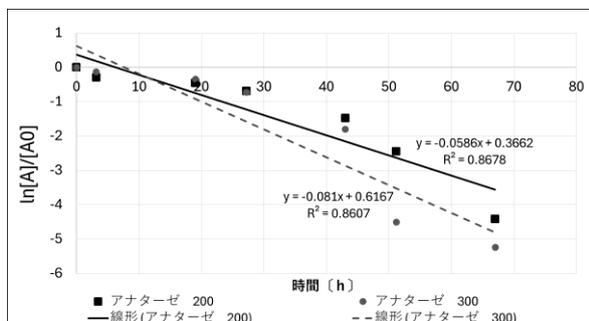


図 10 紫外線波長の影響

# 高吸水性ポリマーを用いた保冷効果の高い蓄冷材の作製

河野里咲 白井咲花 高橋采花 短田理紗

## 要旨

一般的な蓄冷材は水と高吸水性ポリマーで構成されているが、本研究では、水を水溶液に置き換えてより保冷効果の高い蓄冷材を作製することを目的とした。水溶液の溶質の種類と濃度を変化させ、作製した蓄冷材表面における最低温度と温度変化を測定した。結果、尿素水溶液 1.0 mol/kg を基材とした蓄冷材が低温を最も長く維持したことから、尿素水溶液 1.0 mol/kg が最も効果的かつ持続性のある蓄冷材の基材であると結論付けた。本研究では、高吸水性ポリマー系蓄冷材における溶質濃度の最適条件を明らかにした点に新規性がある。

## 1. はじめに

蓄冷材は、繰り返し使用が可能であり、環境負荷を抑えつつ低温を維持できるため、農作物や食品の輸送において重要な役割を担っている。本研究では、持続可能に利用できる蓄冷材のさらなる性能向上を目的として実験を行った。

一般的な蓄冷材は、水約 99%と高吸水性ポリマー約 1%から構成されており<sup>1)</sup>、融解時に融解熱を周囲から吸収する原理を利用し、冷却効果を発揮する<sup>2)</sup>。蓄冷材は気温が高いところに放置しても、固体から液体へと状態が変化する間、大量の熱を周囲から吸収するため、長時間にわたって低温を維持することが可能となる。

また、高吸水性ポリマーは水分を多量に吸収して柔らかいゲル状を保ち、水の蒸発を抑制する性質をもつことから、冷却効果の持続に寄与している。既存の蓄冷材においては、添加物を加えペースト状やゲル状にすることで水の対流による融解速度を遅くし、水に他物質を溶かし込むことで凝固点を下げる工夫が行われている<sup>2)</sup>。

本研究では、蓄冷材の主成分である水への添加物の種類とその濃度に着目した。水に様々な添加物を加えた蓄冷材を作製し、その種類や濃度を変化させることで、蓄冷材に最適な添加物の種類とその濃度を明らかにし、水のみを基材とし

た保冷剤よりもさらに低温を長く保つ蓄冷材を作製することを目的とした。

予備実験として、水(100 g, 150 g)、グルコース水溶液(5%, 20%)、尿素水溶液(5%, 20%)、デンプン水溶液(5%, 20%)、エタノール水溶液(5%, 20%)をそれぞれ調製し、これらにホウ素水溶液とポリビニルアルコールを加えて蓄冷材を作製した(図 1)。



図 1. 予備実験で作製した蓄冷材

その結果、水を基材とした蓄冷材は、他の水溶液を基材としたものと比較して、一定の温度を最も長時間維持することが分かった。これは溶質を添加した場合は、水分子同士の水素結合が減少し、それを切断するためのエネルギーが温度上昇に使われるためだと考えられる。

一方で、水溶液を基材とした蓄冷材は冷凍庫から出した後の固体である初期段階での温度が低くなる傾向が見られた。これは、溶質の添加による凝固点降下の影響であると考えられる。しかし、

凝固点の低下は同時に融点の低下を引き起こし、早く融解が進むため、融解熱の吸収による低温が維持できなくなり、結果として蓄冷材の冷却持続性が低下することも示唆された。

以上より、水は一定の温度を維持するという点で安定性と持続性があり、基材とする水溶液の濃度を工夫することで、蓄冷材における初期段階の低温と持続性を得られると仮説を立てた。

本実験では、予備実験の結果を踏まえ、水溶液の溶質とその濃度を変え蓄冷材の保冷効果について比較を行った。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

蓄冷材の基材として予備実験で保冷効果が高かった水、尿素水溶液、グルコース水溶液を用いた。また、蓄冷材をゲル状にするために高吸水性ポリマー（高吸水性ポリマー、P70-3790-02、N100、NaRiKa）を用いた。尿素水溶液およびグルコース水溶液は、それぞれ所定の質量モル濃度となるように調製した。全ての実験において、高吸水性ポリマーは全体の質量に対して 1%となるように調製した。

#### 2-1-1. 実験①の研究試料

水、尿素水溶液 1.0 mol/kg、グルコース水溶液 1.0 mol/kg を基材とし、高吸水性ポリマーを加え冷却した蓄冷材を比較した(図 2)。



図 2. 高吸水性ポリマーと水、尿素水溶液、グルコース水溶液で作製した蓄冷材

#### 2-1-2. 実験②の研究試料

尿素水溶液の質量モル濃度を 0.10, 0.50, 1.0, 2.0 mol/kg の 4 段階に設定し、高吸水性ポリマ

ーを加えて蓄冷材を作製した。各試料は同一の容器に封入し、測定条件の差が生じないようにした(図 3)。



図 3. 高吸水性ポリマーと濃度別の尿素水溶液で作製した蓄冷材

### 2-2. 研究方法

各試料を同一の冷凍庫内(-20.3℃)で十分に冷却した後、同時に取り出して、室温(28.0℃)下に静置した。試料の表面温度は、非接触式温度計(73036, シンワ測定株式会社)を用いて測定し、取り出し直後を 0 分としてその後一定時間ごとに測定を行った(図 4)。



図 4. 非接触式温度計を用いた蓄冷材表面温度の測定の様子

#### 2-2-1. 実験①の研究方法

実験①では、水、尿素水溶液、グルコース水溶液を基材とした蓄冷材の時間経過に伴う表面温度の変化を比較した。測定は 3 回行い、得られた値の平均を代表値としてグラフに用いた。本実験では 3 回測定の平均値を用いたが、測定誤差や温度計の測定位置の違いによるばらつきが含まれる(7. 添付資料参照)。

#### 2-2-2. 実験②の研究方法

実験②では、質量モル濃度の異なる尿素水溶液を基材とする蓄冷材について、実験①と同様に

時間経過に伴う表面温度の変化を測定し、比較した。測定は 3 回行い、得られた値の平均を代表値としてグラフに用いた。

### 3. 結果

#### 3-1. 実験①の結果

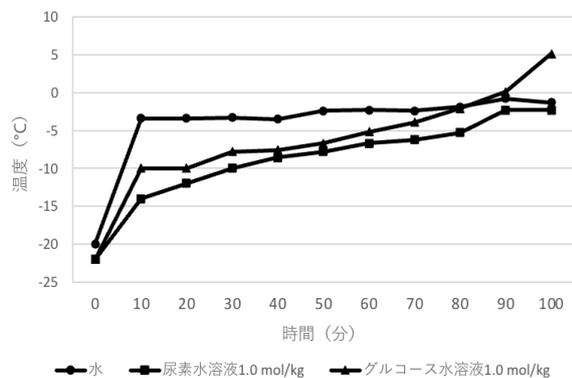


図 5. 基材による蓄冷材の表面温度の推移

実験①では、水、尿素水溶液、グルコース水溶液を基材とした蓄冷材の保冷効果について比較した。室温下での時間経過に伴う蓄冷材の表面温度の変化を条件ごとに比較した。

図 5 より、どの時点においても最低温度を記録したものが尿素水溶液であった。冷凍庫から取り出してから初期段階においては、グルコース水溶液と尿素水溶液が低い温度を記録し、その後の時間経過に伴う温度上昇は、尿素水溶液がグルコース水溶液と比較して明白に緩やかであった。100 分経過時点で 0°C を上回ったのは、グルコース水溶液のみであった。10 分経過までの温度上昇は、水が最も大きく、次いでグルコース水溶液、尿素水溶液の順であった。また、10 分経過以降の温度変化は、水が最も小さかった。

#### 3-2. 実験②の結果

実験②では質量モル濃度を 0.10, 0.50, 1.0, 2.0 mol/kg とした尿素水溶液を基材とする。蓄冷材を作製し、それぞれの条件における保冷効果を比較した。

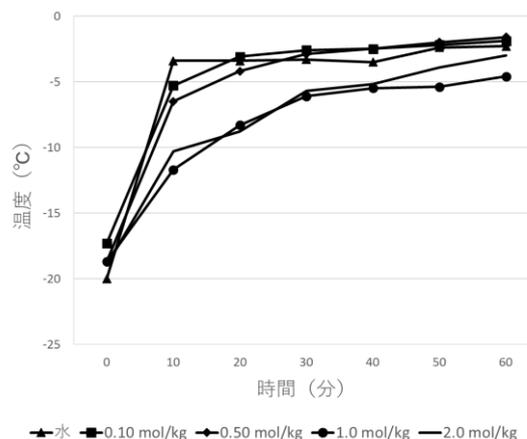


図 6. 質量モル濃度別の表面温度の推移

室温下での時間経過に伴う表面温度の変化を条件ごとに比較した。図 6 より、60 分経過時点で最低温度を記録したのは質量モル濃度が、1.0 mol/kg の蓄冷材であった。0.10 および 0.50 mol/kg の蓄冷材は、10 分時点までの温度上昇が著しく、その後の温度変化は比較的緩やかであった。1.0, 2.0 mol/kg の蓄冷材は 0 分時点から温度上昇の傾向は緩やかで、全体を通して低温を保っていた。20 分経過時点から 25 分経過時点にかけては 2.0 mol/kg の蓄冷材が最低温度を記録していた。

### 4. 考察

#### 4-1. 実験①の考察

図 5 より、尿素水溶液を基材とした蓄冷材がどの時点でも最低温度を記録していることがわかる。固体である初期段階は溶質添加による凝固点降下により温度が低いと考えられる。また、融点に達してから一定の温度を維持する水に対して、尿素水溶液とグルコース水溶液は緩やかに温度が上昇している。これは、融解する間に水溶液の質量モル濃度が小さくなるためだと考えられる。

グルコース水溶液を基材とした蓄冷材と尿素水溶液を基材とした蓄冷材を比較すると、尿素水溶液を基材とした蓄冷材の方が低温を維持している。水溶液中において、尿素分子は尿素分子同士または尿素分子と水分子間で水素結合を形成する<sup>3)</sup>。しかし、グルコースよりも 1 分子あたりの水分子

と形成する水素結合の数が少ないので、溶質添加による水分子同士の水素結合の減少が小さく、尿素水溶液を基材とした蓄冷材の方が低温を維持したと考えられる。最低到達温度は尿素水溶液が最も低い一方で、一定の温度を維持する持続性という観点では、水を基材とした蓄冷材が最も優れていた。以上のことから、最低到達温度と持続性のバランスを総合的に評価すると、尿素と水を混ぜた尿素水溶液が蓄冷材の基材として最も適していると言える。

#### 4-2. 実験②の考察

図 6 より、水と尿素水溶液 0.10, 0.50 mol/kg を基材とした蓄冷材の温度変化が類似しているため、この範囲だと尿素を添加したことによる効果は小さいと言える。

1.0, 2.0 mol/kg は、0.10, 0.50 mol/kg よりも初期段階の温度が低く、これは尿素を添加したことで凝固点降下が起こった影響だと考えられる。尿素水溶液 1.0 mol/kg と 2.0 mol/kg を比較すると、1.0 mol/kg の方が最終時点での温度が低いが、両者の温度変化は類似している。1.0 から 2.0 mol/kg にしたときよりも、0.50 から 1.0 mol/kg にしたときの方が、温度上昇の抑制効果が高い。1.0 と 2.0 mol/kg では温度抑制効果にほとんど違いはないため、環境への影響を考慮すると、より少ない質量で低温維持の効果を得られる尿素水溶液 1.0 mol/kg が蓄冷材の基材に適していると言える。

#### 5. まとめと今後の課題

本研究では、水の代わりに水溶液を用いた蓄冷材を作製し、保冷効果を比較した。その結果、尿素水溶液を用いた蓄冷材は、水やグルコース水溶液を用いた蓄冷材よりも低温を長時間保つことが分かった。また、尿素水溶液の質量モル濃度を変化させて調べたところ、1.0, 2.0 mol/kg の蓄冷材が、初期段階の温度の低さと融点に達してから低温の持続性の両方において優れていた。

これらの結果から、蓄冷材の性能は初期段階の温度の低さだけでなく、融けるまでの時間が大きく関係していることがわかった。初期段階の温度と低温の持続性のバランス、また用いる尿素的の質量から判断すると、尿素水溶液 1.0 mol/kg が蓄冷材の基材に適していることを明らかにした。

本研究の結果は、身近な場面で使用される蓄冷材の改良に活用できると考えられる。例えば、弁当や飲み物の保冷、部活動や野外活動での保冷、災害時の簡易的な冷却など、長時間安定した冷却が必要な場面で役立つ可能性がある。特に、尿素水溶液を用いることで、水だけの蓄冷材よりも低温を保ちやすくなるため、より効率の良い蓄冷材の作製につながると考えられる。

今後の課題として、本研究では、蓄冷材の表面温度のみを測定したため、今後は蓄冷材内部の温度変化や、実際に物を冷やしたときの効果についても調べる必要がある。なお、本研究では測定回数が限られているため、今後は試行回数を増やし統計的検討を行う必要がある。また、尿素以外の物質を溶かした水溶液や、異なる濃度の組み合わせについても実験を行うことで、さらに保冷効果の高い条件を見つけれられる可能性がある。加えて、高吸水性ポリマーの量や種類を変えた場合の影響を調べることで、より実用的な蓄冷材の開発につながると考えられる。

#### 6. 参考文献

- 1) 株式会社カルックス, 保冷剤について, [https://karux.com/ice\\_pack/](https://karux.com/ice_pack/), 2025.6.30
- 2) ワコン株式会社, 2021.11.25, 保冷剤の基礎知識「保冷剤・蓄冷剤とは」, <https://www.wa-con.co.jp/example/> 保冷箱の基礎知識「保冷剤・蓄熱剤とは?」, 2025.6.30
- 3) 小林修・佐々和洋・林治尚・中野英彦, 2004, 分子動力学法による尿素水溶液の構造に関する研究. 日本コンピュータ化学会年会講演予稿集, 春季, 77.

## 7. 添付資料

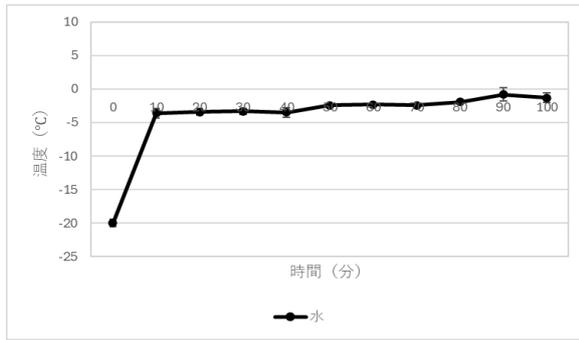


図7. 水を基材とした蓄冷材の表面温度の推移と誤差範囲

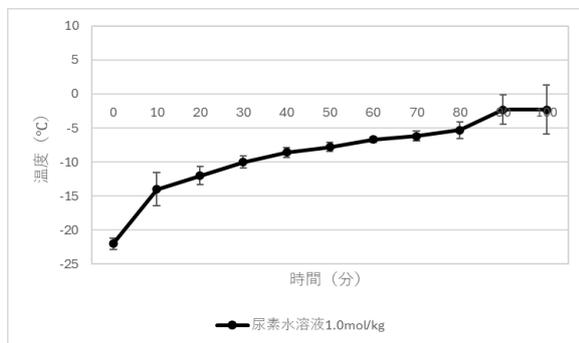


図8. 尿素水溶液 1.0 mol/kg を基材とした蓄冷材の表面温度の推移と誤差範囲

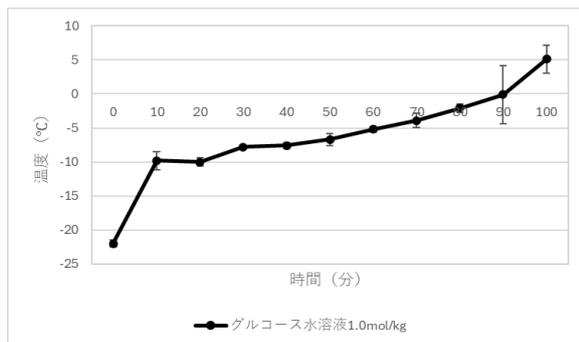


図9. グルコース水溶液 1.0 mol/kg を基材とした蓄冷材の表面温度の推移と誤差範囲

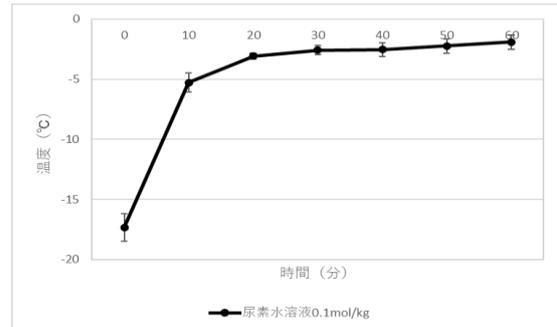


図10. 尿素水溶液 0.1 mol/kg を基材とした蓄冷材の表面温度の推移と誤差範囲

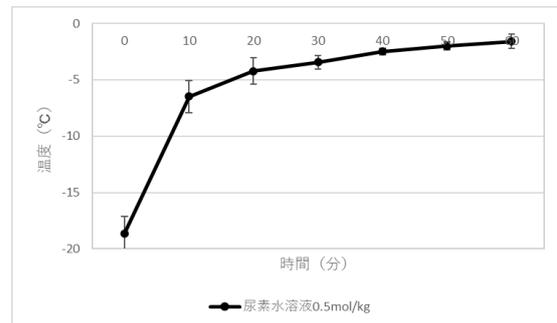


図11. 尿素水溶液 0.5 mol/kg を基材とした蓄冷材の表面温度の推移と誤差範囲

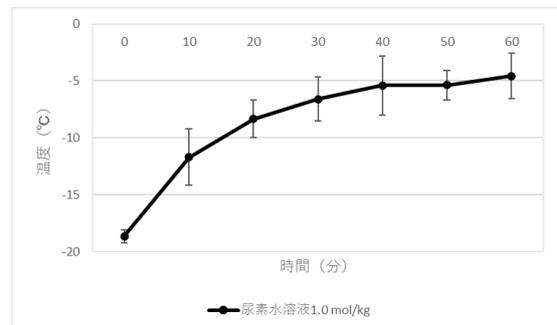


図12. 尿素水溶液 1.0 mol/kg を基材とした蓄冷材の表面温度の推移と誤差範囲

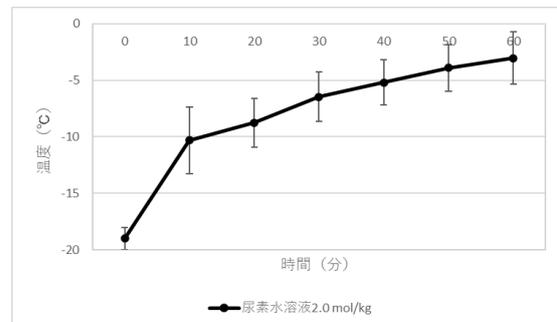


図13. 尿素水溶液 2.0 mol/kg を基材とした蓄冷材の表面温度の推移と誤差範囲

# デンプンを原料としたプラスチックの代替品の開発

足立 謙映 穴澤 来未 益田 真帆 水嶋 環

## 要旨

バイオプラスチックは、植物由来の原料から作られ開発途上であり、一般的なプラスチックに比べ強度が低く、あまり普及が進んでいない。身近な材料を用いて引っ張り強度の強いバイオプラスチックを作製することでバイオプラスチックの普及に貢献できると考え、材料や作り方を変えてどのプラスチックが最も強くなるか調べた。結果は、ジャガイモデンプンと白玉粉を 1:1 の割合で 4 g ずつ、水 30 g、クエン酸 1.25 mL、グリセリン 2.5 mL を用いて作製したプラスチックの強度が最も高かった。

## 1. はじめに

### 1-1. 研究背景

バイオプラスチックは、植物由来の原料から作られ開発途上であり、一般的なプラスチックに比べ強度が低く、あまり普及が進んでいない<sup>1)</sup>。身近な材料を用いて引っ張り強度の強いバイオプラスチックを作製することでバイオプラスチックの普及に貢献できると考え、材料や作り方を変えてどのプラスチックが最も強くなるか調べた。

### 1-2. 仮説

バイオプラスチックを作製する際、直鎖状の構造を持つデンプンであるアミロースと枝分かれ状の構造を持つアミロペクチン<sup>2)</sup>の分量を調節することでプラスチックに適度な柔軟性と硬さをもたせることができると考え、デンプンの中でも手に入りやすい、アミロースを 15% から 30% 含むジャガイモデンプンとアミロペクチンを 100% 含む白玉粉を用いた。これらの用いる量の調節を行うことで強度が向上するのではないかと仮説を立てた。また、デンプンのヒドロキシ基とホルムアルデヒドが反応し架橋構造を形成すると考え、ホルマリンを用いて作製すると強度が向上するのではないかと仮説を立てた。さらに、乾燥させる環境を管理し、乾燥機で高温で乾燥させる、冷蔵庫の中で低温で乾燥させることで水分の蒸発の仕方が変化し、それに

伴って強度も変化するのではないかと仮説を立てた。先行研究<sup>3)</sup>では、プラスチックにグリセリンを用いていたが、グリセリンには保水性があるため<sup>4)</sup>、プラスチックの柔軟性を高める効果があると考えられる。また、酸にはデンプンと加熱するとデンプンを加水分解する性質があるため<sup>5)</sup>、文献<sup>3)</sup>で用いられた酢酸にはデンプンの反応を促進する効果があると考えられる。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

ジャガイモデンプン、白玉粉、グリセリン、食酢、クエン酸、硫酸、ホルマリン、純水、デジタルノギス (APB-2D, Mitutoyo)、デジタルフォースゲージ (MXmoonfree)

### 2-2. 研究方法

まず、水とデンプンをビーカーの中に入れた。次に、全体の色がおおよそ均一になるまでかき混ぜた後、セラミック網にのせてガスバーナーで加熱した。そのデンプン水が糊化してきたら食酢またはグリセリンを加えた。かき混ぜにくくなるまで糊化したら、シリコンマットの上に流した。それを 1 週間放置したものが今回のバイオプラスチックである。

作製したバイオプラスチックの中で十分な大きさのあるものは、デジタルノギスで厚さを計測した

後デジタルフォースゲージの上下の金具に作成したプラスチックの端を挟んで固定し、引っ張り強度を測定した。

実験①は材料の有無の条件を変えてグリセリンと酢酸の有無がプラスチックの形状と強度に与える影響を調べるために行った。

実験②はデンプンと白玉粉の用いる割合がプラスチックの強度に与える影響を調べるために行った。

実験②から、1:1のものが最も強度が高いことが分かった為、実験③はデンプンの総量による影響を調べるために行った。

実験④では、デンプンのヒドロキシ基とホルムアルデヒドが結合し、架橋反応を起こすと考え、加熱前のビーカーにホルムアルデヒド 5 mL を添加した。

実験⑤は、先行研究<sup>3)</sup>では酢酸が用いられていたが、酸の役割を調べるために、酢酸 (pH2.8)・クエン酸水溶液 (pH2.8)・硫酸 (pH1)・硫酸 (pH5)の4種類の酸を用いてプラスチックを作製した。

これまでは室温乾燥で1週間放置を行っていたが、乾燥方法によって強度が変わるのではないかと思い、実験⑥では、室温乾燥・乾燥機 70℃・冷蔵庫 10℃の3種類のものを作製した。

ここまでの実験より、強度が高くなる条件として、デンプンの混合比は1:1で4.0 g ずつであった。実験⑦では、酸はクエン酸水溶液 (pH2.8)を用いる。冷蔵庫 10℃で乾燥することであったため、これらを全て満たすものが最も強度が高くなるのではないかと考えた。そこで、上記の条件のうち、乾燥方法を変え、室温乾燥と冷蔵庫 10℃で乾燥させるもの2種類を作製した。

なお、実験④以降にはシリコンマットの代わりに直径 4 cm の円形のシリコン型を使用した。その際、試料は 3.4 g 流し込んだ。これは、プラスチックの厚みを均一にするためである。実験⑤からは、加熱時間を 10 分に統一した。また、乾燥方法について、ヒ)は73℃の乾燥機で30分、フ)は約10℃

の冷蔵庫で30分、ミ)は約10℃の冷蔵庫で1時間乾燥させた後、実験室に放置した。

### 2-3. 実験の条件

添加した物質の量や条件は表 1～表 7 の通りである。

表 1. 実験①の条件

区分	デンプン [g]	グリセリン [mL]	食酢(酢酸) [mL]	水 [mL]
ア)	15	2.5	1.25	30
イ)	15	0	0	30
ウ)	15	2.5	0	30
エ)	15	0	1.25	30

表 2. 実験②の条件

区分	デンプン [g]	白玉粉 [g]	グリセリン [mL]	食酢(酢酸) [mL]	水 [mL]
カ)	4.0	4.0	2.5	1.25	30
キ)	1.6	6.4	2.5	1.25	30
ク)	6.4	1.6	2.5	1.25	30
ケ)	2.0	6.0	2.5	1.25	30
コ)	6.0	2.0	2.5	1.25	30

表 3. 実験③の条件

区分	デンプン [g]	白玉粉 [g]	グリセリン [mL]	食酢(酢酸) [mL]	水 [mL]
サ)	7.5	7.5	2.5	1.25	30
シ)	4.0	4.0	2.5	1.25	30

区分	デン ブン [g]	白玉 粉 [g]	グリ セリ ン [mL]	食酢 (酢 酸) [mL]	水 [mL]	ホル マリ ン [mL]
タ)	4.0	4.0	2.5	1.25	30	5

区分	デ ン ブ ン [g]	白 玉 粉 [g]	グリセ リン [mL]	酸の種類 (添加量 は 1.25[mL])	水 [mL]
ナ)	2.5	2.5	2.5	食酢 (pH2.8)	20
ニ)	2.5	2.5	2.5	クエン酸 水溶液 (pH2.8)	20
ヌ)	2.5	2.5	2.5	硫酸 (pH1)	20
ネ)	2.5	2.5	2.5	硫酸 (pH5)	20

区分	デン ブン [g]	白 玉 粉 [g]	グリセリ ン [mL]	食酢 (酢 酸) [mL]	乾燥方 法
ハ)	2.5	2.5	2.5	1.25	室温乾 燥
ヒ)	2.5	2.5	25	1.25	乾燥機 70°C
フ)	2.5	2.5	2.5	1.25	冷蔵庫 10°C

区分	デン ブン [g]	白玉 粉 [g]	グリセリ ン [mL]	クエ ン酸 [mL]	乾燥方 法
マ)	2.5	2.5	2.5	1.25	室温乾 燥
ミ)	2.5	2.5	2.5	1.25	冷蔵庫 10°C

### 3. 結果

作製したプラスチックの厚さは 0.36 mm から 1.85 mm の間となった。

「N.A.(Not Available)」は、作製した試料では測定できなかったことを示す。

#### 3-1. 実験①の結果

	強度 (平均) [N]	厚さ [mm]
ア)	21.7	0.70
イ)	N.A.	N.A.
ウ)	N.A.	N.A.
エ)	N.A.	N.A.

グリセリンのみで作製したものは、酢のみで作製したものよりも形を保っていた。グリセリンのみ・酢酸のみ・どちらも無しの 3 つは、細かく砕けていたため、引っ張り強度の測定が不可能だった(図 1)。

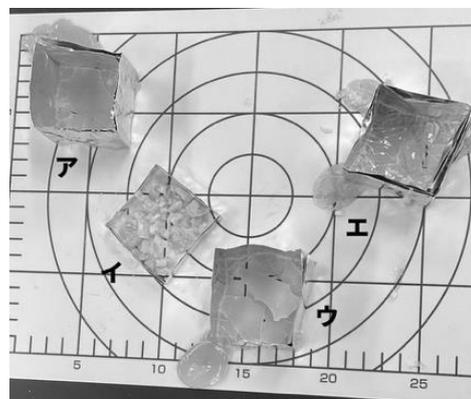


図 1. 実験①で作製したもの

### 3-2. 実験②の結果

表 9. デンプン・白玉粉の混合比と測定値

	強度(平均)[N]	厚さ[mm]
カ)	16.1	0.56
キ)	7.5	N.A.
ク)	N.A.	N.A.
ケ)	5.1	0.36
コ)	7.0	0.78

用いる割合を 1:1, 1:4, 4:1, 1:3, 3:1 にしたものの内で, 1:1 のものの引っ張り強度が最も高かった。

### 3-3. 実験③の結果

表 10. 用いたデンプンの総量と測定値

	強度(平均)[N]	厚さ[mm]
サ)	9.87	1.85
シ)	16.06	0.56

デンプンの割合を約半分にすると, プラスチックのヒビの数が減り, 柔軟性が増した。この結果より, 実験④以降は, デンプンと白玉粉を 4.0g ずつ用いた。

### 3-4. 実験④の結果

水分が十分に蒸発せず, ゴムようになった。

### 3-5. 実験⑤の結果

表 11. 用いた酸の種類と測定値

	強度(平均) [N]	厚さ[mm]
ナ)	11.9	0.63
ニ)	38.9	0.66
ヌ)	29.5	0.57
ネ)	16.8	0.77

クエン酸水溶液を用いたものの引っ張り強度が高かった(図 2)。

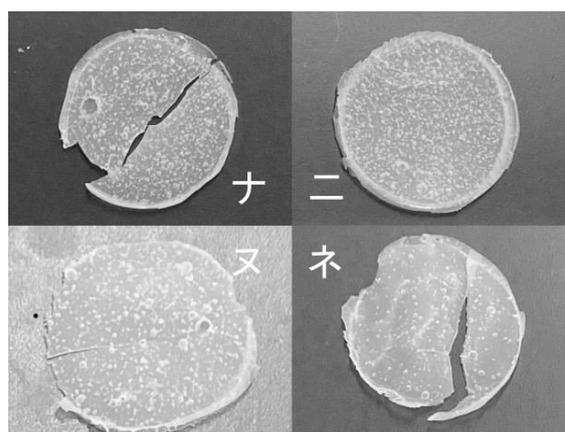


図 2. 実験⑤において作製したプラスチック

### 3-6. 実験⑥の結果

表 12. 乾燥方法を変えた時の測定値

	強度(平均) [N]	厚さ(平均)[mm]
ハ)	13.8	0.64
ヒ)	11.4	0.55
フ)	22.3	0.56

冷蔵庫 10℃で乾燥させたものが 22.3 と最も引っ張り強度が高かった。

### 3-7. 実験⑦の結果

表 13. クエン酸を用いて乾燥方法を変えた時の測定値

	強度(平均)[N]	厚さ[mm]
マ)	27.5	0.86
ミ)	20.7	0.79

冷蔵庫 10℃で乾燥させたものよりも, 室温乾燥のものの方が引っ張り強度が高かった。

ここまでの実験において, ジャガイモデンプンと白玉粉を 1:1 の割合で 4 g ずつ, 水 30 g, クエン酸 1.25mL, グリセリン 2.5mL を用いて作製したプラスチックの引っ張り強度が最も高かった。

## 4. 考察

### 4-1. 実験①の考察

実験①においてグリセリンを用いてプラスチックを作製した時、用いていないものよりも形を保っていたことから、グリセリンにはプラスチックが乾燥段階で割れるのを防ぐ働きがあると言える。グリセリンには保水性があるため<sup>4)</sup>乾燥する間に過度に水分が蒸発せず、デンプン同士の結合が切れずに保たれたためだと考える。このことからグリセリンは本研究で作製するバイオプラスチックで可塑剤としてはたらし、バイオプラスチックの形状維持に必要であることが明らかになった。

### 4-2. 実験②の考察

実験②においてジャガイモデンプンと白玉粉を1:1の割合で作製したものの引っ張り強度がもっとも高かったことから強度の高いプラスチックを作るには同量のデンプンと白玉粉を用いるのがよいと考える。

用いたジャガイモデンプンは15~30%がアミロース、白玉粉に含まれるデンプンは100%アミロペクチンであり<sup>2)</sup>それぞれを等しい割合で混ぜ合わせることで強度が上がった。

ジャガイモデンプンと白玉粉を約1:1で混ぜたときに最も強度が上がった理由については以下のように考察する。アミロースはデンプンのゲル、すなわち老化(冷却により糖鎖から水分子が離れ、糖鎖同士の水素結合が再形成されて結晶状態に戻ろうする現象)が硬さに寄与する<sup>6)</sup>。これより、アミロースの割合が高くなるとプラスチックは硬くなり柔軟性が劣ると考えられる。一方で、ここから、アミロペクチンの割合が高くても硬さが保てず、プラスチックの形状が保てなくなると考えられる。

### 4-3. 実験③の考察

実験③において粉の総量を15gから8gにすると、強度が上がった。これは、一定の水の量に対して用いる粉の量を減らしたため相対的に水の割合が増え、デンプンが糊化する際に起こる水素

結合<sup>6)</sup>に使うことのできる水分子が多くなり、糊化が進行しやすくなったためだと考える。

### 4-4. 実験④の考察

実験④においてホルマリンを追加したことでグリセリンのみの場合以上にプラスチックが柔軟性を持つようになったと考えられる。ホルマリンはヒドロキシ基と反応しメチレン基(-CH<sub>2</sub>-)を作るが、反応によって架橋ができ、グリセリンの可塑剤としての働きによりプラスチックが柔らかくなった可能性がある。しかしながら、プラスチックの硬さは担保されなかった。このことから、プラスチックの作製においては、ホルマリンの添加は適していない、または添加する量の調整が必要であると考えられる。

### 4-5. 実験⑤の考察

強酸の方が弱酸に比べてデンプンの加水分解を起こしやすい<sup>5)</sup>。実験⑤では、酸性の強いpH1の硫酸を用いた時の方が、pH5の硫酸を用いた時よりも強度が高く、このことからpHが小さい酸を用いた時に加水分解が速く進み、プラスチックの強度が向上したと考えられる。しかし、pH1硫酸を用いた時よりもpHが大きいpH2.8のクエン酸を用いた時の方が強度が高くなった。クエン酸を用いた時は、加水分解が過剰に促進されることなく、鎖の長さが保たれ、強度が高くなった可能性がある。

### 4-6. 実験⑥の考察

実験⑥の結果では、10℃の冷蔵庫で乾燥させると強度が向上した。デンプンは温度では0~5℃がデンプン鎖から水分が離れて硬くなり最も変性しやすく、60℃以上や0℃以下は変性しにくいという性質を持っている<sup>7)</sup>。そのため、冷蔵庫の温度がデンプンの変性しやすい温度に最も近く、上記のような結果になったと考えられる。

### 4-7. 実験⑦の考察

これまでの実験でのもっとも強度が高くなった

条件を組み合わせる実験⑦を行ったが、結果として室温の方が強度は高くなった。この点においては、作る際の混ぜ方や、火の強さ、気温などに左右され強度が変化すると考えられるため、安定して強度の高いプラスチックを作製するには、室温を一定に保ったり、コンロなどを用いて火力を一定にするなどの工夫がさらに必要であると考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

グリセリンが可塑剤として働くことでプラスチックに柔軟性を持たせることができ、プラスチックが乾燥の際割れることを防ぐことができるという結果を得た。

また、直鎖状構造を持つアミロースと枝分かれ状の構造を持つアミロペクチンの二種類のデンプンを混ぜて作製することでプラスチックの引っ張り強度を上げることができるといえる。

デンプンの糊化をより進行させ引っ張り強度を高めるためにはデンプンに対する水の割合を多くする必要があるといえる。

デンプンが老化<sup>6)</sup>しやすい温度下で乾燥させることで引っ張り強度を上げることができるといえる。

安定して引っ張り強度の高いプラスチックを作製するには、室温を一定に保ったり、コンロなどを用いて火力を一定にするなどの工夫がさらに必要であるといえる。

これまでの実験で作製したプラスチックは、人体に害のない素材で作られているため、子供のおもちゃなどに活用できるのではないかと考えられる。

今後の課題として、プラスチックの厚さやプラスチックを乾燥させる際の気温などの条件をそろえることができなかつたため、プラスチックを作製する際の条件をより正確にそろえる必要があることがあげられる。

## 6. 参考文献

- 1) マルキ産業株式会社, 2024.4.2, バイオマスプラスチックの課題とは？解決策と不織布への応用, <https://www.maruisangyou.co.jp/column/column-40/>, 2026.1.9
- 2) 灘酒研究会 (Nadashu-Kenkyukai), うるち米・もち米 | 灘の酒用語集, [https://www.nadashu.com/main/jp/index\\_u/97.html](https://www.nadashu.com/main/jp/index_u/97.html), 2026.1.5
- 3) woxraro, 2025, 自宅で簡単バイオプラスチック製造ガイド, <https://chibanian.info/20240504-165/>, 2025.9.26
- 4) 山桂産業株式会社, グリセリンとは？使い方・用途・食品や化粧品での役割, <https://www.yamakei.jp/post/glycerin/>, 2025.9.26
- 5) 大津信之介, 2006, でんぷんの熱水加水分解 (Hydrothermal hydrolysis of starch), 中央大学学術リポジトリ, [https://chuo-u.repo.nii.ac.jp/record/5367/files/1345\\_2428~36~178.pdf](https://chuo-u.repo.nii.ac.jp/record/5367/files/1345_2428~36~178.pdf), 2026.1.30
- 6) グリコ栄養食品株式会社, デンプン, <https://www.glico.com/nutrition/product/ingredient/starch/>, 2026.1.30
- 7) 独立行政法人農畜産業振興機構, 2025.1.10 調理学から見るでん粉の利用と必要性, [https://www.alic.go.jp/joho-s/joho07\\_003263.html](https://www.alic.go.jp/joho-s/joho07_003263.html), 2026.1.9

# 紙から繊維を作ることは可能か

## ～銅アンモニアレーヨンの強度測定による再生繊維の可能性～

岡本優汰 松永拓磨 山形郁弥 横山幹 吉田悠貴

### 要旨

雑紙から十分な強度をもつ再生繊維を合成することで、雑紙の再利用先の選択肢を増やすことを目的に研究をした。この研究では雑紙を素材として銅アンモニア法によって合成したレーヨンの強度を測定した。結果として実用的な強度を持っているとは言い難かったものの、雑紙由来の再生繊維の合成、強度の向上には成功した。

### 1. はじめに

レーヨンはセルロースから作ることでできる再生繊維である<sup>1)</sup>。レーヨンの製造方法として主に銅アンモニア法やビスコース法が存在し、現在工業的製法としてビスコース法が主流となっているが、本実験では安全の為、銅アンモニアレーヨンの合成を行うことにした。両プロセスにおいて最終生成物(レーヨン)の構造は変わらないため、本実験はビスコース法に応用可能な検証であることを前提としている。また、実際に高品質レーヨン繊維の合成にコットンリントー(図1)<sup>2)</sup>が用いられることから、実用性の基準となるレーヨンの原料は脱脂綿とした。

紙にはレーヨンの素材となるセルロースが含まれる<sup>3),4)</sup>ため、紙を素材としてレーヨンを合成することができる考えた。雑紙のような印刷紙からセルロースを取り出して再生繊維を作り、廃棄物が高付加価値な素材になり得る新たなリサイクル方法の発見を目的として実験を行った。本実験では、雑紙を原料として銅アンモニアレーヨンを合成し、その強度を脱脂綿由来のレーヨンと比較することで、雑紙由来のセルロースから得られる再生繊維が実用的な強度を持つかどうかを検証した。



図 1. コットンリントー<sup>2)</sup>

高品質品用レーヨン繊維の合成に用いられるコットンリントー(利用されない綿花)

### 2. 材料・研究方法

#### 2-1. シュヴァイツァー試薬の調合

硫酸銅(II)五水和物 1.0 g, 28%のアンモニア水 10 mL とともに 100 mL 三角フラスコに加え、ゴム栓をして全て溶解するまでよく混ぜた。その後、水酸化ナトリウム水溶液 2.0 mol/L を 4.0 mL 加え、ゴム栓をしてよく混ぜた。

#### 2-2. レーヨン合成のための原料の準備

まず、実験①に用いるため、それぞれのセルロース含有率<sup>5),6),7)</sup>をもとにセルロース総量を揃えた脱脂綿 0.417 g, ろ紙 0.458 g, 普通紙でコ

ピーできる機械用の白紙(以後 PPC 用紙と述べる)0.750 g を細かく刻んだ。次に**実験②**に用いるため、脱脂綿 0.417 g, 白紙の PPC 用紙 1.50 g を用意し、白紙の PPC 用紙は 0.750 g(A)と 0.750 g(B)に分け、それぞれ細かく刻み、6.0 mol/L の酢酸水溶液をシャーレに 30 mL 加え、その中に A を浸して、気体が完全に発生し終わるまで静置し、その後、酢酸に浸した PPC 用紙を純水で洗い流した。また、B には何も操作を加えなかった。最後に、**実験③**に用いるため、**実験②**と同様の操作を酢酸水溶液の代わりに、シュウ酸水溶液を用いて行った。

### 2-3. 発生した気体の特定

三角フラスコ内に細かく刻んだ PPC 用紙と酢酸水溶液を 20 mL 加えゴム栓をして静置し、二酸化炭素用の気体検知管を用いて反応があるかを確かめた。

### 2-4. レーヨンの合成

2-2 で準備したそれぞれの原料を個々に調合したシュヴァイツァー試薬に加え、溶け残りがなくなるまで、よく振り混ぜた。その後、溶解させた試薬を注射器に入れ、2.0 mol/L の希硫酸 30 mL を加えたシャーレ中に射出した。希硫酸に射出する前の濃青色が完全に消え、無色になったら純水に浸し、その後、シャーレ中に引き上げ 1 週間シャーレ内で自然乾燥させた。

### 2-5. 再生したレーヨンの強度測定

実験で合成したレーヨンの引張強度を測定するため、先行研究<sup>8)</sup>を参考にして強度測定装置を自作した(図 2)。作製に関しては 60 cm の糸 2 本とクリップ 1 個、そしてプリンカップ 1 個を(図 2)のようにセロハンテープで組み立てた。

装置上部のクリップに 3 cm に切り揃えた合成したレーヨンを挟み、装置下部のコップに水を静かに注いだ。レーヨンが切れたときの装置



図 2. 強度測定装置

プラスチックカップの縁に等間隔で糸をセロハンテープで固定し、セロハンテープの先端をゼムクリップに引っ掛けたもの

と水の総質量をそのレーヨンの耐荷重とした。

## 3. 結果

図 3 のように雑紙からレーヨンを合成することができた。しかし、原料、試薬の条件を一定に保ったにもかかわらず、溶解状態や得られた繊維の強度に差が生じた。



図 3. レーヨンの生成

### 3-1. 実験①の結果

脱脂綿、白紙の PPC 用紙、ろ紙を原料として合成させたレーヨンの引張強度測定では、脱脂綿由来のレーヨンが最も強い強度を示し、次にろ紙由来のレーヨン、そして PPC 由来のレー

ヨンが最も低い強度を示した。

表 1. 各原料から作成したレーヨンの引張強度

測定no.	測定した水の質量(g)		
	脱脂綿	ろ紙	PPC用紙
1	86.3	34.6	32.4
2	71.9	52.6	33.5
3	96.7	29.1	35.8
4	85.7	61.1	44.0
5	59.4	57.8	43.7
平均	80.00	47.07	37.88

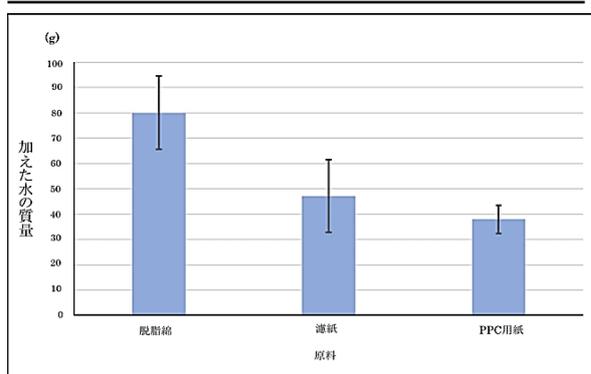


図 4. 各原料から作成したレーヨンの引張強度

### 3-2. 実験②と気体の特定の結果

実験①と同様に、同じ日に同じセルロース量になるように質量を調節した白紙の PPC 用紙、酢酸に浸した白紙の PPC 用紙、ろ紙を原料として合成したレーヨンの引張強度測定ではろ紙が最も強い強度を示し、次に酢酸に浸した PPC 用紙由来のレーヨン、そして PPC 用紙由来のレーヨンが最も低い強度を示した。このことから酢酸に PPC 用紙を浸し不純物を取り除くことで、強度が上がると分かった。

表 2. 材料別レーヨンの引張強度

測定no.	測定した水の質量(g)		
	ろ紙	PPC用紙	酢酸PPC
1	65.5	25.4	55.0
2	71.5	20.0	39.0
3	62.9	25.5	48.5
4	77.2	27.0	58.1
5	70.4	26.0	35.1
平均	69.50	24.78	47.14

### 3-3. 実験③の結果

PPC 用紙をシュウ酸に浸した時、実験②と同様に気泡が発生した。しかし、シュヴァイツァー試薬に溶けにくくなり、注射針が詰まってしまい、レーヨンを合成することはできなかった。

## 4. 考察

### 4-1. 脱脂綿を原料としたレーヨンの強度が高くなった理由について

実験①で、脱脂綿とろ紙、PPC 用紙に含有しているセルロースの質量を揃えたにもかかわらず、生成したレーヨンの引張強度は脱脂綿、ろ紙、PPC 用紙の順で低くなったことの原因はそれぞれを構成しているセルロースの構造にあると考えた。

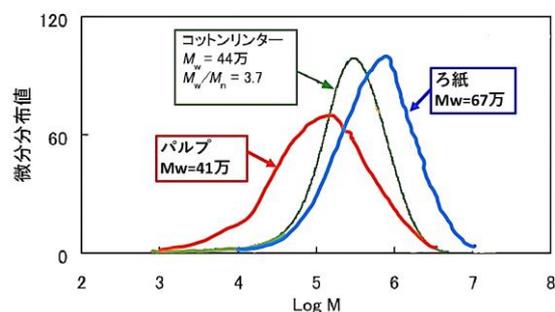


図 5. 各種セルロースの分子量分布曲線<sup>9)</sup>

図 5 はろ紙、PPC 用紙の原料となるパルプ、脱脂綿の原料となるコットンリンターのそれぞれに含まれているセルロースの分子量とそのセルロースの存在割合を表したグラフである。図 5 を見るとコットンリンターに含まれるセルロースの分子量の大きさはパルプに含まれるものよりも大きいとわかる。そして、実験①より、ろ紙よりもコットンリンターの方がレーヨンの引張強度が高くなった。このことから、原料に含まれるセルロースの分子量が大きいことが、レーヨン合成時に引張強度が高くなる要因となると考察できるが、これから、この考察を理論的に証明する二つの要因について説明する。

#### 4-1-1. $\beta$ -グルコース間に生じるグリコシド結合の数

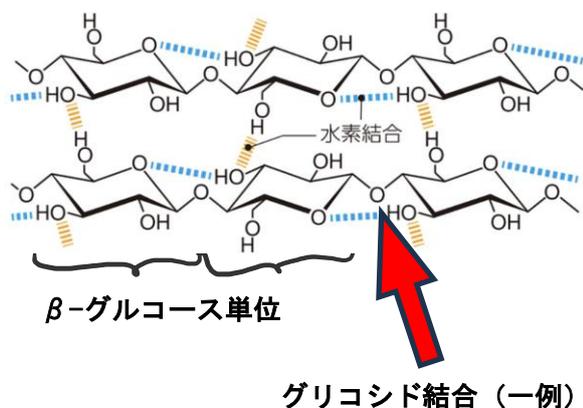
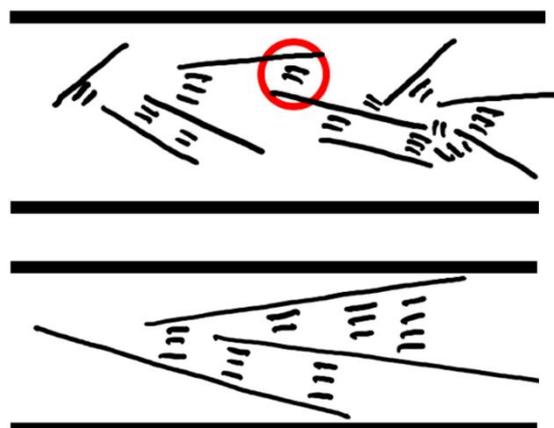


図 6. セルロース分子の模式図<sup>10)</sup>

図 6 はセルロースの構造の一部を模式的に表現したものである。セルロースは多糖類であり、 $\beta$ -グルコース同士が、グリコシド結合によって直鎖状に縮合重合し、それらが分子間で水素結合を形成している。ここで分子量が大きいことは  $\beta$ -グルコース間のグリコシド結合が多いことを意味し、レーヨンを生成するときにグリコシド結合を増やす工程は存在しないので原料に含まれるセルロースの重合度はそのままレーヨンに含まれるセルロースの重合度と依存すると考えられえ。また、セルロースの重合度が大きいと分子内に形成されるグリコシド結合が多くなるので、セルロース分子の長さが多くなり、結果的に分子間に生じる水素結合の数も多くなると考察できる。その理由は以下に示す。

#### 4-1-2. セルロース間に生じる水素結合の数

4-1-1 の考察で述べた通り、セルロースの分子量が大きいことは、 $\beta$ -グルコース間に生じるグリコシド結合の数が多いこと、つまり、セルロースの直鎖状分子の長さが長いことを意味する。



上図：分子の短いセルロース

下図：分子の長いセルロース

|||：水素結合

図 7. 注射針に入ったセルロースの模式図

図 7 はレーヨンを射出する過程での、セルロース溶液が細い注射針内部を通過する瞬間を模式的に表したものである。セルロース分子が長い場合、注射針の内壁の上下に引っかかることで分子鎖が一定の方向に向き、流れの方向にそろって直線状に並びやすい。このように分子同士が平行に並ぶことで分子間距離が近づき、水素結合が形成されやすくなる。その結果、分子間の結合が強くなり、引張強度の高いレーヨンが得られると考えられる。一方、セルロース分子が短い場合は、注射針内で一定の方向に向きにくく、さまざまな向きのまま流動するため、分子同士が整列しにくい。そのため水素結合の形成が不十分となり、分子間の結合力が弱い部分(図 7 の丸印で強調した部分)が生じることとなり、結果として生成したレーヨンの引張強度が低下すると考察される。

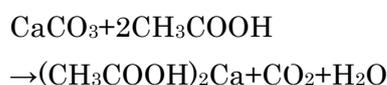
しかしながら、図 5 の各種原料に含まれているセルロースの分子量とそのセルロースの存在割合を表したグラフを参照すると、ろ紙の分子量よりも、脱脂綿の原料となるコットンリンターの分子量の方が小さいにもかかわらず、実験①では、ろ紙を原料としたレーヨンの引張強度よりも、脱脂綿を原料としたものの方が高くなってい

る。これは今までの考察に反する結果のように思えるが、ここには別の要因が強く働いていることを4-2で考察する。

#### 4-2. 酸に浸した PPC 用紙の強度が高まった理由について

実験②の結果より、酢酸に浸した PPC 用紙がろ紙の強度を超えることはなかったが、何も手を加えていない PPC 用紙よりも高い強度を示したのは、PPC 用紙に含まれている不純物が酢酸によって取り除かれたからであると考えた。PPC 用紙にはセルロースが約 55%含まれて他に、炭酸カルシウムが約 10%含まれている。レーヨン生成の際、この炭酸カルシウムが希硫酸と反応して弱酸の遊離が起こり、希硫酸とセルロースとの反応を阻害していると考えた。

これに対し実験前に炭酸より電離度の高い酢酸を反応させることで弱酸の遊離によって炭酸カルシウムを取り除いた。弱酸の遊離の化学反応式は以下に示す。



このことから PPC 用紙のセルロース含有率が高まり、強度が高まったと考えた。

実験③において、酢酸ではレーヨンの強度が向上した操作をシュウ酸でも同様に行ったにもかかわらず、針が詰まった原因は、シュウ酸と炭酸カルシウムの反応で生じたシュウ酸カルシウムにあると考えた。シュウ酸カルシウムの水への溶解度は 0.00067 g/100 mL (20℃)であり<sup>11)</sup>、予想されるシュウ酸カルシウムの発生量は 0.00067 g を大幅に上回り、100 mL に満たないシュヴァイツァー試薬には溶け切らない。析出したシュウ酸カルシウムは PPC を覆い、PPC をシュヴァイツァー試薬に溶けにくくし、PPC が大きな破片のままになっていること、シュウ酸カルシウム自体が析出していることで、それらが注

射針に詰まり、合成できなかつたと考えた。

#### 5. まとめと今後の課題

本研究から、レーヨンの原料に含まれている不純物の割合が少なく、セルロースの重合度が高いと合成したレーヨンの強度は高くなることがわかった。また、PPC 用紙に弱酸をひたすことによって PPC 用紙に含まれる填料(印刷した文字や図柄が紙の裏側に透ける「裏抜け」を防止するために紙の中に配合する白土や炭酸カルシウムなどの鉱物質の粉末のこと)<sup>12),13)</sup>が遊離し、不純物を取り除く方法についても検討することができた。しかし、酸によってセルロースの分子構造が破壊されるかどうかや、セルロース合成を阻害する酸の可能性までは考察し切れていないので、今後に向けてはこれらの点を解明することが課題となる。

#### 6. 参考文献

- 1)2023.6.23,化学のグルメ,ビスコースレーヨンと銅アンモニアレーヨン,  
<https://kimika.net/y2rayon.html>, 2026.2.6
- 2) コットンリントナーの画像,  
<https://ameblo.jp/gigilio/entry-12610805924>, 2026.2.6
- 3)2016.4.1,繊維の種類と特徴 2 ～化学繊維編～,  
<https://masuda-tx-ap.co.jp/column/chemistry2>, 2026.2.6
- 4) 青木, 2025.9.8,紙って何からできてるの? 紙の原料のおはなし,  
<https://kamiol.com/blog/material-of-paper/>, 2026.2.6
- 5) ハリル・トウルグット・シャヒン, ムスタファ・ブラク・アルスラーン, 2008.1.25,  
紙に含まれる木材パルプの割合,  
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2635603/#:~:text=>, 2026.2.6

- 6) 木材パルプに含まれるレルロース含有率  
,[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jtappij/62/7/62\\_7\\_830/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jtappij/62/7/62_7_830/_pdf), 2026.2.6
- 7)アドバンテック東洋 定量ろ紙 No.6 110 mm (100 枚),<https://www.rikanavi.com/product/33600583?page=3#:~:text=>, 2026.2.6
- 8) 竹田りえる,山口涼,摘果みかんから合成した再生繊維の評価方法,  
,<https://uwajimahigashi-h.esnet.ed.jp/uploads/%5BR2-9%5Dtekka.pdf>, 2026.2.6
- 9) 2015.6.12,セルロースの分子量測定  
, <https://www.tosoh-arc.co.jp/techrepo/files/tarc00452/pdf/T1503Y.pdf?direct=1>,2026.2.6
- 10) 辰巳敬ほか : 『化学』(数研出版, 2024)p.372.
- 11)今関英雅,2021.10.1, ナガイモのシュウ酸カルシウム,  
[https://jspp.org/hiroba/q\\_and\\_a/detail.html?id=5223](https://jspp.org/hiroba/q_and_a/detail.html?id=5223),2026.2.6
- 12) 2007.9,紙の填料とは,  
[https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic\\_detail\\_2515.html](https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_2515.html), 2026.2.6
- 13)畠中宏通,2014.8,紙の高灰分化に向けた炭酸カルシウム処理材の開発,  
[https://www.harima.co.jp/randd/technology\\_report/pdf/techrepo1411\\_1.pdf#:~:text=](https://www.harima.co.jp/randd/technology_report/pdf/techrepo1411_1.pdf#:~:text=), 2026.2.6

# 色の組み合わせが人に与える印象と、それによってもたらされる利点

## ～ 学校パンフレットの表紙を例に ～

内田早貴 藤井香梅

### 要旨

本研究では、より目につきやすく好印象を与えるパンフレットの色味とはどのようなものかについて調査するため、校内の生徒を対象にアンケートを実施した。結果としては、明るく彩度の高い色の方が目につきやすく好印象であった。しかし、より詳細な色や明度、色の組み合わせと印象の関係性を調べることはできなかった。

### 1. はじめに

受験校を選ぶ際には、多様な情報源が参考とされている。例えば、学習塾の教員からの助言やウェブサイトに掲載された情報、保護者間での情報交換などが挙げられる。しかし、人づての情報やインターネット上の情報は提供者の主観や経験に依存する側面が大きく、必ずしも信頼性が高いとは限らない。そのように考えると信頼性のある情報源は、生徒募集を行う学校側が発信する情報の記載されたもの、つまり学校の公式サイトやパンフレットである。実際に、山梨県の高校生を対象としたアンケートでは、高校に関する情報を得る媒体として説明会やオープンスクールに次いで、6割ほどの生徒が高校のパンフレットを選択しているという結果が出ている<sup>1)</sup>。このことから、パンフレットは受験生が学校を比較検討する際に頻繁に参照する媒体であると言える。そのため、パンフレットの視認性や第一印象は、学校に対するイメージを膨らませる上で、重要な要素となる。特に、パンフレット表紙の色彩は、視認性や印象形成に大きく影響すると考えられる。

このような背景から本研究では、パンフレットの表紙の視認性と色彩、及びそれらを見た人が受ける印象の関係性について調査することとした。

またその結果を活用して著者2名の通う京都府立洛北高等学校の校風が伝わりやすく、目につき

やすいパンフレットの表紙を作成するためにアンケートを行うこととした。

まず、予備調査として色彩が与える印象を調べるために、文献調査を行った。

より視認性の高い色としては明度の高い色や彩度の高い色、または水色などの寒色、落ち着いた印象を与える色としては明度、彩度の低い色があると指摘されている<sup>2)</sup>。

また、パンフレットの表紙に利用される写真については、真面目や誠実な印象を与える要素として水平垂直の線がずれていない、清潔感を感じさせる写真を使用し、全体的に色調を合わせ、青色や明るい色を使うことが効果的であると指摘されている。一方で、暖かい雰囲気を与えるには暖色を取り入れること、彩度を抑えることが効果的と指摘されている<sup>3)</sup>。

以上のことから、視認性の高いものは明るく彩度の高い色であり、先行研究では保護者が好む傾向にあるものが明るく元気な校風であったため、明るく彩度の高い色かつ暖色を取り入れたデザインが好まれると仮説を立てた<sup>4)</sup>。それを検証するために、先行研究に基づいたオリジナルのパンフレットの表紙を作成し、配色を変えたものを2種類用意し、アンケートを用いて、比較実験を行うこととした。

## 2. 材料・研究方法

本校が採用する学習支援アプリ「ロイロノート」のアンケート機能を使用して、デジタルアンケートを洛北高校在学中の全生徒 813 人に配信し、任意回答として依頼した。

各担任からクラスの生徒に配布していただき、時間が確保できたクラスには著者 2 名が説明に回り、5 分ほどで回答を貰った。なお、著者 2 名の在籍するクラスのみ 7 月 18 日に実施し、他クラスは 9 月中旬から配布をはじめ、締め切りは 9 月 30 日とした。

アンケート作成に当たっては、画像生成 AI を一部使用し、片方を視認性が高く、明るく清潔感のある印象を与えると予想される、明度の高い色や彩度の高い色を用いた画像、もう片方を落ち着きがあり真面目な印象を与えると予想される、明度・彩度の低い色を用いた画像とした(図 3)。

今回のアンケートは、以下に示すとおりである。

問 1. 当てはまるものを選択してください。(1: 普通科文理コース 2: 普通科スポーツ総合専攻 3: サイエンス科)

問 2. この 2 つのパンフレットのうち、1 番初めに目についた方を選んでください。(1: ① 2: ②)

問 3～問 12 では、パンフレット①および②に対する印象評価を行うため、「選んだパンフレットに対して〇〇な印象を受けましたか」という共通の設問形式を用いた。〇〇には「元気」「明るい」「真面目」「落ち着いた」「知的」の 5 つの形容語を挿入し、それぞれについて評価(1: とても受けた 2: どちらかという受けた 3: どちらかという受けなかった 4: 受けなかった)を求め、両パンフレットに対して同一の質問項目を設定した。

問 13. 自分が行きたいと思う(子どもに行きたくて欲しい)学校の校風を教えてください。

問 14. 問 2 のパンフレットをもう一度よく見てみて、行きたいと思う方のパンフレットを選んでください

## 3. 結果

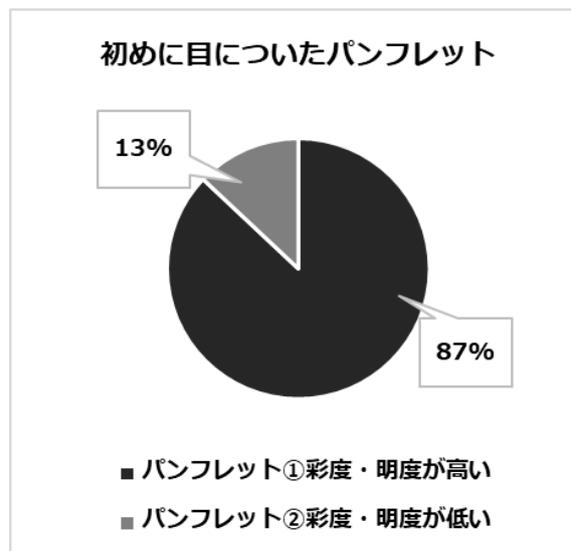


図 1. 問 2 : 初めに目についたパンフレットアンケート結果 (n=813)

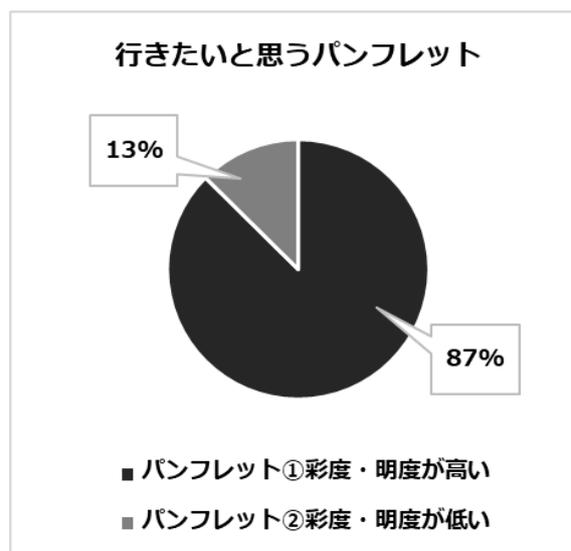


図 2. 問 14 : 行きたいと思うパンフレットアンケート結果 (n=813)

**表 1. パンフレット①から受けた印象の結果**

(1: とても受けた 2: どちらかという受けた 3: どちらかという受けなかった 4: 受けなかった)

項目	1	2	3	4
元気	335 (49%)	317 (47%)	20 (3%)	8 (1%)
明るい	398 (59%)	203 (30%)	56 (8%)	23 (3%)
真面目	64 (9%)	278 (41%)	279 (41%)	58 (9%)
落ち着いた	86 (13%)	230 (34%)	284 (42%)	77 (11%)
知的	64 (9%)	236 (35%)	304 (45%)	72 (11%)

**表 2. パンフレット②から受けた印象の結果**

(1: とても受けた 2: どちらかという受けた 3: どちらかという受けなかった 4: 受けなかった)

項目	1	2	3	4
元気	45 (7%)	130 (19%)	317 (47%)	184 (27%)
明るい	45 (7%)	96 (14%)	327 (48%)	207 (31%)
真面目	184 (27%)	346 (51%)	108 (16%)	36 (6%)
落ち着いた	248 (37%)	306 (45%)	87 (13%)	33 (5%)
知的	141 (21%)	269 (40%)	208 (31%)	56 (8%)

**表 3. 問 13 の自由記述の結果**

回答	数
自由	148
楽しい	134
明るい	123
個人, 自主性の尊重	76
治安	66
真面目	37
落ち着いた	28
元気	18
のびのび	12
知的	7

パンフレット①の方が目につきやすく、また、行きたいと考える生徒が多かった。

また、①に対しては元気、明るいという印象を受けた人数が多く、②に対しては落ち着いた、知的という印象を受けた人が多かった。さらに、問 13 の自由記述では、自分が行きたいと思う(子どもに行って欲しい)学校の校風という問に対して「自由」と書いた人数が最も多かった。

#### 4. 考察

アンケートの設問にもある通り、本校には3つのコースがある。そのため、コースごとにパンフレットから受ける印象が異なる可能性があることを想定し、アンケートにコースを問う質問項目を入れた。しかし、アンケート結果からは、コース間では大きな差は見られなかった。また、結果としては、視認性が高く、明るく彩度の高い色で作成したパンフレットが目につきやすく、行きたいと感ずることが分かった。一方で、問 13 の自由記述の回答において、サイエンス科の生徒の多くが「自由」という言葉を記述していた。これは、洛北高校が自由を尊重する校風を持っており、サイエンス科の生徒は他の2つのコースの生徒よりも在籍期間が長く、その影響を強く受けているためであると考えられる。

ただし、本調査には課題がある。選択式の問の

後に自由記述の問を回答するという順番にしていたため、選択式の問に含まれていた語句が、回答者に影響を与えた可能性がある点である。したがって、自由記述式の問を2種類のポスターの印象を問う問の前に置くべきであったと考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

当初は自由記述のアンケートで得られたデータを基にして、限りなく多くの人に興味を持ってもらえるパンフレットの表紙デザインを1つ作成することを目的としていた。しかし、自由記述の回答がコースによって大きく変わることから、このアンケートの結果を受けて、それぞれのコースに合わせた3つのデザインを作成することに目標を定める必要があった。ただし、ここで課題となるのが言葉の解釈である。特に「自由」はサイエンス科の生徒は書いていることが多く、デザイン案を作るにあたって要素として入れ込む必要があったと考えられる。この言葉について、他の学校と比べて比較的自由度の高い校則を表すものなのか、生徒の自主性を重んじることを表すものなのかの判別は「自由」という一つの単語からは読み取ることができない。

## 6. 参考文献

- 1)堀井孝, 2021, 中学 3 年生の進路意識の変容と高校選び 一定期的調査から見取る意識向上の要因と情報への接し方ー.山梨大学教職大学院令和3年度教育実践研究報告書, 67-68.
- 2)大山正, 1962, 色彩の心理的効果. 照明学会雑誌, 第 46 卷, 第 9 卷, 452-458p.
- 3)ミツモア, 2024. 6. 28, 大きな建物の写真をとるコツ 3 つ! 構図, アングル, 光の見極め! <http://meetsmore.com/services/housing-architecture-photographers/media/22857#iPash>, 2026.1.12.
- 4)通信制高校ナビ編集部, 2022, 中高生の保護者に聞く! 子どもに期待する将来像・職業アンケート調査, <https://www.tsuushinsei-navi.com/real/hogosha/3671/>, 2026.1.12.

## 7. 添付資料



図3. 作成した2種類のパンフレット表紙  
枠内の#から始まる記号・番号はカラーコード

# 豆乳によるバイオプラスチックの物性評価と実用化の検討

## ～酸添加条件による強度・耐水性・においの改善～

近藤史奈 佐藤美咲 清水桜帆

### 要旨

近年、廃棄後に分解されにくく環境中に残留する石油由来プラスチックによる環境負荷が問題となっている。本研究では、この環境負荷の低減を目的として、牛乳および豆乳由来のタンパク質を用いたバイオプラスチックの物性評価および、ストローや衣服用ボタンなどへの応用を想定した実用化の検討を行った。まず、牛乳からカゼインプラスチックを作製したが、不快臭の残留が課題となったため、代替材料として豆乳に着目した。豆乳に酸を添加することでタンパク質を凝集させ、豆乳由来のプラスチックを作製し、酸の添加量や種類が強度、耐水性、においに対する影響を比較した。その結果、適量の酸添加により強度が向上し、表面を削ることで脆化やにおいが抑制されることが明らかとなった。また、豆乳由来のプラスチックは生分解性を示し、衣服用ボタンとしての応用可能性が示唆された。

### 1. はじめに

プラスチックは生産後に適切に回収・分解されにくく、環境中に長期間残留する。その結果、生態系や野生動物に悪影響を及ぼすことが、多くの研究によって報告されている<sup>1)</sup>。

近年、プラスチックストローの代替として紙ストローが使用されている。しかし、紙ストローは飲料中でふやけやすく、使用感に課題がある。そこで本研究では、土中で分解されることが報告されているカゼイン由来のバイオプラスチックに着目した。これを用いてストローを作製すれば、環境負荷が小さく、かつふやけにくい製品が作れるのではないかと考えた<sup>2)</sup>。

カゼインは牛乳に含まれる主要なタンパク質であり、水中でミセル構造を形成する。ミセル構造とは、分子が疎水性相互作用や静電相互作用などによって自発的に集合した微粒子状の構造である。カゼインが形成するミセル構造はカゼインミセルと呼ばれる<sup>3)</sup>。カゼインを含む溶液を加熱し、さらに酸を加えて凝集させると、熱硬化性を示すタンパク質系バイオプラスチックであるカゼインプラスチックが得られる<sup>4)</sup>。

牛乳中(pH約6.6)では、カゼインミセルは負に帯電しており、静電的反発によって分散状態が保たれている。しかし、pHが4.6付近に近づくと、ミセル表面の電荷が減少し、静電的反発が弱まる<sup>5)</sup>。このpHを等電点といい、タンパク質が正にも負にも帯電していない状態を示す<sup>6)</sup>。その結果、カゼインミセル同士が凝集し、網目状構造を形成することで水分を含んだゲル状態となる。その後、脱水・乾燥によって水分が除かれ、タンパク質間の相互作用が強まることで、カゼインプラスチックとなる<sup>7)</sup>。

本研究では、まずカゼインプラスチックの作製条件を確認するために予備実験を行った。牛乳を用いて作製を試みたところ、強い不快臭が残るという問題が生じ、実用化に向けた課題が明らかとなった。この不快臭の原因として、牛乳中の脂肪分が乾燥過程で分解・酸化した可能性が考えられた<sup>8)</sup>。そこで、脂肪分が比較的少ない代替ミルクを用いることで、においを低減できるのではないかと考え、豆乳、アーモンドミルク、ココナッツミルクを用いて検討を行った。

その結果、豆乳では酸の添加によりタンパク質が凝集し、プラスチック状の物質が生成され、また、不快臭が大きく軽減されるという利点を有していた。しかし、薄く成形した場合には耐水性や強度が十分ではないことも明らかとなった。一方、アーモンドミルクおよびココナッツミルクでは十分な凝集が起らず、プラスチックは生成されなかった。これは、両者のタンパク質含有量が豆乳に比べて著しく少ないためであると考えられる。

豆乳にはカゼインは含まれていない。そのため、得られた物質はカゼインプラスチックではなく、豆乳中の大豆タンパク質が等電点付近で凝集し、ゲル構造を形成したものである<sup>9)10)</sup>。本研究では、この物質を「豆乳プラスチック」と定義する。

予備実験の結果を踏まえ、本研究では対象を豆乳プラスチックに絞り、ストローのような薄い製品ではなく、一定の厚みが許容される製品への応用を検討することとした。具体的には、衣服用ボタンへの応用を想定し、作製条件を変化させながら、強度および耐水性の向上を目的とした比較実験を行った。

## 2. 研究方法

### 2-1. 豆乳プラスチックの作製方法

本研究における豆乳プラスチックの共通作製方法以下の通りである。

豆乳 50 mL をビーカーに取り、ガラス棒で攪拌しながら 80°C まで加熱した。酸を所定量滴下し、生成した沈殿物をガーゼで濾し取り、水道水で洗浄した後、キッチンペーパーで十分に水分を除去した。これをラップで挟み、厚さ約 3 mm (ボタン作製時は約 5 mm) の板状に成形し、上面のラップを除去して室温で乾燥させた。

### 2-2. 曲げ強度の測定方法

乾燥試料について三点曲げ試験を行った。試料を 2 点で支持し、中央部をデジタルフォースゲージで押し下げた。支点間距離は 10 mm、圧縮アタッチメントの先端幅は 1 cm とした。破断するま

でに必要な最大荷重を測定し、その値を試料の厚さで除したものを強度の指標とした。

### 2-3. 耐水性評価の方法

試料を 50 mL の水に浸した。浸水時間は、30 分、1 時間、2 時間の 3 条件とした。各時間経過後、試料を水から取り出し、直ちに三点曲げ試験を行った。試料中央部をデジタルフォースゲージで押し下げ、1 mm 変形するまでに必要な荷重を測定した。支点間距離は 10 mm、圧縮アタッチメントの先端幅は 1 cm のものを使用した。

得られた荷重の値を試料の厚さで除し、本研究ではこの値を耐水性の指標とした。

また、浸水前後の質量を電子天秤で測定し、質量変化を求めた。

### 2-4. 酢の添加量が強度に与える影響

2-1 の方法で豆乳プラスチックを作製する際の酢の添加量について 1.5 mL、2 mL、3 mL の 3 条件とした。各条件で作製した試料について 2-2 の方法により、曲げ強度を比較した。また、市販のプラスチックボタンについても同様の三点曲げ試験を行い、比較した。

### 2-5. 酢の添加量が耐水性に与える影響

2-4 で作製した豆乳プラスチック試料を用い、浸水時間を 30 分、1 時間、2 時間の 3 条件として 2-3 同様に耐水性を比較した。また、浸水前後の質量変化も測定した。

### 2-6. 酸の種類が強度に与える影響

酸の添加量は 1.5 mL に固定し、酸の種類を食酢、4.2%クエン酸、レモン汁の 3 種類とした。各条件で作製した試料の曲げ強度を 2-2 の方法で比較した。

### 2-7. 酸の種類が耐水性に与える影響

2-6 で作製した試料を用い、浸水時間を 30 分、1 時間、2 時間として耐水性を比較した。また、浸

水前後の質量変化も測定した。

## 2-8. 表面研磨処理が耐水性に与える影響

酢の添加量は 1.5 mL に固定し、豆乳プラスチックを作製した。乾燥後、試料の表面全体を紙やすりで研磨し、表面の凹凸がなくなるまで整えた。その後、2-2 と同様に試料を水に浸し、耐水性を比較した。

## 2-9. 水浸後における評価

酢の添加量 (1.5, 2.0, 3.0 mL) および酸の種類 (酢, クエン酸, レモン汁) を組み合わせて豆乳プラスチックを作製した。作製した試料の一部は表面を紙やすりで研磨し、全ての試料を 2 時間水に浸した。その後、室温で乾燥させた。

乾燥後のにおいを著者らを含めた 10 人による官能評価により 0~20 点で評価した。0 点を無臭とし、10 点を「酢 3.0 mL 添加・未研磨・水浸なし」の試料のにおいと定義した。

## 2-10. 生分解性の評価

試料を幅約 5 mm, 長さ約 10~15 mm の破片 4 つに分け、質量を測定後、育苗カップに入れた土中に埋めた。2 か月後に取り出して乾燥させ、再度質量を測定し、質量の変化を求めた。

## 2-11. 衣服用ボタンの作製と実用評価

酢 1.5 mL 添加で作製した試料を厚さ約 5 mm に成形し、ペットボトルキャップで型抜きして円形に整形した。中央付近に 2 か所の穴を開け、乾燥後、紙やすりで表面および縁を研磨し仕上げた。作製したボタンを布に縫い付け、着脱および洗濯機による約 30 分間の洗濯を行い、実用性を確認した。

## 2-12. 研究材料・器具

ビーカー, 豆乳, ガラス棒, ガスコンロ, デジタル温度計, 酢(穀物酢), クエン酸, レモン汁, ガーゼ, キッチンペーパー, ラップ, デジタルフォースゲー

ジ, プラスチックボタン, 紙やすり, 育苗カップ, 土, 電子天秤, ペットボトルキャップ, ピンセット

## 3. 結果

### 3-1. 酢の添加量による強度への影響

従来のプラスチックボタンの単位厚さ当たりの強度は約 75 N/mm であった。豆乳プラスチックの単位厚さ当たりの耐久力を図 1 に示す。酢の添加量が 1.5 mL, 2.0 mL, 3.0 mL のうち、1.5 mL の条件で最も高い値を示し、約 62 N/mm であった。

破断後の断面の様子を図 2 に示す。3.0 mL 添加試料では、比較的大きな粒状構造が観察され、粒子間に隙間が確認された。一方、1.5 mL 添加試料では、明瞭な粒状構造は観察されず、比較的均一な断面構造を示した。

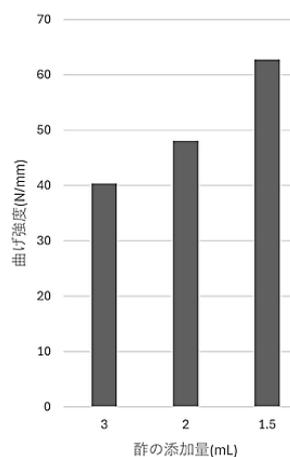


図 1. 酢の添加量と曲げ強度

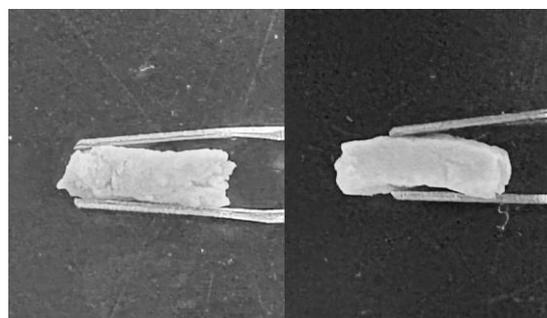


図 2. 断面図  
(左が酢 3 mL, 右が酢 1.5 mL)

### 3-2. 酢の添加量による耐水性への影響

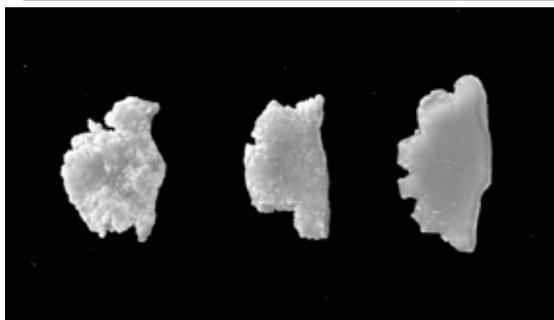
1 mm 変形時における曲げ強度の値を表 1 に

示す。試料を水に浸すと、図 3 に示すように表面が白くなった。その度合いは酢の添加量が 3.0 mL の試料で最も大きく、1.5 mL で最も小さかった。白色化した部分は、欠けやすい状態であった。また、断面の様子は図 4 に示す。酢の添加量 3.0 mL や 2.0 mL の試料では断面の白色化が確認されたが、1.5 mL の試料では明瞭な白色化は観察できなかった。

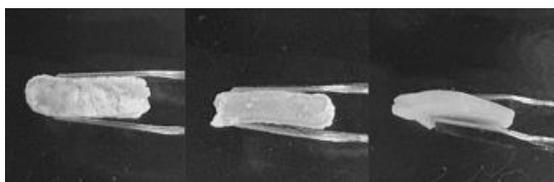
さらに、水に浸して乾燥させた試料は、未浸水試料と比較してにおいが弱くなった。酢の添加量が少ない試料ほど、においは弱い傾向がみられた。

**表 1. 酢の添加量と 1 mm 変形時の曲げ強度**

酢の添加量(mL)	1mm 変形時の曲げ強度(N/mm)
3	1.864
2	1.938
1.5	2.075



**図 3. 浸水後の様子**  
(左から 3 mL, 2 mL, 1.5 mL)

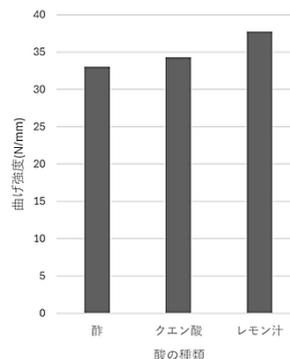


**図 4. 浸水後の断面図**  
(左から 3 mL, 2 mL, 1.5 mL)

### 3-3. 酸の種類による強度への影響

単位厚さ当たりの曲げ強度を図 5 に示す。

酸の種類を酢、クエン酸、レモン汁とした場合、いずれの条件においても大きな差はみられなかった。クエン酸およびレモン汁を用いた試料は、酢を用いた試料と比較して、やや高い値を示した。



**図 5. 酸の種類と曲げ強度**

### 3-4. 酸の種類による耐水性への影響

1 mm 変形時の曲げ強度を表 2 に示す。酸の種類を酢、クエン酸、レモン汁とした場合、測定値に大きな差はみられなかった。

**表 2. 酸の種類と 1 mm 変形時の曲げ強度**

酸の種類	1mm 変形時の曲げ強度(N/mm)
酢	3.113
クエン酸	3.025
レモン汁	3.461

### 3-5. 表面研磨処理による耐水性への影響

1 mm 変形時の曲げ強度を表 3 に示す。表面を研磨した試料と未処理試料との間で、測定値に大きな差はみられなかった。

未処理試料は水に浸すと表面が白色化し、膨潤が観察された。一方、表面を研磨した試料では、白色化した部分の面積が未処理試料よりも小さかった。

**表 3. 研磨処理の有無と 1 mm 変形時の曲げ強度**

処理	1mm 変形時の曲げ強度(N/mm)
研磨試料	1.423
未処理試料	1.413

### 3-6. 水に浸した後のにおいの評価

においの評価結果を表 4 に示す。いずれの試料も 10 点基準(酢 3.0 mL 添加・未研磨・水浸なし)と比較して大幅に低い値を示し、最大でも 4 点であったことから、浸水試料は全体としてにおい

は弱い傾向にあった。

酢の添加量による比較では、酢を 3.0 mL 添加した試料が 3 条件の中で最も高い評価値を示し、においが強いことが分かった。2.0 mL および 1.5 mL 添加試料では評価値に大きな差はみられず、いずれも低い値を示した。

また、表面を研磨した試料は未処理試料と比較して、評価値が低く、においを感じにくいことを示した。

酸の種類(酢, レモン汁, クエン酸)による評価値の大きな差はみられなかった。

すべての条件の中では、酢 1.5 mL 添加かつ表面を研磨した試料が最も低い評価値を示し、ほとんどにおいを感じないことが分かった。

**表 4. 浸水後の試料のにおいの評価**

酸の種類	量 (mL)	研磨処理	においの評価 (平均)
酢	1.5	未処理	1.11
酢	1.5	研磨処理	0.40
酢	2	未処理	1.33
酢	3	未処理	4.00
クエン酸	1.5	未処理	0.67
レモン汁	1.5	未処理	0.83

### 3-7. 生分解性の評価

試料を土中に埋設し、2 か月後に回収した。回収時に一部の試料は破損したが、すべての破片を回収し、乾燥後に質量を測定した。

質量変化の結果を表 5 に示す。各試料の質量は 68.7~85.2%減少し、平均で 98.5 mg (77.2%) の質量減少が確認された。

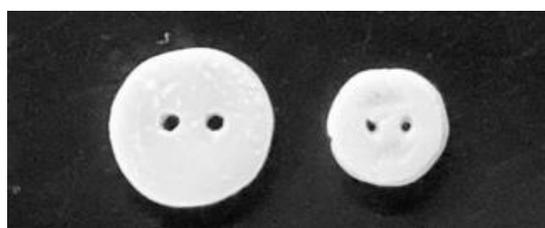
**表 5. 土中埋没前後における豆乳プラスチックの質量変化**

番号	初期質量 (mg)	2 か月後質量 (mg)	減少量 (mg)	減少割合 (%)
1	168.6	25.0	143.6	85.2
2	113.2	22.6	90.6	80.0
3	128.4	32.1	96.3	75.0
4	92.4	28.9	63.5	68.7
	平均		98.5	77.2

### 3-8. 衣服用ボタンの作製

図 6 に示すように、豆乳プラスチックをボタン状に成形することができた。作製した試料のうち、衣服に縫い付け可能な大きさのものを用いて着脱を行ったところ、破損はみられなかった。

洗濯機で約 30 分間洗濯したところ、乾燥前の試料は全体に柔らかくなり、力を加えるとわずかに湾曲した。表面のうち、紙やすりで未研磨の部分は白色化し、崩れが観察されたが、それ以外の部分に大きな崩れはみられなかった。その後、室温で約 30 分間乾燥させると、形状は洗濯前の状態に戻った。



**図 6. ボタン状に成形した豆乳プラスチック**

## 4. 考察

本研究では、豆乳プラスチックの強度、耐水性、におい、生分解性について検討し、衣服用ボタンとしての適用可能性を考察した。

まず、酢の添加量が強度に与える影響について、1.5 mL の酢を添加した試料が最も高い曲げ強度を示した。これは、適量の酸添加によってタンパク質が緩やかに凝集し、内部構造が比較的緻密に形成されたためであると考えられる。一方で、酸の添加量が多い場合には、タンパク質が急激に凝集し、構造が不均一となることで、強度の向上が抑制された可能性がある。また、1.5 mL 添加試料の強度は市販プラスチックボタンに近い値を示したことから、力学的観点では衣服用ボタンとして利用できる可能性が示された。

次に、耐水性について検討した結果、酢の添加量や酸の種類を変化させても、浸水後の曲げ強度に大きな差はみられなかった。このことから、豆乳プラスチックは水の影響を受けやすい材料で

あると考えられる。浸水後には表面の白色化や膨潤が観察されたことから、水による変化は主に表面から進行すると推測される。

この結果を踏まえ、表面を研磨する処理を行ったところ、浸水後の強度に大きな変化はみられなかった。しかし、未処理試料と比較して白色化部分の面積が小さかったことから、表面状態が劣化の進行に影響している可能性がある。したがって、表面処理は耐水性そのものの大幅な向上には至らないものの、形状保持性の改善に寄与する可能性がある。

また、水浸後に乾燥させた試料では、おおいの評価値が低下する傾向がみられた。豆乳プラスチックのにおいは、豆乳中に含まれる不飽和脂肪酸が酸化し、アルデヒド類などの揮発性化合物を生成するためであり、水中において芳香化合物が溶出し、乾燥過程でさらに揮散したため、おおいが軽減したと考えられる<sup>11)</sup>。したがって、水浸処理はにおい低減の一手法となり得ると考えられる。

さらに、土壌中に埋設した試料では、質量の大幅な減少が確認されたことから、豆乳プラスチックは生分解性を有する材料である可能性が示された。この性質は、廃棄後の環境中での残留を抑制する点で利点となると考えられる。

以上より、豆乳プラスチックは一定の強度と生分解性を有し、衣服用ボタンとして利用できる可能性のある材料であることが示された。一方で、水分の影響を受けやすいという課題も明らかとなった。今後は、耐水性向上を目的としたコーティングや複合化などの改良を検討することで、実用化に近づけることが期待される。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、牛乳および豆乳由来のタンパク質を用いたバイオプラスチックの作製を行い、特に豆乳プラスチックについて、酸添加条件が強度、耐水性、おおいに与える影響を検討した。その結果、豆乳 50 mL に対して酢 1.5 mL を添加した条件で、比較的均一な内部構造を示し、最も高い

曲げ強度を示す試料が得られた。また、表面を研磨することで、浸水時の白色化部分が減少し、おおいの評価値も低下する傾向がみられた。

さらに、豆乳プラスチックは土壌中で大きな質量減少を示したことから、生分解性を有する材料である可能性が示された。加えて、一定の強度を有することから、衣服用ボタンのようにある程度の厚みをもつ製品への応用可能性が考えられる。実際にボタン状に成形して評価したところ、洗濯後に一時的な柔軟化はみられたものの、大きな崩壊は生じず、乾燥後には形状が回復した。

一方で、豆乳プラスチックは水分の影響を受けやすく、耐水性には課題が残った。今後は、表面処理方法の改良や成形条件の最適化により耐水性を向上させるとともに、長期間の使用や繰り返し洗濯による劣化を評価する必要がある。これらの検討を進めることで、環境に配慮した材料としての実用化可能性をさらに高めることが期待される。

## 6. 参考文献

- 1)Chloe Wayman, Helge Niemann, 2021, The fate of plastic in the ocean environment – a minireview, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/em/d0em00446d>, 2025.05.16
- 2)Nag Pooja, Ishita Chakraborty, Md Hafizur Rahman, Nirmal Mazumder, 2023, An insight on sources and biodegradation of bioplastics: a review, 2025.05.16
- 3)Cornelis G de Kruif, Thom Huppertz, Volker S Urban, Andrei V Petukhov, Casein micelles and their internal structure, 2012, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22381008/>, 2025.05.16
- 4)Peggy Thomar, Taco Nicolai, Heat-induced gelation of casein micelles in aqueous suspensions at different pH, 2016, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27451368/>, 2025.05.16

5)ELSEVIR, 2019, Acoustic characterisation of pH dependant reversible micellar casein aggregation, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775719301116>, 2025.05.16

6)Alexander A. Tokmakov, Atsushi Kurotani, Ken-Ichi Sato, 2021, <https://www.frontiersin.org/journals/molecularbiosciences/articles/10.3389/fmolb.2021.775736/pdf>,2025.05.16

7)ELSEVIER, 2023, Acid gelation functionality of casein micelles in concentrated state: Influence of calcium supplementation or chelation combined with enzymatic stabilization, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005X23004733>,2025.05.16

8)Aminullah, Egi Febriansyah, Mohamad Ali Fulazzaky, 2025, Optimisation of alpha-tocopherol on anhydrous milk fat's oxidative stability and sensory quality in industrial-scale recombined milk product, <https://academic.oup.com/tfs/article/1/1/vxaf008/8257444>, 2025.11.28

9)食品総合研究所, 1994, 豆乳のゲル化過程の少量計測-新しい加工適性評価法, <https://agresearcher.maff.go.jp/seika/show/224397>, 2025.11.28

10)Yunhe Xu,Qing Ye,Huajing Zhang,Yang Yu,Xiaona Li,Zhen Zhang,Lili Zhang, 2019, Naturally Fermented Acid Slurry of Soy Whey: High-Throughput Sequencing-Based Characterization of Microbial Flora and Mechanism of Tofu Coagulation, <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2019.01088/full>, 2025.11.28

11)Guo-Zhi Ji, Xiao-Min Li, Yang Dong, Yu-Dong Shi, 2022, Composition, formation

mechanism, and removal method of off-odor in soymilk products, <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1750-3841.16370>

# こんなに溜まっちゃって・・・そのゴミ，みんなで処理しよう！

## ～そのゴミ，箱まで我慢できませんでした～

中田悠斗 濱口玲弥 林俊輔 山口穰

### 要旨

本研究では、オーバーツーリズムなどによって京都市内でポイ捨てが問題となっていることを背景として、京都府立洛北高等学校周辺のペットボトル、タバコの吸い殻のポイ捨てゴミの実態を調査することとした。GIS ソフトを用いて、ゴミ箱とポイ捨てゴミの位置を地図にプロットして、その関係を分析した。ペットボトル、吸い殻共にポイ捨ては、大通りから少し離れた細い通りや住宅地で見つかったが、ゴミ箱との距離との関係性を見つけることはできなかった。

### 1. はじめに

京都市では外国人観光客が増加し、近年オーバーツーリズムが問題となっている。新型コロナウイルス感染症の蔓延に伴う渡航自粛で一度は下火となったものの、2024 年の外国人宿泊客数はコロナ禍前をしのぐ数値となっている。

その一方で、実際に京都に観光に来た人からは、街の美しさを指摘する声とともに、人の多さや京都市バスの混雑、ゴミ箱の少なさを指摘する声が一定数みられる<sup>1)</sup>。

また、路上にごみを投げ捨てる、道路いっばいに広がって歩く、深夜に大声で話す、一般住居に立ち入って写真を撮るなどのマナー違反は市内各所で観察される。悪質な例では、嵯峨野の「竹林の小径」で観光客が名前やイニシャルを竹に彫りつけ、竹の皮が剥がされて枯れてしまったり、鴨川の河川敷や住宅地の塀、花街の店舗の看板に落書きされたりするケースが報道されている<sup>2)</sup>。

こうした都市部の公共空間におけるポイ捨ては、景観の悪化や環境汚染、さらには清掃コストの増大など、さまざまな社会的問題を引き起こしていることが指摘されている<sup>3)</sup>。また京都市の観光地は住宅地に隣接していたり、住宅地の中に含まれていたりすることもあり、ごみのポイ捨てが生まれやすい環境にあると考え

られる。

このような背景から、本研究では、京都を代表する観光地に近い京都府立洛北高等学校周辺を対象地域とし、研究を行うこととした。

予備調査として、図 1 の範囲における洛北高校周辺のフィールドワークを行い、ポイ捨ての状況を観察した。その結果、大通り沿いの道に多くポイ捨てが見られたためその周辺を長期的に調査することにした。

また、ゴミ箱があれば、手持ちのゴミを捨てようとするため、ゴミ箱から離れた場所にポイ捨てのゴミが増えると仮説を立て、ゴミ箱の設置場所とポイ捨て箇所を地図にプロットし、その関係を分析することとした。

### 2. 研究対象地域と研究方法

#### 2-1. 研究対象地域

京都府立洛北高等学校は、京都市左京区に位置し、京都盆地の北東部の賀茂川と高野川に挟まれた地域に立地している。洛北高校周辺は、住宅地としての機能の強い地域である一方、北西方向には、京都府立大学や京都コンサートホール、京都府立植物園、京都市営地下鉄の北山駅が立地している。また、洛北高校の正門を出て、下鴨本通りを南下し、北大路通りを越えた先には、

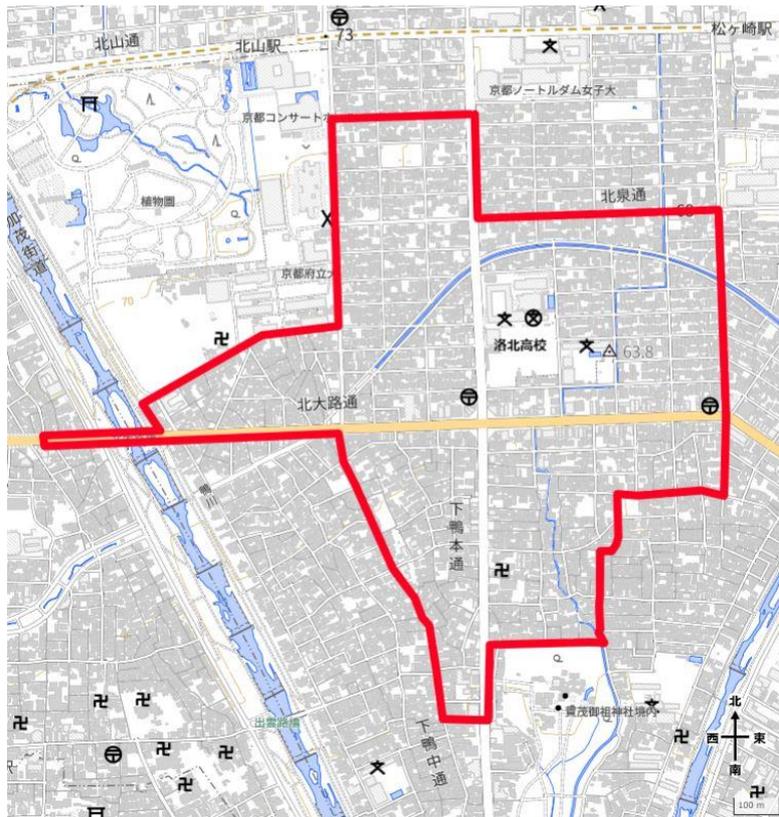


図1. 実施調査の範囲（地理院地図 Vector を基に作成）  
太線で囲まれた範囲は実地調査地域を示している。

京都を代表する神社の一つである下鴨神社が立地している。このような環境から、この地域の幹線道路である下鴨本通りと北大路通りには、通り沿いに小売店や飲食店が立ち並んでいる。そのため、この地域に居住する住民以外にも学生や観光客が多く行き来する地域であることがうかがえる。以上の理由から、洛北高校周辺では、ゴミのポイ捨てが発生しやすい環境にあると考えられる。

## 2-2. 研究方法

本研究は、実地調査として行うものを軸として研究を行った。また、対象とするポイ捨てゴミを他のゴミよりも多く見られたペットボトルとタバコの吸い殻に限定して調査を行うこととした。

実地調査では時期を3つに分けて、5日間、4人で分担し、ポイ捨てされているゴミとペットボトルのゴミ箱、吸い殻入れの位置を地図上にプロットした。地図上にプロットする作業は、Google マップを用いて行った。歩くエリアは110分の授

業時間内に行って帰ってこられる範囲に限定した（図1）。

その後、QGIS と呼ばれる地図情報システム (GIS) アプリを使用し、実地調査で得られたペットボトルゴミと吸い殻ゴミの位置情報を Google Map 上にプロットした。さらに、ゴミの位置とペットボトルのゴミ箱と吸い殻入れとの距離の関係を分析するために、ペットボトルのゴミ箱と吸い殻入れから50mの範囲と100mの範囲にバッファ(ある対象物を基準に、その周囲の一定距離の領域を指す)を重ね合わせた。

## 3. 結果

### 3-1. ペットボトルゴミ (図2)

ペットボトル専用のゴミ箱のほとんどは、コンビニエンスストアの中や自動販売機の横に設置されていた。特に、自動販売機横に併設されたペットボトル用のゴミ箱には、ペットボトルゴミ以外のゴミが押し込んであるものが見られた。また、ペットボト

ルのゴミ箱は、吸い殻入れと比較して数が圧倒的に多かったが、下鴨本通りと北大路通りの交差点から南東方向では、ゴミ箱のない空白地帯が見られた。

ペットボトルのポイ捨てゴミについては、細かい位置を確認すると、幹線道路から1・2本内側に入った通りで多く見られた。

### 3-2. タバコの吸い殻 (図3)

吸い殻入れの多くは、下鴨本通りに面したコンビニエンスストアやラーメン店の外に設置されていた。

吸い殻は、吸い殻入れの周辺にも一部見られるが、それ以上に、吸い殻入れから一定の距離(数10～数100メートル程度)離れた道路沿いや交差点付近、住宅街の中に吸い殻が多く分布している。特に北大路通りから一本入った場所や、人通りはあるが監視の目が少ないと考えられる細い道に吸い殻が集中している傾向が見られた。また吸い殻入れが半径50m圏内に複数存在するエリアであっても、吸い殻のポイ捨てが見られた。

## 4. 考察

### 4-1. ペットボトルゴミ

ゴミを探しにいった日数が同じであることを考えると、タバコの吸い殻と比較して、ゴミ箱の数に対して、見つかったポイ捨てゴミの数が少ない。これはゴミ箱の存在がポイ捨ての抑止力になっていることが考えられるが、その一方で、ポイ捨てが目につきやすいため、善意のある歩行者がゴミを拾った後に、ゴミ箱に捨てている可能性が考えられる。

ペットボトルのゴミ箱の距離とポイ捨ての量との間の相関関係については、データが少ないこともあり見出すことはできなかった。

### 4-2. タバコの吸い殻

吸い殻入れから100m以上離れた場所で見られるポイ捨ての多くは、住宅地に位置している。そのため、吸い殻入れを利用せず、仕事からの帰

宅途中に、歩きタバコをしながら途中で吸い殻を捨てている可能性が考えられる。また、今回発見した吸い殻入れは、店側が利用者向けに用意したものであって、喫煙所ではない。そのため、店の閉店時間中は、店内に片づけられた可能性がある。そういった理由から、吸い殻入れに近いところでもタバコのポイ捨てが見られたと考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

洛北高校周辺では、ペットボトル、吸い殻のポイ捨てゴミが、共に大通りから少し外れた細い通りや住宅地で多く見られた。またゴミ箱の有無とポイ捨て量の明確な相関関係は見られなかったが、ゴミ箱の存在が一定のポイ捨て抑止の効果を生んでいる可能性は示唆された。

その一方で、調査回数が少なかったことが大きな課題としてあげられ、季節・曜日・時間帯などによる変動を分析できなかった。とりわけ時間帯については、大通りに面した店舗で、朝に従業員が店舗前の清掃を行っていることも多く、ポイ捨てが見つかりにくい状況にあったことが予想される。よって、店舗や住民への聞き取り調査を通じて、地域の実感との照合をする必要があったと考えられる。これらは今後の研究の課題としたい。

## 6. 参考文献

- 1)京都市産業観光局, 2024.01, 京都観光総合調査, <https://www.city.kyoto.lg.jp/sankan/cmfiles/contents/0000341/341863/R6honsatsu.pdf>,2025.12.19
- 2)高坂晶子, 2020, オーバーツーリズム 観光に消費されないまちのつくり方. 学芸出版社.
- 3)伊藤 直子, 岩瀧 敏昭, 2024, 忍び寄る破壊が進む京都の景観に関する一考察. 昭和女子大学現代ビジネス研究所 2024 年度紀要, 1-11.

## 7. 添付資料

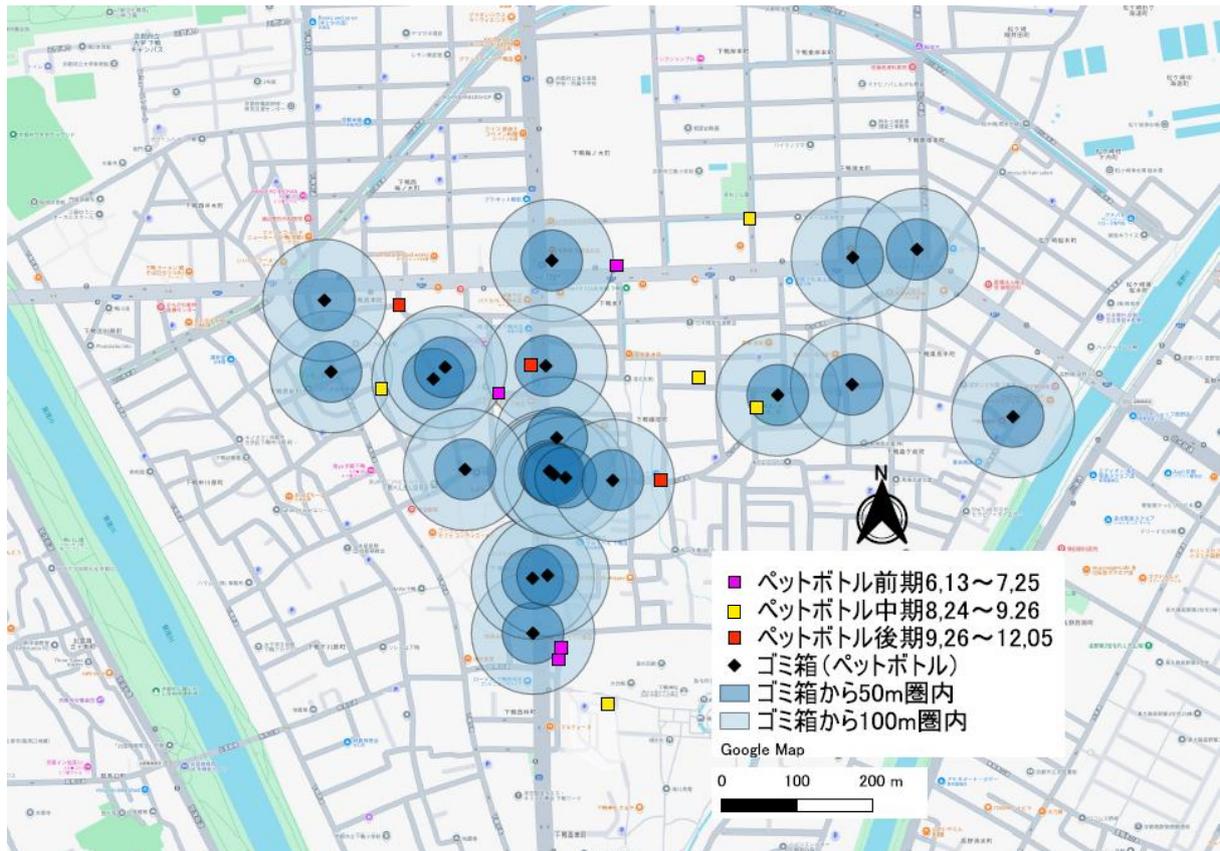


図2. ペットボトルのゴミ箱とポイ捨てされたペットボトルゴミ, およびそれらの位置関係

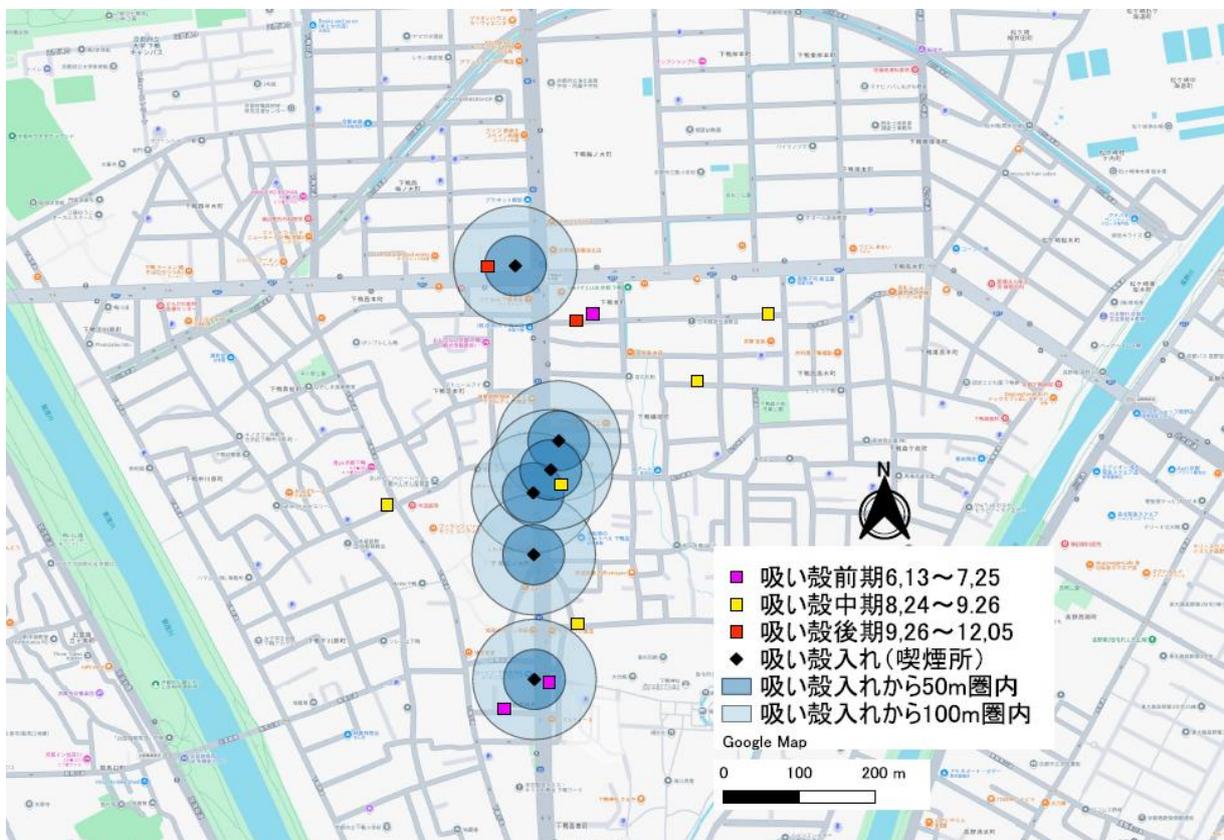


図3. タバコの吸い殻とポイ捨てされた吸い殻, およびそれらの位置関係

# 換気を用いた避難所における暑熱環境の低減

## ～体育館模型実験での開口条件による換気効率の検討～

黒川映瑠和 近藤華 野口紗矢子

### 要旨

我が国には地震をはじめとした自然災害が多く、緊急時の避難所として多くの学校の体育館が指定されているが、冷暖房設備が設置されている体育館は少ない。近年、地球温暖化の影響により全世界の気温は上昇傾向にあり、それに伴って建物の内部における気温も上昇することで熱中症のリスクが増大している。先行研究の調査で、体育館内の暑熱環境は換気によって軽減されることがわかった。本研究では、体育館のような大空間においては、開口面積の拡大のみを重視するのではなく、風向や開口部の配置を考慮し、室内全体を横断する空気の流れを形成することが、効率的な換気のために重要であることが明らかになった。

### 1. はじめに

地震大国として知られる我が国では、災害時の緊急避難先として地域の学校の体育館が指定されている。しかし、地球温暖化の影響に伴い、空調設備の整っていない体育館の暑熱環境が悪化し、避難所における熱中症のリスクが高いことが課題となっている。

本研究では、体育館の暑熱環境を改善するため、換気によって風の流れを生み、風通しを良くすることで室内にこもった熱を屋外に逃すことを目的とする。そのため、本実験では、さまざまなパターンで窓や扉を開閉し、最も換気効率の良い条件を明らかにすることを目的とした。

先行研究より、体育館の暑熱環境は、閉鎖環境と開放環境では大きく異なることが分かっている。体育館内では、開放環境にすることで風通しが改善され、熱が室外へ逃げていくため、気温および暑さ指数(WBGT)が低下し、暑熱環境が校庭よりも軽減されることが報告されている<sup>1)</sup>。

また、真夏の晴天時においては、体育館のみならず戸建住居等の建物においても、強い日射により屋根が熱せられ、屋根が熱源となって建物内の空気を温める。その結果、室内温度が外気

温よりも高くなることがある。体育館のように空調設備を設置・使用できない場合、窓や扉を閉め切って過ごす、熱中症で緊急搬送されるケースもある。窓や扉を開放して室内にこもった熱を屋外に逃すことは熱中症予防として有効であると考えられる。一方、無風またはそれに近い状況では、窓や扉を開放しても室内の熱を屋外に逃すことができず、室内温度の上昇を抑えることができない可能性がある<sup>1)</sup>ことに留意する必要がある。

### 2. 材料・研究方法

#### 2-1. 材料・モデル作成

実験には、本校で格技場として使用している、小中学校で標準的な構造をもつ体育館(以下、体育館)をモデルとして採用した。体育館は床面積 826.8 m<sup>2</sup>、高さ 7.5 m、ドーム型部分の高さ 27 m である。また、長辺が南北方向となるように建てられており、東側および西側の壁面にそれぞれ窓および扉が設けられている。モデルでは、体育館の構造および開口部配置を再現した 1/40 スケールの体育館模型を作成した。模型の作成には、内部の観察が容易である透明な PET 板を主材料として用い、外壁および遮光が必要な部分には黒

色のプラスチック製ダンボール(以下プラ段)を使用した。寸法(横×縦×厚み, 単位 mm)は以下の通りである。

- ・PET 板(640×340×1, 780×250×1, 670×780×0.5)

- ・プラ段(640×340×4, 780×250×4, 640×780×4)

各部の接合にはグルーガンを用いた。

作成したモデルには、実際の体育館における換気構造を可能な限り再現するため、上部東側および西側にそれぞれ12個、下部両側面にそれぞれ8個の窓(上部:横22mm×縦94mm, 下部:横40mm×縦35mm)を設けた。これにより、高所および低所の開口部が空気の流れに与える影響を同時に検討できる構造とした。また、モデルの四隅に扉(横50mm×縦100mm)を作成した。

## 2-2. 研究方法

モデル内部の空気の流れを視覚的に把握するため、スモークを温められた空気に見立てて使用した。スモークをモデル内に充満させた後、モデル上部から照明を照射することで、スモークの動きが明瞭に観察できるようにし、換気による空気の流動および対流の様子を可視化した。

本実験では屋外環境を再現するため、実際の屋外風速と同程度の風(平均0.40 m/s)をサーキュレーターによって再現した。またサーキュレーターの風が体育館内で実際に吹く風に近いものであるか、さらに整流であるかを超音波風速計を用いて測定した。測定条件は、A:実際の体育館内の風向、B:整流器を使用したサーキュレーターの風、C:整流器を使用しないサーキュレーターの風の3種類とし、それぞれ数値化して比較した。本研究では、整流である条件は「風向の変動が小さいこと」と定義し、30秒間の計測(5回/秒)を行い、その間の風向(度)の標準偏差を算出した(表2)。その結果、サーキュレーターの風は整流として扱うことができると評価した。

また、風速の違いによって体育館モデル内部の空気の流路に変化が生じるかを観察した(図1)。四方の窓のみを開けた状態で風速を2段階(i:平均風速0.40 m/s, ii:平均風速0.87 m/s)に設定し、比較した。その結果、風速の大小よりも、風の流入・流出経路の位置が体育館内の換気特性に強く影響することが分かった。そこで本研究では、窓や扉の開閉条件を操作することによる換気効率の変化を調べることにした。

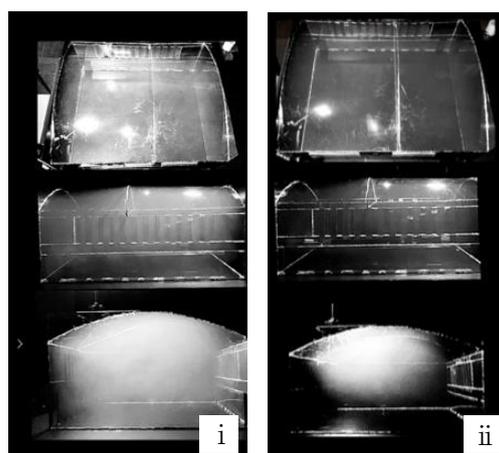


図1. 送風開始から30秒経過した時点でのスモークの滞留  
i: 風速平均0.40 m/s  
ii: 風速平均0.87 m/s

なお、実験における窓および扉の開閉条件は表1に示すとおりである。また、風向の設定については、本実験では京都市内の夏季に多い南東の風がサーキュレーターによって吹き込む条件で統一した。さらに、モデル内のスモークの挙動を、モデル正面(視点1)、側面(視点2)、上方(視点3)の3方向から、各条件につき1回撮影し、動画として記録した(図2)。

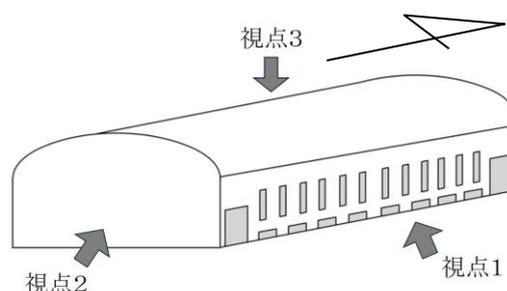


図2. 実験で設定した方角と視点  
視点2を南, 視点1を東側とした。

スモーク排出に要する時間を計測したが、モデル内部のスモーク濃度を数値化して評価することが困難であった。そのため、スモークの挙動を記録した動画を用いた視認比較でも、各実験条件における換気効率の評価も行うこととした。この方法は定量的評価には限界があるものの、空気の流れや滞留の有無を直接観察できる点で、模型実験における評価手法として有効であると考えられる。よって、本研究の換気効率の評価方法は以下の2点とした。

①視点2から確認される、スモークが排出されるまでに要した時間の最小値と最大値

②排出過程における空気の流路

これらを総合的に判断し、スモークの排出が速やかで、かつモデル全体に滞留が少ない条件を「換気効率が良い」と評価した。一方で、スモークが長時間天井付近に滞留し、局所的にしか排出されない条件は「換気効率が悪い」と判断した。

また、同一条件で異なる角度から撮影された映像を重ねて目視で比較した。これにより、偶発的なスモークの動きや一時的な乱れによる影響を可能な限り排除した。

**表 1. 実験の条件**

方位は開放した扉、窓の位置を示す。  
×は閉めていることを示す。

実験 No.	条件		
	下段窓	上段窓	扉
1	×	×	全方位
2	×	全方位	×
3	全方位	×	全方位
4	全方位	全方位	全方位
5	全方位	全方位	×
6	×	全方位	全方位
7	×	×	南東/北西
8	×	×	南西/北東
9	×	開(全方向)	南東/北西
10	×	開(全方向)	南西/北東

11	×	南東/北西	南東/北西
12	×	南東/北西	南西/北東
13	×	南西/北東	南東/北西
14	×	南西/北東	南西/北東

### 3. 結果

#### 3-1. 整流の検証

実際の体育館内の風(条件 A)、整流器を使用したサーキュレーターの風(条件 B)、整流器を使用しないサーキュレーターの風(条件 C)について、30 秒間の風向を測定し、その標準偏差を求めた。

その結果(表 2)、いずれの条件においても風向のばらつきは極端に大きくなく、本実験で用いたサーキュレーターの風は整流に近い状態であると判断した。なお、測定値は測定機器の精度を考慮し、小数第 1 位まで表記した。

**表 2. 30 秒間の風向の標準偏差**

条件	標準偏差
A: 実際の体育館	10.4
B: 整流器使用	14.3
C: 整流器使用なし	18.5

#### 3-3. スモーク排出までの時間

各条件におけるスモークの排出に要した時間を表 3 および図 3 に示す。排出時間が最も短かった条件は、窓・扉をすべて開放した No.4 であり、平均 109.5 s であった。

また、四隅の扉をすべて開けた状態で、下段窓(No.3)と上段窓(No.6)をそれぞれ開放した場合を比較すると、下段窓を開けた場合は平均 184.5 s、上段窓を開けた場合は平均 204.0 s となり、下段窓を開放した方がやや排出時間は短かった。ただし、実験回数が少ないため、この差は誤差の範囲である可能性もある。さらに、上段および下段の窓を開放し、扉を閉めた場合(No.5)と、すべての窓を閉めて四隅の扉を開放した場合(No.1)を比較した。開放面積や開放箇所数は No.5 の方が多いにもかかわらず、四隅の扉のみを開放し

た No.1 の方が排出時間は短くなった (No.5: 449.5 s, No.1:230.0 s). このことから, 開放面積だけでなく, 開放する位置や方向も排出時間に影響している可能性が示された.

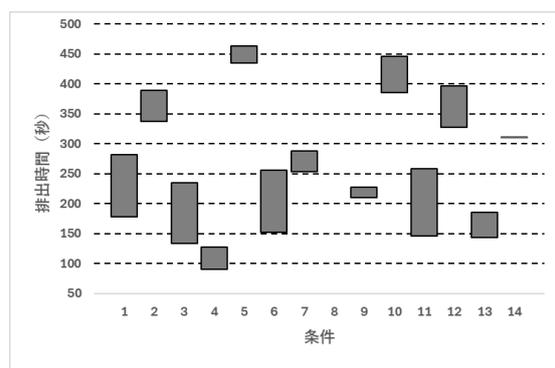
次に, 扉および窓の開放方向と排出時間の関係を調べた. 下段窓を閉めた状態で, 四隅の扉の開放方向と上段窓の開放方向を変え, 排出時間を測定した (No.7~No.14). なお, No.8 は動画が保存できていなかったため, データは欠損している. まず, 上段窓を開放した状態で, サーキュレーター風の風 (南東) が吹き込む位置とその対角にあたる 2 か所 (南東/北西) の扉を開放した場合と, それと直交する対角方向 (南西/北東) の扉を開放した場合を比較した. その結果, 南東/北西を開放した場合 (No.9, No.11, No.13) の方が, 南西/北東を開放した場合 (No.10, No.12, No.14) よりも排出時間が短くなった. 平均排出時間はそれぞれ, 416.0 s と 218.5 s, 362.5 s と 202.5 s, 312.0 s と 164.5 s であり, およそ半分程度に短縮される傾向が見られた.

さらに, 扉の開放方向と上段窓の開放方向を立体的に対角となるように設定した場合 (例: No.12, No.13) と, 扉と窓を同じ方向に開放した場合 (No.11, No.14) を比較した. その結果, 立体的に対角となるように開放した方が排出時間は短くなった (362.5 s と 232.5 s, 312.0 s と 164.5 s).

**表 3. 各条件におけるスモークの排出に要した時間 (単位: 秒)**  
欠損値は「-」で示している.

No.	最小値	最大値	平均値
1	178	282	230.0
2	338	389	363.5
3	134	235	184.5
4	91	128	109.5
5	435	464	449.5
6	152	256	204.0

7	253	288	270.5
8	-	-	-
9	210	227	218.5
10	386	446	416.0
11	146	259	202.5
12	328	397	362.5
13	144	185	164.5
14	312	312	312.0



**図 3. 各条件におけるスモークの排出に要した時間**

### 3-2. 排出過程の空気の流路

風速の違いにより体育館モデル内部の空気の流路に変化が生じるかを観察した. その結果, 図 1 に示したように, 条件によってスモークの濃度分布には違いが見られたものの, 天井付近にスモークが滞留し, 出入口付近でのみ空気の流路が生じるという共通した挙動が確認できた.

スモークの濃度分布は条件ごとに異なっていたが, 空気の流路の経路や滞留位置については, 風速の違いによる大きな変化は見られなかった.

また, 本実験ではいずれの条件においても, 天井付近にスモークが滞留し, 出入口付近で下降気流が確認された.

次に, 視点 2 から撮影した画像を用いて, モデル内部の空気の流路を比較した. 比較対象として, 排出時間が長かった No.5 および No.12 と, 最も短かった No.4 を選定した. なお, 各実験において平均排出時間の 50%が経過した時点を「排出

進捗が同一の時点」と定義し、その瞬間の様子を比較した(図 4)。

観察の結果, No.12 ではスモークが上部に偏って層状に広がり, 下部に空気の流路が形成されていた。また, No.5 では室内中央付近に, 床から天井にかけて広範囲の滞留域が形成され, 上下の窓付近では滞留が見られなかった。

これに対し, No.4 では局所的な滞留や濃度の偏りが小さく, スモークが空間全体に広がる様子が確認できた。

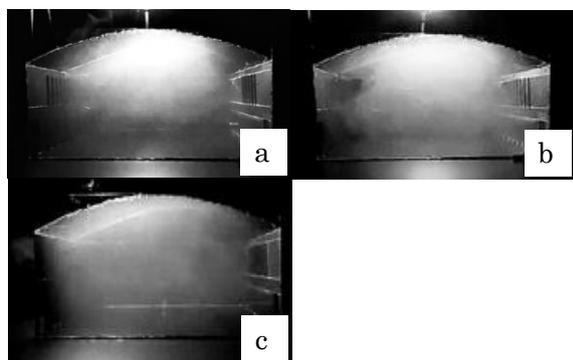


図 4 : 平均排出時間 50%経過時点での, 視点 2 からのスモークの滞留

a : 実験 No. 12

b : 実験 No. 5

c : 実験 No. 4

#### 4. 考察

本研究では, 体育館における開口条件の違いが換気効率に与える影響について検討した。

まず, 窓の位置について比較すると, 下段窓を開放した場合の方が排出時間はやや短い傾向がみられた。上段窓は下段窓よりも開口面積が大きく, 箇所数も多いことを考えると, 開口面積が小さくても, 窓を開放すること自体が換気効率の向上につながる可能性があると考えられる。

次に, 窓と扉を比較すると, 四隅の扉を開放した条件では, 開口面積や箇所数が少ない場合でも排出時間が短くなった。これは, 扉が四隅という離れた位置にあり, 外気の流入と室内空気の排

出の経路がはっきりと形成されやすいからであると考えられる。つまり, 換気効率は開口面積の大きさだけで決まるのではなく, 空気が室内を通り抜ける流れができていのかどうか重要であるといえる。

さらに, 扉を 2 か所開放する場合では, 体育館外の風が吹き込む方角とその対角に位置する扉を開放したときに排出時間が最も短くなった。これは, 流入口と流出口が対角線上に配置されることで, 空気が室内を横切る流れができ, 空気の滞留が減少したためと考えられる。この結果は, 対角に開口部を設けることで通風が促進されるとする先行研究<sup>3)</sup>とも一致している。

一方で, 開口部同士が近い位置にある場合や, 風向と合わない配置では, スモークの排出時間が長くなり, 流入した空気が室内を十分に循環せず, スモークの滞留する様子が見られた。このことから, 換気効率の違いにはショートサーキット(短絡流)の発生が関係している可能性があると考えられる。ショートサーキットとは, 流入した空気が室内全体を十分に循環せず, 入口付近からそのまま出口へ抜けてしまう現象である。もし換気効率が開口面積のみで決まるのであれば, 開口面積が大きい条件ほど排出時間は短くなるはずである。しかし実験では, 開口面積が比較的大きい条件でも, 窓や扉の開口方向により, 排出時間が長くなる場合が確認された。

また, 体育館の天井が高いドーム型の構造もスモークの滞留に影響を与えていると考えられる。先行研究によれば, ドーム型天井を有する建築物では, 天井付近の負圧が高い傾向があり<sup>2)</sup>, 上部に空気が滞留しやすいことが報告されている。これにより, 暖められた空気が天井付近に留まり, 結果として観測されたようなスモークの滞留や換気効率の低下が生じたものと推察される。

また, 扉 2 か所に加えて上段窓を開放した場合には, 扉の開放方向と上段窓の開放方向を立体的に対角となるように配置した条件で, より排出時間が短くなった。これは, 平面的な空気の流れに

加えて、暖かい空気が上昇する動きなどの上下方向の流れも加わり、三次元的な空気の流路ができたためと考えられる。つまり、体育館のような大きな空間では、平面的な対角配置だけでなく、上下方向も含めた立体的な対角配置を意識することが、ショートサーキットを防ぎ、効率的な換気につながるといえる。

## 5. まとめと今後の課題

本研究により、換気効率は単に開口面積の大小によって決まるのではなく、開口部の位置関係や外気の風向、さらに空気が室内全体を通過する流路が形成されているかどうかによって大きく左右されることが明らかとなった。

特に、流入口と流出口を対角に配置した場合や、扉と上段窓を立体的に対角となるように配置した場合に排出時間が短縮されたことから、立体的に空気の通り道を確保することが重要であると示唆された。一方で、開口部が近接している場合などでは、流入した空気が室内を十分に循環せずに出口へ抜けるショートサーキット（短絡流）が生じ、換気効率が低下する可能性があることも考えられた。

以上より、体育館のような大空間においては、開口面積の拡大のみを重視するのではなく、開口部の配置を考慮し、室内全体を横断する空気の流れを形成することが、効率的な換気のために重要であると結論づけられる。

本研究は模型を用いた実験であり、実際の体育館とは空間規模や温度差、気流の乱れなどの条件が異なる。そのため、実際の体育館において同様の傾向が見られるかどうかを検証する必要がある。また、本研究では排出時間を指標として評価を行ったが、室内各地点における空気の流速や濃度分布を直接測定していないため、ショートサーキットの発生を定量的に確認することはできていない。今後は、煙の可視化や流速測定などを取り入れ、空気の流れをより詳細に解析することが必要である。

さらに、実際に体育館が避難所として使われることを想定し熱源や内部の物の配置などが体育館内の空気の流れに与える影響も検証する必要があると考える。

## 6. 参考文献

- 1) 近藤玲・田中義幸・斉藤忠・高田仁, 2022, 市内小学校体育館における暑熱環境調査. 川崎市環境総合研究所年報, 10, 19-22.
- 2) 文礼志・植松康, 2019, 円弧型独立上屋に作用する風圧の時間的・空間的変動特性に関する研究, 膜構造研究論文集, 33, 52.
- 3) YKK AP 株式会社, 2025.8.8, 窓がポイント！住まいのじょうずな換気方法, <https://www.ykkap.co.jp/consumer/satellite/lifestyle/articles/ventilation/>, 2025.12.12

## 7. 添付資料

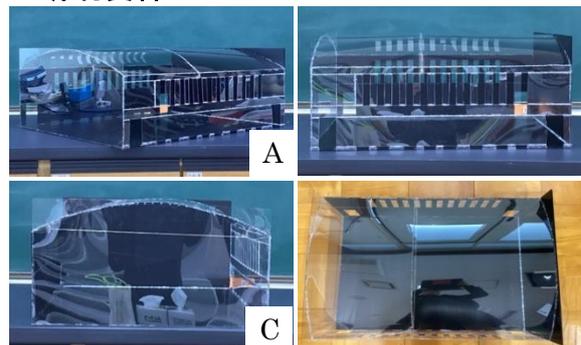


図 5. 制作した模型の写真

A: 全体像

B: 視点 1 から撮影

C: 視点 2 から撮影

D: 視点 3 から撮影

# アレルギー対応プリンの開発

## ～ 卵・牛乳不使用プリンの作製と評価 ～

今井眞香 奥田涼菜 水谷由布

### 要旨

本研究では、豆乳、アーモンドミルク、葛粉、粉寒天、ゼラチン、かぼちゃパウダー、バニラエッセンス、グラニュー糖を用いて卵・牛乳を使用しないプリンを作製した。糖度、水分量、固さ(保形性)の3つの観点で卵・牛乳を使用した蒸しプリンと比較・評価した。また、アレルギー対応プリンと卵・牛乳を使用したプリンについて、官能評価を実施した。その結果、豆乳とアーモンドミルク、粉寒天とゼラチンを混ぜ、太白ごま油を加えることで、味の好ましさや口どけについては卵・牛乳使用プリンに近づくことが明らかになった。一方で、豆乳の風味が強く感じるという点で課題が残ることが分かった。

### 1. はじめに

食物アレルギーの有病率は乳幼児が5～10%、学童期以降では1～3%を占めている<sup>1)</sup>と考えられており、原因食物は鶏卵が最も多く、2位が木の実類、3位が牛乳である<sup>2)</sup>。このような現状を踏まえると、アレルギー患者が安心しておいしく摂取できる食品の種類を、少しでも多く開発していくことが求められる。プリンは、ケーキやアイスクリームと同様に人気のデザートであるが、製造工程が比較的単純で、材料・加熱条件の違いが食感に与える影響を明確に観察できる。しかし、一般的な蒸しプリンには卵・牛乳が使用されているため、アレルギーを有する人は食べることができない。また、卵・牛乳不使用のプリンのレシピや植物性ミルクが嗜好性に及ぼす影響についての研究は見られたが<sup>3)</sup>、寒天やゼラチンなどの凝固剤を変化させることで、卵・牛乳を使用したプリン(以下、通常のプリンとする)の性質に近づけることを目的とした実験はほとんど見られない。そこで予備実験として、卵、植物性ミルク(豆乳、アーモンドミルク、ココナッツミルク)を使用したプリンを作製した。その結果、食感は通常のプリンとほぼ同じとなったが、味や色に違いが見られた。以上を踏まえ、本実験では卵・牛乳の代用となる材料を用いて作製

した9種類の卵・牛乳不使用プリンを作製し、糖度・水分量・固さ(保形性)の3つの観点で通常のプリンに近い卵・牛乳不使用プリンを作ることを目的とした。先行研究より、砂糖を多く入れるとプリンが柔らかく、崩れやすくなる<sup>4)</sup>ということがわかったため、卵・牛乳不使用のプリンでも糖度や水分量を調節することで、通常のプリンに固さを近づけることができるのではないかと考えた。また、卵の代わりとして凝固剤に粉寒天、ゼラチン、葛粉を用い、牛乳の滑らかさを出すために豆乳、アーモンドミルクを用い、牛乳や卵のコクや粘度を出すために太白ごま油を用い、色付けのためにかぼちゃパウダー、香り付けのためにバニラエッセンスを用いることとした。

### 2. 材料・研究方法

#### 2-1. 材料

使用した材料は以下の通りである。作製した9種類のプリンの材料の組合せについては、表1に示す。量はプリン型6個分である。

卵、牛乳、豆乳、アーモンドミルク、葛粉、粉寒天、ゼラチン、かぼちゃパウダー、グラニュー糖、バニラエッセンス、太白ごま油

表1 材料の組み合わせ（プリン型6個分）

プリン	ミルク(mL)	凝固剤(g)	葛粉 9g	グラニュー糖 50g	かぼちゃ パウダー1.2g + お湯	バニラ エッセンス 2滴	太白 ごま油 5mL
A	牛乳 350	卵白 約 30, 卵黄 約 90	×	○	×	×	×
B	豆乳 500	粉寒天 0.5 ゼラチン 7.5	○	○	○	○	×
C	アーモンドミルク 500	粉寒天 0.5 ゼラチン 7.5	○	○	○	○	×
D	豆乳 250 アーモンドミルク 250	粉寒天 0.5 ゼラチン 7.5	○	○	○	○	×
E	豆乳 250 アーモンドミルク 250	粉寒天 1.0 ゼラチン 5.0	○	○	○	○	×
F	豆乳 250 アーモンドミルク 250	粉寒天 2.0	○	○	○	○	×
G	豆乳 250 アーモンドミルク 250	ゼラチン 10.0	○	○	○	○	×
H	豆乳 250 アーモンドミルク 250	粉寒天 1.0 ゼラチン 5.0	○	○	○	○	○

## 2-2. プリンの作製

9種類のプリンについて、以下のレシピで作製した。粉寒天の標準使用量は、ミルク類 500mL に対し 2g、ゼラチンの標準使用量は、ミルク類 500mL に対し 10g として使用した。

### (A)卵・牛乳使用プリン(通常プリン)

- ①鍋にミルク 350 mL とグラニュー糖の半量 25 g を加え、火にかけ、沸騰直前まで加熱した。
- ②卵白 30 g, 卵黄 90 g, 残りのグラニュー糖 25 g をボウルで混ぜた。
- ③②で混ぜ合わせたものを鍋に少しずつ加えながら泡立て器で混ぜた。
- ④③の液をこし器で漉しながら、容器へ注ぎ、アルミホイルで蓋をした。
- ⑤フライパンに蓋をし、10分加熱した後、火を止めて蓋をしたまま5分蒸らした。
- ⑥冷蔵庫に入れて冷やした。

### (B~H)アレルギー対応プリン

卵の代わりに凝固剤として、葛粉 9 g, 粉寒天, ゼラチンを(Fは粉寒天のみ, Gはゼラチンのみ)用いた。また、牛乳の代わりにミルク類として、豆乳もしくはアーモンドミルクを(Bは豆乳のみ, Cはアーモンドミルクのみ)用いてプリンを作製した。

- ①豆乳, アーモンドミルク, 葛粉, 粉寒天, グラニュー糖, お湯でとのかしたかぼちゃパウダー, 太白ごま油 5 mL(Hのみ)を鍋に入れ、混ぜ合わせた。

- ②鍋を中火にかけ、湧いてきたら、弱火にして3分加熱した。

- ③火を止め、バニラエッセンス2滴を入れ、手早く容器に液を注いだ。

- ④冷蔵庫に入れて冷やした。

## 2-3. 評価方法

### (1)機器分析

糖度, 水分量, 固さについて以下のように機器による分析を実施した。

#### 1)糖度

屈折式糖度計(株式会社シロ産業)を用いて、それぞれのプリンの糖度を測った。

#### 2)水分量

乾燥式水分計(エー・アンド・デイ)を用いて、それぞれのプリンの水分量を測った。

#### 3)固さ

プリン容器に入れた状態の高さを定規で測った後、シャーレにプリンをひっくり返して出した時の高さを測る。ふたつの数値から割合を出し固さ(保形性)とした。

$$\text{固さ(保形性)} = \frac{\text{シャーレに出した時の高さ}}{\text{容器内のプリンの高さ}} \times 100$$

### (2)官能評価

Aのプリン(通常のプリン)および、著者ら3人が試食を行った結果と機器分析の結果と合わせて選んだHのプリン(ゼラチン5g, 寒天1g, 豆

乳 250mL, アーモンドミルク 250mL, 太白ごま油を 5nL 加えたプリン)の 2 つのプリンについて, 洛北高校 2 年生 20 人をパネラーとして, 試食調査を行った. その後, 味, 口どけについてそれぞれ 5 段階 (1:好ましくない~5:好ましい) で評価するアンケート調査を行った.

### 3. 結果

#### 3-1. 機器分析

表 2 に A~H のプリンの糖度, 水分量, 固さの機器分析の結果を示す.

表2 各プリンの測定結果

	1)糖度(%)	2)水分量(%)	3)固さ(%)
A	21.1	67.8	75.8
B	22.2	78.4	47.4
C	11.6	84.2	56.8
D	17.7	67.9	68.8
E	20.4	76.9	65.8
F	20.5	75.2	80.5
G	19.2	82.3	17.0
H	16.0	79.8	82.1

#### 1)糖度

A の通常のプリンに最も近い糖度を示したのは, F(豆乳とアーモンドミルクを 1:1 で混合し, 粉寒天のみで固化したプリン)であり, 20.5 % (差 0.6 %)であった. 一方, A と比較して最も差が大きく, 糖度が低かったのは, C(アーモンドミルクのみのプリン)で 11.6 % (差 9.5 %)であった.

#### 2)水分量

A のプリンに最も近い結果を示したのは, D(豆乳とアーモンドミルクを 1:1 で混合したプリン)であり, 67.9 % (差 0.1 %)であった. 反対に, 最も大きく異なったのは, C(アーモンドミルクのみのプリン)で 84.2 % (差 16.4 %)であった.

#### 3)固さ(保形性)

A のプリンに最も近い結果を示したのは, F(豆乳とアーモンドミルクを 1:1 で混合し, 粉寒天のみで固化したプリン)で 80.5 % (差 4.7 %)であった. 一方, 最も大きく異なったのは, G(豆乳のみのプリン)で 17.0 % (差 58.8 %)であった.

図 1~7 は, A の通常のプリンの糖度・水分量・固さをそれぞれ 3 とした場合の, B~H 各プリンの相対値を示すレーダーチャートである.

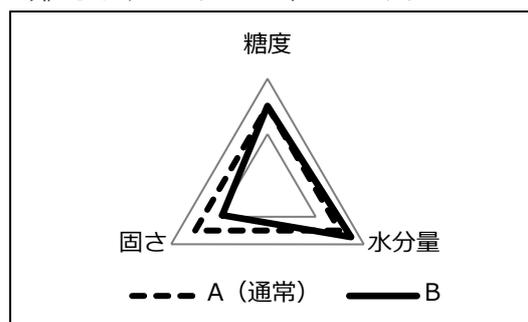


図1 プリン A とプリン B の比較

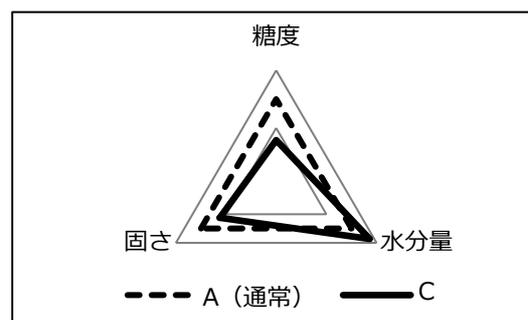


図2 プリン A とプリン C の比較

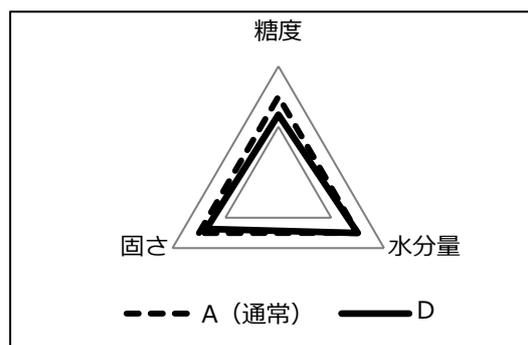


図3 プリン A とプリン D の比較

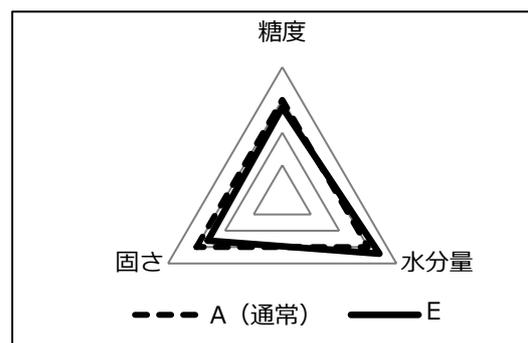


図4 プリン A とプリン E の比較

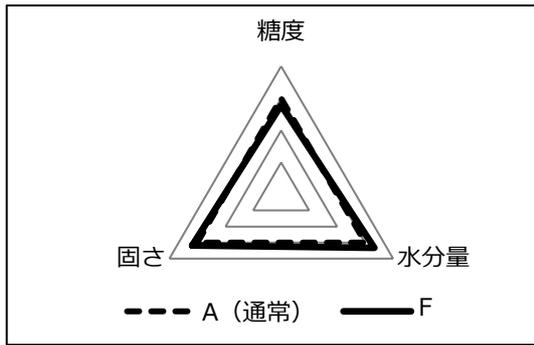


図5 プリンAとプリンFの比較

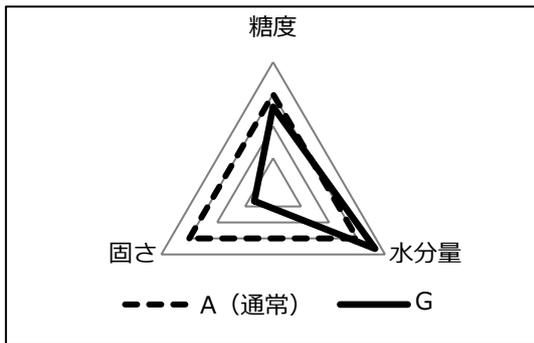


図6 プリンAとプリンGの比較

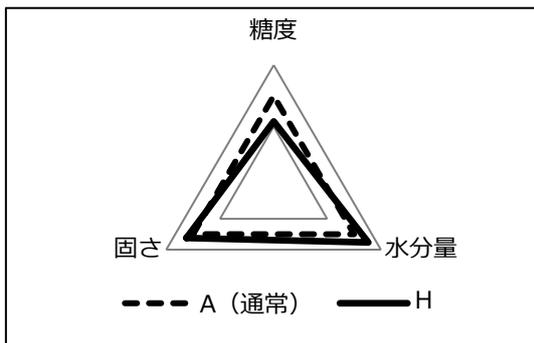


図7 プリンAとプリンHの比較

また、仮説では、糖度が高いプリンほど柔らかくなると予想していたが、固さと水分量の相関係数は-0.50であり、弱い負の相関が認められた一方(図8)、固さと糖度との間にはまったく相関はみられなかった(図9)。

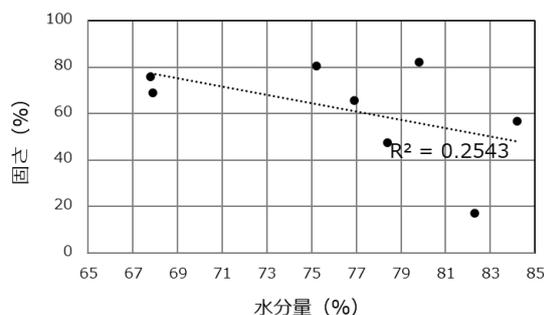


図8 水分量と固さ

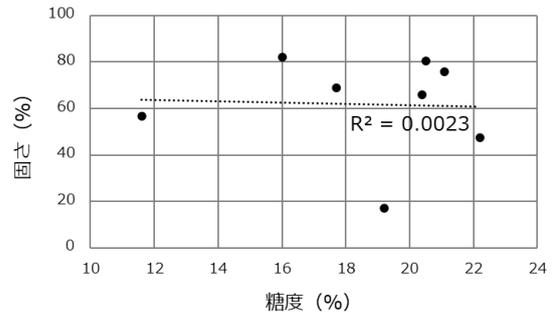


図9 糖度と固さ

### 3-2. 官能評価

著者らによる試食の結果、B~Hの各プリンにはそれぞれ以下のような特徴が認められた。

(B)豆乳のみ、粉寒天 0.5 g、ゼラチン 7.5 g

豆乳自体の味が強く、糖度は全ての作製したプリン全てで最も高かったものの、甘味はあまり感じられなかった。

(C)アーモンドミルクのみ、粉寒天 0.5 g、ゼラチン 7.5 g

アーモンドミルク自体の味が強く、甘味はBより強く感じたものの、糖度は全ての作製したプリン全てで最も高かった。

(D)豆乳とアーモンドミルク 1:1、粉寒天 0.5 g、ゼラチン 7.5 g

豆乳およびアーモンドミルク特有の風味は緩和され、水分量は通常のプリンに最も近い値を示した。しかしながら、口内では速やかに溶けてしまう傾向が認められた。

(E)豆乳とアーモンドミルク 1:1、粉寒天 1 g、ゼラチン 5 g

水分量は通常のプリンおよびDのプリンと比較して増加し、固さはそれらと比較して低下した。一方で、口内で速やかに溶ける傾向は軽減された。

(F)豆乳とアーモンドミルク 1:1、粉寒天のみ

機器分析の結果、糖度・水分量・固さは通常のプリンとの差が小さく、全体としてバランスの取れた値を示した。しかし、官能評価においては、ゼラチンと寒天を併用したプリンと比較して、より固く感じられた。

(G)豆乳とアーモンドミルク 1:1、ゼラチンのみ

作製した全てのプリンで最も柔らかく、シャーレ

に出した際に崩れてしまい、形を維持することができなかった。

(H)豆乳とアーモンドミルク 1:1, 粉寒天 1 g, ゼラチン 5 g, 太白ごま油

Eのプリンと比較して水分量は増加したものの、固さは上昇し、形状は崩れにくくなった。また、ごま油の添加による味および香りの顕著な変化は認められなかった。

これらを踏まえ、Aの通常のプリンと、H(豆乳とアーモンドミルクを 1:1 で混合し、粉寒天 1 g, ゼラチン 5 g, さらに太白ごま油を添加して作製したプリン)について、20名のパネラーを対象に試食調査を実施した。その後、味および口どけについてそれぞれ5段階(1:好ましくない~5:好ましい)で評価するアンケート調査を行った。その結果、Aは味 4.1, 口どけ 3.3, Hは味 3.0, 口どけ 4.1と評価された。味については、HのプリンはAの通常のプリンと比較して評価が低く(差 1.1), 一方、口どけについては通常のプリンよりも高い評価(差 0.8)を示した(表 3, 図 10)。

また、各プリンに対する自由記述の感想を整理すると、Aについては、味に関して「甘い」「濃厚」といった表現が多くみられ、口どけについては「やや硬め」との指摘が目立った。一方、H(豆乳とアーモンドミルクを 1:1 で混合し、粉寒天とゼラチンを 1:1 で併用、さらに太白ごま油を添加して作製したプリン)については、味に関して「豆乳の風味が感じられる」との記述が多く、口どけについては「かなり柔らかい」「ケーキ生地のような」といった感想が認められた。また、Hの味自体は好ましいと評価される一方で、Aの通常のプリンの味とは異なるという指摘も多くみられた。官能評価の結果から、Hは単体の製品としては嗜好性の高い味であるものの、Aの通常のプリンの再現という観点では十分とは言えないとする意見が多数を占めた。

表 3 官能評価の結果

味・口どけは5段階(1:好ましくない~5:好ましい)

	A (卵・牛乳使用)	H (豆乳とアーモンド ミルク 1:1, 粉寒天 1 g, ゼラチン 5 g, 太白ごま油添加)
味	4.1	3.0
口どけ	3.3	4.1
味の感想	甘い・濃厚	豆乳の風味 が目立つ
口どけの感想	かため	柔らかい

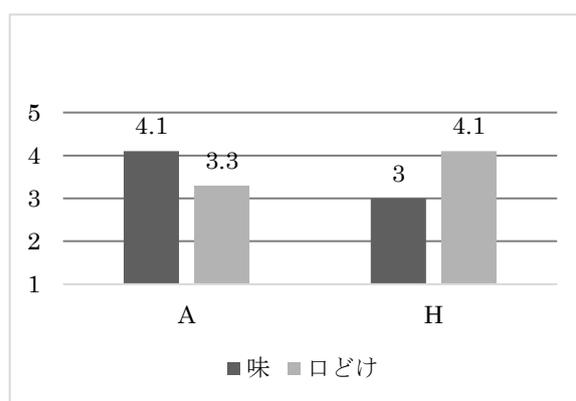


図 10 官能評価の結果

#### 4. 考察

機器分析について、豆乳のみを使用したプリンは糖度が最も高かったが、試食の結果、甘味は強く感じられなかった。一方、アーモンドミルクのみを使用したプリンは糖度が最も低かったにもかかわらず、甘味は豆乳のみを使用したプリンよりも強く感じられた。これは、本研究で糖度測定に用いた屈折糖度計が、糖だけでなく脂質やタンパク質の影響も受けるため、実際に感じられる甘味や砂糖量とは必ずしも一致しないことが理由と考えられる。すなわち、本研究における糖度は、甘味の指標というよりも、試料中の溶質量全体を反映した値である可能性が高い。

また、固さと水分量の相関係数は-0.50であり、弱い負の相関が認められた一方、固さと糖度との間には相関はみられなかった。仮説では、

糖度が高いプリンほど柔らかくなると予想していたが、本研究の糖度が主に脂質やタンパク質量の影響を受けた値であったことから、先行研究で示されるような「砂糖量の増加に伴い柔らかくなる」という関係は確認されなかったと考えられる。また、本実験では固さ（保形性）として、水分量を一定質量中の水の割合として測定しているため、水分量が増加すると、葛粉や寒天、ゼラチンなどの凝固剤に対する水分の割合が増え、結果として固さ（保形性）が低下したことが示唆される。

レーダーチャートから、糖度・水分量・固さのすべての指標において最も A に近い値を示したのは F であった。この結果から、牛乳の代替原料としては豆乳とアーモンドミルクの混合が有効であり、凝固剤としては寒天が物性の再現に適していることが示された。しかし、官能評価では、凝固剤として寒天とゼラチンを併用した E、およびそれに太白ごま油を添加した H が、固さや口どけが好ましいと評価された。これは、水分量・糖度・固さといった機器分析の指標だけでは、実際の食感、特に口どけを十分に評価できないことを示している。その要因としては、凝固剤の熱特性の違いが考えられる。人の口内温度は約 36~37℃であり、ゼラチンの溶解温度は約 25℃、寒天は約 70℃とされている<sup>5)6)</sup>。このため、ゼラチンは口内で容易に溶解し、寒天は溶けにくい。室温下で測定した固さ（保形性）ではこの差は反映されにくい。実際に摂食した際には、ゼラチンの寄与により滑らかな口どけが生じ、一方で、寒天により形の安定性が補われ、結果として「柔らかいが崩れにくい」という食感が実現された可能性がある。

さらに、太白ごま油を添加した H では、機器分析上は固さの上昇がみられ、官能評価では味や香りの顕著な変化は認められなかった。脂質の添加はコクの付与や構造形成に影響することが知られているが、本研究の官能評価では

太白ごま油無添加条件を設定できておらず、その効果を明確にするには至らなかった。

官能評価のアンケートの結果、豆乳とアーモンドミルクを同量混合したプリンでは「豆乳の味が目立つ」とする意見が多くみられた一方、「アーモンドミルクの味が目立つ」とする意見は少なかった。これは、豆乳の方が日常的に摂取される機会が多く、味の認識が容易であったためと推察される。実際に、植物性ミルクの市場における金額シェアは豆乳が約 80%、アーモンドミルクが約 15%とされており<sup>7)</sup>、豆乳の認知度は高い。このような背景から、著者らとパネラーとの間で風味の捉え方に違いが生じた可能性がある。

また、A と H の比較では、H は単体としては好ましい味と評価されたが、「A の味とは異なる」とする意見も多くみられた。すなわち、物性が似ていても、脂質量や香り成分などの違いにより、従来のプリン特有の「甘く濃厚な味わい」を完全に再現することは難しいことが示唆された。以上より、通常のプリンの再現には、糖度や水分量、固さといった数値的な指標に加え、脂質の組成や香り成分、さらには口内での溶解など、様々な要因を考慮する必要があると考えられる。今後は、甘味料の種類や脂質量の調整、凝固剤の配合比の最適化、さらに香り成分や微細構造の解析を行うことで、より通常のプリンに近い品質の再現が可能になると期待される。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、豆乳とアーモンドミルクを併用し、ゼラチンと寒天を組み合わせ、さらに太白ごま油を添加することで、他の条件と比較して通常のプリンに近い味や口どけを示すことが明らかになった。しかしながら、豆乳特有の風味が気になるとする意見も一定数みられ、万人に受け入れられる卵・牛乳不使用プリンの再現に成功したとは言い難い。今後は、豆乳の風味を緩和する条件や香り成分

の調整, 甘味料や脂質量の最適化などを検討することで, より嗜好性の高い製品へ改良する必要がある。

また, 本研究で用いた屈折糖度計による糖度測定は, 糖のみならずタンパク質や脂質の影響も受けるため, 実際の砂糖含有量や甘味の強さを直接的に示す指標とは言えない。今後は, 甘味強度の評価方法を併用するなど, より適切な指標を用いた分析を行うなど, 物性と味覚の関係をより正確に把握することが求められる。

さらに, 本実験における官能評価は, 著者らおよび同じ学年の生徒のパネラーに限定されており, 評価者の嗜好や経験に偏りが生じている可能性がある。今後は, 対象者数を増やすとともに, 多様な年齢層や食習慣を持つ人々を対象とした評価を実施することで, より一般的な傾向を捉えることができると考えられる。加えて, 本研究の目的の一つである卵・牛乳アレルギーへの対応という観点からは, 実際に該当する人々による試食評価を行うことが重要である。今後, 適切な配慮のもとで当事者の意見や感想を収集し, 味や食感, 安全性の観点から改良を重ねることで, より実用的で受容性の高い製品開発につなげていきたい。

## 6. 謝辞

本研究の実施にあたり, アンケート調査および試食評価にご協力いただいた洛北高等学校第 2 学年の皆様に, 心より感謝申し上げます。

## 7. 参考文献

- 1) 厚生労働省・一般社団法人日本アレルギー学会, 2025.4.1, アレルギーポータル アレルギーについて, <https://allergyportal.jp/knowledge/food/>
- 2) 消費者庁, 2024.9.14, 即時型食物アレルギーによる健康被害に関する全国実態調査, [https://www.caa.go.jp/policies/policy/food\\_labeling/food\\_sanitation/allergy/](https://www.caa.go.jp/policies/policy/food_labeling/food_sanitation/allergy/)
- 3) 阿相優香・形純子・松本美鈴, 2021, 植物性ミ

ルクがカスタードプティングの物性と嗜好性に及ぼす影響. 日本調理科学会誌, 54, 1, 6-13.

4) 平松サリー, 2024.4.17, 砂糖の量でプリンのかたさが変わる? プリンで実験しよう, <https://www.zkai.co.jp/z-navi/post-4846/>

5) 入來正躬・土家清・金野郁雄・内野欽司・川島美勝, 1988, 健常日本人の口腔温. 日本生気象学会雑誌, 25, 3, 163-171

6) 共立食品株式会社, 2025.7.29, 凝固剤のお話, <https://www.kyoritsu-foods.co.jp/feature/coagulant/>

7) 株式会社 KSP-SP, 2025.9.10, 健康美容効果に加え飲用だけではない利用も広まっている植物性ミルク. 豆乳&アーモンドミルクの好調が続いている, [https://www.ksp-sp.com/opencts/2025/09/10/reports\\_mktr189/](https://www.ksp-sp.com/opencts/2025/09/10/reports_mktr189/)

# 高校生を対象とした利用規約の内容理解度向上への取り組み

## ～絵文字を用いた試み～

武田七菜未 藤澤那帆

### 要旨

本研究では、高校生がスマートフォンでアプリをダウンロードする際に利用規約を読まないことに伴って生じるさまざまなトラブルを未然に防ぐため、絵文字を利用して利用者に利用規約を読んでもらうことを目標とし、絵文字を取り入れた利用規約のモデルを用いたアンケート調査を行った。結果として、絵文字を用いた利用規約を提示したグループは、変更のない利用規約を提示したグループよりも理解度チェックで良い成績を収めた。特に、普段まったく利用規約を読まない層に限定すると、得点の分布に差が見られた。以上のことから、利用規約に絵文字を取り入れることで、高校生の利用規約に対する理解度を向上させられる可能性があると考えられる。

### 1. はじめに

現在、SNS などを利用する際に提示される利用規約を読まない人が多く(図 1)、また利用規約に記載されているサービス利用者の個人情報の取扱いに関する内容を十分に認識しないまま同意している人も多い<sup>1)</sup>。その結果、消費者に不利な規約内容に気づかず同意してしまう可能性が高いことが指摘されている<sup>2)</sup>。特に、スマートフォンを頻繁に利用する一方で利用規約を読む習慣のない高校生が、一人でアプリをダウンロードする際やウェブサイトを利用する際には、このようなトラブルが生じるおそれがあると考えられる。

また、単に利用規約をダイジェスト表示として分量を減らすだけでは理解度は向上せず、ダイジェスト表示に加えて利用者の関心の高さが理解度に大きく影響すると思われる<sup>3)</sup>ことが明らかになっている。そこで、高校生にとって身近であり、かつ利用者の興味を引きやすいと考えられる絵文字に着目した。

本研究では、トラブルを未然に防ぐことを目的として利用規約のデザインを工夫し、絵文字を取り入れた利用規約モデルを作成した。具体的には、損害賠償および個人情報に関わる項目を強調す

ることを目的として複数の絵文字を文中および文末に挿入し、高校生に提示した。その後、理解度チェックおよび利用規約の読み取り状況を問うアンケート調査を行い、理解度の変化や反応をもとに、内容理解にどのような影響があるかを検討した。

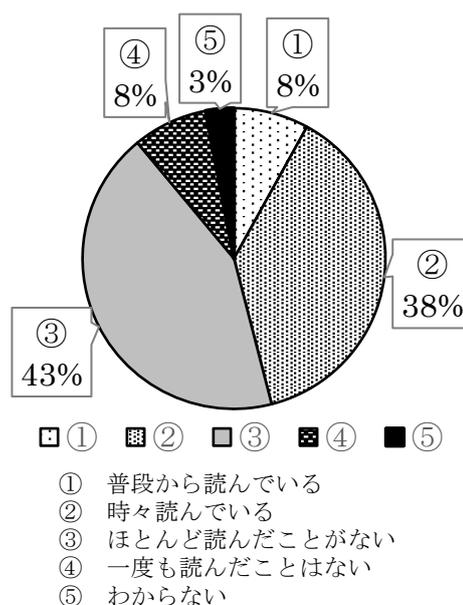


図 1. 利用規約を読む頻度に関する調査結果  
公正取引委員会 デジタル・プラットフォームサービスの利用者（消費者）に対するアンケート調査（詳細）<sup>1)</sup>より作成

## 2. 材料・研究方法

まず、ひな形<sup>4)</sup>をもとに、改変を加えていない利用規約(以下、通常版)(図 2)と、絵文字を取り入れた利用規約(以下、絵文字版)(図 3)を作成した。

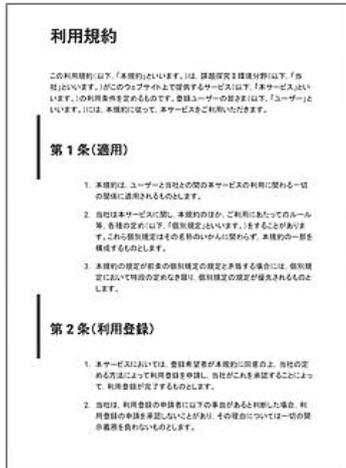


図 2. 通常版の利用規約 (一部)

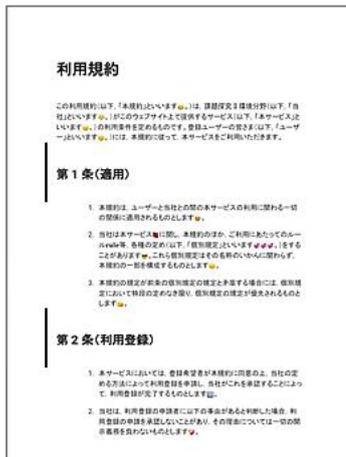


図 3. 絵文字版の利用規約 (一部)

洛北高校第二学年の生徒 227 人を 2 つのグループに分け、一方のグループには通常版の利用規約を、もう一方のグループには絵文字版の利用規約を、タブレットの授業支援クラウドを通して配布した。その後、タブレットを閉じて利用規約を見ない状態にし、利用規約の内容理解を確認するため、4 問からなる理解度チェック(図 4)を実施した。続けて事後アンケートを行い、

- 1) 普段どれだけ利用規約を読んでいるか
- 2) 読まない人はなぜ読まないのか

の 2 点について質問し、問題ごとの回答人数を

集計した。

また、理解度チェックは 1 問 1 点の合計 4 点満点で集計し、3 点以上を高得点、2 点以下を低得点として評価した。通常版使用者(113 人)と絵文字版使用者(114 人)の間で t 検定を行い、有意差の有無を検討した。

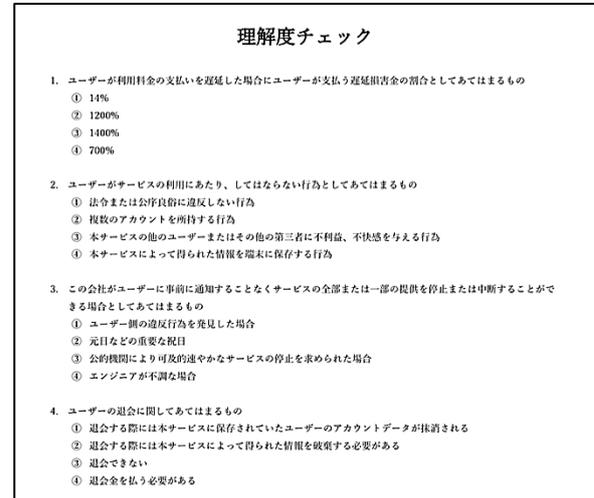


図 4. 理解度チェック (4 問)

## 3. 結果

### 3-1. 理解度チェック

理解度チェックの結果、4 点満点中 4 点を得た人数の割合は、通常版(図 5)よりも絵文字版(図 6)の方が約 12%高かった。一方、4 点満点中 2 点以下の人数の割合は、絵文字版よりも通常版の方が 10.9%高かった。

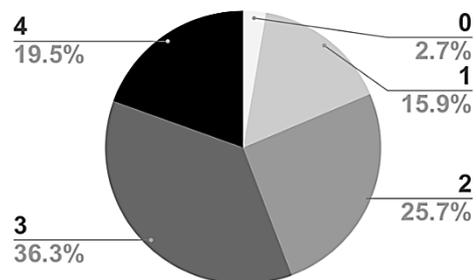


図 5. 通常版の得点ごとの人数の割合 (n=113)

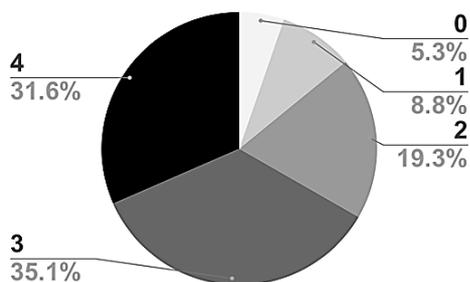


図 6. 絵文字版の得点ごとの人数の割合 (n=114)

### 3-2. 事後アンケート

アンケート調査の結果、普段まったく利用規約を読んでいない人が最も多く、次いで大事そうなところだけ読む人が多かった(図 7)。問 1 において「最初だけ読む」「全く読まない」と回答した人に対し、利用規約を読まない理由を尋ねたところ、「文字が多い」という回答が最も多かった(図 8)。さらに、自由記述では「面倒くさい」「結局同意をしないとサービスを利用できないから」「難しそうな単語が多い」といった回答が見られた。

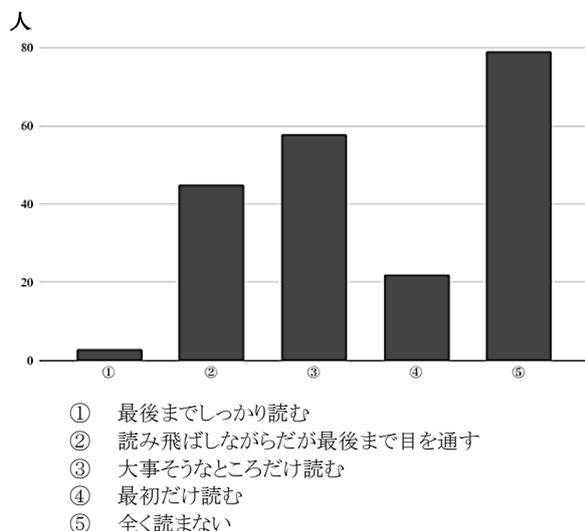


図 7. 利用規約の読み取り状況 (n=227)

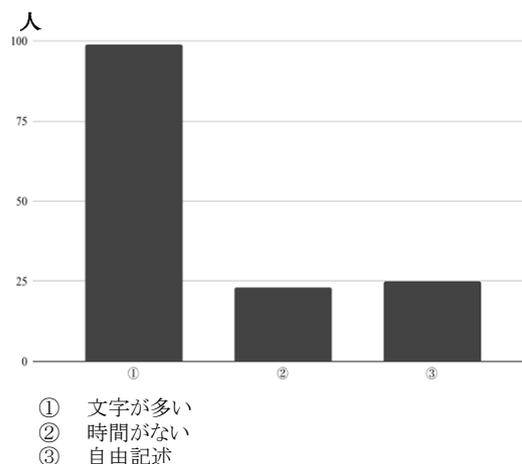


図 8. 利用規約を読まない理由

### 3-3. t-検定結果

理解度チェック(最大 4 点)の得点に対する絵文字利用の効果を検討するため、t 検定を行った。

まず、アンケート回答者全体(227 人)を対象に、通常版と絵文字版の理解度チェック得点の平均値(通常版 2.54, 絵文字版 2.78)に差があるかを、対応のない両側 t 検定により検討した(図 9)。その結果、P 値は 0.104246 となり、有意水準 5% (P=0.05) より大きかったため、両者の平均点に有意差は認められなかった。

次に、事後アンケートで「全く読まない」と回答した層(102 人)を抽出し、同様に通常版と絵文字版の理解度チェックの得点の平均値(通常版 2.43, 絵文字版 3.13)に差があるかを t 検定により検討した(図 10)。その結果、P 値は 0.000346 となり、有意水準 5% (P=0.05) より小さかったことから、両者の平均点には有意差があると考えられる。

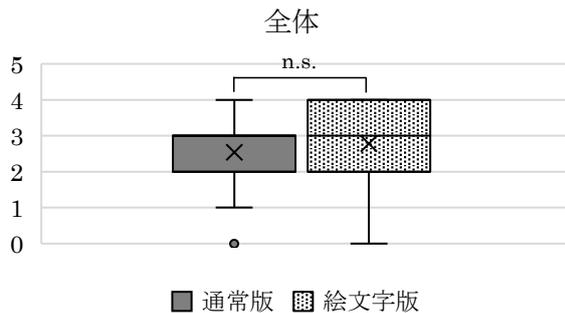


図 9. 通常版と絵文字版における理解度チェック得点の分布 (n=227)

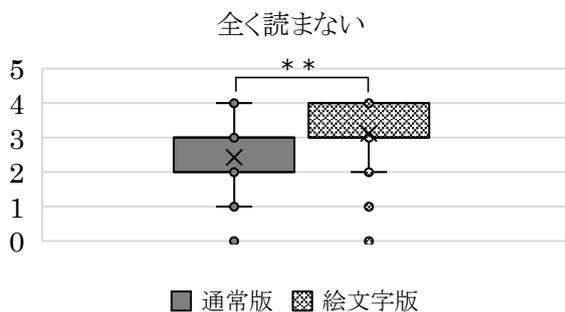


図 10. 「全く読まない」層の通常版と絵文字版における理解度チェック得点の分布 (n=102)

#### 4. 考察

理解度チェックでは、絵文字版グループは通常版グループに比べて4満点中3点以上を得点した人数の割合が大きかった。このことから、高校生にとって絵文字は利用規約の内容を印象づけ、記憶に残りやすくするうえで有効である可能性がある。

また、普段から利用規約を全く読まない層を対象に行った対応のない2標本t検定において、絵文字版と通常版の得点の平均値には有意差が認められた。絵文字は公式文書ではあまり用いられないため、利用規約に絵文字が用いられている意外性が注意を引き、普段利用規約を読まない人に対して内容に目を向けさせる効果があったと考えられる。

さらに事後アンケートでは、「文字が多い」ことを普段利用規約を読まない理由として挙げる生徒

が最も多かった。しかし、本研究では利用規約のひな形に絵文字を追加したため文字数自体は増えている。それにもかかわらず理解度チェックやt検定の結果に差が見られたことから、絵文字を利用規約に用いることは、普段利用規約を読まない層に対して「読んでみよう」と思わせるきっかけになった可能性がある。これは、利用規約にあまり用いられてこなかった絵文字が頻繁に出現することで意外性が生まれ、最後まで目を通そうとする行動につながったことが原因ではないかと考えられる。

本研究は、利用規約を読まないことによって生じるトラブルを未然に防ぐことを目的として、絵文字を用いた利用規約の有効性を検討したものである。理解度チェックおよび統計的検定の結果から、絵文字を取り入れることで、特に普段利用規約を読まない層において内容理解が向上する可能性が示された。当初の仮説である「利用者の関心を高めることで理解度が向上する」という点についても、本研究の結果はこれを支持するものであったと考えられる。

#### 5. まとめと今後の課題

本研究では、利用規約を読まないことによって生じるトラブルを未然に防ぐことを目的として、絵文字を用いた利用規約の有効性を検討した。理解度チェックおよび統計的検定の結果から、絵文字を取り入れることで、特に普段利用規約を読まない層において内容理解が向上する可能性が示された。また、先行研究に示されていた「利用者の関心の高さが理解度に大きく影響すると考えられる<sup>3)</sup>」という点についても、本研究の結果はこれを支持するものであったと考えられる。これらのことから、絵文字は普段利用規約を読まない人に内容を理解させる手段として有効であり、重要な利用規約への活用が見込まれる。

高校生が個人でアプリのダウンロードやウェブサービスの利用を行う機会は増加する一方で、利用規約の内容を十分に理解しないまま同意してし

まう状況も多いが、本研究の結果は、利用規約の提示方法を工夫することで、利用者の理解を促し、トラブルの予防につながる可能性を示している。

ただし、公式な文書に絵文字を用いることへの抵抗感や、絵文字を文章に加えることでかえって内容が理解されにくくなる可能性も考えられる。また、本研究は同一校の高校生を対象とした調査であり、対象集団が限定されている点や、短時間での理解度チェックであったため長期的な記憶や実際の利用場面での行動変容まで検討できていない点にも留意する必要がある。

今後は、絵文字の種類や配置方法の違いによる影響の検討に加え、絵文字と類似した効果が期待できる手法や、全く異なるアプローチの開発も進めていく必要がある。実際のサービス提供の場面では幅広い年齢層が利用規約を目にすることが想定されるため、他の年齢層においても同様の効果が得られるかを検証することが求められる。さらに、絵文字だけでなく、要約や図の活用など多様な提示方法を組み合わせることで、消費者の利用規約に対する理解度をより一層向上させる方法を検討していきたい。

## 6. 謝辞

アンケートにご回答いただいた洛北高等学校第2学年の皆様に、心より感謝申し上げます。

## 7. 参考文献

- 1) 公正取引委員会, 2020.4.28, 【詳細版】デジタル広告の取引実態に関する消費者向けアンケート調査結果, [https://www.jftc.go.jp/houdou/pressrelease/2020/apr/digital/200428besshi2\\_rev.pdf](https://www.jftc.go.jp/houdou/pressrelease/2020/apr/digital/200428besshi2_rev.pdf), 2025.6.6.
- 2) パープル社, 2017.7.10. 22,000 people willingly agree to community service in return for free WiFi, <https://www.purple.ai/blogs/purple-community-service>
- 3) 土屋あんな・砂原秀樹, 2021, 利用規約及びプライバシーポリシーのデザインと理解度の評価,

修士学位論文 2021 年度メディアデザイン学, 92  
3, 1-114

4) web サイトの利用規約, 2017, 11, 6, 利用規約のひな形, <https://kiyaku.jp/hinagata/gp.html>

# 片想い空間

## ～距離空間に対称律を仮定しない場合の考察～

青山真河

### 概要

距離空間の簡単な例としてよく紹介されるものとして、離散距離があるが、これは「距離を測る」という目的においては実用性がない。そのため、距離空間を単に「距離を測る方法の理論」として捉えるのは相応しくない。距離空間の最大の特徴は、「 $\varepsilon$  近傍」という概念を定義できるところにある。これは、多様体論などのトポロジーの発展分野で欠かせない概念であり、とくに、近傍を開基とすることで位相を入れることができるので、極めて使い勝手が良い。しかし、距離空間は基礎的な分野であり、広く応用されているがために、かえってその価値を当たり前のものと考えてしまいがちだ。それらについて再確認し、理解を深めるために、対称律を抜いた場合の考察をした。本論文はその結果をまとめたものである。類似の先行研究としては、非退化性を緩めた「疑距離」というものがあるが、本研究で対称律を抜いて考えることにした理由は、対称律の親しみやすさから、逆にそこに注目することが少ないからである。本研究では、対称律の有無について比較することで対称律の有用性を改めて認識するとともに、対称律を抜いた場合にも、興味深い性質が成り立つことを発見することができた。

## 1 (通常の) 距離空間

### 1.1 定義と基本的な命題

距離空間とは、集合であって、2点を与えられた時にその距離を返す関数  $d$  (距離関数という) を持つもののことである。あるいは、集合  $X$  と距離関数  $d$  の組のことと説明されることも多い。

**定義 1.1 (距離空間).** 集合  $X$  と関数  $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$  の組  $(X, d)$  であって、 $\forall x, y, z \in X$  に対し、以下の規則を満たすものを距離空間という：

- (i)  $d(x, y) > 0 \iff x \neq y$ ,
- (ii)  $d(x, y) = d(y, x)$ ,
- (iii)  $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$ .

ここで、規則 (i) を非退化性、規則 (ii) を対称律、規則 (iii) を三角不等式という。

以上の公理から、距離空間を特徴づける以下の

命題が導かれる。

**命題 1.2 (距離空間の諸性質).**  $(X, d)$  を距離空間とする。このとき、以下が成り立つ：

- (i)  $x \neq y \implies d(x, y) > 0$   
(異なる点の距離は正)
- (ii)  $d(x, x) = 0$  (同じ点の距離は零)
- (iii)  $d(x, y) \geq 0$  (非負性)
- (iv)  $|d(x, y) - d(y, z)| \leq d(z, x)$   
(逆三角不等式)

**証明.**

- (i) 非退化性より自明。
- (ii) 三角不等式より

$$d(x, x) + d(x, x) \geq d(x, x).$$

すなわち  $d(x, x) \geq 0$ 。ところが、非退化性より、仮に  $d(x, x) > 0$  とすると  $x \neq x$  となって矛盾。よって  $d(x, x) = 0$ 。

- (iii) (i) と (ii) から直ちに導かれる。

(iv)  $d(x, y) - d(y, z) \leq d(z, x)$  と  $d(y, z) - d(x, y) \leq d(z, x)$  を示せばよい.

$$\begin{aligned} d(y, z) + d(z, x) &\stackrel{\text{三角不等式}}{\geq} d(y, x) \\ &\stackrel{\text{対称律}}{=} d(x, y), \\ d(z, x) + d(x, y) &\stackrel{\text{三角不等式}}{\geq} d(z, y) \\ &\stackrel{\text{対称律}}{=} d(y, z). \end{aligned}$$

よって題意は示された. ■

**注意 1.1** とくに, (i) と (ii) から  $d(x, y) = 0 \iff x = y$  もわかる.

## 1.2 距離空間の近傍

距離空間の条件は 3 つの基本的な公理のみなので, 以下のようなものも距離空間の一つである.

**例 1.1 (離散距離).** 集合  $X$  (とくに条件を課さない) に対し,  $d: X \times X \rightarrow \mathbb{R}$  を

$$d(x, y) = 1 - \delta_{xy} = \begin{cases} 0 & (x = y) \\ 1 & (x \neq y) \end{cases}$$

で定めると, これは定義 1.1 の規則 (i)~(iii) を満たし,  $(X, d)$  は距離空間になる. ◁

しかし, これは人間の直感からすれば距離と呼べる代物ではなく, また距離を測るという観点からいっても全く実用的でない. それゆえ距離空間は「距離を測る」ことが直接の目的ではなく, より高度な概念を定義するための枠組みであると考えるのが相応しい. たとえば, 以下での述べる「近傍」は, 距離が定義されることによって初めて定義できるものであり, トポロジーの応用や多様体論, さらには函数解析など, 様々な分野で欠かせない概念となっている. また, 逆に近傍が与えられているとき, そこから距離関数を復元することができるので, 近傍の族と距離関数は 1 対 1 対応しており, このことは距離空間の本質が近傍であることの裏付けになっている.

近傍の定義を述べる:

**定義 1.3 (近傍).**  $a$  の  $\varepsilon$  近傍  $U(a; \varepsilon)$  は次で定義される:

$$U(a; \varepsilon) := \{x \in X; d(x, a) < \varepsilon\}$$

## 2 対称律を仮定しない場合

### 2.1 対称律を仮定しない場合の距離空間

この節では, 対称律  $d(x, y) = d(y, x)$  を仮定しない場合に距離空間がどのようになるのかを考えていく. これを片想い空間と呼ぶことにする.

**定義 2.1 (片想い空間).** 集合  $X$  とその上の二項演算  $d: X \times X \rightarrow \mathbb{R}$  の組  $(X, d)$  であって,  $\forall x, y, z \in X$  に対し,

- (i)  $d(x, y) > 0 \iff x \neq y$ ,
- (ii)  $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$ .

を満たすものを片想い空間と呼ぶ.

ここで, 規則 (i) を非退化性, 規則 (ii) を三角不等式という.

距離空間の場合に知られている以下の性質は, 証明に対称律を必要としないため, 片想い空間においても成立する.

**命題 2.2 (片想い空間の初等的性質).**  $(X, d)$  を片想い空間とする. このとき, 以下が成り立つ:

- (i)  $x \neq y \implies d(x, y) > 0$   
(異なる点の距離は正)
- (ii)  $d(x, x) = 0$  (同じ点の距離は零)
- (iii)  $d(x, y) \geq 0$  (非負性)

**証明.** 距離空間の場合と同じ. ■

### 2.2 対称律を仮定しない場合の近傍

対称律を仮定しない場合には, 近傍を  $\{x \in X; d(x, a) < \varepsilon\}$  で定義するか,  $\{x \in X; d(a, x) < \varepsilon\}$  で定義するかによって意味が変わってくる. こ

れらを、非可換代数などでみられる「左イデアル」「右イデアル」などの表現に倣って左  $\varepsilon$  近傍と右  $\varepsilon$  近傍と名づける。

**定義 2.3 (左近傍・右近傍).** 片想い空間  $X$  において、

左  $\varepsilon$  近傍  $U^L(a; \varepsilon) := \{x \in X; d(x, a) < \varepsilon\}$ .

右  $\varepsilon$  近傍  $U^R(a; \varepsilon) := \{x \in X; d(a, x) < \varepsilon\}$ .

一般に、この2つの近傍は一致しない。

左近傍と右近傍が一致しない(対称律が成り立たない)よい例として、たとえば以下を参照してほしい。

**例 2.1 (一方通行の場合の距離).**  $X = \mathbb{R}^2$  に次で距離を定めると、これは片想い空間になる； $(a, b) \in X^2$  に対して  $d(a, b)$  を「 $a$  から  $b$  まで (i) と (ii) を繰り返して移動するときの最短の道のり」で定める；

(i) 同心円上を反時計回りに進む。

(ii)  $x$  軸を正の方向に進む。

これは確かに非退化性  $x \neq y \iff d(x, y) > 0$  と三角不等式  $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$  を満たしている。

ここで、上の片想い空間において、図1のような場合には、

$d(a, b) =$  (薄い線の部分の長さ)、

$d(b, a) =$  (濃い線の部分の長さ)。

となるが、明らかに双方の長さは異なる。◁

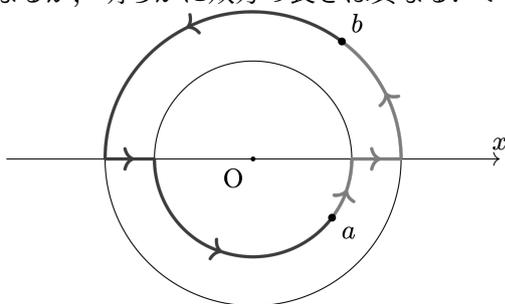


図1 一方通行の場合の距離

上の例を一方通行空間と名づけ、今後も不可思議な現象が起こる片想い空間として取り上げる。

また、片想い空間の特性がよくわかる以下の命題が成り立つ。

**定理 2.4 (片想い空間が距離空間になる条件).**

片想い空間  $(X, d)$  において、左近傍と右近傍が常に一致するならば、 $(X, d)$  は距離空間である。すなわち、

$$\forall a \in X, \forall \varepsilon > 0; U^L(a; \varepsilon) = U^R(a; \varepsilon) \\ \implies \forall x, y \in X; d(x, y) = d(y, x).$$

とくに、距離空間ならば左近傍と右近傍は常に一致するから、上の主張において  $\implies$  を  $\iff$  に置き換えても成り立つ。

**証明.**  $\varepsilon_-, \varepsilon_+ > 0$  を、 $\varepsilon_- < d(a, b) < \varepsilon_+$  を満たすように取ると、

$$a \in U^L(b; \varepsilon_+), \quad a \notin U^L(b; \varepsilon_-), \\ b \in U^R(a; \varepsilon_+), \quad b \notin U^R(a; \varepsilon_-).$$

ここで、 $U^L(x; \varepsilon) = U^R(x; \varepsilon)$  だから、

$$a \in U^R(b; \varepsilon_+), \quad a \notin U^R(b; \varepsilon_-), \\ b \in U^L(a; \varepsilon_+), \quad b \notin U^L(a; \varepsilon_-).$$

よって、 $\varepsilon_- < d(b, a) < \varepsilon_+$ 。ここで  $\varepsilon_-$  と  $\varepsilon_+$  を  $d(a, b)$  にいくらでも近く取ることができるから、結局  $d(a, b) = d(b, a)$  が成立する。■

## 2.3 片想い空間上の収束列

通常距離空間において、収束は  $\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}$  s.t.  $\forall n > N; d(x_n, \alpha) < \varepsilon$  で定義されるが、片想い空間においては  $d(x_n, \alpha)$  と  $d(\alpha, x_n)$  の二通りの収束が考えられる。

**定義 2.5 (左収束・右収束).**

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N} \text{ s.t. } \forall n > N; d(x_n, \alpha) < \varepsilon$$

のとき、 $x_n$  が  $\alpha$  に左収束するという。また、

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N} \text{ s.t. } \forall n > N; d(\alpha, x_n) < \varepsilon$$

のとき、 $x_n$  が  $\alpha$  に右収束するという。それ

ぞれ  $x_n \xrightarrow[L]{n \rightarrow \infty} \alpha$ ,  $x_n \xrightarrow[R]{n \rightarrow \infty} \alpha$  と表記する。

**注意 2.1** 左収束は

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N} \text{ s.t. } \{x_n\}_{n>N} \subset U^L(a; \varepsilon)$$

と近傍を用いて言い換えることができる。また、右収束は

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N} \text{ s.t. } \{x_n\}_{n>N} \subset U^R(a; \varepsilon)$$

と言い換えることができる。

また、各  $n$  ごとに  $d(x_n, \alpha)$  か  $d(\alpha, x_n)$  を選ぶことによって  $\alpha$  との距離を  $\varepsilon$  未満にできる場合を収束と定めることにする；

**定義 2.6 (収束).**

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N} \text{ s.t. } \forall n > N; \\ (d(x_n, \alpha) < \varepsilon) \vee (d(\alpha, x_n) < \varepsilon)$$

のとき、 $\{x_n\}$  が  $\alpha$  に収束するという。これは

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N} \\ \text{s.t. } \{x_n\}_{n>N} \subset U^L(a; \varepsilon) \cup U^R(a; \varepsilon)$$

と言い換えることができる。

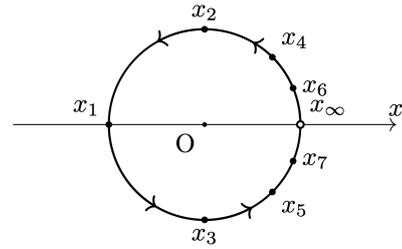
また、このことを  $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \alpha$  と表記する。

**注意 2.2** 左収束列とは常に  $d(x_n, \alpha)$  を選べば収束列であるような  $\{x_n\}$  のことであり、右収束列とは常に  $d(\alpha, x_n)$  を選べば収束列であるような  $\{x_n\}$  のことである。ここで、一般に収束列であっても左収束列または右収束列とは限らないことに注意せよ。(例 2.2)

**例 2.2 (左収束列でも右収束列でもない収束列).**

一方通行空間の上の点列を  $x_n = e^{i\pi(-1)^n 2^{-\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}}$  で定める。このとき、 $\{x_n\}$  は左収束列でも右収束列でもないが、明らかに 1 に収束する。(図 2)

ここで、 $x_\infty := \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$  である。◁



**図 2** 左収束列でも右収束列でもない収束列の例

左収束列・右収束列について、以下の命題が成立する。

**補題 2.7**  $x_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{R} \alpha$  かつ  $x_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{L} \beta$  ならば  $\alpha = \beta$  である。

**証明.** 条件より

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \text{ s.t. } \begin{cases} d(\alpha, x_n) < \frac{\varepsilon}{2}, \\ d(x_n, \beta) < \frac{\varepsilon}{2}. \end{cases}$$

とできるので、

$$d(\alpha, \beta) \stackrel{\text{三角不等式}}{\leq} d(\alpha, x_n) + d(x_n, \beta) < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$$

が任意の  $\varepsilon$  について成立する。よって非退化性より  $\alpha = \beta$ 。■

**定理 2.8 (両側収束列の収束は一意).**  $\{x_n\}$  が左収束列かつ右収束列\*1であるとする。このとき、 $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \alpha$  かつ  $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \beta$  ならば  $\alpha = \beta$  である。

**証明.**  $\{x_n\}$  は左収束列かつ右収束列であるので左収束先と右収束先が取れるが、補題 2.7 よりこの 2 つの収束先は等しいので、これを  $x$  とおくと、

$$x_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{L} x \text{ かつ } x_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{R} x.$$

このとき、 $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \alpha$  を満たす任意の  $\alpha$  について  $\alpha = x$  であることを示せばよい；

収束の定義より、 $\{x'_n\} \sqcup \{x''_n\} = \{x_n\}$  となるような  $\{x_n\}$  の部分列で

$$x'_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{L} \alpha, \quad x''_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{R} \alpha$$

\*1 今後これを両側収束列と呼び、記号では  $x_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{L, R} x$  と表記する。

となるものがある. ところが  $\{x_n\}$  の任意の部分列は  $x$  に両側収束するから,

$$x'_n \xrightarrow[L,R]{n \rightarrow \infty} x \quad \text{かつ} \quad x''_n \xrightarrow[L,R]{n \rightarrow \infty} x$$

である. とくに,  $x'_n \xrightarrow[R]{n \rightarrow \infty} x, x''_n \xrightarrow[L]{n \rightarrow \infty} x$  であり, 再び補題 2.7 より  $\alpha = x$ . ■

ところが, 以下の例が示すように, 一般の場合に収束が一意だとは限らない. ([2] 坪井 (2005) の【例題 3.3.2】(51 ページ) から引用.)

**例 2.3 (収束が一意でない片思い空間).**  $\{(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}] \times (-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]\} \setminus \{0\}$  (正方形から原点を除いた空間) に対して,  $x$  軸に平行な直線の連結成分のなす空間を  $X$  とする.

この空間の点は  $[y = a]$ , ( $a \in (-\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ ) のかたちあるいは  $[y = 0]_+$  か  $[y = 0]_-$  のかたちで表される. とくに, 原点が 2 つある円周と捉えてもよい. この上に, 以下のようにして片思い距離を定義することができる;

$$\begin{aligned} \forall a, b \in \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] \setminus \{0\}; \\ d([y = a], [y = b]) &:= b - a - \lfloor b - a \rfloor, \\ d([y = a], [y = 0]_{\pm}) &:= -a - \lfloor -a \rfloor, \\ d([y = 0]_{\pm}, [y = b]) &:= b - \lfloor b \rfloor, \\ d([y = 0]_+, [y = 0]_-) &:= 1, \\ d([y = 0]_-, [y = 0]_+) &:= 1. \end{aligned}$$

ここに点列を  $x_n = [y = -\frac{1}{n}]$  とすると, これは  $[y = 0]_+$  と  $[y = 0]_-$  の両方に左収束する. ◁

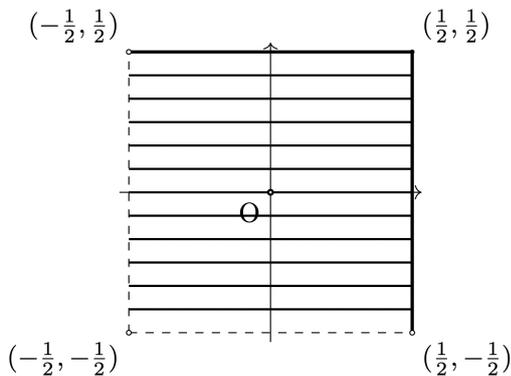


図 3 収束が一意でない片思い空間

**命題 2.9** 以下の 2 つは同値である.

- (i)  $(\forall \{x_n\} \subset X, \forall x \in X; \quad x_n \xrightarrow[L]{n \rightarrow \infty} x \iff x_n \xrightarrow[R]{n \rightarrow \infty} x),$
- (ii)  $(\forall \{x_n\} \subset X, \forall x \in X; \quad x_n \xrightarrow[L,R]{n \rightarrow \infty} x \iff x_n \xrightarrow[L,R]{n \rightarrow \infty} x).$

**証明.** (ii)  $\implies$  (i) は収束性の定義より明らか. したがって (i)  $\implies$  (ii) を示す;

$x$  に収束する任意の点列  $x_n$  について, 収束の定義より,  $\{x'_n\} \sqcup \{x''_n\} = \{x_n\}$  となるような  $\{x_n\}$  の部分列で

$$x'_n \xrightarrow[L]{n \rightarrow \infty} x, \quad x''_n \xrightarrow[R]{n \rightarrow \infty} x$$

となるものがある. ところが仮定より, 左収束と右収束は同値であるから,

$$x'_n \xrightarrow[L,R]{n \rightarrow \infty} x \quad \text{かつ} \quad x''_n \xrightarrow[L,R]{n \rightarrow \infty} x.$$

ここで  $\{x'_n\} \sqcup \{x''_n\} = \{x_n\}$  であったから,  $x_n \xrightarrow[L,R]{n \rightarrow \infty} x$ . ■

**定理 2.10**

$d$  が連続関数  $\iff$  すべての収束列が両側収束列.

**証明.** ( $\implies$ ):  $d$  が連続であるとは, 任意の収束列  $\{x_n\}, \{y_n\}$  に対して

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d(x_n, y_n) = d(x, y)$$

となることである. ただし,  $x, y$  は  $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x, y_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} y$  となる点である.

このとき, とくに任意の右収束列  $x_n \xrightarrow[R]{n \rightarrow \infty} \alpha$  に対して  $y_n = \alpha$  と取ると

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d(x_n, \alpha) = d(\alpha, \alpha) = 0$$

が成り立つ. ところが, これは  $\{x_n\}$  が  $\alpha$  に左収束することを意味する. ゆえに, 任意の右収束列は左収束列である. 同様に, 任意の左収束列も右収束列である. これと命題 2.9 より, 題意が示された.

( $\Leftarrow$ ): すべての収束列が両側収束列であるとき、とくに  $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x, y_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} y$  は両側収束している。ここで、示すべきは  $\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}$  s.t.  $\forall n > N; |d(x_n, y_n) - d(x, y)| < \varepsilon$  であるが、これは以下のようにして証明できる; 両側収束性より、 $N_1$  を  $n > N_1$  ならば  $d(x_n, x) < \frac{\varepsilon}{2}$  かつ  $d(x, x_n) < \frac{\varepsilon}{2}$  となるように取れ、 $N_2$  を  $n > N_2$  ならば  $d(y_n, y) < \frac{\varepsilon}{2}$  かつ  $d(y, y_n) < \frac{\varepsilon}{2}$  となるように取れる。ここで  $N = \max(N_1, N_2)$  と取ると、これが所期のものである。なぜならば、任意の  $n > N$  に対して

$$\begin{aligned} & |d(x_n, y_n) - d(x, y)| \\ &= |d(x_n, y_n) - d(x_n, y) + d(x_n, y) - d(x, y)| \\ &\leq |d(x_n, y_n) - d(x_n, y)| + |d(x_n, y) - d(x, y)| \\ &\leq \max(d(y_n, y), d(y, y_n)) \\ &\quad + \max(d(x_n, x), d(x, x_n)) \\ &< \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon \end{aligned}$$

が成立するからである。よって題意は示された。 ■

以上、第2節の内容をまとめると、下の図のようになる:

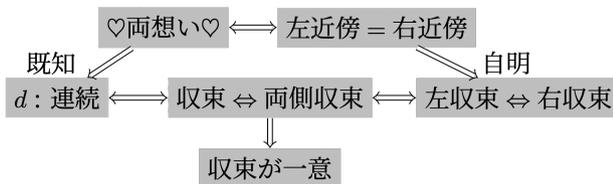


図4 命題の繋がり

### 3 まとめ/今後の課題

第2節において、片想い空間特有の性質について、多くの例を交えながら紹介した。対称律を抜

くだけで収束の一意性などが担保されなくなることは、非常に興味深い。しかし、片想い距離関数  $d$  が連続であるという条件を課せば、距離空間において成り立つ性質の多くが成立する。片想い空間において連続性がいかに重要であるかがわかる。また、「左収束と右収束が同値であること」という対称律に強く関係した条件と、「片想い距離関数の連続性」が命題2.9と定理2.10によって同値な条件だと示され、対称性と連続性の深い結びつきが明らかになった。

今後の課題として、現段階では片想い空間の基礎的な性質についての研究のみで、応用的な研究はしておらず、他分野の利用などもしづらい形にあることが挙げられる。本研究を実用可能なレベルまで上げられるよう、様々な応用や発展した研究をしていきたい。

### 参考文献

[1] Lyn Arthur Steen and J. Arthur Seebach, Jr. *Counterexamples in Topology*. Springer, 1995.

[2] 坪井俊. 『大学数学の入門④ 幾何学 I 多様体入門』. 東京大学出版会, 2005..

[3] 川崎徹郎. “位相空間”. 学習院大学 数学科. 2016.06.29. <https://pc1.math.gakushuin.ac.jp/~kawasaki/16isoukuukan.pdf>, (参照 2025.08.22).

[4] 福井敏純. “集合と位相空間入門”. 埼玉大学. 2024.05.24. [https://www.rimath.saitama-u.ac.jp/lab.jp/Fukui/lectures/Set\\_Toposp.pdf](https://www.rimath.saitama-u.ac.jp/lab.jp/Fukui/lectures/Set_Toposp.pdf), (参照 2025.08.22).

# アオジソの香気成分であるペリルアルデヒドの殺菌効果の検証

天野桜果 布目春菜 平岡悠 福井絢音

## 要旨

本研究では、浴室内の微生物に対する安全かつ環境に優しい消毒液の可能性を追求することを目的としている。アオジソの精油の主成分であるペリルアルデヒドに着目し、浴室内に一般的に存在する微生物であるロドトルラ、及び人間の皮膚の常在菌である黄色ブドウ球菌を供試菌に用いた。ペリルアルデヒドを界面活性剤の Tween80 を用いて溶液化し、菌液と混合して減少した菌数から殺菌効果を検証した。また、ペリルアルデヒドを揮発させ、飽和した状態で菌と接触させ、殺菌効果を検証した。結果、試薬のペリルアルデヒド溶液と菌液を混合させた実験では、濃度 0.25%、反応時間 30 分の条件下で対数減少値  $\log_{10}2$  以上の減少が見られ、殺菌効果が確認された。また、殺菌効果の現れ方が短時間で現れる殺菌システムと、効果が出るまでに時間がかかる殺菌システムがあることが示唆された。さらに、揮発させたペリルアルデヒドを用いた実験では、ガラス、ポリエステル、綿表面で殺菌効果があることが示された。またアオジソから抽出した精油から生成した消毒液においても、消毒液の殺菌効果評価実験において精油濃度 10%では殺菌効果があることが示された。

## 1. はじめに

アオジソに含まれる成分のペリルアルデヒドは活性酸素種の蓄積、細胞膜透過性の変化、酸化損傷による各構造のダメージ等により細胞死に導くことが報告されている<sup>1)2)</sup>。しかし、液相及び気相での濃度や時間条件による殺菌効果は十分に検討されておらず、それを明らかにすることで実用性や適切な使用法が判断できる。本研究で得られる知見は、ペリルアルデヒドは殺菌効果を持つかがわかることである。浴室内の微生物に対して殺菌効果があるが、人体には安全である消毒液の開発に貢献することを目的とする。

## 2. 研究方法

### 2-1. 消毒液の殺菌効果評価実験

消毒液の殺菌効果評価実験(以下、液液実験とする)の条件は、消毒液の濃度条件をペリルアルデヒド 0.1%、0.25%、0.5%、0.75%、1.0%、5.0%とし、コントロールとして PBS 緩衝液のコントロール、ペリルアルデヒド 0.0%の Tween80 のコ

ントロールを設定した。また、反応時間条件を 3 分、10 分、30 分とし、合計 24 条件に定めた。

事前準備として、培地及び消毒液を準備した。寒天及び液体培地は、黄色ブドウ球菌の実験ではトリプトソーヤ培地、ロドトルラの実験ではサブロー培地を作り、オートクレーブし、滅菌した。

消毒液の作成方法として、まずはリン酸緩衝生理食塩水(PBS)に界面活性剤の Tween80 を溶かし込み、0.05%の溶液を作った。その後、Tween 80 の溶液にペリルアルデヒドの試薬を質量パーセント濃度で、それぞれ 0.1%、0.25%、0.5%、0.75%、1.0%、5.0%になるように調整した。

1.  $2.0 \times 10^7$  CFU/mL (CFU: Colony Forming Unit)の調整菌液を作成。黄色ブドウ球菌では菌液のストックが  $2.0 \times 10^{10}$  CFU/mL であるため、15 mL チューブにストック菌液を 10  $\mu$ L、PBS を 10 mL 入れた。ロドトルラでは菌液のストックが  $3.0 \times 10^9$  CFU/mL であるため、1.5 mL チ

チューブにストック菌液を 10  $\mu\text{L}$ , PBS を 1.5 mL 入れた。

2. 事前準備で作成した菌液 5  $\mu\text{L}$  と消毒液それぞれとコントロール 45  $\mu\text{L}$  を 1.5 mL チューブに入れ、条件で設定した分数をボルテックスで振動させて、設定した時間になったら回収液(液体培地)を 950  $\mu\text{L}$  入れて中和させた。本条件における PBS コントロールの菌数理論値は  $1.0 \times 10^5$  CFU/mL とした。
3. 遠心分離機を 10 分間 2000 rpm で遠心分離し、チューブ内の培地を吸い取る。また新たに液体培地を 1.0 mL 加えた。
4. 十分に攪拌し、階段希釈をして寒天培地に塗り広げ、黄色ブドウ球菌では 1 日後、ロドトルラでは 2 日後に寒天上に生えたコロニーの数を計測した。

## 2-2. 燻蒸の殺菌効果評価実験

燻蒸の殺菌効果評価実験(以下、燻蒸実験とする)の条件は反応時間条件を 5 分, 15 分, 30 分, 60 分, 120 分, 240 分とした。また、気化したペリルアルデヒドの殺菌効果が菌の付着する物質によって異なることが考えられるため、環境表面条件をガラス, ポリエステル, 綿とした。また環境由来で菌が死なないコントロールと、ペリルアルデヒドに触れずに空气中に曝露するコントロールを条件ごとに用意し、合計 37 条件に定めた。

事前準備として、培地を準備した。寒天及び液体培地は、黄色ブドウ球菌の実験ではトリプトソア培地, ロドトルラの実験ではサブロー培地を作り、オートクレーブし、滅菌した。また、環境表面条件で定めた素材について、1 cm $\times$ 1 cm に加工した。

1.  $1.0 \times 10^7$  CFU/mL の調整菌液を作成。黄色ブドウ球菌では菌液のストックが  $2.0 \times 10^{10}$  CFU/mL であるため、15 mL チューブにストック菌液を 5  $\mu\text{L}$ , PBS を 10 mL 入れ、1.5 mL チューブに移す。ロ

ドトルラでは菌液のストックが  $3.0 \times 10^9$  CFU/mL であるため、1.5 mL チューブにストック菌液を 4  $\mu\text{L}$ , PBS を 1.2 mL 入れた。

2. 0.5 L のプラスチックコンテナを用意し、図 1 のように設置し、シャーレの中にペリルアルデヒドを 100  $\mu\text{L}$  入れて、ファンの電池をつなぎ、コンテナの蓋を閉め気化させた。

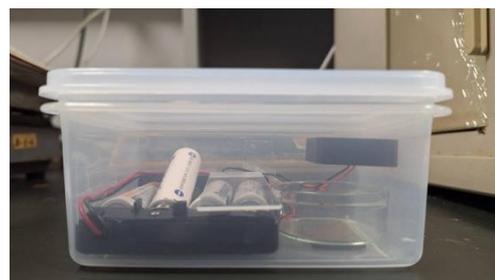


図 1. 燻蒸実験用コンテナ

3. 十分に時間がたったら電池の上にスライドガラスを置き、その上にそれぞれの環境表面を設置した。また、空气中に曝露させるコントロールは、12 ウェルプレート内に 1 条件ずつ、コントロールとする環境表面を設置した。
4. 空气中に曝露させるコントロールとコンテナ内の環境表面上に、それぞれ 10  $\mu\text{L}$  ずつ調整菌液を気泡が入らないように置き、コンテナは反応時間内中は蓋をして飽和状態を保った。
5. それぞれの条件で設定した時間に液体培地を 1 mL 加えて反応をとめた。ペリルアルデヒドの反応条件の環境表面は反応時間が経過したら 12 ウェルプレートに環境表面のみ取り出して液体培地を加えた。
5. 条件ごとにピペッティングをし、十分に攪拌し、階段希釈をして寒天培地に塗り広げ、黄色ブドウ球菌では 1 日後、ロドトルラでは 2 日後に寒天培地上に生えたコロニーの数を計測した。

### 2-3. 精油の液液実験

1. 栽培したアオジンを日陰で乾燥させ、乾燥シソ 500 g を水蒸気蒸留法を用いて、400 mL の蒸留精製物を取り出した。
2. 蒸留精製物の油層をヘキサンに溶かし込んだ。
3. エバポレーターの加熱バスの水温を 40 °C に設定し、精油のみを抽出した。
4. 先行研究よりアオジン精油にはペリラルデヒドが 50% 以上含有していることが報告されていることから、<sup>3)</sup>消毒液の濃度条件を PBS 緩衝液のコントロール、ペリラルデヒド 0.0% の Tween80 のコントロール、アオジン精油 0.2%, 1.0%, 2.0%, 5.0% とし、また、反応時間条件を 10 分、30 分とし、合計 8 条件に定めた。
5. 試薬のペリラルデヒドを用いたロドトルラの液液実験と同様の方法で実験した。

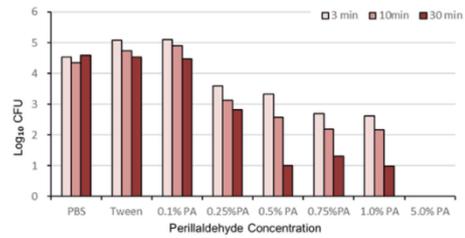


図 3-1. ロドトルラの生存菌数

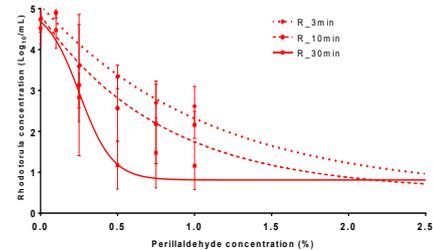


図 3-2. ロドトルラの生存菌数

(凡例の R はロドトルラを表す)

図 2, 図 3 から、黄色ブドウ球菌, ロドトルラのどちらについても、0.25% ペリラルデヒド条件から殺菌活性が示されたが、対数減少値で log<sub>10</sub> 2 以上減少したのは 30 分条件からであることが確認された。

0.1% は Tween80 と生菌数が変わらないと示唆される。殺菌活性が示された 0.25% 以上のすべての条件で 3 分から 10 分において、10 分から 30 分において生菌数が少なかった。

## 3. 結果

### 3-1. 液液実験の結果

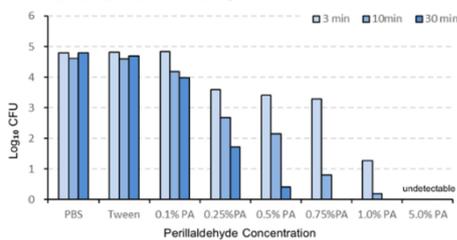


図 2-1. 黄色ブドウ球菌の生存菌数

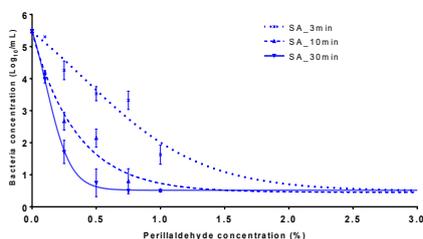


図 2-2. 黄色ブドウ球菌の生存菌数

(凡例の SA は黄色ブドウ球菌を表す)

### 3-2. 燻蒸実験の結果

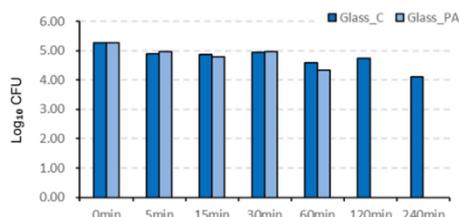


図 4-1. 黄色ブドウ球菌のガラス表面の菌数の推移

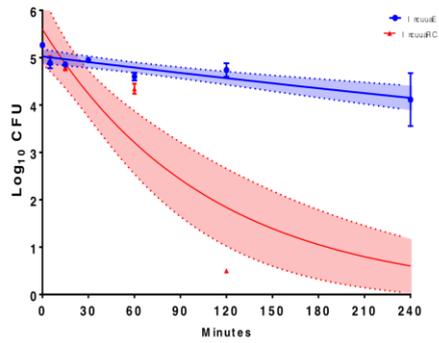


図 4-2. 黄色ブドウ球菌のガラス表面の菌数の推移

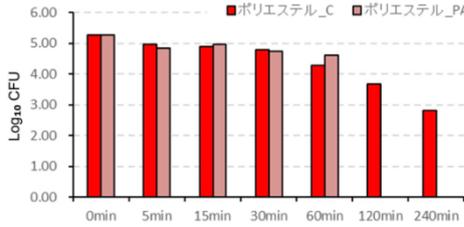


図 5-1. 黄色ブドウ球菌のポリエステル表面の菌数の推移

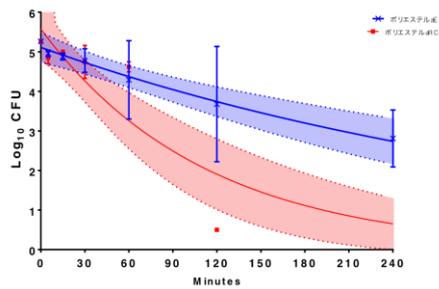


図 5-2. 黄色ブドウ球菌のポリエステル表面の菌数の推移

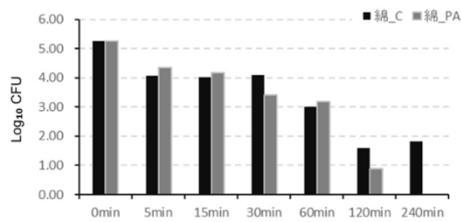


図 6-1. 黄色ブドウ球菌の綿表面の菌数の推移

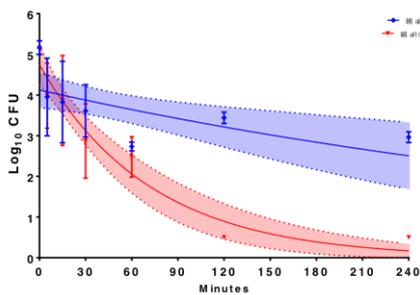


図 6-2. 黄色ブドウ球菌の綿表面の菌数の推移

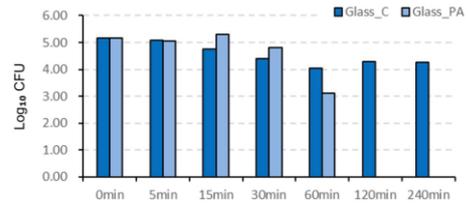


図 7-1. ロドトルラのガラス表面の菌数の推移

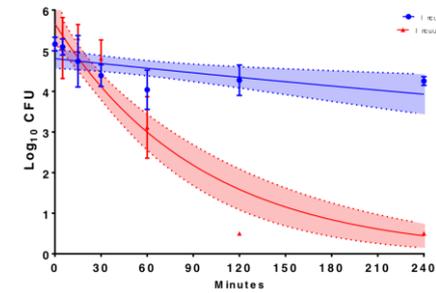


図 7-2. ロドトルラのガラス表面の菌数の推移

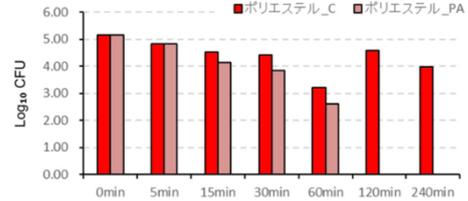


図 8-1. ロドトルラのポリエステル表面の菌数の推移

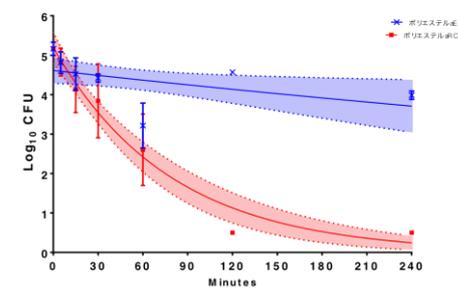


図 8-2. ロドトルラのポリエステル表面の菌数の推移

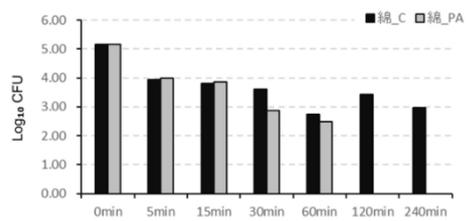


図 9-1. ロドトルラの綿表面の菌数の推移

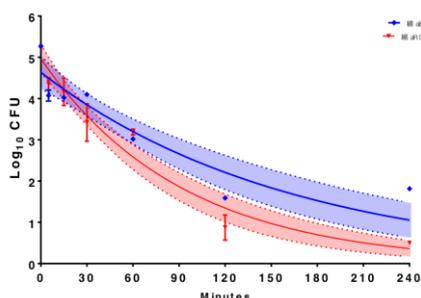


図9-2. ロドトルラの綿表面の菌数の推移

図4, 図5, 図7, 図8からガラス表面, 綿表面ではコントロール条件において, 黄色ブドウ球菌とロドトルラの菌数がほとんど変化しなかったのに対し, ペリルアルデヒド条件では, 黄色ブドウ球菌は60分から120分にかけて急激に減少し, ロドトルラは徐々に減少したことが確認された。また, 黄色ブドウ球菌, ロドトルラの両方について, 120分以上では殺菌効果によりほとんど死滅した。黄色ブドウ球菌は急激に減少したため, 図4-2, 図5-2での対数関数への近似において, 近似した関数からの差が大きくなった。一方, 図7-2, 7-8からロドトルラは近似した対数関数からの差が小さいことが認められた。

図6, 図9から綿表面では, コントロール条件でも時間とともに, 黄色ブドウ球菌では大きく, ロドトルラでは少しずつ生菌数が減少するが, ペリルアルデヒド条件ではどちらの菌も, より生菌数の減少が速いと示された。また近似した対数関数との差は小さかった。

### 3-3. 精油の液液実験の結果

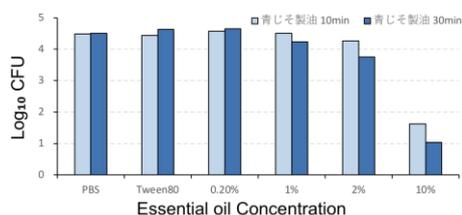


図10. 精油の実験のロドトルラの生存菌数

図10より, 精油濃度2%まではコントロールと比較して対数減少値 $\log_{10}2$ 以上の減少は見られず, 殺菌効果は無いと言える。精油濃度1%から10%について, 反応時間が長いほど殺菌効果が

効果的に現れることが確認された。

## 4. 考察

### 4-1. 液液実験の考察

どちらの菌も30分条件において $\log_{10}2$ 以上の減少が見られたため, ペリルアルデヒドは0.25%以上で殺菌効果を持つといえる。また0.1%はTween80との生菌数の差がなかったことから, 殺菌活性がないことが示された。

Tween80はPBSと同じ結果であったことから, 0.05%のTween80の細胞毒性は無視できると確認された。黄色ブドウ球菌と比べてロドトルラは菌数減少曲線の傾きが緩やかであった。

殺菌物質には濃度依存性を持つものや, 時間依存性を持つものがあるが, <sup>4)</sup>ペリルアルデヒドは濃度依存性も時間依存性も持つと明らかになった。

また, 黄色ブドウ球菌では30分と10分の菌数減少曲線がエタノールなどと同様にシグモイド型で似た傾向であったのに対し, <sup>5)</sup>ロドトルラでは30分のみシグモイド型であった。これは黄色ブドウ球菌の細胞壁が20~40nmのペプチドグリカンであるのに対し, <sup>6)</sup>ロドトルラを含む酵母様真菌は $\beta$ グリカンやキチンなどを含む100~1000nmの細胞壁を持つため, <sup>7)8)</sup>ロドトルラのほうがペリルアルデヒドへの応答が遅かったという可能性がある。

同じ濃度であっても反応時間によって菌数減少曲線の傾向が異なること, ペリルアルデヒドの抗菌効果のシステムは複数あることから<sup>1)2)</sup>, それらのシステムは時間差で微生物に効果を及ぼす可能性が考えられる。

ペリルアルデヒドの液液実験での殺菌効果について, 先行研究では可視的な菌の増殖による濁りが見られないという指標であるMICの測定や, <sup>9)10)</sup>ペリルアルデヒドを含む液体培地で培養した菌の表面付着量の評価などが報告されている。<sup>11)</sup>

しかし, それらはいずれもペリルアルデヒド濃度及び反応時間ごとの生菌数を直接評価したものではない。従って, 生菌数を直接評価した本

実験で得られたデータが、ペリラルデヒドの殺菌効果を評価する上で新規性の高い知見を提供するものだと考えられる。

#### 4-2. 燻蒸実験の考察

ペリラルデヒド条件では、黄色ブドウ球菌、ロドトルラともに、ガラス、ポリエステル、綿どの条件についても、菌の生存時間が短くなっていることから、ペリラルデヒドは気化した状態でも菌に対して殺菌効果を持つことが明らかになった。

ガラス、ポリエステル、綿のコントロールにおいて生存時間が異なるのは、乾燥のしやすさによるものだと考えられる。<sup>12)</sup>そのため、コントロールとペリラルデヒドを揮発させた条件での乾燥のスピードをそろえることが正確な効果を見るために必要だと考えられる。

また、菌数は乾燥によって減少する場合も、消毒液によって減少する場合も対数関数をとるにもかかわらず、<sup>13)</sup>図 4、図 5 から読み取れる通り、黄色ブドウ球菌のペリラルデヒド条件のポリエステルとガラスで、30 分まで対数のグラフからずれて、横ばいであったのは液滴の乾燥が遅れたからだと考えられる。このことは黄色ブドウ球菌は低濃度の消毒液にさらされると多くの多糖類を分泌し、液滴に膜をつくることで、液滴の蒸発が抑制されたからである可能性がある。<sup>14)15)</sup>これは同じ条件下で行われた綿では、コントロールとペリラルデヒド条件ともに、すぐに液滴が染み込むため、乾燥が正常に進み対数関数からのばらつきが小さいことから認められる。

この実験において、短時間条件では乾燥に大きな差は出ないように調整されていたが、長時間条件ではコントロールの方が乾燥が早かった。このことから、ペリラルデヒドの効果を過小評価している可能性がある。

図 5、図 8 から読み取れる通り、ポリエステルのコントロールでデータにばらつきがあるのは、菌液の液滴をのせた後、短時間で液滴が崩れる

ものと長時間液滴が崩れないものがあつたからだと考えられる。

またコントロール条件において、黄色ブドウ球菌は乾燥しやすい綿やポリエステルでガラスと比べて生存時間が大幅に短いのに対して、ロドトルラでは乾燥による影響が小さかった。このことから、ロドトルラのほうが黄色ブドウ球菌より乾燥による耐性があることが示された。

#### 4-3. 精油の実験の考察

精油 10%において、図 10 を図 3-1 と比べて、ペリラルデヒド濃度 1.0%程度の殺菌効果であったことから、精油には約 10%しかペリラルデヒドが含まれていなかったと考えられる。原因として、精油をエバポレーションしたときにヘキサンを精油から飛ばしきれていなかったことや、ペリラルデヒドがヘキサンと同時に揮発したという可能性もある。また、ペリラルデヒドは揮発性の物質であるにもかかわらず、収穫したアオジソの葉を夏の高温条件下に長時間放置してしまったため、ペリラルデヒドが揮発した可能性がある。

### 5. まとめと今後の課題

アオジソの精油の主成分であるペリラルデヒドの液相と気相での濃度や時間条件による殺菌効果を調べ、以下の知見が得られた。

液相実験ではペリラルデヒドは 0.25%以上で殺菌活性を示し、かつ 30 分の反応で  $\log_{10}2$  以上の菌数減少が確認された。殺菌効果は濃度および時間に依存して強くなることを示した。

燻蒸実験ではペリラルデヒドの気体が黄色ブドウ球菌およびロドトルラの生存時間を短縮し、殺菌効果を有することが明らかとなった。

以上の結果から、ペリラルデヒドは液相と気相いずれにおいても黄色ブドウ球菌とロドトルラに殺菌効果を示すことが明らかとなった。また、ロドトルラの方が黄色ブドウ球菌より耐性があることが確認された。

ペリラルデヒドをスプレーとして人体に触れて

も安全に使える濃度が 2.1%であることが報告されており、<sup>16)</sup>0.25%以上で殺菌活性を示したことからペリルアルデヒドは浴槽の殺菌スプレーとして活用できる可能性がある。

また、精油にもペリルアルデヒドが含まれているため、殺菌スプレーに使用することができる可能性がある。

一方、ペリルアルデヒドを溶液として用いる場合は乳化が必要となるが、乳化した状態は長時間維持できないため、殺菌スプレーとして用いる時の濃度安定性を確保する工夫が必要である。また、ペリルアルデヒドはプラスチックに吸着されることが明らかになっているため、<sup>17)</sup>使用時に調合した濃度よりも薄くなってしまふことが考えられるため、保存容器にも濃度安定性を確保するためにガラスなどの他の物質を用いるといった工夫が必要である。

## 6. 謝辞

本研究の遂行にあたり、京都府立医科大学大学院 医学研究科 感染症態学 准教授 廣瀬亮平先生に多大なご助言、ご協力を頂きました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

## 7. 参考文献

1) Chao Pan, Kunlong Yang, Famous Erhunmwunsee, Bo Wang, Dongjing Yang, Guoquan Lu, Man Liu, Yongxin Li, Jun Tian. 2023. Antifungal Activity of Perillaldehyde on *Fusarium solani* and Its Control Effect on Postharvest Decay of Sweet Potatoes. *J Fungi*. 9(2):257.  
2) Wenxiu Zhu, Yue Zou, Longze Liu, Shugang Li, Xinran Sun, Mingxin Li, Haisong Wang, Xiaodong Xia. 2024. Antibacterial and antibiofilm efficacies of perillaldehyde against *Vibrio parahaemolyticus* and its application in seafood. *Food Control* Volume 166.

3) Lina Bumblauskiene, Veldas Jakartas, Valdimaras Janulis, Ramute Maedeieriene, Ona Ragaeinskiene. 2009. Preliminary analysis on essential oil composition of *Perilla L.* cultivated in Lithuania. *Acta Poloniae Pharmaceutica – Drug Research*, Vol. 66 No. 4.  
4) Joseph L. Kuti. 2016. *Optimizing Antimicrobial Pharmacodynamics: a Guide for Your Stewardship Program*. *Temacentral: Farmacología clínica* Vol. 27. Núm. 5.  
5) Naoto Watanabe, Ryohei Hirose, Katsuma Yamauchi, Hajime Miyazaki, Risa Bandou, Takuma Yoshida, Toshifumi Doi. 2023. Evaluation of Environmental Stability and Disinfectant Effectiveness for Human Coronavirus OC43 on Human Skin Surface. *ASM Journals Microbiology Spectrum* Vol. 11, No. 2.  
6) Philip Nikolic, Poonam Mudgil. 2023. The Cell Wall, Cell Membrane and Virulence Factors of *Staphylococcus aureus* and Their Role in Antibiotic Resistance. *Microorganisms*; 11(2):259.  
7) Sahar Hasim, Jeffrey J Coleman. 2019. Targeting the fungal cell wall: current therapies and implications for development of alternative antifungal agents. *Future Med Chem*; 11(8):869–883.  
8) Miguel Antunes, Marta N. Mota, Pedro A. R. Fernandes, Elisabete Coelho. 2024. Cell wall alterations occurring in an evolved multi-stress tolerant strain of the oleaginous yeast *Rhodotorula toruloides*. *Scientific Reports* volume 14.  
9) Nikol Kadeřábková, Ayesha J S Mahmood, Despoina A I Mavridou. 2024. Antibiotic susceptibility testing using mini

- mum inhibitory concentration (MIC) assays. *NPJ Antimicrob Resist* Nov 7;2:37
- 10) Zi-Yong Chu, Yu Long Li, Lin Wang, Shu-Yun Wei, Sheng-Qiang Yang, Hong Zeng. 2024. Perillaldehyde: A promising antibacterial agent for the treatment of pneumonia caused by *Acinetobacter baumannii* infection. *International Immunopharmacology* Volume 126.
- 11) Author links open overlay panel Wenxiu Zhu, Yuanhang Cheng, Yankun Zhang, Mingxin Li, Yue Teng, Yunqi Gu, Haifeng Wang, Xiaodong Xia. 2025. Antibiofilm efficacies and mechanism of perillaldehyde against *Shewanella putrefaciens*. *Food Microbiology* Volume 128
- 12) Han Cheng, Jie Chen, Hao Yu, Bin Sun, Jialiang Zhou, Guoyi Wu. 2025. Environmental factors and antimicrobial efficacy: the impact of temperature and humidity on material surfaces, *Microbiol Spectr* ;13(11)
- 13) Harriette Chick. 1908. An Investigation of the Laws of Disinfection, *J Hyg (Lond)*;8(1):92–158.
- 14) Tingting Zeng, Ying Wang, Qing Zhu, Huimin Xi, Mei-Fang Liu, Peng Liu, YunXue Bai, Lei Yuan, Rui Zhao, Yi-Yun Sheng, Qianbin Dai. 2025. Sub-inhibitory concentrations of fosfomycin enhance *Staphylococcus aureus* biofilm formation by a sarA-dependent mechanism. *Microbiol Spectr*, ;13(9).
- 15) Tadashi KAJIYA, Masao Doi. 2010. Dynamics of Drying Process of Polymer Solution Droplets: Analysis of Polymer Transport and Control of Film Profiles. *Nihon Reoroji Gakkaishi* Vol. 39, Nos. 1-2 (combined issue), 17~28.
- 16) SCENT. VN. 2024. Perillaldehyde (CAS 2111-75-3): Odor profile, properties, and IFRA compliance. SCENT. VN. <https://scent.vn/en/pages/compound/perillaldehyde-34>.
- 17) Alain Reynier, Patrice Dole, Florence Fricoteaux, Philippe Saillard, Alexandre E Feigenbaum. 2004. Stabilization of aroma compounds through sorption-release by packaging polymers. *J Agric Food Chem* 8;52(18)

# デュビアの走光性及び情報共有能力に関する研究

～デュビアは負の走光性や集合フェロモンによる情報共有能力を保持しているのか～

磯田皓一 深見珠貴

## 要旨

本研究ではゴキブリで確認されている負の走光性および情報共有能力がデュビアにも備わっているかを検証した。実験1では光刺激に対する行動を観察し、実験2では成体を使いフェロモンによる集合行動を想定した装置を用いて情報共有能力の有無を調べた。その結果デュビアは光を避ける行動を示し負の走光性を有する可能性が示唆された。一方で情報共有能力については確定できるまでの根拠を得ることはできなかった。

## 1. はじめに

生物は外界からの刺激に対して何らかの反応を示す。その中の一つに、光という刺激に対して、移動における方向性が決まるといった光走性が知られている。一般に、家庭内でよく見られるクロゴキブリは光に対して負の走性を示すことが広く報告されている。自身に光が当たると、それを避けるような行動を示す<sup>1)</sup>。また、クロゴキブリ (*Periplaneta fuliginosa*) など一部の種類では集合フェロモンを介して仲間と情報を共有し集まることが知られている<sup>2)</sup>。この行動が他種のゴキブリにも共通して見られるのかについて興味を抱いた。しかし、この性質がすべてのゴキブリ種に共通するのかについては十分に明らかではない。

そこで本研究では、飼育が容易で、ペットやペットの生き餌として利用されているデュビア (*Blattella dubia*) を対象にして、光走性および個体間コミュニケーションの有無について検証を行った。デュビアとは、アルゼンチンモリゴキブリの通称でゴキブリ目ブラベルス科の昆虫である。中南米の熱帯・亜熱帯の森林地帯に生息し、樹皮の下や落ち葉の下に潜み植物質や有機物を餌とする。メスは羽をもたないため、脱走しにくいことから本実験において最適な生物であると考えた(図1)。

光走性については、遮光した箱の側面から光源を当て、照射直後の個体の様子を観察した。また、フェロモンによる情報伝達については、デュビアの糞を用いた。フェロモンをデュビアが受容することで、どのように行動するのかについて検証を行った。



図1. デュビアの外観

(左から成体のオス、成体のメス、幼体)

## 2. 研究方法

### 2-1. 研究対象

本研究では研究対象としてデュビアを使用した。図2,3より、成体との混在による共食いを避けるため、幼体は別の虫籠に分け、成体とは隔離して飼育した。餌は fuu 社の「うまうまセレクション うさぎのごはん」をフードプロセッサーで粉末状にしたものを与えた。



図 2. 成体の飼育ケース



図 3. 幼体の飼育ケース

## 2-2. 実験 1: 負の走光性の確認

クロゴキブリと同様、デュビアに負の走光性があるかを検証すべく、光を照射した後のデュビアの様子を観察した。実験にはメスのデュビア5匹を用い、内部が A・B・C・D の4区画に仕切られた箱(図4)の D に入れた。箱の D 側(右側)から水槽用ライトを照射し、照射後5分、10分、15分の時点で各個体がどの区画(A~D)に位置しているかを記録した。この実験は個体を入れ替えながら合計4回行った。観察では光に対する移動方向や場所などの傾向に注目した。

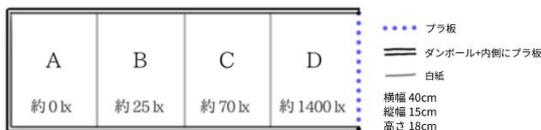


図 4. 上から見た箱の図

光量の値は光量計で計測。右側から光を当てた。

## 2-3. 実験 2: 情報共有能力の確認

デュビアが糞に含まれるフェロモンを用いて情報を共有しどのように行動するのか調べるため、装置を用いた実験を行った。ワモンゴキブリやチャバネゴキブリでは、特に幼体で糞に含まれる集合フェロモンが強く作用することが知られている。<sup>3)</sup>そのため、デュビアにも同様の性質が存在する場合、幼体の方が集合フェロモンによる集合的行動が現れやすいと考え、幼体を用いて実験を行った。

そこで、2つの箱(図5)を入れた虫籠(図6)の中に幼体のデュビア 30 匹を入れ、1時間放置した後、左右どちらの箱に何匹集まっているかを記録した。片方の箱には糞を入れたシャーレ(図7)を、もう片方の箱には空のシャーレを入れ、両者を比較した。



図 5. 横から見た箱の写真

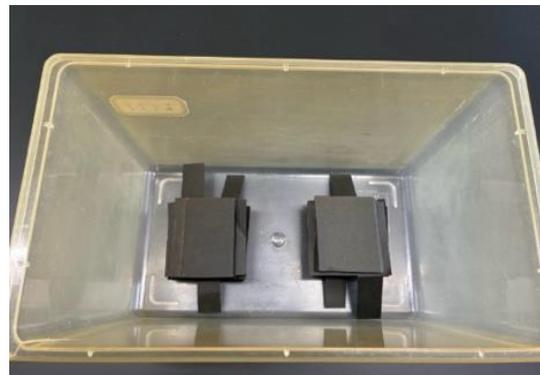


図 6. 箱を入れた虫籠

中心部分にデュビアを置いて放った



図7. 糞(成体)を入れたシャーレ

### 3.結果

#### 3-1.実験2の結果

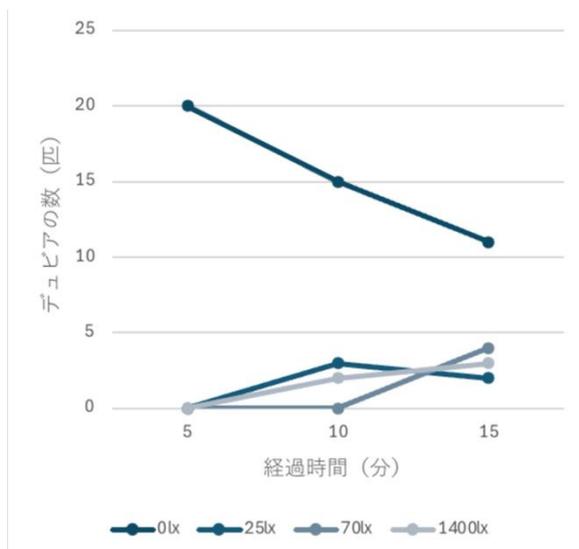


図8. 負の走光性に関するデュビアの移動傾向

図8より、照射後5分では、全ての個体が区画A、つまり光源とは反対側の区画に位置していたことがわかった。また、10分以上経過すると、0%の個体が光の当たっている方向に移動し、区画C・Dに位置していた。15分後には、50%の個体がどちらかという暗い方の場所にいた。また、箱に入れた直後には、隙間や暗所に集まる行動も確認された。

#### 3-2. 実験2の結果

集まった個体数

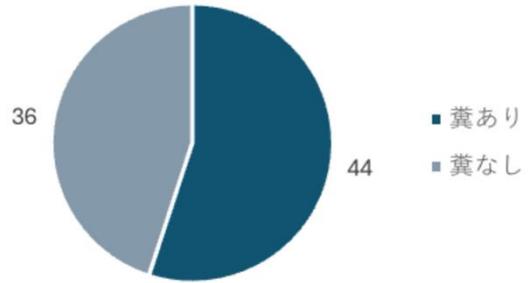


図9. 糞の有無による幼体デュビアの選択行動

図9より3回の実験での合計では糞がある方の箱に入ったデュビアの個体数は多かったが、しかし、明確な差は見られなかった。また糞ありの箱に個体が集まる様子(糞ありに13匹、糞なしに7匹)が一度だけ観察されたが、複数回見られたわけではなく糞と個体の集まり方に何らかの関係を見出すことはできなかった。

### 4. 考察

実験1において、デュビアが光から離れる方向へ移動し暗所や隙間にとどまる行動を示したことからデュビアは負の走光性を持つ可能性が高いと考えられる。この結果は、クロゴキブリなど他種のゴキブリで知られている行動特性と一致しておりデュビアも夜行性の昆虫として共通する特徴を持つことを示している。暗所を好む性質は捕食者から身を守ることや、直射日光による体温上昇を防ぐなどの生態学的な理由によるものと考えられる。

一方で、光を当てた直後にすぐ移動する個体もいれば一定時間その場にとどまる個体、あるいは途中で移動方向を変える個体も観察された。このことから、デュビアは負の走光性を持っていると

いっても個体差や刺激に対する慣れ、あるいは周囲の環境条件によって行動が変化する可能性がある。特に、今回実験に使用した箱は段ボールとテープで作成したものである、隙間や各区画の大きさのばらつきなど、光以外の要因が行動に与える影響がなかったとは断言できない。

実験 2 では、デュビアが、糞に含まれるフェロモンを介して情報共有を行い、特定の箱に集合するかを検証した。結果、いくつかの実験では、糞のある方の箱に個体が集中する傾向が見られたが、その傾向はすべての実験で再現されたというわけではなかった。この結果は、デュビアの集合フェロモンによる情報共有能力が存在しない可能性、もしくは本研究の実験方法では十分に検証できなかった可能性を示している。

ゴキブリの集合行動は単純なフェロモンの有無だけでなく、温度、湿度、床材の材質、振動、空気の流れといった複数の要因の影響を受けることが先行研究で指摘されている<sup>4)5)6)</sup>。本研究においても、実験環境のわずかな違いが、個体の移動やそれ以外の行動に影響を与えた可能性が高い。また、実験に使用した個体数や実験回数の少なさが、結果に影響した可能性がある。

先行研究では、集合フェロモンの量や個体数が集合行動に影響するとされており<sup>3)</sup>この研究でもこれらの条件を厳密に統一する必要があると考えられる。また、デュビアが特定の条件の場所に集合したとしても、それがフェロモンによる情報共有の結果であるのか、単にそれぞれの個体が自分にとって最適な環境を選んだだけであるのかを区別することは困難である。これらは本研究の大きな課題であり、フェロモンの影響を検証するためには事前に個体を入れていた箱と未使用の箱を比較するなど、影響をより厳密に排除した条件設定が必要である。

以上のことから、本研究では光を当てたときに避ける傾向があることが明らかになった。それにより、デュビアに負の走光性があると考えることができ一方、フェロモンによる情報共有能力につ

いては断定できず、今後のさらなる検証が必要であると考えられる。実験条件を厳密に統一し、実験回数と実験に用いる個体数を増やすことで、デュビアにおける集合行動の仕組みをより明確にしていきたい。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、デュビアが、光刺激の方向に対して反対に動くことが明らかになり、負の走光性があると考えられる結果となった。

一方で、情報共有能力については明確な結果が得られなかった。今後のさらなる検証が必要であるといえる。実験条件をより厳密に統一し、実験回数と実験に用いる個体数を増やすことで、デュビアにおける集合行動の仕組みをより正確に明らかにできると考えられる。

## 6. 参考文献

- 1) みらいぶっくグループ, 2017.8, ゴキブリが光に集まる！？～種や条件によって「暗」より「明」を選ぶことはあるのか,  
<https://activity.miraibook.jp/live/2017sobun/b215/>
- 2) 蟹めんま(2008), まんが・きらわれ生物図鑑, コスミックスマック, 12
- 3) 株式会社タニサケ, 2019.12.5, シビアな感覚で集うゴキブリさん一家の秘密  
<https://tanisake.co.jp/column/cockroach/490/>
- 4) Blattella germanica L・Dictyopetera,1999 Aggregation density and longevity correlate with humidity in first-instar nymphs of the cockroach  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12770325/>
- 5) Jennifer Micale, 2025.11.20, Research : Cockroaches gather in groups to keep from drying out  
<https://www.binghamton.edu/news/story/5>

929/research-cockroaches-gather-in-groups-to-keep-from-drying-out

6) Syamusal Manyulei · Steven Silalahi · Andi Murni · Alwi Paluseri ·

Iyan Wahdaniyah · Hardin Walt ·

Wulan Ramadhani Jabalnur ·

Rudi Hendro Putranto, 2022.6,

Environment factors affecting cockroach density: A systematic review

[https://www.researchgate.net/publication/362363476\\_Environment\\_factors\\_affecting\\_cockroach\\_density\\_A\\_systematic\\_review](https://www.researchgate.net/publication/362363476_Environment_factors_affecting_cockroach_density_A_systematic_review)

7) 岡崎洸太郎 · 野呂佳史, 2016, ワモンゴキブリの糞の状態とその集合フェロモンの働きの関係 81-84,

[https://www.chibac.ed.jp/funako/fttp\\_kousin/ssh/reserch/2016/2016\\_21b.pdf](https://www.chibac.ed.jp/funako/fttp_kousin/ssh/reserch/2016/2016_21b.pdf)

# 魚類の顔認識に関する主要な要素の検討

## ～ ゼブラフィッシュを用いた図形の認識と識別の学習 ～

鈴木さやか 八穴実咲

### 要旨

本研究では、ゼブラフィッシュ (*Danio rerio*) は形状の大きく異なる図形の視覚的な認識と識別が可能なのかを検証するため、エサを報酬としたオペラント条件付けを用いて、報酬と図形の識別とを関連づけた行動実験を行った。初期の実験では、水流の影響により明確な識別行動が確認されなかった。そのため、水流の影響を排除した環境下での訓練を行ったが、ゼブラフィッシュに明確な識別行動は見られなかった。

### 1. はじめに

人間の脳皮質の大部分を占める新皮質の紡錘状顔領域は顔の認識能力を担っており、魚類には存在しない。しかし、魚類であるテッポウオは、特定のヒトの顔画像を回避するようオペラント条件付けをされたとき、77～89%の精度で顔画像を認識し回避行動を行う。また、顔画像がモノクロとなったときその認識精度は上がることが報告されている<sup>1)</sup>。この識別能力はテッポウオがエサとなる、水面上にいるクモや羽虫などの昆虫を口から水を発射することで撃ち落とすために進化の過程で得られた能力であるとされている。この識別行動について、テッポウオはヒトの顔のどの部分を認識しているかは不明瞭である。そこで、魚類における図形の認識および識別について研究を行った。本研究では、モデル生物であるゼブラフィッシュを用いることとした。ゼブラフィッシュはテッポウオと同様な識別能力があるとされており、線の向きを識別することができると報告されている<sup>2)</sup>。本研究では、ゼブラフィッシュが形の異なる図形を認識し、識別行動を示すのかことができるのか。さらに、どのような要因が認識に関与しているかを検証した。実験には、横線を組み合わせた図形 A(図 1)と、線の要素を持たない円の図形 B(図 2)を用いた。先行研究より、ゼ

ブラフィッシュは縦線と横線の向きを見分けが可能であることから、形状が大きく異なる図形を認識可能であるという仮説を立てた。また、図形の識別が可能であるならば、魚類が顔の部位の形状や輪郭を判断する際にも、視覚的な要因を利用している可能性があると考えた。識別能力の評価については、オペラント条件付けを用いて図 1 に近づくと、エサが得られるという課題を学習させた。その後、学習した個体が図形を正しく識別し、図 1 に選択的に近づくかそうでないかを観察を通して、識別行動の有無を評価した。



図 1. 図形 A

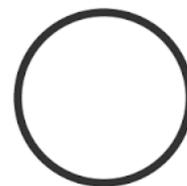


図 2. 図形 B

### 2-1. 研究試料：図形識別実験①

- ・ゼブラフィッシュ (*Danio rerio*) 8 匹
- ・水槽1(60 cm×30 cm×35 cm)
- ・エサ(フレーク状)(テトラ社)
- ・30 cm×6 cm の仕切り(プラスチック製)

本研究では、新たに購入したゼブラフィッシュ8匹(図3)を用いた。メスとオスの調節は行わず、メスとオスがそれぞれが混在した状態で実験を行った。飼育および、実験には 60×30×35 cm の水槽1を用いた。

### 2-2. 研究試料：図形識別実験②

- ・ゼブラフィッシュ7匹
- ・水槽2 (24.5 cm×16.5 cm×20.5 cm)
- ・ヒーター
- ・エサ(フレーク状)
- ・仕切り(プラスチック製)

ヒーターを設置した。ゼブラフィッシュが図形 A とエサを関連づけて学習できているかを確認することを目的とし、以下のような実験を行った。給餌の際、ゼブラフィッシュを 24.5×16.5×20.5 cm の水槽2に移動させ、水槽2を 7 cm:14.5 cm で仕切るようにして仕切りを挿入しエサを与えた。



図3. 水槽2 飼育の様子

### 3-1. 研究方法：図形識別実験①

ゼブラフィッシュが図形 A とエサを関連づけて学習できているかを確認することを目的として、以下のような実験を行った。プラスチック製の仕

切りを用いて 水槽1の水面を2等分し、給餌の際、図形 A のみを水槽1の側面に挿入した(図4)。ゼブラフィッシュが図形そのものではなく提示位置を手がかりとして学習することを防ぐため、図形 A の提示位置は水槽1の左右側面に毎回交互に変更した。また、エサは平日の朝夕に与え、これらの操作を約3週間継続して行った。

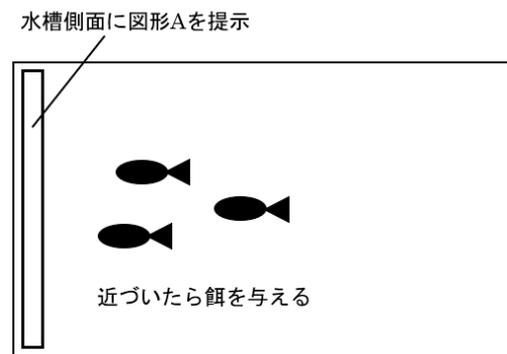


図4. 水槽1 学習方法

学習の成立を確認するため、ラミネート紙を用いてゼブラフィッシュを水槽1の右側または左側の側面に寄せ、寄せた側面とは反対側に図形 A または図形 B を挿入した。ラミネート紙を外した瞬間から3分間、ゼブラフィッシュが仕切りの下を移動した回数を記録した。左右の通過回数を比較することで、ゼブラフィッシュが、図形 A をエサの手がかりとして学習し、図形を識別して近づくかを検証した(図5)。ここで仕切りの下を通過して移動した数を右と左で比較して図形 A を覚えられているのか判別することとした。

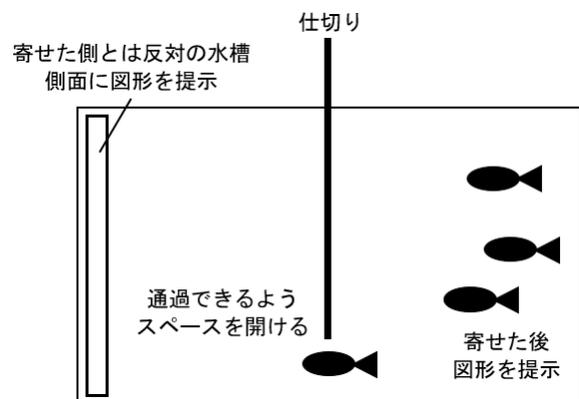


図5. 水槽1 実験の様子

### 3-2. 研究方法：図形識別実験②

3-1 とで示した水流の学習への影響を排除するため、実験方法の改良を行った。本実験では、水の流れがゼブラフィッシュの関連付け学習に影響しないよう、ポンプを設置していない水槽2を用いた。また、図形とエサの関連付け学習をより高めるため、側面から7 cm の位置にプラスチック製のしきりを入れることで、エサが水槽全体に拡散しないよう防いだ。

普段の水槽で飼育しているゼブラフィッシュを水槽2に移動させ、水槽の 16.5×20.5 cm の側面からしきりで区切られた7cm の範囲にゼブラフィッシュを誘導し、図形 A を表示しているときにエサを与え、図形 B を表示しているときはエサを与えない。この操作をそれぞれ1日3回ずつ行った。

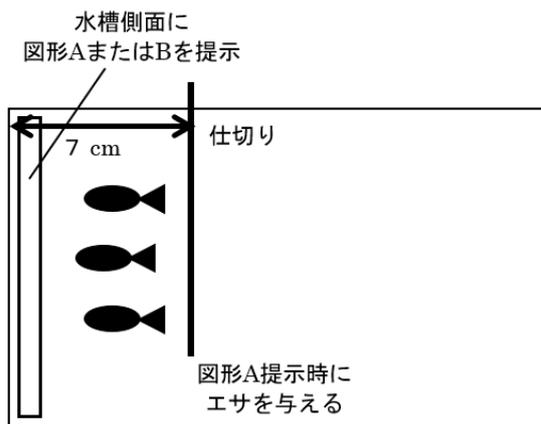


図6. 水槽2 学習の様子

以上の操作をおよそ5週間行った後、ゼブラフィッシュが図形を識別できるのかを調べるために、ゼブラフィッシュを普段飼育している水槽から水槽2に移し、図形 A または B 図形を水槽2の側面提示し、提示してから3秒後、6秒後、9秒後、12秒後、15秒後、18秒後、21秒後、24秒後、27秒後、30秒後に、水槽2の側面から7 cm の範囲内にいるゼブラフィッシュの個体数を計測した(図7)。

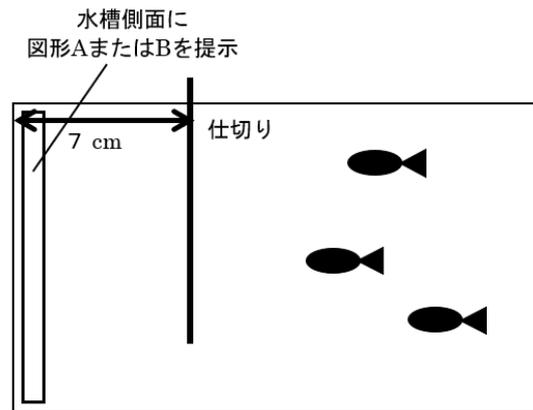


図7. 水槽2 実験の様子

### 4-1. 結果：図形識別実験①

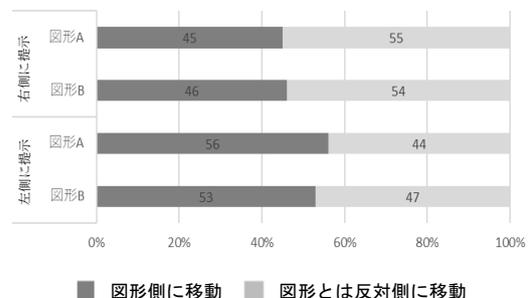


図8. 図形 A/B 提示時のゼブラフィッシュの移動方向の割合

図8は、図形 A と図形 B についてそれぞれの図形を水槽内に挿入した際、ゼブラフィッシュ図形側および、図形の反対側に移動した回数の割合を示した図である。上段 2 つはゼブラフィッシュを水槽の左側に誘導後、水槽の側面右側に図形を提示した場合の移動結果であり、下段 2 つは右側に誘導後、水槽の側面左側に図形を提示した場合の移動結果を示している。

左右どちらに提示した場合でも、また図形 A と図形 B を入れ替えて提示した場合でも、ゼブラフィッシュの行動に差は認められなかった。移動方向については、左方向へのわずかな偏りが見られる場面もあったが、明確な傾向とは言えなかった。いずれの条件でも特定の図形への選択的な行動は確認できなかった。

#### 4-2. 結果：図形識別実験②

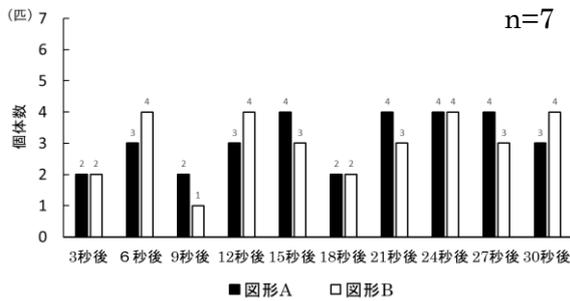


図9. 図形提示後の接近個体数の変化

図9は、図形提示後30秒までの各時点において、水槽2の側面から7cm以内に入ったゼブラフィッシュの個体数を示したものである。結果、いずれの図形を提示した場合でも、個体数は時点により1～4匹の範囲で変動したが、3匹または4匹である場合が最も多かった。また、図形Aと図形B提示時の接近個体数に明確な差がみられなかった。

#### 5-1. 考察：図形識別実験①

図形AまたはB提示時のゼブラフィッシュの移動方向の割合(図8)から、ゼブラフィッシュは図形Aと図形Bを認識、識別するといった行動は確認できなかった。これはゼブラフィッシュの、水の流れに対し、正の走性をもつことが影響したのではないかと考える。ゼブラフィッシュは体の側面の側線部分に運動を感知する有毛細胞があり、それをを用いて水中での体の向きを決めると報告されている<sup>3)</sup>。図形識別実験①では水槽1で実験を行ったが、水槽1では、水槽の環境を調節するポンプが常に起動している状態であった。ここから、水槽の水面を二等分したために、右と左の水面で流れに違いが出てしまったこと、ラミネート紙でゼブラフィッシュを左右に寄せてからすぐに図形を挿入し記録を始めたため、水の流れが治まっていなかった等の、水槽内で生じた水流が、図形とエサの関連づけに影響を与えてしまった可能性があると考えられる。

#### 5-2. 考察：図形識別実験②

図9の結果から、ゼブラフィッシュは図形Aと図形Bのどちらを提示した場合でも、寄ってくる個体数に明確な差は確認できなかった。このことから、図形A=エサあり、図形B=エサなしの関係を学習が十分に行えていなかったと考えられる。そのため、ゼブラフィッシュは図形の種類を区別して行動してのではなく、図形が提示されたという視覚的刺激そのものに反応して接近行動を示したのではないかと推察する。

以上より、本実験では図形の認識・識別について検証することはできなかったが、これはゼブラフィッシュに識別能力がないことを意味するのではなく、図形とエサとを関連づけるが条件が十分ではなかったことが、結果に影響したと考えられる。

#### 6. まとめと今後の課題

本研究では、ゼブラフィッシュが図形Aと図形Bを識別し、エサのある側へ移動することについて検証したが、図形識別実験①と図形識別実験②のいずれにおいても、図形を識別して移動するといった明確な行動は確認できなかった。図形識別実験①では、ポンプの稼働等による水流が、図形とエサの関連づけに影響を与えてしまった可能性が高く、十分に学習できていなかったと考えられる。また、図形識別実験②では、はじめに提示した図形側に移動する行動が見られたことから、最初に受け取った刺激に対して反応し、行動していたのではないかと推察する。さらに、エサの関連付け学習の試行回数が不十分であったことも、本結果に影響を与えた可能性が高い。今後は、エサの関連付け学習の訓練期間をさらに増やし、図形の表示順や提示方法等の条件を揃えることで、ゼブラフィッシュが図形を識別するかをより厳密に検証する必要がある。加えて、図形の形や構成要素を変えることで、ヒトの顔識別に関わる要因の解明につなげていきたい。

## 7. 参考文献

- 1) Cait Newport·Guy Wallis·Yarema Reshitnyk·Ulrike E. Siebeck , 2016, Discrimination of human faces by Archerfish (*Toxotes chatareus*). Scientific reports
- 2) Maria Santaca·Marco Dadda·Luisa Dalla Valle·Camilla Fontana·Gabriela Gjinaj·angelo Bisazza, 2022, Learning and visual discrimination in newly hatched zebrafish, Scientific reports
- 3) John O. Dabiri, 2017, How fish feel the flow. Nature, 2017
- 4) 飯田朋華·片岡礼·川口よしの, ゼブラフィッシュから見える世界

# 渦励振発電の効率化

幡山巧 土生敦樹 藤澤真那 山下あまね

## 要旨

本研究では、風が円柱にあたることによって生じる渦励振を利用した、電磁誘導による発電機構の原理開発および効率化について検討を行った。塩化ビニル管とコイル、磁石からなる装置に風を当てると渦励振が生じ、その振動によって電圧が得られた。塩化ビニル管の質量が小さく、高さが高い方が磁石が付く棒の振幅がより大きくなるという仮説を立て、その装置において装置の構造や塩化ビニル管の質量と高さの違いが棒の振幅の大きさに与える影響を実験的に調べた。実験から、棒を支えるひもを弛ませ、棒が動く空間を確保して、円柱の質量と高さを大きくすると発電量が大きくなると分かった。

## 1. はじめに

物体に風が当たると、風が物体に沿って流れ、物体の後方(風下)に渦ができる。物体のある場所に渦が出来ると物体周りで空気の密度に差が生まれ、風に垂直な向きと、風と同じ向きに力が発生する。すると、前者の力によって物体が風と垂直な方向に動く。後者の力は前者の力に比べて小さく、無視することが多い<sup>1)</sup>。時間が経過すると、渦ができる部分が物体に対して反対の位置になり、風と垂直な向きにかかる力に向きも反対になる。同様にこの力によって物体が風と垂直な方向に動く。このような作用が周期的に繰り返されて物体が振動する現象が起こる(図 1)<sup>2)</sup>。この現象を渦励振と呼ぶ。

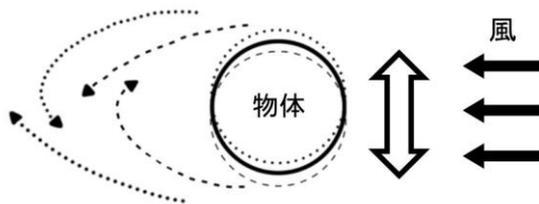


図 1. 渦励振の仕組み

図は上方から見た模式図である。物体は、点線矢印の向きに渦が発生した時は図の上方向に、破線矢印の向きに渦が発生した時は図の下方向に振動する。

渦の発生振動数(単位時間あたりに、渦が発生する場所が反転し、元に戻る現象が起こる回数)と物体の固有振動数が一致すると共振状態に似た現象が生じ、物体の振動が大きくなること、渦励振は円柱状構造物で多く観測されることがわかっている<sup>2)</sup>。

本実験の目的は、この渦励振という振動現象を利用した発電機構を考案すること、そして、発電量に影響を与える装置条件を実験的に調べ、効率的な発電方法を検討することである。

初めに、物体に当たるものとして円柱形の塩化ビニル管を用い、それに送風機で風を当てることで渦励振を発生させ、発電を行う機構(後述内容と2を参照)を独自に考えた。この機構において、塩化ビニル管の振動が伝わるひもの張り方、棒の付け方、そして円柱の材質と質量が棒の振幅に及ぼす影響を実験から考察した。発電の直接的な要因である棒の振幅に影響を与えうるものとして、ひもや棒の付け方を変化させた。また、円柱の材質は棒の振幅に影響を与えず、質量は影響を与えるという仮説を立てていたため、それを検証するために円柱の材質と質量を変化させた。円柱と風速の関係は先行研究からかなり詳しくわかっている<sup>2)</sup>ため、風速の条件は変化させないこと

にした。そして、渦励振を利用して効率よく発電する方法について考えた。

本実験で独自に考えた装置の発電メカニズムについて説明する。図 2, 3 は、本実験で考えた装置を水平方向から見た図である。渦励振が発生し、円柱が振動すると、慣性の法則により棒はその場に留まろうとする一方で、ひもは円柱の振動によって移動する。このとき、棒の両側のひもが水平面に対してなす角に差が生まれるため、棒に対して円柱が振動した方向に力がかかる(図 2)。これにより棒に傾きが生じる。その後、ひもと棒の接点周りの力のモーメントについて考えると、棒にかかる重力から棒が逆向きに回転することが分かる(図 3)。棒の円柱の振動方向が反転するとき、ひもの移動も同時に反転し、先程と同様に棒が回転し、振動することになる。棒には磁石が付いており、回転することでコイル周りの磁束密度が変化し、電磁誘導が起こる。

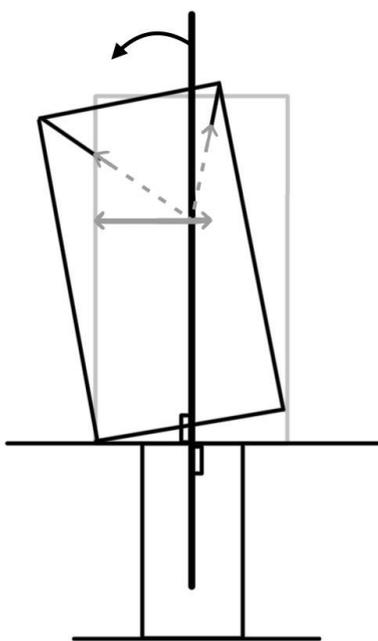


図 2

本図は装置を水平方向から見た断面図である。灰色破線矢印はひもの張力、灰色矢印はひもの張力の水平方向の分力、黒矢印は棒の回転方向を示す。

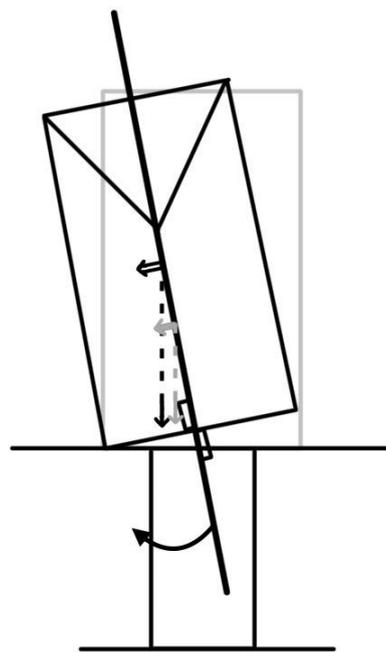


図 3

本図は装置を水平方向から見た断面図である。灰色破線矢印は棒の重心にかかる重力、灰色矢印はその重力の、棒に垂直な向きの分力、黒破線矢印は円柱の重心にかかる重力、二重線矢印は黒破線矢印の、棒に垂直な向きの分力、黒色矢印は棒の回転方向を示す。

## 2. 材料・研究方法

実験装置の基本構造は、塩化ビニル管の振動を棒に伝え、コイルの内部で棒に取り付けた磁石を振動させ、発生する磁界から電磁誘導によって発電するものである。

図 4, 5 のように机にコイル(直径 38.0 mm, 高さ 140 mm, 巻き数 500 回)を置き, その上に塩化ビニル管 I (外径 114 mm, 内径 106 mm, 高さ 255 mm, 質量 425 g) を設置した. 鉄を含む合金の棒(直径 3.00 mm, 高さ 427 mm, 重さ 26.1 g) は, コイルと塩化ビニル管 I の中心に通し, ひも(ビニール糸, 1.50×600 mm)を結び, 塩化ビニル管 I の外側にテープでひもを貼り付けることによって固定した. コイルと塩化ビニル管 I の境界付近に位置するように磁石(直方体のネオジウム磁石, 20.0×12.0×5.00 mm, 0.30 T) を棒に取り付け, コイルに電圧計を繋ぐ. この装置を基本装置と呼ぶことにする。

## 2-1. 実験 A

ひもを強く張るほどひもが塩化ビニル管の振動と同じ方向に振動可能な幅は減少する。これより、ひもの張力によって塩化ビニル管から棒への振動の伝達のしやすさが変化すると考えた。ひもを弛ませた場合の方がひもの張力の影響が少なく、振動が伝達しやすいため、棒の振幅が大きくなると仮説を立てた。

基本装置について、ひもの張り方以外の条件(コイル、棒の材質・質量、磁石の位置、風速)はすべて同一とし、ひもの結ぶ高さによって弛ませ具合を変えて実験を行った。強く張った装置(装置 A-1)と、弛ませた装置(装置 A-2)を用意した。これらの装置の塩化ビニル管 I に、送風機(IRIS OHYAMA 製サーキュレーター扇風機 STF-DC182T-W)から水平に 6.60 m/s の風を当てた。

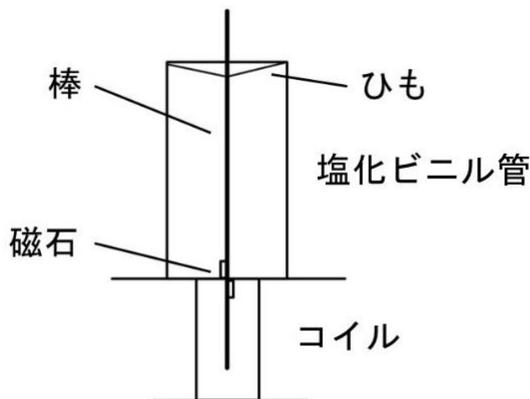


図 4. 装置 A-1 (ひもを強く張った場合)  
本図は装置 A-1 の水平方向から見た断面図である。

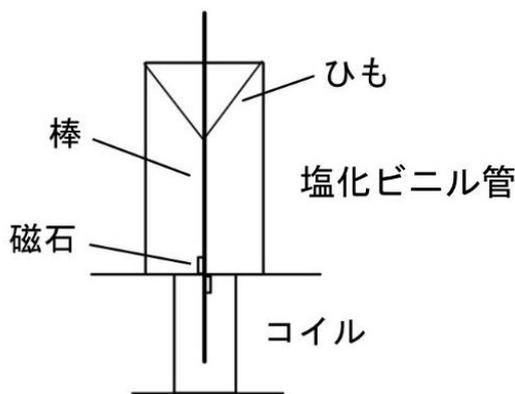


図 5. 装置 A-2 (ひもを弛ませた場合)  
本図は装置 A-2 の水平方向から見た断面図である。

## 2-2. 実験 B

実験 A において、棒とコイルの接触によって棒の振動が吸収されたと考えた。そこで、装置全体の高さを上げることで、棒とコイルが接触しないようにし、振幅が大きくなれば、棒の振幅が大きくなると仮説を立てた。

図 6 のように、棒が通るのに十分な大きさの穴を上部に開けた段ボール箱(240×350×220 mm)の上に装置 A-2 を置き、装置全体の高さを上げた(装置 B)。装置 B に実験 A 同様、塩化ビニル管 I に水平に風を当てた(以降の実験も同様)。

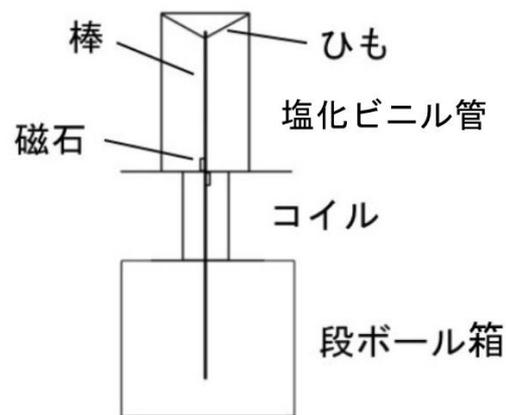


図 6. 装置 B

本図は装置 B の水平方向から見た断面図である。

## 2-3. 実験 C

円柱部分の材質の渦励振の振幅への影響を調べた。円柱部分の材質は、形状が同一であれば渦励振の発生仕方に変化を与えないため、棒の振幅に変化はないと仮説を立てた。

図 5 のように、装置 B の塩化ビニル管 I の部分に置く円柱を塩化ビニル管 II(外径 60.0 mm, 内径 55.0 mm, 高さ 133 mm, 質量 69.6 g)及び塩化ビニル管 II と大きさが等しいペットボトル(質量 3.20 g)に変えた(それぞれ装置 C-1, C-2 とする)。塩化ビニル管 II は塩化ビニル管 I と高さと同径の比が同じである。また、ペットボトルにおもりを貼り付けることで塩化ビニル管 II とペットボトルの質量を等しくした(装置 C-3)。

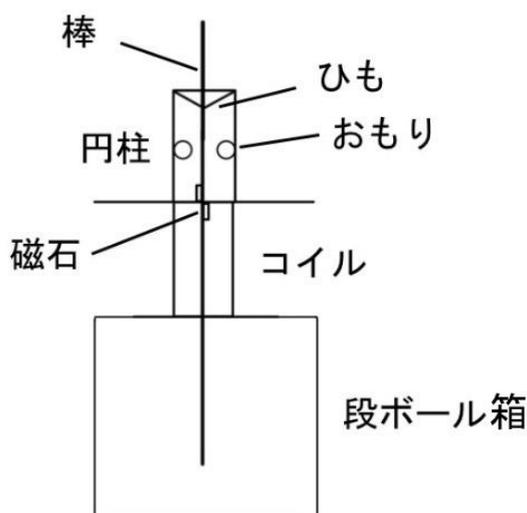


図 7. 装置 C-3 (おもりを貼り付けた場合)  
本図は装置 C-3 の水平方向から見た断面図である。

#### 2-4. 実験 D

実験 C において、円柱部分の質量が棒の振幅に影響を与えたと考えた。円柱部分の質量が小さいほど揚力による影響を受けやすく、渦励振の振幅が大きくなり、棒の振幅が大きくなると仮説を立てた。

円柱部分の質量の条件のみを変えるために、円柱部分を塩化ビニル管 I と形状が同じで、質量が 144 g 小さいアクリル円柱(外径 120 mm, 内径 115 mm, 高さ 255 mm, 質量 281 g)に変えた(装置 D)。

#### 2-5. 実験 E

実験 C において、円柱部分の高さが棒の振幅に影響を与えたと考えた。円柱部分の高さが高いほど揚力によってかかるモーメントが大きく、渦励振の振幅が大きくなり、棒の振幅が大きくなると仮説を立てた。

円柱部分の高さの条件のみを変えるために、円柱部分を、装置 D で用いたアクリル円柱と外径と質量が等しく、高さが 89.0 mm 低い塩化ビニル管 III (外径 114 mm, 内径 106 mm, 高さ 166 mm, 質量 278 g)に変えた(装置 E)。

### 3. 結果

表 1 に実験結果を示す。得られた電圧は、各実験 30 秒×3 回で得られた最大値を表記する。

表 1 それぞれの装置における発生電圧

装置	外径[mm]×高さ[mm], 質量[g], 条件	電圧 [mV]
A-1	114×255, 425, Tight	0.0
A-2	114×255, 425, Loose	0.2
B	114×255(+220), 425	0.6
C-1	60.0×133, 69.6, PVC	0.0
C-2	60.0×133, 3.20, PET	0.0
C-3	60.0×133, 66.0, PET	0.0
D	120×255, 281, PMMA	0.2
E	114×166, 278, PVC	0.1

なお、表 1 の装置 B の結果において(+220)と示したものは、段ボール箱の高さを意味する。また、表 1 において 0.0 V と示したものは、電圧計の分解能以下であり、明確な電圧変化が確認できなかったことを意味する。

### 4. 考察

#### 4-1. 実験 A の考察

ひもを強く張った場合は、塩化ビニル管は振動した一方でひもがほとんど振動せず、棒も振動しなかったため、電圧は得られなかった。

$$\text{波の伝達速度} \cdot \text{張力と波長の式} \left[ v = \sqrt{\frac{S}{\rho}} = f\lambda \right]$$

について、 $f$  は一定であるから、 $S$  が大きくなると  $\lambda$  も大きくなる。装置 A-1 ではひもが強く張られており、張力が大きくなったため、 $\lambda$  は大きくなる。この実験ではひもと円柱の接点を振動源として定在波が生じており、 $\lambda$  が変化すると定在波の腹の位置が変化する。 $\lambda$  が大きい場合より小さい場合の方が棒の振動が大きかったことから、 $\lambda$  を大きくすると腹の位置が棒から遠ざかり、棒があまり揺れなくなったと考えられる。その結果、塩化ビニル管の振動が棒にほとんど伝わらなかったためだと考えられる。

ひもを V 字に弛ませたときは、塩化ビニル管の振動がひも及び棒全体に伝わって棒が振動した一方で、棒が振動した際にコイルの内側下部と接触し、それが棒の動きを制限していた。

以上より、発電においてはひもを弛ませるのが良いと考えられる。

#### 4-2. 実験 B の考察

棒とコイルが接触しないようにするために装置の高さを上げたことで、棒の振幅が制限されず、実験 A よりも高い電圧が発生したと考えられる。

#### 4-3. 実験 C の考察

装置 C-1 と装置 C-3 の結果を比較すると、材質の違いによる棒の振幅の差はないことが示唆される。これは、材質は変化しても円柱の周囲の空気の流れおよび渦の発生の仕方に、風と垂直方向に働く力の大きさを変えるような大きな変化がないからであると考えられる。一方で、おもりを貼り付けてペットボトルを立てた際にペットボトルが少し変形したことから、おもりの影響により振動の仕方が変化した可能性があるが、物質の固有振動数の式が  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$  で表され、固有振動数が材質に影響されないことから、材質によって棒の振幅は変化しないと考えられる。

装置 B と装置 C-1 の結果を比較すると、材質と高さや外径の比は同じだが装置 B では電圧が得られた一方で、装置 C-1 では得られなかった。このことから、円柱部分の高さや質量のどちらか一方または両方が大きい方が発生電圧が大きくなると考えられる。

#### 4-4. 実験 D の考察

塩化ビニル管 I の方が 0.4 mV 大きい電圧が得られたことから、円柱部分の質量が大きい方が発生電圧が大きくなると考えられる。ただし、材質の影響は 4-3 から無視するとする。これは、円柱

の質量が大きくなることで、風に垂直水平方向に働く力によって円柱に傾きが生じる時のひもと棒の接点周りの円柱の重力によるモーメントが大きくなり、その結果、円柱の振幅が大きくなって棒の振幅が大きくなったためだと考えた。

#### 4-5. 実験 E の考察

装置 D と比較すると、円柱の高さが高いほど発生電圧が大きくなることが考えられる。渦によって円柱が揺れるときにかかる力の合力を考えると、円柱の高さが上がるとその合力の作用点の位置は高くなる。そのため、円柱にかかる力のモーメントが大きくなる。一方で、円柱の重心の位置も同時に高くなり、棒がひもに引っ張られた時に円柱が元の位置に戻ろうとする力のモーメントも大きくなる。しかし、円柱の高さの上がり幅に対して、円柱の重心の高さの上がり幅は半分になる。よって、円柱が左右に揺れる際にかかる力のモーメントの方が大きくなるため、円柱がより揺れ、発電量が大きくなったと考えられる。

#### 5. まとめと今後の課題

基本装置のような機構で渦励振による発電を行う場合、実験 A からひもを弛ませること、実験 B から中心の棒が回転する空間を確保すること、実験 D から円柱の質量と重心の高さを大きくすることが有用であることがわかった。

円柱の質量を大きくすることで発電量が増える可能性があるため、鉄などの、塩化ビニル管よりも密度の高い素材で作られた建物に仕組みを応用することができれば、より大きな発電量を得られる可能性がある。建物を壊すこともある揺れのエネルギーを効率的に電気エネルギーに変換できれば画期的である。

今後の課題は主に三つある。一つ目は電流の測定である。今回の実験では電圧のみを計測しており、電気エネルギーを考えるには電流も測定する必要がある。

二つ目は条件の厳密化である。本実験では円

柱の質量・材質, 磁石の強さ, 磁石の位置, ひもの弛ませ方, …というように条件のパラメーターが非常に多い。そのため, 4 種類の実験を行う上で, 比較する条件以外をできる限り統一したが, ひもを棒につける位置によって棒の振幅に変化が生まれる可能性がみられた。このことについて実験を行ったものの, ひもを結びつける位置と棒の振幅の相関関係はわからなかった。そのため, 今後はこの相関関係を明らかにしていく必要がある。

三つ目は数式化である。本実験ではあくまで実験的な結果である。本実験での発電を数式化することができれば, 発電量の具体的な予測につながる。さらに, 数式化の過程での風と電磁誘導の関係(モデル)を用いれば, 実際の建物に応用する際に建物の揺れを予測することができ, 安全性の確保にもつながる。

## 6. 参考文献

- 1) 一般社団法人日本機械学会, 2017 年 7 月, 渦励振,  
<https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/doku.php?id=09:1000820>,  
2025 年 3 月 10 日
- 2) 国際振音計装株式会社, 2021 年 7 月, なるほど! シリーズ 9 風と振動 (カルマン渦振動について) 「これだけ知っていれば ほぼ 大丈夫」,  
<https://www.svr.co.jp/files/9816/6685/3348/adde291812d1662d6ac4f206fa07b269.pdf>,  
2025 年 3 月 10 日

# 効率よくビー玉の運動方向を変える曲線

## ～最速降下曲線は逆向きにも最速なのか～

尾崎大馳 桂幸生 沢邊耕一 高橋佑斉 松本捷一 山田洗瑛

### 要旨

物体の水平方向の運動を最も効率よく鉛直上向きに変換する曲線を調べるため、複数の種類の曲線の模型を作製し、ガウス加速器を用いてビー玉に水平方向の初速を与え、鉛直上向きに変換された後の速度と比較することで、それぞれの曲線の変換効率を測定した。結果として、最速降下曲線であるサイクロイド曲線は、水平方向の運動を鉛直上向きに変換する場合においては効率が良いとは言えず、今回調べた曲線の中ではクロソイド曲線が最も良い効率を示した。

### 1. はじめに

本研究では、「水平方向の初速に対する、鉛直上向きに変換された後の速度の比」を変換効率と定義する。この値は、運動エネルギーの損失の影響を含めた最終的な運動の大きさを、曲線ごとに比較するための指標となる。

サイクロイド曲線は鉛直下向きの運動を最も効率よく水平方向に変換する曲線であり、最速降下曲線として知られている<sup>1)</sup>。我々は水平方向の運動を鉛直上向きに変換する場合にも、サイクロイド曲線が最も効率よく変換できるのかどうかについて興味を持った。

本研究では、「水平方向の運動を鉛直上向きに変換する際、サイクロイド曲線が最も高い変換効率を示す」という仮説を立て、これを検証することを目的とした。そのため、サイクロイド曲線を含む複数の種類の曲線の模型を作製し、ガウス加速器を用いてビー玉に水平方向の初速を与え、鉛直上向きに変換された後の速度と比較することで、それぞれの曲線の変換効率を測定した。

### 2. 材料・研究方法

#### 2-1. 研究試料

スタイロフォーム(厚さ 20 mm)

木片(10×10×110 mm)

ガウス加速器実験セット(ナリカ製)

└鉄鋼球(Φ11 mm)5 個

└ネオジウム磁石(Φ10 mm,(BH)max:30MGOe)  
3 個

エネルギー実験用レール(ナリカ製,  
12×7×1000 mm)

速度測定器 KA(ケニス製)2 台

ビー玉(Φ11 mm, 重さ 2g)1 個

#### 2-2. 使用した曲線

以下の 5 曲線を使用した。通常の曲線は長辺を底辺、名前に「逆」とつけた曲線は短辺を底辺として定義した。曲線の軌道はレールではなくビー玉の中心の軌道とし、曲線の高さは全て 300mm に揃えた。

サイクロイド 長辺:476 mm, 短辺:300 mm(図 1)

クロソイド 長辺:450 mm, 短辺:300 mm(図 2)

円弧 長辺:300 mm, 短辺:300mm(図 3)

逆サイクロイド 長辺:300 mm, 短辺:200 mm

逆クロソイド 長辺:300 mm, 短辺:198 mm

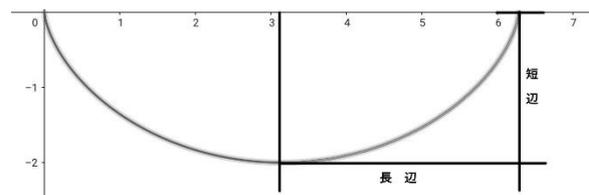


図 1. サイクロイド曲線

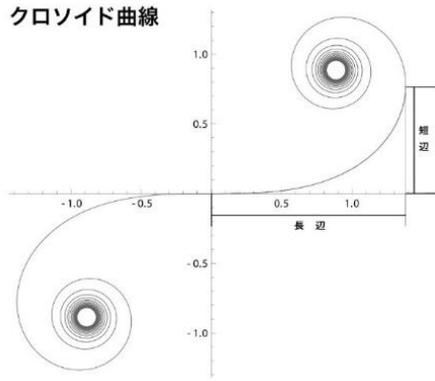


図 2. クロソイド曲線

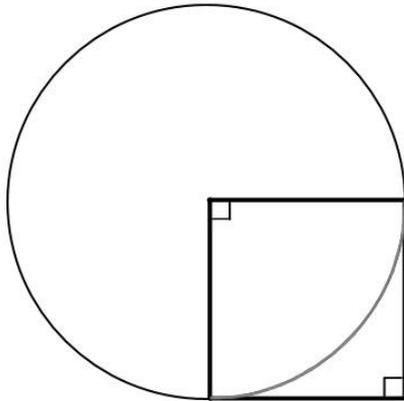


図 3. 円弧

### 2-3. 装置の作成 (図 4~8)

1. コピー用紙に各曲線を印刷した.
2. 印刷したコピー用紙の上にプラスチック板を置いて曲線を転写した. この際に曲線の終端部分がわかるように記した.
3. 曲線を描いたプラスチック板を線に沿ってはさみで切った.
4. スタイロフォームに直線部分を油性ペンで先に書き込み, 曲線部分を作業 2 で記した印を目印に書き込んだ.
5. スタイロフォームをカッターナイフで大まかに 1 cm ほど残して切り出した.
6. 作業 5 で残った部分を紙やすりで線とスタイロフォームの境界線まで削った.
7. 終速計測用の速度測定器(速度測定器 B)の台座を固定するために各辺が 1cm の正方形の穴を曲線の終端部分の高さから 0.5 cm

上に 2 つあけた.

8. 初速計測用の速度測定器(速度測定器 A)の台座を差し込む部分を底辺から 2 cm 切り出した.
9. レールを設置して釘で固定した.
10. 速度測定器を乗せる台座を同じくスタイロフォームに油性ペンで線を描いてからパーツごとに切り出した.
11. 8 で切り出したパーツをボンドと爪楊枝で組み立てた.
12. 本体と木片で組み合わせてブックエンドを用いて自立させた.

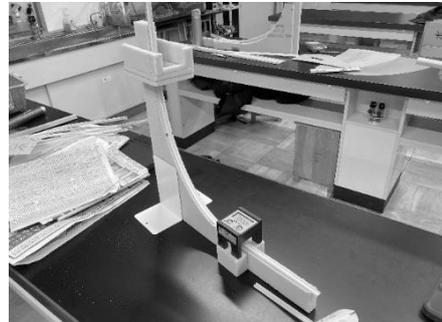


図 4. 実験装置

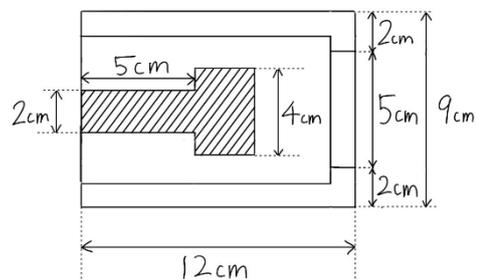


図 5. 速度測定器 B の台座上図

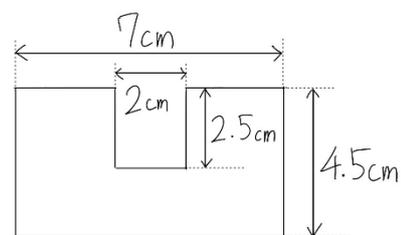


図 6. 速度測定器 A 用の台座前面図

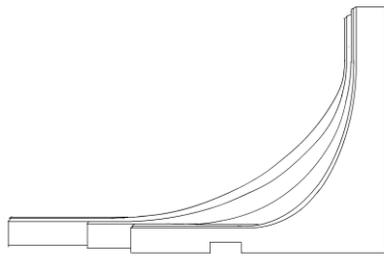


図 7. 曲線ごとの実験装置の構造の違い。  
(手前から逆クロソイド, 逆サイクロイド, 円弧, ク  
ロソイド, サイクロイド)

#### 2-4. 実験方法

実験装置に速度測定器 2 つとガウス加速器を設置した。加速器上に磁石を 3 つ固定し、その前方に鉄球とビー玉を一つずつ設置した。磁石を後方から近づけてビー玉に水平方向の初速を与えた。速度測定器の一つ目で測定したものを初速、二つ目のものを終速とした。

各曲線で、同条件で 40 回の測定を行った。

#### 2-5. FIJI を使用した曲率の変化の測定

円弧を除く、曲率が一定でない曲線の曲率の変化を可視化するため、National Institutes of Health で開発された画像分析に用いられるオープンソースのソフトウェアである FIJI を使用し、Kevan Lu によって作成され、現在は Hadrien Mary によって管理されている Kappa というプラグインを使用した。

まず、使用する各曲線の画像について、曲線の使用する部分を長方形に内接させた時に、その長方形の長辺と短辺に当たるピクセル数を調べる。今回使用した画像は、クロソイド曲線は Wikipedia のもの<sup>2)</sup>を、サイクロイド曲線は株式会社オプラインのサイトのもの<sup>3)</sup>を使用した。使用した画像においては、サイクロイド曲線は長辺 408 ピクセル、短辺 261 ピクセルであり、クロソイド曲線は長辺 1730 ピクセル、短辺 971 ピクセルであった。

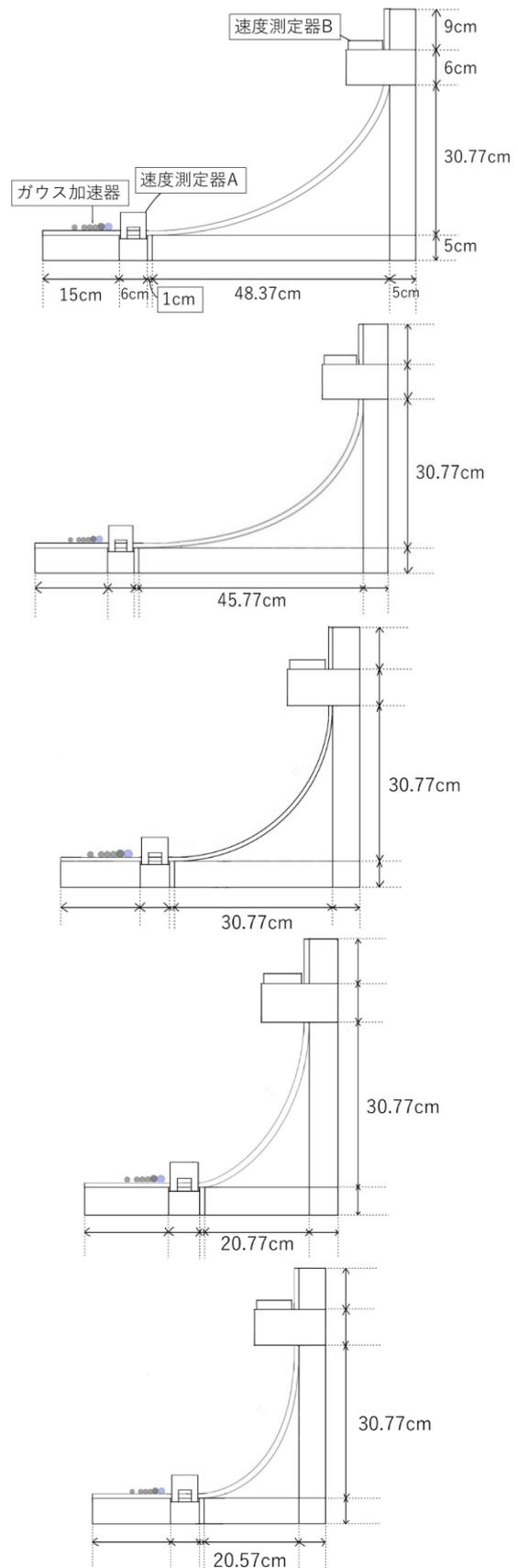


図 8. 実験装置の寸法  
(上から順にサイクロイド, クロソイド, 円弧, 逆サ  
イクロイド, 逆クロソイド)

これらについて、各曲線を同一の高さ(30cm)にスケーリングし、曲線に沿った曲率分布を比較した。

### 3. 結果

曲線ごとの測定値の平均値を表1に示す。

表1. 初速の平均と終速の平均

曲線	初速(m/s)	終速(m/s)
逆サイクロイド	5.03	2.52
逆クロソイド	5.41	2.52
サイクロイド	4.67	2.61
円弧	4.52	2.46
クロソイド	4.64	2.54

実験の際に初速が異なるのは Gauss 加速器にネオジウム磁石を衝突させる際、人の手によって行われること、および実験を重ねることによるネオジウム磁石の破損によるものである。

初速にはばらつきが見られたが、図9に示す各曲線における初速と変換効率の関係の R-2 乗値は高く、曲線間の変換効率の比較には大きな影響を与えないと判断した。

測定値より求めた近似直線の係数、切片、R-2 乗値および各曲線の長さを表2に示す。

表2. 各曲線の実験結果の近似直線の係数と切片と R-2 乗値と曲線の長さの関係

曲線	係数	切片	R-2 乗値	曲線の長さ (cm)
逆サイクロイド	0.0828	-0.1641	0.8468	38.15
逆クロソイド	0.0907	-0.1155	0.7394	38.34
サイクロイド	0.1195	-0.0048	0.7905	59.83
円弧	0.1289	-0.0426	0.583	47.12
クロソイド	0.1304	-0.0601	0.7737	68.44

上の表より、係数は大きい順にクロソイド、円弧、サイクロイド、逆クロソイド、逆サイクロイドとなる。

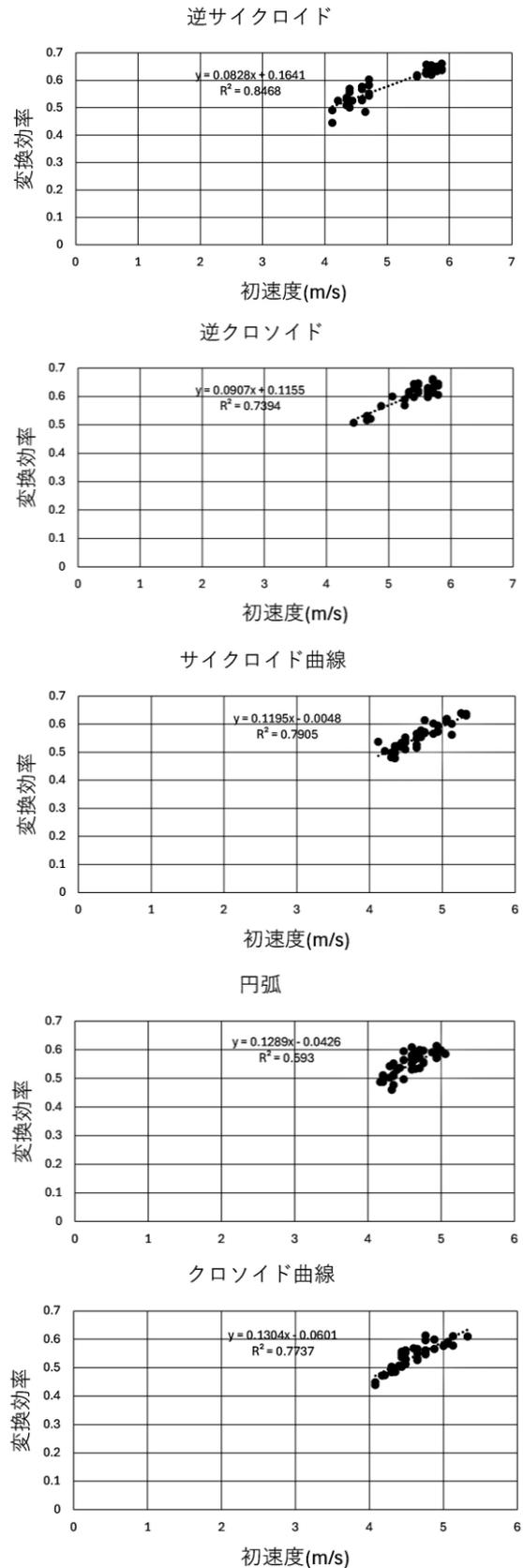


図9. 各曲線の初速と変換効率の関係

次にFIJIで測定した各曲線についての曲率の変化をグラフ化したものを図10に示す。

縦軸は曲率、横軸は曲線全体の長さを15等分したものになっており、グラフは各15分の1ごとの平均の曲率を滑らかに結んだものである。

円弧については、半径が常に30cmであることから曲率は常に0.033(1/cm)である。

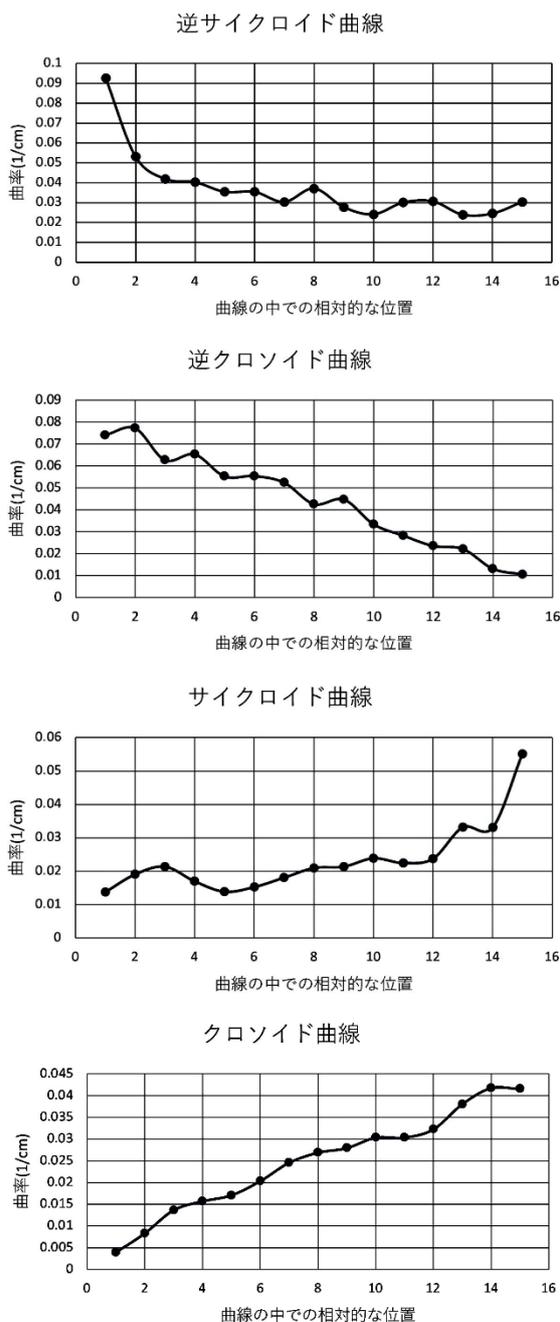


図10. 各曲線の曲率の変化

## 4. 考察

### 4-1. 全体への考察

R-2乗値がそれぞれの曲線のデータに対して0.5以上であるから、それぞれの曲線のデータについて、直線による近似はある程度妥当であると言える。ただし、より高次の近似の検討も今後の課題である。

今回求めた各曲線の近似直線のxの項の係数について、これが大きくなるほど、初速度を大きくしていったときに変換効率が高くなると言える。したがって、初速度を大きくしていったときに水平方向のビー玉の運動を最も効率よく変換する曲線はクロノイド曲線であると言える。

ここで、近似曲線の係数が正の値であることから、初速を大きくすると、変換効率が1を超え、終端速度が初速を超えてしまうように見える。しかし実際には、初速に対する終速の関係は、直線ではなく、双曲線的な関係になると考えられる。これは、斜面との摩擦と空気抵抗とを考えず、初速をx、終速をyとすると、力学的エネルギー保存則より

$\frac{1}{2}mx^2 = mgh + \frac{1}{2}my^2$  ( $y \geq 0, x \geq 0$ )が成り立ち、これを整理すると、

$y = \sqrt{x^2 - 2gh}$  という双曲線の式が得られることから推察できる。この式の漸近線は $y = x$ であるから、終端速度は常に初速より小さくなるのがわかる。また、初速が限りなく大きくなると、yはxに近づくため、変換効率は1に近づくが、1を超えることはない。

さらに、本実験でとった初速の値の範囲はおおよそ4~6 m/sで共通している(図10)。これは初速xの定義域が同じであることを示しており、この範囲をとった変換効率との近似直線の傾きが大きいということは、そのぶん変換効率がより早く100%に近づく、つまり変換効率が良いと言える。

次に、図10の各曲線のグラフを見比べる。サイクロイド曲線は、はじめは徐々に曲率が大きくなっていき、曲線を進むにつれてさらに曲率の増加が大きくなっている。反対に、逆サイクロイド曲線は、

はじめ大きい曲率が急激に小さくなり、曲線を進むにつれて曲率は徐々に小さくなっている。図には示していないが、円弧の曲率は常に一定である。クロソイド曲線は測定した値では細かい変動があるが概ね一定の割合で曲率が増加し続けている。反対に、逆クロソイド曲線は概ね一定の割合で曲率が減少し続けている。

#### 4-2. ビー玉にかかる力

一般に、レールの上を運動する際、ビー玉には重力、斜面からの垂直抗力、空気抵抗、斜面との摩擦の4つの力が働いていると考えられる。重力を斜面の接線方向と法線方向に分解すると、重力の法線成分と、向心加速度を生じさせるために必要な力とのつり合いによって垂直抗力の大きさが決まる。

今回の実験については、空気抵抗、レールからの摩擦、ビー玉の回転運動を考えなければ、初速度を測定する場所の高さと終端速度を測定する場所の高さの差が全ての曲線に対して共通であり、ビー玉の重さも一定であることから、重力をレールの接線方向に分解したときの成分のする仕事は全ての曲線において同じであり、ある初速度に対する終端速度は力学的エネルギー保存則より、曲線の形状に関わらず一つの値に定まるはずである。

#### 4-3. 実際の実験への考察

4-2. から、曲線ごとの変換効率の差は空気抵抗、レールとの摩擦、回転運動によって生じるといえる。ここで、空気抵抗によるエネルギー損失は、一般に移動距離が長いほど大きくなるが、曲線の距離が短い逆サイクロイドや逆クロソイドのほうが、曲線の長いサイクロイドやクロソイドよりも運動の方向を変換する効率がよくなかったことから、摩擦の寄与の方が大きいと推測される。

また、回転運動については、本実験ではビー玉の回転数を実際に測定したわけではなく、各曲

線の曲率分布と摩擦によるエネルギー損失をもとにした物理的推論である。

曲率が大きい区間では、向心加速度が大きくなるため、垂直抗力が増加する。それに比例して摩擦力も大きくなる。

一方、ガウス加速器によって曲線部分へ射出されたビー玉は、はじめは滑っているが、レールとの摩擦により徐々に回転を始める。ビー玉の回転運動はレールとの摩擦を小さくする。

これらのことから、曲線上でガウス加速器から遠い側に曲率の大きい区間が位置するほど、回転数が十分に高まっている状態で垂直抗力の大きい区間を通ることになるため、回転運動によって摩擦が軽減され、エネルギー損失が小さくなる。

以上のことから、運動方向の変換効率は、ビー玉が曲率の大きい区間を回転数が十分に高まった後に通過できるかどうかに関係して依存しているのではないかと考えた。

#### 4-4. 各曲線の考察

##### 4-4-1. 逆サイクロイド、逆クロソイド曲線

逆サイクロイド曲線と逆クロソイド曲線は、今回調べた5つの曲線の中で、最も変換効率が低かった曲線と、その次に変換効率が低かった曲線である。これらの曲線はともに曲線の曲率がビー玉が曲線部分に入った段階では大きく、曲線に登るにつれて小さくなっている。したがってこれらの曲線ではビー玉は曲率の大きい区間を回転数が十分に高まらないうちに通過したため、エネルギーが大きく損失したと考えられる。

##### 4-4-2. クロソイド曲線

クロソイド曲線は、今回調べた5つの曲線の中で最も変換効率の高かった曲線である。クロソイド曲線は曲率が一定の割合で増加するため、ビー玉は回転数が十分に高まった後に大きな曲率の区間を通過することになったため、結果としてエネルギー損失が抑えられたと考えられる。

#### 4-4-3. サイクロイド曲線と円弧

サイクロイド曲線は今回調べた5つの曲線の中で3番目、円弧は2番目に変換効率の高かった曲線である。

サイクロイド曲線は、曲線全体の長さのうち前半の5分の4の区間まで曲率が円弧よりも小さく、そこから曲率が大きくなっている。そのため円弧と比べると、曲率の大きい区間を回転数が十分に高まったのちに通過することになるため、変換効率がより高いと考えられる。しかし、実際には円弧の方が、変換効率がより高かった。その理由として考えられるのは曲率の値である。円弧は常に0.033(1/cm)である一方サイクロイド曲線は最終的に0.09(1/cm)まで曲率が大きくなっている。この最後の曲率の大きい区間では急激に向心加速度が増加し、それに伴い摩擦力も増加する。その結果、エネルギー損失が増加しサイクロイド曲線は円弧よりも変換効率が低くなったと考えられる。

#### 5. まとめと今後の課題

結果から、仮説とは異なり最も効率よくビー玉の運動方向を水平方向から鉛直方向へ変える曲線はクロソイド曲線であった。

本研究は、最速降下曲線として知られるサイクロイド曲線を、運動方向の変換効率という観点から評価した点に意義がある。

よって、クロソイド曲線は実際に効率よく水平方向の移動を鉛直方向へ変えることに利点がある装置設計に応用できる可能性がある。

今後の実験については、クロソイド曲線以上の変換効率を示せる曲線の発見や、射出角度を変えた上での水平移動距離の計測などが考えられる。

#### 6. 参考文献

1) 佐藤雅彦・ユーフテラス. (2010). 日常に潜む数理曲線 (pp. 2-5).

2) ウィキペディア日本語版. (2025). クロソイド曲線. Wikipedia.

<https://ja.wikipedia.org/wiki/クロソイド曲線>

3) 株式会社オプライン. 直線上を転動するサイクロイド曲線. OPLiNE.

[https://www.opline.co.jp/expert/heimenzugaku/plane\\_apply4.html](https://www.opline.co.jp/expert/heimenzugaku/plane_apply4.html)

# 双曲面構造の強度を探る

## ～ パスタを構造材料とした模型の鉛直および水平方向に対する強度評価 ～

今井泉 鵜飼留美 坂本有彩 谷口実咲 平田千羽 渡邊美月

### 要旨

本研究の目的は、双曲面の形状が構造の強度にどのように影響を与えるかを調べることである。そこで我々はベニヤ板、パスタ、ストローを用いて、パスタと板のなす角度 $\theta$ および捻る角度 $\phi$ を変化させた双曲面構造の模型を作成し、鉛直下向きおよび水平方向に対する強度を測定した。その結果、両方向の力に対して、 $\phi$ が大きいほど構造の強度が高くなることが分かった。また、円柱構造と比較すると、双曲面構造は水平方向の力に対し強度が高いことが確認された。

### 1. はじめに

双曲面構造とは、神戸ポートタワーに代表される、鼓のような見た目の構造である。神戸ポートタワーとは、後述の「捻る角度」が $135^\circ$ <sup>1)</sup>の展望台で、阪神淡路大震災でも損害をほとんど受けなかったことでも有名である。この双曲面の特徴の一つとしては、主に直線部材で構成されるため、建築に必要な材料が少なく、環境に優しいことがあげられる。また、「ねじると、やっぱり中間に支点のあるこういう波形になる。この時座屈荷重はフラットの場合の5倍になりました。」<sup>2)</sup>と報告されている。このように、部材を捻るようにして建築することで、座屈に対し強くなるということが報告されている。しかし、双曲面構造において、捻る角度や部材の傾きが強度にどのように影響するかについて、定量的に比較した研究は多くない。そこで本研究では、パスタを用いた模型実験により、双曲面構造の形状と強度の関係を明らかにすることを目的とした。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

- ・パスタ(太さ 1.8 mm, 長さ 15.7 cm)
- ・シナベニヤ(約 W900×D900×H4.0 mm)
- ・紙ストロー(直径  $\phi=6$  mm)

- ・グルーガン
- ・アロンアルファ EXTRA ゼリー状(東亜合成株式会社)
- ・卓上ボール盤(京セラインダストリアルツールズ(旧:リョービ)TB-2131)
- ・フォースゲージデジタル 500N ハンドル式計測スタンド付き 縦型(Mxmoonfree)
- ・ばねばかり(TOKYO KAMOSITA 100N・10kg)
- ・iPad(メトロノーム兼動画撮影用)

### 2-2. 研究方法

下の図1のような双曲面構造の模型を作成した。



図1. 双曲面構造の模型

パスタと板のなす角度を $\theta$ と定義した。また、図2のように、真上のストローからパスタをずらして差

し込む角度を捻る角度  $\varphi$  と定義した.  $\theta$  は  $45^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $60^\circ$  の 3 種類,  $\varphi$  は  $112.5^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $157.5^\circ$  の 3 種類で実験を行った. 模型に鉛直下向きに力を作用させる実験と, 水平方向に力を作用させる実験を行い, 模型が破壊されるまでに耐えた最大の力(以降, 強度と呼ぶ)を測定した. 水平方向の実験のみ, 追加で  $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=0^\circ$  の円柱形の模型(以降, 円柱形模型と呼ぶ)を用いた実験も行った.

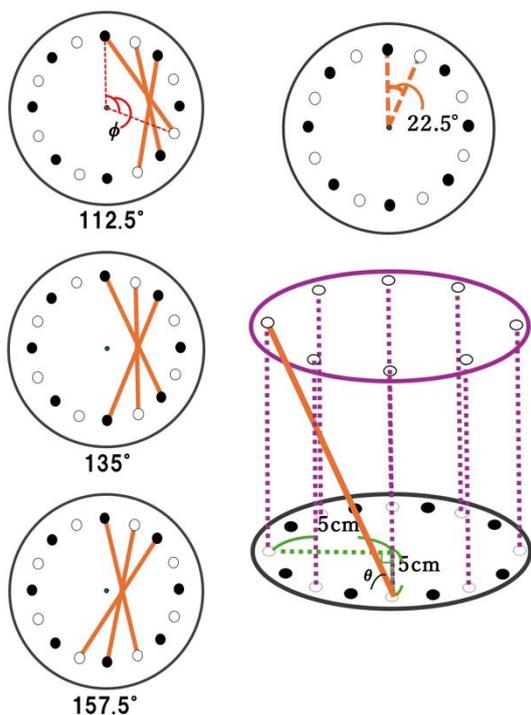


図 2. 捻る角度

●...下面のストロー ○ ...上面のストロー

### 2-2.1. 模型の作成方法

- ① ベニヤ板を円状に切った. 模型の底面は半径  $6\text{ cm}$  で, 上面は表 1 に示す半径に切った. この実験ではパスタの長さが構造の強度に与える影響を考えないようにするため, パスタの長さを一定にした. パスタの長さを一定にすると上面の半径を変える必要があり, これらの半径は, パスタの長さ<sup>2</sup>と底面の半径から余弦定理により求めた.

表 1. 板の半径一覧

$\theta$ ,  $\varphi$  の単位は ( $^\circ$ ), それ以外の単位は  $\text{cm}$

		パスタと板のなす角度 $\theta$		
		$45^\circ$	$55^\circ$	$60^\circ$
捻る 角 度 $\varphi$	$112.5^\circ$	8.5	6.6	5.6
	$135^\circ$	7.8	5.8	4.8
	$157.5^\circ$	7.3	5.2	4.1

- ② 円状のベニヤ板に半径  $5\text{ cm}$  の円を描き, それに沿って円周を 8 等分する位置に点を打った.
- ③ 紙ストローをそれぞれの角度  $\theta$  になるように図 3 のように切り, ②の点に貼り付けた. これをパスタの固定箇所とした.

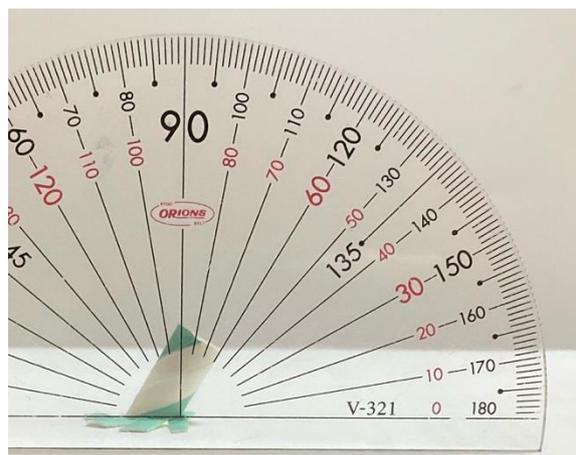


図 3. 模型に用いた紙ストロー

図は  $\theta=60^\circ$  の場合の紙ストローである.

- ④ パスタを  $15.7\text{ cm}$  に切り, グルーガンで 2 本 1 組にして接着した. このペアをストローに差し込んだ. 鉛直にパスタを立てるのではなく, 真上の点から少し横にずれた点に差し込むことで, 双曲面構造が生み出された.

### 2-2.2. 模型に対し鉛直下向きの力をかける実験手順

- ① 模型を図 4 のように, 上面の板の中心に力がかかるようフォースゲージに設置した.
- ② iPad のメトロノームで鳴らす  $100\text{ bpm}$  の音に合わせて, 一拍で一回転するように回転

ハンドルを手動で回した。

- ③ ②の様子を iPad で撮影し、フォースゲージに表示される、強度の数値を読み取った。
- ④ 一つの模型に対し同じ実験を3回繰り返した。  $\theta = 45^\circ, 55^\circ, 60^\circ$ と  $\varphi = 112.5^\circ, 135^\circ, 157.5^\circ$ の計9種の模型で実験した。



図4. フォースゲージに設置した模型

### 2-2.3. 模型に対し水平方向の力をかける実験手順

- ① 模型の上面の板のストローを設置している箇所の外側に、卓上ボール盤で直径4 mmの穴を一つ開けた。
- ② ①で開けた穴にばねばかりのフック部分を通し、図5のようにばねばかりを引っ張った。この時、ばねばかりの延長線上を上面の板の中心が通るようにした。
- ③ ②の様子を iPad で撮影し、ばねばかりが示す強度の数値を読み取った。
- ④ 一つの模型に対し同じ実験を3回繰り返した。  $\theta = 45^\circ, 60^\circ$ と  $\varphi = 112.5^\circ, 135^\circ, 157.5^\circ$ の計6種の模型で実験した。追加で、比較のため円柱形模型の実験を行った。

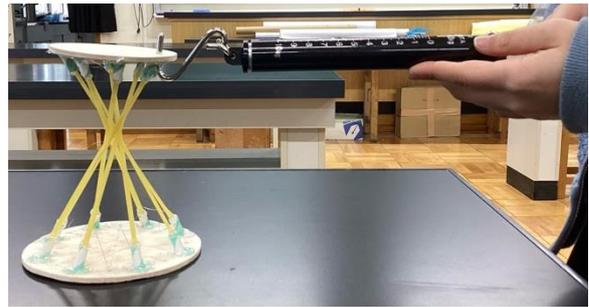


図5. 模型をばねばかりで引っ張る様子

### 2-2.4. パスタのヤング係数を求める実験

- ① フォースゲージを用いて12 cmの長さの pasta 1本を図6のように垂直に立て、鉛直下向きに力をかけた。

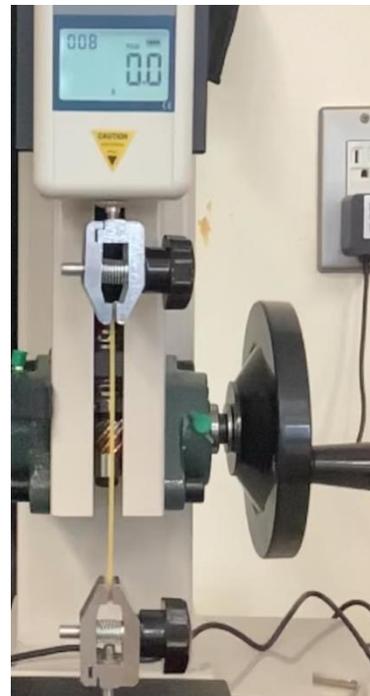


図6. フォースゲージに設置したパスタ

- ② パスタが破壊されるまでフォースゲージで力をかけ、破壊された瞬間の力、すなわち座屈荷重を測定した。
- ③ ①②の手順を3回行い、座屈荷重の平均（以下、 $P_0$ ）をとった。  $P_0 = 3.05$  [N] となった。
- ④ パスタの断面二次モーメント  $I$  を断面二次モーメントの公式<sup>3)</sup>にパスタの直径  $d = 1.8$  [mm]を代入して求め、これを  $I_0$ とした。  $I_0 = 0.515$  [mm<sup>4</sup>]となった。

### 断面二次モーメント I

$$I = \frac{(\text{パスタの直径 } d)^4 \times \pi}{64}$$

### ⑤ 両端固定の座屈荷重の公式<sup>3)</sup>

#### 座屈荷重 P

$$P = \frac{(\text{ヤング係数 } E) \times (\text{断面二次モーメント } I) \times \pi^2}{(\text{パスタの長さ } L)^2}$$

に  $P_0 = 3.05$ ,  $I_0 = 0.515$ ,  $L = 120$  [mm] を代入して求めた結果, パスタのヤング係数は  $E = 3.77 \times 10^3$  [N/mm<sup>2</sup>] と分かった. 以降, 座屈荷重を求める際はこれを利用した.

## 3. 結果

### 3-1. 鉛直下向きに力をかけた実験

図 7 のように, 鉛直下向きに力をかけると, 捻る角度が大きくなるにつれて, 強度がおおよそ 1.5 倍から 2 倍になった. またこの実験では,  $\phi = 112.5^\circ$  から  $157.5^\circ$  に増加させると, 強度は約 1.5~2.0 倍に増加した.

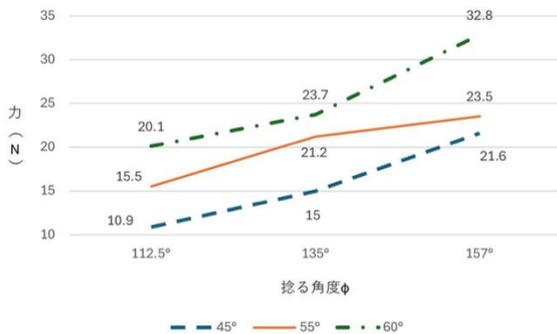


図 7. 捻る角度と強度 (鉛直下向き)

横軸には捻る角度  $\phi$  ( $112.5^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $157.5^\circ$  の 3 種類), 縦軸にはフォースゲージを用いて測定した強度 (単位: N) を示している.

### 3-2. 水平方向に力をかけた実験

図 8 のように, 水平方向に力をかけた実験でも, 鉛直下向きに力をかけた時と同じく, 捻る角度が大きくなるにつれ, 強度が高くなる傾向が見られた. 特に  $45^\circ$  の模型に関しては  $112.5^\circ$  から  $157.5^\circ$  にかけて, 強度が 1.6 倍になった. しかし鉛直下向きに力をかけた時とは反対に,  $60^\circ$  よりも  $45^\circ$  の模型の方が, 強

度が高かった. そして, 円柱形の模型の強度と比較すると,  $112.5^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $157.5^\circ$  のすべての模型について強度が高くなったことが分かる.

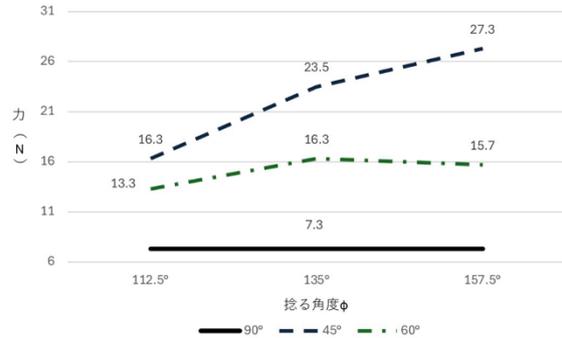


図 8. 捻る角度と強度 (水平方向)

横軸には捻る角度 ( $112.5^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $157.5^\circ$  の 3 種類), 縦軸にはばねばかりを用いて測定した強度 (単位: N) を示している. また円柱形 ( $\phi$  が  $0^\circ$ ) の模型を太線で表している.

## 4. 考察

### 4-1. 鉛直方向に力をかけた実験の考察

結果に示すように,  $\theta$  や  $\phi$  が大きくなるにつれ鉛直方向に対し強度が高くなると考えられる. このような結果になった要因について考える. はじめに, パスタ 1 本分にかかる, 破壊に至るまでの限界の力を  $F$  とし, 図 9 のように, パスタを圧縮する力  $F_2$  と, それに垂直な方向の力  $F_1$  に分解する.

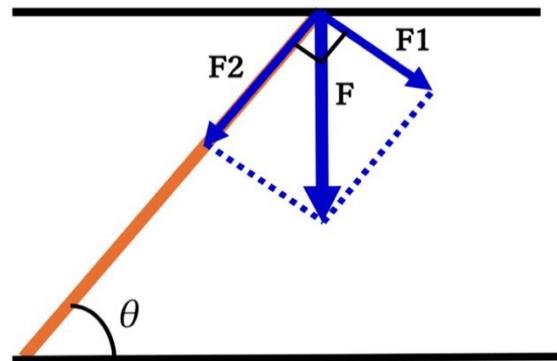


図 9. 模型に垂直にかかった力の分解

### 4-1.1. 破壊機序の特定

構造の強度が高くなった要因を明らかにするために, まず構造の破壊機構を明確にする必要が

ある。

F2による座屈現象を考慮する。座屈現象とは、細長い柱や薄い板などの構造部材が、圧縮力を受けたときに、ある一定の荷重を超えると急激に横方向に曲がってしまう現象のことである。座屈が発生するときの荷重を座屈荷重と呼び、これに達すると部材は破壊される。構造物が座屈によって壊れたかどうかを確かめるため、 $\theta$  が  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ の時のそれぞれのパスタ1本当り座屈荷重を求め、それらを実際に構造が破壊された時のF2と比較した。まず、両端固定の座屈荷重の公式<sup>3)</sup>

#### 座屈荷重 P

$$P = \frac{(\text{ヤング係数 } E) \times (\text{断面二次モーメント } I) \times \pi^2}{(\text{パスタの長さ } L)^2}$$

を利用して座屈荷重を求める。座屈荷重の公式内にあるヤング係数は、材料の変形のし易さ(し難さ)を測るための指標である。「2-2.4 パスタのヤング係数を求める実験」で求めた  $E=3.77 \times 10^3$  [N/mm<sup>2</sup>]を代入してパスタ1本あたりの座屈荷重を算出した。

図 11 は、パスタ1本当り座屈荷重と、実際に計測した  $157.5^\circ$ の時のそれぞれの $\theta$ のパスタ1本当りF2を示している。いずれの場合も座屈荷重が実際のF2よりも大きい。これにより、本実験の破壊は、座屈によるものではなく、また、引張り・圧縮力による破断である可能性が高いと考えられる。

#### 4-1.2. 角度 ( $\theta$ , $\phi$ ) による強度変化の力学的要因

まず  $\theta$  が大きくなるにつれ強度が高くなる理由を考える。パスタが折れた原因の一つとしてF1が考えられる。F1 = Fcos $\theta$  なので、F が等しいとき、 $\theta$  が大きくなるほど、かかる F1 は小さくなる。よって  $\theta$  が大きくなるにつれ強度が高くなると思われる。

次に  $\phi$  が大きくなるにつれ強度が高くなる理由を考える。パスタが折れた原因の 1 つとして、F2

の反作用の力 F2'が考えられる。ただし、板とパスタを接着しているため、板とパスタは一体としてF2'は板とパスタの両方にかかるものとする。図 10のようにF2'を板の接線に平行な方向の力F3とそれに垂直な方向の力F4に分解する。F4は板を回転させないため考える必要はない。一方で、F3は板を回転させる働きを持つ。Fが一定で、 $\theta$ も一定ならば、F3は捻る角度が大きくなるにつれ小さくなる。また、板の半径 r は、 $\phi$  が大きいほど小さくなる。よって、 $\phi$  が大きくなるにつれて、F3×rで求められる偶力モーメントは小さくなる。つまり、板が回転してパスタをねじる力が弱くなるため、 $\phi$  が大きいと強度が高くなると考えられる。

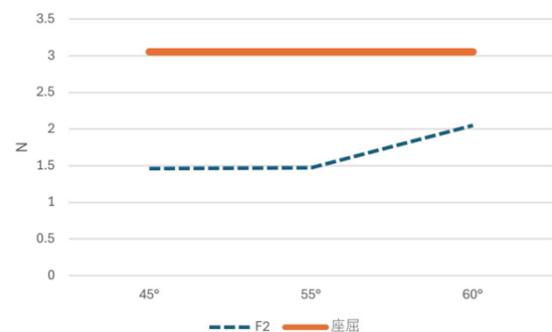


図 11. 座屈荷重と実際に計測した  $157.5^\circ$ の時のそれぞれの $\theta$ のパスタ 1 本当り F2

横軸は $\theta$  ( $45^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $60^\circ$ ), 縦軸は力の大きさを示している。パスタ 1 本当り座屈荷重

#### 4-2. 水平に力をかけた実験の考察

図 8 に示しているように、 $\theta$  が小さくなり、 $\phi$  が大きくなるにつれ強度が高くなると考えられる。このような結果になった要因について考える。

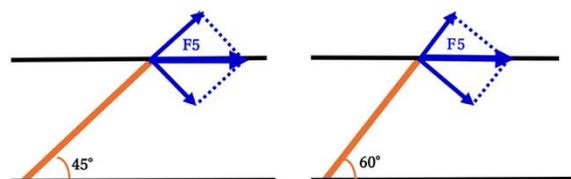


図 12. 模型に水平にかかった力の分解

$\theta$  が小さくなるにつれ強度が高くなる理由について考察する。図 12 に示すように、水平方向に

引く力を  $F_5$  とすると、 $\theta$  が小さいほどパスタに垂直にはたらく力が小さくなる。よって  $\theta$  が小さくなるほど強度は高くなると考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

この実験から、鉛直下向きの力及び水平の力に対し、双曲面構造は  $\varphi$  が大きくなるにつれて強度が高くなることが分かった。

水平方向の実験におけるバネばかりの操作を人力で行ったため、実験条件を完全に統一することができなかった。今後は、力の加わり方を一定にするためにモーターや滑車を用いた装置を導入し、より再現性の高い実験を行う必要がある。

また、模型が壊れる際、 $\varphi$  が小さい模型では接合部付近での破断が目立ち、その傾向は特に  $\theta = 45^\circ$  の模型に水平方向に力を加えた時に顕著であった。今回はパスタが折れた位置を区別せず同じ実験結果として扱った。しかし、角度によって支配的な破壊要因が変化している可能性があり、今後は高速度カメラ等を用いた破壊プロセスの詳細な観察が必要である。

## 6. 参考文献

1) 廣瀬二郎, 発行年不明, 神戸ポートタワーのひねる角度,

[https://clubsetoken.com/cn11/Kobe\\_Port\\_Tower.html](https://clubsetoken.com/cn11/Kobe_Port_Tower.html)

2025. 6. 21 閲覧

2) 特別講義 02 坪井宏嗣氏 (坪井宏嗣孝蔵設計事務所) 講演レポート,

<https://www.ouvi.nu/jyuku/ichinichi/2010/10/04/1004-7.html>

2025. 12. 15 閲覧

3) 浅野清昭, 2017, 改訂版 図説 やさしい構造力学, 学芸出版社

## 7. 添付資料

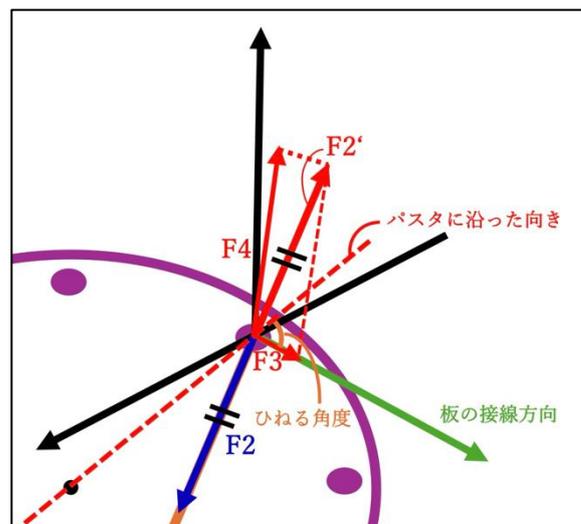


図 10.  $F_2'$  の力の分解

# 回転攪拌流におけるダイラタント流体のトルク応答と

## 冪乗則モデルの適用限界の検証およびその有効モデルの考察

佐々木陽子 中司莉々夏 橋本煌平 洞谷和寿 村井恵伍

### 要旨

本研究では、ダイラタント流体中の回転円柱に作用するトルクの角速度依存性に着目した。これを回転攪拌流を用いた実験モデルにより検証し、ナビエ・ストークス方程式と冪乗則モデルを根拠とする理論モデルの適用限界を検討した。理論モデルとして、トルクが角速度の流動指数乗に比例する関係式を導出した。実験結果を両対数表示で解析したところ、多くの条件で理論モデルと一致するような直線関係が得られ、流動指数は 1 を超える値を示した。一方、ある角速度以上の回転域では直線近似からずれたプロットが観測され、流体内部構造の変化を反映した新たな補正項を加えたモデルの必要性がある、と結論づけた。今後は、冪乗則が有効な角速度範囲についてのより詳しい解析や、補正項を含む数理モデルの妥当性検証が課題である。

### 1. はじめに

剪断応力の増大に伴って見かけの粘性率が増加する液体をダイラタント流体という。代表的な例として、コーンスターチと水を懸濁させた流体があり、この懸濁液は外力に応じて個体のようにふるまう特異な性質を示す。

1)

本研究では、このようなダイラタント流体中で鉛直に挿入した円柱を回転させた際の流体の挙動について理論モデルの構築、および検証実験を行い、理論モデルの適用限界を検証した。そこから、実験結果をもとに適用限界外の有効モデルを考察した。

予備実験より、特定の濃度範囲から外れたコーンスターチ懸濁液の濃度は、沈殿の発生などにより時間経過に伴って不均一となる場合があることが分かっている。このような濃度分布の不均一性が生じると、その試料での質量濃度を定義することが難しい。そのため、本研究では予備実験で明らかになった不均一性が生じにくい濃度範囲(2-4 参照)で実験を

行った。

また、本研究では仮説として、冪乗則モデルから導出される理論モデルは全ての角速度に適用できると考えた。また、流動指数  $n$  は冪乗則の定義上  $n > 1$  となると考えた。

### 2. 研究方法

#### 2-1. 実験概要

本研究では、コーンスターチと水を混合して作成したダイラタント流体中に円柱を垂直に挿入し、一定の角速度で回転させた際にモーターにかかるトルクを測定した。

#### 2-2. 実験装置

##### 2-2-1. 構成部品

実験装置は以下の部品から構成した。

- 攪拌機：IKA MICROSTAR 7.5 control 付属のシャフトを一定速度で回転させることができ、回転時にモーターにかかるトルクを測定することが可能である。
- ジョイント：3D プリンターで作成した。

攪拌機のシャフトと内筒を接続するための部品である。

- 内筒：3Dプリンターで作成した。ダイラタント流体中に挿入し、回転させる円柱である。
- 外筒：3Dプリンターで作成した。ダイラタント流体を保持する容器である。

3Dプリンターで作成した部品の図面を図1に示す。

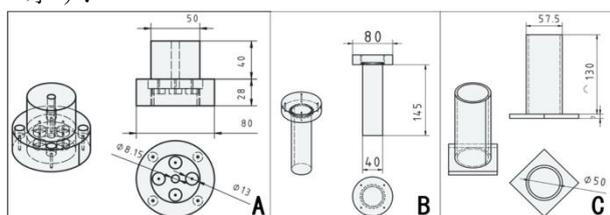


図1. 3Dプリンター作成部品

A: ジョイントの図面 B: 内筒の図面

C: 外筒の図面

### 2-2-2. 組み立て

これらの部品をビスを用いて接続し、図2に示すように組み立てた。組み立てた後、装置全体をスタンドに固定した。

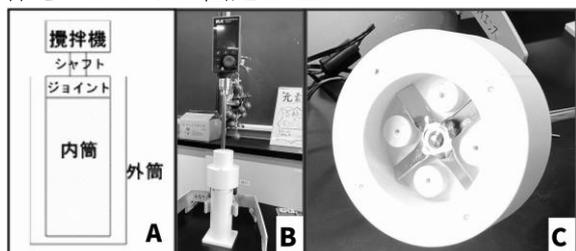


図2. 実験装置

A: 実験装置の模式図 B: 実際の写真

C: シャフトとジョイントの連結部の様子

### 2-3. 実験方法

以下の手順で実験を行った。

1. コーンスターチと水の懸濁液を作成。(濃度がより均一になる様に水に少量ずつコーンスターチを加えて攪拌。)
2. 外筒に混合液を注入。
3. 内筒を回転させ、トルクが一定値(10秒間変動しない状態)にしたときの単位時

間あたりの角速度 [rad/s] およびトルク [N・cm] を記録。

4. 行程4を、トルクが 0.0 N・cm から 9.5 N・cm の範囲(攪拌機測定範囲)となるよう単位時間あたりの角速度  $\pi/3$ [rad/s] 刻みで増加させた。
5. 測定した角速度と対応するトルクのデータを後述の理論モデルに基づいて、流動指数  $n$  を算出。なお、これらのデータ処理および計算は Python を用いて行った。
6. 上記の行程を各実験濃度条件(2-4 参照)について実施。(試行回数:69回)

### 2-4. 実験条件(コーンスターチ懸濁液の精製)

水 50 g に対してコーンスターチの質量を 46 g ~ 52 g の範囲で変化させた複数の試料を用いた。ここで、質量の下限は実験モデルでトルク応答が確認できた最小値、上限は実験終了時に沈殿が確認されない最大値である。この範囲で計 69 回試行を行った。

また本研究では、流体濃度の指標として、調製時の質量濃度[wt%]

$$C_m = \frac{m_{starch}}{m_{starch} + m_{water}} \times 100$$

を用いた。

### 3. 理論モデル

内筒にかかるトルクと、円筒の角速度の関係式を求めることを目的とする。

#### 3-1. 本研究における仮定

理論モデルの成立前提として、以下の条件を仮定する。

- 実験中の流体の濃度分布は時間的にも、空間的にも一定に保たれている。
- 実験中にできる流体の流れは層流である。
- 内筒は一定角速度で回転している。
- 実験装置は軸対称である。
- 実験装置には外力は加わっていない。

- 実験に使用する流体は、非圧縮性流体である。

### 3-2. 理論モデルの導出

#### 3-2-1. 主な物理量の定義

理論モデルの導出に用いる主な物理量を以下に示す。

- $R_i$  : 内筒半径 [m]
- $R_o$  : 外筒半径 [m]
- $\mathbf{v}$  : 速度ベクトル [m/s]
- $v_\theta(r)$  : 円周方向速度 [m/s]
- $v_\theta(\theta)$  : 半径方向速度 [m/s]
- $v_\theta(z)$  : z軸方向速度 [m/s]
- $\tau_{r\theta}(r)$  : 剪断応力 [Pa]
- $\Omega$  : 角速度 [rad/s]
- $n$  : 流動指数 (無次元量)
- $K$  : 粘性係数 [Pa · s<sup>n</sup>]
- $H$  : 接触長さ  
(z軸方向の内筒と流体が接触する高さ) [m]
- $\rho$  : 流体密度 [log/m<sup>3</sup>]
- $\tau$  : 応力テンソル (2階テンソル)
- $\dot{\gamma}$  : 剪断速度 [/s]
- $T$  : 内筒に働くトルク [N · m]

#### 3-2-2. 座標系の定義

本研究の理論モデルは図 3 のような内筒の軸を z 軸とした円筒座標  $(r, \theta, z)$  で考える。

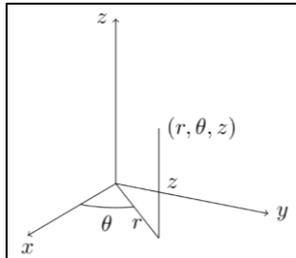


図 3. 円筒座標

#### 3-2-3. ナビエ・ストークス方程式の立式

円筒座標におけるナビエ・ストークス方程式の  $\theta$  方向成分は<sup>2)</sup>,

$$\rho \left[ \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + \{(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}\}_\theta \right] = (\nabla \cdot \boldsymbol{\tau})_\theta \quad (1)$$

(∵ 軸対称だから圧力項は0, 外力がないから体積力も0である.)

(1)の計算をすると

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_r v_\theta}{r} \right) \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} \end{aligned}$$

流れは定常かつ軸対称であり、速度成分は接線方向のみである。この仮定から、以下の関係が導かれる。

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} = 0, \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0, v_r = 0, v_z = 0$$

以上から、

$$(\text{左辺}) = 0, (\text{右辺}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{r\theta}) + 0 + 0$$

$$\therefore \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{r\theta}) = 0 \quad (2)$$

よって、積分定数  $C_1$  を用いて、

$$\tau_{r\theta}(r) = \frac{C_1}{r} \quad (3)$$

#### 3-2-4. 冪乗則モデル、剪断速度定義式の導入

冪乗則モデルを導入して、

$$\tau_{r\theta} = K \dot{\gamma}^n \quad (4)$$

これと(3)より

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}(r) &= \left( \frac{C_1}{Kr} \right)^{\frac{1}{n}} \\ &= Ar^{-\frac{1}{n}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\left( A \equiv \left( \frac{C_1}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \right)$$

また、剪断速度の定義式より、

$$\dot{\gamma} = r \frac{d}{dr} \left( \frac{v_\theta}{r} \right) \quad (6)$$

(5), (6)より、 $\dot{\gamma}$ を消去して、積分する。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr} \left( \frac{v_\theta}{r} \right) &= Ar^{-1-\frac{1}{n}} \\ \frac{v_\theta}{r} &= -Anr^{-\frac{1}{n}} + C_2 \\ v_\theta(r) &= -Anr^{1-\frac{1}{n}} + C_2r \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $C_2$ は積分定数を表す。

#### 3-2-5. 境界条件の導入

本実験では、外筒は固定、内筒は一定角速度で回っており、内筒と流体、外筒と流体の接触部分は共に等速になるため、境界条件は、

$$\begin{cases} v_\theta(R_i) = \Omega R_i \\ v_\theta(R_o) = 0 \end{cases}$$

(7)より,

$$\begin{cases} -AnR_i^{1-\frac{1}{n}} + C_2R_i = \Omega R_i \\ -AnR_o^{1-\frac{1}{n}} + C_2R_o = 0 \end{cases} \quad (8)$$

(8)の下式より,

$$C_2 = AnR_o^{-\frac{1}{n}}$$

これを上式に代入して,

$$A \left( R_o^{-\frac{1}{n}} - R_i^{-\frac{1}{n}} \right) = \frac{\Omega}{n}$$

$$\Leftrightarrow A = \frac{\Omega}{n \left( R_o^{-\frac{1}{n}} - R_i^{-\frac{1}{n}} \right)}$$

### 3-2-6. 内筒に働くトルクの計算

内円筒に働くトルクは,

$$\begin{aligned} T &= (2\pi R_i H) \tau(R_i) R_i \\ &= 2\pi R_i^2 H \tau(R_i) \\ &= 2\pi R_i H C_1 \end{aligned}$$

ここで,

$$A = \left( \frac{C_1}{K} \right)^{\frac{1}{n}}$$

より,

$$C_1 = K A^n$$

だから,

$$\begin{aligned} T &= 2\pi H K R_i A^n \\ &= 2\pi H K R_i \left\{ \frac{\Omega}{n \left( R_o^{-\frac{1}{n}} - R_i^{-\frac{1}{n}} \right)} \right\}^n \\ &= 2\pi H K R_i \Omega^n \cdot \frac{R_o R_i}{\left\{ n \left( R_i^{\frac{1}{n}} - R_o^{\frac{1}{n}} \right) \right\}^n} \\ &= \frac{2\pi H K R_o R_i^2}{n^n \left( R_i^{\frac{1}{n}} - R_o^{\frac{1}{n}} \right)^n} \Omega^n \end{aligned}$$

係数部分を

$$C \equiv \frac{2\pi H K R_o R_i^2}{n^n \left( R_i^{\frac{1}{n}} - R_o^{\frac{1}{n}} \right)^n}$$

とおくと,

$$T = C \Omega^n$$

となる. 両辺の対数をとると,

$$\ln |T| = n \ln \Omega + \ln |C| \quad (9)$$

となる.

以上より理論的には内筒にかかるトルクと内筒の角速度の間に,

$$T \propto \Omega^n \quad (10)$$

という関係が成り立つと示された. 以降は実験で得られた,  $T$ と $\Omega$ のデータからこのモデルを用いて解析を進めていく.

## 4. 実験結果及び考察

以下では, 流動指数の分布の考察, 理論モデルが部分的に適切に現象を記述しているという正当性の確認, 理論モデルの適用限界, 及びその原因考察の4点を, 算出した流動指数や, 得られた直線近似とプロットのずれから考察する.

### 4-1. 流動指数分布

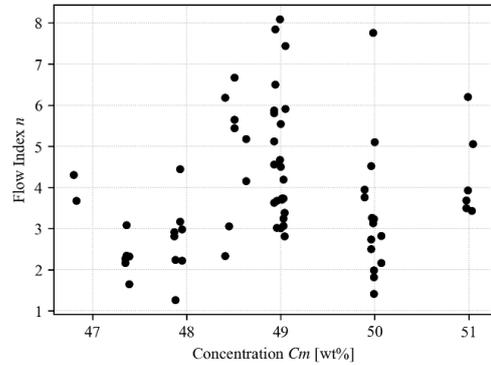


図4. 質量濃度と流動指数

各試行で得られた $T - \Omega$ データについて両対数を取り, 最小二乗法により直線近似を行って流動指数 $n$ を算出した. また使った懸濁液の質量濃度も計算した. また, 図4に各試行ごとの質量濃度と理論モデルを用いて算出した流動指数の関係をグラフにプロットしたものを示す.

図4を参照すると, 同一濃度に分類される試料であっても, 角速度とトルクの対数プロットにおける傾きは一樣ではなく, 試料ごとに明確な差が存在した. この結果だけを見ると, 濃度が同じにもかかわらず流動特性が異なるかのように見える. しかし, 直線近似のずれが大きいものは, データ数が少ないものを除くと, 各質量濃度帯での個々の試料の低 $d$ 速回転域ではほとんど同一の傾きを示して

いた。すなわち、本来は低速回転域では各試料がほぼ共通の性質を示しているにもかかわらず、高速回転域での挙動が試料ごとに異なるため、全測定範囲を一つの直線で近似すると、結果として流動指数が大きくばらついてしまう。このことから、得られた流動指数の違いは濃度そのものの違いではなく、測定前後における試料内部の微細な状態の違いや、回転履歴、および微小な環境条件が測定範囲の中で変化していることによって生じた見かけの差であると考えられる。したがって、流動指数を試料の特性値として厳密に評価するためには、挙動が安定している低速回転域のみを用いて指数を求めるなど、解析範囲を適切に限定する必要があることが示唆される。

#### 4-2. 理論モデルの正当性

本研究では、理論モデルが示すような同心円筒型回転粘度系におけるトルク $T$ が角速度の流動指数 $n$ 乗に比例することを検証した。実験結果を対数表示で整理したところ、全ての濃度条件において高い直線性が確認され、回帰直線の傾きは常に  $n > 1$  となった。これは測定した流体が剪断増粘性を示すダイラタント流体であることを明確に示しており、本研究で採用した理論モデルが本実験系の挙動を良好に記述していることを示す結果である。

計 69 回の試行のうち、プロット数が 5 以下のデータを除いて集計すると、これらのデータは線形に理論モデルを満たすデータと、高速回転域では測定点が近似直線を下回る傾向が現れ線形性を破るデータの二種類に分類できた (図 5, 図 6 参照)。また線形性を破る試料と同じ濃度帯だが理論モデルを満たし線形性の破れが見られないデータも存在した。

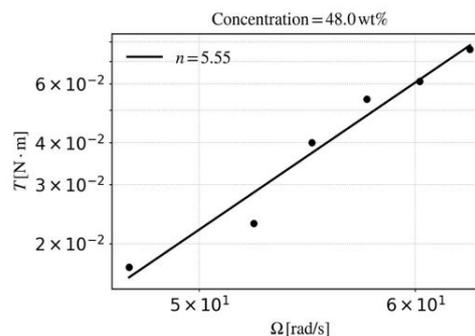


図 5. 理論モデルを満たす試料の角速度とトルクの関係

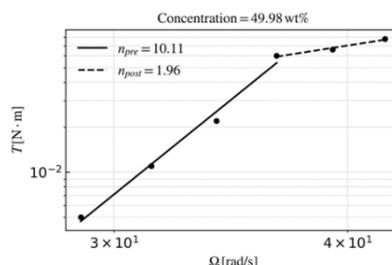
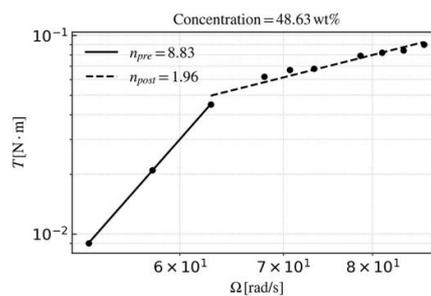
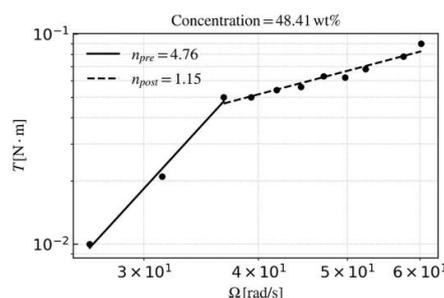
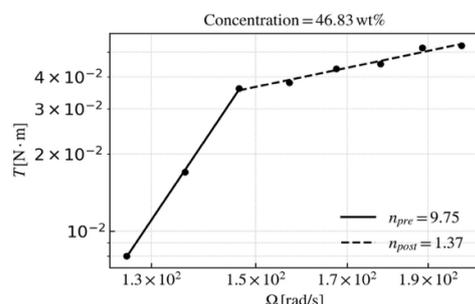


図 6. 線形性を破るデータの閾値前後の角速度とトルクの関係

### 4-3. 適用限界の境界の考察

まず適用限界の境界, すなわち線形性が破れた角速度の点を決定するため, 各試料のそれぞれ全てのプロットを一つずつ閾値として, 前半の低速域と後半の高速域に分け, それぞれで近似曲線を出力し, 各試料で低速域と高速域の傾きの差分が最も大きいデータの閾値をその試料の適用限界点とした.

全ての試料を統計すると, 高濃度帯では適用限界の角速度は小さくなる傾向にあった. すなわち, 高濃度であるほど理論モデルの適用限界の範囲は狭くなる, と結論づけられる. また同じ濃度帯でも線形性を破るデータとそうでないデータがあったことから, 適用限界は濃度以外の要素にも依存する可能性が考慮される.

図7に関して, 閾値を基準に分割したデータの低速域のみを反映した流動指数を算出し, 質量濃度との関係をしるしたもので,  $r_1$  は全ての試料,  $r_2$  は灰色のプロットを除いた試料の相関係数である. これより質量濃度と低速域での流動指数の正の相関は十分強いと言える. このことは, 閾値の設定の正当性を良好に示すとともに, 高速域も含んだ範囲で流動指数を決定する危険性を示唆している.

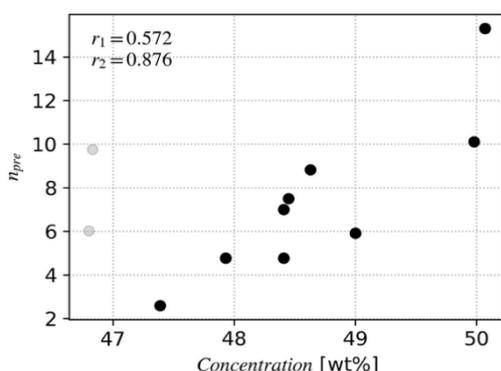


図7. 質量濃度と低速域での流動指数

### 4-4. 高速回転域で粘性が低下する理由

直線近似とデータプロットに大きいずれがある試料のうち多くに共通して観測された重要な特徴として, 高速回転域においてプロット

が近似直線を下回る傾向が挙げられる. これは角速度が増加するにつれて, 回転に対する抵抗, すなわち見かけの粘性が低下していることを意味する. この挙動は, 回転が遅い場合と速い場合とで, 流体内部の状態が異なっていることを示している. 低速回転域では, 流体内部の粒子や成分は比較的安定した配置を保ったまま変形している. しかし回転が速くなると, 内部の配置が次第に乱れ, 粒子同士の結びつきや絡み合いが弱まることでダイラタント性が一時的に失われ, 剪断応力の増加が小さくなる.

その結果, 理想的な冪乗則から外れ, 測定点が直線の下側に現れる. 実際, 提出した全データの多くでこの傾向が共通して見られることから, これは偶然の誤差ではなく, 試料がもつ本質的な挙動であると考えられる. 他にも原因として, ダイラタント性による局所的な粒子破壊・再配列, および内筒表面での滑りなど壁面での効果により, 境界条件や  $y$  であるという理論モデルの仮定が破られた可能性が考えられる.

### 5. 今後の展望(理論モデルへの補正の提案)

本研究では, 多くの試料は十分直線に近似されていたが, 一部の試料において角速度を増加させると, この直線関係から系統的なずれが生じ, 高速回転域では傾きが緩やかになる傾向が観測された. すなわちこの現象は, 本研究での実験データ以上に角速度が速い高速回転域では単純な冪乗モデルでは説明できず, 試料内部の構造状態が回転速度に依存して変化している可能性を示唆している.

この挙動を定量的に表現するため, 本研究では次の補正モデルを導入した.

$$T = K\Omega^n (1 + a\Omega^m)^{-1}$$

このモデルは低速回転域では補正項

$$(1 + a\Omega^m)^{-1}$$

の部分が 1 にほぼ等しく基礎的な流動特性を表現し, 回転数の増加とともに現れる追加的な

効果を表す。この2点を記述し、かつ複雑性が最小限となるようこの項を設定した。特に、高速回転域で傾きが低下するという実験事実は、この補正項によって自然に再現されることが考えられる。実際に今回の実験データを用いて、全パラメータを同時に推定すると係数間の相関が強く、物理的に一意な解が得られないことが判明した。そこで、低速回転域のみを用いて  $K$  と  $n$  を先に決定し、その後に補正項の係数  $a$ ,  $m$  を推定する段階的手法を考案したが、今回は低速回転域のプロットデータが少なく、実行には至らなかった。この方法により、各係数は明確な物理的意味を持って安定に決定され、モデルの再現性も大きく向上することが予測される。

この解析から、仮に一意的にパラメータが推定できれば、低速回転域では流動特性がほぼ一定の構造に支配されているのに対し、回転数の増加とともに試料内部の状態が変化し、流動抵抗の増加率が次第に抑制される、ということが明確になる。すなわちこの場合、本試料の流動挙動は単一の冪乗則では記述できず、回転数に応じて内部構造が変化する多段階的な応答として理解される。また、より高速回転域のデータを用いた場合でもパラメータの  $a$  が十分に0に近いならば、その実験範囲で補正項を無視できるほど十分に流動指数の挙動は冪乗則に従う、と結論づけられる。逆に、パラメータが一意的に定まると結論づけられない場合は、さらなる補正案が必要になる。

## 6. 結論

本研究は、角速度とトルクの関係を単純な冪乗則で扱うことの限界を明らかにした。適用限界について、高濃度のダイラタント流体であるほど、適用限界となる角速度は小さくなることが示唆された。

同時に、ダイラタント流体の流動特性が質量濃度や回転条件によって変化することを実験

的に示した。特に、高速回転域での挙動を考慮せずに流動指数を一意的に定めることの危険性を示した点は、流動特性評価において重要な知見である。

多くの測定データは対数プロット上で高い直線性を示したが、一部の試料の高速回転域では冪乗則からの系統的な乖離が観測され、流体内部の構造変化や境界条件の破れが生じている可能性が示唆された。もしこの挙動が構造緩和を考慮した補正モデルによって一貫して説明可能であれば、本系のレオロジー挙動は、低～中回転域では冪乗則に支配され、高回転域では非線形補正を必要とする二重構造を持つと理解できる。

以上より、本研究は冪乗則モデルの適用限界を実験的に検証するとともに、より有効な理論モデル構築に向けた指針を与えるものである。

## 7. 参考文献

- 1) 後藤康平, 1962. 2 レオロジーとその応用, 共立出版
- 2) 岩柳茂雄, 1971. 8, レオロジー, 朝倉書店

# ツーハーフヒッチはなぜ解けないのか

## ～ 絶対に解けない結び方 ～

隠岐僚太 加嶋伸弥 鳥嶋浩大 彦惣一翔 藤原顕太

### 要旨

ツーハーフヒッチという結び方がなぜ固いかという疑問に摩擦力を用いてアプローチした。摩擦力と荷重は相関関係を持つということを仮説として立て、まず紐間などでの摩擦係数を計測し、次に摩擦をできるだけ小さくした際に紐がどれほどの荷重を耐えうるかを実験した。実験の結果として、実際にかけた荷重が摩擦力におおまかな相関関係をもつことがわかり、ツーハーフヒッチという結び方においてかける力と同時に摩擦力が増幅しているため解けにくいという結論に至った。

### 1. はじめに

ツーハーフヒッチとは、片結びを二回連続して行う結び方であり、「ふた結び」とも呼ばれている。基本的で実用性もある結びであり、外力が加わった状態で解けない結びであると報告されている<sup>1)</sup>。しかし、その「解けにくさ」はどこまでの荷重に耐えられる強度を有するのか、また摩擦や結び目内部で生じる応力や圧縮がどのように関わっているのかについて示された研究は、探しうる範囲の中では見つけられなかった。本研究の仮説は、ツーハーフヒッチでは外力が大きくなるにつれて接触面での摩擦力および結び目内部の圧縮・応力が増加し、その結果として結び目がより強固になるというものである。したがって、この実験で私達が外力に基づく指標との間に相関関係を確認できれば、この仮説は支持される。そこで表面に凹凸の少ないプラスチック製の紐を用いて予備実験を行った。その結果、ツーハーフヒッチは単純な片結びと比較して、より重い荷重でも解けなかった。一方で、紐の摩耗や結び方の手順によって測定結果が変化することが確認された。このことから、結び目の耐荷重を正確に測定するために

は、材料、結び手順、および荷重を統一した上で、繰り返し測定を行う必要があると考えた。本研究では、ツーハーフヒッチに加わる外力と、結び目内部の状態の関係を明らかにすることを目的とした。まずはじめに紐が動き始める瞬間の張力を調べた。錘を用いて一定の荷重を与えた状態で、バネ計りにより紐が滑り始める際の張力を測定し、紐同士の静止摩擦係数を求めた。そして、得られた張力をもとにし、荷重との関係について分析した。その結果を用いて結び目が解ける荷重を測定する実験を行った。

### 2. 材料・研究方法

#### 2-1. 研究試料

本実験では、縄跳びの紐（ポリ塩化ビニル、直径 2.2mm）、錘（50g, 20g, 10g）、バネ計り 2 種類（バネ計りの最大計測量 10kg と 200g）、計量器（小数点 2 桁まで計測可能）、シリコンスプレー、椅子（高さ 35cm, 木製）、ガムテープ、カメラ（iPad）を用いた。

また、実験場所は校内の渡り廊下であり、本実験で記載されている手すりはこの渡り廊下に設置されている金属製の手すりを使用し

た。気温は 28℃、手すりの温度は 20℃であった。

## 2-2. 研究方法

実験①では、紐全体にシリコンスプレーを振り掛けなかった場合の、紐間の最大静止摩擦力、手すりとの最大静止摩擦力、そして、紐全体にシリコンスプレーを振り掛けた場合の最大静止摩擦力についてそれぞれの計測を行なった。実験方法は、高さを 70cm にした椅子を二つ用意して、2cm だけ間隔を空けて並べた。紐を 2 本用意し、1 本は、ガムテープで椅子の上に水平に固定した。もう一方の紐は、長さが半分になる位置に油性ペンで印を付けて、その印が椅子の上に固定されている紐の中央に来るようにもう一方の紐を掛ける。掛けた方の紐の両端に同じ重さの錘 (50g, 100g, 150g) を吊り下げ、片方にはばね計り (最大計測量 10kg) も取り付けた (図 1)。カメラで撮影しながら、ばね計りに少しずつ力を加え続けて引っ張った。中央につけた印が完全に動いたら、動き出した時の力の大きさを動画で確認し、記録した。これをそれぞれの錘の重さで 20 回計測を行なった。その後シリコンスプレーを固定する紐とかける紐の全体に振り掛けた状態でもバネ計りを最大計測量 200g の物に変えて実験を行った。

次に、紐の中央に油性ペンで印を付けて、印が手すりの上に来るように紐を手すりに掛けた。紐の両端に先ほどと同じ重さの錘

(50g, 100g, 150g) を吊り下げ、片方にはバネ計りも取り付けた (図 2)。カメラで撮影しながらバネ計りを、少しずつ力を強めながら引っ張った。中央につけた印が完全に動いたら、動き出した時のばね計りが示している値を動画で確認し、記録するのをそれぞれの重さで 20 回計測を行なった。その後、シリコンスプレーを手すりとの紐の全体に振り掛けた状

態でもバネ計りの最大計測量 200g の物に変えて同様に実験を行なった。

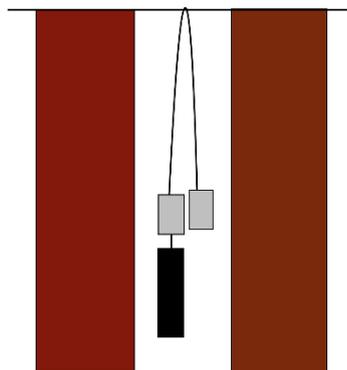


図 1 実験① (紐間)

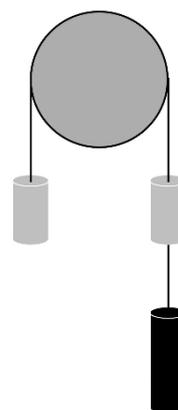


図 2 実験① (手すりとの紐の間)

実験 2 では、紐全体にシリコンスプレーを振り掛けた場合と振り掛けなかった場合において、ツーハーフヒッチが耐えうる重量の測定を行なった。実験方法として手すりに紐を掛けて、ツーハーフヒッチで結びつけた。この時片方の紐の端は結び目から 5cm の長さにし、結び目から 2.5cm の位置に油性ペンでマークをつけ、もう片方の紐の端にはバネ計りをつけた。その後カメラで撮影しながら少しずつ力を強めながら紐につけたマークが結び目に到達するまで引っ張り、到達した時のばね計りの値を確認して、記録するのを 20 回行なった。その後紐と手すりにシリコンスプレーを振り掛けた場合でも実験を行なった。(図 3)



図3 実験②

### 3. 結果

#### 3-1. 実験①の結果

動き出しの値を荷重で割ることで静止摩擦係数を求めた。シリコンスプレーを用いた場合の紐同士の静止摩擦係数の平均は 1.20。シリコンスプレーを用いた場合は少しの力で紐が動いてしまうため正確に測定することはできなかったが、静止摩擦係数は最大でも 0.1 以下であった。各荷重における動き出しの値を図 4 に示す。

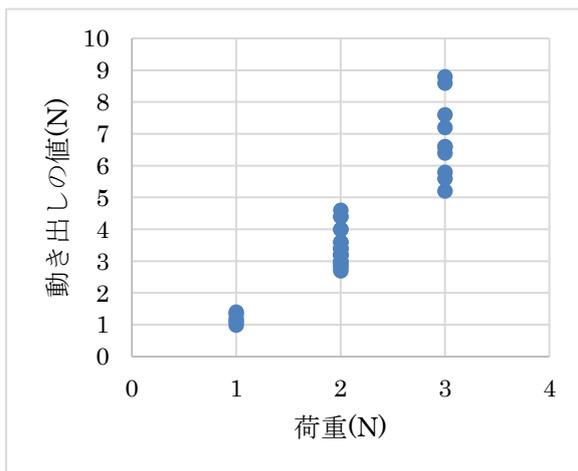


図4 実験①の結果

#### 3-2. 実験②の結果

シリコンスプレーを用いない場合、ツーハーフヒッチは 100N 前後で紐がちぎれたため圧力は測定できなかった。全ての場合において、ツーハーフ

ヒッチが解けることはなかった。同様の実験を、シリコンスプレーを用いて 30 回行った。その値を平均すると 28.4N でツーハーフヒッチは解けた。(図5)

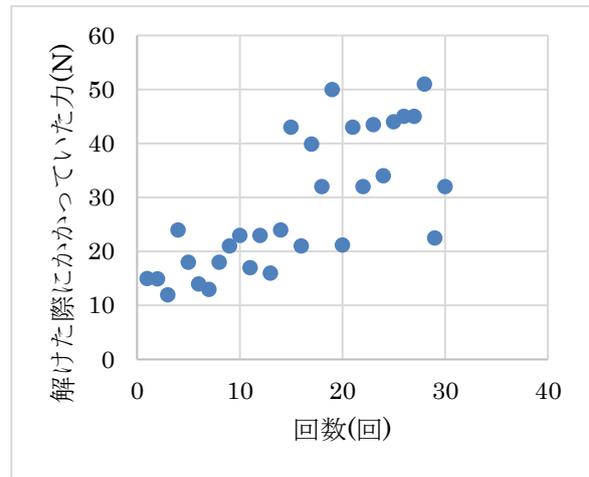


図5 実験②の結果

### 4. 考察

#### 4-1. 仮説との整合性

本研究の仮説は、外力の増加に比例して摩擦および結び目内部の圧力が増大することで、結び目が解けないということ。実験では荷重または摩擦条件を変化させ、動き出しの値、解けた際にかかっていた力を実際に測定した。しかし得られた結果は仮説の予測と一致するものではない。仮に全ての内部圧力が完全に荷重と比例しているのならばツーハーフヒッチは解けないはずである。実際には紐の摩擦によっては解けたため、この仮説は棄却された。

#### 4-2. より強固な結び方

本実験において紐の摩擦によってツーハーフヒッチが解けることが確認された。この結果を踏まえ、より強固な結び方を考案する。ツーハーフヒッチにおける  $\alpha$  が抜けることをここでは解けるとする。

##### (1) 紐と鉄棒間の摩擦を減らす

本実験において荷重と圧力が比例しなかった原因の一つとして紐と鉄棒の間の摩擦が挙げられる。その摩擦は 1 が抜けないよう

に働く摩擦は紐と紐の間の摩擦のみである。そのため紐と鉄棒の間の摩擦は結びの硬さには関係なく、紐にかかる張力を減らす要因となっている。そのため、シリコンスプレーなどを用いて紐と鉄棒の間の摩擦を減らすことでより強固な結び目になると考えられる。

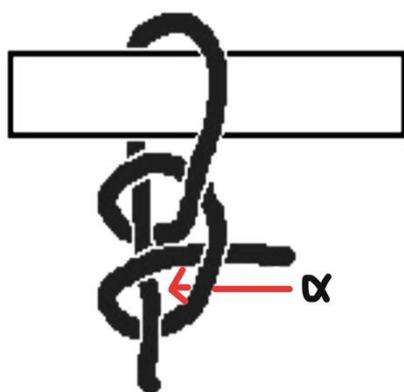


図6 ツーハーフヒッチの模式図

#### (2) $\alpha$ の先端を変化させる

$\alpha$ が抜けない方向に働く力は現状の結び目では紐間の摩擦だけである。紐間の摩擦を増やす方法として $\alpha$ の先をもう一度ひと結びする、1の先を紐と鉄棒の間に挟むなどが挙げられる。これらはどちらも設置面積を増やす方法である。これとは異なる方法として $\alpha$ の先を太くするなどして結び目に $\alpha$ が引っかかる構造にする方法が考えられる。

### 4-3. 実験の失敗とその原因、改善方法

本研究では、ツーハーフヒッチの強度を測定する実験を行ったが、いくつかの課題が残った。まず、摩擦を小さくした条件では紐が非常に小さな力でも動き出してしまい、使用したバネ計りでは正確な測定が困難であった。これは、測定器が微小な力の変化を捉えるのに不十分であったことが原因である。また、ツーハーフヒッチについては、結び目が解ける前に紐が破断してしまい、解ける力を直接測定することができなかった。これは、使用した紐の耐荷重が結

び目の保持力よりも小さかったためである。さらに、バネ計りを手動で引く方法を用いたため、力の加え方や引く速さにばらつきが生じ、測定値の再現性が十分でなかった。加えて、結び目の締め具合や位置を完全に統一することが難しく、結び方の違いが結果に影響を与えた可能性がある。

今後の改善としては、高精度な測定機器を使用すること、より耐荷重の高い紐を用いること、力を一定速度で加えられる装置を導入することが有効である。また、結び目の初期張力や位置を数値化、固定することで、条件をより厳密にした実験が可能になると考えられる。

### 5. まとめと今後の課題

本実験ではツーハーフヒッチが紐の摩擦によって解けることが確認された。しかし、実際にどのような相関関係にあるのかは明らかではない。荷重を変化させ、それごとに紐間の内部圧力を測定することでこれを検証することができると思われる。

### 6. 参考文献

- 1, エキグチ・クニオ『図解ひもの結び方：実用・装飾各種の結び方』1980年 12p

# 指向性のいいメガホンの作り方

木村耕平 清川隼輝 坂田頼謙 杉原実 横川智洋

## 要旨

本論文は紙製のメガホンにおける音の指向性と伝達効率の向上を目的として、メガホンの口径と長さをパラメータとし、様々な形状のメガホンにおける音源と音源から一定距離である複数の地点との音圧の拡大率を比較することにより理想的なメガホンの形状を模索することができる。これにより、災害時等に必要とされる紙製のメガホンに応用することができる。

## 1. はじめに

現代社会においてメガホンは様々な役割を担っている。その中でも防災分野において情報の伝達や避難誘導を迅速かつ正確に行うための簡易的な拡声用のツールとして大きな役割を果たしている。災害時にはインフラの停止や電力供給の断絶などにより電子式の拡声器の使用が困難となる場合が多い。そのため、電源や通信設備を必要とせず音の指向性を確保できる紙製のアナログメガホンは有効な代替手段として利用されている<sup>1</sup>。

従来のメガホンの多くはプラスチック素材であるが、廃棄時の環境負荷や材料の入手の容易さ、コスト面の課題が問題視されている。また、被災地では大量の物資を即時配備することが要求されているため、軽量かつ低価格で環境負荷の小さい資材の利用が望ましい。

紙は調達と加工の容易さ、リサイクル性、コストパフォーマンスに優れており、防災備蓄品としての適性を有していると言える。しかし、紙製メガホンについては形状と材質が音の指向性と伝達性に与える影響が評価されていないため、従来のメガホンの代替品としての適合性は明らかではない。そこで本研究は紙製のメガホンが音の指向性と伝達性に与える影響を実験的に評価し、従来のメガホン

の代替となる拡声デバイスとしての実用性を考えることを目的としている。

私達はメガホンの形状の違いによる音の指向性、伝達性の向上について研究した。本実験で得られた結果から、指向性と伝達性の高い、メガホンの理想的な形状を得ることができる。さらに、音の広がりを調べてメガホンから音がどのように伝達されていくかを研究する。そして、将来的には実験成果をもとにコンピューター上でシミュレーションを行うことで、メガホンを通じた際の音の広がりがどのようなものを明らかにしたい。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

実験場所として、学校の教室 201 を使用した。

また、実験の際は以下のものを使用した。

- スピーカーを設置する教卓(高さ 113cm)
- 厚さ約 0.18mm の厚紙
- メジャー
- スピーカー (BT2602)
- 音圧測定器 (HY1361)
- 吸音材 (発泡ウレタンシート)
- タブレット端末 (iPad A2602)

また、Web サイト「オンライントーンジェ

ネレーター

<https://www.onlinemictest.com/ja/tone-generator/>を使用して、スピーカーから音を流した。

## 2-2. 研究方法

### 2-2-A. メガホンの作り方

厚紙に、 $90^\circ$  の扇形 a，そのなかに同じ中心点でそれより小さい  $90^\circ$  の扇形 b をかいて切り取り，それを台紙として円錐形を頂点付近で水平に切り取ったような形を作成した。この形が今回扱うメガホンの概形である。以下はこの概形を想定したものをメガホンと定義する。

接着は糊代をなくしてセロハンテープで接着している。

扇形 a の半径からの扇形 b の半径を引いた長さを「メガホンの長さ」と定義し，扇形 b の半径を「メガホンの口径」と定義した（図 1）

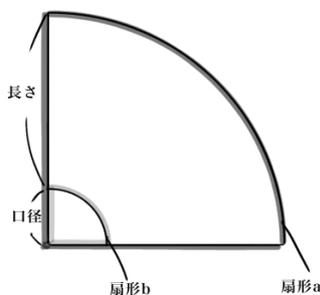


図 1 今回作成するメガホンの台紙

口径と長さはそれぞれ 3 種類ずつ

口径 14 cm，17 cm，20 cm

長さ 20 cm，25 cm，30 cm

用意した

1 種類の口径につきそれぞれの長さで，合計 9 種類（長さ 20 cm・口径 14 cm のメガホン，長さ 20 cm・口径 17 cm のメガホン，長さ 20 cm・口径 20 cm のメガホン，長さ 25 cm・口径 14 cm のメガホ

ン，長さ 25 cm・口径 17 cm のメガホン，長さ 25 cm・口径 20 cm のメガホン，長さ 30 cm・口径 14 cm のメガホン，長さ 30 cm・口径 17 cm のメガホン，長さ 30 cm・口径 20 cm のメガホンの合計 9 種類）のメガホンを作成した。

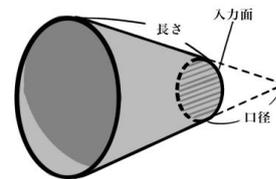


図 2 メガホンの各部分の名称の定義

### 2-2-B. 実験方法

#### 実験 1（図 3）

教卓上にスピーカーを設置し，黒板のある壁の反対側の壁を向けた。

スピーカーから，壁の法線と平行な向きに黒板側から 5 m 測り，その地点を測定点 B とした。

測定点 B から高さ 50 cm 上の地点を測定点 A，測定点 B から高さ 50 cm 下の点を測定点 C とした。（図 3）

オンライントーンジェネレーターを使って周波数 200 Hz，波形が正弦波の音を最大音量でスピーカーから出力した。

音圧測定器を使って各測定点 A・B・C で音圧を測った。

メガホンの口径が 14 cm の場合，スピーカーの出力面の縁にメガホンの入力面（図 2）が一

致するようにメガホンを取り付けた。  
 メガホンの口径が 17cm または 20cm のときは  
 スピーカーとメガホンの間に隙間ができない  
 ようにスピーカーに吸音材を巻きつけてから  
 メガホンを取り付けた。  
 音圧測定器をつかって各測定点 A・B・C で  
 9 種類のメガホンを取り付けた時の音圧をそ  
 れぞれ測った。

### 実験 2 (実験 1 からの変更点) (図 4)

スピーカーが円柱形であるため、スピーカー  
 を設置する際スピーカーを設置する向きを固  
 定するためスピーカーの側面の 1 点に印をつ  
 け、その点が真上になるように設置するよう  
 にした。  
 図 4 のように、スピーカーの接地点を中心にし  
 て B を反時計回りに 30° 回転した点を B1、時  
 計回りに 30° 回転した点を Br に変更した。  
 メガホンの強度を高めるため、同じ形状のメ  
 ガホンを 2 つ作成し、それを重ねて 1 つのメ  
 ガホンとした。

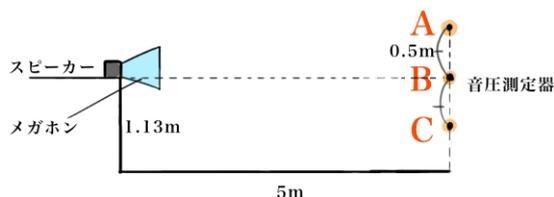


図 3 実験 1 の配置図

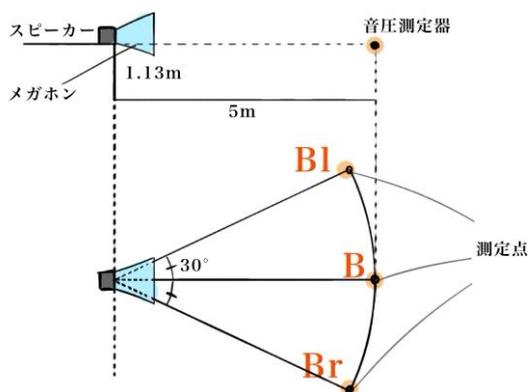


図 4 実験 2 の配置図

## 3. 結果

### 3-1. 実験 1 の結果

表 1 実験 1 の結果

測定点 C (高さ 0.63m)			
口径 (cm)	20	25	30 長さ (cm)
14	1.02	0.98	0.91
17	0.93	1	0.96
20	1.03	0.96	0.99
測定点 B (高さ 1.13m)			
口径 (cm)	20	25	30
14	0.94	0.99	0.94
17	1	0.96	1
20	0.93	1.02	1.08
測定点 A (高さ 1.63m)			
口径 (cm)	20	25	30
14	1.05	1.03	0.95
17	0.89	1.01	0.97
20	1.14	0.99	1.09

表 1 では、測定点 B1, B, Br について、それ  
 ぞれのメガホンの長さや口径に対応する音の  
 拡大率を示している。以下、音の拡大率とは、実  
 験 1 では図 3 に示した B1, B, Br それぞれの地  
 点、実験 2 では図 4 に示した B1, B, Br それぞ  
 れの地点において、メガホンを設置せずにスピー  
 ーカーから出した音を測定した際の音圧の測定値を  
 「1」とした。任意のメガホンを設置した状態での音  
 圧の測定値は、メガホンなしの場合と比べてどの  
 くらい拡大されたかという比を表す数値と定義する。  
 例えば、実験 1 で、高さ 1.63m の測定点において  
 メガホンを設置せずに音圧を測定した際の音圧  
 の測定値を「1」としたとき、メガホンの口径 14cm、  
 メガホンの長さ 20cm のメガホンを設置した状態  
 で、同じく高さ 1.63m の測定点で音圧を測定した際の

音圧の測定値は、「1.02」と表せるということになる。また、音の拡大率を表す数値について、「1」より小さいということは、メガホンを設置したことで、メガホンを設置しない場合に比べて音圧が小さくなったことを、逆に、「1」より大きいということは、メガホンを設置したことで、メガホンを設置しない場合に比べて音圧が大きくなったことを意味する。

表1より、メガホンごとに音の拡大率の結果に傾向が見られなかった。また音の拡大率が「1」を下回った、すなわち、メガホンを設置したことによって、メガホンを設置せずにスピーカーから出した音を測定した際の音圧よりも、音圧が小さくなったという結果になっているものもあった。

### 3-2. 実験2の結果

表2 実験2の結果

測定点 B(中央)			
口径 (cm)	20	25	30 長さ (cm)
14	1.02	1.04	1.05
17	1.05	1.06	1.04
20	1.03	1.02	1.04
測定点 B1(左)			
口径 (cm)	20	25	30
14	1.13	1.19	1.23
17	1.17	1.13	1.21
20	1.18	1.19	1.23
測定点 Br(右)			
口径 (cm)	20	25	30
14	1.09	1.01	1.07
17	1.02	1.03	1.07
20	1.05	1.03	1.07

以下の表2では、測定点 A, B, C について、それぞれのメガホンの長さと口径に対応する

音の拡大率を示している。

表2より、測定点 B1 では9種類すべてのメガホンで音の拡大率が「1.1」よりも大きくなった。測定点 B および Br では音の拡大率は9種類すべてのメガホンで音の拡大率が「1」よりも大きくなったが、音の拡大率が「1.1」よりも大きくなっていることはなかった。このことから、特に測定点 B1 においては、測定点 B および Br と比較して、メガホンを設置したことによって、メガホンを設置せずにスピーカーから出した音を測定した際の音圧よりも、音圧がより顕著に大きくなったということがわかる。また、9種類すべてのメガホンについて、3測定点すべてにおいて、音の拡大率が「1」より大きくなっているということから、メガホンを設置することによって、メガホンを設置せずにスピーカーから出した音を測定した際の音圧よりも、音圧が大きくなったということがわかる。さらに、メガホンの長さが長いメガホンの方が、より音の拡大率が大きくなるという傾向も見られた。

### 4. 考察

実験1の結果は取れたもののどの種類のメガホンも測定結果の幅が大きく、参考にならないような結果が出ていた。また本来メガホンは円心状に広がっていく音を反射することで音波が散らばっていくのを防ぎ、平面波にするはたらきがある。それによって音が伝わる過程でエネルギーが拡散し、音量が小さくなることを妨げる。そのためメガホンがある方が音が大きくなると考えていたが、その予想とは逆の結果、つまり3-1で示しているように拡大率が「1」を下回っている結果が得られており、その原因として音を流さない無音状態でも測定した教室で場所によって差異があったり、スピーカーが経年劣化によって設定した通りの音を発することができていなかったことが原因として考えられる。また、そもそも試行回数が少なかったため正確な値を

得ることができておらず信憑性がなかったため、試行回数を増やす必要がある。また音源から発せられる音は円心状であるが実験1では音源から測定地点である3点は等距離ではなくわずかに差異があることが図3より分かった。同じ距離を進んだ音がどのように変化しているのかを測定するのを目的としていたが、3点とスピーカーの距離に差異があるのなら結果として成り立っていないため、対策として等距離の地点で測るために実験2では等距離の点より条件を揃えるため水平方向とし、実験を行うようにした。

実験2の考察としては、実験1の問題点を踏まえ、スピーカー、測定点の変更試行回数の増加によって拡大率が「1」を超えることはなく、また測定結果からメガホンの長さや口径に関係が見られた。図2にある地点B1を例に挙げると口径14cm、長さ20cmのメガホンと口径14cm、長さ30cmのメガホンの結果を比較すると前者の拡大率は1.13後者の拡大率は1.18と角度が大きくなるにつれて観測できる音圧が高くなっていることからメガホンは長さや口径を変えることによって角度が変わり、表2よりその角度が小さくなるにつれてBで測定した音圧がBr、B1で測定した音圧と比べて大きくなり、また角度が大きくなるにつれてBr、B、B1で測定した音圧はほとんど変わらなくなるように変化した。Br、B、B1の測定点では音源の地点から同心円上にあるのにも関わらず同じ値が取れなかったが、測定した教室の構造上の問題だと考えられる。しかし、同じ測定点での測定には影響がないと考えられるので上記の傾向は間違いないと考えられる。

よってこれらの実験からより指向性が高く伝達効率の良いメガホンを作成するためには口径、長さかのかについて単体で考えるのではなく角度に重点を置くことが重要になると考える。

## 5. まとめと今後の課題

今後の改善策としては、より精密な値を取るために試行回数を増やすことや、ノイズをの除去した環境で計測を行うこと、口径や長さの幅を今回はよりも細かく変更しながら実験を行うことでより適した大きさを調べることなどが挙げられる。またメガホンに使用する材料を変更して実験を行うなど、紙製以外のメガホンにおける音の指向性と伝達効率を高める方法を模索する。

## 6. 参考文献

藤原克樹、永治弘樹、吉村健 音を大きく伝えるメガホンの条件 <https://school.gifu-net.ed.jp/ena-hs/ssh/R03ssh/sc2/22121.pdf>

2025年9月26日閲覧

1)日本ドライケミカル株式会社 防災用品総合カタログ

2025-2026 [https://www.nrdc.org/bio/renee-sharp/1-trillion-social-cost-plastic-united-states?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.nrdc.org/bio/renee-sharp/1-trillion-social-cost-plastic-united-states?utm_source=chatgpt.com)

2026年2月7日

2)Renée Sharp \$1 Trillion: The Social Cost of Plastic in the United States [https://www.ndc-group.co.jp/products/fire\\_protection/fire\\_protection\\_catalog.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.ndc-group.co.jp/products/fire_protection/fire_protection_catalog.pdf?utm_source=chatgpt.com)

2026年2月7日閲覧

令和7年度スーパーサイエンスハイスクール  
研究活動報告集

令和8年3月発行

発行者 京都府立洛北高等学校

〒606-0851 京都市左京区下鴨梅ノ木町 59

TEL 075-781-0020 FAX 075-781-2520