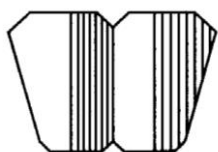


令和4年度指定 スーパーサイエンスハイスクール

令和5年度

# 研 究 活 動 報 告 集

第2年次



令和6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】

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 納豆菌によるアンモニア生成とその有用性.....                | 1  |
| 齋藤さくら・清水雪花・長澤晟行・東口芽倭                    |    |
| どうして色が変わるージュ？ ～唇上で色が変化する口紅の構造の解明～ ..... | 6  |
| 井上瑚子・小畑百佳・高木柚花・津下桃恵・畑埜千聡                |    |
| 豆乳を用いたラムスデン現象の検証 ～より強度の強い膜を作るには～ .....  | 10 |
| 青山琴美・坂元奈直・中島由布子・奈良巴園                    |    |

#### 【生物】

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 豆苗( <i>Pisum sativum</i> )を用いた特異的な枝分かれの発生.....                            | 14 |
| 重松恒希・高嶋紗都・柳井大輝・若木恵麻                                                       |    |
| 環境指標コケを用いた酸性雨緩和物質の調査 ～酸性雨の植物への影響を探る～ .....                                | 19 |
| 磯田真友子・下坂百葉・中村 美咲                                                          |    |
| 微生物による繊維の分解と紙の透明度の関係.....                                                 | 25 |
| 伊藤杏莉・梶井凜音・牧野藍                                                             |    |
| ゼブラフィッシュ <i>Danio rerio</i> の記憶に関する研究.....                                | 29 |
| 北口美古都・船越慈世・山田颯都・渡辺姫菜                                                      |    |
| 矮性ヒマワリ ( <i>Helianthus annuus</i> ) を用いた生育条件の検討<br>～大きなヒマワリを育てるために～ ..... | 35 |
| 檜木弥央・白数麗美・能勢真優                                                            |    |
| 片眼のプラナリア <i>Dugesia japonica</i> による光走性.....                              | 40 |
| 池内秀典・岡本侑也・道明宙也・松浦元樹                                                       |    |

#### 【環境】

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| X による京都観光の分析 .....                         | 44 |
| 岡橋龍司・中井芳樹・吉田侑生                             |    |
| 古都の風景と開発のバランス ～100 年後にも風景を残すために～ .....     | 48 |
| 杉本さらね・和田まい                                 |    |
| マスメディアによる人々の脱毛観のへ変化 ～現代社会を生きる人々の価値観～ ..... | 52 |
| 打田昊己・河嶋悠介                                  |    |

#### 【物理地学】

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| iCool Cool Down iPhone, Get Higher Performance..... | 56 |
| 東孝衛・宮奥創太・宗實孝輔・吉岡拓弥                                  |    |

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| タンポポ型模型を用いた揚力測定及びパラシュート型模型との比較 .....          | 62 |
| 浅賀唯生・久留宮悠大・ドゥヴリーズ輝弥人・濱口晴輝                     |    |
| 音力発電の実用化に関する研究                                |    |
| ～圧電素子を用いた音力発電における設置環境と発電量の関係～ .....           | 67 |
| 田上慶一・塩見理桜・高嶋幸・橋本葵・杵谷和紀                        |    |
| ワイセンベルク効果を利用した粘弾性流体における架橋密度と第一法線応力差間の関係の調査 .. | 73 |
| 小田垣陽人・角濱菜々美・加藤暢啓・近藤咲希・才田遼                     |    |
| 叩く速さと手の大きさが拍手に与える影響 ～模型を用いて拍手のメカニズムを解き明かす～ .. | 81 |
| 青木翔和・木村純平・辻拓真・前田駿輔                            |    |
| 音波を用いた消火における最適な周波数と音圧の決定 .....                | 85 |
| 古仲智貴・平岡義貴・松木亮賢・松田拓真                           |    |

## 【数学】

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| どっちのオークション方法がお得！？ ～ゲーム理論を用いた、オークション方法の比較～ .... | 89 |
| 福田詩奈                                           |    |
| サッカーにおける得点率を上げる方法の考察～Jリーグの試合記録のデータ化～ .....     | 93 |
| 桑原紫櫻・花田壮太・三浦圭以                                 |    |
| 動点による限定空間の充填 ～動く円は平面を埋められるか～ .....             | 97 |
| 田中玲羽・和田泰直                                      |    |

## サイエンス研究（高校3年）

## 【生物】

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| ゼブラフィッシュのビー玉に対する嗜好性 ～魚は底面を見ているのか～ .....       | 100 |
| 井上凜音                                          |     |
| ペットボトル緑茶の大腸菌に対する抗菌作用について ～他の食品添加時の抗菌活性～ ..... | 104 |
| 川本歩乃加                                         |     |

# 納豆菌によるアンモニア生成とその有用性

齋藤さくら 清水雪花 長澤晟行 東口芽倭

## 要旨

本研究では、近年燃料として注目を浴びているアンモニアに着目し、納豆菌による発酵でより多くのアンモニアを作ることを目指す。おからに納豆菌を加え、任意の期間放置し、おから内のアンモニア濃度を滴定によって測定した結果、2日目までは増加したが、3日目以降は増加しないこと、納豆菌の生育に不可欠であるビオチンを多く含む無添加無塩のピーナッツバターを混ぜたもののほうがアンモニアの生成量が多いことが分かった。この生成量の増加がビオチンのみによるものなのかを調べるため、ビオチンのサプリメントを使用し同様の実験を行なったところ、ビオチンのサプリメントを混ぜたものと納豆菌のみのものに差が見られなかった。また、今回の結果より、おからから生成できるアンモニアがどれほど二酸化炭素削減につながるのかを試算した。

## 1. はじめに

地球温暖化が深刻化する現代社会において、脱炭素社会に向け、二酸化炭素を出さない燃料であるアンモニアに注目が集まっている。工業的なアンモニア生成法としては、「ハーバー・ボッシュ法」が主流であるが、この方法では合成時に炭酸ガスが発生してしまう上、エネルギーを大量に消費するため、温暖化ガスを出さない新たな生成法の研究が進められている。そこで我々は、日本人にとって身近な菌である納豆菌(*Bacillus subtilis* var. *natto*)が大豆を発酵させるときに出すアンモニアに着目し、新たなアンモニア生成法の確立を目指した。調べたところ、納豆食品が二次発酵する際に生成されるアンモニア臭を減らす研究は盛んに行なわれているが、アンモニアを増やす研究は見られなかった。本研究では、おからを発酵させる時にアンモニア生成量が1番多くなる条件を調べた。発酵に豆でなくおからを使用する理由としては、多くの量が廃棄されているというおからを用いることで、フードロスの削減につながるのではないかと考えたからだ。

納豆菌によるアンモニアの生成経路についてはグルタミン酸の資化と、尿素回路の二種類であ

ることが明らかにされている<sup>1)</sup>。また、納豆菌の生育にはビタミンB群の一つであるビオチンが必要であり、納豆特有の粘質物(ポリグルタミン酸、PGA)の生成にも密接な関連があることが明らかになっている<sup>2)</sup>。PGAは、納豆菌により分解され、グルタミン酸となることが知られている。そこで、我々はPGAの合成をビオチンによって促進できれば、アンモニアの生成量も増えると考えた。先に行なった実験(以下予備実験)では、おからにビオチンを多く含む食品であるピーナッツバターを混ぜて発酵させた。その結果は図1に示した。するとアンモニア生成量が格段に増加したことがわかった。しかし、ビオチンが完全にアンモニア生成促進に関係しているとは言い切れなかったので、本実験ではピーナッツバターを混ぜるものと、サプリメントのビオチンを混ぜるものとを比較して実験を行なった。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

納豆菌(高橋祐蔵研究所)

おから(伊賀屋食品工業株式会社、市販)

ピーナッツバター(生鮮館なかむら、無添加無塩)

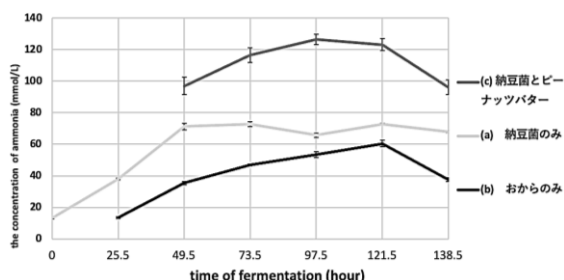


図 1. 予備実験でのアンモニア濃度の変化

おから 25g を (a) ~ (c) の条件下で発酵させた。アンモニア濃度の平均値をプロットし、エラーバーで標準偏差を記した。

持続型ビオチン(DHC, 1錠 0.1 g につき 500

μg のビオチンを含む)

純水(適量)

## 2-2. 研究方法

(1)滅菌 おから 600 g を 3 つの 300 mL ビーカーに均等に入れ、アルミホイルで蓋をし、121 °C, 20 分滅菌した。

(2)納豆菌の調製 10 mL の純水に納豆菌を付属の計量スプーン一杯分入れよくかき混ぜた(以後これを納豆菌溶液とする)。

(3)発酵 フリーザーパックに、滅菌したおから 25 g と純水 25 mL を入れたものを複数用意し、納豆菌溶液を 2 mL 摂取し、何も加えないもの (a'), ピーナッツバターを 20 g 加えたもの (c'), ピーナッツバターを 40 g 加えたもの (c''), ビオチン 1 錠を粉末状にして加えたもの (d), ビオチン 2 錠を粉末状にして加えたもの (d') の 5 種類を作成した。それぞれに空気を充填し、温度を一定に保つことのできる実験用乾燥機内で、約 40°C に保ち 1 ~ 6 日間発酵させた。

(4)アンモニアの濃度の測定 任意の期間発酵させたフリーザーパックに、気体を逃さないよう素早く 100 mL の純水を加えよく混ぜた。その後木綿の布を用いて溶液を絞って濾し、10 倍に希釈した。その後 0.005 mol/L の硫酸を用いてメチルオレンジを指示薬として、フリーザーパック一袋につき、4 回の中和滴定を行ない塩

基の濃度を測定した。その後平均値を算出した。滅菌、発酵の温度等は、先行研究を参考にした<sup>3)</sup>。

## 3. 結果

実験の結果が表 1, グラフ化したものが図 2 である。発酵後のフリーザーパックに水を 100 mL 入れた時点での、溶液中のモル濃度を計算した。(c') は 0 日目から 5 日間滴定を行なった。それ以外は 1 日目から滴定を行なった。

表 1. 発酵時間によるアンモニア濃度の変化  
一番濃度が濃くなった値を斜体字で表示している。

| 時間<br>(h) | (a')<br>(mmol/L) | (c')<br>(mmol/L) | (c'')<br>(mmol/L) | (d)<br>(mmol/L) | (d')<br>(mmol/L) |
|-----------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| 0         |                  | 33.050           |                   |                 |                  |
| 24        | 15.300           | 51.700           | 72.900            | 16.750          | 18.675           |
| 47        | 40.025           | <i>95.800</i>    | 83.800            | 32.050          | 39.350           |
| 71        | 47.650           | 90.900           | <i>107.40</i>     | <i>44.750</i>   | <i>46.000</i>    |
| 93        | <i>59.275</i>    | 91.400           | 89.200            | 43.000          | 42.975           |

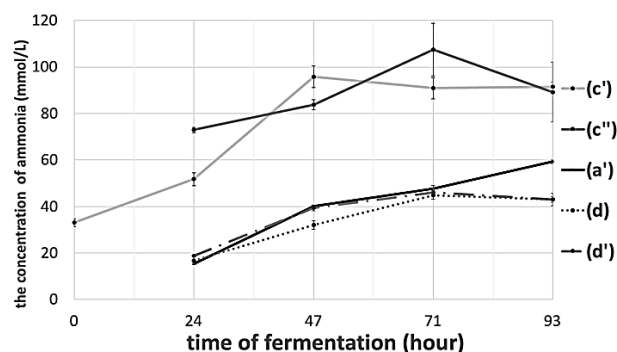


図 2. 発酵時間によるアンモニア濃度の変化

それぞれの平均値をプロットし、エラーバーで標準偏差を記した。

(a') は 5 日間で単調増加した。(c'), (c'') の二つを比べるとアンモニア濃度にそこまで差が見られなかった。(d), (d') については、(a') とほとんど変わらなかった。

(c'), (c'') は、溶液を濾す時に図 3-A のような糸引が確認された。また、(c'), (c'') は、滴定の際に図 3-B のような白い沈殿ができた。

## 4. 考察

### 4-1. 実験についての考察



図3. 実験で見られた生成物の様子

A: (c) の糸引 B: (c) の白い沈殿

結果より, (d), (d') は, (a') とほとんど変わらない変化をしたので, ビオチンがアンモニア生成を促進するわけではないことが分かった. しかし本実験には, ピーナッツバターに含まれるビオチンの量よりも大分多量にビオチンを混ぜたことや, 水溶性ビタミンであるビオチンを粉末状のまま混ぜたことなどいくつか問題点がある. 完全にピーナッツバターのビオチンと条件を揃えられた訳ではないので, これらが要因となってビオチンを混ぜてもほとんど効果がないように見えた可能性もある.

また (c'), (c'') は, 糸引が確認されたことから, 大量に PGA が生成されたと考えられる, ピーナッツバターを混ぜてアンモニアの生成量が増えた理由は, ピーナッツバターのアミノ酸の組成にあると考えた. アンモニア生成に関わるアミノ酸は, 図4の通りである. また, 先行研究<sup>2)</sup>によると, アミノ酸のうち, シスチン, メチオニンは糸引つまり PGA の生成を阻害する. 表2よりわかるように, 茹でた大豆と比べてもピーナッツバターには, アンモニア生成の元となるアミノ酸が多く含まれているのに対し, 大豆に似て, PGA の生成の促進を阻害するアミノ酸が少ない. このような組成がアンモニア生成に良い影響を与えたと考えられる.

予備実験の (a) と本実験の (a') を比較すると, (a) は2日目で上限を迎えたのに対し, (a') は5日目まで増加し続けた. また, 最高値も (a') の方が少なかった. 実験上, 条件は変えていない. 本実験で用いたおからに含まれる

アミノ酸の量が少なかった可能性がある. 発酵期間によるアンモニアの変化は, おから内に含まれるアミノ酸の量によって変化するのではないかと考えた.

(c'), (c'') は誤差範囲が広がってしまった. これは, ピーナッツバターを混ぜた時に見られる沈殿によって, 指示薬の色の変化が見えにくくなっていたからであると考えた. (c'') の方がより多くピーナッツバターを入れていたので, 沈殿の量が多かった. 誤差を考慮すると, (c') (c'') は, 予備実験での (c) の増減とほぼ一致する.

また, 図5に模式的に示した通り, 本実験と予備実験の結果を合わせて考えたアンモニアの増減と先行研究<sup>6)</sup>の PGA の変化の量を重ねてみると, PGA が分解されて量が減っている間にアンモニア濃度も高くなっていく. PGA が最高値になったあと, アンモニアが最高値を迎える. また, PGA が完全に分解され終わる前にアンモニアが最高値を迎えておりそれ以降は増えていない. このことから, 一定期間経つと, PGA が分解されてもアンモニア生成が増えなくなることがわかった. PGA がグルタミン酸に分解された後, アンモニアへの分解が進んでいないと考えられ, グルタミン酸からアンモニアへの分解を促進させることができればアンモニア濃度は増えると予想できる.

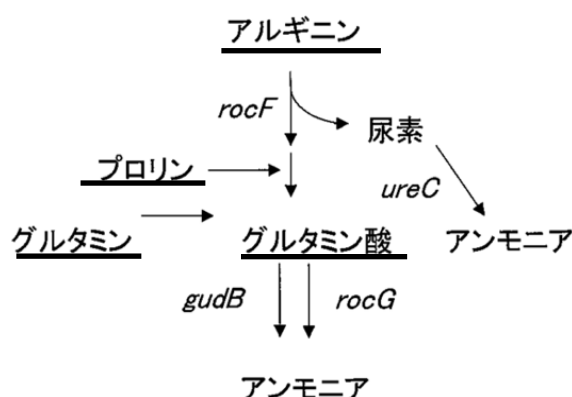


図4. アンモニア生成過程<sup>1)</sup>

納豆菌の系統的育種による商品の差別化と品質向上, 竹村浩, 2014 より引用. アンモニア生成に直接関わるアミノ酸は下線で示した.

表 2. 食品のアミノ酸の量 (mg/可食部 100 g) <sup>5)</sup>

|          | アルギニン | グルタミン酸 | プロリン | メチオニン | シスチン |
|----------|-------|--------|------|-------|------|
| 茹でた大豆    | 1200  | 3000   | 870  | 210   | 220  |
| おから      | 410   | 710    | 340  | 97    | 110  |
| ピーナッツバター | 2700  | 4700   | 1000 | 230   | 290  |

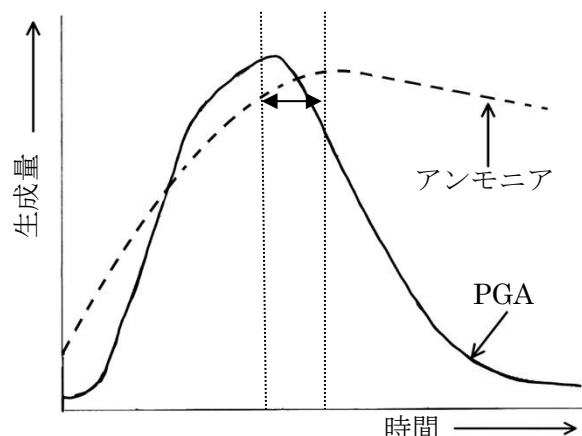


図 5. PGA の量の変化とアンモニアの変化の模式図

生物コーナー納豆菌も納豆粘質物(ポリグルタミン酸)を食べる！, 伊藤義文・木村啓太郎, 2006 より引用, 一部改変

発酵温度については, 先行研究を参考に 40℃で行なったが, 本研究でもアンモニアを生成することが顕著に見られたことから, 適した温度であったと考える。

#### 4-2. 二酸化炭素削減度合いについての考察

本実験の目的は, 納豆菌によるおからの発酵からより多くのアンモニアを生成させ, 二酸化炭素の削減につなげることである。よって, 今回の実験で生成したアンモニアの最大量で, どれほどの二酸化炭素が削減できるのか試算を行なった。

(c”) で, 生成したアンモニアの量はおから 25 g あたり 0.15 g である。参考文献のデータ <sup>78)</sup> から, おからの排出量を 70 万トン, 廃棄率を 9% とし, おからの廃棄量を求めたところ 63000 トンとなった。このアンモニア生成法を用いると, 廃棄されているおからからおよそ

380 トンのアンモニアが生成できる。この生成したアンモニアを発電に使った場合, 経済産業省の発表している資料 <sup>9)</sup> によると, 石炭火力発電で発電した際に排出される二酸化炭素を 760 トン削減することが可能になる。日本の二酸化炭素排出量の 12 億トンと比較すると小さい値ではあるが, 脱炭素化へ貢献できる。

#### 5. まとめと今後の展望

ピーナッツバターを混ぜることで格段にアンモニア生成量は増加した。しかし, ビオチンによるアンモニア生成促進は, 本実験で確認することはできなかった。アンモニア生成量が増える期間は, 発酵させるおからに含まれるアミノ酸の量によって変化することが分かった。また, 40℃で発酵させることでアンモニアを生成させる事が出来ることも分かった。本実験で生み出せたアンモニアから, 二酸化炭素削減量を試算すると, 760 トンになる事が分かった。

今後は, 水に溶かした少量のビオチンで実験を行ないたい。また, ピーナッツバター以外のアミノ酸を加えた場合でも同じように増えるのかも調べたい。アンモニアの生成量を増やすためには, グルタミン酸の分解を促進することが有効であると考えている。

本実験で生成したアンモニアを燃料として活用するためには, 高濃度のアンモニアを気体として取り出す必要がある。我々は, 冷却によりアンモニアを凝縮させることで取り出すことができるのではないかと考えている。アンモニアは, 空気中の他の気体と比べて沸点が -33.34℃ と高いため, 少ないエネルギーで液化することができる。今後は, アンモニア生成量を増やすだけでなく燃料としての活用に向けた実験にも取り組んでいきたい。

#### 6. 参考文献

- 1) 竹村浩, 2014, 納豆菌の系統的育種による商品の差別化と品質向上. 日本醸造協会誌, 109 巻, 2 号, 79-80.

- 2) 藤井久雄, 1962, 納豆菌による粘質物の生成に関する研究(第一報). 日本農芸化学会誌, 36 巻, 12 号, 1000-1001.
- 3) 宮村英宏・竹中陽子・竹中哲夫, 1998, 納豆菌発酵によるおからの改質. 日本食品保蔵科学会誌, 24 巻, 1 号, 38, 41.
- 4) 文部科学省科学技術・学術政策局政策課資源室, 2023. 5, 日本食品標準成分表(八訂)増補 2023 年第 2 章(データ),  
[https://www.mext.go.jp/content/20230428-mxt\\_kagsei-mext\\_00001\\_012.xlsx](https://www.mext.go.jp/content/20230428-mxt_kagsei-mext_00001_012.xlsx), 2024, 1, 15, 2024.1.14
- 5) 文部科学省科学技術・学術政策局政策課資源室, 2023. 5, 日本食品標準成分表(八訂)増補 2023 年アミノ酸成分表編電子書籍第 2 章第 1 表(データ),  
[https://www.mext.go.jp/content/20230428-mxt\\_kagsei-mext\\_00001\\_022.xlsx](https://www.mext.go.jp/content/20230428-mxt_kagsei-mext_00001_022.xlsx), 2024.1.15
- 6) 伊藤義文・木村啓太郎, 2006, 生物コーナー 納豆菌も納豆粘質物(ポリグルタミン酸)を食べる!, 化学と生物, 44 巻, 8 号, 569-572.
- 7) 日本豆腐協会, 2011.12.2, 食品リサイクル法に係る発生抑制
- 8) ミナミ産業株式会社, 2017, おから無排出化による資源の有効活用, 「第 5 回 食品産業もつたいたい大賞」表彰 事例集, 6
- 9) 経済産業省資源エネルギー庁資源・燃料部, 2021. 5, 我が国の燃料アンモニア導入・拡大に向けた取組について,  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/green\\_innovation/pdf/gi\\_006\\_03\\_06.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/gi_006_03_06.pdf), 2024.1.14
- 10) Shuhong Li et al.2013, Soybean Curd Residue: Composition, Utilization, and Related Limiting Factors.International Scholarly Research Notices, 2013, article.

# どうして色が変わる一ジュ？

## ～ 唇上で色に変化する口紅の構造の解明 ～

井上瑚子 小畑百佳 高木柚花 津下桃恵 畑埜千聡

### 要旨

この実験の目的は、唇に塗ると色に変化する口紅の構造を明らかにすることである。実験で用いた口紅は、唇に塗ると緑色から桃色に変化する。私たちは、体温、水分量、pH、エタノール、油の吸収、構造の観察、の6つの観点で実験を行った。この実験の結果、実験で用いた口紅は、緑色に着色した大量の油と、紫色に着色した少量の水の粒で構成されていると結論付けた。

### 1. はじめに

市販の口紅の中に、唇に塗ると色に変化するものがある。これらは一般的に、pH リップと呼ばれている<sup>1)</sup>。口紅の色が変化する要因は、体温、水分量、pHのいずれかだと言われている<sup>1)</sup>。私たちは、緑色から桃色に変化する口紅を用いて実験を行った。この実験の目的は、この口紅の色の変化の原因を明らかにすることである。私たちは、この口紅の色の変化に、pH が関係していると仮説を立てた。口紅の製造中に色調が変化し、皮膚に塗布された後、時間の経過とともに色調が変化する原因については、先行研究がある<sup>2)</sup>が、色の変化を利用した口紅についての研究は見つけることができなかったので、私たちはこの仕組みについて検討する。

### 2. 材料・研究方法

#### 2-1. 研究試料

色に変化する口紅(以下「色変わり口紅」と表記する)、色が変わらない口紅(色変わり口紅の色違いで桃色のもの)、チラシ、和紙、わら半紙、ろ紙、ラップ、あぶらとり紙、50mL ビーカー、こまごめピペット、薬さじ、三脚、金網、ガスバーナー、ガスマッチ、顕微鏡、プレパラート、カバーガラス、0.1mol/L 塩酸、0.1mol/L 水酸化ナトリウム水溶液、99.5vol%エタノール、純水

#### 2-2-1. 実験①

色変わり口紅を、薬さじで少量すくいとり、純水 20mL を量りとした 50mL ビーカーに入れ、混合し、三脚、金網、ガスバーナーを使用し、加熱した。

#### 2-2-2. 実験②

色変わり口紅を、水に浸したろ紙に塗った。また、乾いているろ紙にも塗り、色の変化の様子を比較した。

#### 2-2-3. 実験③

色変わり口紅を、薬さじで少量すくいとり、二箇所に分けてラップにのせ、0.1mol/L 塩酸、0.1mol/L 水酸化ナトリウム水溶液を、それぞれにピペットで数滴滴下した。

#### 2-2-4. 実験④

エタノール 20mL を 50mL ビーカーに量りとり、色変わり口紅を、薬さじで少量すくいとして入れ、溶かした。

#### 2-2-5. 実験⑤

色変わり口紅を、肌、チラシ、和紙、わら半紙、ろ紙、ラップ、あぶらとり紙にそれぞれ塗った。また、圧力をかけてラップに塗り広げた。

## 2-2-6. 実験⑥

色変わり口紅を、葉さじで少量すくいにとって、プレパラート上にのせ、顕微鏡を使って、150 倍の倍率で観察した。また、0.1mol/L の水酸化ナトリウム水溶液を数滴滴下した後の色変わり口紅を観察した。さらに、実験に用いた色変わり口紅の色違いである、色が変化しない桃色の口紅も観察した。

## 3. 結果

### 3-1. 実験①の結果

色変わり口紅を溶かした純水の色は、沸騰する直前に桃色に変化した。

### 3-2. 実験②の結果

色変わり口紅の色は、塗った直後は変化しなかったが、水が蒸発して、紙が乾いていくと、端の方から徐々に桃色に変化していった。また、濡らしていないろ紙は桃色に変化した。

### 3-3. 実験③の結果

色変わり口紅の色は、0.1mol/L 塩酸を滴下しても緑色のまま変化せず、0.1mol/L 水酸化ナトリウム水溶液を滴下したときは、図 1 のように、色変わり口紅が液体状になり、桃色に変化した。

### 3-4. 実験④の結果

色変わり口紅を溶かしたエタノールの色が、図 2 のように、全体的に無色から桃色に変化した。

### 3-5. 実験⑤の結果

色変わり口紅の色は、肌、素材が違う二種類のチラシ、五種類の和紙、わら半紙、ろ紙に塗ったときに桃色に変化した。ラップ、あぶらとり紙では緑色のまま変化しなかった。また、圧力をかけてラップに塗り広げても、変化しなかった。

### 3-6. 実験⑥の結果

色変わり口紅の中に、図 3 のように、桃色の粒

と多くの紫色の粒が見えた。カバーガラスを指で動かし、粒同士をぶつけても一つに合わさることはなかった。このプレパラート上の口紅に、水酸化ナトリウム水溶液を滴下すると、図 4 のように、紫色の粒が桃色の粒に変化した。このとき、桃色の粒は元の紫色の粒よりも大きかった。その後、図 5 のように、粒は見えなくなって、全体が桃色に見えた。色が変わらない口紅を観察したときは、図 6 のように、粒は見えなかった。

## 4. 考察

実験①の結果から、色変わり口紅を構成する固体の油の融解が、色変わり口紅の色の変化を引き起こしたのだと考えられる。しかし、色変わり口紅を溶かした純水の色が人間の唇の温度である 36℃付近で変化せず、100℃付近になるまで変化しなかったことから、体温は色変わり口紅の色の変化に関係がなかったといえる。

実験②の結果では、濡らしたろ紙の場合、紙に油が吸収されなかったため、色変わり口紅の色の変化がなかったのだと考えられる。

実験③の結果から、色変わり口紅に水酸化ナトリウム水溶液を加えると、図 7 のように、けん化が起こり、油脂が、脂肪酸ナトリウム塩とグリセリンに変化し、色変わり口紅の色の変化を引き起こしたのだと考えられる。

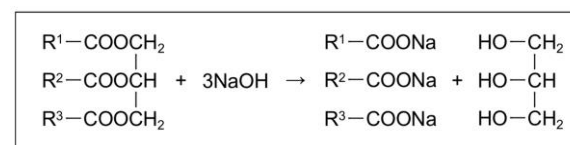


図 7. けん化

油脂に水酸化ナトリウム水溶液を加えると、  
脂肪酸ナトリウム塩とグリセリンに変化する

一方、人の唇は弱酸性であるにも関わらず、酸性の塩酸を加えた時に色変わり口紅の色の変化がなかったことから、pH は色変わり口紅の色の変化に関係がなかったといえる。

実験④の結果では、エタノールが油を溶かす性質を持つことが、溶液の色の変化に関係してい

ると考えられた。

実験⑤の結果から、肌や紙など他の物質に油が吸収された場合、色変わり口紅の色が変化しただと考えられる。また、ラップの実験から、圧力をかけて色変わり口紅を塗り広げるとは、色変わり口紅の色の変化に関係がなかったといえる。あぶらとり紙は、油を表面にくっつけて固定する性質を持つため、変化しなかったといえる。

実験⑥の結果から、色変わり口紅の中には、紫色の粒が存在していると考えられる。また、その粒は立体構造をもち、衝撃では変化しなかったといえる。この実験から、図 8 のように、色変わり口紅の中に存在する紫色の粒の成分は水、粒を取り囲む物質の成分は、多量だったことから、色変わり口紅の主成分である油、となっていると考察する。水は極性を持ち、油は極性を持たず、混ざり合わないため、紫色に着色された少量の水は、緑色に着色された油の中に、粒のような状態で、分散して存在していると推察できる。水酸化ナトリウム水溶液を加えた際は、油脂のけん化が起こって、図 7 のように、脂肪酸ナトリウム塩へと変化したため、図 9 のように、水と油が混ざり合おうとし、粒の構造が壊れ、水と共に色素が油に溶け出したのだと判断できる。その結果、色素の濃度が低くなって、色が濃く紫色に見えていたのが薄くなり桃色に見え、口紅の色が変化したように見えたのだと考察した。

## 5. まとめと今後の課題

実験で用いた色変わり口紅は、図 8 のように、緑色に着色した大量の油と、紫色に着色した少量の水の粒で構成されていると結論付けた。色変わり口紅の色の変化は、その粒の構造が壊れ、水に溶けていた色素が油に溶け出し、色素の濃度が低くなることによって起こると考えられる。ただし、衝撃をかけるだけでは変化せず、油の層の性質を変えるか、油を取り除く必要があるといえる。

新たな疑問としては、実験で用いた色変わり口紅を様々な人の手の甲に塗った結果、年齢が若

いほど速く色が変化した点が挙げられる。年齢と肌の質によって色が変わる速度が変わるのかについて調べるのが今後の課題である。製造会社は、pH や温度で口紅の色が変化すると発表しているが、今回の実験ではそのような結果にはならなかった。私たちが行った実験は完全な対照実験とはなっていないため、今後は唇の上で本当にこの変化が起こっているのかを調べたい。どうすれば色が変わる口紅が作り出せるのかを調べること、本当に pH や温度で色が変わるかどうかを正確に調べられると考える。

## 6. 参考文献

- 1) コレシル, 2021.10.29, 唇の pH 値や水分量で色が変わるリップがある? 色が変わる仕組みとおすすめリップ 5 選,  
<https://collesiru.jp/beauty/6247/>, 2023.7.14
- 2) Felix Lachampt and Charles Zviak,  
NOVEL LIP COLORING COSMETICS  
AND METHODS OF MAKING SAME.  
United States Patent Office,  
US3662061A, 1972.May.9

## 7. 添付資料

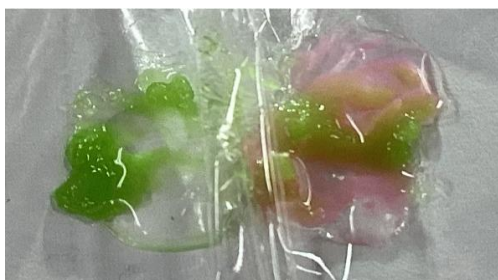


図 1. 実験③の結果（写真）

ラップ上の口紅の塊に 0.1mol/L 塩酸を加えたもの（左）と、色変わり口紅に 0.1mol/L 水酸化ナトリウム水溶液を加えたもの（右）



図 2. 実験④の結果（写真）

50mL ビーカーにエタノール 20mL を量り取ったもの（左）と、それに色変わり口紅を加えて溶かしたもの（右）



図 3. 実験⑥の結果 1（写真）

色変わり口紅を顕微鏡で観察したもの

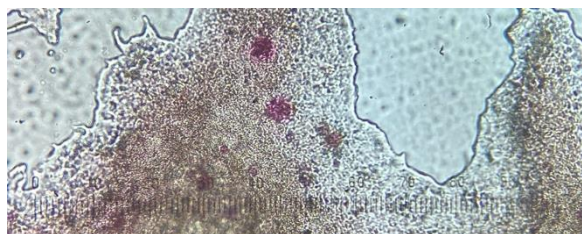


図 4. 実験⑥の結果 2（写真）

色変わり口紅に 0.1mol/L 水酸化ナトリウム水溶液を加えて、顕微鏡で観察したもの

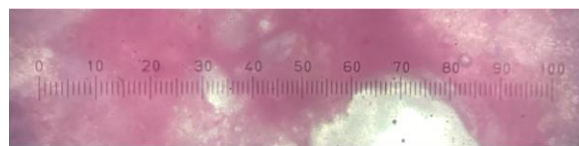


図 5. 実験⑥の結果 3（写真）

図 4 からさらに時間が経ったもの

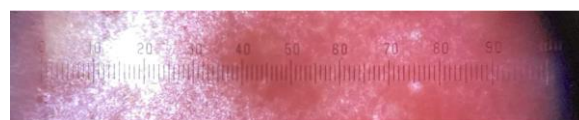


図 6. 実験⑥の結果（写真）

色が変わらない口紅を顕微鏡で観察したもの

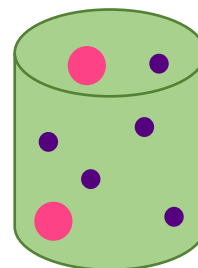


図 8. 実験で用いた色変わり口紅の模式図

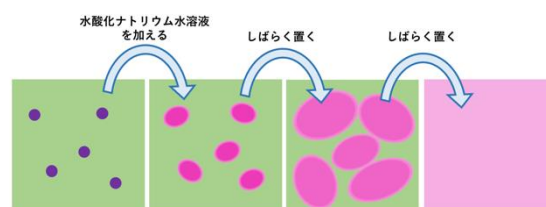


図 9. 色変わり口紅の色の变化過程  
口紅に水酸化ナトリウム水溶液を加えた際の  
口紅の中の紫色の粒の構造の変化

# 豆乳を用いたラムスデン現象の検証

## ～ より強度の強い膜を作るには ～

青山琴美 坂元奈直 中島由布子 奈良巴園

### 要旨

本研究の目的はラムスデン現象を利用して強い膜をつくることである。

研究方法は、何も加えない豆乳と、豆乳 100mL に様々な物質を加えて混ぜたものを 70℃に温めたウォーターバスで 40 分間湯煎して表面にできた膜の強度を測定した。

タンパク質の割合を増やした液体からできた膜と、繊維質の物質を加えた液体からできた膜は何も加えていない豆乳からなる膜よりも強くなり、脂質の割合を増やした液体からできた膜は弱くなった。また、表面からの水分の蒸発量が減るとできる膜は弱くなる傾向があった。

### 1. はじめに

牛乳や豆乳を温めると膜ができる。これは、図 1 にかかれているように、牛乳を温めることで表面の水分が蒸発し、表面のタンパク質が脂質を包み込みながら熱凝固したものである。これをラムスデン現象という。<sup>\*1, \*2, \*3</sup> 近年、食品用ラップには炭素、水素の他に塩素が含まれているため、燃焼した時のダイオキシンの発生が懸念されている。私たちはこのラムスデン現象に着目して、より強度の強い膜をつくることで環境、人体に対してともに安全な植物性のフィルムを作ろうと考えた。

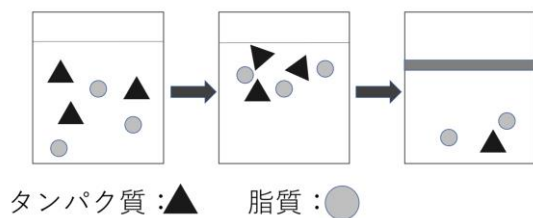


図 1 ラムスデン現象

図 1 のように、ラムスデン現象では溶液表面のタンパク質が熱変性し脂質を巻き込んで膜が形成されるため、膜の強度には溶液中の脂質

やタンパク質の割合、水分量などが関係していると考え、それら进行操作した。

1 回目の予備実験では、豆乳と牛乳を 50mL ビーカーに加えたものを 2 つずつ用意し、それぞれガスバーナーと約 70℃に温めたウォーターバスで 30 分間湯煎した。結果はどちらも豆乳の方がより強い膜ができた。1 回目の予備実験では豆乳も牛乳も蒸発して少なくなってしまうので、2 回目の予備実験では、豆乳と牛乳を 100mL に変えて、1 回目と同じよう湯煎した。結果は 1 回目と同じで豆乳の方がより強い膜ができた。これらの結果から豆乳のみを用いることに決めた。3 回目の予備実験では直火と湯煎の二つの方法で加熱し、よりとりやすく形の良い膜のできた湯煎を採用することにした。4 回目の予備実験では豆乳 100mL にバター 1.9mL を加えることによって、豆乳中の脂質の量を増やし 1 回目、2 回目と同様に湯煎した。できた膜には多数の穴が空いており強度は非常に低かった。そのため、本実験では脂質の量を調整する際にはヤシ油を使用することとした。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

実験 1 では全てキッコーマン社の調整豆乳を用いた。それに加え、実験 1 でヤシ油と豆乳にヤシ油を溶かすための乳化剤として洗剤(花王社, キュキュット), 実験 2 でゼラチン, 実験 3 で寒天, 実験 4 で塩化ナトリウム, 実験 5 で高吸水性ポリマー(ポリアクリル酸ナトリウム)を用いた。また, 豆乳と溶質を加えるビーカー, 豆乳を湯煎するためのウォーターバス, 膜の強度を測定する装置は図 2 のようにスタンドにクリップを吊るし, 膜をはさみ, そこにペットボトルを切り取って作った容器を吊るしたもので, その中に膜が破れるまで水を入れて強度を測定した。



図 2 膜を測定する装置

### 2-2. 研究方法

ビーカーに豆乳を 100mL 入れ湯煎した。

実験 1 ではビーカーに豆乳を 100mL 入れ, ヤシ油を 0.25mL, 乳化させるための洗剤を 0.75mL 加えて攪拌した後湯煎した。

実験 2 ではビーカーに豆乳を 100mL 入れ, ゼラチンを 0.1g 加え, ガラス棒では混ざりにくかったため, スターラーを使い攪拌した後湯煎した。

実験 3 ではビーカーに豆乳を 100mL 入れ, 寒天を 0.1g 加え攪拌した後湯煎した。

実験 4 ではビーカーに豆乳を 100mL 入れ, 塩化ナトリウムを 0.6g 加え攪拌した後湯煎した。

実験 5 ではビーカーに豆乳を入れ, 高吸水性ポリマーを 0.15g 加えて湯煎した。

なお, 湯煎は全て約 70°C に熱したウォーターバスで 40 分間行った。

それぞれの実験で生成した膜を, 2L ペットボトルを半分切断した下側を爪楊枝で結びつけたクリップで挟み, ペットボトルに駒込ピペットで水を入れて膜が破れるまでの量を測定した。膜が破れるまでにペットボトルに入った水の質量を強度とし, 豆乳のみから生成した膜と実験 1 から実験 5 で生成した膜の強度を比較した。

## 3. 結果

豆乳のみから生成した膜の強度の 8 回の平均は 241.4g であった。

### 3-1. 実験 1 の結果

ヤシ油を加えた豆乳の膜の強度は 95.3g で, 何も加えていない豆乳の膜よりも弱かった。膜の形状は歪で小さかった。

### 3-2. 実験 2 の結果

ゼラチンを加えた豆乳の膜の見た目は堅く, 何も加えていない豆乳の膜よりも分厚かった。強度は 1 回目の実験で 168.2g, 2 回目の実験で 562.7g で, 1 回目は何も加えていない豆乳よりも少し強度が下がったが, 2 回目は 2 倍以上の強度となった。

### 3-3. 実験 3 の結果

寒天を加えた豆乳の膜の強度は 364.7g で何も加えていない豆乳よりも強かった。膜の見た目は何も加えていない豆乳とほとんど同じだ

った。

### 3-4. 実験4の結果

NaClを加えた豆乳の膜の強度は40.2gで何も加えていない豆乳よりもはるかに強度が弱かった。膜には、ポツポツとした小さな気泡がたくさんみられた。

### 3-5. 実験5の結果

高吸水性ポリマーを加えた豆乳の膜の強度は397.7gで2回目のゼラチンを加えた豆乳の次に強度が強かった。膜はどの膜よりも分厚かった。以上の結果を図4に示す。

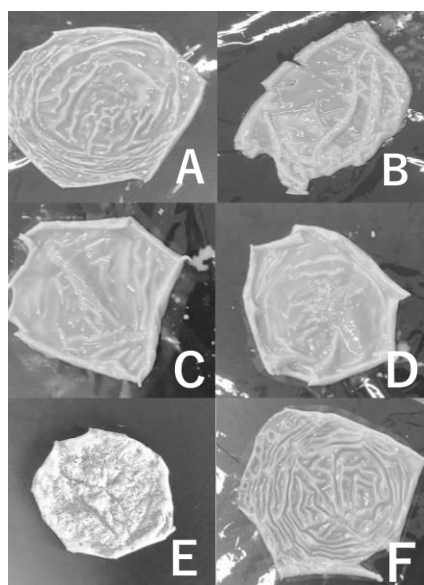
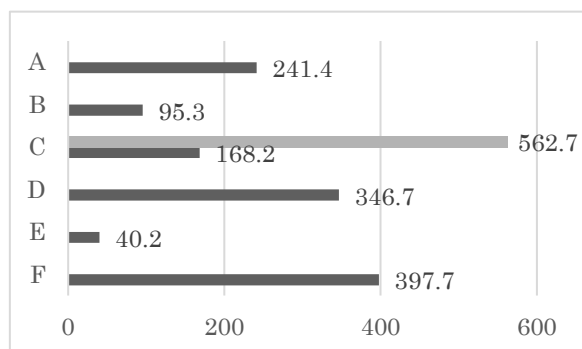


図3 膜の写真

A: 豆乳のみ    B: ヤシ油と豆乳  
C: ゼラチンと豆乳    D: 寒天と豆乳  
E: NaCl と豆乳    F: 高吸水性ポリマーと豆乳



強度（加えた水の質量）[g]

図4 強度の比較

## 4. 考察

実験1では脂質が主成分であるヤシ油を加えたため、豆乳内に含まれる脂質の割合が相対的に高くなる。よって実験結果から、豆乳の中に含まれる脂質の割合が高くなると、生成される膜の強度は弱くなることがわかった。実験2では繊維状タンパク質であるコラーゲンを多く含むゼラチンを加え、実験3では食物繊維を多く含む寒天を加えたため、相対的に繊維状物質の割合が高くなっている。

また、実験2では1回目の実験で使用した豆乳は開封してから2ヶ月以上経過していたため、豆乳に含まれるタンパク質が分解してペプチドになっていた可能性があるのではないかと考えられる。そのことを考慮すると、豆乳の中に含まれる繊維状タンパク質の割合が低くなると、生成される膜の強度は弱くなると考えられる。

実験4では塩化ナトリウムを豆乳に溶かし、希薄溶液にすることで蒸気圧降下や沸点上昇、水和物の生成により液面からの水の蒸発量が減り豆乳中や豆乳の表面の水分量が相対的に増加したため、生成される膜の強度は低下すると言える。

実験5において加えた高吸水性ポリマーは水分を保持する性質を持ち網目状の構造をとっている。実験4と実験5の結果を比較して膜の強度は液面から蒸発する水分量の減少による影響よりも繊維状の構造を持つ物質が与える影響の方が大きいと示唆される。

予備実験で用いた牛乳には食物繊維は含まれていない一方、豆乳には100mLあたり0.1gの食物繊維が含まれており<sup>4,5</sup>、生成された膜の強度は豆乳からできたものの方が高かったことから、繊維状の物質が膜の強度を高めていると考えられる。

これらのことから、強度の高い膜を生成するには豆乳に繊維状の構造を持つ物質を加えることが有力であると考察される。

## 5. まとめと今後の課題

研究から繊維状の物質を加えて熱し膜を生成すると強い膜ができることがわかった。今後の課題としては、膜の厚さを測ること、長期保存を可能にすること、気温や湿度などできる膜の関係を調べること、豆乳の古さとできる膜の関係を調べる事が挙げられる。

## 6. 参考文献

\*1 日本乳業協会, 2021.07, 乳と乳製品のQ&A,  
[https://nyukyou.jp/dairyqa/2107\\_005\\_475/](https://nyukyou.jp/dairyqa/2107_005_475/),  
2023.09.22 閲覧

\*2Study-Z 編集部, 牛乳に白い膜? 「ラムスデン現象」って何? 現役講師がわかりやすく解説, <https://study-z.net/100066818>,  
2023.11.20 閲覧

\*3 大阪教育大学, 牛乳の膜の形成に影響を与える条件,  
[https://f.osaka-kyoiku.ac.jp/tennoji-h/wp-content/uploads/sites/5/2022/02/化学\\_r09.pdf](https://f.osaka-kyoiku.ac.jp/tennoji-h/wp-content/uploads/sites/5/2022/02/化学_r09.pdf),  
2023.09.22 閲覧

\*4 キッコーマン社, キッコーマン調製豆乳, <https://www.k-tounyu.jp/lineup/89/>,  
2024.01.26 閲覧

\*5 日本食品標準成分表, 食品詳細 01.一般成分表-無機質-ビタミン類,  
[https://fooddb.mext.go.jp/details/details.pl?ITEM\\_NO=13\\_13003\\_6](https://fooddb.mext.go.jp/details/details.pl?ITEM_NO=13_13003_6), 2024.02.02 閲覧

# 豆苗(*Pisum sativum*)を用いた特異的な枝分かれの発生

重松恒希 高嶋紗都 柳井大輝 若木恵麻

クローバーは葉の原基が傷つくことで 4 葉となるという説があるが、これがクローバーのみに発生するかは不明確である。そこで本研究はクローバーと同じ豆科である豆苗を用い、傷による人工的な枝分かれを発生させることを目的として行った。傷をつける位置は茎頂部に位置する原基と茎の最下部に位置する脇芽の 2 つに設定し、それぞれについて実験を行った。結果、茎の最下部の脇芽を傷つけることによる枝分かれの発生はほぼ確認できず、一方で茎頂部の原基の傷を傷つけることによる枝分かれの発生は多く見られた。よって原基の傷による枝分かれの発生は、必要な条件はあるもののクローバー以外にも見られるものと考えられた。

## 1. はじめに

マメ科である *Trifolium repens* (以下シロツメクサとする) の葉は通常 3 小葉からなる<sup>1)</sup>が、変異により 4 葉のクローバーとなる。それは一般的に、日光や気温や物理的損傷などの外的要因によって葉の原基が傷つくことで発生する<sup>2)3)</sup>。また、これは原基を発生、分化させて細胞分裂を促進するサイトカイニンを抑制するオーキシシンが関与する。オーキシシンは茎頂部で多く合成され、重力に従い、極性移動し茎頂部から根本まで濃度勾配を形成する。これにより通常時は茎頂部では枝分かれが抑制されているのだが、何らかの要因によりオーキシシンの合成が減少する。そしてサイトカイニンの合成が増加することで原基が成長し、新たな枝が発生し 4 葉となることが原因と考えられている。このことから私たちは、他の植物でも同様に原基を傷つけることで変異が発生するのではないかと考えた。そこでシロツメクサと同じ科で、かつ食用になるまでの成長が 7-10 日と、成長スピードが速いマメ科エンドウ属の *Pisum sativum* (以下豆苗とする)<sup>4)5)</sup>に着目した。成長の速い豆苗を用いることで実験の試行の回数が増え、より正確に変異が発生する外的要因を調べられると考えた。具体的な実験方法として豆苗の枝分かれの原因となる脇芽<sup>4)</sup>と原基などの部分を傷つけて育て、傷つけていないと

きとの対象実験を行い、変異が起こるか頻度を測定した。仮説として、脇芽、原基のどちらにおいても傷をつけたところからつるや茎の枝分かれや茎の三叉(図1)ができるのではないかと考えた。



図 1. 豆苗の茎の三叉

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

豆苗(種), プラスチック容器(縦 185mm 横 125mm), 針, カッター, 温室機(23.0℃), 水

## 2-2. 研究方法

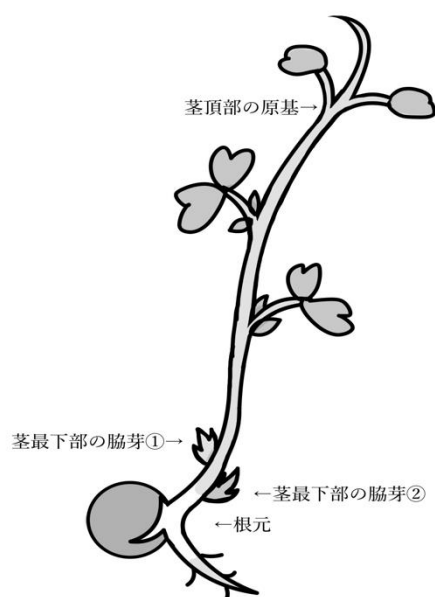


図 2. 豆苗の全体図と傷の設定位置

### 2-2-1. 実験(1)

(※ 豆苗には茎の根本に 2 つの脇芽がある<sup>3)</sup>. 以降は図 1 を参照し上部の脇芽を①, 下部の脇芽を②とする.)

〔手順 1〕 豆苗の種を 1 日水につけてから, 人工気象機(23.0℃設定.)で水深 1cm 程度(根が浸かるくらいの水量で毎日水の入替えをした.)で 1 週間栽培した.

〔手順 2〕 1 週間経過した豆苗の 2 つある脇芽について“何もしない”, “①だけ傷つける”, “②だけ傷つける”, “①と②を傷つける”の 4 つの区で分類してそれぞれ針で傷つけた.(針の下から 2 mm を測り, そこに印をつけて印まで 3 回刺した.)また, 1 つの区につき豆苗を 20 本用いた.

〔手順 3〕 そこからさらに 1 週間おき, 脇芽からの直接の枝分かれの発生率を「脇芽からの枝分かれを持つ個体」「通常の脇芽を持つ個体」それぞれで測定した.

### 2-2-2. 実験(2)

〔手順 1〕 種から 1 週間 23.0℃の人工気象機で育てた豆苗の茎の先にある原基を実験①と

同様に針で傷つける.“何もしない”と“原基を傷つける”の 2 つの区に分類し, 1 つの区につき豆苗を 100 本用いた.

〔手順 2〕 そこからさらに 1 週間おき, 傷つけた原基の位置からの茎の三本叉の発生率を「三叉の茎を持つ個体」「通常の枝分かれを持つ個体」それぞれで測定し, 図 3 にまとめる.

また, 「枯死数」とあるのはカビの発生が原因で, 枯死した個体数を示す.

## 3. 結果

### 3-1. 実験(1)の結果

傷をつけた脇芽からの直接の枝分かれを持つ個体は一個体も確認されなかった.

それぞれの区で特徴的な成長を確認したため, それぞれの区で「上部のつるの枝分かれの数」と「茎の枝分かれの総数」をそれぞれ調査した.

#### ・上部のつるの枝分かれの数

上部のつるの枝分かれの数は 1~3 回まで確認した. その枝分かれの数を, つけた傷(区)ごとに右の図 4 にまとめた. ※ただし, 1 個体に異なる回数 of 枝分かれがある場合は, 多い方のつるの枝分かれを持つ豆苗として測定した. 図 2 の場合は 3 回として測定する.

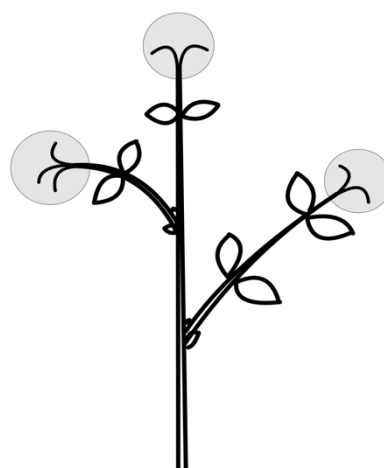


図 3. つるの枝分かれの数の数え方の例

左 3 回中, 2 回, 右 2 回の枝分かれがあった場合は, 最も多い枝をその個体の枝分かれ数とした.

### ・茎の枝分かれの総数

茎 1 本にある枝分かれの数を数えた.[図 5]

#### 3-1-1. 上部のつるの枝分かれの数

3 回の枝分かれのつるは 2 つの脇芽を同時に傷つけたときに 14 本と多く見られた.また片方の成長点だけを傷つけた場合は 2 回の枝分かれのつるが 3,4 本と,何もしてない時より多く見られた.

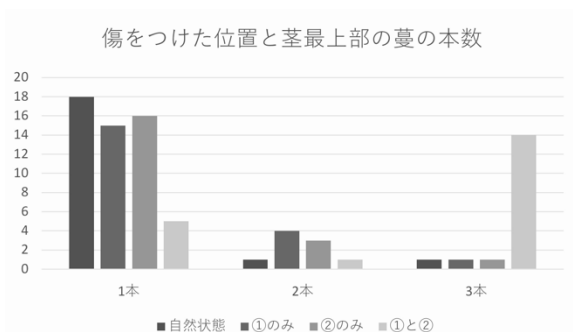


図 4. それぞれのグループと豆苗上部の蔓の枝分かれの数の関係

#### 3-1-2. 茎の枝分かれの総数

茎の枝分かれの総数の結果は図 5 にまとめた.まず茎の分岐数(枝分かれの回数)の平均値を見ると“①のみ傷つける”が 5.40 本で“①と②を傷つける”が 5.45 本と他の区よりも 1 本あたりの分岐数が多いとわかる.また,“①と②を傷つける”の要因の分散値が 2.75 と他よりも大きい.それと比べて“①のみ傷つける”のグループは分散値が 0.88 と低くなっていて,回数が安定しているとわかった.

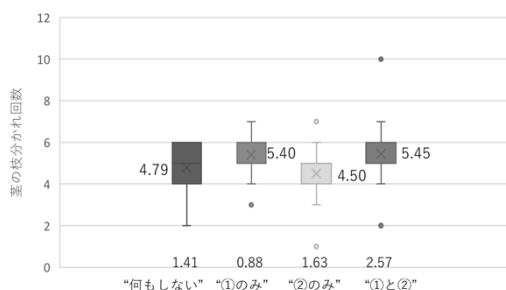


図 5. それぞれの要因と茎の枝分かれ回数

箱ひげ図の中心に書いた数値はそれぞれの要因の枝分かれ回数の平均値を示す.また,下にある数値はそれぞれの要因の枝分かれ回数の分散を示す.

### 3-2. 実験(2)の結果

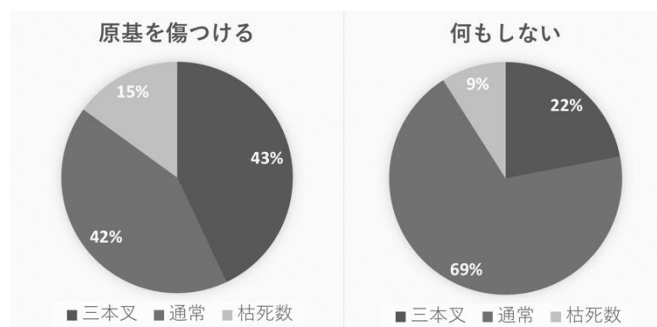


図 6. 原基と枝分かれの関係性 (n=100)

図 6 より,原基を傷つけた場合,傷つけてない場合と比べて三叉の茎が約 2 倍存在する.

また“原基を傷つける”で三叉の元にある葉の裏に小さな葉が逆向きで生えている個体が多数見つかった. できれば“何もしない”や実験(1)では全く確認されなかった.

### 4. 考察

#### 4-1-1. 実験(1)

実験(1)の結果は有意差検定により“何もしない”の区と“①のみ”, “何もしない”と“②のみ”では有意差は確認されなかったが, “何もしない”の区と“①と②”の区において有意差が確認された. 豆苗の最下部の脇芽を傷つけても傷つけた部分からの枝分かれは発生しないことが考えられる.また,これは,最下部の脇芽ではオーキシンは少量しか合成されていなかったために,原基を傷つけたことによるオーキシン合成量の減少の影響が非常に小さく,サイトカイニン合成量にも変化が少なかったために茎下部の成長に変化が起こらず,傷をつける前と傷をつけた後の変化が見られないためだと考えられる.

#### 4-1-2. 実験(1)で見られた特殊な傾向

茎頂部の蔓の本数と茎の枝分かれの総数は,有意差検定による有意差は確認できなかったものの,結果に差が生じた原因について,下部の脇芽

の傷により、オーキシンの量が減ることでサイトカイニン合成量が増加するなど、傷により間接的に細胞分裂を促進するホルモンが増加したことで蔓と茎において枝分かれが増加した可能性があるかもしれない。

#### 4-2-1. 実験(2)

実験(2)の結果は有意差検定より差があることが確認された。このことより、豆苗の茎頂部の原基を傷つけると傷をつけた部分から枝分かれの発生が多くみられる傾向があると考えられる。また、これは、通常時は茎頂部の原基周辺において多く合成されていたオーキシンの合成量が原基が傷つけられることによって減少し、これにより原基周辺のオーキシン濃度が低下、また、サイトカイニン合成が抑制されにくくなり、合成量が増加したことでサイトカイニン濃度が上昇したために腋芽が成長したものと考えられる。

#### 4-2-2. 葉の裏に生じた小さな葉

実験(2)の原基を傷付けた区で確認された葉の裏にある小さな葉は原基を傷つけた個体でのみ確認されたことから、茎頂分裂組織の傷によりオーキシン合成量が減少し、それに伴いサイトカイニン合成量が増加するなど、外傷により間接的に傷付近のサイトカイニン量が増えたことで通常個体にはない部分からも枝分かれの発生が促進された可能性がある。

#### 4-3. 2つの実験から

実験(1)、(2)の結果より、原基からの枝分かれの発生はシロツメクサ以外の植物にも見られるものであることが考えられる。このことから、シロツメクサや豆苗以外植物にも見られることが示唆される。

ゆえに、これらの実験より、目的としていた傷による枝分かれの発生は原基という条件に加えて茎頂部であるという条件、即ち茎頂分裂組織が傷つけられることが条件の一つであることが考えられる。

これにより実験目的である豆苗の原基を傷つけ

ることによる人工的な枝分かれは、一部に限られるものではあるが、発生が見られるものであることが確認された。しかし、本研究では有意差検定を行っていないため、傾向を見るにとどまった。



図 7. 葉の裏に生じた小さな葉

### 5. まとめと今後の課題

#### 5-1. まとめ

今回豆苗を用い、原基と脇芽を傷つけ実験することで人工的な枝分かれを発生させ、外的要因についてより正確に判断を行ったところ、豆苗の茎頂部の原基を傷つけることにより枝分かれが発生する傾向があると考察された。

#### 5-2. 今後の課題

本実験では茎頂部と茎最下部の二点を実験対象としていたが、実験結果よりオーキシンの濃度勾配が大きく関係していると考えられたため、最上部最下部だけでなく、その間の茎に存在する原基についても同様の実験をし、茎頂部からの距離と枝分かれの発生の確率は関係するののかについて研究し、原基と枝分かれの関係をより深く調べていく必要があると考えた。また有意差検定の有意が確認できなかった実験での実験対象の母数を増やすことなどで研究の精度を上げる必要がある。また、オーキシン、サイトカイニンの2つのホルモンについて個体における分布と成長や合成の抑制促進の関係を元として今回の考察を立てたが、この考察の真偽を確かめるためにホルモンを外部

から与えるなどして実験をしていきたい.具体的には,頂芽を傷つけた際にオーキシンを傷の部分に加え,しばらく育てるような実験をしたときに,頂芽からの枝分かれ発生が見られなくなるかを調べる. 根本の脇芽を傷つけた際にサイトカイニンを傷の部分に加え,しばらく育てるような実験をしたときに,脇芽からの枝分かれ発生が見られるかを調べるなどが挙げられる.

また,オーキシンのサイトカイニンを定量することができれば,本研究においてより正確な考察が可能となる.

## 6. 参考文献

- (1) 国立環境研究所,侵入生物データベース  
<https://www.nies.go.jp/biodiversity/invasive/DB/detail/80160.html>,2023.9.24
- (2) Nick Stockton, 2015.4.25,  
<https://wired.jp/2015/04/25/four-leaf-clover/> ,2023.9.24
- (3) 勝又 大樹,2017,  
<https://www.city.chiba.jp/kyoiku/gakkokyoiku/kyoikushido/docume014yotubanokurobanokennkyuu.pdf> ,2023.9.24
- (4) 村上農園,  
<https://www.murakamifarm.com/myouken/grow/technique/#where>,2023.9.24
- (5) フマキラー,2019,11,  
<https://fumakilla.jp/foryourlife/330>,2023.9.24
- (6) 高辻,博  
志,1999,3,<https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2010590504.pdf>,2023.9.24

# 環境指標コケを用いた酸性雨緩和物質の調査

## ～ 酸性雨の植物への影響を探る～

磯田真友子 下坂百葉 中村美咲

### 要旨

近年、酸性雨を要因の1つとした森林枯損により多くの生物の命が絶たれてしまっているという。本研究は、酸性雨が植物を枯らす原因を調査し、かつその対策として有効な策を見つけることを目的としている。森林衰退の原因調査において、原因は未だ明らかになっていないため土壌酸性化—アルミニウム毒性説に焦点を当て、模擬酸性雨を作成して、pHの違いによる、滴下後のコケの枯損量および再生力の変化をみることを目的とした。実験結果から、土壌酸性化によるアルミニウムの溶出が大きく影響すると考え、対策として植物が吸収する前にアルミニウムと結合し、かつその生成物が植物に害を与えないような物質を、酸性雨が降る前後の対策として提案する。ただし本研究ではコケを用いて実験を行ったため全ての植物で利用可能かは不明である。

### 1. はじめに

現在私たちが直面している環境問題は世界規模の問題であり、早急な解決が求められている。また、そのような環境問題が自然環境にどのように影響を及ぼすのかを知り、そのような悪影響を減らしていく必要がある。解決すべき環境問題の一つとして、酸性雨が挙げられる。酸性雨の影響は、ヨーロッパ、北米、東アジアなどの先進工業国を中心に世界的な規模で広がっている。原因となる物質が放出される地域と、酸性雨として降る地域は大きく異なることもあり、先進工業国以外の地域でも悪影響を受けることもありうるため、世界的な対策が求められている。

酸性雨の原因は、化石燃料の燃焼(人為起源)や火山活動(自然起源)などにより放出される二酸化硫黄( $\text{SO}_2$ )や窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )であると言われている<sup>1)</sup>。これらのガスは、大気中で光化学反応などの化学変化を起こし、硫酸や硝酸となって降水に溶け込み、酸性雨となる。酸性雨は、河川や湖沼、土壌に悪影響を及ぼすといわれている。近年では、酸性雨による影響と見られる森林の立ち枯れ現象・森林衰退が問題視されている。

欧米諸国ほどではないが、関東平野のスギ林、赤城山のシラカンバ、丹沢山系の大山のモミなどの衰退が酸性雨との関連で報告されている<sup>2)</sup>。酸性雨が植物に悪影響を及ぼす原因はまだ明らかにはなっていないが、直接的影響として、地上部組織の指為、植物体からの生体物質のリーチング(溶脱)や生理代謝変化等があると言われている<sup>2)</sup>。本研究では、その他酸性雨が植物に悪影響を与える原因を調べ、その影響を緩和する方法を見つけることを目指している。酸性雨の植物への影響を調べるために、学校の敷地内に生息するコケを用いて、研究を行った。私たちはまず、酸性雨が植物に悪影響を与える原因が“酸性であること”によると推測した。pH2・3・4・5の塩酸、または硝酸を用いて、コケへの影響を調べた。その結果、この実験では塩酸、硝酸のコケへのはつきりとした害は見られなかった。この結果から、私たちは酸性雨が植物に悪い影響を与えるのは、酸性であることではなく、他の要因からだと考えた。私たちは、近年問題となっている酸性雨による森林衰退の原因に着目した。森林衰退の原因調査において、原因はいまだに明らかになっていないが、

(1) 土壌酸性化—アルミニウム毒性説, (2) オゾン説, (3) マグネシウム欠乏説, (4) 窒素過剰説, (5) 複合ストレス説<sup>3)</sup>の5つの主要な仮説がある。私たちはこのうち(1)土壌酸性化—アルミニウム毒性説に着目し, 硝酸アルミニウムを用いて, その pH 変化とコケの個体数を調べ, その関係について研究した。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

スナゴケ(学校の校庭裏)

ホソウリゴケ(学校の校庭裏)

ギンゴケ(学校の校庭裏)

0.1 mol/L 硝酸アルミニウム

クエン酸溶液(水 100mL に 2.5g)

1/15 mol/L リン酸緩衝液

肥料(ハイポネックス 500 倍希釈)

### 2-2. 研究方法

・実験①: アルミニウムイオンが植物を枯らすかどうかについての調査

本実験では, 学校の校庭の裏から採取したコケ, 硝酸アルミニウム(pH3, pH4, pH5) 20 mL を用いる。

実験は次の手順で行った。

1. 採取してきたコケを適当な大きさに切り分けた。これを3つ用意した。
2. 生きているコケの房数を数える。
3. コケをそれぞれシャーレに乗せ, 硝酸アルミニウム 20 mL ずつをスポイトでコケの上に滴下した。
4. 2週間放置して, 枯死したコケの房数を数える。

・実験②: アルミニウムの影響を減らすための物質についての調査

本実験では, アルミニウムイオンと結合しやすい物質を含むためにアルミニウムの影響を減らすと考えられる肥料(ハイポネックス 500 倍希釈), クエン酸溶液(水 100 mL に対して小さじ 1/2 杯い

れたもの), 1/15 mol/L のリン酸緩衝液を使用した。ホソウリゴケ, ギンゴケ, スナゴケの3種類をそれぞれ1.2 cm<sup>2</sup>の大きさとなるようにしてシャーレにいれ, そのシャーレを6つ用意した。硝酸アルミニウム 10 mL を滴下してから, 次の日に肥料 10 mL を滴下したもの(シャーレⅠ), クエン酸溶液 10 mL を滴下したもの(シャーレⅡ), リン酸緩衝液 10 mL を滴下したもの(シャーレⅢ)を一週間観察した。また, 肥料 10 mL, クエン酸溶液 10 mL, リン酸緩衝液 10 mL を滴下してから, 次の日に硝酸アルミニウム 10 mL を滴下したもの(シャーレⅣ, シャーレⅤ, シャーレⅥ)を一週間観察した。

・実験③: コケ1房に注目した, 実験①の再実験

本実験では実験①ではコケの団体の大きさによる影響を完全には排除できていないため, コケ1房ずつに注目した。実験①と同様に硝酸アルミニウムを滴下し, それらの再生力を観察した。

1. 採取してきたコケから葉状体から長く茎が伸びているものを6本選び, 水洗いする。
2. コケを 15 分間次亜塩素酸ナトリウム6%(16 倍希釈)に浸す。その後コケを引き上げ滅菌水で洗う。
3. 滅菌シャーレの中に1%寒天培地を作る。(寒天 1%, 他純水)
4. コケを培地の上にのせる。
5. 硝酸アルミニウム 0.1 mL を滴下する。
6. 密閉して3ヶ月ほど観察を続ける。

・実験④: コケ1房に注目した実験②の再実験

本実験では, 実験③で行ったようにより定量的に実験②と同様に肥料, クエン酸, リン酸緩衝液をそれぞれ1房のホソウリゴケに滴下した。また, これらの溶液の滴下前に硝酸アルミニウムを滴下するもの(肥料Ⅰ<sub>2</sub>, クエン酸Ⅱ<sub>2</sub>, リン酸緩衝液Ⅲ<sub>2</sub>), これらの溶液の滴下後に硝酸アルミニウムを滴下するもの(肥料Ⅳ<sub>2</sub>, クエン酸Ⅴ<sub>2</sub>, リン酸緩衝液Ⅵ<sub>2</sub>), 2パターン用意した。

1. 採取してきたコケの葉状体から長く茎が伸びているものを6本選び、水洗いする。
2. コケを 15 分間次亜塩素酸ナトリウム6%(16 倍希釈)に浸す。その後コケを引き上げ滅菌水で洗う。
3. 滅菌シャーレの中に1%寒天培地を作る。(寒天1%, 他純水)
4. コケを培地の上にのせる。
5. I<sub>2</sub>～VI<sub>2</sub> に1つ目の溶液 (I<sub>2</sub>:肥料, II<sub>2</sub>:クエン酸, III<sub>2</sub>:リン酸緩衝液, IV<sub>2</sub>・V<sub>2</sub>・VI<sub>2</sub>:硝酸アルミニウム)を 0.1mL ずつ滴下する。
6. 5の4日後, I～VIに2つ目の溶液 (I<sub>2</sub>・II<sub>2</sub>・III<sub>2</sub>:硝酸アルミニウム, IV<sub>2</sub>:肥料, V<sub>2</sub>:クエン酸, VI<sub>2</sub>:リン酸緩衝液)
7. 密閉して一ヶ月ほど観察を続ける。

### 3. 結果

#### 3-1. 実験①の結果

滴下した硝酸アルミニウムの pH ごとの, コケの変化を表1に示す。また, この実験では, コケが本来の緑色から茶色に変色し, 水をかけた際に葉状体が広がらない状態をコケの死とした(添付資料の図1)。

硝酸アルミニウム pH3, pH4, pH5いずれにおいても生きているコケの房が減少していた。pH3を滴下したコケが最も枯死率が高く, pH5を滴下したコケが最も枯死率が低かった。また, pH3, pH4を滴下したコケの枯死率と pH5を滴下したコケの枯死率には大きく差があった。

**表 1. 滴下した硝酸アルミニウムの pH と生きているコケの房の数の変化と死亡率**

|        | pH3 | pH4 | pH5 |
|--------|-----|-----|-----|
| 滴下前(房) | 55  | 36  | 78  |
| 滴下後(房) | 8   | 7   | 47  |
| 枯死率(%) | 85  | 81  | 40  |

#### 3-2. 実験②の結果

それぞれのシャーレにおけるコケの様子を表2に示した。全体の結果を見ると, ホソウリゴケは変色している割合が高かった。また, 後に硝酸アルミニウムを加えたものは, 先に加えたものよりも茶色く変色した個体が多かった。また, シャーレⅢでは枯死した個体が他のシャーレと比べて多く見られた。

**表 2. 各々のシャーレにおけるコケの変化**

| シャーレ           | ホソウリゴケ | ギンゴケ | スナゴケ |
|----------------|--------|------|------|
| I :<br>肥料      | 全体が茶変  | 変化なし | 変化なし |
| II :<br>クエン酸   | 変化なし   | 変化なし | 変化なし |
| III :<br>リン酸   | 全体が茶変  | 一部茶変 | 一部茶変 |
| IV :<br>I + Al | 全体が茶変  | 変化なし | 変化なし |
| V :<br>II + Al | 変化なし   | 変化なし | 変化なし |
| VI<br>III + Al | 全体が茶変  | 変化なし | 変化なし |

#### 3-3. 実験③の結果

実験③の結果は添付資料の写真(図2)のとおりになった。A は硝酸アルミニウムをかけていないもので, B, C, D は硝酸アルミニウムをかけたものである。全てに塩素消毒を施したため, 先端部分を除いて脱色している。Aを見ると, Aは緑の芽がいくつか生えている。しかしB, C, Dのコケではそれが見られない。そして, B, C, D の6つの試料のうち3つでカルスと見られる2～5mmの黒い塊がついている。

#### 3-4. 実験④の結果

実験④の結果は添付資料の写真(図3)の通りに

なった。リン酸緩衝液Ⅲ<sub>2</sub>では、新たな芽が見られたが、他の試料では新たな芽は見られなかった。肥料Ⅳ<sub>2</sub>、クエン酸Ⅴ<sub>2</sub>、リン酸緩衝液Ⅲ<sub>2</sub>では根の方にカルスと見られる黒い塊がついており、クエン酸Ⅴ<sub>2</sub>では3 mm程度、肥料Ⅳ<sub>2</sub>、リン酸緩衝液Ⅲ<sub>2</sub>では1mm程だった。

## 4. 考察

### 4-1. 実験①の考察

実験①の結果において、滴下した硝酸アルミニウムの pH が低くなるにつれてコケの生存率が下がっていたことから、アルミニウムが酸性化によって植物に悪い影響を及ぼしたと考えられる。これは、pH が低いと土壤中に含まれるアルミニウムが一部可溶性のイオンとして存在しやすくなり、それがコケにとって有害であったからではないかと考えた。しかし、実験①では、コケのコロニーの大きさが違い、pH 3と4は比較的小さいコロニーであったため、試液の影響を受けやすかったとも考えられる。

### 4-2. 実験②の考察

実験②の結果から、実験①で硝酸アルミニウムによって枯死していたコケが肥料、リン酸、クエン酸を滴下した後は枯死していた個体が大幅に減っていたことから、肥料とリン酸、クエン酸にはアルミニウムが植物に与える影響を減らすことができると言える。また、コケの中でもスナゴケ、ギンゴケは生存しているが、ホソウリゴケは枯死しているというケースが多く見られている。それは、ホソウリゴケは他のコケの種類に比べ、乾燥に強いが多湿に弱いという特徴があるため、連日 10 mL の水分を直接受け取ったことに原因があるのかもしれない。また、シャーレⅢでは観察する1週間のうち、保管する環境のなかで空気に触れない期間があったため、枯れた個体が多いのは保存環境が整えられていなかったからだと推測される。

アルミニウムイオンが植物の成長を阻害するプロセスとして、アルミニウムイオンはカルボン酸やリン酸基と結合しやすい性質があるため、細胞壁のペクチンやヘミセルロース成分と結合して、細胞の伸長に必要な細胞壁の伸展性を低下させることがわかっている<sup>4)</sup>。肥料にもリン酸が含まれているため、肥料とリン酸の滴下によってコケが生き残ったのは、アルミニウムイオンが細胞の成分と結合する前に加えたリン酸が結合したからだと考えられる。また、植物の持つアルミニウム耐性機構の一つとして、根から根圏へ有機酸を分泌することによって Al をキレートし、無毒化するというものがあることから、クエン酸がそのはたらきをしたと言える。これより、これらのリン酸、肥料、クエン酸は酸性雨の対策としての物質に適していると言える。

### 4-3. 実験③の考察

実験③では硝酸アルミニウムをかけなかったコケでは新たに芽が生えていたが、硝酸アルミニウムをかけたコケでは生えなかったことから、硝酸アルミニウムがコケの成長・再生を阻害する働きをもつと考えられる。また、硝酸アルミニウムをかけたコケはカルスと見られる黒い塊が生えていたが、カルスは傷などのストレスにより誘発され形成されるため、硝酸アルミニウムがストレスとなり、コケのカルス形成に繋がったと思われる。

### 4-4. 実験④の考察

実験④のリン酸緩衝液Ⅲ<sub>2</sub>において新たな芽が見られたことより、リン酸は酸性雨が降った後に滴下することが1房のコケに対するアルミニウムイオンによる悪影響の予防として有効である可能性があると言える。また、肥料Ⅵ<sub>2</sub>、クエン酸Ⅴ<sub>2</sub>、リン酸緩衝液Ⅲ<sub>2</sub>にカルスが形成されていたことから、肥料、クエン酸はアルミニウムイオンの悪影響を低減させることができないこと、加えて、リン酸緩衝液においては予防として活用できたとしてもコケへストレスがかかってしまうと言える。しかし、この実験では実験②の時と比べて、一回目

の溶液を入れて二回目の溶液を入れるまでの期間が長かったため、アルミニウムイオンの影響が既に出てしまったとも考えられる。また、複数のコケの房でできた団体での実験②と比べると、それぞれ結果が異なっていることから、1房であることと団体であることでは硝酸アルミニウムにおける悪影響の及び方が異なっていると考えられる。植物のアルミニウム耐性機構で、アルミニウムイオンの毒性の緩和に活用できるクエン酸より、細胞壁などと結合するのを防ぐリン酸の方が1房においての効果が見られることより、アルミニウムによる細胞壁への影響が1本の方が深刻であると考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

植物への酸性雨の影響の1つとして、土壌に溶け出したアルミニウムイオンが植物に吸収されることで起こることが考えられる。また、リン酸、肥料、クエン酸は酸性雨によるアルミニウムイオンの影響を抑える効果が期待できる。このことから、これらの結果より、酸性雨が降ると予測された際、また、降った翌日にリン酸、肥料、クエン酸を散布すると植物枯損が抑えられるのではないかと考えた。今後の課題としては酸性雨の植物への影響は種によって異なると考えられるため、対策などを探していきたい。また、本実験では実験を一度ずつしか行っておらず精度に欠けるため、再度実験を行い実験の精度を高めたい。実験④では、観察にかけた日数が少なく結果が不十分だったので、経過観察を入念にするようにしたい。また、実験②と実験④で見られたカルスのようなものが実際には何なのか、できた原因は何かを明らかにしたい。実験④においてアルミニウムイオンの影響緩和として後からのリン酸イオンの滴下が有効だと考察したが、コケにストレスを与えていたので、ストレスの原

因を調査しその原因を取り除く方法を考え、実践的に使える方法に発展させていきたい。

## 6. 参考文献

1)気象庁, 更新日記載無し, 酸性雨に関する基礎的な知識,

[https://www.data.jma.go.jp/env/acid/info\\_acid.html](https://www.data.jma.go.jp/env/acid/info_acid.html)

閲覧日 2024.1.16

2)野内勇, 1991, 酸性雨と植物被害, 農業気象, 47, 3, 165~175

3) 野内勇, 1990, 酸性雨の農作物および森林木への影響, 大気汚染学会誌 J. Japan Soc. Air Pollut, 25, 5, 295~312

4) 安田 國雄, 藪崎 義康, 横田 聡, 和田 元, 1999, アルミニウムと酸性と根の深い関係 [https://www.jstage.jst.go.jp/article/kagakutoseibutsu1962/37/3/37\\_3\\_186/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kagakutoseibutsu1962/37/3/37_3_186/_pdf/-char/ja)

育てやすい苔の種類, ホソウリゴケの好む環境と育て方, 2022.11.6, 苔の育て方.com, <https://mossterarium.com/moss-3-012/>, 2024.1.14

松井春夫, 望月美由貴, 中川一兵, 1991, 酸性雨成分の表層土壌における季節的変動 [https://www.jstage.jst.go.jp/article/nikkashi1972/1991/5/1991\\_5\\_705/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/nikkashi1972/1991/5/1991_5_705/_pdf/-char/ja)

## 7. 添付資料

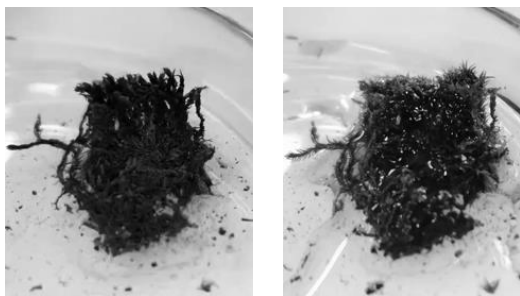


図 1 : コケの枯死判断

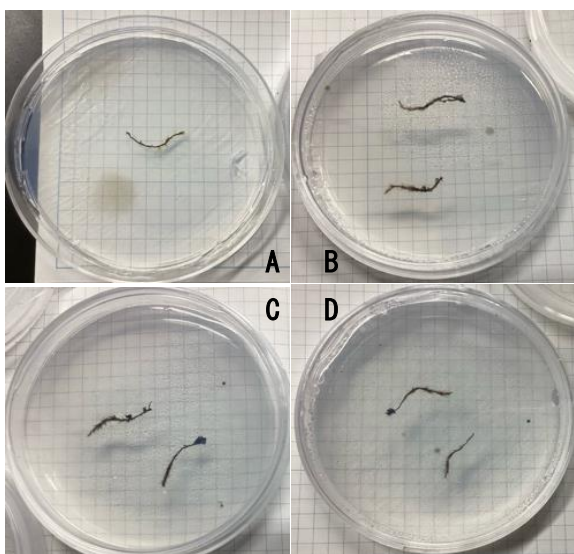


図 2 : 実験③の結果

A:硝酸アルミニウムをかけていないコケ  
B・C・D:硝酸アルミニウムをかけたコケ



図 3 : 実験④の結果

E:肥料 I<sub>2</sub> , IV<sub>2</sub>

F:クエン酸 II<sub>2</sub> , V<sub>2</sub>

G:リン酸緩衝液 III<sub>2</sub> , VI<sub>2</sub>

# 微生物による繊維の分解と紙の透明度の関係

伊藤杏莉 梶井凜音 牧野藍

## 要旨

一般的に紙を作る際には、リグニンの分離や漂白などのために化学的な薬品を使用することが多いが、私たちは材料を土に埋めて微生物の力を借り、透明な紙が作れないかと考えた。また、土に埋めたのとそうでないもので、透明度の比較をしようと考えていた。しかし、土に埋めて腐敗したことによる変色等がひどく、比較ができるような紙質にはならなかった。

## 1. はじめに

近年、セルロースナノファイバーが環境にやさしい素材として注目を集めている。セルロースナノファイバーとは、木材等植物の細胞壁の主成分であるセルロースを直径数～数十ナノメートルまで細かく解きほぐした繊維状の物質である。この繊維の細かさを利用することで、透明な紙を作ることができる。細かいセルロースナノファイバーは、透明で、特徴的な粘度をもち、温度変化による変形の少ない特性があるため、多くの分野での利用が期待できる。実際に、東京大学<sup>1)</sup>や京都大学<sup>2)</sup>、大阪大学<sup>3)</sup>など数々の大学や企業で、このセルロースナノファイバーの軽量で強度が高いという特徴を活かした研究が進められている。

一般的に、セルロースを抽出して紙を作るためには、化学薬品を用いた手法が用いられるが、私たちは環境への負担が少ない生物学的手法を用いて紙を作れないか、と考えた。また透明度は繊維の細かさに依って決まるため、繊維を細かくしてセルロースナノファイバーに近い形にし、透明な紙が作れないかと考えた。さらに、材料としては、身近な野菜、果物のほか、それらの廃棄する部分を使うことにした<sup>4)</sup>。廃棄する部分で紙を作ることができれば、環境問題への貢献もできるのではないかと考えた。具体的には、材料となる野菜や果物を土に埋めて、微生物による繊維の分解を促進し、繊維を細かくすることによって、紙を透明にできる

とも考えた。また、土に埋めたものと埋めていないものとで紙の透明度や強度を比較した。

もし繊維が細くなれば、紙の透明度は増すと予想したが、一方で土に埋めると紙の強度を保つような物質も分解されてしまい、強度が低下してしまうのではないかという懸念もある。セルロースの結合を強力にするペクチンや糖分は土に埋めた時、セルロースよりも早く分解される。紙を作る際にそれらの分解が、紙質に影響を与える可能性も考えられる。これらのことを検証するために、以下の実験を行った。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

果物(りんご、かき、バナナの皮、みかんの皮)、植木鉢、土(学校の中庭で採取)、落ち葉(土と同様)、包丁、鍋、ビーカー、ガラス棒、葉さじ、ミキサー、ストッキング、電子天秤、アルミホイル、ビニールテープ

### 2-2. 研究方法

紙の材料とする果物を用意する。埋めたときの分解具合の関係を見るため、普通の状態のものと土に埋めたものの2種類を利用した。

「土に埋めた」とは、土を敷いた植木鉢に果物を入れて土を被せ、落葉とともに2週間放置したものである。

実験1(予備実験的な立ち位置であった):果物を1~2cm 角に刻み,果物が浸るほどの深さの水を鍋に入れて 10 分茹で,ミキサーで1分×15 回粉碎,攪拌した.攪拌後のペーストを2枚重ねのストッキングで濾過した(バナナの皮のみ).それを鍋に入れて煮詰め,水分を飛ばし,かき混ぜている時に抵抗が感じられる程まで続けた.できたペーストを,アルミホイルで作った 6cm×10cm の容器の中に入れた(バナナの皮の場合).もしくは,発泡スチロールの板を2枚用意し,水分を出す穴(径 1~2mm)を6箇所開け,ペーストを間に挟んで全体重をかけて圧縮し,水分を抜いた(柿の場合).

実験 2:ミキサーで 15 回攪拌するまでは実験 1 と同じだが,ストッキングで濾過すると,繊維が少なかったのかうまく紙が出来なかったため(実験1の結果参照)濾過の工程をなくし,バナナ同様煮詰めて水分を飛ばした.紙の大きさと厚さを統一するため,規格を決めた.アルミホイルにビニールテープを貼って 5cm×5cm の枠を作っておき,その上に煮詰めた果物のペーストをおよそ 3.5g くらいが出来ないように広げた.そのまま乾燥させ,十分に乾いたらアルミホイルから剥がした.

### 3. 結果

#### 3-1. 実験①の結果

この実験では,バナナの皮と柿を材料として用いた.

まず,埋めていないバナナの皮を使って,手順通り実験を進め,アルミホイルにペーストを広げて乾かしたところ,紙というよりはベタベタしたカaramel状のものが出来上がった(図5A;添付資料).そこで,濾過でストッキングを通過しなかった繊維も残してあったため,それに少し水を混ぜ,アルミホイルで作った枠に入れて乾かしたところ,茶色く薄い紙ができた(図5B;添付資料).繊維の量が十分だったため紙ができたと考えられる.

次に,埋めていない柿を使って紙を作った.バナナの皮の実験で,ストッキングで濾過をしようとうまく紙にならないということがわかったため,その濾

過の工程を省いた.また,乾かすときに二つの方法を試した.一つは,アルミホイルで枠を作ってその中で自然乾燥させるもの(図 1A),もう一つは,発泡スチロールで圧縮して水分をなくすもの(図 1B)だった.

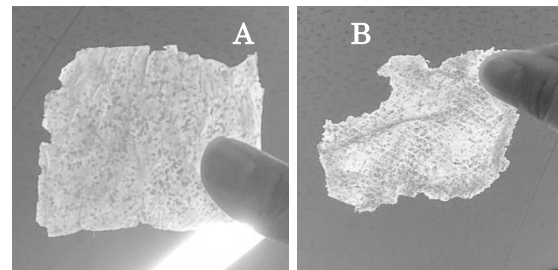


図1:柿

A: アルミホイル状で乾かしたもの

B: 発泡スチロールで圧縮したもの

二つの方法で水分を取り除いたが,紙の色や強度,透明度等に大きく差が出ることはなかった.しかし,発泡スチロールを用いた方は,圧縮の際に一緒に挟んだネットの網目の模様がついてしまったので,これ以降の実験ではアルミホイルの上でペーストを自然乾燥させた.

#### 3-2. 実験②の結果

この実験では,実験1の結果をもとに,方法を見直し,条件をそろえてそれぞれの紙を作った.

まず,バナナの皮,りんご,柿,みかんの皮を2週間土に埋めた.湿気があった方が微生物による分解が促進され则认为,定期的に水をいれ,果物を取り出して状態を確認した.最初の1週間ほどは大きな変化がなく,少し柔らかく脆くなっているくらいだったが,2週間経つ頃には白くふわふわした菌のようなものがついていて,変色が進んでいた.柿はすぐに柔らかくなり,汁が出てきて原型がなくなってしまったので,土に埋めて紙を作るのには不向きだと考え,断念した.

### I バナナの皮

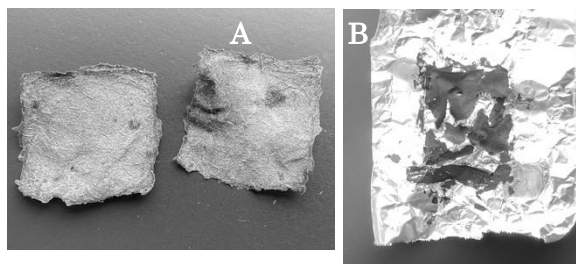


図2: バナナの皮

A: 埋めなかったもの, B: 土に埋めたもの(背景はアルミホイル)

A の土に埋めなかったものは、少し表面に繊維がそのまま残っていてザラザラしていたものの、強度は十分にあった。茶色で、透けてはいなかった。B の土に埋めた方は、軽く触れるだけでポロポロと崩れてしまうような強度だった。透明度はなく、炭のように真っ黒だった。

### II りんご

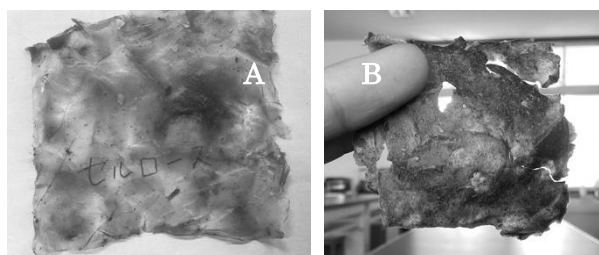


図3: りんご

A: 埋めなかったもの, B: 土に埋めたもの

A の埋めていないりんごは、今回行った実験で一番の透明度を持っていた。図 3A のように、下に「セルロース」と書いた紙を敷いてみると、文字がはっきりと読めた。しかし、紙というには少し柔らかく、ベタつきがあって、文字は書けず、セロハンに近いものに思えた。B の埋めたりんごは、一部薄い部分は少し透けていたが、A に比べると色が黒ずんでいて、透明度が低かった。

### III みかんの皮

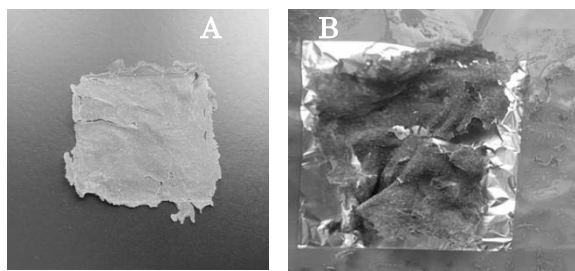


図4: みかんの皮

A: 埋めなかったもの, B: 土に埋めたもの

A はみかんの皮そのものの色で、オレンジと黄色の間のような色だった。色がついていたので透明ではないが、透けてはいた。B は乾燥させている途中にアルミホイルからはがれてしまったと考えられるが、平らにならず折れ曲がってしまった。色は黄色味のある茶色で、透明度はなかった。表面をよく見ると、小さい点がたくさんあった。もともとのみかんの皮にも小さいブツブツとした模様があるので、それが残ったもののように見えた。

## 4. 考察

実験①の結果より、ストッキングを用いた濾過を行うと、紙が形成されないことが明らかになった。これは、ストッキングの網目が細かすぎたために、濾液に十分な量の繊維が含まれず、紙を形成するのに不十分であったためだと考えられる。ストッキングを通過しなかった繊維は、量が十分にあったため紙となったと考えられる。濾液を用いた紙を作ろうとした時に、透明なキャラメル状のものができたことから、透明度は糖の有無や含有量にも影響されると考えた。また、実験②では、土に埋めたバナナの皮、リンゴ、みかんの皮はいずれも強度が弱くなっていたことから、繊維は分解されていたと考えられる。しかし、実験①で作った紙に比べて紙質が乾燥しており、糖質が分解されて粘度が落ちた可能性も示唆された。繊維が分解された証拠として土から取り出した時に白くふわふわしたものが果物に付着していたが、これは繊維質を分解する

放線菌であると推測できる。また、バナナの皮で作った紙はりんごで作った紙より脆かったが、りんごには多量のペクチンが含まれており、これが分解の過程で一部が分解されず、セルロースの結合を強力にしたのではないかと考えられる。今回の実験では2週間腐敗させた果物を用いたが、その期間を短くして、繊維の結合を助ける糖類の分解が進みすぎないようにすることで、より丈夫な紙を作ることができると予想した。これらの実験より、実験に用いた3つの果物は、土に埋めたことにより繊維が分解されたと考えられた。変色や糖の分解などを考慮にいれなかったことが、土に埋める前後で紙の透明度を比較できなかった原因だと考えた。

## 5. まとめと今後の課題

それぞれの材料で、紙を作ることには成功した。しかし、土に埋めたものは変色して、臭いがひどく、また崩れやすかったりして紙として実用化は難しいと考えられる。また、透明度や強度を比較しようにも、紙の材質が異なっていたため比較は困難だった。廃棄する部分であるバナナの皮でも、また化学薬品を使わなくても紙を作ることができたため、実用化できれば環境問題の解決に貢献できるのではないかと考えた。食べ物で作ったことにより今後変色が進む可能性が考えられるため、これから変化の記録をつけ続けたい。また、時間があれば別の素材にしたり、ミキサーの回数を変えたりしながら実験を続けたい。

## 7. 参考文献

1) 東京大学大学院農学生命科学研究科・農学部, 木材由来のセルロースナノファイバーから, アルミニウム合金並の強度と自己消火性を兼ね備えた, 透明な板材を開発, [https://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/topics\\_20230217-1.html](https://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/topics_20230217-1.html)

2) 京都大学生存圏研究所教授矢野浩之・日本製紙株式会社, 透明紙の開発に成功, [https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/archive/prev/news\\_data/h/h1/news6/2013\\_1/140318\\_1](https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/archive/prev/news_data/h/h1/news6/2013_1/140318_1)

3) 大阪大学産業科学研究所 第2研究部門 自然材料機能化研究分野,

[https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/organization/sec/sec\\_01/](https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/organization/sec/sec_01/)

4) 透明な紙の作り方,

<http://www.nogimasaya.com/research/make/>

丸住製紙株式会社, セルロースナノファイバー,

<https://www.marusumi.co.jp/paper/cnf/>

一般財団法人日本緑化センター, 緑化樹木供給技術情報,

[http://www.jpgreen.or.jp/kyoukyu\\_jyouhou/gijyutsu/recycle/page3.html](http://www.jpgreen.or.jp/kyoukyu_jyouhou/gijyutsu/recycle/page3.html)

コンポスト化技術の基本理論, 重要項目

[http://www.kita.or.jp/upload/\\_special/takakura4.pdf](http://www.kita.or.jp/upload/_special/takakura4.pdf)

## 8. 添付資料

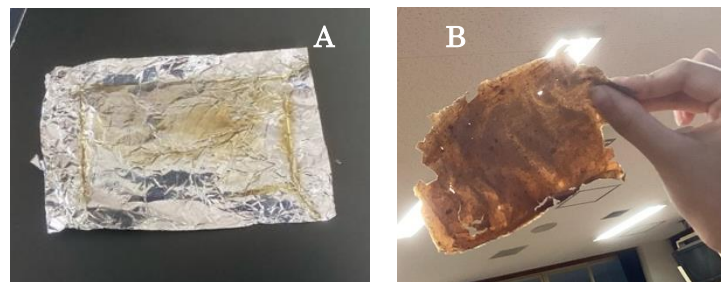


図5

A: 濾過後のバナナの皮

B: 濾過で通過しなかった繊維

# ゼブラフィッシュ *Danio rerio* の記憶に関する研究

北口美古都 船越慈世 山田颯都 渡辺姫菜

## 要旨

ゼブラフィッシュの記憶について調べるために、ゼブラフィッシュの成魚に対して、電気刺激と色の組み合わせで学習能力に関する研究を行った。その結果、ゼブラフィッシュは 3 色を識別して記憶する能力があり、電気刺激と色の記憶には強い結びつきがあるとわかった。

## 1. はじめに

先行研究よりゼブラフィッシュなどの脊椎動物における色の識別は、紫外線オプシン(SWS1)、緑オプシン(RH2)、赤オプシン(LWS)を発現する4種類の錐体細胞の組み合わせによって行われることが報告されている<sup>1)</sup>。また、ゼブラフィッシュは人間と同じ程度に色を識別できること、電気刺激を与えられると回避行動を起こすという、危険に対する学習能力があることが報告されている<sup>2)</sup>。以上のことを踏まえて、より詳細なゼブラフィッシュの記憶方法、記憶容量、新しい情報に対する処理能力を調査しようと考えた。そこで、色の組み合わせを複雑化させ、実験、観察を行った。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

本研究では購入したゼブラフィッシュを9匹使用した。オスとメスが混在しており、これらを区別することは難しかった。オスとメスで色覚には違いがあるかもしれないが、本研究では考慮せずに実験を行った。実験するときには、水槽内の温度と実験するときの水の温度が大きく異ならないように調節した。はじめに、実験用装置を作成した。ゼブラフィッシュが実験する色以外の情報を認識しないようにするために、ダンボールの内側を黒スプレーで塗り、側面の3面を四角形に切り抜いた。また、上側は開封ができる蓋のように切り、下側は切り抜いた(図1)。次に、実験用水槽の側面の両端から5cmの

ところにテープを貼り、印をつけた。次に、直流電源装置を水槽の両側に設置し、それぞれリード線で繋げ、炭素棒を印のついた範囲内に設置した。図1のように段ボールを水槽の上から被せ、側面にはiPadで色を表示できるように準備した。正面からは、水槽内のゼブラフィッシュの行動を撮影するためにカメラをおき実験を行った。

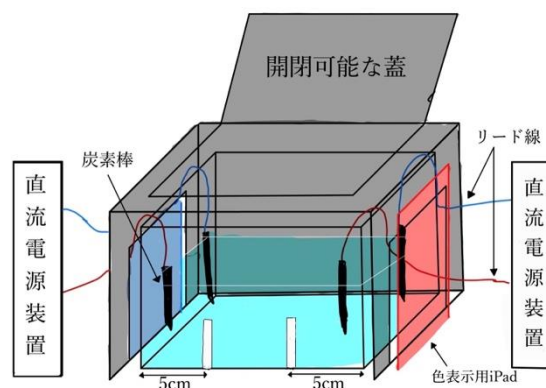


図1. 行動を記録した装置模式

### 2-2. 研究方法

#### 2-2-1. 一連の流れ

実験の一連の流れは図2に示した。

実験用水槽にゼブラフィッシュ 9 匹を飼育用水槽から移し替えて、実験装置を設置した。

赤(RGB カラーコード 赤 255, 青 0, 緑 0), 青(赤 0, 青 255, 緑 0), 緑(赤 0, 青 0, 緑 255)の 3 色を用いて水槽の両側から見せる 2 色とその 2 色のうち電気刺激を与える色の組み合わせを 3 つ設定した。赤と青の色を表示し赤側で電気刺激を与えた

パターンをパターン 1, 青と緑を表示し青側で電気刺激を与えたパターンをパターン 2, 緑と赤を表示し緑側で電気刺激を与えた側をパターン 3 とした (表 1).

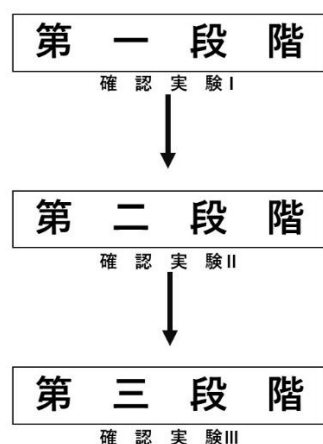
実験は第一段階から第三段階に分割して行った. 第一段階ではパターン 1 を, 第二段階ではパターン 1 と 2, 第三段階ではパターン 1, 2 と 3 を実施した.

**表 1. 色の組み合わせパターン**

| パターン | 赤 | 青 | 緑 |
|------|---|---|---|
| 1    | ◎ | ○ |   |
| 2    |   | ◎ | ○ |
| 3    | ○ |   | ◎ |

◎は電圧を加えた色を示し, ○は色表示のみを示す.

無表記は関係なし.



**図 2. 実験フローチャート**

## 2-2-2. 第一段階の実験方法

第一段階ではパターン 1 を実施した. パターン 1 では水槽の側面の 1 つに赤を表示した iPad を設置し, 同時に向かい側の側面に青を表示した iPad を設置した. 左右のどちらで赤および青を見せるかは毎回無作為に選んだ. 色を表示して 10 秒後に赤側で 10V の電気刺激を 30 秒間与え続けた.

また, パターン 1 でゼブラフィッシュが回避行動を示したと判断した後に赤と青に対するゼブラフィッシュの認識について調べる確認実験 I を 1 回行った. 水槽の片方でのみ赤または青を iPad で

10 秒間表示し, それまで電気刺激を与えていた領域(電気刺激領域)への 10 秒間でのゼブラフィッシュの侵入回数を計測した.

## 2-2-3. 第二段階の実験方法

第二段階ではパターン 1 と 2 を実施した. パターン 1 の実験方法は第一段階のパターン 1 と同様である. パターン 2 では水槽の側面の 1 つに青を表示した iPad を設置し, 同時に向かい側の側面に緑を表示した iPad を設置した. 左右のどちらで青および緑を見せるかは毎回無作為に選んだ. 色を表示して 10 秒後に青側で 10V の電気刺激を 30 秒間与え続けた. パターン 1 と 2 は同日に連続して実施した. どちらを先に行うかは無作為に選んだ.

また, 第二段階実験中に確認実験 II を日を空けて 4 回行った. 確認実験 II では水槽の両側から

同じ色を同時に表示した. 赤, 青, 緑それぞれ 10 秒間ずつ表示して, 10 秒間での両側への侵入回数を計測した.

## 2-2-4. 第三段階の実験方法

第三段階ではパターン 1, 2, 3 を実施した. パターン 1, 2 の実験方法は第二段階までと同様である. パターン 3 では水槽の側面の 1 つに緑を表示した iPad を設置し, 同時に向かい側の側面に赤を表示した iPad を設置した. 左右のどちらで緑および赤を見せるかは毎回無作為に選んだ. 色を表示して 10 秒後に緑側で 10V の電気刺激を 30 秒間与え続けた. パターン 1, 2, 3 は同日に連続して実施した. どれを先に行うかは無作為に選んだ.

また第三段階実験中に確認実験 III を日を空けて 4 回行った. 実験方法は確認実験 II と同様である.

### 3. 実験結果

#### 3-1-1. 第一段階 結果

動画記録をもとに色を表示してから 10 秒間での赤側へのゼブラフィッシュの侵入回数と電気刺激を与え始めてからの 30 秒間での赤側への侵入回数をそれぞれ計測した。計測は同じ方法で 4 回行った。結果は図 3 に示した。図 3 より赤側へのゼブラフィッシュの侵入数は減少した。このことからゼブラフィッシュはパターン 1 を学習したと判断した。

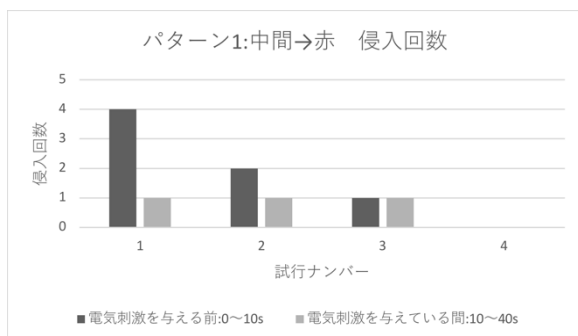


図 3. 第一段階 結果

#### 3-1-2. 確認実験 I の結果

確認実験 I の結果は図 4 に示した。

結果として赤のみを表示した時の赤側への侵入数は 0, 青のみを表示した結果, それまで電気刺激領域としていた領域への侵入回数は 4 となった。このことから, パターン 1 は記憶したと判断し, 第二段階へと移った。

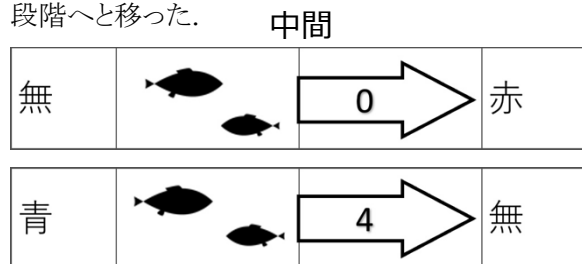


図 4. 確認実験 結果

水槽の概略図である。数字は矢印の指す領域へと侵入したゼブラフィッシュの個体数を表す。上部は赤のみを一つの側面に表示した結果, 下部は青のみを一つの側面に表示した時の水槽の中間からそれまで電気刺激領域としていた場所への侵入回数を示す。

#### 3-2-1. 第二段階 実験結果

第二段階において, パターン 1 の実験結果は図 5 に, パターン 2 の実験結果は図 6 に示した。

パターン 1 と 2 に共通していることは最初の 5 回で侵入回数は増加傾向であり, その後は減少傾向であるということだ。

また, パターン 1 では侵入回数の総数はパターン 2 と比較して少ない。

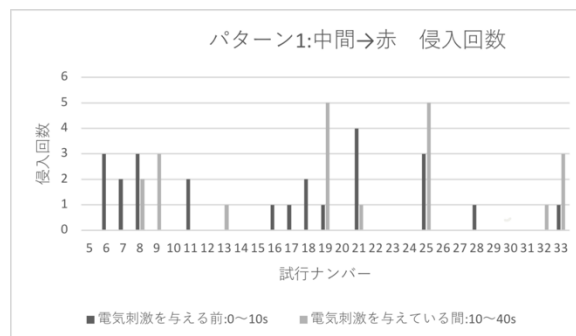


図 5. 第二段階 結果 パターン 1

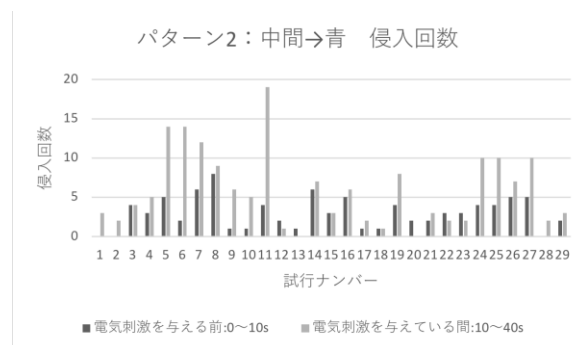


図 6. 第二段階 結果 パターン 2

### 3-2-2. 確認実験Ⅱ 実験結果

確認実験Ⅱは4回実施し、結果は図7に示した。

1色に注目してみると赤と青では4回の確認実験で侵入回数は減少傾向を示したが、緑では減少傾向は見られなかった。

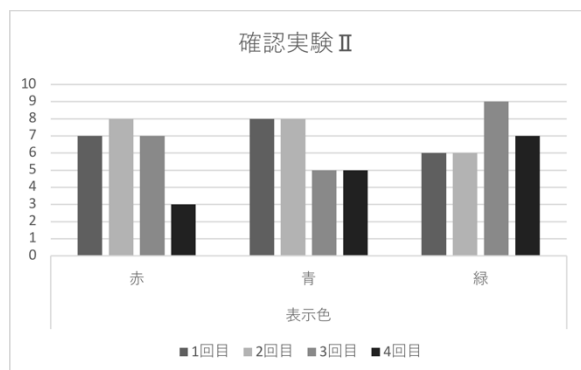


図7. 確認実験Ⅱ 結果

### 3-3-1. 第三段階の実験結果

第三段階において、パターン1の実験結果は図8に、パターン2の実験結果は図9に、パターン3の実験結果は図10に示した。ただし図8における42回目と43回目、図9における37回目と38回目、図10における8回目と9回目では8日間の空きがある。

図8から図10に共通して言えることとして最後の実験4回分の侵入回数は増加傾向であった。

はじめの実験8回分における侵入回数の結果は、共通して言えることとして減少傾向であった。また図8と図9の間では侵入回数に大きな差はなかったが、図8と図9を比較するとパターン2における侵入回数がパターン1と比べて多かった。また、図9と図10を比較するとパターン3における侵入回数が図7、図8と比べて多かった。

また第三段階において、色の組み合わせで危険な色を状況に合わせて認識して行動しているか、各色を全て危険な色と認識して行動しているかを判別するために、色表示後10秒間のパターン1から3の電気刺激を与えない側(非電気刺激領域)への侵入回数を計測し、パターン1から3までそれぞれ非電気刺激領域への侵入回数から電

気刺激領域への侵入回数を引いた数値を図11に示した。

図11からは、正の方向に大きい値をとるとき、電気刺激領域への侵入回数が非電気刺激領域への侵入回数を大きく超えていることを表すため、ゼブラフィッシュが2色の組み合わせで一方の色を回避したとみなせる。逆に小さい値を取るとき、2色を危険な色と認識して色が表示された両側を避けたことを示す。

パターン1から3で共通して言えることとして二つの侵入回数の差が減少傾向を示した。またパターン1と2ではそれぞれ9回中8回正の値を示し、パターン3では8回負の値を示した。

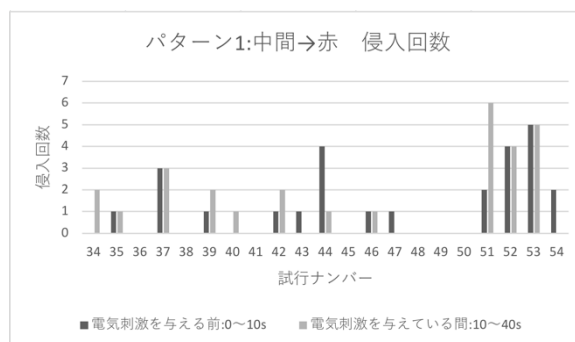


図8. 第三段階 結果①

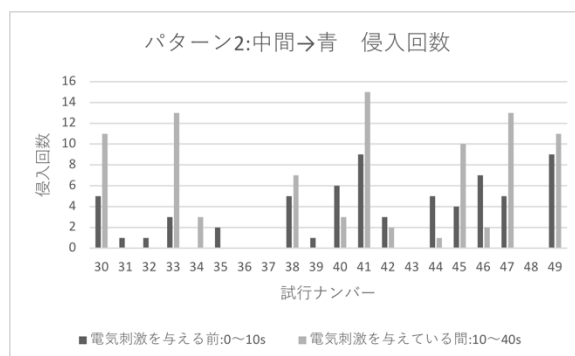


図9. 第三段階 結果②

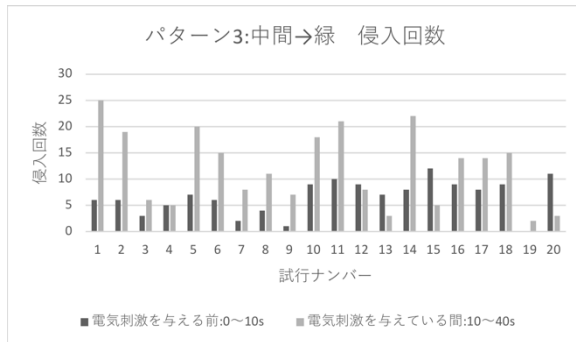


図 10. 第三段階 結果③

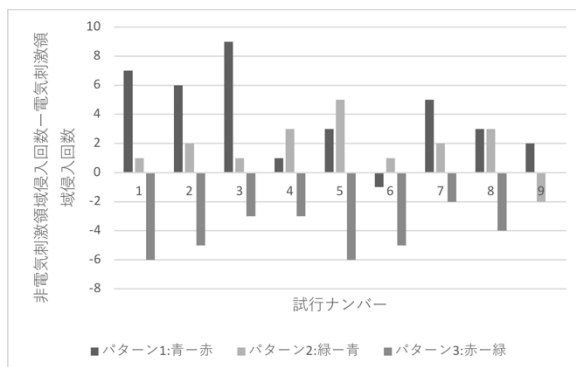


図 11. 第三段階 結果④

### 3-3-2. 確認実験Ⅲ 実験結果

確認実験Ⅲは 2 回実施した.結果は図 12 に示した.

1 色に注目して 2 回の実験結果を比較すると赤, 青, 緑総じて侵入回数は減少した.

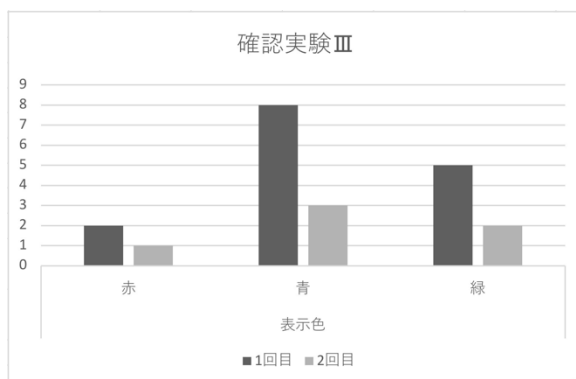


図 12. 確認実験Ⅲ 結果

## 4. 考察

### 4-1. 第一段階 考察

パターン 1 の結果からゼブラフィッシュは色を学習して回避行動を示したと言える.また確認実験 I の結果からゼブラフィッシュはパターン 1 では赤色に対してのみ回避行動を示したと言える.これは赤側で電気刺激を受けたという体験が色の記憶に結びついていていたからではないかと考える.対して青についてはそのような体験はしないため回避行動に結びつく色の記憶はされなかったと考える.

### 4-2. 第二段階 考察

図 5 と図 6 よりパターン 1 と 2 両方で初めの 5 回分の侵入回数が増加傾向であることからゼブラフィッシュがどちらのパターンでも回避行動を示さなかったと言える.パターン 2 が増加傾向であるのは学習の初期段階であるため,パターン 1 が増加傾向であるのはパターン 2 を開始したことによって新しい記憶として再学習をしようとした結果である可能性が示唆される.

また図 5 と図 6 の結果よりゼブラフィッシュは電気刺激領域への侵入回数が減少したことからパターン 1 と 2 を学習したと言える.このことからゼブラフィッシュは 2 つの状況において危険な色を正しく認識する能力があると考えられる.

また確認実験Ⅱの結果より,緑のみ侵入回数に減少傾向が見られなかったことから緑に対して回避行動を示していないことがわかる.対して赤と青では減少傾向が見られることから赤と青に対して回避行動を示したと言える.これはパターン 1 とパターン 2 では緑側で電気刺激を与えていないためだと考える.

### 4-3. 第三段階 考察

図 8 から 10 の 8 日間の空き以前の期間の実験結果ではパターン 1 から 3 まで総じて減少傾向を示したことから,この期間でゼブラフィッシュは一度学習したと考えられる.その後パターン 1 から 3 における侵入回数が増加したことから,8 日間の空

白期間でゼブラフィッシュが学習記憶を忘却したと考えられる。

記憶の定着過程において図 8 から 9 よりパターン 1 よりもパターン 2, パターン 2 よりもパターン 3 の方が全体的に侵入回数が多い傾向であることから記憶定着度はパターン 1, 2, 3 の順によかったと言える。また図 11 においてパターン 3 のみ負の値を取っていることから電気刺激領域への侵入回数が非電気刺激領域への侵入回数を超えていたことが明らかであり, そのことからパターン 3 の記憶定着度はパターン 1, 2 と比較して特に低かったと考えられる。そのことから同じ条件下での学習の反復回数が多い分記憶定着度は高くなったと考えられる。

図 11 において非電気刺激領域への侵入回数から電気刺激領域への侵入回数を引いた値に減少傾向が見られたことから, ゼブラフィッシュは第三段階において赤, 青, 緑の 3 色全てを危険な色と認識し電気刺激を与えられるかどうか関係なく表示した色に対して回避行動を起こしたと考えられる。

そのことから第一段階においては赤色を危険と認識し, 第二段階で青色を新しく危険と認識し, 第三段階で緑色を新しく危険と認識していったと考えられる。第三段階で図 11 においてパターン 3 のみが負の値を複数回とった理由として赤色が危険という認識の元, 行動していた中で緑色を危険と認識する学習を行っていたと考えられる。

また図 12 の結果より 1 色に注目してみるとどの色も 2 回目の実験での侵入回数が 1 回目よりも減少した。また 2 回目での各色の数値に大きな差がない。このことから最終的に赤, 青, 緑の 3 色に対して等しく回避行動を起こしたと考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

第一段階から第三段階までの実験結果を通して, ゼブラフィッシュは赤, 青, 緑の各 3 色を識別して記憶する能力があるとわかった。また電気刺激を与えられたという体験が色の記憶に強く結びつくことが確認できた。さらに記憶の定着度は学習の反復数に依存することも確認できた。

ゼブラフィッシュが単色以外に 2 色の組み合わせで記憶できるのか今回は判断できなかった。そのため, 片方は赤と青を iPad で分割表示し, 反対側では緑と黄色を分割表示して, 赤と青の方に電気刺激を与える。その後, 赤だけを表示するとゼブラフィッシュがどのような動きをするのかを確認したい。これで, 回避行動を取らなかった場合は組み合わせで記憶したと判断できる可能性がある。

## 6. 参考文献

- 1) Yohey Ogawa・Tomoya Shiraki・Yoshimasa Asano・Koichi Kawakami・Yutaka Suzuki・Daisuke Kojima・Yoshitaka Fukuda, 2019.2.14, Six6 and Six7 coordinately regulate expression of middle-wavelength opsins in zebrafish, 2023.4.28
- 2) 飯田朋華・片岡礼・川口よしの, 2018, ゼブラフィッシュから見える世界, p59-p61

# 矮性ヒマワリ (*Helianthus annuus*) を用いた生育条件の検討

## ～大きなヒマワリを育てるために～

擣木弥央 白数麗美 能勢真優

### 要旨

矮性ヒマワリであるスマイルラッシュを育てるのに最も適した条件を決定することを目的とした。大・中・小の鉢を3つずつを窓際の側・人工気象器の中に1セットずつ置き、生育させた。草丈、茎の太さ、最大葉の大きさの3つの観点について測定し、各条件での優位差の有無を調べた。気温が高く、大きな鉢の方がよく育つという仮説に対して、窓際の鉢が、鉢の大きさについては中の鉢がよく育つという結果が得られた。

### 1. はじめに

スマイルラッシュは普通のヒマワリよりひと回り小さい矮性ヒマワリであり様々な大きさの鉢で育てることが可能である。最も大きなヒマワリを育てるにはどのような条件が最も適しているかを明らかにすることを目的として研究を行なった。茎の太さが太く、草丈が高く、最大葉の大きさが大きいものをヒマワリと定義する。

温度・土の体積の条件を変えて育て、違いを調査した。ヒマワリの発芽温度は 25℃前後、生育温度は 15～35℃が適正であることが報告されている<sup>1)</sup>。また、土の体積が大きいほど根が張りやすく、土に含まれる水の量が増えることで吸収できる水の量も増えると考えられるため、より成長すると考えられる。このことより私たちは土の推積が大きいほど、気温は 25℃以上で高く大きく育つという仮説を立てた。

大きさの異なる 3 種類の鉢をそれぞれ 6 個ずつ計 18 個用意した。それぞれを半分ずつに分け、一方を窓際(図 1)でもう一方を人工気象器(図 2)で育て、成長にどのような差が見られるのかを観察した。

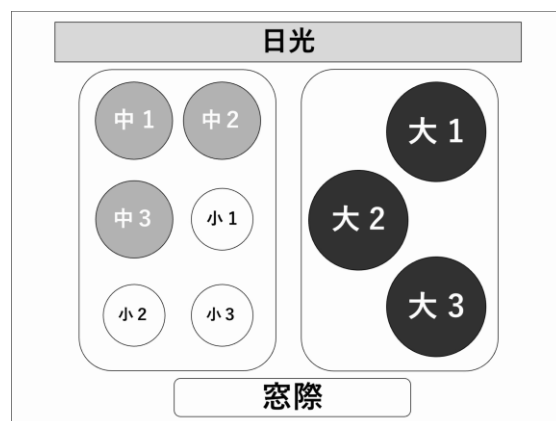


図 1. 窓際の配置図

窓際の側においた鉢の配置図。

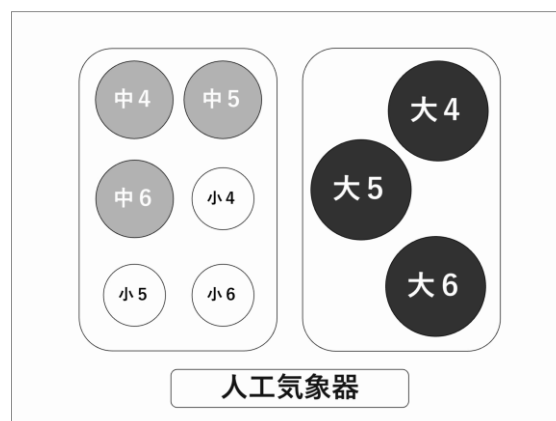


図 2. 人工気象器の配置図

人工気象器の中においた鉢の配置図。光源は蛍光灯を用い真上から照射を行った。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

矮性ヒマワリ的一种であるスマイルラッシュの種を黒色のポリポット(直径が 6cm, 9cm, 12cm である 3 種類の鉢)に培養土を入れ、バットに設置し、育ちをよくするために粒状の化成肥料などを用いて実験を行った。測定には、15cm 定規とノギスを用いた。

### 2-2. 研究方法

直径 12cm のポリポットを大の鉢、9cm のポリポットを中の鉢、6cm のポリポットを小の鉢とし、それぞれ 6 個ずつ計 18 個用意した。大の鉢には 600ml (233.50g)、中の鉢には 300ml (123.21g)、小の鉢には 150ml (61.86g)の土をそれぞれ入れた。大・中・小の鉢をそれぞれ 3 ずつに分け、3 つの大の鉢を 1 つのバットに入れ、3 つの中の鉢と 3 つの小の鉢計 6 つの鉢を 1 つのバットに入れた。この 2 つのバットを 1 セットとし、これをもう 1 セット作った。このうち一方を窓際(図 1)の側で、もう一方を人工気象器(図 2)の中で育て、成長にどのような差が見られるのかを観察した。水やりは毎日行い、休日は前日にバットに水を 3cm ほど張り、水不足でヒマワリが枯れることを防いだ。週に 1 回、「茎の太さ」・「草丈」・「最大葉の大きさ」の各項目の測定を行った。この測定は 9 月 8 日から 11 月 24 日まで計 12 回行った。肥料は 11 月 3 日に行った。培土に予め入ってる元肥と窒素、リン酸、カリウム、マグネシウムの入った追肥により健全な生育ができるよう栽培した。

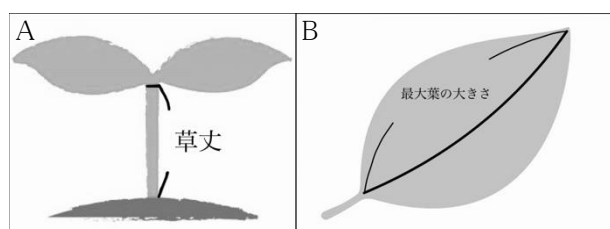


図 3. 本研究で調査した測定部位

A は草丈の長さを示す。草丈は地際部から頂芽までの長さを測定した。B は最大葉の長さを示す。

## 3. 結果

グラフ(図 4, 図 5, 図 8, 図 9, 図 10, 図 11)のように、茎の太さ、草丈および最大葉の大きさについて測定し、T 検定により有意差を確認した。これらの 3 つのグラフ(図 6, 7, 12)は有意差を示した。アスタリスクは有意差が認められた(P 値が 0.05 未満)ことを示し、アスタリスクが 2 つあるものはより有意差が大きい(P 値が 0.01 以下)ことを示している。

### 3-1. 「茎の太さ」においての実験結果

茎の太さでは、図 4, 6 のように窓際の大の鉢と中の鉢では 10 月 27 日以降の後半に中の鉢の方が茎が太いという有意差が出たが、それ以外には優位差は確認されなかった。図 5, 7 のように窓際の大の鉢と人工気象器の大の鉢では人工気象器の大の鉢のほうが茎が太いという有意差が認められたが、11 月 24 日以前では認められなかった。

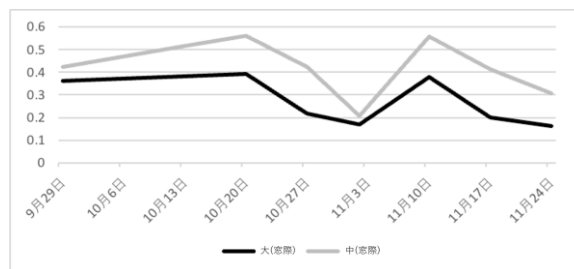


図 4. 茎の太さ (大と中)

窓際の大的鉢と中の鉢の茎の太さの経緯図。縦軸は茎の太さの値、横軸は経過の日数を表す。

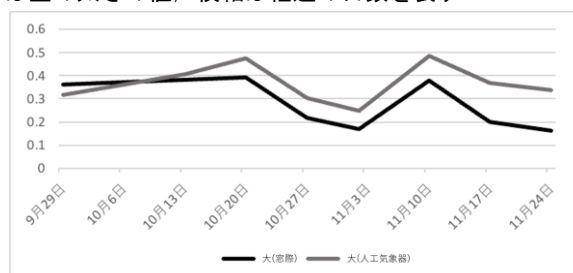


図 5. 茎の太さ (大と大)

窓際の大的鉢と人工気象器の大的鉢の茎の太さの経緯図。

緯図。図4と同様に縦軸は茎の太さの値、横軸は経過の日数を表す。

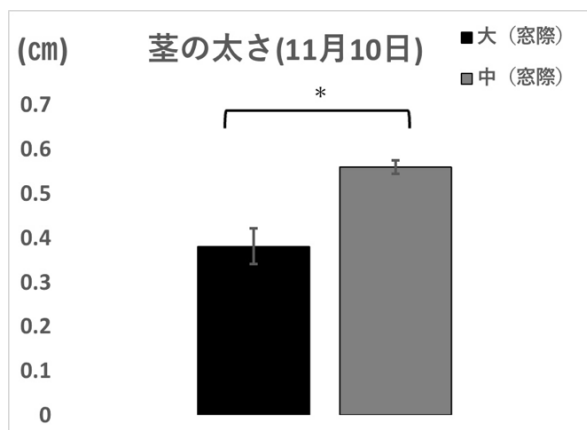


図 6. 11 月 10 日の茎の太さの優位差

茎の太さにおいて 11 月 10 日の大の鉢と中の鉢のグラフ。P 値が 0 以上 0.05 未満であり、優位差が認められた。

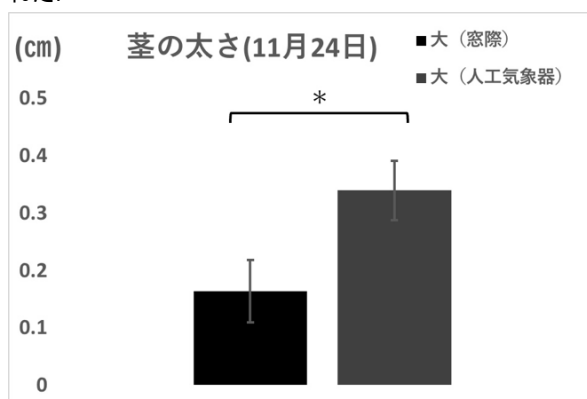
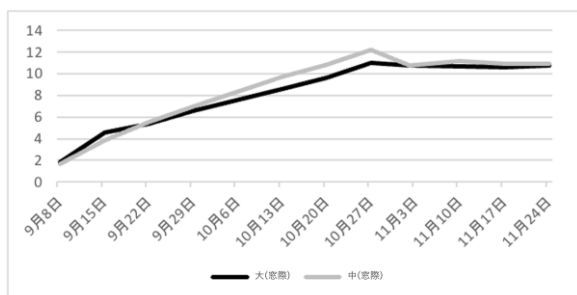


図 7. 11 月 24 日の茎の太さの優位差

茎の太さにおいて窓際と人工気象器のグラフ。P 値が 0 以上 0.05 未満であり、優位差が認められた。

### 3-2. 「草丈」における実験結果

草丈については、図 8, 9 のように窓際の大の鉢と中の鉢、窓際の大の鉢と人工気象器の大の鉢、両者ともどちらかのほうがより大きいという有意差は見られなかった。



### 図 8. 草丈 (大と中)

窓際の大の鉢と中の鉢の草丈の経緯図。縦軸は草丈の値、横軸は経過の日数を表す。

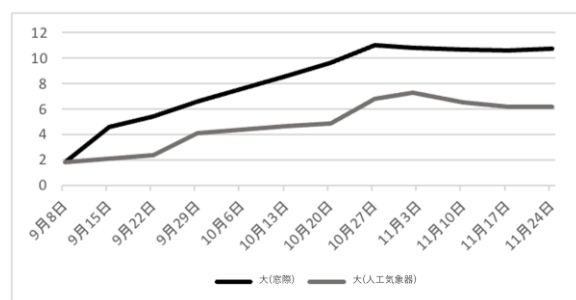


図 9. 草丈 (大と大)

窓際の大の鉢と人工気象器の大の鉢の草丈の経緯図。図 8 と同様に縦軸は草丈の値、横軸は経過の日数を表す。

### 3-3. 「最大葉の大きさ」における実験結果

最大葉の大きさについては、図 10, 11 のように窓際の大の鉢と中の鉢の間でも、窓際の大の鉢と人工気象器の大の鉢でも有意差は見られなかった。草丈、最大葉の大きさの観点ではまれに有意差が現れることがあったが、図 12 より有意差がないと判断できる傾向が見られた。

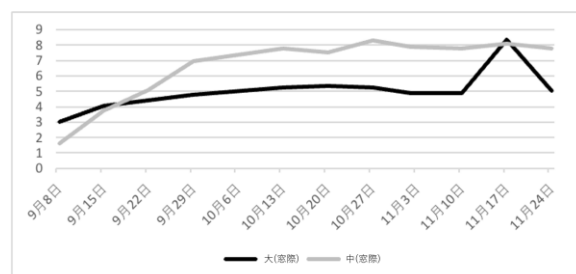
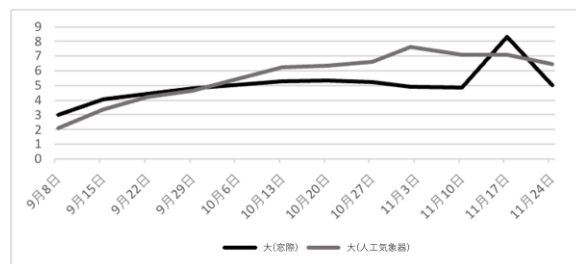


図 10. 最大葉の大きさ (大と中)

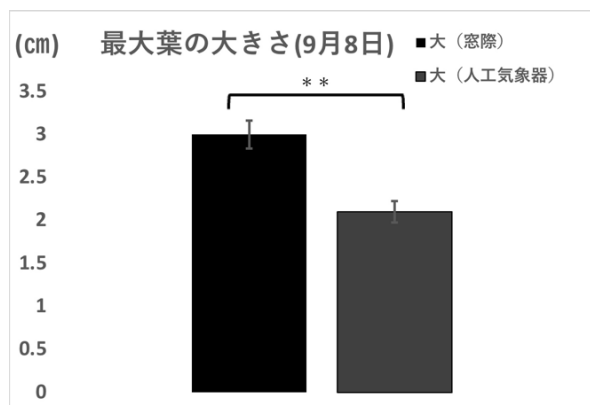
窓際の大の鉢と中の鉢の最大葉の大きさの経緯図。縦軸は最大葉の大きさの値、横軸は経過の日数を表す。

### 図 11. 最大葉の大きさ (大と大)



窓際の大の鉢と人工気象器の大の鉢の最大葉の大きさの経緯図。図 10 と同様に縦軸は最大葉の大きさの値、横軸は経過の日数を表す。

値、横軸は経過の日数を表す。



**図 12. 9 月 8 日の最大葉の大きさの優位差**  
最大葉の大きさにおいて窓際と人工気象器のグラフ。  
P 値が 0.01 以下であり、優位差が認められた。

窓際のの小の鉢、人工気象器の中、小の鉢については 3 個の鉢のうち 2 個しか発芽せず、T 検定を行うことができなかった。また、花茎の大きさについては 1 つの鉢に複数開花しているものもあれば、そうではないものもあり、データの収集が困難であると判断したため、この観点のデータは扱わなかった。気温が 25℃以上で高く大きく育つという仮説の通り窓際の鉢の方がよく育った。また、初めは大の鉢の方が 3 つの観点においてより成長していたが、途中からは仮説に反して中の鉢のほうが成長した。

#### 4. 考察

中と大の鉢を比較した時、中の鉢の方が良い生育を示した(図 4,6)。大の鉢の生育が良くなかった要因として水の存在が考えられる。多量の水は根の成長を阻害することが知られている<sup>2)3)</sup>。全体として、窓際の中の鉢が大の鉢よりも成長したことから、大の鉢には成長に適した量より多くの水分が含まれていたと考えられる。大の鉢は土 233.50g において水 360g を吸収しており含水率は約 60.7%である。中の鉢は土 123.21g において水 150g を吸収しており、含水率は約 55.0%である。ゆえに、大の鉢は中の鉢より含水率が 5%も高く、根の成長が阻害されたことでヒマワリの生育が悪く

なつたと考えられる。これにより、含水率の高さが原因であるとする、灌水量を抑えることで生育を良くすることが可能だと考えられる。

茎の太さの観点において、窒素を多く含むと茎が太くなることが知られている<sup>4)</sup>。また、平均気温が低いと窒素の含有率が低くなり、低温環境では表層土壌の質素含有率、同 C-N が比が高い値を示し、土壌有機物の分解が抑制され、窒素の可給性が低くなることが知られている<sup>5)</sup>。それにより、人工気象器で、途中から茎の太さに差がでる結果が示されたのは、月日を経つにつれ窓際よりも気温が高くなっていったことにより、土壌の分解速度が増して窒素の含有率が高くなったことが原因と考えられる。ゆえに、低温環境である窓際では、十分な窒素量が得られずこのような結果になったと考えられる。また、後半にかけて有意差が見られたことから、成長するにつれて根の張り具合に差が生じ、吸収可能な水の量が異なることで成長にも差が生じたと考えられる。このことから、茎の太さと根の成長は関連していると考えられる。これに加えて 11 月 3 日での値が低くなっていることが見受けられる。これは肥料が足りなくなったことで見られた現象だと考え、追肥を行った。

窓際の中の鉢と大の鉢について草丈の観点においては、数値的には有意差は見られなかったが、実際は中の鉢のほうが大きいという印象を受けた。これは、大の鉢の中に大きいものと小さいものがあり、値が偏ったためではないかと考えられる。最大葉の大きさについては、有意差が見られなかったため、葉は鉢の大きさに関係なく成長すると考えられる。

優位差は得られていないが、小の鉢よりも中の鉢のほうが成長したように見えた。これは小の鉢は鉢が小さいため、根が張りきれなかったのではないかと考えられる。また、窓際の中の鉢と小の鉢に関しては日当たりの関係で中が大きく育ってしまったため、小に十分に日光が当たらず、小の鉢方が中の鉢と比べて成長が悪くなったということも考えられる。

## 5. まとめ・今後の課題

本研究の結果から、茎の太さと根の成長は関連していることが示唆された。このことから今後、窓際の大の鉢と人工気象器の大の鉢の間でも、茎の太さに有意差が出る可能性があると考えられる。

今後の課題としては、窓際と人工気象器の日照時間という条件を正確に合わせられなかったことや土の硬さによる根の成長の阻害について調べることがあげられる。また、窓際の鉢についてより窓に近く日光があたっていた鉢がより成長し、窓から遠い方の鉢に日光が当たりにくくなってしまったことから、一日ごとにバットの向きを逆にし、どの鉢にも均等に鉢が当たるようにする工夫をすることも考えられる。他にも、全ての区間で T 検定が出来るように少なくとも比較できる鉢を 3 つ以上準備することも課題としてあげられる。

## 6. 参考文献

- 1) 池口英明, 2021.6, 矮性ひまわり, 2019 タキイ最前線 春種特集号, 43～45  
[https://www.sasakawa.co.jp/cms\\_sasakawa/wp-content/uploads/2021/06/2019\\_sp\\_43\\_46.pdf](https://www.sasakawa.co.jp/cms_sasakawa/wp-content/uploads/2021/06/2019_sp_43_46.pdf)
- 2) 山本福壽, 2016, 樹木と環境 第 6 回:水と樹木, 樹木学の基礎講座, 20, 1, 40～46.  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/treeforesthealth/20/1/20\\_40/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/treeforesthealth/20/1/20_40/_pdf/-char/ja)
- 3) 石原邦, 1997, 水環境に対する植物の反応について, シンポジウム, 76, 23～29.  
<https://js-soilphysics.com/downloads/pdf/076003.pdf>
- 4) 片岡静, 2021, トマトの育て方.com, トマト栽培 Q&A, トマト茎が太い  
[https://トマトの育て方.com/トマト栽培\\_qa/トマト茎が太い.html](https://トマトの育て方.com/トマト栽培_qa/トマト茎が太い.html)
- 5) 重永英年, 2003, 日本におけるスギ針葉の窒素含有率

# 片眼のプラナリア *Dugesia japonica* による光走性

池内秀典 岡本侑也 道明宙也 松浦元樹

## 要旨

プラナリアの光受容と行動の関係について興味をもち、片眼のプラナリアが光を当てられた時の行動を調べた。プラナリアを1匹シャーレに入れ、周りを暗くし、温度を15℃に保つなど、環境をできる限り飼育環境に近づけた中で光を当て、プラナリアの行動を調べた。その結果、片眼のプラナリアによる光走性が弱くなることが示された。

## 1. はじめに

プラナリア *Dugesia japonica* はウズムシとも呼ばれ、河川などの淡水に棲み、石や枯葉の裏に張り付いている。体内に幹細胞を多く持つため、複数の切断しても全ての小片が再生して個体となる。

プラナリアはその驚異的な再生能力が注目され、多くの研究がされているが、私たちは再生能力とは違う側面からプラナリアについて研究し、眼で受け取る光の情報と負の光走性との関係を詳しく調べる基礎研究を固めるのが目的である。プラナリアは体の前方に2つの眼を持つ。先行研究では、プラナリアに光を当てたところ負の光走性を示し、また、彼らの自律的首振り運動について、『プラナリアは脳にある視覚中枢領域にある GABA 神経回路の制御によって左右の視神経から入力される光信号を比較して光の方向を認識し、左右の眼からの信号が等しくなるように体の向きを方向転換している』と報告されている。<sup>1</sup>

本研究では、片眼を取ることによってプラナリアの光応答定位行動に関して何らかの変化が起きることを予想し、実験をした。変化に関して、具体的にはプラナリアが片眼を取り除かれることにより、取り除かれた眼からの信号を受け取れなくなることで、片方の眼の方に恒久的に強い光が来ていると錯覚し、光走性に基づき、回転するような反応を示す、つまり、負の光走性が示されなくなると考えた。

## 2. 材料・研究方法

### 2.1 実験材料

プラナリア  
iPhone  
水槽  
シャーレ  
黒画用紙  
ガラス板  
方眼紙  
濾紙  
保冷剤  
双眼実体顕微鏡  
ピンセット

### 2-2. 研究方法

#### 準備

プラナリアの片眼を取り除くにあたり、プラナリアの動きを鈍くする目的で、プラナリアを濾紙を介して保冷剤の上に置き、双眼実体顕微鏡を用いて拡大しながら針で眼を取り除いた。

#### 実験①

半分を黒画用紙で覆って影を作ったシャーレに無処理のプラナリアを三匹入れ、20分間真上から光にあて、プラナリアが影に入っている合計時間を計測した。

また、この際温度を一定に保つため 15℃に保たれた低温定温器の中で実験を行った。次に、片眼のプラナリアに対して同じ実験を行った。



図 1. 実験①で用いた実験装置

### 実験②

片眼が取り除かれて 24 時間後のプラナリアを入れた水槽を方眼紙の上に置き、蛍光灯でケースの真横からプラナリアに光をあて、その際の動きをスタンドで固定したスマートフォンを用いて撮影した。また暗室で行うことで、蛍光灯より照らされた光以外はプラナリアに感知されないようにした。

## 3. 結果

### 3-1. 実験①の結果

無処理のプラナリアの結果は図2の通りである。一個体あたりの平均時間は影に居た時間が 788 秒、光の当たるところに居た時間が 412 秒となった。

片眼を取り除いたプラナリアの結果は図3の通りである。一個体あたりの平均時間は影にいた時間が 527 秒、光の当たるところにいた時間が 673 秒となった。

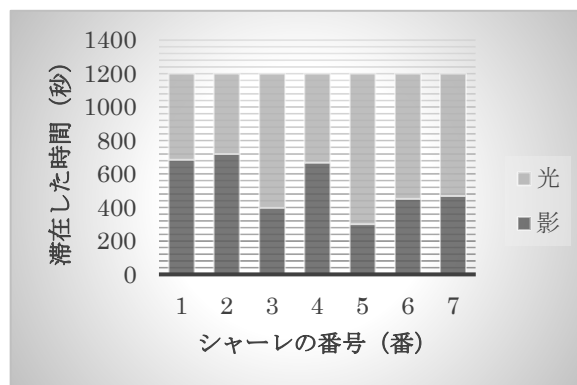


図 2. 実験① 無処理のプラナリア

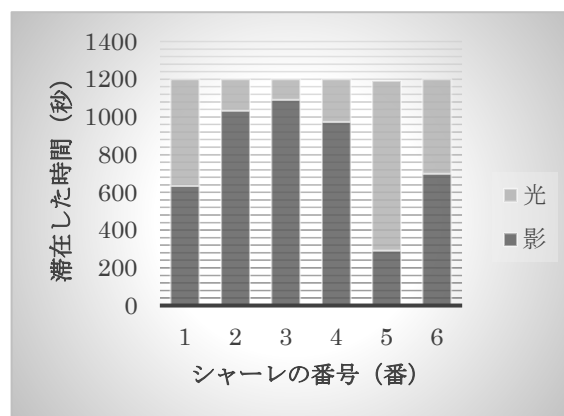


図 3. 実験①片眼のプラナリア

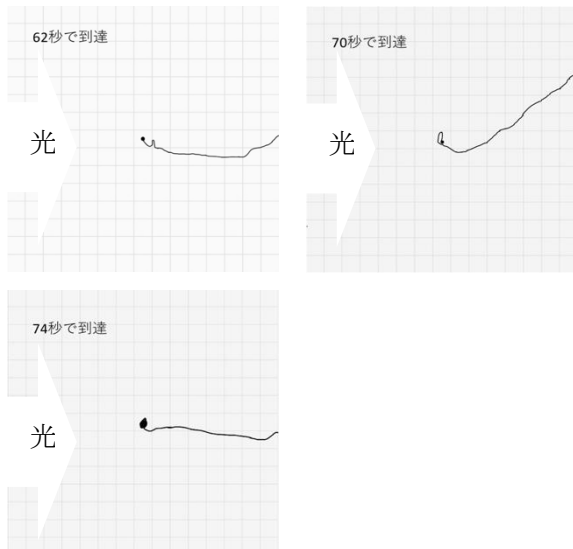
実験には片眼を取り除いてから 24 時間が経過した個体 c ののみを使用した。

### 3-2. 実験②の結果

無処理のプラナリアは底に全身を滑らせるように動いたのに対し、片眼のプラナリアでは、突然体を縮めて頭部を大きく持ち上げ、方向転換するという特有の動作が確認された。

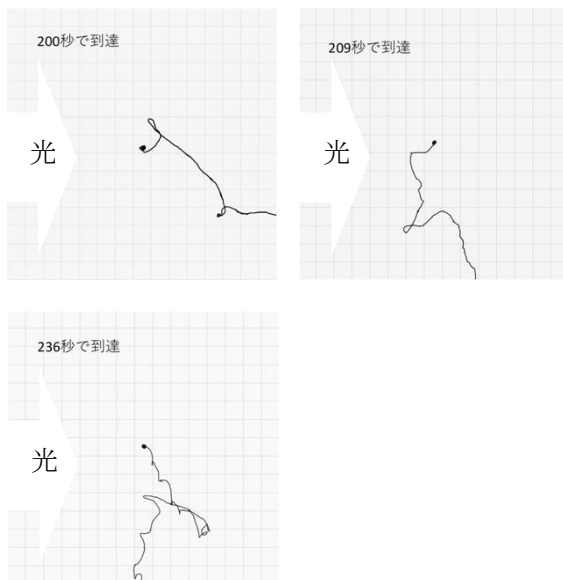
自律的首振り運動については、無処理のプラナリア、片眼のプラナリアのいずれにおいても問題なく確認された。

図4、図5からも確認できるように、無処理のプラナリアは光から直線的に逃げたのに対し、片眼のプラナリアは無作為な方向に逃げるような行動が観察された。



**図 4. 実験② 無処理のプラナリア**

ある 1 マスの中心を始点（黒点）としてプラナリアを配置した。そのマスの周囲 7 マスを範囲とし、その範囲を出るまでの軌跡を模写、到達までにかかった時間をそれぞれの左上に記した。線はプラナリアの頭部の動きのみを参照した。いずれの図も左側から光を当てたものになっている。実線はプラナリアの頭部の動きのみを示した。



**図 5. 実験②片眼を取り除かれたプラナリア**

図 4 と同じようにして、片眼を取り除いて 24 時間が経過したプラナリアにおいても実験を行った。いずれの実験においても光は左から当てている。

#### 4. 考察

実験①, ②より, 無処理のプラナリアは片眼のプラナリアに比べて負の走光性が顕著に表れていることがわかる。これは, 片眼では光の向きを特定しにくいためだと考えられる。

実験②において片眼のプラナリアで見られた特有の動作について, これは, 片眼が傷つけられたことにより視覚情報処理や方向感覚に変化が生じている, もしくは片目を取り除くときに脳などの中枢神経を傷つけてしまっていることが考えられる。

図 5 を参照すると, 片眼のプラナリアは特定の方向に回転し続けるという仮説は間違っていた可能性が高いと言える。

図 4, 図 5 より, 無処理のプラナリアは光から直線的に逃げたのに対し, 片眼のプラナリアは無作為な方向に逃げたことについて, それぞれの眼からの信号がどの方向を見ても同じにならず, 光の向きが特定しにくかったためだと思われる。

#### 5. まとめと今後の課題

本実験では片眼のプラナリアは無処理のプラナリアと比べて負の光走性の程度が弱くなることがわかった。

また, 片眼のプラナリアは実験中, 無処理のプラナリアには見られない動きをしたため, その行動を示す条件, 理由を調べるのが今後の課題である。具体的には, その動きは体を縮めて頭部を大きく持ち上げ, 方向転換するという動きだが, この動きが片眼を取ったことによって起きたのか, あるいは, どの体の部位を傷つけることでも見られるのか, あるいは, 眼の周辺の中枢神経を傷つけてしまったことによることかどうかなどを調べたい。

私たちの実験では眼を取り除く時に, 中枢神経を傷つけてしまっている可能性がある。そのことが実験に影響を与えないようにするため, リドカインを用いると良いと思われる<sup>2</sup>。リドカインを直接眼の周りに注射することで眼の機能を停止させ, 中枢神経, その他の眼の周りの組織への影響を最小限にして実験を行えるだろうと考えている。

## 6. 参考文献

<sup>1</sup> 井上 武, 2018.09.25, 大学プレスセンター

<https://www.u-presscenter.jp/article/post-40116.html>

2023.11.24

<sup>2</sup> Yoshitaro Akiyama, Kiyokazu Agata,  
Takeshi Inoue, 2018, COMMUNICATIONS  
BIOLOGY, Coordination between binocular  
field and spontaneous self-motion specifies  
the efficiency of planarians' photo-response  
orientation behavior

# Xによる京都観光の分析

岡橋龍司 中井芳樹 吉田侑生

## 要旨

京都には多くの歴史的建造物や自然があり、世界中から多くの人が観光に訪れる。特に、人気観光地ではオーバーツーリズムが問題となっている。その問題を解決する方法を考案するために本研究では、Xの投稿内容から京都観光の特徴を調査した。その結果、建造物や風景の写真だけではなく、アニメのキャラクターの人形やアクリルスタンドと写った写真が多く投稿されていることが明らかになった。アニメのキャラクターなどを用いて、あまり人気のない観光地に観光客を呼ぶことで、オーバーツーリズムの問題を解決できるのではないかという結論に至った。

## 1. はじめに

2019 年まで、日本は急速に観光客数を伸ばしてきた。国土交通省の調べによると2019年には、訪日外国人旅行者数が 3188 万人に達し、2018年に続き 3000 万人を超え、過去最高となったということが報告されている<sup>1)</sup>。2030 年には訪日外国人旅行者数 6000 万人、消費額 15 兆円を目指していた<sup>2)</sup>。

しかし、2020 年から世界中で流行した、新型コロナウイルスの影響で日本の観光客は激減してしまった。2020年は412万人、2021年は25万人、2022年は383万人となっている<sup>1)</sup>。現在コロナウイルスの流行はおさまリ、2022年の日本政府による外国人観光客の入国者数上限撤廃と個人旅行者の受け入れの再開によって再び観光客が戻ってきている。図 1 のように令和4年度の観光客は令和元年度の半分以上と、京都にも多くの旅行者客が戻ってきていることがわかる。

観光は経済を活性化するだけでなく、文化の継承にもつながり、その地域の発展を支えるものとなっている。しかし、観光がもたらすのはそのような利点だけではない。

人気観光地では観光客が集中し、渋滞、混雑、騒音などの様々な問題が発生しやすくなっている。このような観光客の集中による弊害は近年、「オーバーツーリズム(観光公害)」と呼ばれており、

様々な歴史敵建造物や豊かな自然がある京都でも、例えば、観光客によって地域の住民がバスを利用できない場合があること、ゴミのポイ捨てなどが問題となっている。

この問題を解決するにはまず、京都を訪れる観光客の目的や行動を知る事が重要である。そのためには多くの情報を集める必要があり、現在世界中で多くの人が利用する X(旧 Twitter)を使うのが最適なのではないかと考えた。X で見られる観光に関する投稿の多くには、写真が添付されており、投稿者の観光行動を把握できる。また、投稿データは X のユーザーであれば誰でも閲覧することができ、多くの観光行動のサンプルを得ることができる。アンケートでは入手できない日本全国のユーザーの観光分析も可能である。

このことから、本研究では X で観光客の行動を把握することで、京都観光における目的や傾向を掴み、混雑する京都の観光地での観光客の分散方法を提案する。

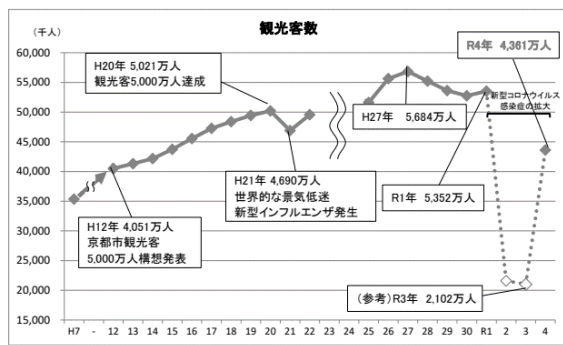


図 1. 京都を訪れる観光客数の推移  
(京都市産業観光局調査 2022<sup>4)</sup> より)

## 2. 研究方法

X で“京都旅行”などの京都観光に関するワードを検索し、2023 年 4 月から 2023 年 12 月までの訪れた場所がわかるポストを探した。Google の画像検索機能を使用して写真が撮影された場所を特定し、どのような観光地を訪れているのか集計を行った。また、投稿内容や写真を見てどのような目的でその場所に訪れているのか分析を行った。

## 3. 結果

136 件の投稿データを収集した。清水寺が 44 ポスト、伏見稲荷が 38 ポスト八坂神社が 32 ポスト、金閣寺が 24 ポスト、嵐山が 24 ポスト、渡月橋が 22 ポスト、京都駅が 20 ポスト、京都水族館が 12 ポスト、貴船神社が 12 ポスト、京都タワーが 10 ポスト、下鴨神社が 10 ポスト、平等院が 10 ポスト、東寺が 8 ポスト、という結果になった。寺社仏閣の写真の投稿が非常に多くみられたが、その中で清水寺のポストには周辺の古い街並みの写真を一緒に投稿したものも多かった。

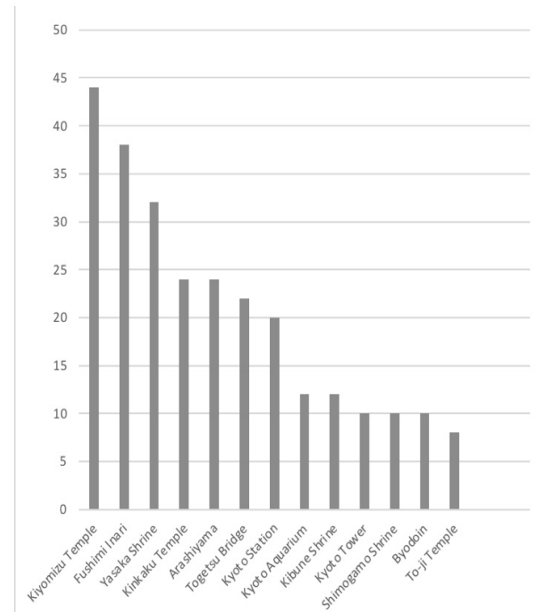


図 2. 各観光地のポスト数

また、投稿された写真の多くは、風景や食べ物の写真であった。しかし、その中にアニメのキャラクターやマスコットキャラクターの人形の写真が見られた。風景や食べ物のみを写した写真とアニメキャラクターなどが写っている写真の割合は図 3 のようになった。キャラクターの種類としては、近年流行しているアニメキャラクター、京都所縁のアニメキャラクター、推しの Vtuber のぬいぐるみ、アクリルスタンドを写したものが見られた。観光地とコラボしたキャラクターの写真もあるが、自分が好きなキャラクターの人形等を用意して配置した「推し活」関連ポストも多いことが明らかになった。

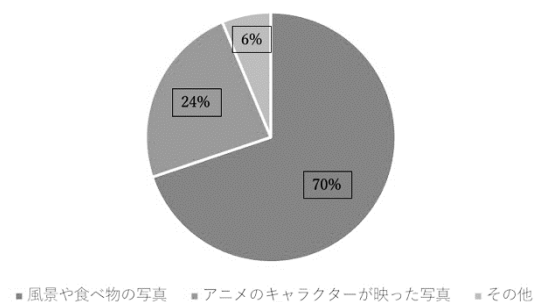


図 3. ポストされた写真の内容

#### 4. 考察

Xを使った京都観光の調査の結果、Xにおける京都観光の特徴として、清水寺や伏見稲荷などの歴史的な建造物への訪問を目的にしている人が多いということが分かった。また、その他にもアニメのキャラクターやマスコットキャラクターの人形やアクリルスタンドと写っている写真も25%程度見られたことから、推し活や聖地巡礼を目的とした観光も多いことが明らかになった。

このことから、京都でも推し活を旅行の目的の一つとしている観光客をターゲットとして、観光客の少ないエリアでキャラクターとコラボした企画や、アニメの世界観を体験できる、舞台となった土地などを訪れる「アニメツーリズム」の企画を実施することで、観光客を分散させることが可能ではないかと考えられる。京都府以外の自治体でもすでにアニメ会社と協力して『舞台探訪マップ』をつくるなど、市が率先して聖地巡礼を促進してアニメとコラボした観光誘致を行い、成功している例もある<sup>5)</sup>。

スペインの中で最も観光客が多いバルセロナでは政府観光局が有名都市以外の魅力を積極的にPRすることで、観光客を計画的に分散させてオーバーツーリズムを回避している<sup>6)</sup>。京都でも我々が提案するような「アニメツーリズム」により観光客を分散させ、オーバーツーリズムを回避するためには、行政が積極的に環境を整え、アニメ以外の観光資源も掛け合わせて回遊性を高める必要があると考える。

また、「アニメツーリズム」を推進する上で持続的な取り組みをすることも大切である。地元の住民に受け入れられる企画にすることはもちろん、単発の企画で終わるのではなく、様々な企画を継続して実施することや何度も訪れる必要がある企画を実施することで、アニメのファンが徐々に地域のファンにもなっていくのではないかと考える。

#### 5. まとめと今後の課題

今回の研究では、Xを使った京都観光の分析と、そこからオーバーツーリズムの解決策の提

案を行なった。観光客の少ない観光地や地域で行政が主体となって環境を整え、アニメのキャラクターなどとコラボする「アニメツーリズム」を推進することで、観光客を分散させることで渋滞や混雑といった問題の解決につながる可能性があるという結論に至った。今回はXを用いた情報の収集を行ったが、他のソーシャルメディアを使った場合の情報との違いについても研究を進めていきたい。

また、行政が「アニメツーリズム」を京都で浸透させるためにどのように環境を整えるのか、その方法や、「アニメツーリズム」が次のオーバーツーリズムを引き起こさないようにするためにはどうすればいいのかを検討していく必要があると考えている。

#### 6. 謝辞

本論文の執筆にあたり丁寧な指導と適切な助言をいただきました総合地球環境学研究所の研究員の方々にお礼を申し上げます。

#### 7. 参考文献

- 1) 国土交通省, 2023.7.6, 訪日外国人旅行者・出国日本人数  
[https://www.mlit.go.jp/kankoch/siryou/toukei/in\\_out.html](https://www.mlit.go.jp/kankoch/siryou/toukei/in_out.html) 2023.1.13
- 2) 観光庁, 2023.4.3, 観光庁 令和4年3月,  
<https://www.mlit.go.jp/kankoch/content/001466906.pdf> 2023.1.13
- 3) 外務省, 2023.5.9, 海外渡航・滞在 新型コロナウイルス感染症に関する水際対策の強化に係る措置について  
[https://www.mofa.go.jp/mofaj/ca/fna/page4\\_005130.html](https://www.mofa.go.jp/mofaj/ca/fna/page4_005130.html), 2023.2.2
- 4) 京都市産業観光局, 2023.6.1, 京都産業観光局調査 2022  
<https://www.city.kyoto.lg.jp/sankan/page/0000313654.html>
- 5) 自治体・公共 Week, 2021.9.13, アニメ×町お

こし。聖地巡礼や観光誘致につながる取り組みとは？

[https://www.publicweek.jp/jajp/blog/article\\_29.html](https://www.publicweek.jp/jajp/blog/article_29.html) , 2023.1.13

6) 株式会社 ObotAI, 2023.12.22, オーバーツーリズム(観光公害)とは？対策と成功例をご紹介！

<https://obot-ai.com/column/10862/> , 2023.2.2

# 古都の風景と開発のバランス

## ～ 100 年後にも風景を残すために ～

杉本さらね 和田まい

### 要旨

住民生活と観光客の動線が混在する京都では、住民が生活するための機能充実や観光客を迎えるための宿泊施設の建設等と歴史と文化を反映した街並みの保全を両立させていく必要がある。本研究では、京都が街として発展していく中でも人々が好ましいと思える風景を保ち続けるためにどうすべきか提案していくために、洛北高校の生徒と教員を対象としたアンケート調査および鴨川でのフィールド調査を行った。結果、鴨川の景観の保全において大切なことは、自然の多さではなく、建物や自然などの様々な要素の調和がとれていることであるという結論に至った。

### 1. はじめに

京都の歴史は古く、794 年から平安京として栄えてきた。今や京都は世界的にも歴史的に価値のある美しい街並みや名所で有名である。現在の京都市は、その街並みを条例によって守っている。

京都市では、京都の優れた景観を守り、育て、50 年後、100 年後の未来へと引き継いでいくため、建築物の高さとデザイン、屋外広告物等を全市的に見直した「新景観政策」を平成 19 年 9 月に実施し、令和 3 年 4 月には、「新景観政策の更なる進化」の一環として、高さ規制の特例許可の対象に「まちづくりに貢献する建築物」を追加している<sup>1)</sup>。図 1 は、令和 3 年 4 月時点の高さ制限がある地域の図である。

しかし、住民生活と観光客の動線が混在する京都では、住民が生活するための機能充実や観光客を迎えるための宿泊施設の建設等も必要であり、歴史や文化を反映した街並みの保全との両立が難しい。そこで私たちは、そもそも京都の住民は京都のどのような景観を重要であると感じているのか、果たしてそれらが保全されていると感じているのかを調査し、実際に重要視されている景観を分析することで、保全の方法を模索し、よりよく、そしてできる限り長く未来へ京都の美しい景観を保

ち続けていくことを目的として研究を行った。

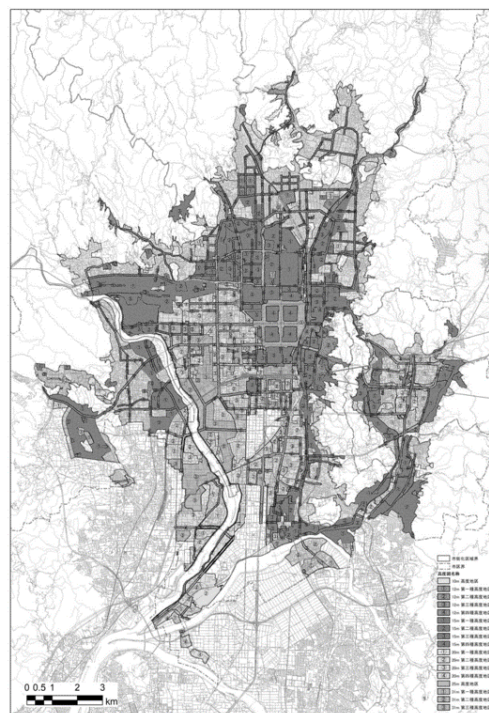


図 1. 高度地区指定(概要)図

(京の景観ガイドライン建築物の高さ編<sup>1)</sup>より引用)

### 2. 研究方法

#### 2-1. アンケート調査

サイエンス科の生徒 40 名、文理コースの生徒 79 名、スポーツ専攻コースの生徒 36 名、そして

教員 12 名の計 167 名を対象に質問紙を用いたアンケート調査を行った。

質問項目として、京都の景観を山や川などの自然・寺社仏閣・大通りの風景の 3 つのカテゴリに分け、それぞれについて①どれくらい重要か、②重要な地名の例、③どれくらい保全されていると感じるかを聞いた。次に、④どこに住んでいるのか(区まで)、⑤住んでいる地域の高さ制限は丁度良いか、を聞いた。

## 2-2. フィールド調査

アンケート調査の結果、重要視している人の多かった鴨川の景観についてフィールド調査を実施した。京都駅付近の塩小路通りの橋から、北大路橋までの鴨川の橋を全て渡り、橋の中央にて北向きと南向きで写真を撮影した。撮影した写真を縦 15 マス×横 20 マスの 300 マスに分け、空・空川以外の自然・人工物・川のマス数を数えた。その結果に基づき、各橋や地域から見える京都の景観について特徴を分析した。

## 3. 結果

### 3-1. アンケート調査

自然・寺社仏閣・大通りの風景の中で、アンケートの結果、6 割以上の人々が寺社仏閣について「とても重要である」と考えていることが分かった。また自然についても 5 割以上の人々が「とても重要である」と考えていることが分かった。大通りの風景については、「とても重要である」「重要である」を合わせて 5 割程度であった(図 2)。

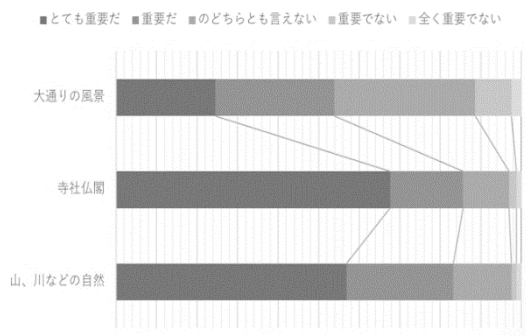


図 2. 京都の風景はどれくらい重要か

次に、「各風景がどれくらい保全されているかと感じるか」という問いでは、寺社仏閣については 9 割以上の人々が「保全されている」「まあまあ保全されている」と感じているのに対し、山・川などの自然や大通りの風景については「保全されている」「まあまあ保全されている」と感じている人は 5~6 割程度にとどまった(図 3)。また、景観として重要であると回答された場所の中で寺社仏閣以外として多かったのが、鴨川であった。

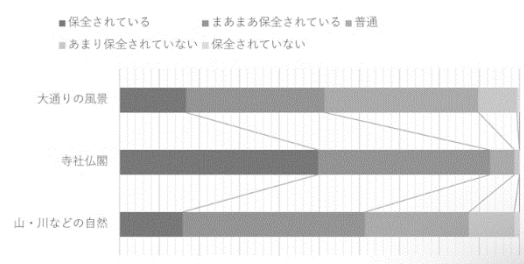


図 3. 各風景がどれくらい保全されているか

また、住んでいる地区別の建物の高さについては、図 4 のように、ちょうど良いと考えている人が多いことが分かった。

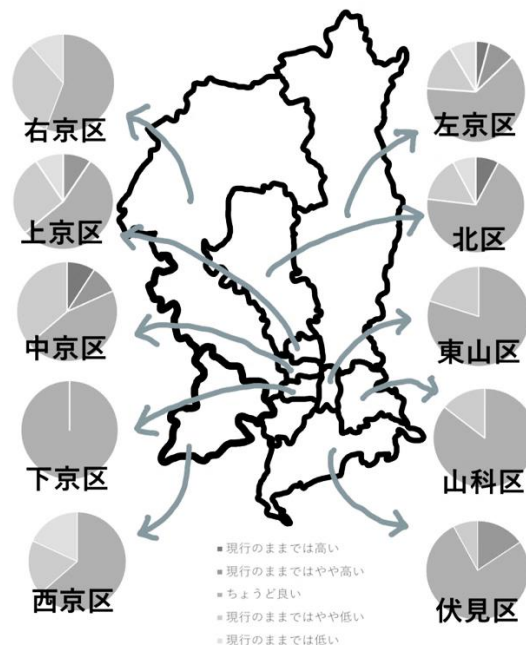


図 4. 現在の建物の高さに対するイメージ

### 3-2. 鴨川フィールド調査

鴨川の各橋から南北に向けて写真を撮影し、空・自然(草木や山など)・人工物・川(水や砂礫)

の割合を調査した。三条大橋(図 5①)より北では、人工物の割合が急に減り、10%を超えることがほとんどなくなった。さらに、丸太町橋(図 5②)以北の北向きでは、徐々に山に近づき山の占める面積が増加した。四条大橋(図5③)や三条大橋の周辺は人工物の割合が多いものの、大きなビル等ではなく木造の所謂「和」の雰囲気を感じる建物が多く、同じように人工物の割合が多い七条大橋(図5④)付近ではマンション等の大きく近代的な建物が多く見られた。

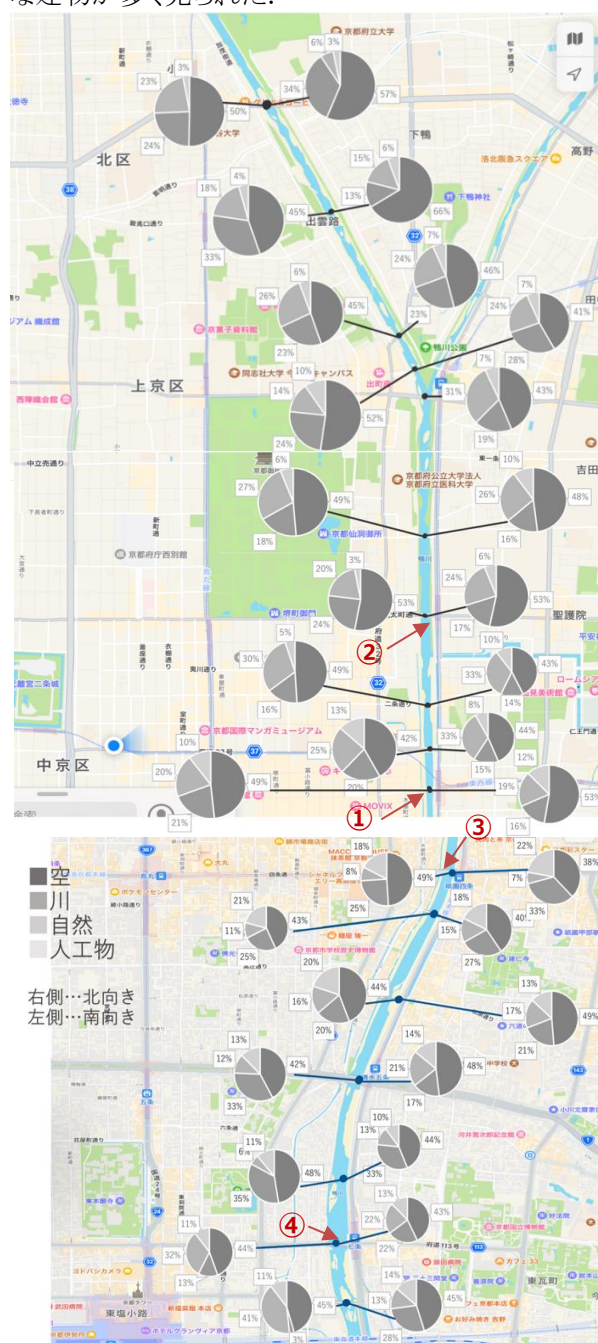


図 5. 鴨川からみた景観の分類結果

また、どの橋から見た場合でも、空の割合が 4 割を超える場所がほとんどであることが分かった。

フィールドワーク中に橋周辺にいる人の様子を観察したところ、三条・四条辺りでは観光客が多く、丸太町橋よりも北に行くベンチ等も整備されており、犬の散歩をしている人や遊びに来ている親子連れ、スポーツを楽しむ人などが多かった。

#### 4. 考察

アンケート調査の結果から、京都に住んでいる人は景観について、寺社仏閣・山・川などの自然・大通りの中では、寺社仏閣が重要だと感じているものの、歴史や文化の観点から充分にお金をかけて保全されていると考えている人が多いことが分かった。しかし、山・川などの自然については、5 割以上の人々が京都の景観にとって重要であると感じているのに関わらず、寺社仏閣と比較するとあまり保全されていないと感じており、川の自然や市内から見える山についてあまり規制や環境保全の取組が充分に行われていないのではないかと考えていることが明らかになった。

建物の高さについては、観光地としての役割や住宅としての機能と歴史や文化の保全という観点からすると、低くすることも難しいし、これ以上高くすることも望ましくないという理由で「ちょうどいい」という回答を選んだ人が多かったのではないかと考えられる。

また、アンケートの結果から、寺社仏閣以外では鴨川を景観の中で重要視する場所として挙げた人が多かったため、鴨川の風景の魅力の要因や保全の方法を検討するために、鴨川でフィールド調査を行った。

当初、京都市内は住宅や建物が密集しており道路も狭いため、空や自然をあまり目にすることができず、比べると鴨川は開けており空や自然が多いため魅力を感じている人が多いのではないかと考えていた。

散歩やスポーツを楽しむ住民の姿が多い丸太町橋以北では予想の通り、空の割合が 4～6 割程

度、川や自然の割合が合わせて 4 割程度、人工物の割合が 1 割以下となっており、開けた空間と四季の豊かな景観に魅力を感じている人が多いと考えられる。

しかし、観光客も多く、京都で鴨川といえば写真や映像がよく挙げられる四条大橋の辺りは、空の割合は 4～5 割程度、自然物の割合は 1 割以下と低く、人工物の割合が 1～2 割程度と比較的高かった。同様に七条大橋付近でも空の割合は 4～5 割程度、人工物の割合が 1～2 割程度と高いが、観光客や住民の姿は多くない。これは、空や川(水や砂礫)の割合はあまり変わらないものの、人工物として四条や三条付近は、木造や煉瓦等の歴史を感じる建物が多いのに対し、七条大橋付近はマンション等のコンクリートの建物が多いこと、三条～四条大橋では観光客や買物・食事に来る人が多いが、七条大橋は住民が多いことが理由として考えられる。また、七条大橋付近では自然の割合は高いもののあまり休憩する場所が整備されていなかったり、川幅が広がり水の面積より砂礫の面積が増えたりしており、住民にとっても緑の自然と水とのバランスとしてあまり魅力が高くないと感じている人いるのではないかと考えられる。

よって、調査の結果から三条大橋や四条大橋では観光客や買物・食事に来た人が京都の四季豊かな自然と歴史や文化の融合した雰囲気を楽しみながら散歩や休息すること、丸太町橋より北では住民が北山や東山を望む緑豊かな風景の中で散歩やスポーツを楽しむこと、というように観光地や繁華街から憩いの場まで、訪れる人の目的が異なり、鴨川の風景それぞれが場所により異なる役割を果たしていると考えられる。

また、鴨川の風景としての魅力は自然や川の面積がただ多いことではなく、休憩場所や歩道等の環境が整備されていること、山や草木などの緑と川、空と京都の街並みのバランスが整っていることにあった。このことから、景観を保全するために大切なことは、如何に自然が多いかでは

なく自然と人工物、川や空が調和した風景やそれを楽しむ環境を場所に合わせて作っていくこと、京都の歴史や文化と融合した風景を保つために、川沿いの建築物には木材を多く使用する等の工夫が必要であると考えた。

## 5. まとめと今後の課題

観光地であり憩いの場でもある鴨川は、橋から見える位置だけでなくあらゆる部分にデザインや素材の工夫が凝らされており、京都の景観を保つための自治体の尽力が感じられた。鴨川の景観を更に美しくする為には、南から北まで同じように整備をするのではなく、その地域の需要のかたちに合わせて発展させていくべきだと感じた。一つの項目だけでは美しい景観は測りきれないと感じた。今後は橋の歴史やデザイン等、自然や周囲の人工物以外にも目を向けた鴨川の魅力を調査し、人々に紹介することができるような活動についても検討していきたい。

## 6. 参考文献

1)京都市都市計画局, 令和 3 年 6 月, 京都京都の景観ガイドライン, [https://www.city.kyoto.lg.jp/tokei/cmsfiles/contents/0000281/281294/guideline\\_takasa.pdf](https://www.city.kyoto.lg.jp/tokei/cmsfiles/contents/0000281/281294/guideline_takasa.pdf)

# マスメディアによる人々の脱毛観のへ変化

## ～ 現代社会を生きる人々の価値観 ～

打田晃己 河嶋悠介

### 要旨

本研究では、脱毛に対する社会的圧力の存在とその要因を明らかにするために、京都府立洛北高等学校 1,2 年生の生徒計 250 名を対象にアンケート調査を行った。その結果、社会的圧力が存在すると考える人の割合が 75%以上を占めており、その圧力の主な原因はマスメディアによる脱毛広告であることが明らかになった。

### 1. はじめに

世界市場の調査をインターネット上に公表している IMARC の 2023 年のレポートによると、「世界のレーザー脱毛市場は、2023 年から 2028 年の間に 16.3%の成長率(CAGR)を示すと予想されている。美容施術に対する需要の増加、より効率的で効果的な脱毛デバイスの開発などの技術進歩、可処分所得の増加、競合する方法に対する優位性、美容基準や社会規範の変化が市場を推進する主な要因の一部である。」<sup>1)</sup>としており、世界規模で関心が高まっていることがわかる。

日本でも、脱毛産業の発達は顕著であり、2019 年の時点でエステサロン業界 3600 億円のうち脱毛産業は約 800 億円を占めており、売り上げシェアは 22%にもものぼる<sup>2)</sup>。

一方で、急速な認知の広がりによって、目には見えない社会的な圧力や偏見も生まれているのではないかと考えた。脱毛を行っていることをステータスとして考えるようになり、脱毛を行っていないことを一種のコンプレックスのように感じさせてしまっている可能性がある。本研究では、ソーシャルメディアや街中、電車の中で見かける広告の影響により、体毛に対してマイナスなイメージが植え付けられ、脱毛に対し社会的な圧力や偏見が存在するのでないかと考えた。

本研究では、SNS 等の利用率が高く、影響を

受けやすい高校生を対象にアンケートを実施し、脱毛を強いる社会的圧力の有無と脱毛に対する印象を調査した。社会的圧力は存在し、美意識が高いことから男性よりも女性の方がよりその圧力を受けていると予想した。

### 2. 研究方法

洛北高等学校 1,2 年生の生徒計 250 人に質問紙を用いてアンケート調査を行った。本研究のアンケートにおいて脱毛の対象となるのは首から下に限定した。理由としては、本研究ではひげや眉毛を除く体毛の脱毛を対象としており、首から上を含んだ場合、眉毛を整えることや髭剃りも含まれてしまい、回答にばらつきが出ると判断したためである。

アンケートの質問項目については、次の結果に記載する。

### 3. 結果

質問 1 脱毛は身だしなみ、美容のどちらであるといえるか

脱毛を身だしなみとして考えている人と美容として考えている人の割合はおおよそ同じであるが、わずかに身だしなみであると考えている人の方が多い結果となった(図 1)。

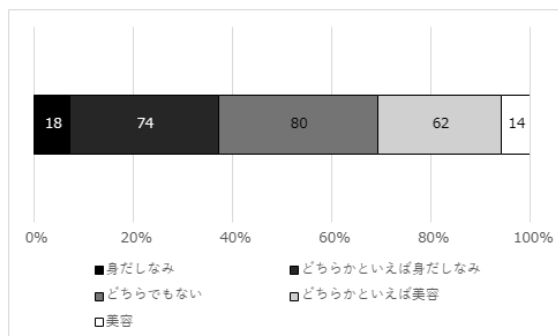


図 1. 脱毛は身だしなみ，美容のどちらであるといえるか

#### 質問 2 脱毛をしたら抵抗を感じるか

「大いに感じる」「少し感じる」と回答した人が，女性では約 13%ほどだったが，男性では女性のおよそ 2 倍の 25%となった(図 2)．

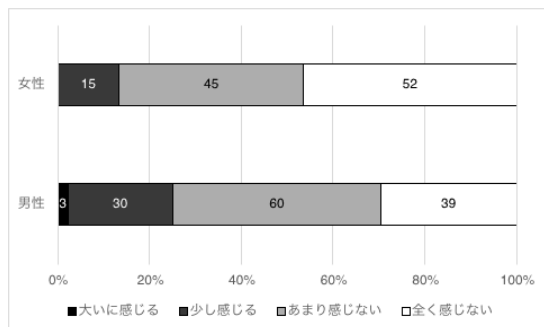


図 2. 自分が脱毛をしたら抵抗を感じるか

#### 質問 3 自分以外の同性の人に対して脱毛をした方がよいと思うか

#### 質問 4 自分以外の異性の人に対して脱毛をした方がよいと思うか

図 3,4 より，どの場合においても，脱毛は本人がしたいならした方がよいと考えている人が著しく多いことが明らかである．一方で，男性女性の回答者ともに，男性は脱毛をした方がよいと思う割合が 10%を下回っているが，女性は脱毛をした方がよいと思う割合は男性の場合と比べて高くなっている．中でも男性のおよそ 5 人に 1 人が女性に対して脱毛をした方がよいと思っていることが特徴的である．

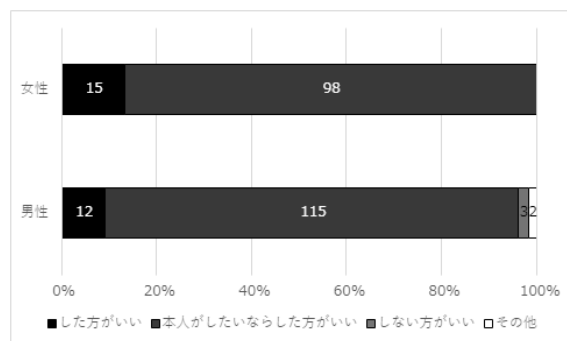


図 3. 自分以外の同性の人に対して脱毛をした方がよいと思うか

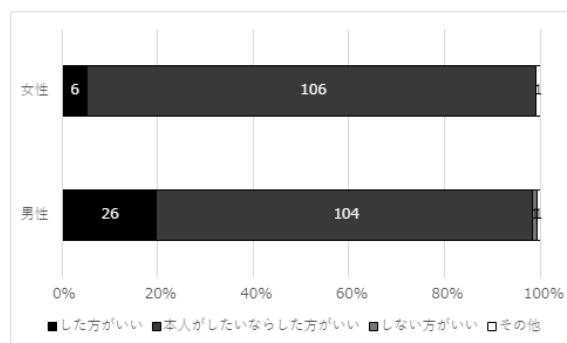


図 4. 異性の人に対して脱毛をした方がよいと思うか

#### 質問 5 日本には脱毛をうながす社会的圧力があると思うか

#### 質問 6 社会的圧力は何によってあると感じたか (質問 6 は質問 5 で「かなり強くある」「一般的にある」「一部ある」を選択した者のみ回答．複数選択可能で最も強く感じた物には印をつけてもらった.)

図 5 より，8 割近い人が脱毛を強いるような社会的圧力の存在を感じていることが確認できる．また，その社会的圧力は，テレビ・CM・雑誌・ネットなどのマスメディアが原因であると感じている人が多いことが分かった．

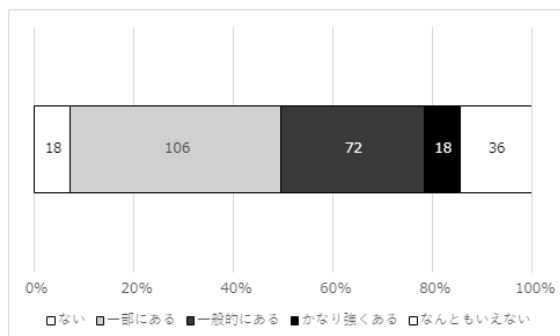


図 5. 日本には脱毛をうながす社会的圧力があると思うか

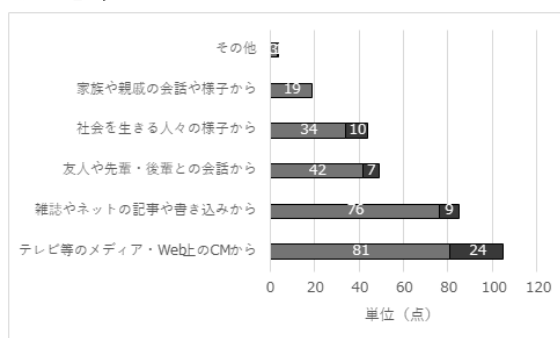


図 6. 社会的圧力は何によってあると感じたか  
(グラフの黒い部分は最も強く感じる要因として選択された回答を示す)

質問 7 学校の授業の中で、美容や脱毛に対する捉え方の国際比較や現代社会における意味などを考えることがあった方がいいと思うか

質問 8 いつ頃からその授業を行うべきだと思うか  
(質問 8 は質問 7 で「とても思う」「やや思う」と答えた者のみ回答)

図 7 より、多くの人は必要を感じていないものの、3 割程度の人は学校で美容や脱毛に関する授業があってもよいと考えていることが分かる。また、図 8 より、授業を行う方がよいと回答した人の 9 割以上が、中学生以降からその授業を行うべきだと考えていることが明らかとなった。

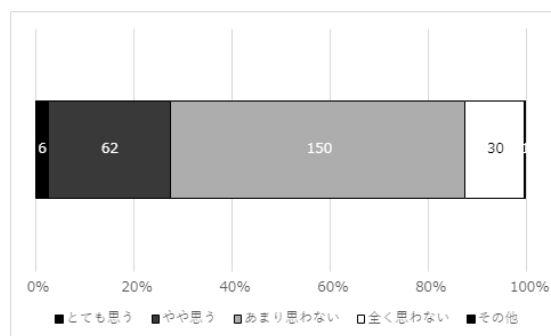


図 7. 学校の授業の中で、美容や脱毛に対する捉え方の国際比較や現代社会における意味などを考えることがあった方がいいと思うか

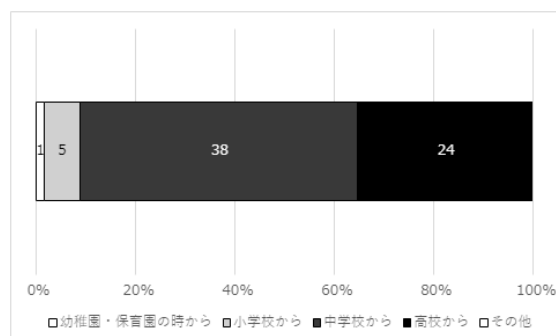


図 8. いつ頃からその授業を行うべきだと思うか

#### 4. 考察

図 1 の結果において、首から下を対象とした脱毛は、美容よりも身だしなみとして考えている人がわずかに多いことから、脱毛をすることは一般的なマナーであると捉えている人もいる可能性がある。

図 2 から男性も女性もある一定数抵抗を感じる人がいる。社会的圧力はこの人々にとっては、自身の選択を制限されるものとなっている。

ここで生物学的な観点から脱毛について考えてみる。一般的に女性よりも男性の方が毛深いことは知られているが、それはホルモンによる影響である。男性ホルモンと呼ばれるテストステロンは体毛を濃く、強くすることで知られている。また、女性ホルモンのエストロゲンは毛の発育を抑制する<sup>3)4)</sup>。そういった理由で男性は女性よりも脱毛を行う上で痛みや見た目が大きく変わるため着しにくいのではないかと考えた。実際に脱毛をすることに抵抗があると回答した理由に痛いからと回答し

た人がいた。

図 3,4 の結果から、洛北高校では女子生徒の基本制服はスカート、男子生徒はスラックスであり、女子生徒は男子生徒よりも露出が多い。そのため、男性よりも女性に脱毛をしてほしいと考える回答が多くなったのではないかと考えられる。

次に図 5 及び図 6 より、日本には脱毛を促す社会的圧力が存在していると言えるが、その結果を示唆するように、異性の人には脱毛をした方がいいと考えている男性の割合は女性と比べて高くなっている。加えて、女性の方が男性よりも自身が脱毛することに対する抵抗が少ないことから、無意識のうちに女性は脱毛をするのが当たり前だという風潮が広がっている可能性があり、このことも社会的圧力が存在することを示唆するデータとなった。また、社会的圧力が生じる原因としてはテレビ・CM・雑誌・ネットなどのマスメディアによる脱毛広告であることが明らかになったが、この結果は SNS やメディアと幼い頃から過ごしてきたデジタルネイティブともいわれる Z 世代の特徴を大きく示していると考えられる。一方で、第 3 位に友人や先輩との会話から社会的圧力を感じた回答者が一定数いることは、高校生特有のものであると考える。高校生同士では、社会人とは異なり、関係性が深くなりすぎたがゆえに、相手のプライベートゾーンに踏み込んでしまう可能性もあるため、社会的圧力を感じるが多くなると考える。

図 7, 8 において学校教育を行うべきと考える人がそれほど多くないことから、それほど重要な問題ではないと考える人が多いと予想される。また、中学校以降に教育を行うべきと回答した人が多いのは、中学生になると周りの目を気にして、脱毛について検討を始める人が多いからであると推測される。

## 5. まとめと今後の課題

脱毛に対する社会的圧力をなくすためには、メディアによる広告の形態を変える必要がある。また、身近な人による社会的圧力を抑制する例とし

ては、学校制服の完全自由選択化などがあるのではないだろうか。ジェンダー多様化とも結びつくと考えられるが、当人に選択の自由を与え、それが当たり前であるような体系を作っていく必要がある。また、学校の授業の中で、美容や脱毛に対する捉え方の国際比較や現代社会における意味などを考えることがあった方がいいという意見が一定数あったことから、脱毛についての偏見や規範についての教育や啓発が求められており、個々の多様性や選択肢が尊重される社会を形成していくことが重要であると考えている。

今後は、学校教育において、脱毛は個人の自由であり、多様性を認めていく必要があることを教えるために、私たちにできることを考えていく必要がある。脱毛が体に与える影響や体毛の存在意義、脱毛の方法について詳しく教え、自己決定するに足りうる情報を与えるべきではないだろうか。

## 6. 謝辞

本論文の執筆にあたり総合地球環境学研究所の宗田勝也研究員にはいつも丁寧な指導と適切な助言をいただきました。ここに深謝の意を示します。また、調査を行うにあたりアンケート回答にご協力いただいた洛北高校 1,2 年生の生徒の皆さんに深く感謝いたします。

## 7. 参考文献

- 1) IMARC,2023, レーザー脱毛市場:世界の産業動向, シェア, 規模, 成長, 機会, 2023-2028 年測,<https://www.imarcgroup.com/report/ja/laser-hair-removal-market>,2024.1.14
- 2) 株式会社 NBS,脱毛ビジネスについて,<https://www.clear-sp.com/business/>,2023.6.9
- 3) 鈴木ハーブ研究所, 2023.6.9, 毛深い男性の原因って何? 体毛やひげが濃くなる理由や対策を解説, <https://x.gd/VelWE>, 2024.2.2
- 4) 山村菜実, 2024.1.19, 更年期になると毛が濃くなるって本当? 女性ホルモンと体毛の関係, <https://x.gd/Rutqj>, 2024.2.2

# iCool

## Cool Down iPhone, Get Higher Performance

東孝衛, 宮奥創太, 宗實孝輔, 吉岡拓也

以下, iPhone® (iPhone, Apple, Inc) を iPhone と表記する.

### 要旨

発熱により性能が低下するにも関わらず, 十分な冷却装置を装備できないスマートフォンであるが, 我々はこれに外付けの冷却装置を装着することにより使用に伴う性能の低下を抑えることができると考え, 効果的な冷却方法を研究し, 最終的に実用可能なものを製作することを目的とした実験を行った. より良い冷却の方法としてヒートシンク, ファン, 放熱性セラミックを iPhone に装着し, 対照実験を行って温度変化を測定し, それぞれの冷却性能を確認した.

### 1. はじめに

スマートフォンのユーザー数は今や世界人口の 70%を超え, スマートフォンは生活必需品の一つとなり, 動画編集やゲームなどの高負荷作業をスマートフォンで行う人が増加した. しかし, スマートフォンはパソコンと比較し冷却能力で大きく劣るため CPU が高温になりやすく, サーマルスロットリング(CPU が高温になることによる故障や熱暴走を防ぐため, 一時的に CPU の動作周波数を下げ CPU 温度を下げるプログラム)が作動しやすい. これにより性能が一時的に(CPU 温度が下がるまで)低下するため, グラフィックの乱れ, アプリのクラッシュなどが発生する. それにもかかわらず十分な冷却装置が装備されないのは, 薄型軽量かつ防水であることが求められ, 冷却器の積載スペースを確保できないからであると考えられる. 熱に弱いという問題に対し各社は高性能 CPU を搭載することで発熱しにくくした新型のスマートフォンを毎年のように製造することで対処しているが, これでは根本的な解決になっていない. この問題に対し, 冷却器を筐体外部に装着することで使用に伴う性能低下を抑えることができると考えた私たちは, 最終的にスマートフォンの携帯性や軽さなどを損なわない実用的な外付け冷却器を製作することを目的とした実験をおこなった. 実機での性能測定

に使用するスマートフォンは日本で 70%近くの圧倒的なシェアを誇る(StatCounter 調べ)iPhone に決定した.

### 予備実験

iPhone のサーマルスロットリングの作動温度を調べるため予備実験を行った. 0, 5, 10, 17, 22, 30, 35 度の水を用意し(iPhone の動作温度は 0°C以上 35°C以下との記載が Apple の公式サイトにあったため, それ以外の温度については測定していない. Ziplock に入れた iPhone7(空気を十分抜いたため空気による断熱は無視できるものとする)を水中に入れ, その状態でベンチマークスコア(ベンチマークソフトにより数値化されたハードウェアの性能. 数値が大きいほど性能が高いことを示す. CPU, GPU などの項目別スコアと, それらの総和のトータルスコアが測定される. 本実験では「AnTuTu benchmark ver.10.0.2」を使用した.)を測定した.

## 予備実験結果

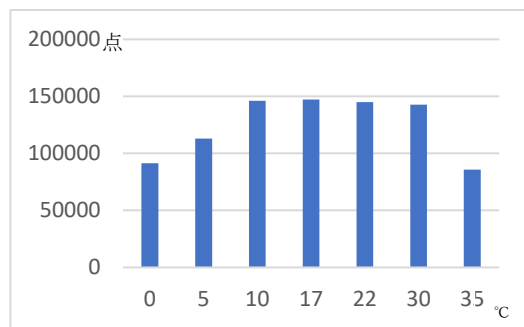


図 1. 各温度における CPU スコア

サーマルスロットリングは CPU の動作周波数に関するプログラムであるため、各温度における CPU スコアの差に着目することで作動温度がわかるはずである。図 1 より、CPU スコアは 10°C～30°Cにおいて顕著な差はないものの、0°C、5°C、35°Cにおいて大きく減少していることがわかる。

0°Cおよび 5°Cにおける性能低下の原因は断定できないものの、搭載されているリチウムイオンバッテリーは一般的に低温化で電圧が下がることが知られており<sup>1)</sup>、その影響ではないかと考えられる。

30°Cと 35°Cのスコアの間に大きな差があることから、私たちはサーマルスロットリングがこの間の温度で作動し始めると考えた。冷却器装備後の実機パネル温度を負荷をかけた状態で 30°C以下に収めることを目標とした。

## 2. 材料・研究方法

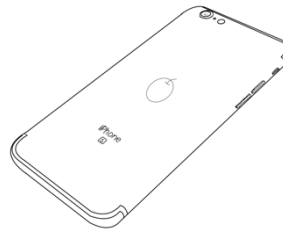
### 2-1 空冷冷却器の効果比較

実験 1 では、50°Cの湯で加熱されたスマートフォンのバックパネルを 3 種類に場合分けしてそれぞれの温度変化を記録した。材料については以下の通りとなる。

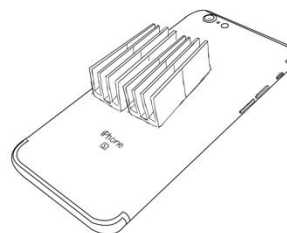
- ・iPhone6 バックパネル (iPhone からバッテリー、ディスプレイ、基盤を取り外したもの)
- ・湯 (50°C)
- ・ヒートシンク (20mm×30mm, アルミ製)
- ・ファン (5V)
- ・サーモグラフィー (FLIR One Pro)

iPhone 6 のバックパネルを湯で 50°Cまで均一に加熱し、その後バックパネルを以下の(1)、(2)、(3)の状態で一定時間を経過させた。

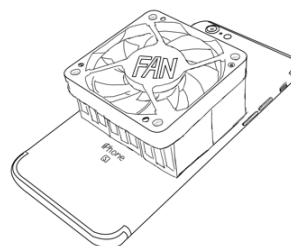
(1) 何も装着しない(下図)



(2) ヒートシンクを装着する(下図)



(3) ヒートシンクとファンを装着する(下図)



各場合についてサーモグラフィーで動画を 20 秒間撮影し、パネルの温度変化を観察した。

### 2-2 ファンの風向と冷却効率

実験 2 ではファンの風向による冷却効率の変化を調べた。材料は以下の通りである。

- ・iPhone6 バックパネル
- ・ヒートシンク (20mm×30mm, アルミ製)
- ・ファン (5V)
- ・ペルチェ素子 (40mm 角, ケニス(株))
- ・赤外線温度計 (AIDBUCKS AD70)

iPhone6 のバックパネル (ロゴ側) にヒートシンクとファンを取り付け、ファンを回転させながらバックパネルの内側 (基板側) に貼り付けたペルチェ素子で加熱した。パネルのカメラ横の部分の表面温度が 40°Cになったところで加熱をやめ、30 秒ご

とに赤外線温度計で温度を測定した。ファンの回転を逆にすることで

- (i) ヒートシンク側に風を吹きつける
  - (ii) ヒートシンク側から空気を吸い出す
- の二つの場合について比較できる。30 秒前からの温度減少が 0.1℃未満になり次第計測を終了した。

## 2-3 放熱性セラミック

2-1, 2-2 で扱った空冷はそもそも気温が 30℃以上の時には性能向上に貢献できず、ファンを用いると熱風が送り込まれ逆効果であることが夏季の実験で分かった。

そこで実験 3 では西村陶業株式会社より提供していただいた放熱性セラミック N-9H を用いて冷却した。特性は下の表 1 の通りである。

N-9H の熱伝導率はヒートシンクに使われる代表的な金属であるアルミニウムの 237W/(m・K)と比較してかなり低い。一方放射率に着目すると、アルミニウムが 0.2 であるのに対し N-9H は 0.97 とかなり高い値となっている。このことから、N-9H は熱伝導ではなく熱輻射によって放熱していると考えられる。熱輻射は電磁波によりエネルギーが伝搬されるため、冷却器周囲の流体(空気)温度に影響されず、外気温が 30℃以上でも冷却効果を発揮できるのではないかと考えた。

表 1. N-9H の特性表

|          |                   |                          |
|----------|-------------------|--------------------------|
| 材質名称     |                   | アルミナ系                    |
| ニシムラ No. |                   | N-9H                     |
| 呈色       |                   | 肌色                       |
| 密度       | g/cm <sup>3</sup> | 3.9                      |
| 吸水率      | %                 | 0                        |
| 熱的特性     | 放射率               | 0.97                     |
|          | 熱伝導率              | W/m・K 39                 |
|          | 熱膨張係数             | ×10 <sup>-6</sup> /℃ 7.7 |
|          | 耐熱衝撃性             | ℃ 200                    |
|          | 最高使用温度            | ℃ 1500                   |

### 2-3-1 セラミックの冷却効果

iPhone6 バックパネルに

- (i) 何も装着しない
- (ii) 4mmN-9H を背面に装着する
- (iii) 6mmN-9H を背面に装着する

上記の状態でペルチェ素子を用いて加熱し、温度を赤外線温度計で 30 秒ごとに測定した。材料は以下の通りである。

- ・iPhone6 バックパネル
- ・ペルチェ素子
- ・4mm /6mm 厚の N-9H (40×120mm)

### 2-3-2 空冷との比較

25cm にカットしたニクロム線(径 0.3mm)を 3 本用意し、バックパネル一枚につき一本ずつ貼り付けた。

4V の電圧一定下で

- (i) 何も装着しない
- (ii) 4mmN-9H を装着する
- (iii) ヒートシンクを 6 個装着する

それぞれのパネル温度を 30 秒ごとに赤外線温度計で測定した。無電力の条件で揃えるためヒートシンクのみを用いた。材料は以下の通りである。

- ・iPhone6 バックパネル
- ・4mmN-9H
- ・ヒートシンク(20mm×30mm, アルミ製)
- ・ニクロム線(25cm で切断)
- ・赤外線温度計(AIDBUCKS AD70)

### 2-3-3 セラミックの熱放射

セラミックを装着したバックパネル、アルミホイルで覆ったセラミックを装着したバックパネルを 2-3-2 の実験と同様の方法で加熱し、30 秒ごとの赤外線温度計で温度を測定した。材料は以下の通りである。

- ・iPhone6 バックパネル
- ・4mmN-9H
- ・アルミホイル
- ・ニクロム線(25cm で切断)
- ・赤外線温度計(AIDBUCKS AD70)

### 3. 結果

#### 3-1

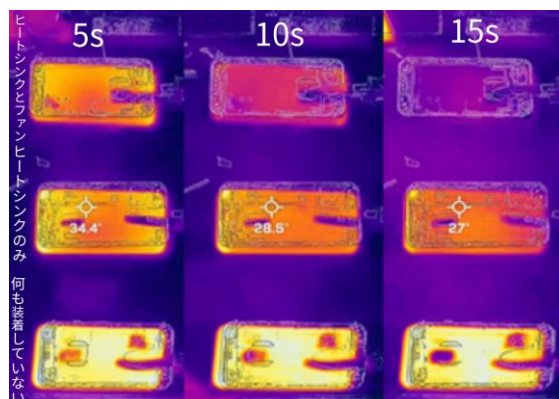


図 2. サーマグラフィー写真

図 2 は実験 1 についてバックパネルの温度を 50℃まで上げてからの温度変化をサーモグラフィーによって撮影したもので、上から順にヒートシンクとファンを装着、ヒートシンクのみ装着、何も装着していないものである。左から 5 秒後、10 秒後、15 秒後の状態である。サーモグラフィーの映像から、何も装着しなかったものと比較した時、ヒートシンクを装着したもの、ヒートシンクとファンを装着したものは明らかに早く温度が下がっていることがわかる。ヒートシンクとファンを装着したものについては、20 秒で室温とほぼ同じ程度まで冷却できている。

#### 3-2

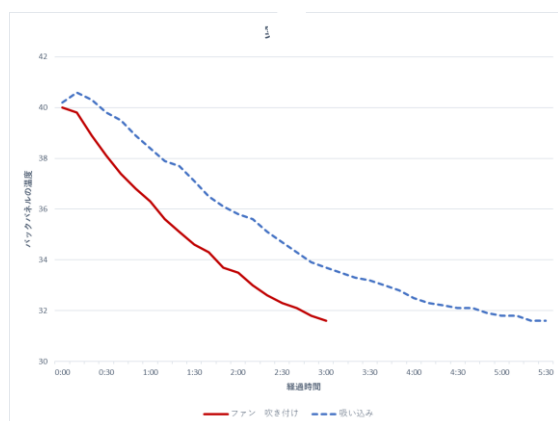


図 3. ファンの回転の向きと効果

図 3 は実験 2 の結果であり、40 度まで加熱したバックパネルにファンを取り付け、同じ電圧をかけてヒートシンク側に風を吹き付けた場合とヒート

シンク側から空気を吸い出した場合での温度変化を測定しグラフにしたものである。室温と同じ程度まで下がるまでに、吹き付けた場合は 3 分ほど、吸い出した場合は 5 分ほどかかっていることがわかる。

#### 3-3

##### 3-3-1

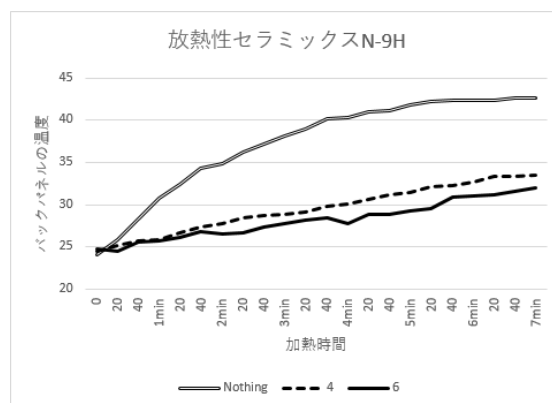


図 4. N-9H 装着時との比較

図 4 は実験 3 の結果であり、何も装着していないときよりもセラミックを装着したもののほうが温度上昇が明らかに抑えられていることが分かる。ただ、2 枚のセラミックの厚みの違いによる明確な差は見受けられない。

##### 3-3-2

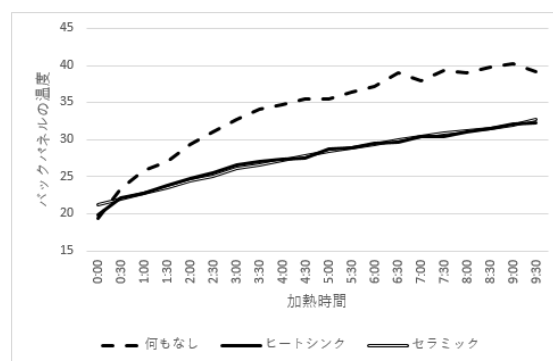


図 5. N-9H と空冷、デフォルトの比較

図 5 は実験 3 の結果で、iPhone のバックパネルに何も取り付けない、ヒートシンクを装着、放熱性セラミックを装着した状態で、電熱線で同じ熱量を与えた時の温度変化を表したものである。何も装着しなかった場合よりも、セラミック及びヒートシン

クを装着した場合の方が温度上昇が遅いことから、セラミック、ヒートシンクは冷却性能があることがわかる。

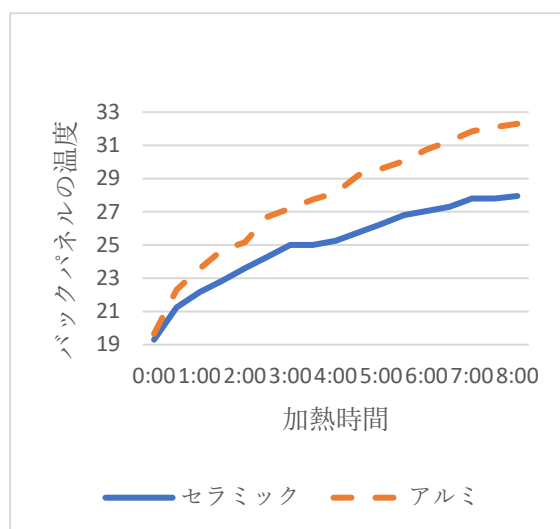


図 6. N-9H とアルミで覆った N-9H の比較

図 5 は実験 3 の結果で、iPhone のバックパネルにセラミックをとりつけた状態、セラミックとアルミホイルを取り付けた状態でニクロム線で同じ熱量を与え、温度変化を記録したものである。セラミック、アルミホイルで覆ったセラミックの順で冷却性能が高いことがわかる。

## 4. 考察

### 4-1

図 2 の結果から 5, 10, 15 秒の時間が経過するにつれ、ヒートシンクやファンを装着したものと何もつけていないものの温度差が大きくなっており、さらにヒートシンクとファンを両方装着したものの方がヒートシンクのものよりも 15 秒後のパネル温度が低いことがわかる。このことからヒートシンクのみでも冷却効果はあるものの、ファンを用いた方がより効果的であることが分かる。冷却効率は固体と流体の接触面積と温度差に比例するが、ファンはヒートシンク周囲の温まった空気を逃すことで温度差を増加させたため、効率が良くなったと考えられる。

ただ夏季の気温が 40℃ 近くの日に行った実験では、ファンを用いたものの方がヒートシンク

のみのものより冷却能力で劣るという結果が出た。これはファンにより熱風がパネルに送り込まれ、逆効果になったためだと考えられる。よって外気温が高温であれば空冷冷却器を装備しても性能向上に期待できないことがわかる。

### 4-2

実験 2 からファンによって風を吹き付けた時の方が、吸い出した場合よりも温度の減少が早いことから、吹き出しの方が冷却性能が高いことがわかる。吸い出しではヒートシンクの狭い隙間からしか空気を取り込むことができないのに対し、吹き付けはその制約がなくファンがより多くの空気を取り込むことができるため、空気の循環量が多くなるからではないかと考えられる。吸い出しの冷却器を使用する際は空気取り入れ口を広くするためにフィン(突起部分)が長い、もしくはフィンの間隔が広いヒートシンクを用いることが必要であると思われる。

### 4-3

実験 3 よりセラミックを装着した時の方が冷却速度が速かったことから、放熱性セラミック、ヒートシンクは冷却効果があることがわかる。また、図 5 から、ヒートシンクとセラミックの冷却速度に明確な差は見られないが、セラミックはアルミホイルで覆うと冷却速度が落ちていることから、セラミックは主に熱放射によって冷却していると考えられる。セラミックの厚さによる明確な差は見受けられなかったが、熱容量が増大するだけでなく重量も嵩むので実用の際は薄型に加工することが必要だと思われる。

## 5. まとめと今後の課題

本研究ではヒートシンク、ファン、セラミックによる冷却の有効性を明らかにすることができた。

実用化を本実験で行うことはできなかったが、実用面で空冷は厳しいと考えられた。

ファンを用いた冷却の方がヒートシンクのみの

場合よりも効果があることは先述の通りであるが、ファンは当然ながら電源が必要である。スマートフォンのバッテリーから供給するのは本体の稼働時間を短くするので好ましくない。ただ新たにバッテリーを装着すると本体重量が大幅に増大してしまう、Apple の Vision Pro のようにバッテリーパックを別で用意し有線接続するのは断線が問題になるのに加え、見た目が酷く普及しないと考えられる。

残る候補はヒートシンクと放熱性セラミックである。冬の気温が低い時は二つの間に大きな差はないものの、夏季の使用を考えた時、高温時空冷のヒートシンクは性能向上に寄与しない可能性が高いが、一方の輻射放熱のセラミックは気温の影響を受けないと考えられるため望ましいという結論に至った。

セラミックを実用化する上で問題となるのは

- ・ 落下時に割れる
- ・ 多孔質であるが、手などで触れると皮脂がつまり放熱効率が落ちる(西村陶業株式会社による情報)
- ・ 重量(装着すると 4mm 厚のもので重量が 83% 増加する)
- ・ 熱伝導率が低いため保温してしまう

ことである。

今後の実験ではこれらの解決を目指す。

## 6. 謝辞

多数の資料および N-9H のサンプルを提供頂いた西村陶業株式会社様に感謝いたします。

## 7. 参考文献

- 1) [www.chemitox.co.jp](http://www.chemitox.co.jp)
- 2) <https://gs.statcounter.com/>

# タンポポ型模型を用いた揚力測定及び

## パラシュート型模型との比較

浅賀唯生 久留宮悠大 ドゥヴリーズ輝弥人 濱口晴輝

### 要旨

本研究の目的はドローグシュートの代用と改善である．そのために制作した模型でどれほどの揚力を得られるのかを調べた．風速が弱い場合はタンポポ型模型の方が揚力が得られるが，風速が強くなるにつれ，ある風速を境に，ドローグシュートの模型の方が揚力を得られるようになるのではないかと考えた．水平に吊るした模型にその下から風をあて，その前後でばねばかりが示す数値の変化を計測した．その結果，風速が小さい時はドローグシュートの模型の方が揚力を得られたが，3.9m/s 以降では，タンポポ型模型の方が揚力を得られた．

### 1. はじめに

本研究では，タンポポが浮遊するための揚力が得られるタンポポの冠毛の構造を利用して，ドローグシュートの代用に挑戦した．ドローグシュートとは，減速，メインパラシュートをスムーズに展開し損壊を防ぐことを目的とし，メインパラシュート展開前に展開するパラシュートである．タンポポが浮遊する仕組みを利用した疑似パラシュートによって，ドローグシュートと同等かそれ以上の揚力などの鉛直上向きの力を得ることができないのではないかと考えた．

過去の研究によると放射状に広がる物体に下から風を当てると，タンポポが浮遊する時に発生する渦と同様の渦が発生する<sup>1)</sup> (図 1)．そのことから，初めに予備実験において 3D プリンターを利用し，中央から放射状に広がる円盤の模型を作成した<sup>2)</sup>．その模型に下から風と共に煙を当て，空気の渦が発生するのを確認した．このことから，作成した模型は揚力を得る可能性があると判断し，本実験を行った．

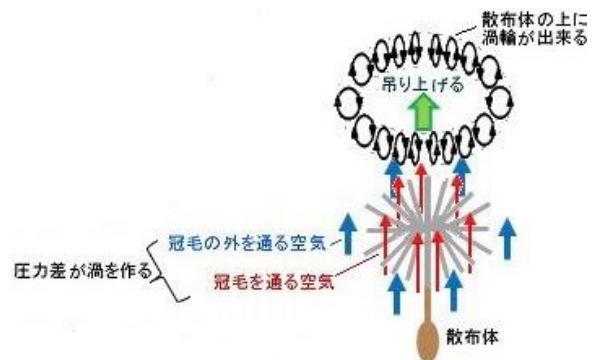


図 1. 渦ができる様子<sup>1)</sup>

### 2. 材料・研究方法

#### 2-1. 実験材料

サーキュレーター(KSF-DC152T-W)，風洞実験装置，3D プリンター(XYZ PRINTING da Vinci 1.0 Pro 3-in-1, ABS フィラメント)，滑車，ばねばかり，クリップ，風速計(CHE-WD1)を使用した．

## 2-2. サンプル①

サンプル①では、3D プリンターで作成した模型で揚力を得ることができるのかを確かめた。この模型の風受け面積は  $16\pi + 112 \approx 160 \text{ cm}^2$ 、質量は  $50.85\text{g}$ (図 2)。風洞実験装置を縦向きにし、滑車にかけた紐で、作成した模型をサーキュレーターの吹き出し口から  $30 \text{ cm}$  の位置に水平に固定した。滑車にかけた紐のもう一端は壁に固定したばねばかりのフックにかけた(図 3)。この時、ばねばかりは  $44.1\text{g}$  を示していた。この模型に下からサーキュレーターで風を当て、このサーキュレーターの風速を  $1.4\text{m/s}$  から  $5.6\text{m/s}$  まで変化させ、ばねばかりが示す数値の増減をそれぞれ 10 回ずつ調べた。風速はサーキュレーターの吹き出し口から  $30\text{cm}$  の、サンプル②と同じ位置で測定した。

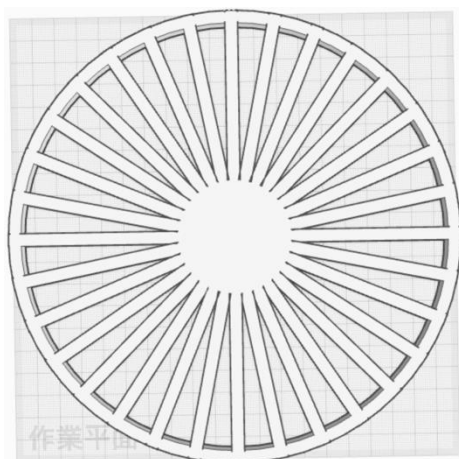


図 2. サンプル①

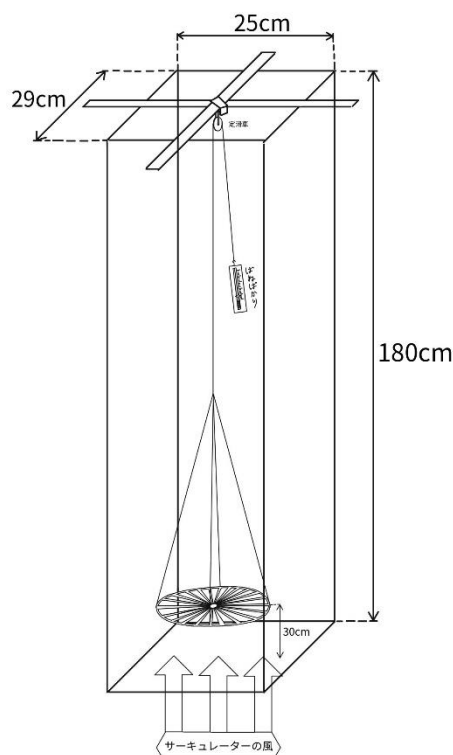


図 3. 実験の装置

## 2-3. サンプル②

サンプル②では、サンプル①と同様の方法でばねばかりが示す数値の増減を調べた。サンプル①の質量とサンプル②の質量を実験時にそろえるためにおもりをつけて調整した。模型は、パラシュートクロスの上に、サンプル①の模型を置き、型取りして切り取り、四か所に穴をあけてひもを通し、そのひもを結んで実際のパラシュートのような形状にして、おもりをつけて実験した(図 4)。このサンプルを安定させるために針金をパラシュートクロスに通した。この時切り取ったパラシュートクロスの面積は  $75\pi \text{ cm}^2$ 、パラシュートクロスの質量は  $4.49\text{g}$ 、重りの質量は  $11.04\text{g}$  であった。

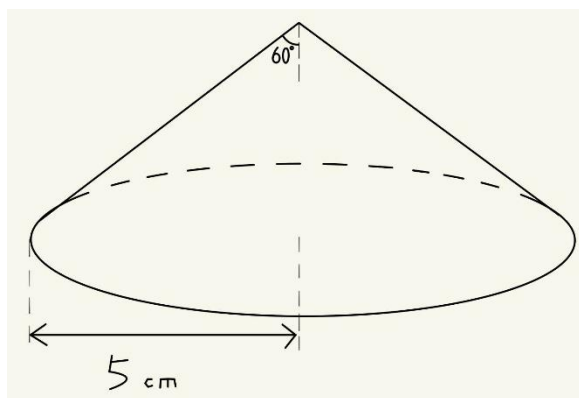


図 4. サンプル②

### 3. 結果

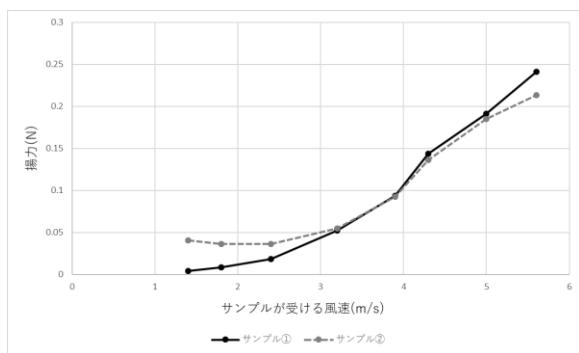


図 5. サンプル①,②の結果の散布図

風を当てる前と当てている時のばねばかりの示す数値の差が、得られた揚力であると考えた。ただし、重力加速度を  $9.8\text{m/s}^2$  として計算した。その揚力の、それぞれの風速における平均をとり、その結果を表したものが図 5、表 1 である。また、それぞれの分散を小数第 5 位で四捨五入し、示した。風速  $3.9\text{m/s}$  の場合、サンプル②の方が揚力を得られたが、以降はサンプル①の模型の方が揚力を得られた。

表 1. サンプル①, ②の結果の分散

| 風速<br>(m/s) | サンプル①の<br>揚力 (N) | 分散     |
|-------------|------------------|--------|
| 1.4         | 0.00372          | 0.3462 |
| 1.8         | 0.00853          | 0.7779 |
| 2.4         | 0.00184          | 0.3400 |
| 3.2         | 0.00524          | 0.8072 |
| 3.9         | 0.00936          | 2.0983 |
| 4.3         | 0.00144          | 9.5539 |
| 5.0         | 0.00191          | 7.100  |
| 5.6         | 0.00241          | 9.240  |

| 風速<br>(m/s) | サンプル②の<br>揚力 (N) | 分散     |
|-------------|------------------|--------|
| 1.4         | 0.00406          | 1.8397 |
| 1.8         | 0.00362          | 1.5757 |
| 2.4         | 0.00361          | 1.1543 |
| 3.2         | 0.00544          | 0.4132 |
| 3.9         | 0.00925          | 0.5523 |
| 4.3         | 0.00136          | 0.9478 |
| 5.0         | 0.00185          | 2.3361 |
| 5.6         | 0.00214          | 2.3493 |

### 4. 考察

結果から分かる通りサンプル①と②を比較すると、風速が小さい場合にはサンプル②のほうがサンプル①よりも揚力を得られる傾向があると分かった。その原因として考えられるものとしては、サンプル②はパラシュートを模して作っているため下方からの風をうけるとそのまま風の力によって持ち上げられるが、それに対してサンプル①に関しては隙間を抜けた風から空気の渦を作り上昇気流を作り上げることで持ち上げるという作りをしているため、微量の風では風が弱すぎたことが原因で上昇気流を作ることができなかったと考えられる。また風速が上がるにつれてサンプル①も揚力

をのばしており風速 3.9m/s 以上になるとサンプル②を上回り、サンプル①のほうが多くの揚力を得た。このことからある程度の風速をもってすればサンプル②に対してサンプル①は匹敵するような効果が得られるということが考えられる。また下方からの風によって模型が揚力を得られたことから、サンプル①は落下運動をする際には揚力を得ることができることがわかる。またサンプル①はサンプル②なみの揚力を得られたことから実際に利用する際にもパラシュート型と同程度の減速効果が得られると思われる。

しかし、我々の仮説で述べていたパラシュート型の模型のほうがより多く揚力を得られるのではないかという考えが結果として異なった原因としては、サンプル②の完成度の問題によって安定した飛行を実行することができなかったからではないかと考える。模型の軸が安定しないことで得ている揚力の値が常に変動し、正確な値が得られず、その結果分散が大きくなってしまった。サンプル②は軸が安定せず、特に強い風を受けると一定の値を長い時間とることが難しいためであると考察する。具体的な飛行軌道としては下方からの風を受けてまっすぐに飛行するわけではなくブレが生じており風を受けて得た力を大きく取り逃がしてしまっていた可能性が考えられる。そのためサンプル①は大きな揚力を受けることができなかったのではないかと考えた。また、実際の落下させる物体を減速させるにあたって、実用的な効果を得ることができるサイズにおいても有効であるのかということについても示す必要があると考えられる。そして、いくつかの分散値が大きくなったことに関しては、風速が高すぎると空気の流れにムラが生じることやパラシュートの飛行軌道が安定しないことが原因として挙げられる。

また本実験のサイズにおいてはこのように十分な揚力を得ることができたが、対象とする

物体が大きくなればなるほど模型の必要サイズも必然的に大きくなるのでそれに合わせて自重も大きくなるので模型の自重が落下に影響を与える可能性も考慮する必要があるだろう。

その点を考慮した場合サンプル①の場所を取らない性質と組み合わせると落下運動において最初の減速に利用してその後はパラシュートによって減速する方法をとるのがよいのではないかと考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

タンポポ型模型は下からの風を受けて渦を発生させられることが分かった。またそのような構造である模型は下方からの空気の流れを受けることで揚力を得る、つまり落下運動が起きた際には揚力を得ることができる。また 2-3. をふまえパラシュート型と結果を比較した場合には、パラシュート型に近い揚力をタンポポ型模型が得ることができた。このことからタンポポ型模型に関しても物体の落下運動に関しての減速の役割を担うにあたってパラシュート型模型に比べて遜色のない活躍をするといえるだろう。ただしパラシュート型模型に関しては形状などの要因から乱れた軌道での飛行をしており、それによって力が分散してしまっている可能性が考えられるのでパラシュート型模型に関して今後手直しを加えたうえでデータを取り直す必要があり、強い風をパラシュートが受けているときに一度体勢が崩れると風の力で立て直すことが非常に困難なため、安全性も考慮しより耐久性のある構造の模型での実験が望まれる。また実際のパラシュート質量は約 2kg であり、人間の質量が 60kg と仮定すると、今回の実験において作成したパラシュート型模型はパラシュート本体の質量とそれにかかるおもりの質量の比率との差が大きいことが問題の一つであるため、実用性を考慮したうえでこの比率を実際のもものと近づけるこ

とが必要だと考えられる。また本研究ではモデルサイズでのタンポポ型モデルの減速効果について存在を示すことができたが、その減速効果が実用的な落下する物体に合わせたサイズにおいても有効であるのかということについても示す必要があると考えられる。

## 6. 参考文献

1) Levalloisbee, パリにひとり  $n=1$ の心象

2019.2.1

<http://silverrapide.blog94.fc2.com/blog-entry-486.html>

2) フラハティ陸・橋田朋子, 2020, 生きた冠毛: 重力に抗う動きにより生命力が感じられるタンポポの冠毛群, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム (EC2020), 69–74.

# 音力発電の実用化に関する研究

## ～ 圧電素子を用いた音力発電における設置環境と発電量の関係 ～

田上慶一 塩見理桜 高嶋幸 橋本葵 空谷和紀

### 要旨

私達の目的は、圧電素子を用いて効率よく発電を行う条件を模索し、音力発電の実用化に貢献することだ。そのために、圧電素子を設置する環境(圧電素子を接触させる物体)と照射する音波の音量と振動数を変化させて、発生電圧との関係を調べた。今回の実験から、接触させる物体により、本来の圧電素子の固有振動数が変化することが分かった。また、照射する音波の音量と、圧電素子の発生電圧には、強い正の相関関係があることが分かった。圧電素子を接触させる物質の厚さを小さくした場合と発泡スチロール板の面積を大きくした場合に、発生電圧は増加した。これらのことから、発生電圧を増大させ、音力発電を実用化させるには圧電素子を接触させる物質を大きく、薄くすることに加え、設置する環境に合わせて物体系の固有振動数を調整することで、物体系が振動しやすいようにする工夫が必要だと考えられた。

### 1. はじめに

圧電素子とは、圧力を加えることで電圧を発生し、また逆に電圧を加えることで変形するデバイスである。圧力が加わると、圧電材料内のプラスイオン、マイナスイオンの位置が移動し、電荷の偏りが生じることで、電圧が発生する<sup>1)</sup>。

私達は、この圧電素子とそれを取り巻くさまざまな条件の相互関係を明らかにしたいと考えた。これにより、効率よく発電を行い、環境負荷の少ない音力発電の実用化に貢献することを目的とした。

予備実験において、圧電素子を直接有孔ボードに固定し、本実験と同様の手順で実験を行ったところ図1に示すように圧電素子はほとんど電圧を発生しない事が分かった。壁の質量は大きく、面積も大きいため、壁は振動していないとみなすことができることから、今回使用した圧電素子は、照射された音波の音圧だけでは実用的な発電に繋がらないと考えた。この結果を受けて私達は、圧電素子に対する内的要因と外的要因に分けて対照実験を行った。

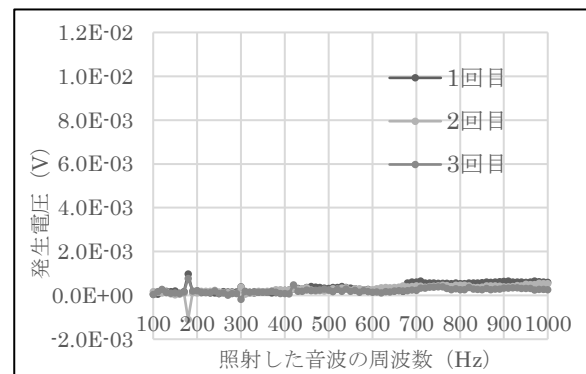


図1. 有孔ボードに圧電素子を固定した場合の発生電圧

今回の実験での内的要因は、圧電素子を接触させる物質(今回は、必要な大きさおよび形状を作成しやすい発泡スチロールを用いた)の条件をさし、外的要因は照射する音波の条件をさす。

以下のように仮説を立てた。

- ・照射する音波の周波数を変化させた場合、音波の周波数が圧電素子の固有振動数である180Hzに一致したとき、発生電圧は最大になると考えた<sup>2)</sup>。
- ・倍音である360Hzや540Hzでも発生電圧が

増加するのではないかと考えた。

- ・照射する音波の音量を増加させた場合、圧電素子に加わる圧力が増加し、発生電圧も増加すると考えた。
- ・発泡スチロール板の厚さを大きくした場合、それに応じて発泡スチロール板に圧電素子を固定したもの(以降「物体系」と呼ぶ)の固有振動数は小さくなることから、発生電圧が著しく増加する周波数帯(確認された周波数帯を周波数が小さい順にファーストピーク、セカンドピークと呼び、グラフ中に①、②と記載する。また、ファーストピーク中で最も発生電圧が大きい周波数を F.max, セカンドピーク中で最も発生電圧が大きい周波数を S.max と定義する。ファーストピーク、セカンドピークを合わせてピークと呼ぶ)は小さくなると考えた。
- ・発泡スチロール板の質量が増加した場合、物体系は振動しにくくなり、発生電圧は減少すると考えた。
- ・発泡スチロール板の厚さを変化させずに面積を大きくした場合、発泡スチロール板と圧電素子の受け取るエネルギーが増加し、発生電圧も増加すると考えた。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

圧電素子(LDT0-028K), オシロスコープ(TEXIO DCS-1072B), パソコン(PC-VRT16FBGS3R7), スピーカー(MM-SPU7BK), 発泡スチロール, USB メモリ, セロハンテープ, ガムテープ, 導線, 木製の椅子(300mm×300mm×450mm)

### 2-2. 実験方法

まず圧電素子に導線をはんだ付けした。そして、導線の部分のみを予備実験では有孔ボード(京都府立洛北高等学校放送室の内壁)に、本実験では発泡スチロールにガムテープで固定した。

また、本実験では発泡スチロール板に固定したうえで、同じく有孔ボードに、発泡スチロール板の4辺をセロハンテープで留めた。

有孔ボードに触れないように椅子を設置し、その上にスピーカー(音量最大)を置いて、発泡スチロール板とスピーカーの距離を 10mm に固定した。導線をオシロスコープに接続し、導線がスピーカーに触れないように調節した。スピーカーを接続したパソコンで音量を 100pt(pt をパソコンの音量表示の単位とする)に設定し、更に指定した波形と周波数の音波を出力できる Web サイト Oscillator(URL : [https://tomari.org/main/java/audioapi/audio\\_osc2.html](https://tomari.org/main/java/audioapi/audio_osc2.html)) (サイト内の音量は最大に設定した)を用いて周波数を適宜変化させた。

周波数を変化させるごとにオシロスコープに接続した USB メモリに 2 秒間、 $2.0 \times 10^{-4}$  秒ごとに記録した電位差のデータを CSV 形式のファイルとして保存し、Excel book に取り込んだ。

記録内容は以下の通りである。

- ・無音状態
- ・周波数 100Hz~1000Hz (10Hz 間隔)

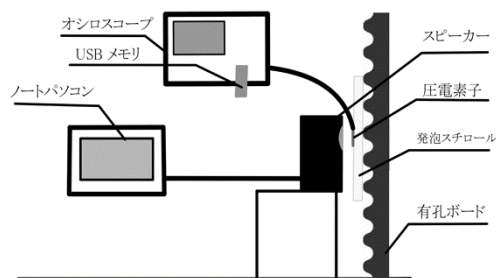


図 2. 実験装置の概略図

Excel book に取り込んだデータの絶対値を取り、各状態での平均値を計算した。それぞれの平均値と無音状態での圧電素子の電位差の平均値の差をグラフ化した。

ただし、2-2-2 については、音量を 5pt 毎に変化させて記録した。

また、2-2-1, 2-2-3, 2-2-4 では音波の周波数を 100Hz から 1000Hz まで変化させた。

### 2-2-1. 音波の周波数を変化させる実験

圧電素子を発泡スチロール板 (100mm×100mm×9.5mm) に貼り付けた場合について、照射する音波の周波数の変化による発生電圧の変化を調べた。

### 2-2-2. 音波の音量を変化させる実験 (外的要因)

音量と発生電圧の関係を調べた。この実験では音量をパソコンの設定画面の表示に基づき、PC の音量を 0pt から 100pt まで 5pt ずつ変化させて照射した。周波数は 240Hz に固定した。

### 2-2-3. 発泡スチロール板の厚さを変化させる実験 (内的要因)

発泡スチロール板の厚さの変化による発生電圧、ピークの変化について調べた。この実験では圧電素子を貼り付ける面を 100mm 四方に固定し、厚さを 9.5mm, 29mm, 50mm と変化させた。3 回の測定を繰り返し、平均値をグラフにした。

### 2-2-4. 発泡スチロール板の面積を変化させる実験 (内的要因)

発泡スチロール板の面積の変化による発生電圧、ピークの変化について調べた。この実験では発泡スチロール板の厚さを 9.5mm に固定し、100mm 四方と 150mm 四方、200mm 四方の 3 つについて行った。3 回の測定を繰り返し、平均値をグラフにした。

## 3. 結果

### 3-1. 音波の周波数を変化させる実験

図 3 (横軸は照射した音波の周波数 (Hz)、縦軸は発生電圧 (V) である) のように、F.max は 210Hz となった。また、S.max は、F.max の約 4 倍である 860Hz であった。F.max での 3 回の発生電圧を平均すると  $9.5 \times 10^{-3} \text{V}$  であり、S.max で

の発生電圧の平均は  $2.9 \times 10^{-3} \text{V}$  であった。それから 2 つのピーク以外の周波数ではほとんど電圧が発生しなかった。

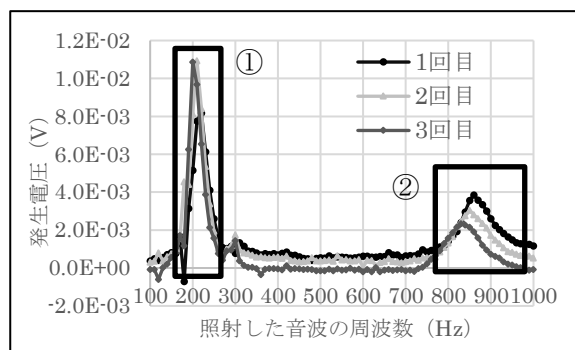


図 3. 音波の周波数を変化させた場合の発生電圧

### 3-2. 音波の音量を変化させる実験 (外的要因)

図 4 (横軸は音量 (pt)、縦軸は発生電圧 (V) である) のように、音量の増加に伴い発生電圧も増加した。音量 45pt までの発生電圧の平均で相関係数を算出したところ、0.996611 となり、強い正の相関関係が見られた。しかし、発生電圧の増加の割合は音量 45pt から減少していき、最終的に発生電圧は  $9.0 \times 10^{-3} \text{V}$  に収束した。

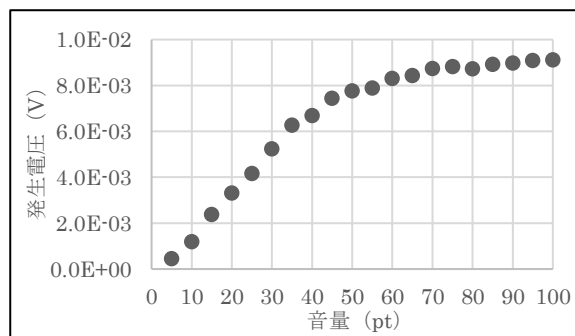


図 4. 音波の音量を変化させた場合の発生電圧

### 3-3. 発泡スチロール板の厚さを変化させる実験 (内的要因)

図 5 (横軸は照射した音波の周波数 (Hz)、縦軸は発生電圧 (V) である) のように、F.max とその周波数での発生電圧は、厚さ 9.5mm では

210Hz,  $9.5 \times 10^{-3} \text{V}$ , 厚さ 29mm では 230Hz,  $5.3 \times 10^{-3} \text{V}$ , 厚さ 50mm では 240Hz,  $5.7 \times 10^{-3} \text{V}$  であった. それぞれの F.max での発生電圧を比べると厚さ  $9.5\text{mm} > 50\text{mm} > 29\text{mm}$  となった.

また, 厚さ 9.5mm では 850Hz, 厚さ 50mm では 640Hz が, S.max であった.

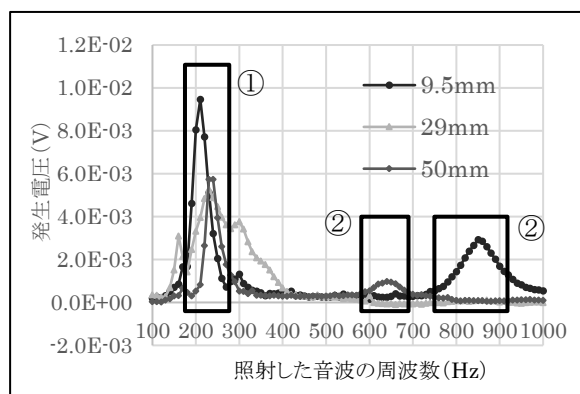


図 5. 発泡スチロール板の厚さを  
変化させた場合の発生電圧

### 3-4. 発泡スチロール板の面積を変化させる実験 (内的要因)

図 6 (横軸は照射した音波の周波数 (Hz), 縦軸は発生電圧 (V) である) のように, F.max とその周波数での発生電圧は,  $1.00 \times 10^4 \text{mm}^2$  では 210Hz,  $9.5 \times 10^{-3} \text{V}$ ,  $2.25 \times 10^4 \text{mm}^2$  では 230Hz,  $2.0 \times 10^{-2} \text{V}$ ,  $4.00 \times 10^4 \text{mm}^2$  では 220Hz,  $1.9 \times 10^{-2} \text{V}$  であった. それぞれの F.max での発生電圧を比べると,  $2.25 \times 10^4 \text{mm}^2 > 4.00 \times 10^4 \text{mm}^2 > 1.00 \times 10^4 \text{mm}^2$  となった. ただし,  $2.25 \times 10^4 \text{mm}^2$  と  $4.00 \times 10^4 \text{mm}^2$  の発生電圧はほとんど同じであった.

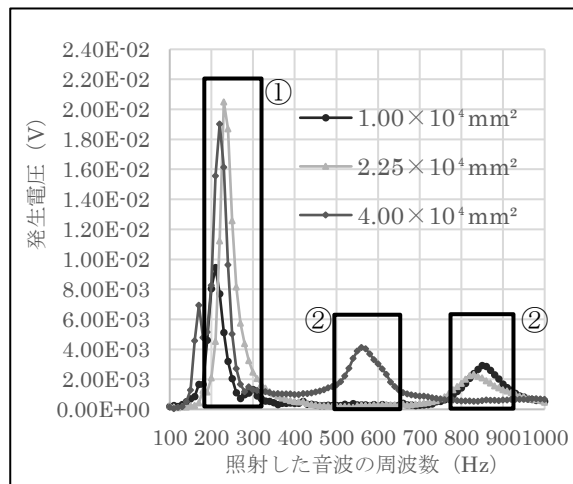


図 6. 発泡スチロール板の面積を  
変化させた場合の発生電圧

また, S.max とその周波数での発生電圧は,  $1.00 \times 10^4 \text{mm}^2$  では 850Hz,  $2.9 \times 10^{-3} \text{V}$ ,  $2.25 \times 10^4 \text{mm}^2$  では 830Hz,  $2.3 \times 10^{-3} \text{V}$ ,  $4.00 \times 10^4 \text{mm}^2$  では 560Hz,  $4.1 \times 10^{-3} \text{V}$  であった. それぞれの S.max での発生電圧を比べると,  $4.00 \times 10^4 \text{mm}^2 > 1.00 \times 10^4 \text{mm}^2 > 2.25 \times 10^4 \text{mm}^2$  となった.

## 4. 考察

### 4-1. 音波の周波数を変化させる実験

予備実験に比べて発生電圧が大幅に増加し, 予備実験では確認されなかったピークが確認されたことから, 発生電圧は発泡スチロールに依存していたことが明らかになった. また, F.max は 3 回全てで 210Hz であり, 発生電圧は, 予備実験よりも大幅に大きかったことから, 物体系の固有振動数は約 210Hz であると考えられる.

### 4-2. 音波の音量を変化させる実験 (外的要因)

算出された相関係数が 1 に近いことから, 音量と発生電圧には強い正の相関関係があるとわかった. 音量が増加し, 音波の振幅が大きくなったことで, 音波のもつエネルギーが増加し, 結果的に発泡スチロール板が受けるエネルギーも増加したことが示唆された.

また、発生電圧が収束したのは、音量 50pt 以降ではスピーカーの出力の限界に達したために、音量がほとんど増加しなかったことが原因だと考えられる。

#### 4-3. 発泡スチロール板の厚さを変化させる実験（内的要因）

厚さ 29mm、厚さ 50mm の F.max での発生電圧は厚さ 9.5mm の F.max での発生電圧より小さかった。これは、発泡スチロールの厚さが大きくなったことに伴う質量の増加により、発泡スチロール板の振動に要するエネルギーが増加したことが原因だと考えられる。一方で、厚さ 29mm と厚さ 50mm の F.max での発生電圧の差が小さいことが分かった。また、厚さを大きくすると F.max が増加した。このことから、厚さの変化に伴い、物体系の固有振動数が変化したことが明らかになった。質量が増加すれば固有振動数は小さくなると考えていたが、厚さを大きくしたことによって発泡スチロール板の剛性が高まり、質量増加の影響を上回ったことで固有振動数が大きくなったと考えられる。

#### 4-4. 発泡スチロール板の面積を変化させる実験（内的要因）

発泡スチロール板の面積を大きくした場合、質量が増加して発泡スチロール板の振動に要するエネルギーが増加したと考えられる。しかし、 $2.25 \times 10^4 \text{mm}^2$  と  $4.00 \times 10^4 \text{mm}^2$  の F.max での発生電圧は、 $1.00 \times 10^4 \text{mm}^2$  の F.max での発生電圧の約 2 倍であったことから、発泡スチロール板の面積が大きくなったことで、発泡スチロール板が受けるエネルギーも増加し、発泡スチロール板は、より激しく振動したと考えられる。

### 5. まとめと今後の課題

今回の実験における物体系の固有振動数は 210Hz~230Hz であると結論付けた。また、音量

が増加すると発生電圧は増加した。発泡スチロール板の厚さが大きくなるとファーストピークでの発生電圧は減少すると考えられたが、面積が大きくなるとしてもファーストピークでの発生電圧は増加し続けるわけではないことが示唆された。

発泡スチロール板の面積を  $1.0 \times 10^4 \text{mm}^2$  よりも小さくした場合や、 $4.0 \times 10^4 \text{mm}^2$  よりも大きくした場合のそれぞれについて同様に検証することにより、圧電素子を接触させる発泡スチロール板の面積と発生電圧の細かな相関関係をみるなどさらに深い考察が可能になるだろう。

発泡スチロール板の厚さについても、9.5mm ~50mm の範囲での発生電圧の変化についてデータを取得できれば、より数理的に発生電圧と厚さとの関係を解析できるだろう。

これらのことから、発生電圧を増大させ音力発電を実用化させるには、圧電素子を接触させる物質を大きく、薄くすることに加え、設置する環境に合わせて物体系の固有振動数を調整することで、物体系が振動しやすいようにする工夫が必要だと考えられる。

本研究では圧電素子を接触させる物質の材質を発泡スチロールのみに絞って実験を行ったが、実用化に向けては圧電素子を接触させる物質の材質と発生電圧の関係についても検証が必要である。木材やプラスチックなど、実際の発電時に圧電素子と接触するであろう物質の材質について本研究と同様の実験を行うことで、今回とは異なる結果が得られる可能性を否定できないからである。

また、今回の実験では各場合でセカンドピークの発生がみられたが、その原因を特定することができなかった。要因の解明には、まずはファーストピークとセカンドピークとの関係を明らかにすることが必要だ。先に述べたように、圧電素子を接触させる物質の厚さや面積を細かく変化させてデータを採取することで、ファーストピークとセカンドピークの変化を連続的に追跡可能となり、二者の関

係を分析することができるのではないかと考える.

## 6. 参考文献

1) ローム株式会社, ピエゾ(圧電素子)とは？,

[https://www.rohm.co.jp/electronics-](https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/piezo/what1)

[basics/piezo/what1](https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/piezo/what1), 2023.10.14

2) 一般社団法人 電気学会, 2020.1.19,

[https://www.iee.jp/pes/wp-](https://www.iee.jp/pes/wp-content/uploads/sites/3/2020/01/R1_5.pdf)

[content/uploads/sites/3/2020/01/R1\\_5.pdf](https://www.iee.jp/pes/wp-content/uploads/sites/3/2020/01/R1_5.pdf) [\\_](#)

# ワイセンベルク効果を利用した粘弾性流体における

## 架橋密度と第一法線応力差間の関係の調査

小田垣陽人 角濱菜々美 加藤暢啓 近藤咲希 才田遼

### 要旨

本研究では粘弾性流体における架橋密度と法線応力の相関関係の解明を試みた。本実験では粘弾性流体としてスライムを作成して用いた。そして、ワイセンベルク効果における回転軸の角速度の変化及びスライムの巻き上げ量の測定・解析を行った。また、粘弾性流体に沈降していく鉛球の加速度を測定しスライムの粘性を評価した。既知のずり応力、法線応力、第一法線応力差の関係式より、架橋密度の増大に伴って第一法線応力差は大きくなる。しかし、架橋密度がある値を超えれば、ひずみが大きくなることで生じる架橋物質による高分子鎖の伸縮の阻害よりも、弾性による復元力や水素結合が弱まることで第一法線応力差が減少することがわかった。

### 1. はじめに

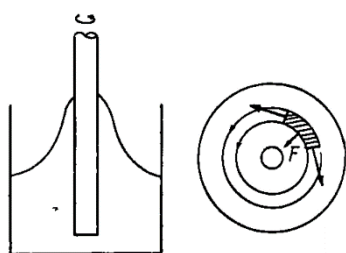


図 1. ワイセンベルク効果の模式図

参考文献 1) より引用

ずり流動する粘弾性流体では、第一法線応力差によって軸向きの流れに沿った張力が作用する。円に沿った流れでは張力の合力は内向きの力で、遠心力の逆である。図1に示すように2本の流線で挟まれた円環部分を考えると、この張力の合力  $F$  はその円環より内側の流体を締め付ける作用をし、中心部に近い流体ほどその外側全体から締め付けられる。このとき、流体は回転する棒に巻き付いて這い上がる。これをワイセンベルク効果という。

予備実験では、飽和ホウ砂水溶液と PVA(ポリビニールアルコール) 溶液を用いることによってス

ライムを作成した。このスライムに円柱形の棒(3D-CAD により設計)を挿入して回転させるとワイセンベルク効果が観測できたため、スライムの粘弾性が確認された。よって本実験においてスライムを粘弾性流体として用いることを決定した。

本実験の目的は、ワイセンベルク効果を用いることで第一法線応力差を求め、架橋密度との関係性を評価することである。しかし第一法線応力差は応力テンソルの対角二成分の差であるため、専門器具を用いない本実験では値自体を求めることは困難である。よってここではスライムのずり速度と粘度からずり応力を導出し、ずり応力と架橋密度の関係性を求め、第一法線応力差と架橋密度の関係を考察する。

仮説および考察には、一般にニュートン流体に対して成立するずり応力とずり速度の関係式 1、および一般に粘弾性流体に対して成立する第一法線応力差の関係式 2 を利用する。

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad \text{式1}$$

$$N = \tau - \sigma \quad \text{式2}$$

文字の定義については 3. 結果を参照。

本論文では図 2 のようにずり応力と法線応力の

向きを定義した.

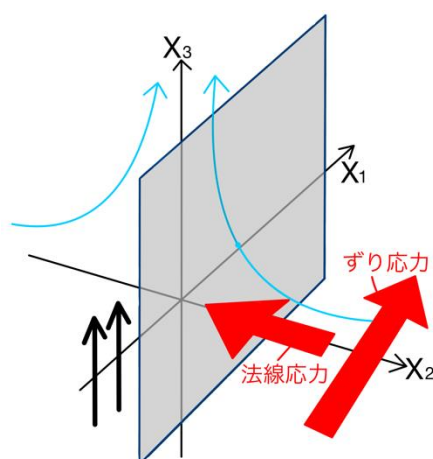


図 2. スライムの境界におけるずり応力 $\tau$ と法線応力 $\sigma$ の向き

定義は参考文献 1) 2) に参照

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 実験 A 目的・仮説

実験 A では飽和ホウ砂水溶液の添加量を変えて、ワイセンベルク効果における法線応力の寄与を調べることを目的とする. 回転棒をスライムにつける深さを深くすれば、巻き上げ開始時に棒の底面付近にかかるスライムによる圧力は強くなる. これにより巻き上げ開始直後において中心付近のスライムが外側のスライムから受ける圧力も強くなるため、中心付近のスライムの流速は外側に比べて大きくなる. よって、スライムの境界における速度差に依存する法線応力も同様に大きくなると考えられる. 一方で回転棒自体は、スライムにつける深さを深くすれば粘性による抵抗を強く受け回転速度が減少し、それに伴ってずり速度も減少. ずり速度に依存するずり応力の値を小さくすることで法線応力の寄与を考察できると考えた.

#### A-1. 研究試料

PVA25mL と水 50mL を混ぜ合わせ. そこに飽和ホウ砂水溶液を加えることで PVA と水の質量比が 1:2 のスライムを作成した. このとき PVA と水に対して体積比 2.0% の飽和ホウ砂水溶液を添加

した. そして、3D-CAD で直径 10mm の円柱状の棒を作成し、角速度  $20\pi$  [rad/s] のモーターと角速度測定器を取り付けた.

#### A-2. 研究方法

作成したスライムを 500mL ビーカーに入れ、直流電源装置に接続したモーターに棒を取り付けてスライムに挿入し、40 秒間回転させて棒の角速度の時間変化を測定した (サンプル間隔は 0.02 秒). これを棒の底面の液面からの深さを 5.0mm, 10mm, 15mm, 20mm と変えて行った. このとき電源装置より流れる電流の値は 2.0A で一定になるようにした.

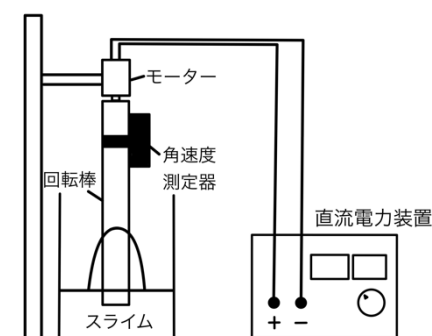


図 3. 実験 A の装置模式図

### 2-2. 実験 B 目的

実験 A で使用したモーターの回転軸のトルクは小さかったため、スライムの粘性の抵抗によって回転が不規則になり角速度測定器に多くのノイズが発生した. 実験 B では正確に飽和ホウ砂水溶液の添加量とずり速度の関係を調べることを目的とし、回転軸のトルクが大きく測定結果にノイズが発生しにくいデジタル攪拌機を使用した.

#### B-1. 研究試料

PVA25mL と水 50mL を混ぜ合わせ、そこに飽和ホウ砂水溶液を加えることで PVA と水の質量比が 1:2 のスライムを作成した. このとき飽和ホウ砂水溶液の添加量について、体積比で 2, 3, 4, 5% 分をそれぞれ加えたスライムを作成した. 直径

10mm の銅棒を用意し角速度 100rad/s のモーターを装備したデジタル攪拌機と角速度測定器を取り付けた。

## B-2. 研究方法

作成したスライムを500mLビーカーに入れ、銅棒を底面の液面からの深さが20mmになるように挿入して40秒間回転させ、棒の角速度の時間変化を測定した(サンプル間隔は0.02秒)。これを飽和ホウ砂水溶液の添加量別に行った。また、このときスライムが最高点に達するまでの時間と、スライムの液面から最高点までの高さを計測した。

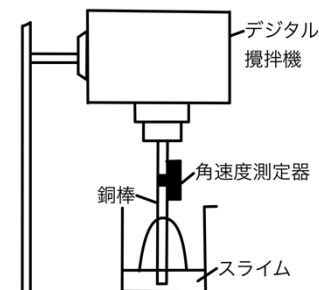


図 4. 実験 B の装置模式図

## 2-3. 実験 C 目的

実験 C では落球法による粘性の測定を行い、飽和ホウ砂水溶液の添加量とスライムの粘度の関係を調べることを目的とする。

### C-1. 研究試料

PVA100mL と水 100mL を混ぜ合わせ、そこに飽和ホウ砂水溶液を加えることで PVA と水の質量比が 1:1 のスライムを作成した。このとき飽和ホウ砂水溶液の添加量について、体積比で 2, 3, 4, 5%分をそれぞれ加えたスライムを作成した。

また、落球法には直径 20mm、質量 35.4g の鉛球を用いた。鉛球にはテグスを結び、テグスの他端には加速度測定器を付けた。

### C-2. 研究方法

200mL ビーカーにスライムを入れ、滑車を

用いて鉛球をスライムの中に落下させて球の加速度を測定した(図 5)。この実験では加速度測定器が接触している机との間に働く動摩擦力が無視できないため以下加速度測定器と机間の動摩擦係数を  $\mu$  とする。はじめテグスと机に対して水平方向のなす角は  $35^\circ$  であった。

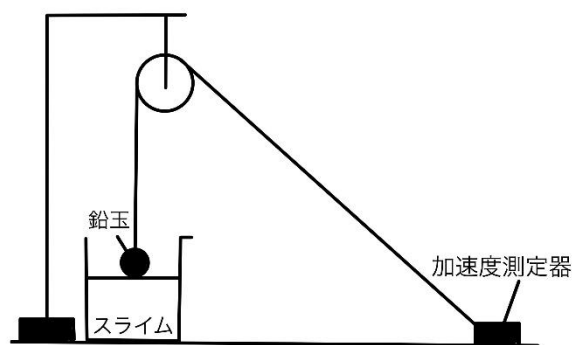


図 5. 実験 C の模式図

## 3. 結果

以下のように文字を定義する。

- $m$  鉛球の質量[kg]
- $M$  加速度測定器の質量[kg]
- $g$  重力加速度[m/s<sup>2</sup>]
- $\rho$  スライムの密度[kg/m<sup>3</sup>]
- $V$  スライムの体積[m<sup>3</sup>]
- $\eta$  スライムの粘度
- $T$  テグスの張力[N]
- $R$  実験Bで回転させる銅棒の半径[m]
- $r$  鉛球の半径 [m]
- $v$  鉛球の速度[m/s]
- $\omega_{(t)}$  銅棒の角速度[rad/s]
- $\gamma$  スライムのひずみ
- $\theta$  テグスと水平方向のなす角[°]
- $\tau$  流線に対して接線方向に働くずり応力[Pa]
- $\sigma$  法線応力[Pa]
- $N$  第一法線応力差

### 3-1. 実験 A の結果

この実験における角速度の変化は後に示す図 9 のようになった。液面からの深さを 5mm, 10mm

としたとき、角速度は振動しながら増加して0.5sあたりでピークをとり、その後減少しある一定の値に収束した。15mm,20mmとしたときは振動しながら増加してある一定の値に収束した。

棒の底面の液面からの深さ 5mm,10mm, 15mm,20mm としたときの巻き上げ最高点の高さをそれぞれ $h_1, h_2, h_3, h_4$ とすると、観察より以下の大小関係が得られた。

$$h_1 > h_2 > h_3 > h_4 \quad \text{式3}$$

### 3-2. 実験Bの結果

この実験における角速度の時間変化のグラフは後に示す図10のようになった。ここから、飽和ホウ砂水溶液の添加量によらず角速度はある一定の値に収束したと考えられる。巻き上げ開始の原点から収束値までの角速度の傾きを求めると、表1のようになった。ただし、ここでいう収束値とは角速度を $t \rightarrow \infty$ に飛ばした時の値ではなく、角速度の変化率の絶対値が初めて $10^{-2}$ 以下になったときの値を採用する。次に、飽和ホウ砂水溶液の添加量別に、巻き上がったスライムの最高点の液面からの高さ、その点に到達するまでの時間を測定したところ、表2のようになった。巻き上げ最高点の高さは、回転前のスライムの液面の高さからスライムが巻き上がった最高点の高さまでを測定した。

**表1. 図9における角速度の巻き上げ開始から漸近する値までの角速度の傾き**

| 飽和ホウ砂水溶液添加量[%] | 傾き     |
|----------------|--------|
| 2              | 226.70 |
| 3              | 218.02 |
| 4              | 213.09 |
| 5              | 207.63 |

**表2. 飽和ホウ砂水溶液添加量別の巻き上げ最高点の高さ及び最高点到達時間**

| 飽和ホウ砂水溶液添加量[%] | 巻き上げ最高点[mm] | 最高点に到達するまでの時間 $t_1$ [s] |
|----------------|-------------|-------------------------|
| 2              | 5.0         | 6.9                     |
| 3              | 22          | 8.6                     |
| 4              | 57          | 11.3                    |
| 5              | 59          | 12.5                    |

### 3-3. 実験Cの結果

落球法における、時間変化に伴う球の加速度三軸合成値を $a_{(t)}$ としてグラフにしたところ、図11のようになった。ここから落球の速度を求める。

$$\sqrt{\left(\mu g - \frac{dv}{dt} \cos \theta\right)^2 + \left(g - \frac{dv}{dt} \sin \theta\right)^2} = a_{(t)} \quad (*)$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{dv}{dt} &= g(\mu \cos \theta + \sin \theta) \\ &\pm \sqrt{g^2(\mu \cos \theta + \sin \theta)^2 - g^2(\mu^2 + 1) + a_{(t)}^2} \\ &= 8.0\mu + 5.6 \pm \sqrt{a_{(t)}^2 - 31.7\mu^2 + 89.8\mu - 64.8} \end{aligned}$$

運動の方向から

$$\frac{\mu g}{\cos \theta} < \frac{dv}{dt} < \frac{g}{\sin \theta}$$

が成立するがこれだけでは二式のうちいずれが適切か決定することはできない。

粘性抵抗を考慮すると開始直後の加速度が重力加速度に一致し、その後0に漸近するはずだが結果のグラフは上に凸の関数となった。加速度測定器が動き始めるまでに、最大静止摩擦力に達するまでの時間が存在するため、測定開始直後の値にずれが生じたとして、図11中の各グラフのピーク値を確からしい値として計算した。 $\mu < 1$ より

根号内の値は負であるため $\frac{dv}{dt}$ が存在しない。これ

は、糸がたわんで張力が働かなくなったことで上記の運動方程式(\*)が成立しなかったことが原因だと考えられる。よってこの実験では $v$ の値を正確に求めることができないと判断した。しかし $a(t)$ を小さくすると根号内が0に近づくのは事実なので以下、根号内を0として式4に決定した。

$$\frac{dv}{dt} = 8.0\mu + 5.6$$

$$v = (8.0\mu + 5.6)t \quad \text{式4}$$

#### 4. 考察

##### 4-1. 実験Aの考察

液面からの深さを5mm,10mmとしたときの角速度変化が15mm,20mmの場合と大きく異なる原因を考察する。深さ5mm,10mmのときピークをとった後に急激に角速度が減少したことから、一時的に応力緩和が起きたことが考えられる。このとき、ひずみによりスライム内の分子のずれが瞬間的に大きくなり、スライムの弾性力が強く働いていることがうかがえる。深さ15mm,20mmで応力緩和が発生しなかったことから、応力緩和はひずみが短時間で一定以上に大きくならないと発生しないと解釈できる。このことから、正確に飽和ホウ砂水溶液の添加量とずり速度の関係を調べることを目的とする実験Bでは、応力緩和が起きてスライムの形状の回復が起こると不都合なので、液面からの深さは20mmに設定した。

実験Aの仮説にある通り、棒の液面からの深さを深くすれば法線応力の値は大きくなる。そのため、ずり応力に対して法線応力の値が大きければずり速度が小さくなくてもスライムの巻き上げの高さは高くなるはずである。式3の大小関係はこれに反するため、ずり応力に対して法線応力の値は小さく、以下第一法線応力差を考える上でずり応力を主応力として考える。

##### 4-2. 実験Bの考察

巻き上げの様子は図6のようになり、最高点に至るまでのスライムの巻き上げの全体像は円柱形

に近似できるとした。



図6. 実験Bにおけるスライムの巻き上げ

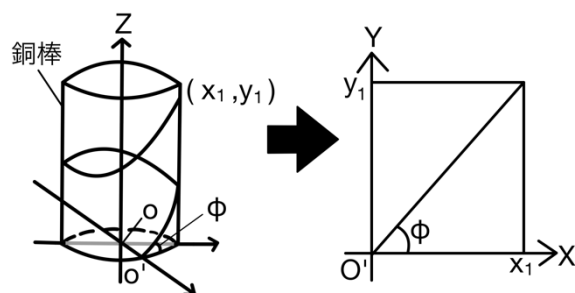


図7. 円柱の側面の展開と座標設定

スライムは粘性をもち、ずり流動している間は棒の側面に対して滑っていない。このときZ軸方向への伸長は時間に比例する。よって、巻き上げスライムと接している銅棒表面を展開して新しい平面座標を導入すると、スライムのひずみ速度の方向はこの座標系における $(0, 0)$ ,  $(x_1, y_1)$ の2点を結ぶ直線方向である。ただし円周に沿う伸長方向をX軸、鉛直方向Y軸に設定し、 $(0, 0)$ ,

$(x_1, y_1)$ の2点を結ぶ直線とX軸のなす角を $\varphi$ とする。

$$x_1 = 2\pi R \times (\text{回転数})$$

$$y_1 = (\text{最高到達点})$$

$$(\text{回転数}) = \int_0^{t_1} \omega(t) dt$$

回転数は結果より得られた $\omega(t)$ の関数を $[0, t_1]$ で積分することで導出できる。このとき $\omega(t)$ の関数は高次の整関数に近似した上で積分した。

$$\dot{\gamma} = \frac{R\omega(t)}{\cos \varphi} = \sqrt{1 + \tan^2 \varphi} R\omega(t)$$

$$\tan \varphi = \frac{y_1}{x_1}$$

以上の関係式から

$$\dot{\gamma} = \sqrt{1 + \left(\frac{y_1}{x_1}\right)^2} R\omega(t)$$

**表 3. 考察で設定した座標系における、ホウ砂添加量別の $(x_1, y_1)$ の値**

表 2 の角速度のグラフを  $t=0$  から  $t = t_1$  で積分することによって値を求めた.

| ホウ砂添加量[%] | $x_1[m]$             | $y_1[m]$             |
|-----------|----------------------|----------------------|
| 2         | $2\pi R \times 9.68$ | $5.0 \times 10^{-3}$ |
| 3         | $2\pi R \times 13.4$ | $22 \times 10^{-3}$  |
| 4         | $2\pi R \times 17.1$ | $57 \times 10^{-3}$  |
| 5         | $2\pi R \times 20.0$ | $59 \times 10^{-3}$  |

図 10 より飽和ホウ砂水溶液の添加量によらず  $\omega(t)$  の関数の概形は変化しないとしてよく、ずり速度の値は  $\sqrt{1 + \left(\frac{y_1}{x_1}\right)^2}$  に依存する. 2, 3, 4, 5% のずり速度を  $\dot{\gamma}_2, \dot{\gamma}_3, \dot{\gamma}_4, \dot{\gamma}_5$  とすると, 表 3 の結果より以下の大小関係が得られる.

$$\dot{\gamma}_2 < \dot{\gamma}_3 < \dot{\gamma}_4 < \dot{\gamma}_5 \quad \text{式5}$$

また巻き上げ開始直後のずり流動の方向は銅棒の断面円の接線方向と一致し, 表1中の傾きは巻き上げ開始直後のずり速度の増加率として扱うことができる. これを  $\dot{\gamma}_2, \dot{\gamma}_3, \dot{\gamma}_4, \dot{\gamma}_5$  として大小関係は以下の通り.

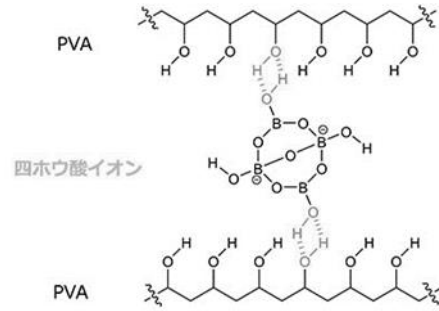
$$\dot{\gamma}_5 < \dot{\gamma}_4 < \dot{\gamma}_3 < \dot{\gamma}_2 \quad \text{式6}$$

スライム全体の溶液に対して加えた飽和ホウ砂水溶液の量は極めて小さいため, ホウ砂はすべて架橋に使われ, 架橋密度の大小は飽和ホウ砂水溶液の添加量の大小と一致するとして考察を行う.

スライムは図 8 のように四ホウ酸イオンの持つヒドロキシ基と PVA の高分子鎖のヒドロキシ基が水素結合して架橋している.

式6よりずり流動を始めた直後の運動においては架橋密度が大きいほどずり速度の増加が抑制される傾向が見られるが, これは架橋物質である四ホウ酸イオンが PVA の高分子鎖の伸縮を阻害していることを表している. 式6の大小が不変であ

ればずり速度も式6の大小関係に一致するはずである. 実際は式5において大小関係がこれとは一致せず, これはスライムが流線方向に伸長するにつれてスライムが持つ弾性による復元力が無視できなくなったこと, あるいは四ホウ酸イオンの持つヒドロキシ基と PVA の高分子鎖のヒドロキシ基間の距離が開き水素結合が弱まったことが原因として考えられる. 非ニュートン流体であるスライムはずり速度の増加に伴って粘度が減少していることからこの変化は妥当である. 4, 5%間の大小に注目すれば, 飽和ホウ砂水溶液の濃度が一定以上であれば, ひずみの増大に伴って架橋物質による高分子鎖の伸縮の阻害よりも, スライムの弾性による復元力や水素結合が弱まることがずり速度に強く影響を及ぼすことが考えられる.



**図 8. スライムの架橋の様子**

参考文献 3) より引用

#### 4-3. 実験 C の考察

鉛球が  $t_2[s]$  で終端速度に達するとすると, 加速度測定器が移動する距離は式より

$$\int_0^{t_2} (8.0\mu + 5.6)t \, dt$$

図 11 からこの値を計算すると実験で使用したテグスの長さに対して十分に小さい. よって  $\theta$  は一定としてよい. 以下  $\theta$  は時間に依存しない定数であるとする.

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = mg - \left(T + \frac{4}{3}\pi r^3 g + 6\pi \eta r v\right) \\ M \frac{dv}{dt} \cos \theta = T \cos \theta - \mu M g \end{cases}$$

T 消去して

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g \left( m - \frac{4}{3} \pi \rho r^3 \right) \cos \theta - \mu mg}{(M + m) \cos \theta} - \frac{6 \pi r}{M + m} \eta v$$

ここで以下のように  $k_1$ ,  $k_2$  を設定

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{g \left( m - \frac{4}{3} \pi \rho r^3 \right) \cos \theta - \mu mg}{(M + m) \cos \theta} \\ &= 5.39 - 6.58\mu \\ k_2 &= \frac{6 \pi r}{M + m} \\ &= 1.14\pi \times 10^{-3} \end{aligned}$$

微分方程式を解いて

$$v = Ae^{-k_2 \eta t} + \frac{k_1}{k_2 \eta} \quad (A \text{ は任意定数})$$

鉛球には初速を与えなかったので  $t = 0$  で  $v = 0$  が成立するため  $A$  を決定して.

$$\begin{aligned} v &= -\frac{k_1}{k_2 \eta} e^{-k_2 \eta t} + \frac{k_1}{k_2 \eta} \\ \frac{dv}{dt} &= k_1 e^{-k_2 \eta t} \quad \text{式7} \end{aligned}$$

式4, 式7より  $v$  および粘度  $\eta$  は飽和ホウ砂水溶液の添加量にほとんど依存しないことが考えられる. しかし, 実験 B の観察では明らかに飽和ホウ砂水溶液の添加量によってスライムの粘度が変化していたため, この考察と矛盾する. この原因は, 鉛球の初速が小さく終端速度に達するまでの時間が短すぎたため, 計算結果が変わらなかったことだと推察される. また全実験を通して, スライムは変形後に速やかに元の形状に戻る様子をみせたため, スライム自体の粘度が小さかったことも原因として考えられる.

## 考察まとめ

式1, 2および実験 A, B の考察より, 飽和ホウ砂水溶液の添加量 2, 3, 4, 5%の第一法線応力差を  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $N_4$ ,  $N_5$ , として, 大小関係は以下の通り.

$$N_2 < N_3 < N_5 < N_4$$

架橋密度の増大に伴って第一法線応力差は大きくなる. 架橋密度が一定以上になれば, ひずみが大きくなるにつれて架橋物質による高分子鎖の伸

縮の阻害よりも, 弾性による復元力や水素結合が弱まることが第一法線応力差を減少させることがわかった.

## 5. まとめと今後の課題

実験 C の結果だけでは鉛球の速度を決定することができない. よって粘度  $\eta$  が飽和ホウ砂水溶液の添加量によらないとする議論は曖昧である. そのため初速を与えることで測定開始直後の数値のずれを小さくする, または落球法ではなく円環流動法などの手法を用いることでより正確な粘度決定ができると考えられる.

実験 B において側面の座標系におけるスライムのずり速度は直線系であるとしたが, 厳密には側壁に沿う中心部のスライムの滑りは無視できても巨視的にみればすべりは無視できない. そのためより正確にスライムの挙動を追いかけるためには, 最高到達点だけでなく, スライムの鉛直方向への変位を時間の関数として表すことが必要である. ただし中心側のスライムと外側のスライムでは法線方向の応力のかかり方が違うため巻き上がり方が違うことに注意しなければならない.

実験Bの考察において立てた運動方程式はスライムをニュートン流体として扱っているが, 本来は非ニュートン流体であるため速度に応じて粘度が変化する. そのため粘度が定数値を取らない. 回転速度を変え対照実験を行う, あるいは回転軸のトルク変化を測定, 応力の関数を導出することで粘度関数を求めることができると考えられる.

## 6. 参考文献

- 1) 田村幹雄・倉田道夫・小高忠男・山本三三, 1957, ワイセンベルク効果について, 6 巻, 43 号, 31-35p
- 2) 松本一真・堀内潔, 2010, 粘弾性法線応力差による乱流抵抗低減機構の解明, ながれ 29, 403-410p
- 3) 東京農工大学工学部, 2019.11.8, 高分子の性質を探索, ,

[https://www.miraikougaku.jp/laboratory/pages/191108\\_02.php](https://www.miraikougaku.jp/laboratory/pages/191108_02.php), 2024.1.3

4) 上田隆宣, 2015.7.30, 図解でわかるレオロジー測定の実務とデータの活かし方, 日刊工業新聞社

5) 上田隆宣, 2020.6.19, 測定から読み解くレオロジーの基礎知識, 日刊工業新聞社

6) 荒木修, 2023.3.30, レオロジーの基本, 日刊工業新聞社

7) 尾崎邦宏, 2011.3.28, レオロジーの世界, 森北出版株式会社

## 7. 謝辞

本研究の遂行にあたり京都府立嵯峨野高等学校・森本先生より本実験で使用したデジタル攪拌機をお借りしました。ここに深謝の意を表します。

## 8. 添付資料

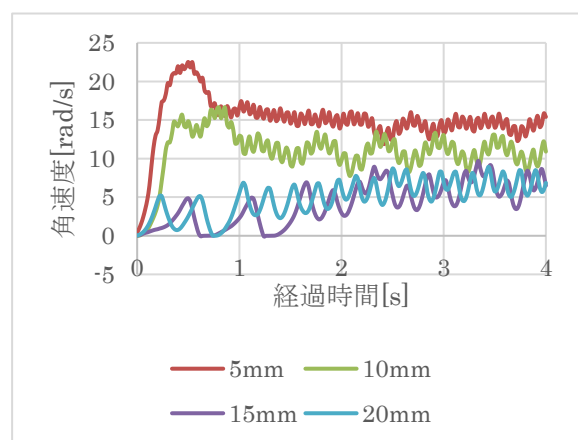


図 9. 実験 A 角速度の時間変化

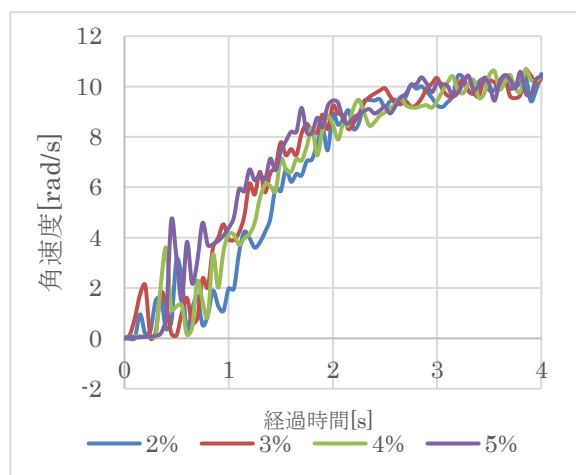


図 10. 実験 B 飽和ホウ砂水溶液添加量別における角速度の時間変化

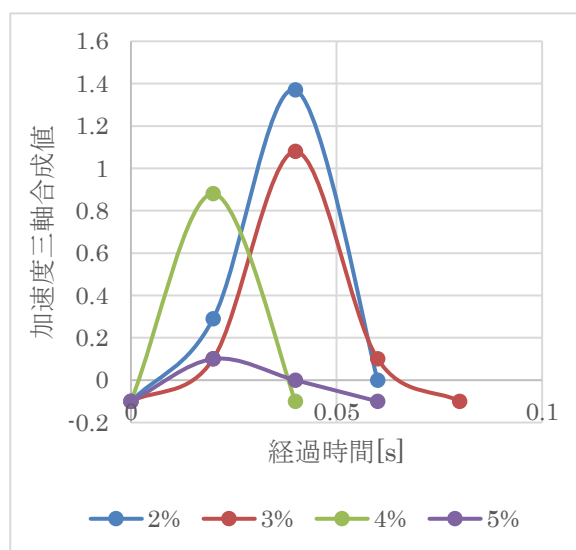


図 11. 球の加速度の三軸合成値の時間変化

# 叩く速さと手の大きさが拍手に与える影響

## ～模型を用いて拍手のメカニズムを解き明かす～

青木翔和 木村純平 辻拓真 前田駿輔

### 要旨

本研究では、手の大きさと手を叩く速さの二つの要因が拍手音の周波数、大きさの2点にもたらす影響を明らかにするため、簡易な構造の模型を用いて、容積等の条件を変化させたときに生じる音を測定した。私たちは、風船内の空気量が増加すると、圧力が大きくなることによって、より大きく、高い周波数の音が発生する。また、木箱の体積が増えると、圧力が大きくなりにくくなり、低周波数の音が見られる。一方、発生音の大きさは大きくなると考えた。そこで、15.0cm, 17.5cm, 20.0cm 四方の立方体の中に風船を入れて膨らませ、それぞれで膨らませる時の空気量を変化させ、割った時の音がどのように変化するかを調べた。その結果、空気量を多くすると音の周波数は下がり、音圧が大きくなった。このことから、手を大きく、より多くの空気を含んで拍手すると周波数が低く音圧が大きな音が鳴ると考えられる。

### 1. 研究目的

劇場や演奏会で観衆が出演者に送る拍手を注意深く聞くと、様々な高さの音が聞こえてくる。多様な音が聞こえる理由の一つとして、拍手はインパルス音だからだ<sup>1)</sup>というものがあるが、私たちはそれ以外にも原因があるのではないかと考えた。実際に、事前研究において、叩く人によって様々な拍手の音の周波数が現れることが明らかになった。同じ叩き方、速さで叩いた時、手が大きい人の拍手と小さい人の拍手は違う音の周波数を見せた。また、同じ大きさの手でも叩く速さによって、音の周波数が変化した。しかし、手で叩くのでは個人差が出てしまうので、模型を用いて拍手の傾向のうち叩く速さと手の大きさについて調査することにした。

拍手音が生じる原理は、瞬間的に両手が空気を圧縮することで両手の隙間から空気が音速を超えて漏れ出ることによって衝撃波が発生し、音が生じるものと報告されている<sup>2)</sup>。これをモデル化し、風船の中に空気を入れて圧力を大きくし、

針を刺して小さな隙間を作ることによって、音速を超える速度の空気が漏れ出て、音が発生する仕組みを考えた。そこで、本実験では、木箱の中に風船を入れて、拍手の音が出る状況を作り出した。木箱の大きさを手の大きさとみなした。拍手をするときの手の内部の形状は必ずしも立方体になるわけではないが、風船は膨らむ際に球状に膨らむため、木箱が壊れることがないように木箱を立方体で行った。また、手を早く叩くということは、圧力の変化が瞬間的に大きくなるので、風船内の空気量を手の叩く速さと仮定して、木箱の大きさと風船内の空気量を変えて研究を行った。加えて、この模型の妥当性を検証するため、実際に拍手を異なる大きさの手、異なる速さで拍手を行ったときの観測結果と模型を用いた実験結果との比較を行い、同様の傾向を示すかどうかを確認した。

### 2. 仮説

風船内の空気量が増加すると、圧力が大きくなる。圧力が大きくなることによって、より大

きく、高い周波数の音が発生すると考える。また、木箱の体積が増えると、圧力が大きくなりにくくなり、周波数が低くなる。一方、発生音の大きさは大きくなると考える。

### 3. 材料・研究方法

#### 3-1. 研究試料

風船、集音器、パソコン、それぞれ1辺が15.0cm、17.5cm、20.0cmの立方体の木箱、自転車用空気入れ、WaveSpectra Ver. 1.40、爪楊枝。

#### 3-2. 研究方法

##### 実験 1

まず、集音器を WaveSpectra Ver.1.40 という音の波長を測定するアプリを入れたパソコンに繋ぎ、2.0m 離れた位置に風船を入れた木箱を置いた(図 1)。

次に木箱内の風船に入れた空気量は、条件に応じて空気入れで最大ストローク分の空気を送り込むのを1回(200ml)として、その回数で調整した。そして、木箱の上面に開けた穴から爪楊枝で風船を割り生じた音を測定した。

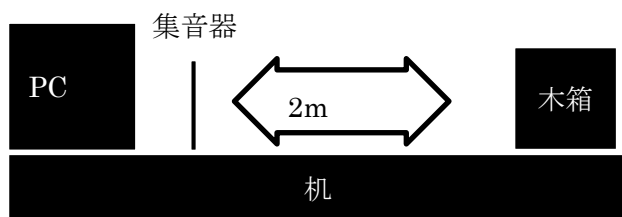


図 1. 実験図

この実験では、木箱の大きさと風船に入れる空気量をそれぞれ変化させ、模型から発せられる音のうち、音圧が最大となる時の音の大きさと高さの要素がどのように変化するかその傾向を調べた。また、データの取り方として、集音器を通じてアプリ内に出力された値の中から音圧が最も大きい値の周波数と大きさのデータをとった。今回の実験では、15.0cm の立方体の風船には 3.0L と 4.0L、17.5cm の立方体の風船には 5.0L と 6.0L と 7.0L、20.0cm の立方体の風船には 6.0L と

8.0L 分の空気を入れてそれぞれ 10 回ずつ風船を割った。

##### 実験 2

実験 1 と同様の場所に装置を置き、木箱の位置に手の大きさが異なる 2 人(手首から指の付け根までの長さが小:9.5cm 大:12.0cm)に異なる速さ(ゆっくり:45cm/s 速く:65cm/s)でそれぞれ 50 回ずつ拍手をしてもらい、発生した音を測定した。

### 4. 結果

#### 4-1. 実験 1 の結果

表 1. 実験結果

|   | 木箱の一边  | 空気を入れた体積 | 平均の周波数 (Hz) | 平均の音圧 (dB) |
|---|--------|----------|-------------|------------|
| ① | 15.0cm | 3.0L     | 345.61      | 63.04      |
| ② | 15.0cm | 4.0L     | 185.21      | 61.64      |
| ③ | 17.5cm | 5.0L     | 384.39      | 71.23      |
| ④ | 17.5cm | 6.0L     | 333.78      | 64.42      |
| ⑤ | 17.5cm | 7.0L     | 299.33      | 61.68      |
| ⑥ | 20.0cm | 6.0L     | 482.35      | 64.93      |
| ⑦ | 20.0cm | 8.0L     | 227.19      | 64.33      |

実験で出たデータから平均を取ってまとめた。

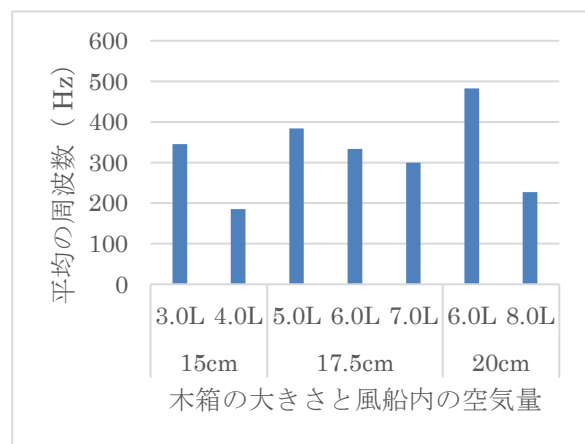


図 2. 平均の周波数と装置の大きさ

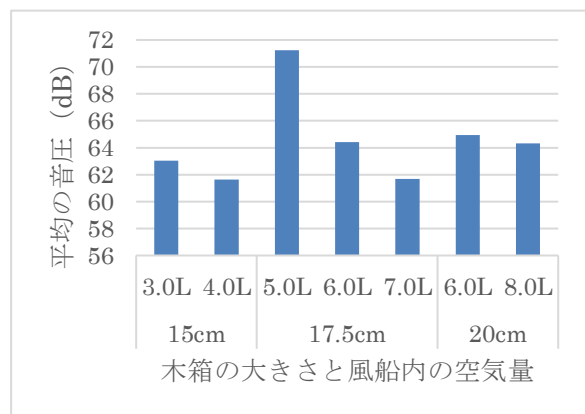


図 3. 平均の音圧と装置の大きさ

実験で取れたデータを平均して表 1 にまとめ、そこから図 2, 図 3 のグラフを出力した。

図 2 から、風船内に空気を多く入れると、周波数は小さくなる、すなわち音の高さは低くなった。図 3 から、風船内に空気を多く入れると音の大きさが小さくなったことが分かる。

また、図 2 の 17.5cm 6.0L と 20cm 6.0L のグラフを見ると、同じ空気量で木箱の大きさを変えた場合では周波数は大きくなる、すなわち音の高さは高くなった。図 3 からは木箱の大きさを変えたことと音の大きさとの関係は見られなかった。

## 4-2. 実験 2 の結果

表 2. 実験結果

|   | 大きさ        | 速さ            | 平均の周波数 (Hz) | 平均の音圧 (dB) |
|---|------------|---------------|-------------|------------|
| ① | 小 (9.5cm)  | ゆっくり (45cm/s) | 224.11      | 39.44      |
| ② | 小 (9.5cm)  | 速い (65cm/s)   | 752.17      | 52.15      |
| ③ | 大 (12.5cm) | ゆっくり (45cm/s) | 1997.31     | 40.08      |
| ④ | 大 (12.5cm) | 速い (65cm/s)   | 1584.56     | 53.27      |

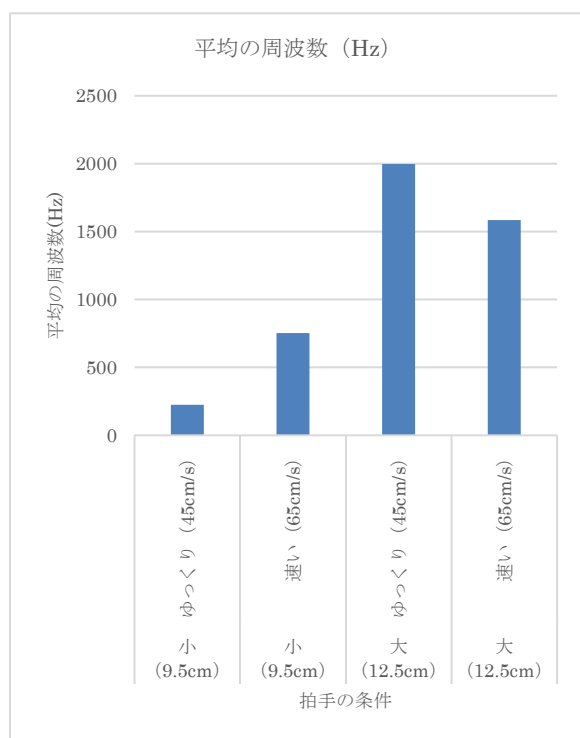


図 4 手の大きさ、叩く速さと音の高さ

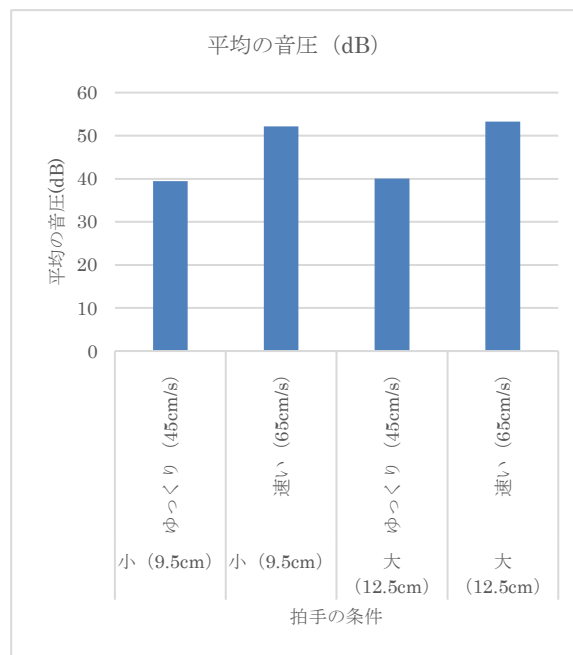


図 5 手の大きさ、叩く速さと音の大きさ

実験 2 の結果としては、音の大きさは速く手を叩いた時の方が大きくなった。手の大きさに関しては、手が大きい方が音の大きさは微量に大きくなったが、音の周波数については明確な関係性は見られなかった。

## 5. 考察

①と②、③と④と⑤、⑥と⑦より風船の体積一定で風船内の空気量が増えるにつれ、周波数は減少し、音圧も減少する事がわかった。このことから、風船内の圧力は、音の周波数と音圧に影響を与えることが明らかになり、風船内の圧力が高まると周波数は減少し、音圧も減少するという傾向があると考えられる。これは、音が空気の圧力変化によって生じ、発生時の空気の圧力が音質の変化に影響を与えることに起因していると考えられる。また、①と③と⑦より、木箱の体積だけを大きく(空気量だけを大きく)した時、③が周波数、音圧共に最も大きくなった。このことから、その時の空気圧に対しての空気量が少なくても、多くても音圧と周波数が小さくなる事がわかった。

①、②、③、④の手の大きさと速度の影響を調べた実験2において、手の大きさや速度が拍手の音に影響を与えることが確認された。①と②、③と

④を比較すると、共に、手を叩いた速さが速い場合の方が音圧が増加する傾向が見られた。その一方で、周波数は手の小さい人が行った①と②では大きくなったのに対し手の大きい人が行った③と④では周波数が小さくなった。これは、接触面積の大きさが関わってきてるのではないかと考える。①と③、②と④を比較すると手の大きさが大きくなると周波数は増加する事が明らかになり、音圧はわずかに増加することが明らかになった。これらのことから、手の大きさと拍手音には明らかな関係があると考えられる。一方で、叩く速さによる拍手音の測定では、叩く速さと拍手音の音圧には明確な関係があるが、周波数との関係は明言できないと考えられる。

木箱の測定結果と実際の拍手音の測定結果では同じ傾向が見られなかった。これは、手と手の接触音などが関係していると考えられる。また、堅い物質は透過音が強く出、柔らかい物質は反射音が強く出る<sup>3)</sup>ことから、板は堅く、透過音が強く出るのに対し、手は柔らかく、反射音が強く出るのもこのような結果が得られた原因の一つとして考えられる。

## 6. 今後の展望

今後の研究では、試行回数を増やし、より一層正確なデータを出していく。また、本実験では拍手時の手の大きさに近い形状の木箱を作成していたが、風船の膨らみ方の都合上立方体だけでは実験できなかったため、これからは木箱の形状を変えての測定も行っていきたい。

## 7. まとめ

本研究によって、木箱内の圧力と大きさによる生成音の変化に見られる傾向と手の叩く速さによる拍手音の周波数の傾向と大きさの傾向が明らかになった。一方で、手の大きさや形状による拍手音の傾向は明らかにならなかった。

## 8. 参考文献

- 1) 宇根健一郎・辻春樹・田口博史・栗山繁, 2016, 拍手音を用いた対話的イルミネーション演出. 情報処理学会研究報告書, 3 ページ
- 2) Neville H.Fletcher, 2013, SHOCK WAVES AND THE SOUND OF A HAND-CLAP—A SIMPLE MODEL. Acoustics Australia Vol. 41, No. 2, 165-168
- 3) 加来治郎, 第 2 回音響の基礎:音の発生と伝搬, [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000674398.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000674398.pdf), 2024.02.09

# 音波を用いた消火における最適な周波数と音圧の決定

古仲智貴 平岡義貴 松木亮賢 松田拓真

## 要旨

本研究では、音波による消火について、気柱共鳴を用いて消火を行う際に最適な周波数と音圧の決定に挑戦した。初めに予備実験において、スピーカーから直接音を出しても蝋燭の火に影響を与えるには音圧が足りないことを確認し、スピーカーからの音の音圧を増幅するために気柱共鳴を利用することとした。次に本実験の一つ目において、蝋燭に当たる音波の音圧を一定にした条件下で音波の周波数を変化させ、蝋燭の火への影響を観察する実験を行った。その際スピーカーの振動膜の振動による風が確認できたが、その影響を排除するために超音波風速計を用いて周波数ごとの風速を計測したところ、振動膜から発生する風速にほとんど差がないことを確認した。その後、音波の周波数を一定にして音圧を変化させ、蝋燭の火への影響を観察する実験を行った。その結果、消火に最適な音波の周波数は決定できなかったが、音圧と火への影響の間には正の相関関係があると結論づけた。

## 1. はじめに

音波が火炎に対して影響を及ぼす事実は古くから知られており、音波が燃焼にもたらす効果としては、疎密波である音波による空気の振動によって燃焼場に影響を与えると考えられている。また、先行研究では音波を用いた消火を考える際に、火炎に対して影響を与える指標として主に音圧と音の周波数などが考えられている。例としてアメリカ国防高等研究計画局 (DARPA) によれば、最も効果的な周波数は 35～150Hz、音圧は 80～150 dB と報告されている<sup>1)</sup>。私たちは、この音圧と周波数という二つの指標について、最も火の消火に適する値を求めることを目的とした。初めに、予備実験で 図 1 のようにスピーカー (ARIA Guitar Amplifier AG-10X) から一本の蝋燭に向かって、スマートフォンアプリの周波数ジェネレーターを用いて音波を発生させた。振動数と音圧の一方を固定して、他方を変化させて蝋燭の炎の変化を観察した。実験を行う際に、外部からの風の影響をできる限り避けるため、図 1 のように蝋燭の周りをプラスチックの板で囲んで実験を行った。

その結果、低周波の音のほうが蝋燭の火に大きな動きが見られたが差はわずかであった。また、スピーカーの音量を上げても蝋燭の火はほとんど動かなかった。これは、スピーカーから発生する音波の音圧が蝋燭の火に影響を与えるには不十分だからであると考えた。したがって、本実験では開管の気柱共鳴を利用し、スピーカーからの音量を増幅させることで、音波による空気の周波数や音圧別の消火性能の評価がより容易にできると考え実験を行った。

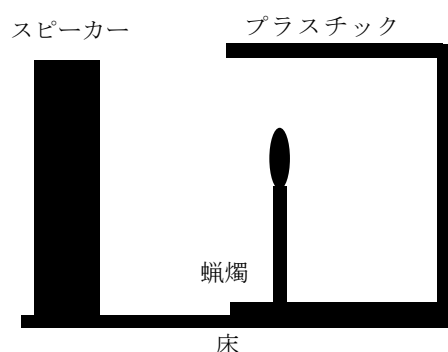


図 1 予備実験における模式図

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 実験① 消火に最適な周波数の決定

本実験では実験を三段階に分けて行った．以後は音波による火への消火性能を音波照射時の火のゆらめき  $\Delta l$  [mm] で評価する．初めに，周波数ごとの火への影響を見るために，図 2 のように実験装置を作成した．塩ビ管 (シンエツ塩ビパイプ VU40) の長さ  $L$  を発生した音波の周波数で開管共鳴するように設定し，固定した上で塩ビ管の蝋燭側で騒音計 (HY-1361) を使用して音圧を測定し，その値が一定 (90dB) になるようにした．使用する周波数としては，予備実験で火への影響が比較的大きかった低周波の 10～100Hz の音を 100Hz から 10Hz ずつ下げて発生させ，蝋燭の火の様子を観察した．この際音速  $V$  は

$V = 331.5 + 0.6t$  [m/s] ( $t$ : 摂氏気温 [°C]) - (1)  
で求められ，塩ビ管の長さ  $L$  は

$L = \frac{V}{2f} - 2l_K$  [m] ( $f$ : 周波数 [Hz],  $l_K$  開口端補正 [mm]) - (2)  
で求められる．

ここで開口端補正について，先行研究で管の半径の約 0.6 倍になることが報告されている<sup>2)</sup>．よって，使用した塩ビ管の半径  $r = 25$  mm を用いて

$$l_K = 25 \times 0.6 = 15 \text{ [mm]}$$

として求めた開口端補正を考慮した上で  $L$  の値を求めた．蝋燭の火の変化は図 3 のように蝋燭の火の先端座標を  $Z_T$ ，蝋燭の上側中央を  $Z_C$  として，地点  $Z_C$  にメジャーの 0 目盛がくるようにメジャーを置き，地点  $Z_C$  と  $Z_T$  間の距離を火のゆらめき  $\Delta l$  [mm] として (3) のように設定してその値を測定した．

$$\Delta l \text{ [mm]} = Z_T - Z_C \quad \text{--- (3)}$$

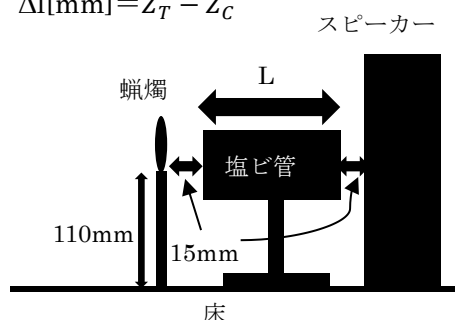


図 2. 実験装置の模式図

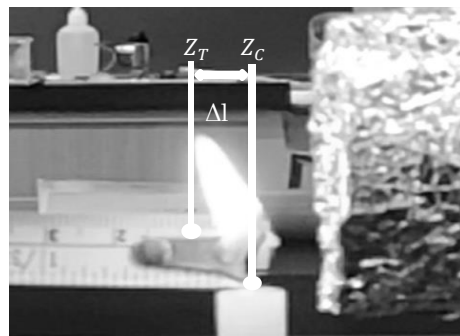


図 3.  $\Delta l$  について

### 2-2. 実験② スピーカーの振動膜によって発生する風の蝋燭の火に対する影響

実験①を行っている際に，スピーカーの振動膜から風が発生していることが確認され，音波そのものの以外で蝋燭の火に影響を与えるものとして，その影響を測定しなければ音波による火への影響を正確に評価できないと考えられた．よって実験①で蝋燭の火に与える影響が最も大きかった 80Hz で開管共鳴するように  $L$  の長さを (1)(2) の式を使って設定して，その長さに固定したまま 10Hz から 100Hz までの音を 10Hz ごとに発生させ，(3) の値を実験①と同じように測定した．

また，スピーカーから 3cm 離れた場所に図 4 のように超音波風速計 ULSABASIC を設置して，音圧一定 (90dB) で蝋燭の火の様子を観察した時と同様に，100Hz～10Hz の音を出し，スピーカーの振動膜から発生する風の風速を測定した．

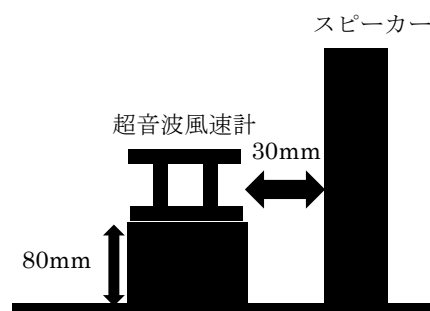


図 4. 実験装置の模式図

### 2-3. 実験③ 消火に最適な音圧の決定

実験①で使用した図 2 の実験装置を用いて，実験①で最も大きい  $\Delta l$  の値を示した 80Hz が蝋燭の火の様子の変化を見やすいと考え，80Hz に

固定して、音圧を変化させながら音を発生させ、(3)の式の値を測定した。塩ビ管の長さは(1)(2)の式を使って 80Hz で開管共鳴するように設定した。音圧は使用しているスピーカー (ARIA Guitar Amplifier AG-10X) の最大音量の時の音圧である95dB から蠟燭の火の様子に変化が見られなくなるまで変化させた。

### 3. 結果

#### 3-1. 実験①の結果

図5に音波の周波数に対する $\Delta l$ の値を示す。この図より、50Hz以下の周波数では $\Delta l$ の値が全く測定できなかったことがわかる。また、周波数を80Hzにしたときに最も $\Delta l$ の値が大きくなったことがわかる。50Hzと40Hzを共鳴させた際に $\Delta l$ の値が全く観測できなかったため、また、40Hz未満の周波数ではLの値が大きくなりすぎて実験を行うことが難しかったので、40Hz未満の周波数については実験を打ち切った。

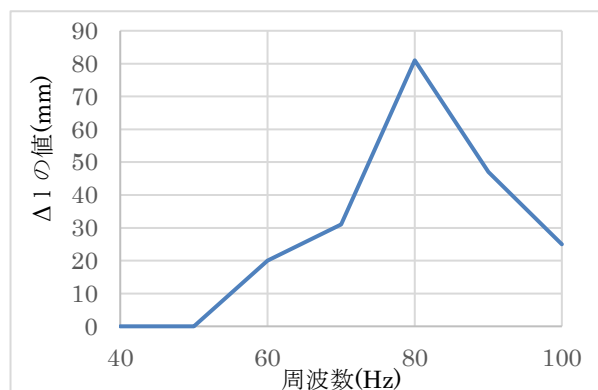


図 5. 音波の周波数に対する $\Delta l$ の値

#### 3-2. 実験②の結果

図6に結果をまとめた。ここでの風速とは、超音波風速計 ULSABASIC で、一秒間にサンプリングできる最大数の50個のサンプリングをとり、その平均を小数第三位で四捨五入したものである。図6より、80Hzの音波を発生させた際には $\Delta l$ の値が一定の値を示した。しかしそれ以外の周波数の音波を発生させた際は、 $\Delta l$ の値が全く測定でき

なかった。また、80Hzの音波でも、それ以外の使用した周波数の音波でも、発生させたときのスピーカーの振動膜によって発生する風の風速はほとんど変わらないことがわかる。

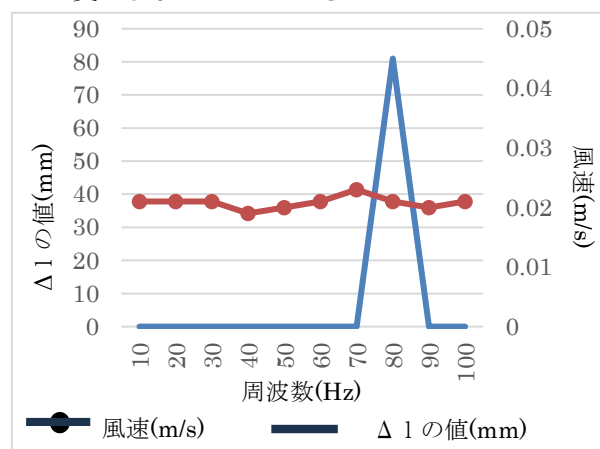


図 6. 実験②結果まとめ

#### 3-3. 実験③の結果

図7に音波の音圧に対する $\Delta l$ の値を示す。ここでの音圧の値とは塩ビ管の蠟燭側に騒音計 (HY-1361)を設置して測定したものである。この図から音波の音圧が85dB以下の時は $\Delta l$ の値は小さく、音圧によってほとんど $\Delta l$ の値が変化しなかったことがわかる。それに対して音波の音圧が85dB以上になると $\Delta l$ の値は大きく、音圧が上昇すると $\Delta l$ の値は急激に上昇したことがわかる。またグラフ全体で相関係数を求めたところ0.92となり、音圧と火への影響には強い正の相関関係があることがわかった。

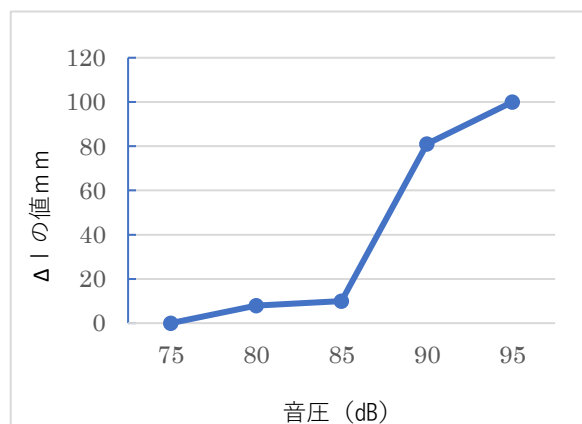


図 7. 音波の音圧に対する $\Delta l$ の値

#### 4. 考察

初めに3-1の結果から、火に影響を与えやすい周波数帯は 60~100Hz であり、その中で 80Hz 付近の周波数帯が、最も火に影響を与えやすいと言える。周波数ごとの消火性能に違いが発生した原因は、音波の周波数と蝋燭の固有振動数との関係によって起こりうるものであり、蝋燭の固有振動数に 80Hz の値が近かったため火が影響を受けやすかったことが一つの可能性として考えられる。しかし、この実験はあくまで、90dB という一つの条件下で行ったものであり、この実験だけでは正確な結論は得られない。よって今回の実験において最も消火性能が高い周波数は 80Hz であるが、一定にする音圧の値を変更する、燃焼物を蝋燭からアルコールランプなどに変更する等、再度実験をしなければ正確な結論を得られないと結論付けた。

次に 3-2 の結果から、80Hz の音を発生させ開管共鳴させたときは、蝋燭の火が動いたのに対し、それ以外の周波数の音を出しただけでは、蝋燭の火に影響がなかったことから、他の周波数では共鳴せず音波が増幅していないことがわかる。また、その際スピーカーの振動膜から発生する風の風速の値はほとんど変わらない。よって、このことから本実験ではスピーカーの振動膜によって引き起こされる風が蝋燭の火に与える影響は、無視できるほどに小さいと考えられる。

最後に、3-3 の結果より、音波の音圧と $\Delta l$ の値には正の相関関係がみられる。また、他の先行研究より、音の強さは音圧の二乗に比例するという関係が知られている<sup>5)</sup>。よって、音波の音圧が上昇すれば、より火に影響を与えやすい、つまり、火を消火しやすいことが考えられる。また音圧が 85dB から 90dB に上昇する際に $\Delta l$ の値が大きく変化している。この現象については、音波が火に影響を与えるために必要な最低限の音波の持つエネルギーの閾値が存在し、音圧が 90dB の時に音波の持つエネルギーがその値を超えたため、蝋燭の火が大きく動かされ、 $\Delta l$ の値が大きくなっ

たとえることができる。

よって、音波の音圧と火の影響は強い正の相関関係があることがわかった。しかし、音波の周波数による火への影響については結論を得るためには実験が不十分であると考えられる。

#### 5. まとめと今後の課題

この実験から、消火に最適な周波数は結論を得られず、音波の音圧と火への影響には正の相関関係があることがわかった。

このように音が火に影響を与えやすい条件がわかることで、音波消火器の実用化に役立ち、火災現場などで使用されるハロンのような消火用の薬剤や水を使う従来の方法と比べて、建造物に与える被害を抑えられることが期待できる。

今後の課題としては、様々な音圧の値に条件を設定する、燃焼物を蝋燭からアルコールランプなどに変更することなど、照射させる音波および燃焼物の条件を変えて再び実験を行い、再度考察を行う必要がある。また、対象の火を大きくするなどさらにスケールを変化させ同様の実験を行うと、より音波と火の関係性についての解明が進展すると考えられる。

#### 6. 参考文献

- (1) DARPA-13-F1078, Instant Flame Suppression, Phase II Final Report(2013)
- (2) Harold Levine・Julian Schwinger, 1947 , On the Radiation of Sound from an Unflanged Circular Pipe
- (3) 山崎貴史・松岡常吉・横山博史・中村裕二 , 2020 , スピーカーによる音場が拡散火炎に与える影響に関する実験的研究 , 日本機械学会論文集 , 86 , 889 .
- (4) Alan Arulandom Alexander, 2015, Study of Sound Wave as a Flame Extinguisher.
- (5) 合格ロケット 2023 - 08. 音響  
<https://5569et.com/inputs/01-08onkyou/>

# どっちのオークション方法がお得！？

## ～ ゲーム理論を用いた、オークション方法の比較 ～

福田詩奈

### 要旨

2つのオークション方法を2つの視点(耐戦略性、リスク回避性向)から、買い手にとってどちらが得かについて分析した。収入同値定理は一定の仮定の下で成立する。その仮定を崩した時に買い手の出費(売り手の期待収入)は変動するかを考える。研究方法としては、方法ごとの耐戦略性の有無とリスク回避性向が存在する時の変化を評価するために、具体値を入れた利得表を使用した。また、現実例としてGoogle 広告オークションと電波オークションを提示した。研究材料には、似通った条件下での比較を目指して、1st プライスオークションと2nd プライスオークションを用いた。

### 1. はじめに

世の中には様々なオークション方法が用いられ、それは、魚の競、芸術品取引、Yahoo!オークション等、多岐にわたる。オークションは、財の売り手が財の買い手の情報を完全には知らないという現実的状況のもとで、売り手が財を最も欲しがる者に最も高い価格で売却したり、買い手の入札行動から彼らの情報を抽出したりするために、極めて有用な方法と考えられている。<sup>1)</sup>

では実際にどの方法が買い手にとってお得に取引できる方法なのだろうか。

オークションの理論は、1996年に収入同値定理を定めたノーベル賞を受賞したヴィックリーによる研究から発展した。収入同値定理とは、買い手の評価額が同一の分布から引き出され、入札者それぞれが他の人の入札額が分からないという状態で行われるオークションにおいて、結果的に売り手側が得られる収入は変わらないというものだ。つまり、1st プライスオークションでも2nd プライスオークションでも、買い手の出費(売り手の期待収入)は変わらないと示した定理である。これによると方法によって買い手の出費も変わらないとすることができる。

しかし、現実では状況によって方法が複数存在する。これは、収入同値定理には厳しい仮定が存在するので、現実では状況によってその仮定が崩れ、方法によって利点欠点が生じているのではないかと考えた。

上記の仮説を検証するため、2つの視点からオークション方法を比較した。

### 2. 材料・研究方法

#### 2-1. 研究材料

今回は出来る限り似通った条件下で比較を行ったため、「封印入札方式である」という共通点を持つ1st プライスオークションと2nd プライスオークションを用いた。現実における例としてはGoogle 広告オークションと電波オークションを挙げた。

#### 2-2. 研究方法

比較の方法としては、耐戦略性とリスク回避性向の2点から、利得表を用いて行った。

耐戦略性とは、相手の戦略を考えず自分の最善の選択をできる状況、つまり嘘をつく理由がない状況のことを指す。嘘をつく状況とは「第1希

望ではなく、あえて第 2 希望を言う」といった状況である。

そのため、耐戦略性があると、買い手は自分が入札したい金額を正直に申告することが 1 番“得”となるので、自分の出したい以上の金額を出す必要が無くなり、“得なオークション”と言える。今回は、参加者全員の、物に対する評価値を 100 円とし、評価値と実際の落札額との差を利得として算出した。

リスク回避性向は、収入同値定理の「オークション参加者はリスク中立的である」という仮定を崩した状況として用いた。ここでの“リスク”は“落札ができない可能性”を意味し、リスク回避性向は“落札できない事態を避ける性格”を意味する。

### 3. 結果

#### 3-1. 耐戦略性

利得表(表 1, 表 2)では他の入札者(入札価格が 80 円, 70 円, 65 円, 50 円の 4 人)がいた時に、入札者 A の入札額を変えた時の利得を示した。表内では(A の利得, 他の入札者の利得)としている。オークションに負けると利得は 0 である。

表 1 より, 1st プライスオークションだと, 入札額を低く変更して 100 円→90 円にした場合が利得が大きくなっていることから, 戦略を持って入札額を変更したほうが利得が増している。

対して, 表 2 より, 2nd プライスオークションでは, 買い手 A は自分の入札額が 100 円→90 円と変わろうと, 勝てば支払う金額が 80 円であることには変わりがないため, 利得は一定である。

逆に入札金額を下げすぎるとオークションに負けてしまうため, 利得は 0 となる。

表 1. 1st プライスオークションにおける利得表

| 入札額   |      | 他の入札者   |         |         |         |
|-------|------|---------|---------|---------|---------|
|       |      | B(80円)  | C(70円)  | D(65円)  | E(50円)  |
| 入札者 A | 100円 | (0, 0)  | (0, 0)  | (0, 0)  | (0, 0)  |
|       | 90円  | (10, 0) | (10, 0) | (10, 0) | (10, 0) |
|       | 81円  | (19, 0) | (19, 0) | (19, 0) | (19, 0) |
|       | 77円  | (0, 20) | (0, 0)  | (0, 0)  | (0, 0)  |

表 2. 2nd プライスオークションにおける利得表

| 入札額   |      | 他の入札者   |         |         |         |
|-------|------|---------|---------|---------|---------|
|       |      | B(80円)  | C(70円)  | D(65円)  | E(50円)  |
| 入札者 A | 100円 | (20, 0) | (20, 0) | (20, 0) | (20, 0) |
|       | 90円  | (20, 0) | (20, 0) | (20, 0) | (20, 0) |
|       | 81円  | (20, 0) | (20, 0) | (20, 0) | (20, 0) |
|       | 77円  | (0, 23) | (0, 0)  | (0, 0)  | (0, 0)  |

#### 3-2. リスク回避性向

1st プライスオークションでは, より高い価格を入札して, 支払う価格が高くなったとしても落札できる確率を高めようとする。

対して 2nd プライスオークションだと, 耐戦略性の時と同様で, 入札金額に関わらず, 買い手は自分が思う評価金額を正直に申告することが 1 番良いため, 無駄に高くする必要がない。

#### 3-3. Google 広告の例

Google 広告は, 2019 年 3 月に従来使われていた 2nd プライスオークションから 1st プライスオークションへと方式を移行した。その理由としては, 2019 年 3 月に出された声明<sup>2)</sup>で, 『1st プライスオークションに切り替えることで, 複雑さを軽減し,

公平で透明性の高い市場を作ることができる。』と述べられている。

### 3-4. 電波オークションの例

人口 1 人当たり/1MHz 当たり単価が高い<sup>3)</sup> 米, 英, 独で使われている方式としては, 英国の LTE 等オークションを除いて, 表 3 のように 1st プライスオークションであった。<sup>4)</sup>

## 4. 考察

3-1 より, 1st プライスオークションでは買い手 A は自分の評価値を正直に出す方が損になるため, 耐戦略性は存在しないという事が分かる。対して 2nd プライスオークションでは利得が一定であるため, 耐戦略性があると言える。

3-2 より, 落札できない事態を回避するため金額を上げていく 1st プライスオークションと, 自分の評価値を出す 2nd プライスオークションの比較となるので, 買い手が出す金額は 1st プライスオークションの方が 2nd プライスオークションの時より高くなる。

以上の検証から, 買い手にとって, 2nd プライスオークションの方が得と言える。このことから, 「収入同値定理には厳しい仮定が存在するので, 現実では状況によってその仮定が崩れ, 方法によって利点欠点が生じているのではないか」という仮説を確かめることができ, 当初の目的は達成された。

しかし, 3-3, 3-4 より, 現実では理論的に優秀な 2nd プライスオークションよりも, 1st プライスオークションの方が用いられている。

これは, Google の声明からも明らかのように, 価格の不透明さが影響していると考えられる。2nd プライスオークションでは, 自分の入札価格ではない 2 番目の金額を支払うことになり, 他者の入札金額は分からないため, オークション主催者が落札金額を不正に釣り上げたとしても気付けない。そのため, 信用関係が十分に築かれていない場合, オークションが滞る可能性があると考えられ

る。

また, 他の原因として, 参加者の理解と戦略の複雑さ, 一般的な使用例の不足があると考ええる。前者については, 2nd プライスオークションは, 最終的な支払額が自身の入札よりも低いという特性を持っている。この複雑さが, 参加者がオークションを理解し適切な戦略を展開するのを難しくしていると考えられる。後者については, 1st プライスオークションの方が広く一般的に使用されており, Google のような大企業も方式を 2nd プライスオークションから 1st プライスオークションへ移行したことも相まって, 1st プライスオークションの利用が定着していることが考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

以上より, 収入同値定理の仮定を崩すと方法ごとに利点欠点が生まれることが分かり, 得なのは 2nd プライスオークションであると言える。また, 方式の理解が進み, 価格の不透明さが解消されれば, 2nd プライスオークションの欠点が回避でき普及が進むと考える。

今後は, 私的価値や予算制約が落札額に及ぼす影響を調べることと, 2nd プライスオークションの欠点を回避するにはどのような仕組みがあれば良いかについて研究を深めていきたい。

## 6. 参考文献

- 1) 上田晃三, 2010, オークションの理論と実際: 金融市場への応用. 金融研究, 29, 1, 47-90
- 2) Google Ad Manager, 2019, 3. 6, Simplifying programmatic: first price auctions for Google Ad Manager, <https://blog.google/products/admanager/simplifying-programmatic-first-price-auctions-google-ad-manager/>, 2024. 1. 6
- 3) 鬼木甫, 2010. 11.15, 海外における電波オークション落札価格と日本における落札価格の推定, <https://www.osaka-gu.ac.jp/php/fumihom/Kenkyu/Kyodo/oniki/>

noframe/download3/201011a-ppt.pdf, 2024.

1. 6

4)周波数オークションに関する懇談会事務局,

2011. 7. 8, 諸外国のオークション制度,

[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000121936.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000121936.pdf) , 2024. 1. 6

5)GMO INTERNET GROUP, 2021. 7. 8, エンジニアにこそ知ってほしい経済学～オークション理論基礎編～,

[https://recruit.gmo.jp/engineer/jisedai/blog/auuction\\_theory\\_basic/](https://recruit.gmo.jp/engineer/jisedai/blog/auuction_theory_basic/) , 2024. 1. 6

6)福田恵美子, 2015, オークションのデザイン.

オペレーションズ・リサーチ, 60, 6, 330-336

7)東京大学エコノミックコンサルティング株式会社, 2022. 12. 22, 経済学から見た循環型流通第1回「セカンドプライスオークション」,

[https://www.aucnet.co.jp/aucnet-research/report/20221222\\_01/](https://www.aucnet.co.jp/aucnet-research/report/20221222_01/) , 2024. 1. 6

8)篠原拓也, 2023. 1. 17, どんな方式でも落札額は同じ！？ーオークション理論「収入同値定理」の考え方, [https://www.nli-](https://www.nli-research.co.jp/report/detail/id=73609?site=nli)

[research.co.jp/report/detail/id=73609?site=nli](https://www.nli-research.co.jp/report/detail/id=73609?site=nli) , 2024. 1. 6

## 7. 添付資料

表 3. 米, 英, 独で使われている方式

## 入札方法、入札状況の公表方法等

- オークション方式は同時複数ラウンド方式（SMRA）を採用しているオークションが多数
- 価格の決定方法は英国のLTE等を除いてファーストプライス方式
- 各ラウンドにおいて最高入札者と最高金額を公表しているオークションが多数

| 国名 | オークション名            | オークション方式 | 価格の決定方法  | 各ラウンドにおける入札状況の公表方法 |               |
|----|--------------------|----------|----------|--------------------|---------------|
| 米  | PCSオークション（A+Bブロック） | 同時型      | 複数ラウンド方式 | ファーストプライス方式        | 最高入札者と最高金額を公表 |
|    | PCSオークション（Cブロック）   | 同時型      | 複数ラウンド方式 | ファーストプライス方式        | 最高入札者と最高金額を公表 |
|    | 700MHz帯オークション      | 同時型      | 複数ラウンド方式 | ファーストプライス方式        | 最高入札額を公表      |
| 英  | 3Gオークション           | 同時型      | 複数ラウンド方式 | ファーストプライス方式        | 最高入札者と最高金額を公表 |
|    | LTE等オークション         | 同時型      | 複数ラウンド方式 | セカンドプライス方式         | 最高入札者と最高金額を公表 |
| 独  | 3Gオークション           | 同時型      | 複数ラウンド方式 | ファーストプライス方式        | 最高入札者と最高金額を公表 |
|    | LTEオークション          | 同時型      | 複数ラウンド方式 | ファーストプライス方式        | 最高入札者と最高金額を公表 |

### 複数ブロックの入札方法

**同時型**  
全てのブロック（周波数帯、エリア等）を同時にオークションにかける方式

**逐次型**  
一つ一つのブロックを逐次オークションにかける方式

### 回数

**単一ラウンド方式**  
1回のラウンドで入札が終了する方式

**複数ラウンド方式**  
オークションを時間的区間を挟んだ複数のラウンドに分け、各ラウンド毎に入札を行う方式

### 価格の決定方法

**ファーストプライス方式**  
落札者の支払金額について、落札者が付けた金額を支払う方式

**セカンドプライス方式**  
落札者の支払金額について、次点の入札者が付けた入札額を支払う方式

# サッカーにおける得点率を上げる方法の考察

## ～Jリーグの試合記録のデータ化～

桑原紫櫻，花田壮太，三浦圭以

### 要旨

近年，Jリーグではカウンターサッカー(敵の攻撃中にボールを奪うことで守りが薄い状況で攻撃できるという特徴を持つサッカーのプレースタイル)が主流となっている．そこで私達はサッカーの試合での得点率やプレーを元にカウンターサッカーの妥当性を調査することにした．まず得点率について調べるためにJリーグ公式から公開されているデータを用いて考察を行った．予備実験として試合中の各プレーの試合ごとの平均値とゴール数との相関係数を調べ，その値からゴール数を増やすことにつながっていると考えられるプレーを抽出した．私達はそのうちの一つであるペナルティエリアへ侵入してからゴールへ繋げることにについてより深く考察を行った．その後Jリーグ公式 Youtube チャンネル<sup>1)</sup>で公開されているゴールシーンからボールがペナルティエリアに入った段階での敵チーム・味方チームの人数やシュート位置などを記録し，研究を進めた．

### 1. はじめに

一般にサッカーにおけるデータ分析で多くとられる手法は選手の動きをトラッキングするというものである．<sup>2)</sup>しかし私達高校生の技術では難易度が高いと感じたため，データの数値そのものからの考察をすることにした．

予備実験としてインターネットサイト Football Lab<sup>3)</sup>に公開されているJ1(2022~2018)の5シーズンとJ2(2022~2021)の2シーズン延べ7シーズンに関するチームごとのスタッツについて調査した．調査したプレーのスタッツはシュート/枠内シュート/パス/クロス/コーナーキック/スローイン/ドリブル/タックル/インターセプト/オフサイド/30m ライン侵入回数/ペナルティエリア(以降 PA と呼ぶ)侵入回数/攻撃回数/ボール保持率の14種類である．それぞれの年度において各チームにおいてゴール数とそれぞれのプレーのスタッツを調査し，全チーム(J1では18チーム、J2では22チーム)のそれぞれのプレーごとの相関係数を計算した．(表1)

数値を見ると，シュート/枠内シュート/30m ライン侵入回数/PA 侵入回数の4つのプレーでは7シーズン中5シーズン以上でゴール数との強い正の相関が見られた．また，パス/ボール保持率の2つのプレーでは6シーズン以上で正の相関が見られた．スローインではJ2では2シーズンとも非常に弱い負の相関であるのに対し，J1では5シーズン中2シーズンでは非常に弱い正の相関，1年度では非常に弱い負の相関とばらつきが生じた．

これらの数値結果から私達は得点率を上げるためには「30m ラインに侵入する回数を増やすこと」と「PA に侵入して，ゴールに繋げること」という2点が必要なのではないかと考えた．前者の方に関してはサッカーの競技場に30m ラインが明確に線として示されていないため記録を取ることが難しく定量的にならないと判断した．その為，私達は後者の方に関してデータの解析および考察を行うことにした．

表 1. 得点数と各プレーの相関係数

J1 (2022~2018 の 5 年間) と J2 (2022~2021 の 2 年間) 計 7 シーズン分、各チームごとのデータから計算した得点数と各プレーの相関係数(小数点第 4 位を四捨五入)

| プレー<br>種類   | J1<br>'18                             | J1<br>'19 | J1<br>'20 | J1<br>'21 | J1<br>'22 |
|-------------|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| シュート        | 0.40                                  | 0.66      | 0.88      | 0.76      | 0.75      |
| 枠内<br>シュート  | 0.68                                  | 0.82      | 0.92      | 0.91      | 0.91      |
| パス          | 0.61                                  | 0.61      | 0.55      | 0.64      | 0.79      |
| クロス         | 0.00                                  | 0.32      | 0.37      | 0.52      | 0.23      |
| コーナー<br>キック | 0.06                                  | 0.61      | 0.79      | 0.61      | 0.42      |
| スローイン       | -0.37                                 | -0.17     | 0.37      | 0.31      | 0.26      |
| ドリブル        | 0.21                                  | 0.42      | 0.32      | 0.28      | 0.13      |
| タックル        | -0.09                                 | -0.03     | 0.53      | 0.13      | -0.19     |
| インター<br>セプト | 0.27                                  | 0.16      | 0.27      | -0.22     | 0.05      |
| オフサイド       | 0.13                                  | 0.45      | 0.42      | 0.42      | 0.21      |
| 30m 侵入      | 0.56                                  | 0.78      | 0.75      | 0.81      | 0.86      |
| PA 侵入       | 0.57                                  | 0.75      | 0.86      | 0.85      | 0.84      |
| 攻撃回数        | -0.24                                 | 0.19      | 0.39      | 0.61      | 0.28      |
| 保持率         | 0.52                                  | 0.65      | 0.47      | 0.58      | 0.77      |
| プレー<br>種類   | J2 の 2018~2020<br>の 3 シーズン分は<br>データ無し |           |           | J2<br>'21 | J2<br>'22 |
| シュート        |                                       |           |           | 0.73      | 0.76      |
| 枠内<br>シュート  |                                       |           |           | 0.89      | 0.80      |
| パス          |                                       |           |           | 0.66      | 0.74      |
| クロス         |                                       |           |           | 0.38      | 0.11      |
| コーナー<br>キック |                                       |           |           | 0.69      | 0.11      |
| スローイン       |                                       |           |           | -0.35     | -0.45     |
| ドリブル        |                                       |           |           | 0.50      | 0.21      |
| タックル        |                                       |           |           | 0.18      | 0.02      |
| インター<br>セプト |                                       |           |           | 0.18      | 0.10      |

|        |  |       |       |
|--------|--|-------|-------|
| オフサイド  |  | 0.35  | 0.03  |
| 30m 侵入 |  | 0.77  | 0.62  |
| PA 侵入  |  | 0.88  | 0.71  |
| 攻撃回数   |  | -0.02 | -0.11 |
| 保持率    |  | 0.61  | 0.71  |

## 2. 研究方法

J リーグの公式 YouTube チャンネルに掲載されている、J1 の 2021 シーズンの全ゴール集、2022 シーズンの各節ごとのゴール集を視聴した。各々のゴールについて、ボールが PA に侵入してから、PA 内でのボールと選手の動き/得点したシュート位置/PA への侵入方法(PA 内からのシュートの場合)/ボールが PA に入った瞬間の、PA 内の味方と相手のポジション /クロスを上げた位置(クロスがゴールに関与した場合)について記録した。

## 3. 結果

全 502 ゴール中 130 ゴールがクロスが関与するゴール、68 ゴールがコーナーキックが関与するゴール、51 ゴールが PA 外の位置から決まったゴール、21 ゴールが PK(ペナルティキック)からのゴール、17 ゴールがフリーキックからのゴールであった。PK/間接フリーキック/直接フリーキック(ファールが起きた地点から直接ゴールを狙うことができるもの)については、今回の研究にそぐわないため除いて 464 ゴールについて調べた。以下の図1はゴールを決めたシュートの位置の分布図である。

また、ボールが PA に入った時の PA 内の敵/味方の人数は以下のグラフ(図 2)に示した。(コーナーキックの状況は守備人数が多くなってしまうため除外した。)攻撃側の人数の最頻値は 2 人と 3 人の場合で、守備側の人数の最頻値は 5 人であった。

また、クロスを上げた位置の分布を図 4 に示し

た。

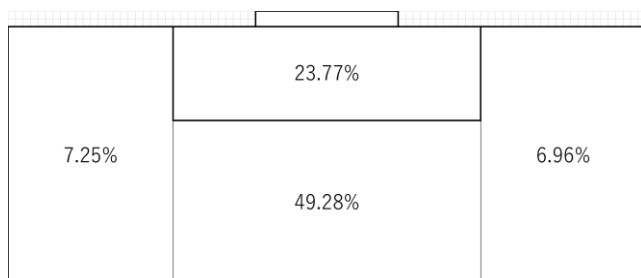


図 1. PA 内のシュート位置の割合

PA 内の位置を 4 つに区切りそれぞれで 464 ゴール中どれくらいの割合でそこでシュートされているかを数値化した。PA 外は 12.75%であった。

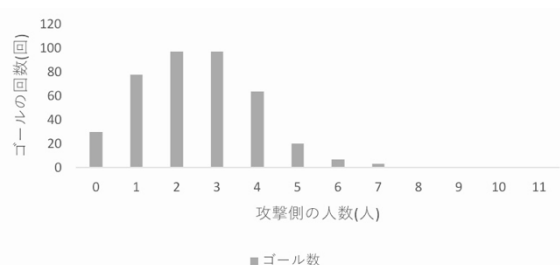


図 2. PA 内の攻撃側人数別のゴール数

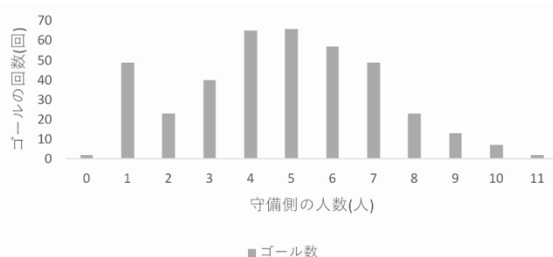


図 3. PA 内の守備側人数別のゴール数

それぞれのゴールの時の人数を調査し、どの人数が多いかを示したグラフ。コーナーキックを除いたためこれらのグラフは計 396 ゴールである。

#### 4. 考察

クロスからのゴールの割合が大きいのにゴールとの相関係数が小さいのは、ゴールに繋がらないクロスが多いからである。つまりクロスがゴールに繋がる可能性が低い、それ以上にクロスを上げる意味がある、あるいはクロスを上げざるを得ない状況が多いと考えた。

また結果からゴールに対して正面から打つシュートが入りやすいと考えられる。ゴールエリアから

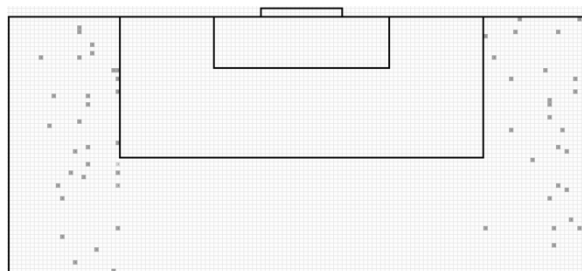


図 4. クロスを上げた位置の分布

ペナルティエリアの横のラインとタッチラインの間からペナルティエリアへ打ったパスをクロスと定義して、計 130 ゴールの上げた位置を記録すると上図のようになった。

のゴールが少ないのは、キーパーが比較的ゴールから離れた位置を守備範囲にしているからだと考えられる。

近年、ゴールキーパーはゴールを守るだけでなく、ゴールから離れ、ビルドアップ(自陣からパスを繋いで、ボールを前方に向けて運ぶこと)に参加するべきだという考えに影響されているのではないかと考えた。

クロスはサイドライン側の足で上げることが多い。サッカーにおいて、守備側のチームの選手はほとんど全ての場合において、自陣のゴールを守る為に攻撃側の選手よりも自陣のゴールに近い位置とゴールと攻撃側の選手を結んだ直線上との両者の間に立つ。これより、クロスを上げる際は、相手ディフェンスから遠い方の足、つまりサイドライン側の足で蹴る方が有利だと考えられる。J リーグには右利きの選手が多く、左サイドからクロスを上げる場合、左足の方がクロスを上げやすいが、右サイドから右足でクロスを上げる場合に比べて、精度と力が劣る為に、ゴールに近づく必要があるのではないかと考えた。

この 2 つの考察から、クロスを上げる時に出来るだけゴールに対して正面にあげれば良いのではないかと考えた。

また、図 2, 3 より攻撃側の人数は守備側の人数よりも少ない場合が大半であると考えられる。カウンタースoccerが行われている時には攻撃側の

人数も守備側の人数も少なくなる傾向にあるため、守備側の人数が1人の場合が多くなっているのはカウンターサッカーを行うことで得点につながっていると言えるだろう。もしそうであれば、守備側の人数が1人の時よりも4人や5人の場合の方が多いため、カウンターサッカーの方式を取ることが得点につながりやすいとは考えにくい。加えて、データより守備側の人数が多い場面が多くあることから、2022年までのJリーグではカウンターサッカーの反対と呼ばれるパスサッカーがまだまだ行われていたのではないかと考えられる。

どちらにせよ、カウンターサッカーがパスサッカーより良いとはこのデータからは言えない。

## 5. まとめと今後の課題

今回の研究より、ゴールに対して正面からシュートを打てる状況を色々なプレー(クロスなど)によって作り出すことが得点率を上げる第一の方法であることが示唆された。

また、カウンターサッカーの妥当性に関してはこれらのデータからはまだ証明されないと考える。

今後の課題はデータ数の不足を補うということと、ゴールに繋がらなかったプレーとの対比を行うことによって今回の結論の信憑性をあげるということである。

## 6. 参考文献

- 1) Jリーグ公式 Youtube チャンネル  
<https://www.youtube.com/@jleaguechannel>
- 2) 矢島 史他, 2022.5.21, 映像上での動きの直接描画によるサッカー映像検索, データベースシステム, 127, 5, 1
- 3) Data Stadium, Football Lab,  
<https://www.football-lab.jp/contact/>

# 動点による限定空間の充填

## ～ 動く円は平面を埋められるか ～

田中玲羽 和田泰直

### 要旨

一定のアルゴリズムに従って動く円の軌跡が限定された領域内を埋める場合の効率性を追求した。Python を用いて XY 平面上を等速で直進し、領域外に出た場合に進行方向を一定角度回転させる円を作成して実験を進めた。回転角度を  $1^\circ$  ずつ変更しながら埋めた面積を求めたところ、角度と 360 の約数が多い時、面積が小さくなる傾向があった。

### 1. はじめに

近年、世には人工知能が搭載され自動で掃除を行ってくれるロボット掃除機が数多く存在し、我々の生活の一助となっている。その先駆けにしてトップのシェアを誇るのが iRobot 社のルンバである。ルンバの人工知能は同社の地雷探査ロボットの流れを継いでおり、部屋に最適なルートで掃除をするとともに不測の事態にも強く、実に効率的な動きをする。

そこで我々は、逆に極めて単純なアルゴリズムに従い動くロボット掃除機が仮想の平面上を動く時、どのようなアルゴリズムであれば効率が良く掃除ができるかに興味を持った。

本研究では単一のアルゴリズムに焦点を絞り、その内の変数が幾らである時に効率的に掃除ができるかを明らかにする事を目的とする。「効率的」の基準としては、「一定時間閉鎖空間で動かした場合に掃除できなかった面積が小さい」とした。アルゴリズムの内容は、可能な限り単純かつ発展性が高いと考えた「範囲外に出ると方向転換する」と設定した。

本実験をするにあたり、計算で進行ルート及び面積を算出する事は困難または煩雑であると考えられたため、Python によるプログラミングを用いてシミュレーションを行った。

### 2. 材料・研究方法

#### 2-1. 研究に用いたソフト・ツール

Python 3.11.5

Matplotlib 3.7.2

Numpy 1.25.2

OpenCV-Python 4.8.0.76

#### 2-2. 研究方法

Python の Matplotlib モジュールを用い、限定された XY 平面上を軌跡を残しながら等速で 10000 秒間直進する円のプログラム<sup>1)</sup>を作成した。

円は X 軸に対し  $\theta$  の方向に  $v$  の速さで直進する。言い換えると、毎秒 X 軸方向に  $v \cdot \cos\theta$ , Y 軸方向に  $v \cdot \sin\theta$  移動する。

また、円は自身の円周が領域を出た時、直進する方向を一定の角度 ( $d\theta$ ) 回転させる ( $\theta + d\theta$ , 図1)。

上記の円の軌跡を画像出力した後 OpenCV-Python モジュールを用い二値化し、軌跡が埋めた面積が全体に占める割合を算出した。

上記の操作を  $d\theta$  の値を  $1^\circ$  ずつ変えて繰り返した。

$d\theta$  以外の各種実験条件は表1の通りである。

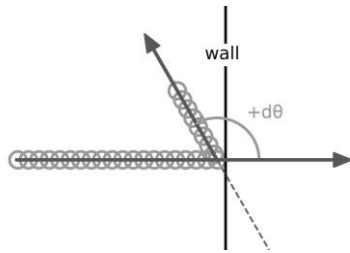


図 1. 本実験における  
アルゴリズム

表 1. 一致させる項目

| 一致させる項目 | 値                                    |
|---------|--------------------------------------|
| 実験時間    | 10,000sec                            |
| 円の速さ(v) | 0.05/sec                             |
| 円の半径    | 0.1                                  |
| 平面の領域   | $0 \leq x \leq 10, 0 \leq y \leq 10$ |
| 初期位置    | $x=0.1, y=0.1, \theta=0$             |

### 3. 結果

実験結果はグラフ(図2)の通りである.

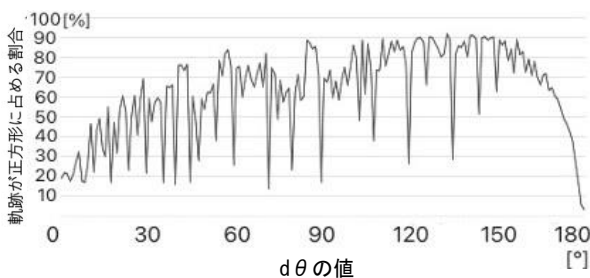


図 2.  $d\theta$  と面積

### 4. 考察

以下, $d\theta$  の単位[°]は省略する.

まず特徴として, 面積が急激に落ち込んでいる箇所がある. この時の  $d\theta$  は 8, 9, 18, 24, 30, 36, 40, 45, 60, 72, 80, 90, 120, 135 であり, これらの共通点は 360 との公約数が多く, 最小公倍数が小さい事が挙げられる. 特に最小公倍数が 360, つまり  $d\theta$  自身が 360 の約数である時, 面積は 20%付近にまで下がる.

次に上記の場合の円の軌跡を確認した(図 3, 図 4, 図 5, 図 6, 図 7, 図 8).

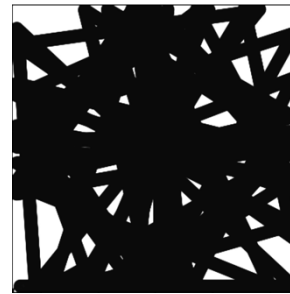


図 3.  $d\theta = 137$  の時

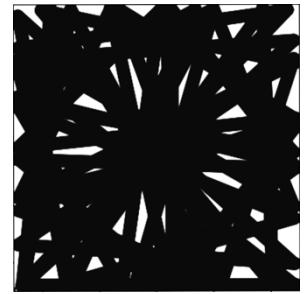


図 4.  $d\theta = 142$  の時

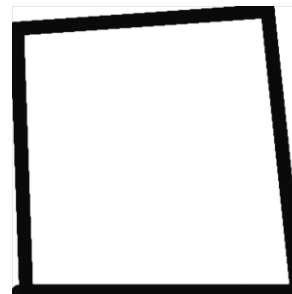


図 5.  $d\theta = 8$  の時

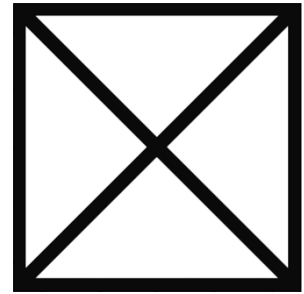


図 6.  $d\theta = 135$  の時

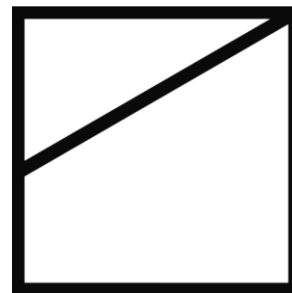


図 7.  $d\theta = 30$  の時

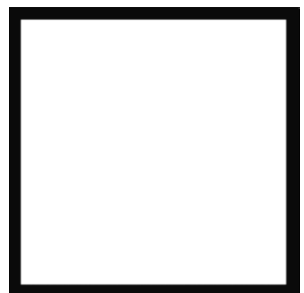


図 8.  $d\theta = 90$  の時

多くの場合図 3, 図 4 のように円が描く軌跡はそれぞれ異なる向きに走っているように見えるが, 面積が少なくなる時の一例図 5, 図 6, 図 7, 図 8 では軌跡にループが起これり同じところを何度も通っていることがわかる. 最小公倍数が小さいことから, 少ない衝突回数で角度が等しくなり同じ軌道を辿ると考えられる.

また, 図 9, 図 10 など  $d\theta$  が 170 以上の時には空間の端の方しか埋められていなかった. これは  $d\theta$  が 180 に近いいため正反射に近い動きをし, 微妙にズレた角度により図のような図形が出来ると考えられる.

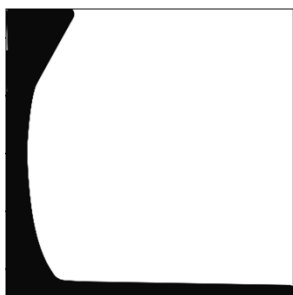


図 9.  $d\theta = 179$  の時



図 10.  $d\theta = 176$  の時

また,  $d\theta$  が 85,124(図 9,図 10)の時に面積は最も大きくなった.面積が 90%を超えたのは  $d\theta$  が 85,111,117,118,122,123,124,125,128,129 の時であり,120 付近の角度でより面積は大きくなる傾向が見られた.



図 11.  $d\theta = 85$  の時

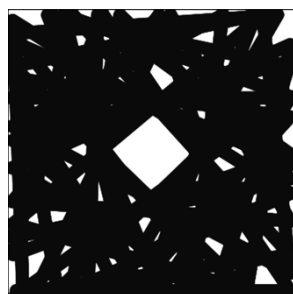


図 12.  $d\theta = 124$  の時

## 5. まとめと今後の課題

今回,面積が小さくなる時の条件は分かったものの,どうすれば面積が大きくなるのかという具体的な条件の発見には至らなかった.

正方形の空間の一つのパターンでしか実験していないので,今後は部屋の形,サイズの変更や障害物の設置などを行ない様々な角度から考察を行いたい.

## 6. 参考文献

<sup>1)</sup>MENDY, 2018.8.17, ボールが跳ねるアニメーションを python(matplotlib)で書いてみた,  
<https://qiita.com/MENDY/items/e1b432df1e0bfe8b680c>, 2023.5.19

# ゼブラフィッシュのビー玉に対する嗜好性

## ～ 魚は底面を見ているのか ～

井上凜音

### 要旨

水槽底面に敷いたビー玉に対するゼブラフィッシュの嗜好性を調べるために、ゼブラフィッシュの成魚をビー玉の有無を変えた様々な条件の水槽に入れて行動実験を行った。その結果、ゼブラフィッシュは底面の環境の違いよりも底面に映った自身の姿や壁面により強く反応する事が分かった。

### 1. はじめに

小型魚類は視運動反応と呼ばれる、視野の変化に対して適宜反応することで、絶えず変化する水流の中で定位置を保つ行動を取る事が知られていることが報告されている<sup>1)</sup>。この行動には視覚が関わっており、主に円筒水槽の周りで縞模様が描かれた筒を回転させることで実験が行われている。しかしながら、底面を見ているのかや、底面環境に対する視覚的嗜好性の研究はあまり主流ではない。

ゼブラフィッシュ(*Danio rerio*)の食卵を防ぐために「床にビー玉を敷き詰める」という方法がある。もしゼブラフィッシュが底面も見ているのであれば何も無い底面と比較して行動様式に何らかの変化が現れていると予測される。ビー玉は色形が一定であり、実験を行う上で実験条件を揃えやすい。

この事を前提として、底面のビー玉の存在がゼブラフィッシュの遊泳にどのような影響をもたらすのかについて調べる実験を行った。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

本研究で用いたゼブラフィッシュは、学校の水槽で生物実験用に飼育しているものを使用した。夏の暑さにより多くのゼブラフィッシュが死んでしまい、実験途中で全滅した為秋以降の実験は新しく買い足した 20 匹を用いて実験を行った。オス

とメスが恐らく混在していたが、判別が難しかったため本実験では雌雄の割合調節を行わなかった。

実験を行う水槽として内径 24.0×16.0×20.5 cm のガラス製水槽を1つ用意し、底面に合わせてカットしたアクリル板1枚とビー玉の仕切りとして使える 16.0×2.3 cm のアクリル板1枚を用意した。また、実験に用いたビー玉は半径 6 mm の無色透明なものを一袋分用意した。

### 2-2. 研究方法

予備実験においてゼブラフィッシュは水槽の周囲を人が歩くと反応を示してそちらに近づいてしまう事が分かっていたので、ダンボール製の囲い(図1)を用いて水槽の3方を囲う事で対処した。また、開いている1方向には最初から iPad を設置しておき、前を人が通らないようにして実験を行った。



図1. ダンボール製の囲い  
三方向を囲い、上面は採光の為開けた。  
手前の開いている側から動画撮影を行った。

全ての実験において、実験に用いる水槽に汲み置き水を入れて条件を整えてから魚を移して5分間慣らし遊泳を行った。

その後、1分間にわたり正面から iPad のカメラ機能を用いて動画を撮影した。得られた動画を1秒毎に分析し、魚が上下左右どの位置に居るかを魚の目の位置を基準にして判定し、水槽正面に対し4つのエリアに分割して計測した。

水槽に入れた物の条件と魚の数の条件、試行回数は以下の通りである。

- ① 底のアクリル板あり、ビー玉は 2 段重ねで水槽底面の半分に敷いた。
- ② 底のアクリル板無し、ビー玉は 2 段重ねで水槽底面の半分に敷いた。
- ③ 底のアクリル板無し、ビー玉は 2 段重ねで水槽の全面に敷いた。
- ④ 底のアクリル板無し、ビー玉は 2 段重ねで水槽の底面半分に敷いた。水槽の底に白い紙を沈めた。
- ⑤ 底のアクリル板無し、ビー玉は水槽の底面半分になるように自然な状態で積み上げた。水槽の底に白い紙を敷いた。

**表 1. 行った実験の環境条件と試行回数**

ここに記した試行回数は、実際の試行回数ではなく遊泳の様子がはっきりと録画されており結果の分析に用いることのできた試行の回数である。実験条件は図 1 の通りである。単位は全て回。

| 実験条件 | 回数           |
|------|--------------|
| ①    | 10(うち複数遊泳1回) |
| ②    | 2            |
| ③    | 4            |
| ④    | 4            |
| ⑤    | 2            |

### 3. 結果

全ての有効な試行で得られた動画を分析し、各エリアに魚が居た秒数の数値を平均した結果が以下の表の通りである。複数の魚を用いて行っ

た実験の場合は、それぞれの魚についての秒数を足し合わせて平均を取った。

#### 3-1. 実験①の結果

水槽の中に入れた魚が1匹の時の結果は以下の表2の通りである。

**表 2. 実験①の結果（単独遊泳）**

9 回行った実験について、得られた結果を平均した。単位は秒。小数点第 3 位を四捨五入した。

| 秒数 | ビー玉有り | ビー玉無し | 合計    |
|----|-------|-------|-------|
| 上側 | 10.44 | 14.11 | 24.56 |
| 下側 | 17.56 | 17.78 | 35.33 |
| 合計 | 28.00 | 31.89 | 60    |

水槽の中に魚を複数匹入れた場合の結果は以下の表3の通りである。

**表 3. 実験①の結果（複数遊泳）**

実験を行った 2 匹について、得られた結果を平均した。単位は秒。

| 秒数 | ビー玉有り | ビー玉無し | 合計   |
|----|-------|-------|------|
| 上側 | 3.0   | 16.5  | 19.5 |
| 下側 | 17.5  | 23.0  | 40.5 |
| 合計 | 20.5  | 39.5  | 60   |

#### 3-2. 実験②の結果

結果は以下の表4の通りである。

**表 4. 実験②の結果**

2 回行った実験について、得られた結果を平均した。単位は秒。

| 秒数 | ビー玉有り | ビー玉無し | 合計   |
|----|-------|-------|------|
| 上側 | 12.5  | 5.5   | 18.0 |
| 下側 | 17.0  | 25.0  | 42.0 |
| 合計 | 29.5  | 30.5  | 60   |

### 3-3. 実験③の結果

結果は以下の表5の通りである。

表 5. 実験③の結果

4 回行った実験について、得られた結果を平均した。単位は秒。

| 秒数 | 水槽左側  | 水槽右側  | 合計    |
|----|-------|-------|-------|
| 上側 | 19.75 | 19.75 | 39.50 |
| 下側 | 6.25  | 14.25 | 20.50 |
| 合計 | 26.00 | 34.00 | 60    |

### 3-4. 実験④の結果

結果は以下の表6の通りである。

表 6. 実験④の結果

4 回行った実験について、得られた結果を平均した。単位は秒。

| 秒数 | ビー玉有り | ビー玉無し | 合計    |
|----|-------|-------|-------|
| 上側 | 1.25  | 5.75  | 7.00  |
| 下側 | 14.75 | 38.25 | 53.00 |
| 合計 | 16.00 | 44.00 | 60    |

### 3-5. 実験⑤の結果

結果は以下の表 7 の通りである。

表 7. 実験⑤の結果

2 回行った実験について、得られた結果を平均した。単位は秒。小数点第 3 位を四捨五入した。

| 秒数 | ビー玉有り | ビー玉無し | 合計   |
|----|-------|-------|------|
| 上側 | 10.0  | 40.0  | 50.0 |
| 下側 | 7.0   | 3.0   | 10.0 |
| 合計 | 17.0  | 43.0  | 60   |

## 4. 考察

多くの試行において、ゼブラフィッシュは水槽の下側に居る時間の割合が高かったと言える。動画内では底に向けて口を近づけていた時間と腹の下を地面につけるような泳ぎ方をしている時間に大きく二分された。これは、Novel tank test に

おいて水槽下層や壁際を選択する場合は魚の不安レベルが高い事が既に報告されており<sup>2)</sup>、本実験においてもゼブラフィッシュが実験環境に対して恐怖反応を示していた事を表すと考えられる。

実験①の複数遊泳においては、魚同士で体を突き合い相手を追いやるような行動が見られた。その他の行動や条件は同じで合ったので、この突き合いの行動が魚をより下層へと導いた事が示唆される。

また、水槽の中で底面や側面に向かって口を近づけるような行為が行われた時間がどの試行においても非常に長く、魚が遊泳していた実質の時間は短かった。これは、底面環境の違いよりも底面や側面の方が行動を決定づけるにおいて重要視されていたことを示すと考えられる。

さらに、対照実験として行った実験③においても、行動範囲が水槽の片側に有意に寄るという現象が見られた。このことから、底面環境以外にも水槽内での魚の遊泳位置を決める要素が別にあったと言えるだろう。よって、単にこの実験結果を底面環境の違いとそれに対する嗜好性から来るものだと結論付けることはできない。

## 5. まとめと今後の課題

以上の結果から、ゼブラフィッシュは底面の環境の違いよりも底面に映った自身の姿や壁面により強く反応している事が分かった。

どの実験においても接触走性があり見られず壁面に頭を押し付けるような行動が多く見られたのは、不安による接触走性よりも逃避のための行動(吉田将之, 2011)が優先された結果だったのではないかと。

ゼブラフィッシュが水槽の壁面、底面のガラスやアクリル板に映った自分の姿に強く反応を示したことで、求めているような結果が得られなかった。これを解決するには、透明ではなく半透明の水槽で実験を行い上部から撮影する事が考えられる。しかし、半透明の水槽を用いると上下方向の位置の計測ができないという問題点がある。この点に

については今後も議論の余地があるだろう.

## 7. 参考文献

- 1) 磯江泰子, 2020.10.21, 海外特別研究員最終報告書,  
[https://www.jsps.go.jp/file/storage/general/jab/data/list/h30/06/201860483\\_isoe.pdf](https://www.jsps.go.jp/file/storage/general/jab/data/list/h30/06/201860483_isoe.pdf),  
2024.1.15
- 2) 吉田将之, 2011, 魚類における恐怖・不安行動とその定量的観察, 比較生理生化学, 28, 4, 317,  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/hikakusei-riseika/28/4/28\\_4\\_317/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/hikakusei-riseika/28/4/28_4_317/_pdf/-char/ja),  
2024.1.28

# ペットボトル緑茶の大腸菌に対する抗菌作用について

## ～ 他の食品添加時の抗菌活性 ～

川本歩乃加

### 要旨

茶葉から淹れた日本茶においては細菌性下痢起因菌の抗菌作用が確認されているが<sup>1)</sup>、一般のペットボトル飲料の緑茶も、大腸菌への抗菌作用がみられるのかについて調べた。

ペットボトル緑茶に、アスパラギン酸、レモン果汁、蜂蜜を、濃度を変更して加え、大腸菌(*Escherichia coli* K12)を塗布した LB 寒天培地での発育阻止帯形成を観察した。その際に非常に高い抗菌作用を示した、ペットボトル緑茶と蜂蜜の混合液について、濃度、含有糖類量、粘度の観点から、その抗菌作用を調べた。

その結果、ペットボトル緑茶における蜂蜜の割合が約 55%以上の混合液において、顕著な抗菌作用が見られた。しかし、蜂蜜と緑茶における相互作用は明らかにできなかった。

### 1. はじめに

昨年度、茶葉から淹れた緑茶を用いて緑茶カテキンの抗菌作用が明らかにされていることを知り、製造時に加熱処理を施される<sup>2)</sup>ペットボトル飲料でも緑茶カテキンの抗菌作用は見られるのかと疑問に思い、これを調べた。

昭和大学の戸田真佐子氏らの研究によって、日本茶がいくつかの細菌性下痢起因菌に対して抗菌作用及び殺菌作用を持つことが報告されている<sup>1)</sup>。また茶に含まれるポリフェノールの一種であるカテキンのうち、ガレート型カテキンは抗菌作用が高いことが分かっている<sup>3)</sup>。それらの理由から緑茶カテキンを対象に、市販のペットボトル飲料の中でガレート型カテキン含有量が多い花王株式会社「ヘルシア 緑茶 α」を用いて緑茶が大腸菌(*E.coli* K12)の生育に与える影響を調べた。

茶葉から入れたものよりも身近なペットボトル緑茶の、細菌への抗菌作用を確認することによって、日常生活における健康管理の手段を負荷なく増やすことができるのではないかと考え、実験を行った。

昨年度の研究では、ペットボトル茶単体での大

腸菌に対する抗菌作用について探究し、結果的にペットボトル茶単体では大腸菌に対して望ましい抗菌作用が得られないことがわかった。

一方、カテキン-銅(Ⅱ)錯体が大腸菌に対し、抗菌作用を示すことがわかっている<sup>4)</sup>。このことから同様に、ペットボトル緑茶に他の食品を添加した際にも、大腸菌への抗菌作用を示すようになるのではないかと考え、緑茶のアレンジレシピとして一般に知られている、レモン緑茶、蜂蜜緑茶に着目した。

まず、ペットボトル緑茶に、レモン果汁(L)、蜂蜜(H)、アスコルビン酸 A、レモン果汁及び蜂蜜(H+L)を、濃度を変えて混合した混合液の抗菌作用について調べた。この時、レモン果汁が抗菌作用を示す場合は、レモン果汁の主成分であるアスコルビン酸が関係しているという仮説のもと、レモン果汁とは別に、アスパラギン酸単体から調整した混合液を加えて実験を行なった。

その結果、レモン果汁、アスコルビン酸を加えた混合液では抗菌作用が見られなかったが、蜂蜜を加えた混合液において顕著な抗菌作用が見られた。この結果から、蜂蜜単体、段階的に濃度

を変えた蜂蜜と緑茶の混合液、蜂蜜と同じ糖分濃度に調整した水溶液と緑茶の混合液の大腸菌への抗菌作用について調べた。

この実験において、蜂蜜濃度が約 55%を超えた場合に顕著な抗菌作用が見られた。一方で、糖分濃度の等しいスクロース水溶液との混合液では抗菌作用は見られなかった。また、抗菌効果が見られた濃度の蜂蜜と緑茶の混合液の pH を測定すると、総じて pH4.5 以下であり、これは大腸菌が生育できる pH5から9の値<sup>5)</sup>を下回っていた。また、蜂蜜自体の pH の平均値は 3.7 である<sup>6)</sup>。以上より、蜂蜜を加えた混合液の pH の値が低くなることが大腸菌に対する抗菌作用を示す要因であると考えられる。

## 2. 材料・研究方法

### 2-1. 研究試料

大腸菌(*Escherichia coli* K12 株)は、冷凍したものを LB 寒天培地 (LB Bouillon, Merck) で培養したのち、そのうちの 1 コロニーを培養し、使用した。またペットボトルの緑茶には花王株式会社の「ヘルシア 緑茶 α」を使用した。濾紙には、東洋濾紙株式会社のクロマトグラフィー用濾紙 No. 50 を、10mm 四方にカットし、滅菌して使用した。レモン果汁には実験直前に市販のレモン果実を切り、絞ったものを使用した。蜂蜜には株式会社加藤美峰園本舗の「メキシコ産純粋はちみつ」を使用した。

大腸菌は、液体培地の場合は恒温振とう機、寒天培地の場合は恒温機でそれぞれ 37℃で培養した。試料の pH 測定には HORIBA の卓上ガラス電極 pH 測定器を使用した。

### 2-2. 研究方法

#### 2-2-1. 食物由来物質との混合液

食物由来物質である、レモン果汁、蜂蜜に対して、緑茶と混合した場合の大腸菌に対する抗菌作用を調べた。レモン果汁と緑茶、蜂蜜と緑茶、レモン果汁及び蜂蜜と緑茶を、それぞれ質量パ

ーセント濃度 75%, 7.5%, 0.75%で混合した。レモン果汁に含まれるアスコルビン酸濃度と等しくなるように調整したアスコルビン酸の緑茶溶液は質量パーセント濃度が 5.0%, 0.5%, 0.05%になるように混合した。この時、レモン果汁と蜂蜜の濃度は、実際に飲む場合を目安とし、参考にしたレシピの濃度を1として、それを 10 倍、1 倍、1/10 倍した値である。大腸菌を全面に均一に広げた LB 寒天培地上に、上記の混合液を染み込ませた濾紙片を図1のように配置し、1日後の大腸菌の様子を観察し、発育阻止帯を測定した。

#### 2-2-2. 蜂蜜混合液の抗菌作用

上記の実験で比較的強い抗菌作用を示した蜂蜜について、緑茶を溶媒として、それぞれ質量パーセント濃度 70%, 56%, 35%, 14%で混合し、同様の実験を行った。この濃度は参考にしたレシピの濃度を1とし、それを 10 倍、8 倍、5 倍、2 倍にした値である。

#### 2-2-3. 蜂蜜混合液の pH と抗菌作用の関係

蜂蜜と緑茶の混合液について、質量パーセント濃度が 70%, 35%のものを作成し、その混合液の pH を測定した。その後、0.1N に調整した NaCl 水溶液、HCl 水溶液を加え、各混合液を pH の1の位が6になるように調整し、同様の実験を行った。このとき、pH の1の位が6になるように、緑茶単体に 0.1N に調整した NaCl 水溶液、HCl 水溶液を加え、共に実験を行った。

## 3. 結果

### 3-1. 2-2-1 の結果

2-2-1 の実験において、以下の表1の結果が得られ、発育阻止帯の様子は図2のようになった。アスコルビン酸混合液では、発育阻止帯が観察できず、大腸菌に対する抗菌作用は見られなかった。一方、75%のレモン果汁と緑茶の混合液、蜂蜜と緑茶の混合液、レモン果汁と蜂蜜と緑茶の混合液では、発育阻止帯が観察できた。

表 1. 2-2-1 の実験結果

| 混合液          | 阻止帯(cm) | 抗菌作用 |
|--------------|---------|------|
| L 75%        | 0.5-0.6 | +    |
| L 7.5%       | -       | -    |
| L 0.75%      | -       | -    |
| H 75%        | 1.2-1.5 | ++   |
| H 7.5%       | -       | -    |
| H 0.75%      | -       | -    |
| H + L 75%    | 0.5-0.8 | +    |
| H + L 7.5%   | -       | -    |
| H + L 0.75%  | -       | -    |
| A 0.75%      | -       | -    |
| A 0.075%     | -       | -    |
| A 0.0075%    | -       | -    |
| A 単体 0.75%   | -       | -    |
| A 単体 0.075%  | -       | -    |
| A 単体 0.0075% | -       | -    |
| H 単体         | 1.7-2.0 | +++  |

L: レモン、H: 蜂蜜、A: アスコルビン酸、単体との表記がない混合液は溶媒にヘルシアαを使用している(「単体」は溶媒が水)。抗菌作用については発育阻止帯が見られなかったものは-, 発育阻止帯が見られたものについてはその規模によって、最大値が 1.0cm 未満は+, 1.0 から 2.0cm は++, 2.0cm 以上は+++の3段階で表した。

また、これらの実験においてレモン果汁と緑茶の混合物は 75%, 7.5%, 0.75%混合液の順に、pH は 2.44, 3.27, 4.70 であった。アスコルビン酸と緑茶の混合液は、0.75%, 0.075%, 0.0075%混合液の順に、pH は 4.69, 5.66, 5.83 であった。

### 3-2. 2-2-2 の結果

2-2-2 の実験結果は表 1, 発育阻止帯の様子は図 3 のようになった。蜂蜜と緑茶の混合液は強い抗菌作用を示した。

### 3-3. 2-2-3 の結果

2-2-3 の実験結果は表 1, 発育阻止帯の様子は図 4 のようになった。この実験でも発育阻止帯状の部分は観測されたが、2-2-2 での実験に比べて、その規模が小さい。また、阻止帯の色が 2-2-2 よりやや白っぽくなっていた。

蜂蜜と緑茶の混合液について、70%, 35%の混合液は、調整前の pH が 3.38, 3.92 であった。また、実験に使用した緑茶の pH は 6.13 であった。

表 2. 2-2-2 の実験結果

| 混合液   | 阻止帯(cm) | 抗菌作用 |
|-------|---------|------|
| H 70% | 1.6-2.1 | +++  |
| H 56% | 1.3-2.0 | +++  |
| H 35% | 0.2-0.3 | +    |
| H 14% | -       | -    |

発育阻止帯の数値については、最小値と最大値の値を平均し、少数第 3 位を四捨五入した。抗菌作用については表 1 と同様に表した。

表 3. 2-2-3 の実験結果

| 混合液   | 阻止帯(cm) | 抗菌作用 |
|-------|---------|------|
| H 70% | 1.2-1.5 | ++   |
| H 35% | 1.3-1.6 | ++   |
| 緑茶のみ  | -       | -    |

発育阻止帯の数値については表 2 と同様に平均値を用いた。抗菌作用についても表 1 と同様に示した。

## 4. 考察

図 3, 4 を比較して、図 4 で観察できる発育阻止帯状の部分は明らかに図 3 よりも白みがかかり、境界が不鮮明であるため、発育がある程度妨げられてはいるものの大腸菌に対して完全な抗菌作用を示していないと考えられる。この結果より、大腸菌に対する抗菌作用について、蜂蜜を加えた緑茶の抗菌作用は、その混合液の pH に起因

することが示唆された。なおこれらの実験では混合液の粘度が蜂蜜を加える前と同程度になるまでかき混ぜており、また実験後ある程度時間が経っても、混合液内で蜂蜜が分離しなかったことから、蜂蜜の粘度は抗菌作用に関係がないと考えられる。さらに 2-2-1 の実験から、75%の混合液では全ての組み合わせで抗菌作用が観察された。しかし、レモン果汁と緑茶の混合液、アスコルビン酸と緑茶の混合液では大腸菌に対する抗菌作用は見られなかったことから、大腸菌への抗菌作用は単純に pH に依存するわけではないと考えられる。これらのことから、蜂蜜に含まれる物質が、pH に関連して抗菌作用を示した、あるいは、蜂蜜に含まれる物質が pH による抗菌作用を促進していたということが考えられる。

また、図3,4より、高い抗菌作用を示した混合溶液について、その蜂蜜の濃度が 56%のものと 70%のもの、また 35%のものと 70%のものとは発育阻止帯の規模にほとんど差が見られなかった。このことについて、混合溶液はある一定の濃度を超えると抗菌作用の強さが限界値に達し、その限界濃度が 50%から 70%の間に存在していたということ、あるいは、シャーレという面積的に制限された場所で培養したため、発育阻止帯の広がり互いに重なり、それぞれの混合液が十分に抗菌作用を発揮することができなかったということが考えられる。

2-2-1 と 2-2-2 の実験結果を比較して、蜂蜜単体での抗菌作用と、緑茶に蜂蜜を加えた混合溶液の抗菌作用には大きな差が見られなかったため、抗菌作用という観点において、蜂蜜と緑茶の間には相乗効果などの相互作用は明らかにできなかった。

## 5. まとめと今後の課題

この研究から、緑茶混合液による大腸菌への抗菌作用にはその pH が大きく関わっていると考えられる。

また単体では大腸菌に対して抗菌作用を示さ

ない緑茶だが、今回の実験結果から、相乗効果は確認できなかったものの、添加物により緑茶との混合液が大腸菌への抗菌作用を示すことが確認された。

蜂蜜添加時の抗菌作用について、酵素が関係していることも考えられるが、粘性の高い蜂蜜と酵素を分離する方法や分離自体の確認法を模索する必要がある。例えば、一般に酵素の働きについて調べる実験ではセロハンを使い、分子量の大きなタンパク質である酵素を分離する方法がある。しかし対象となる酵素、またはその大きさが不明な場合は、セロハンを透過させた混合液が仮に抗菌作用を示さなくなったとしても、それが酵素が分離できたからなのかどうかは明確にはならない。セロハンの孔径が明示された、研究用のセロハンチューブを利用し、対象物質の大まかな大きさを推察することも考えられるが、孔径別のセロハンを何種類も揃えるには費用がかかるという欠点がある。また、蜂蜜といった粘性の高い物質ではセロハンによる透析の応用が難しく、対象とする物質以外の物質が溶け出しているかを確認するためのマーカーの設定などが必要であると考えられる。

## 7. 参考文献

- 1) 戸田真佐子・大久保幸枝・大西玲子・島村忠勝, 1989, 日本茶の抗菌作用および殺菌作用について. 日本細菌学雑誌, 44, 4, 669-672
- 2) 花王株式会社, ヘルシアの製造工場を覗いてみよう,  
<https://www.Kao.co.jp/healthya/product/research-development/factory/>, 2023. 1. 25
- 3) 川村淳・竹尾忠一, 1989, *Streptococcus mutans* に対する茶葉カテキンの抗菌作用について, 日本食品工業学会誌, 36 巻, 6 号, 463-467
- 4) 星野伸夫, 2000, カテキン-銅(II)錯体による酸化ストレスと選択的殺菌作用, 滋賀医科大学, 博士論文
- 5) 小林弘, 1996, 環境の pH 変化に対する細菌

の適応機構. 日本細菌学会雑誌, 51(3), 745-753

6)越後多嘉志,1977,蜂蜜の特性とその利用, 日本醸造協会雑誌, 72 巻, 4 号, 244-249

## 8. 添付資料

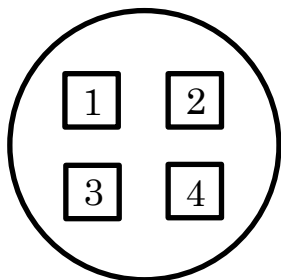


図1 濾紙の配置図

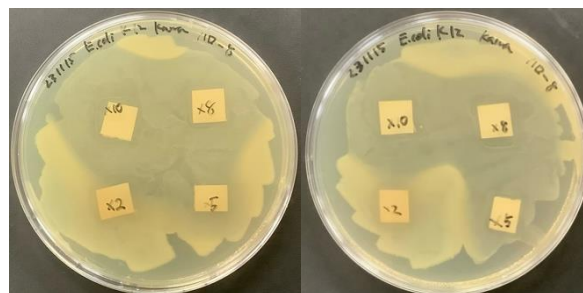


図3 2-2-2の結果

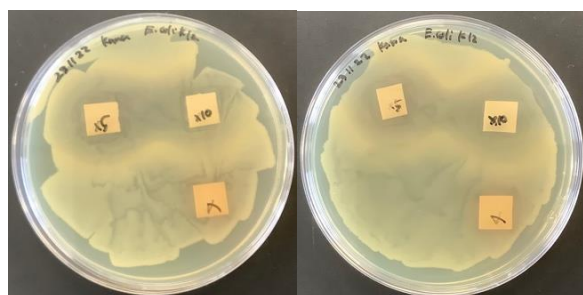


図4 2-2-3の結果

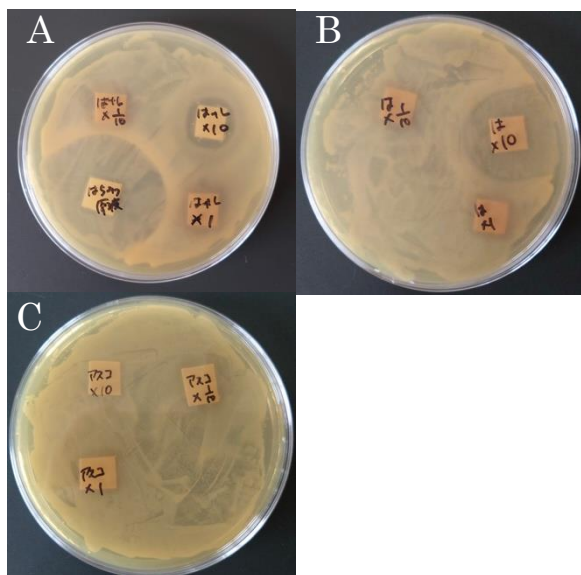


図2 2-2-1の結果

A 蜂蜜とレモンと緑茶の混合液と蜂蜜原液

1:  $\times 1/10$ , 2:  $\times 10$ , 3: 蜂蜜原液, 4:  $\times 1$

B 蜂蜜と緑茶の混合液

1:  $\times 1/10$ , 2:  $\times 10$ , 3: 4:  $\times 1$

C アスコルビン酸と緑茶の混合液

1:  $\times 1/10$ , 2:  $\times 10$ , 3: 4:  $\times 1$

令和5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6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