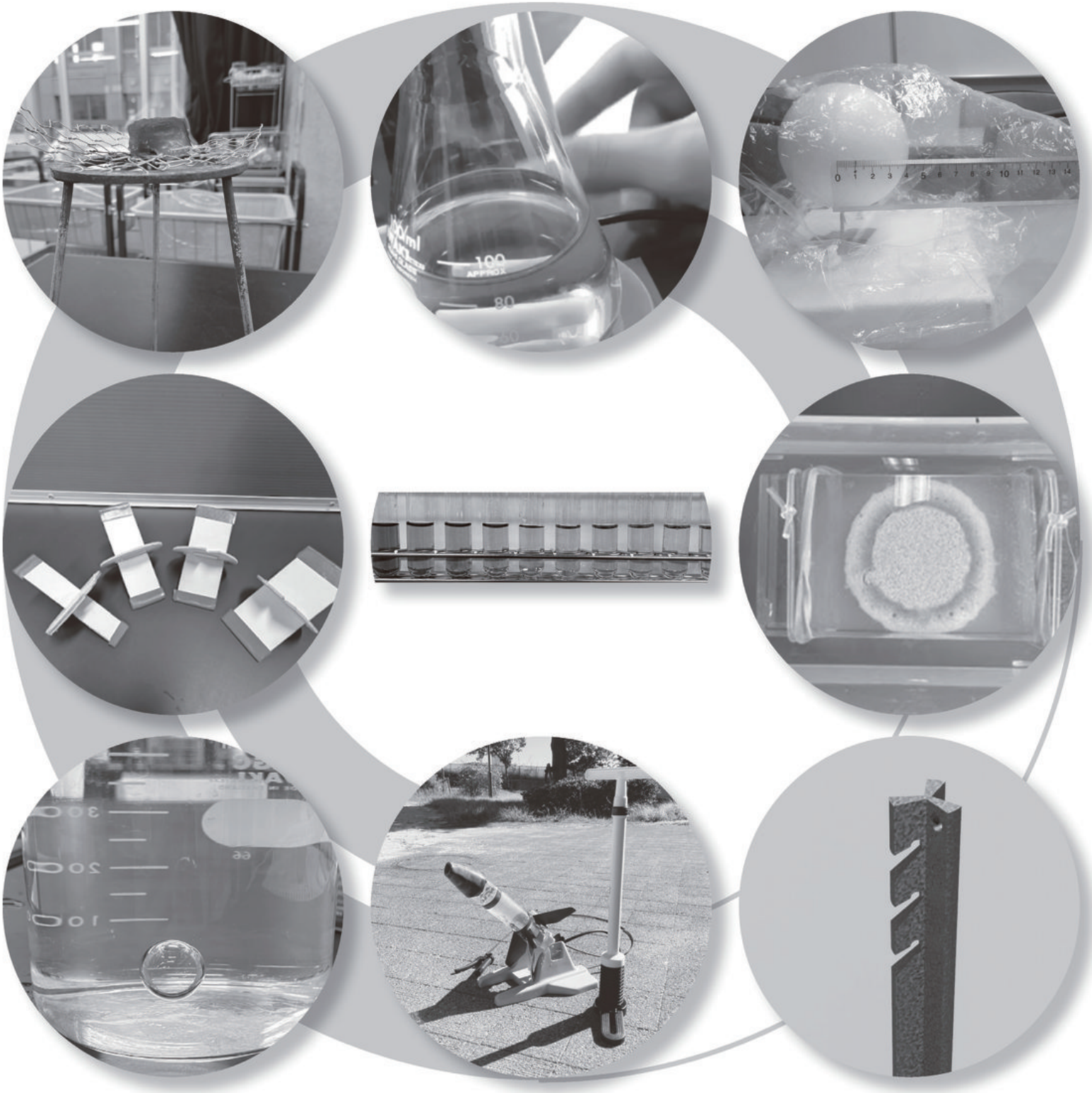


令和7年度
普通科SSHコース
課題研究論文集

千葉市立千葉高等学校

〒263-0043　千葉県千葉市稲毛区小仲台9-46-1
TEL 043-251-6245

巻　頭　言

千葉市立千葉高等学校長　尾留川　聡

ＳＳＨは、現在の本校にとって欠くことのできない、極めて大きな特色となっているところですが、簡単にその歴史を振り返ってみますと、次のようになっています。

第Ⅰ期　２００２（Ｈ１４）～２００６（Ｈ１８）５年間
第Ⅱ期　２０１２（Ｈ２４）～２０１６（Ｈ２８）５年間
※普通科ＳＳＨコース設置：２０１２（Ｈ２４）
※科学技術人材育成重点枠：２０１６（Ｈ２８）１年間
第Ⅲ期　２０１７（Ｈ２９）～２０２１（Ｒ３）５年間
※科学技術人材育成重点枠：２０１８（Ｈ３０）～２０２０（Ｒ２）３年間
第Ⅳ期　２０２２（Ｒ４）～２０２６（Ｒ８）５年間
※科学技術人材育成重点枠：２０２３（Ｒ５）～２０２６（Ｒ８）４年間

第Ⅰ期の後に５年間のブランクがありますが、その後第Ⅱ期からは途切れることなく継続しています。今年は通算で１９年目に当たりますが、千葉県では本校が最も長く取り組んでいることになります。

このように長きにわたって継続できたことには、様々な要因があります。まず千葉市教育委員会からの全面的なバックアップがあった上で、ＳＳＨ運営指導委員、評価委員の方々の親身な御指導・御助言が支えとなりました。また、本校の先生方の献身的な指導がなければ絶対に成り立たちませんでした。「仕事」とか「業務」という枠を超えて、皆さんに何とか少しでも役に立つことをしてあげたいという「思い」があればこそ、ここまで継続できたのです。また、直接みなさんを指導している理数教科の先生方に加え、それ以外の先生方がいかにＳＳＨの意義を理解し、いかに協力するかということも不可欠な要因です。

しかし何より、生徒の皆さんがいかに取り組むか…これが最も重要であることは言うまでもありません。先輩方がこれまでに残してきた素晴らしい成果や実績…これがあるからこそ、１９年も継続できたのです。

しかし、このような伝統の「重み」や先生方の「思い」を皆さんにぜひ感じてもらいたいと思う一方で、そのようなことはさておき、シンプルに自らの好奇心や探究心に突き動かされて、それぞれの研究に没頭し、邁進する…それが一番なのだ、という思いもあります。実際、皆さんの取り組む姿を見ていると、一人として「やらされている」という人はいないと感じます。純粋に「知りたい」、そして研究した成果を「伝えたい」…そういう「思い」がヒシヒシと伝わってきます。この気持ちこそが科学技術従事者のベースになるものであり、「全て」であると言ってもいいのかもしれません。皆さんの姿は大変頼もしく、その姿は必ずや後輩たちに引き継がれていくものと確信しています。

目次

巻頭言

第１１期ＳＳＨコースのあゆみ

外部コンテスト成果

ＳＳＨコース　課題研究論文

１．前代未聞の新燃料！バイオコークスの高効率化　・・・・・・・・・　１　～　７

２．マグヌスフライヤーをより高く飛ばす方法　・・・・・・・・・　８　～　１５

３．アンチバブルの性質と界面活性剤の関わり　・・・・・・・・・　１６　～　２５

４．向かい風でめくれないレインコートのフード　・・・・・・・・・　２６　～　３３

５．ペットボトルロケットで長い距離を飛ばす方法　・・・・・・・・・　３４　～　４２

６．Ｙ字ペグの折れにくい形状　・・・・・・・・・　４３　～　５２

７．アミラーゼの分泌量と食事条件の関係　・・・・・・・・・　５３　～　６０

８．信号反応における糖の減少量について　・・・・・・・・・　６１　～　６６

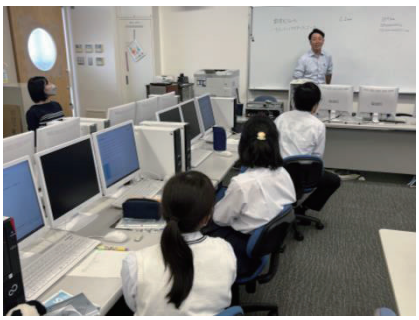
９．プロテインのダマの解消方法　・・・・・・・・・　６７　～　７９

あとがき

第１１期ＳＳＨコースのあゆみ

課題研究基礎講座＜４～５月＞

物理・化学・生物・地学に分かれ実験基礎講座を行った。ANS（Advanced Natural Science）の時間ではデータ処理や研究倫理の講義をいただき、さらにポスター作成講座やスライド作成講座、実験ノート作成講座を通して課題研究を進める上で重要なポイントを学んだ。



野外実習基礎講座（地学編・生物編）

地学編（勝浦・鴨川）では鵜原理想郷の砂泥互層、鴨川青少年自然の家付近の枕状溶岩、鴨川漁港付近の付加体等の観測を行った。生物編（君津）では清和県民の森の奥地に存在する氷河期の現存種「ヒメコマツ」を観測するとともに、SS-Science Camp II に向けてのフィールド実践を行った。

SS-Science Camp II ＜８月＞

野外実習基礎講座の経験を通し、１日目はフォッサマグナ・翡翠探し研修、２日目は室堂平周辺でのフィールド研修、３日目は雄山での氷河観測の研修、４日目は黒部ダム研修を行った。４日間ともに天気には恵まれて２日目と３日目の夜には武田先生による天体観測の解説もいただいた。

SS-Science CampⅢ＜３月＞

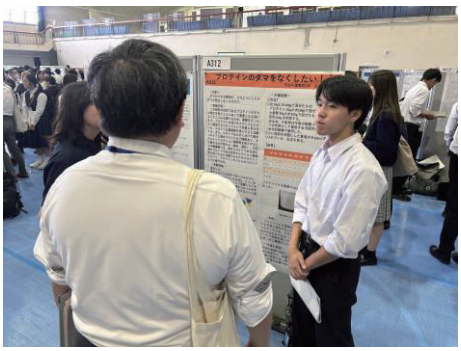
令和５年度より SS-Science CampⅢの九州地方での研修の開発を行った。１日目は佐賀大学海洋エネルギー研究所での海洋温度差発電の研修、２日目は雲仙普賢岳でのフィールド実習、３日目は有田陶磁美術館と佐賀県立窯業技術センターでのセラミックス研修を行った。

各種連携講座

千葉大学機器分析講座や東邦大学 PCR 講座、日本技術士会連携の青少年のための科学の祭典（PIC メロディの小箱工作）などの連携講座に参加した生徒もいた。大学の内容の先駆けとなる講義や実習を経験することで、科学の興味・関心をさらに高め、課題研究の学びに生かすことができた。

各種課題研究発表会

２年次は９月の高校生理科研究発表会、１２月の CCSS Fair、３月の千葉県高等学校課題研究発表会に参加した。３年次は坊ちゃん科学賞や科学の芽等のコンテストに、作成した論文を出品した生徒もおり、ひたむきに課題研究に力を入れることできた２年間であった。



「プロテインのダマの解消方法」

普通科ＳＳＨコース３年次　山本　悠翔

第 16 回 坊っちゃん科学賞

研究論文コンテスト（高校部門）　奨励賞

プロテインのダマの解消方法

千葉市立千葉高等学校　普通科２年ＳＳＨコース　山本悠翔

＜背景と目的＞

私は部活動の一環として飲むプロテインのダマ(粉末が水に溶けるときに発生する溶け残った粉の塊)がプロテインの口当たりを悪くしていると思い、そのダマの発生を防ぎたいと考えた。ダマの発生を防ぐ方法を発見することができれば、プロテインの口当たりが良くなるだけでなく、ココアなどの他の粉末飲料に応用できるのではないかと考えている。そこで、プロテインにおけるダマの解消方法を発見するために、ダマの発生条件、つまりダマのできやすい環境の特定を目的とする。

＜仮説＞

参考文献（1,2）より、プロテインのダマ発生のメカニズムとして次のような仮説を立てた。塊状に固まった粉末が水と接することで、分散する前に塊の表面の分子が水和し、周囲の分子とくっつきあって水の侵入を拒む膜を形成する。つまり、意図的に粉末を塊状で水と触れさせたときは、ダマが多く発生するのではないかと考えられる。

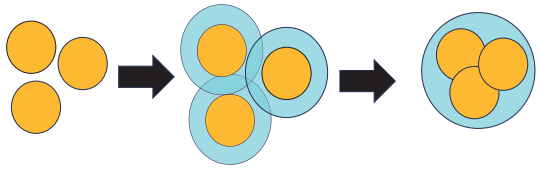


図1　ダマ発生のメカニズム

＜予備実験＞

仮説をダマのモデルを用いて検証する

【方法】

図2のようなアクリル板で上下をはさみ、2㎜の隙間から水が入る装置を作り水槽に沈めることにより、仮説にある粉末が塊状で水と触れるという状況を作り出す。このとき、アクリル板を上から見たときの粉末の様子は、ダマの断面の様子と考えることができる

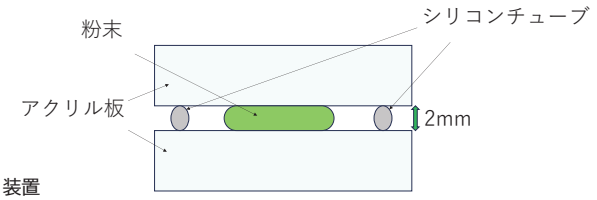
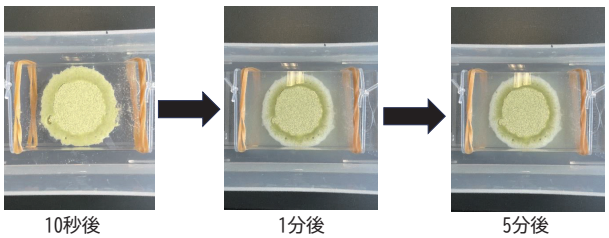


図2　装置

【結果】

写真からわかる通り、時間が経っても乾燥している粉末の部分の面積が変化していないことがわかった。



【考察】

水と触れず乾燥している粉末の面積が変化しなかったことから、粉末が塊状で水と触れるときにはダマの表面に水の侵入を拒む膜ができていると考えられるため、仮説は正しいと考えられる。

＜本実験1＞

水の入れ方を変えて、意図的に粉末を塊状で水と触れさせ、ダマが発生するのか検証する。

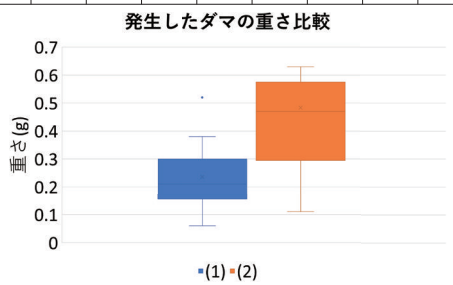
【方法】

①ZAVAS抹茶風味 11.2gと水 100mlを攪拌する
　この時の攪拌方法を2つに分ける
　　⑴100mlを1回で入れる
　　⑵50mlを2回に分けて入れる
②これらをそれぞれ装置１をかぶせてマグネチックスターラーの最小の力で攪拌する。
③攪拌されたものを茶こしでこし、ラップ(穴あき)をかけて水が蒸発するまで放置する
④その後シャーレに移し重さを量る
⑤これを9回ずつ行う

【結果】

回目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	平均
(1)	0.16	0.21	0.06	0.15	0.38	0.52	0.21	0.21	0.22	0,24
(2)	0.48	0.52	0.47	0.37	1.18	0.63	0,54	0,11	0,25	0,51

(g)



グラフより、(1)の箱ひげ図よりも(2)の箱ひげ図のほうが、数値が重い値の方に散らばっていることがわかる。

【考察】

結果より、(1)よりも(2)の粉末を塊状で水と触れさせたときのほうがダマができやすいと考えられる。

＜本実験2＞

シェイカーを用いた攪拌方法に近い攪拌方法を取れる装置2を用いて再度検証する。

【結果】

回目	1	2	3	平均
(1)	0.22	0.31	0.47	0.33
(2)	0.1	0.8	0.88	0.59

(g)

【考察】

結果より、装置2を用いて攪拌したときも(2)のほうがダマができやすいと考えられる。

＜結論＞

本実験1,2の結果が類似していることからシェイカーでの攪拌時でも、水を分けて入れたときのほうがダマができやすいと考えられる。

＜今後の展望＞

水を半分ずつ入れて実験を行ったが、結果に大きな差が見られなかった。そのため、水を3分の1ずつ入れるなど実験方法を変えて差を明確にしたい。また、装置の精度を上げていきたい。

＜ 参考文献＞

1.MP五協フード＆ケミカル.“ダマってなんだろう？～ダマができる原因と解決方法①～”多糖類.com.2024年5月14日 https://www.tatourui.com/trivia/trivia_vol.48,（参照2024-12-11）
2.ユニテックフーズ株式会社.“ダマを作らない増粘多糖類の溶解方法”食品開発ラボ.2024年5月1日 https://shokulab.unitecfoods.co.jp/article/detail193/,(参照2024-2-7)

SSH コース　課題研究論文

前代未聞の新燃料！バイオコークスの高効率化

千葉市立千葉高等学校　普通科（SSH コース）２年　秋葉　文香

1. 要約

In this research, I experimented to investigate the connection between the shape of biocoke and its burning time. Biocoke is a new solid fuel made from any photosynthetic plant. The purpose of this experiment is to find out the best shape to burn the longest. First, I investigated whether or not each burning time of two same shaped cylinders, compacting 100% cotton towel blanket depend on the style of placing. As a result, burning time of putting vertically cylinder was longer. Then I investigated the connection between the burning time and the surface area. In this experiment, a cylinder which had small surface areas burnt for a long time.

本研究ではバイオコークスの燃焼時間と形状の関係を調べる実験を行う。バイオコークスとは、光合成に起因する全ての植物から形成可能な新型固形燃料のことだ。これの燃焼時間がより延びる形の条件や傾向を明らかにすることを目的とする。まず、同じ円柱のサンプル（粉砕した綿 100%のタオルケット 3 g を押し固めたもの）でも燃やす際の置き方で燃焼時間に差異があるのか調べる実験を行った。この結果、縦置きのサンプルの方が燃焼時間は長いことがわかった。次に表面積が異なるサンプルを完全燃焼させ、燃焼時間に差異があるか調べる実験を行った。この実験からは、表面積が小さいサンプルの方が燃焼時間は長いことがわかった。

2. 序論

光合成に起因する全ての植物から形成可能であり、さらに環境保護へのメリットもあるとされる「バイオコークス」は未だ世界各国で研究の最中にある期待の新燃料だ。また、従来のコークスの代替品として利用が検討されており、製鉄や発電分野において利用が可能であると言われている(HATCH 編集部 2022；井田 2024)。研究当初は主に熱量を高めることを目的とした実験を行っていた。しかし、バイオコークスの利用分野においては、長時間燃焼が持続されることが求められるため、熱量よりも燃焼時間を延ばすことができれば、さらに実用化が進むのではないかと考えた。そこで本研究では、形状や表面積に着目し燃焼時間との関係性を調べた。同じ質量のバイオコークスでも、形状等を工夫することで燃焼時間を延ばせれば、より効率良く運用することができる。材料の質量を変えずに、燃焼時間を延ばす方法を模索することを本研究の目的とした。

3. 基礎実験

(1) 目的

同質量のサンプルの横幅を変えて燃焼させる際、得られる熱量や燃焼時間の変化を調べる。
サンプルの燃焼の傾向を調べる。

(2) 使用器具

綿 100%のタオルケット、万力、円柱の筒、マッチ、ピンセット、ビーカー、ビーカースタンド、蒸発皿、金網、温度計、えごま油（2.1J/(g･K)）

(3) 方法

① 下記の 3 タイプ円柱型のサンプル（綿 100%のタオルケット 3 g を加圧したもの）を作る。加圧には万力を使用し、人力で回せる限界まで圧縮させた。

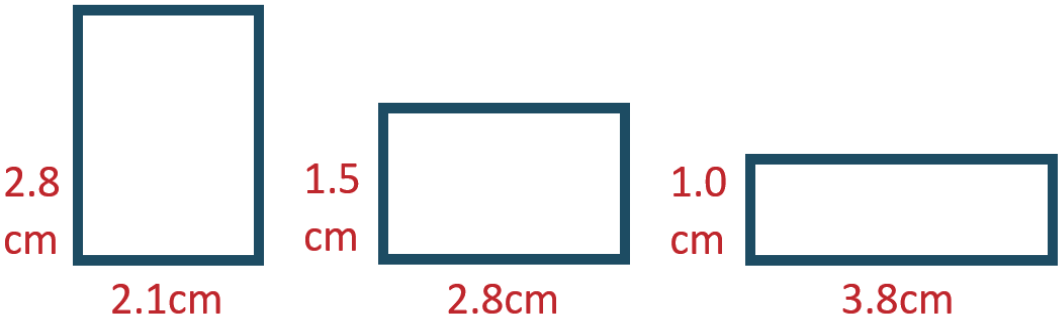


図 1　3 タイプについてのサンプル外寸

② えごま油（2.1J/(g･K)）を 5 mL（4.55 g）ビーカーに入れる。その後、サンプルを写真の装置を用いて燃焼させ、えごま油の上昇温度、燃焼時間、熱量を計測した。熱量は下記の式で算出した。
「2.1J/(g･K)・えごま油の質量（4.55 g）・上昇温度＝熱量（J）」
各サンプルにつき 2 回試行した。

図 2　実験装置

図 3　蒸発皿上のサンプル

4. 基礎実験結果

表１　基礎実験１回目結果

横幅	2.1cm	2.8cm	3.8cm
燃焼時間	297s	433s	260s
上昇温度	66.5℃	66.2℃	64.0℃
熱量	621.44J	618.64J	598.08J

表２　基礎実験２回目結果

横幅	2.1cm	2.8cm	3.8cm
燃焼時間	316s	387s	201s
上昇温度	72.4℃	62.7℃	21.1℃
熱量	676.58J	585.93J	197.18J

・燃焼時間は横幅 2.8 cm 型が最も長かった。
・得られる熱量が最も高かったのは横幅 2.1 cm のものであった。
・2 回目の実験の際、横幅 3.8 cm 型は不完全燃焼だった。
・質量以外の体積や密度などの条件を揃えなければ、対照実験としては不十分であることがわかった。
・今回の実験で用いた装置や算出方法では、誤差が大きく正確な熱量が求められていないことがわかった。

5. 基礎実験考察

3.8 cm 型が不完全燃焼となってしまったのは、他のサンプルよりも蒸発皿に触れている部分が広く、酸素と十分に触れ合わなかったことが原因だと考えられる。実験結果の信憑性を高めるためにはサンプルが酸素に触れる面積が等しくなるように設定する必要がある。

また、熱量の誤差が大きかった理由として、気温などの影響や、えごま油の温度上昇以外に熱が使われたことが関係していると考えられる。学校内で用意できる装置では、より正確に熱量を算出することが困難だと判断したため、今後は燃焼時間による比較を行うことにした。

6. 実験①　サンプルの置き方による燃焼時間の差異

(1) 目的

同じ体積、密度の円柱型のサンプルの置き方のみを変えて燃焼させた際、燃焼時間に差異があるのか調べる。

(2) 仮説

使用するサンプルは全く同じものであるため、置き方の違いが燃焼時間に影響を与えることはない。

(3) 使用器具

綿 100%のタオルケット、万力、円柱の型、マッチ、ピンセット、三脚、ガラスシャーレ、金網

(4) 方法

① 下記の円柱型のサンプル（綿 100%のタオルケット 3 g を加圧したもの）を作る。
加圧には万力を使用し、人力で回せる限界まで圧縮させた。

図 4　サンプル外寸と実物

② 圧縮方向に対して地面が垂直、もしくは平行になるように設置したサンプルを、それぞれ図 7 の装置を用いて完全燃焼させ燃焼時間を計測した。サンプルの上部中心に着火し内部の火が完全に消えたとき計測終了とした。その後、燃焼後のサンプルに再度着火し、完全燃焼しているかどうか確認をした。この実験を各設置方法につき 5 回試行した。

図 5　圧縮方向に対して
垂直の設置

図 6　圧縮方向に対して
平行の設置

図 7　実験装置

7. 結果①

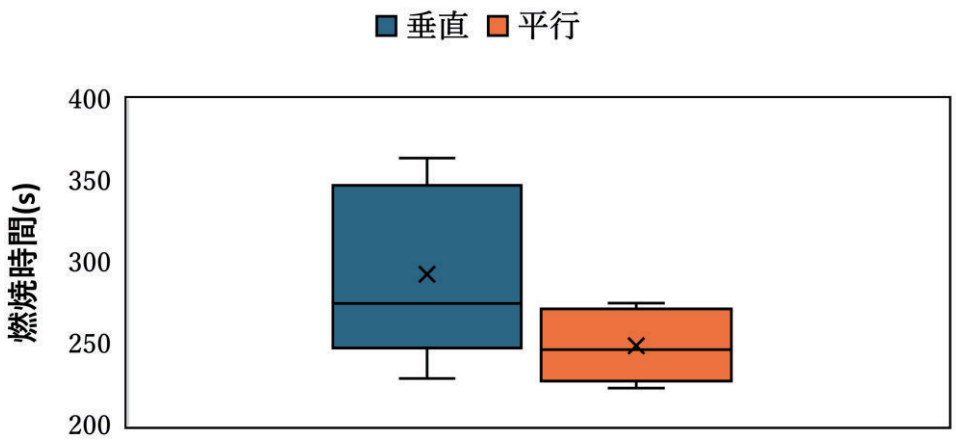


図 8　設置方法と燃焼時間の関係

・圧縮方向に対して垂直に設置したサンプルの方が燃焼時間は長い傾向があった。
・圧縮方向に対して平行に設置した場合は、サンプルが広がったり割れたりすることがあった。
・不完全燃焼になることはなかった。

8. 考察①

垂直設置では圧縮させた際と同じ方向に重力が加わるため形状が安定していたと考えられる。崩れた横置きのサンプルは表面積等が変わっているため、単純に縦置きの方が長期燃焼に優れていると判断することはできない。

実際のバイオコークスのように機械を使用し圧縮したサンプルを用いた場合、燃焼時間に差が見られない可能性も考えられる。

また、それぞれの置き方で不完全燃焼が起きていないことから、サンプル全体に酸素が十分に触れていたことがわかる。そのため、表面積で燃焼時間を比較することができると考えられる。

9. 実験②　表面積と燃焼時間の関係

(1) 目的

表面積の差異がサンプルの燃焼時間にどのように影響しているか調べる。

(2) 仮説

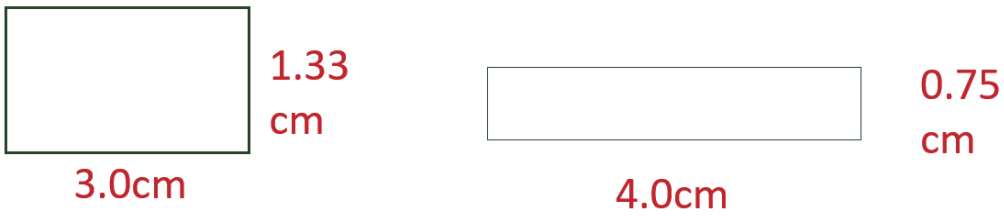
表面積が大きいサンプルは、酸素に触れる面積も大きくなるため燃焼時間が短く、一気に燃え尽きてしまうのではないか。

(3) 使用器具

実験①と同様

(4) 方法

① 下記の 2 パターンの円柱型のサンプルを作る。新たに加圧の基準を設け、1 g ずつ 3 回に分けて圧縮することとし、1 回目及び 2 回目は万力で 1 分間、3 回目のみ 3 分間圧力を加えた。



パターン 1（表面積 8.49π cm^2）　　パターン 2（表面積 11.0π cm^2）

図 9　各サンプルと表面積

② それぞれのサンプルを圧縮方向に対して地面が垂直になるように設置し、実験①と同じ方法、器具を用いて燃焼時間の計測を行った。この実験を各サンプルにつき 5 回試行した。

10.　結果②

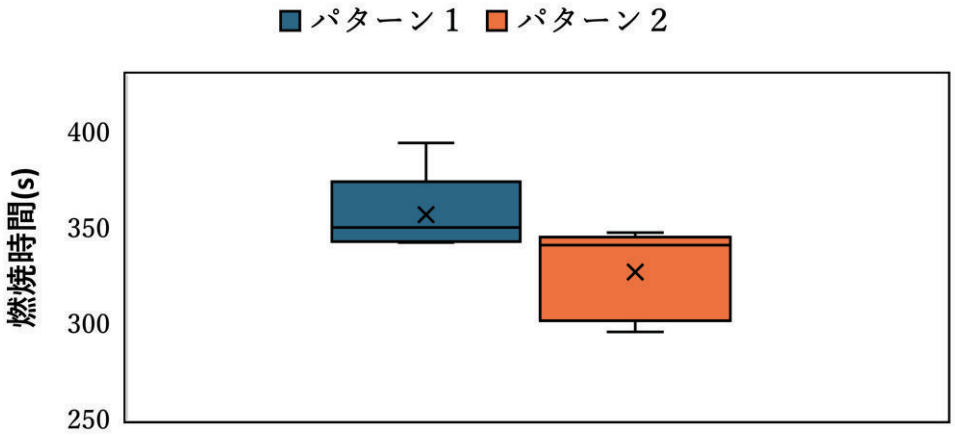


図 10　表面積と燃焼時間の関係

・表面積が小さいパターン 1 の方が燃焼時間は長いことがわかった。
・また、表面積と燃焼時間の間には関係性があることが示唆された。

11.　考察②

表面積が大きいとその分サンプルに触れる酸素の量も増加するため、完全燃焼までの時間が短くなると考えられる。長時間燃焼が可能なバイオコークスにするためには、触れる酸素量を最低限とし、じわじわと燃焼する仕組みにすることが重要であるのではないか。バイオコークスの高効率化の一つの工夫として、表面積を小さくすることが含まれると考えられる。

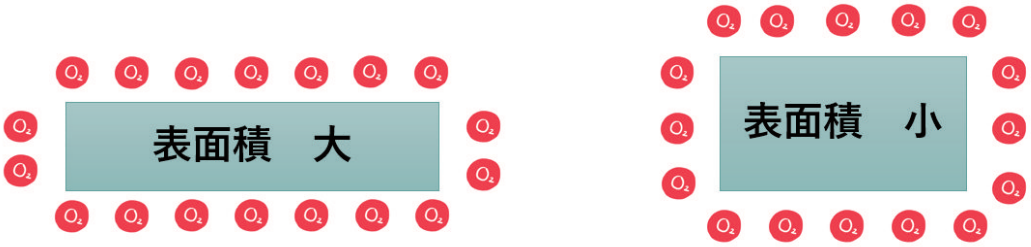


図 11　表面積と触れる酸素量の概念図

12.　今後の展望

試行回数を増やし、燃焼前後のサンプルの質量変化を調べるなど、より多様な視点で同実験を行う。燃焼時間は表面積に反比例するのか、サンプルパターンを増やして調べる。表面積以外の観点にも着目し、燃焼時間との関係性を調べる。

13.　謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教官の三坂先生を始めとした多くの先生方から終始熱心なご指導をいただきました。また発表会では、各大学、研究機関の方々から様々なご助言をいただきました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

14.　参考文献

(1) 近畿大学次世代再生可能エネルギー
https://www.kindai.ac.jp/science-engineering/research/forefront-research/toprunner02/
(2024/7/5 参照).
(2) HATCH 編集部バイオマスを使ったエコなエネルギー「バイオコークス」とは？
https://shizen-hatch.net/2022/11/24/bio-coke-carbon-dioxide/(2024/7/5 参照).

マグヌスフライヤーをより高く飛ばす方法

How to make the Magnus Flyer fly higher

千葉市立千葉高等学校　普通科（SSH コース）２年　石井　佑

私は、ソフトボール部に所属しており、飛ばし方がボールの投擲に似た、マグヌスフライヤーという玩具に興味を持った。マグヌスフライヤーは、バックスピンをかけることで上昇しながら飛ぶ玩具でマグヌス効果によって揚力を得ている。マグヌス効果とは、回転体が進行方向に対して垂直な力を受ける現象を指し、野球の変化球を投げる際にも用いられる。しかし、うまく飛ばすのにはかなり力が必要で、幼児などが投げるのは難しい。そこで、本研究では、マグヌスフライヤーをより軽い力でも飛ばせるように、マグヌス効果によって受ける力が物体の回転速度に比例するという点に着目し、回転速度が大きくなるような形状を調べる。研究を行うにあたり、私は、羽の幅が小さいほど、回転速度が大きくなるという仮説を立て、羽の幅が違うモデルを作成して飛ばし、各モデルの回転速度を求めた。今後は、これを基に理論通りに回転速度が揚力に比例するのかを検証することを予定している。

I belong to softball club so I got interested in a toy, Magnus Flier. How to throw it is similar to softball. A Magnus Flier flies using the magnus effect which is created by applying backspin. The magnus effect is a hydrodynamic effect on rotating bodies. Baseball curve-ball is a famous example. However, generating Magnus effect requires to some force which is difficult for some children to create. Therefore, I considered improving the toy to be able to throw it with less power. Also, the force generated by the magnus effect is proportional to rotational speed. From this perspective, the purpose of this study is to research the shape with the highest rotational speed. I made a hypothesis that the smaller the blade width is, the higher the rotation speed will be. To confirm this, I made some models with different width blades and recorded each rotational speed. Based on date, I'm planning to verify whether the lift force is proportional to rotational speed.

１.はじめに

1.1 本研究の背景と目的

皆さんは、マグヌスフライヤーという玩具を知っているだろうか。でんじろう先生によって紹介されたこの玩具は、バックスピンをかけて飛ばすことで上昇する。また、円盤に板が刺さったような簡単な形状をしているため、作製も容易で、シンプルな分、改良の余地も多くある。そこで私は、本研究の目的を、より高く飛ぶマグヌスフライヤーを考案することとした。

1.2 マグヌス効果の原理

先行研究により、マグヌス効果の仕組みは、すでにわかっている。原理を説明するうえで、下図のような、時計回りに回転しながら、左に向かって水平に飛んでいる物体を考える。このとき、空気には粘性があるため、物体の周りを流れる空気の流れは、物体の回転と同じ向きに流れている部分 A では加速し、反対向きに流れている部分 B では減速する。ここで、ベルヌーイの定理(式１)が働くことで、速度が大きい A の部分では、圧力が小さくなり、速度が小さい B の部分では、圧力が大きくなる。この圧力差によって、物体が進行方向に対して垂直方向に力を受ける現象をマグヌス効果という。(丸山祐一 2009「マグヌス効果の物理的メカニズムについて」)

式１

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_1 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

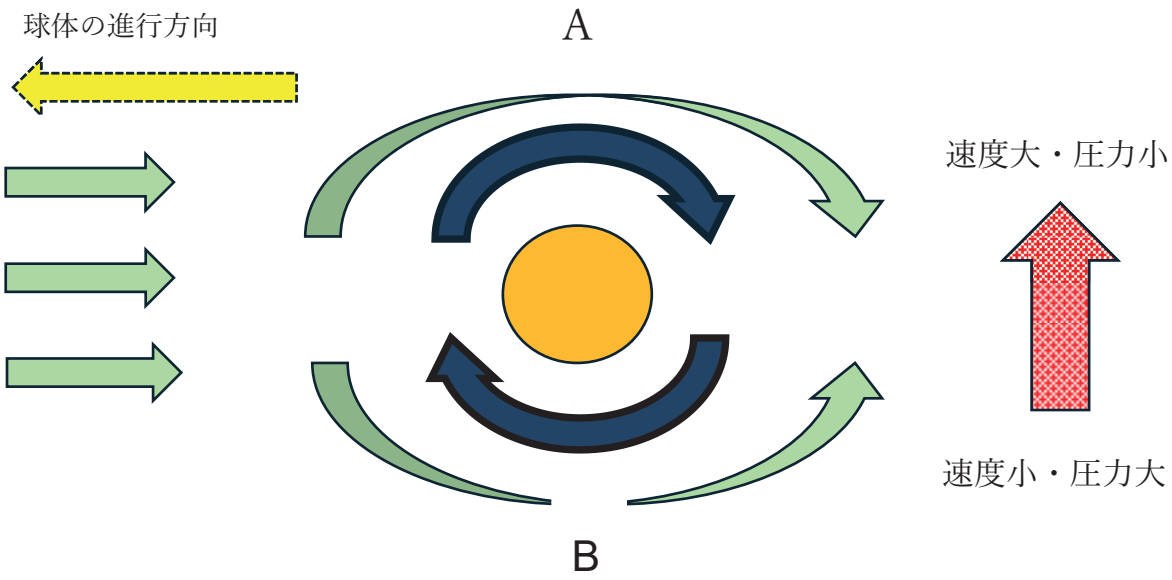


図 1. 左向きに進行する回転体にかかるマグヌス効果の模式図

1.3 本研究の実験方針

マグヌス効果についての論文は既に存在しており、原理はわかっているが、実験にはどれも野球のボールや筒のようなものを用いており、マグヌスフライヤーに関しての論文は見当たらなかった。先行研究がなく、大まかな方針や実験に用いる装置がわからない。そのため、まずはマグヌスフライヤーの形状や大きさを変えて比較し、マグヌス効果に影響しそうな条件を絞ると同時に発射装置の考案も進めた。その後、予備実験をもとに、どのような形状がより大きい揚力を得ることができるのかについて仮説と検証を行う。

2.発射装置についての検討

実験を行うにあたって、より安定してマグヌスフライヤーを飛ばすために、マグヌスフライヤーの発射装置を検討した。

発射装置①は、カタパルト型発射装置である。カタパルトはマグヌスフライヤーを投げるときの人の肘から先の動きに似ており、その点、優秀だといえる。この発射装置の問題点は、マグヌスフライヤーを水平に飛ばすことが難しいことである。水平に飛ばせないと、揚力で上昇したのか、単に斜めに飛んだのかわからず、揚力の大きさを求めることができなくなってしまう。

発射装置②は、回転しているマグヌスフライヤーに人為的に風を送る装置である。この装置では、マグヌスフライヤーは、回転運動のみを行うため、マグヌス効果以外の流体力学のことをあまり考慮しなくてもよいという利点がある。この装置の問題点は、回転するマグヌスフライヤーを一点にとどめておくことが難しく、実際に飛ぶマグヌスフライヤーを再現しづらいことだ。

発射装置③は、輪ゴムを用いた発射装置である。

この輪ゴム発射装置は、マグヌスフライヤーの円盤の部分に小さい切れ込みを入れ、そこに輪ゴムを引っ掛けて飛ばす。この装置の優れたところは、第一に、高い回転速度でマグヌスフライヤーを発射できる点だ。回転速度が大きいと、得られる揚力も大きくなり、回転軸のぶれも抑えられ、回転の様子の観察が容易になる。第二に、マグヌスフライヤーを水平に飛ばせることだ。これによって、揚力の導出が可能になる。この装置の問題点は、ゴムの劣化や、個体差であるが、同日に複

数回の実験を行うなどの工夫で誤差を減らせる可能性がある。

実際に飛ぶマグヌスフライヤーを再現することに重点を置くため、本研究では、発射装置③を採用する。

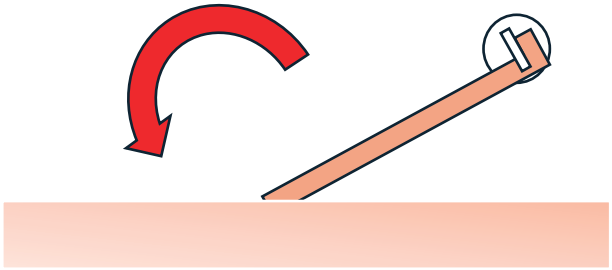


図 2. 発射装置①の模式図

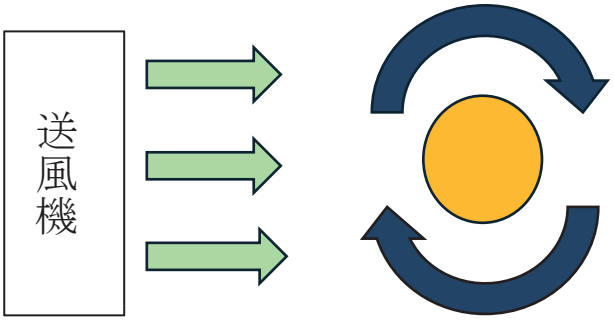


図 3. 発射装置②の模式図

図 4. 発射装置③

＊写真１の右端のクリップは写真を撮るために使用したものであり、クリップではうまく飛ばすことができなかったため、本研究では手を使った。

３.予備実験１－１

3.1 目的

以降の実験の方針を決めるために、まずはマグヌスフライヤーのサイズを変えて、軌跡や飛距離を調べる。

3.2 仮説

サイズが大きい方が揚力を受けられる面積が大きくなり、より遠くまで飛ぶことができるのではないか。

3.3 実験方法

厚紙製のマグヌスフライヤーのモデル①(円盤の半径 5.5 cm、羽の寸法 17×6.6 cm)・モデル②(円盤の半径 2.75 cm、羽の寸法 8.5×3.3 cm)を作製し、それぞれ 20 回ずつ手で飛ばして回転の様子や軌跡、飛距離の違いを動画で撮って観察する。

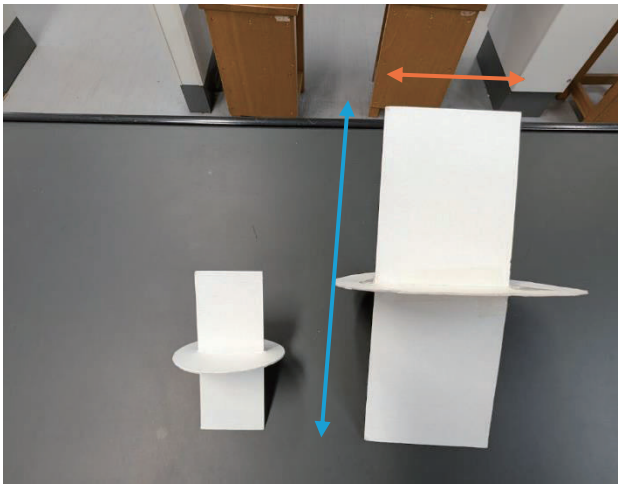


図 5. 予備実験１－１で使用したモデル

＊以後、図 5 の長方形の板のような部分を「羽」、羽が刺さった円盤のような部分を「円盤」と呼ぶ。また、羽の長辺(青色両矢印)を「羽の長さ」、羽の短辺(橙色両矢印)を「羽の幅」と呼ぶ。

3.4 結果

表 1 はマグヌスフライヤーの飛距離を示す。

表 1. 予備実験１－１の結果

	平均飛距離〔cm〕	最長飛距離〔cm〕	最短飛距離〔cm〕
モデル①	353.4	386	328
モデル②	363.4	404	320

また、モデルごとの軌跡にも違いが見られた。

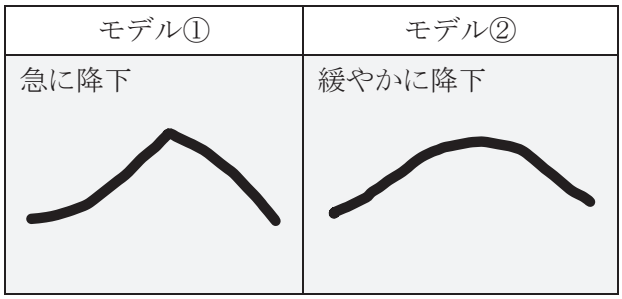


図 6. モデル別のマグヌスフライヤーの軌跡
＊進行方向は左

3.4 考察

表 1 より、仮説とは異なり、小さいモデルの方が平均飛距離は長いという結果になった。軌跡から見てわかる通り、大きいサイズのモデル①は、モデル②に比べて最高地点からの降下が急である。このことから、サイズが小さいモデル①の方が大きいモデル②に比べてマグヌス効果による揚力を長い時間受けることができると考えられる。

４．予備実験１－２

4.1 目的

羽の幅の違いで、どのような変化が起こるかを観察する。

4.2 仮説

予備実験１－１の結果より、羽の幅が狭いモデルの方が広いモデルに比べて周速が大きくなり、よりマグヌス効果を受けることができるのではないか。

4.3 実験方法

羽の幅が違う 2 つの厚紙製のマグヌスフライヤーを作り、それぞれモデル①(円盤の半径 4 cm 羽の寸法 5×14 cm)、モデル②(円盤の半径 4 cm、羽の寸法 3×14 cm)とする。そして、2 つのモデルをそれぞれ 20 回ずつ手で飛ばして、飛んでいる様子や軌跡、飛距離を動画でとって観察する。

4.4 結果

表 2 はマグヌスフライヤーの飛距離を示す。

表 2. 予備実験１－２の結果

	平均飛距離〔cm〕	最長飛距離〔cm〕	最短飛距離〔cm〕
モデル①	**338.8**	**391**	**285**
モデル②	**353.2**	**396**	**287**

また、軌跡にも予備実験１－１と同様にモデル①は上昇した後急激に降下し、モデル②は緩やかに降下するという特徴が見られた。

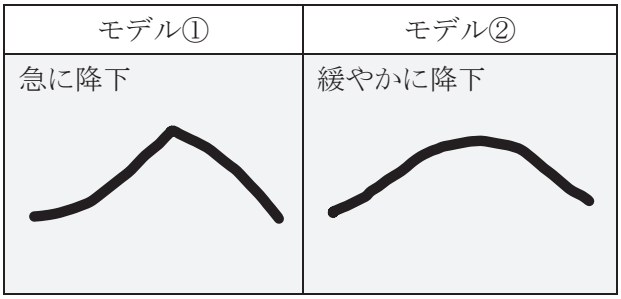


図 7. モデル別のマグヌスフライヤーの軌跡
＊進行方向は左

4.5 考察

表 2、図 7 からわかる通り、羽根の幅が狭いモデルの方がマグヌス効果を受けて長い距離を飛んでいる。このことから、羽の幅が狭いモデルの方が、周速が大きく、よりマグヌス効果を得られると考えられる。しかし、周速について詳しい値を出すことができていないため、今後の実験で算出したい。

５．予備実験１－３

5.1 目的

予備実験１－１、予備実験１－２で着目した、マグヌスフライヤーの周速が、羽の幅によってどれくらい変わるのかを調べる。

5.2 仮説

羽の幅が狭いモデルの方が広いモデルに比べ、慣性モーメントが小さいため、より周速は早くなるのではないか。

5.3 実験方法

厚紙を 2 枚重ねて作った羽の幅が違う 3 つのマグヌスフライヤーのモデルを、羽の幅が狭い順にモデル①(羽の幅 2.5 cm)、モデル②(羽の幅 3.0 cm)、モデル③(羽の幅 3.5 cm)とする。これを、切り幅 3.0 mm の輪ゴムで 2 回ずつ飛ばし、400 fps のハイスピードカメラで羽の周速を記録する。このとき、ゴムの伸びは、自然長 10 cm のものを 43 cm まで伸ばした 33 cm で統一した。

5.4 結果

結果は以下の通りになった。

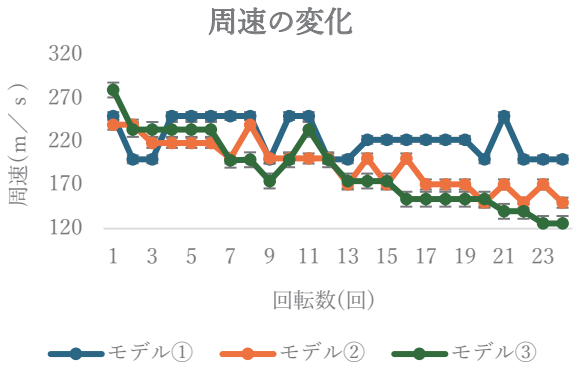


図 8. 25 回転するまでの周速の変化

＊グラフ 1 の周速は小数第二位を四捨五入し、π で割ったものを使っている
＊周速の求め方は本資料後半の付録に記載
＊エラーバーは標準誤差

表 3. 25 回転するまでの周速の変化

	発射直後〔cm/s〕	１０回転目〔cm/s〕	２５回転目〔cm/s〕
モデル①	250π	250π	200π
モデル②	240π	201π	150π
モデル③	280π	200π	126π

＊小数点以下は四捨五入

5.5 考察

図 8、表 3 からわかる通り、発射直後は同じような周速で回転していたが、10 回転目を過ぎたあたりでモデル②、モデル③が減速し始め、25 回転目では、モデル①との差が 1.5 倍ほどにまで広がってしまった。このことから、発射直後は、周速に大きな差がなく、同じように上昇するが、羽の幅が広いモデルの方が、周速の減少速度が速く、マグヌス効果を受けられる時間が短いため、羽の幅が狭いモデルの方が長い時間マグヌス効果を受けてより高く飛ぶと考えられる。

また、今回の実験では、400 fps のハイスピードカメラで記録をしたが、ブレが多く、グラフもギザギザの値をとってしまった。そのため、次の実験では、1200 fps まで解像度を上げて記録をとることにする。

６．実験１－１

6.1 目的

予備実験１－３で得られたデータをもとに、最も高くまで飛ぶマグヌスフライヤーの羽の幅を調べる。

6.2 仮説

より周速が大きく、長い時間高い周速を維持できたモデルが、最も高く飛ぶのではないか。

6.3 実験方法

厚紙を 2 枚重ねて作った羽の幅が違う 4 つのモデルをそれぞれ羽の幅が狭い順に、モデル①(羽の幅 2.0 cm)、モデル②(羽の幅 2.5 cm)、モデル③

(羽の幅 3 cm)、モデル④(羽の幅 3.5 cm)とし、質量はすべて 5.6 g で統一した。それらを切り幅 6 cm のゴムでそれぞれ 5 回ずつ飛ばして 1200 fps のハイスピードカメラで撮影し、周速と上昇した高さを調べる。このとき、ゴムの伸びは、自然長が 8.0 cm のものを 40.0 cm まで伸ばした、32.0 cm で統一した。

6.4 結果

結果は以下の通りになった。

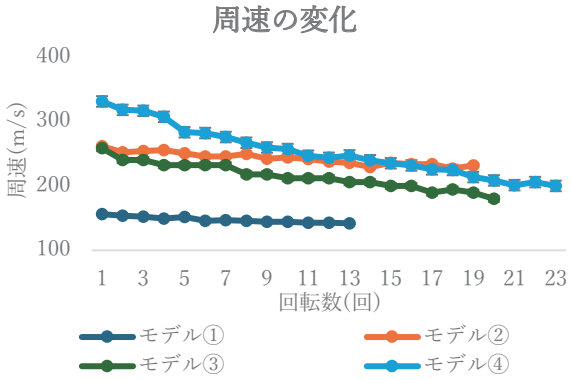


図 9. 周速の変化

＊グラフ 2 の周速は小数第二位を四捨五入し、π で割った値を使っている

＊エラーバーは標準誤差

表 4. モデルごとの上昇した高さ

	平均〔cm〕	最大〔cm〕	最小〔cm〕
モデル①	**23.2**	**37.0**	**10.0**
モデル②	**26.2**	**42.8**	**20.0**
モデル③	**26.3**	**50.9**	**8.0**
モデル④	**38.9**	**43.9**	**32.3**

＊上昇した高さは小数第二位を四捨五入した

＊上昇した高さの求め方は本資料後半の付録に記載

＊モデル②・③は最高地点が画角に収まらなかったため、画角の中で上昇した高さを出した

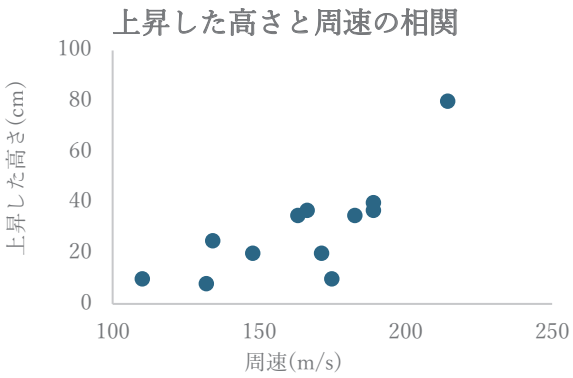


図 10. マグヌスフライヤーが上昇した高さと周速の相関

＊平均周速は、発射直後から見切れる、または着地するまでの周速の平均

＊グラフ③の平均周速は、小数第二位を四捨五入し、π で割った値を使っている。

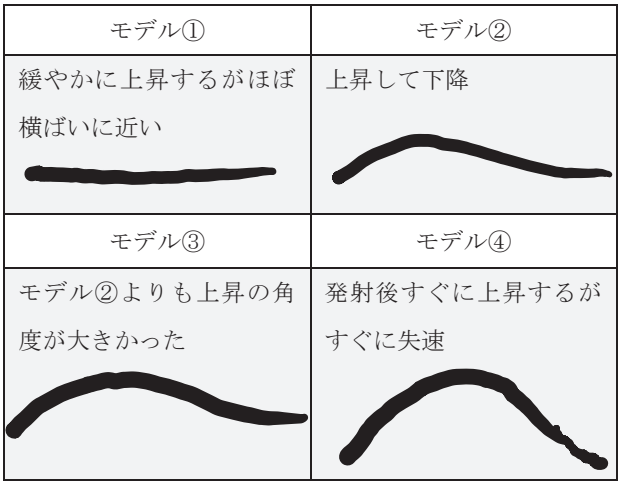


図 11. ハイスピードカメラの画角内のマグヌスフライヤーの軌跡　＊進行方向は左

6.5 考察

図 9 より、羽の幅が広いモデルの方が周速の減速が速く、狭いモデルの方が周速を維持していることがわかる。また表 4 より、モデルごとの上昇した高さの平均は、羽の幅が広いモデルの方が、数値が大きい傾向が見受けられた。

図 10 より、周速に対する上昇した高さにも相関がみられ同じモデルでも周速が速いときの方が上昇した高さが高かった。各モデルの軌跡としては、図 11 にある通り、羽の幅を広くすると上昇

の角度が大きくなるが、山の位置が手前になり飛距離が出にくい傾向があった。

6.6 結論

本研究では、マグヌスフライヤーの上昇にかかわる要素の一つとして、羽の幅を変えることで生じる周速の大小や持続性の違いによって上昇する高さや軌跡に差が出ることがわかった。

マグヌスフライヤーの羽の幅を広くすると上昇する角度が急になり、高く飛ぶが、周速の減速が速く飛距離が短くなる傾向がある。

7．今後の展望

本実験では、ゴムを使った装置を用いてマグヌスフライヤーを飛ばしたが、劣化やゴムごとの弾性力の違いから、再現性を高くするにも限界がある。そのため、より正確なデータをとるためには、より再現性の高い発射装置を考案・導入していかなくてはならない。また、本研究では、マグヌスフライヤーの羽の幅のみに着目したが、羽の形状などもまだ改良の余地があると思う。

8．謝辞

本研究の遂行にあたり、指導教官として始終多大なご指導を賜った、千葉市立千葉高等学校地学科山田和洋先生に深謝します。また、SSH 担当の先生方皆様には、本研究の遂行にあたり多大なご助言、ご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

9．参考文献

1) 石錦良三 (2007.9).「図解解説流体力学」ナツメ社

2) 丸山祐一 (2009) 「マグヌス効果の物理的メカニズムについて」『日本航空宇宙学論文集』Vol.57，No.667，pp.309-316

3) ベルヌーイの定理とは？図解でわかりやすく解説 | 機械設計エンジニア 1 年目の教科書 https://nanamemo.net/bernoullis-principle/ (2024/10 参照)

付録

1．周速の求め方

本研究では、ハイスピードカメラの分析でわかった、羽が一回転するのにかかるコマ数から一秒間あたりに何回転するかを求め、そこに円盤の円周をかけることで算出した。

2．角速度の求め方

本研究では、ハイスピードカメラの分析でわかった、羽が一回転するのにかかるコマ数から一秒間あたりに何回転するかを求め、そこに２π をかけることで算出した。

3．上昇した高さの求め方

マグヌスフライヤーが実際に飛んだ高さと、カメラに映る目盛との誤差をなくすために、図形の相似を利用した。

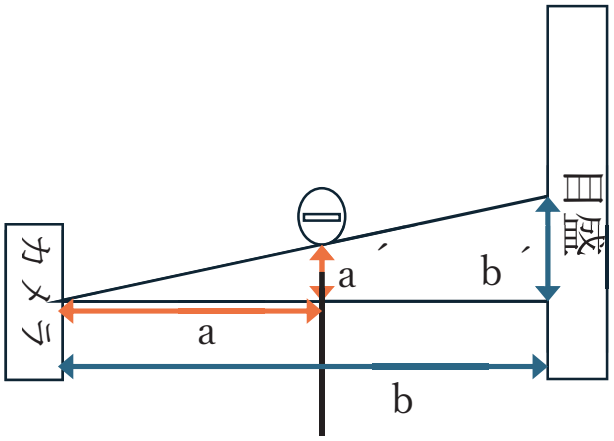


図 12. 上昇した高さの求め方

まずは、カメラからマグヌスフライヤーが飛ぶ場所までとカメラから目盛までの距離、そして床からカメラレンズの中心までの長さをあらかじめ計測しておく(カメラからマグヌスフライヤーが飛ぶ場所までとカメラから目盛までの距離は、それぞれ a、b と置く)。その後、実際にカメラで撮影したマグヌスフライヤーの最高地点の高さとカメラの差に、a/b をかけ、モデルの最高地点がカメラの高さより高ければ、カメラの高さに算出した値を足し、逆に低ければ、引くことで正確な最高地点が求められる。上昇した高さは、この高さから、発射時の高さを引くことで求めることが可能だ。

4．マグヌスフライヤーの改良

予備実験１－１、１－２では、厚紙 1 枚でマグヌスフライヤーを作製したが、厚紙 1 枚では強度が十分ではなく、湿気にも弱いため、羽や円盤が反ってしまうことに悩んでいた。そこで、この問題の解決のために、3D プリンターでのモデル作製を実施した。3D プリンターでのモデル作製は、モデルごとの差が小さく、湿気などによる変形にも強いため、データの定量化に適している。しかし、実際に作製・発射してみたところ、問題点もあることがわかった。

初めに、厚紙と同じような条件にするため、円盤と羽の厚みを 1.0 mm に設定し作製したが、耐久性がなく、数回の試行で欠けてしまった。強度を上げるため、2.0 mm に変えたが、重すぎて、うまく飛ばなかった。また、一つのモデルの作製に 1～2 時間かかり、失敗することも多々あったため、本研究では採用しなかった。

本研究では、3D プリンターでのモデル作製の代わりに、厚紙を 2 枚重ねることでモデルの強度を上げたが、質量と強度のバランス調整や、ゴムをより弾性力の強いものに変更するなどの工夫をすれば、3D プリンターの活用が可能だと思う。

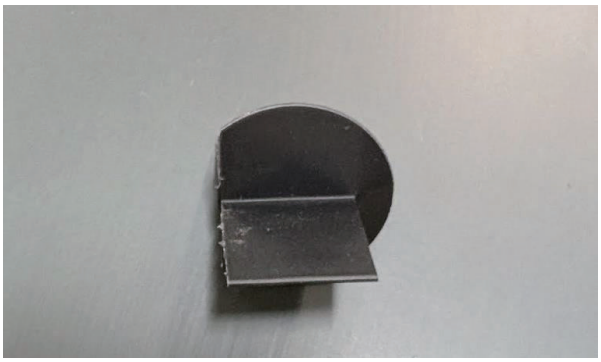


図 13. 破損した３D プリンターで
作製したモデル

アンチバブルの性質と界面活性剤の関わり

千葉市立千葉高等学校　普通科（SSH コース）２年　大村　奈柚子

1. 要約

My research is about anti-bubbles, which are called underwater soap bubbles. To create anti-bubbles, I suck the solution of the surfactant into a straw and drop it in the solution. Although anti-bubbles are used in experiments for elementary school students, the essential conditions to make anti-bubbles are not clear. Therefore, this study aims to examine the conditions under which anti-bubbles can be made with a detergent or sodium dodecyl sulfate, a component in surfactants. In this experiment, I used a dish detergent sold in stores. In the first experiment, I increased the amount of the detergent of a solution to see how we could make anti-bubbles easier. In the second experiment, I increased the amount of solution drops and measured the diameter of the anti-bubbles. As a result, the success rate of creating anti-bubbles did not change significantly by the different percentages of the concentration. It was also found that when I dropped the larger amount of solution, the larger anti-bubbles were created. I also experimented to find out the concentration between the concentration of the solution with sodium dodecyl sulfate how I make anti-bubbles easily. As a result, I couldn't make anti-bubbles if the concentration was too low or too high. Therefore, I found that the concentration of the aqueous solution was related to the conditions to create anti-bubbles. As for the future outlook, I will examine the conditions to create anti-bubbles using other chemicals.

アンチバブルとは、界面活性剤を含んだ水をストローで吸い取り、滴下した際にできる「水中シャボン玉」である。アンチバブルは小学生の実験に使われるにも関わらず、できる条件が明らかではない。そのため、本研究では洗剤の場合と界面活性剤の成分のドデシル硫酸ナトリウムを使用した場合について、アンチバブルができる条件を調べることを目的とする。洗剤での水溶液の濃度とアンチバブルのできやすさ、また水溶液の滴下量とアンチバブルの直径について実験を行った。結果としては、洗剤では濃度の違いによってアンチバブルのできやすさが大きく変わることはなかった。また、水溶液の滴下量が多いほどアンチバブルが大きくなることがわかった。最後に、ドデシル硫酸ナトリウムでの水溶液の濃度とアンチバブルのできやすさについて実験した。結果として、濃度が低すぎても高すぎてもアンチバブルはできなかった。したがって、アンチバブルができるための条件に水溶液の濃度が関係することがわかった。今後の展望としては、他の薬品も用いてアンチバブルのできる条件について調べていきたいと考えている。

2. 序論

＜研究動機＞

アンチバブルは水中にできるシャボン玉と知られており、小学生や中学生の自由研究に使われている。しかし、文献によってアンチバブルができる条件や実験方法に違いがみられたため、この研究を通して、それらを明らかにする必要があると考えた。

＜目的＞

本研究では、アンチバブルができる条件と実験方法を明確にすることを目的としている。また、市販の洗剤と、界面活性剤の成分の一つであるドデシル硫酸ナトリウムをそれぞれ用いた場合でのアンチバブルができる条件を比較する。

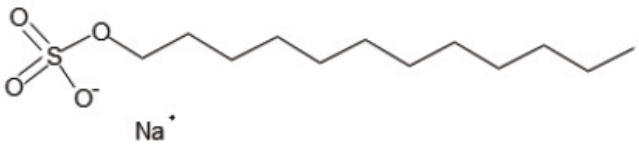


図 1. ドデシル硫酸ナトリウムの構造式 [1)]

3. 原理

界面活性剤を水に溶かし、その溶液を吸い取って滴下することで、界面活性剤水溶液の親水基と疎水基の間に空気の膜が生じるために、アンチバブルができる。シャボン玉とアンチバブルの違いとして、液体または空気の膜であるかということや、膜の外が空気か液体かということが挙げられる。

⑴ 界面活性剤水溶液を吸い取り、その溶液を滴下する。
⑵ お互いの疎水基同士が触れ合い、水を弾くことで空気の膜が形成される。
⑶ そのまま水中に落ちていくと水中にアンチバブルができる。

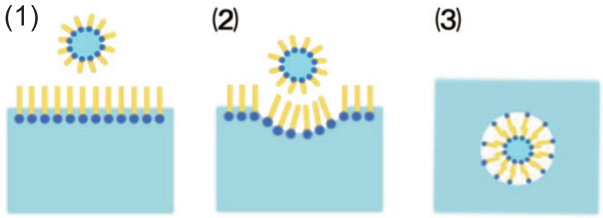


図 2. 空気膜ができる様子（● が親水基、— が疎水基）

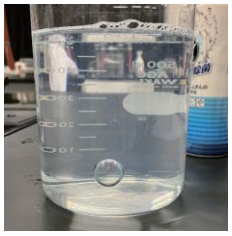


図 3. 実際にできたアンチバブル

4. 予備実験

⑴ 予備実験 1　洗剤と水道水を用いたときのアンチバブルのできやすさと濃度の関係

＜目的＞

水道水と市販の洗剤を用いた場合の、アンチバブルと界面活性剤水溶液の濃度の関係を調べ、アンチバブルが最もできやすい界面活性剤水溶液の濃度を見つける。

＜実験操作＞

① 100 mL ビーカーに実験室の水道水 100 mL を入れた。
② 市販の洗剤を滴下し、ゆっくりと混ぜた。洗剤には「JOY」を使用し、滴下量を 5,9,10,20 滴として、それぞれの濃度におけるアンチバブルのできやすさを調べた。

＜結果＞

アンチバブルは洗剤を 10 滴入れたときが最もできやすかった。また、5 滴や 20 滴ではアンチバブルはほとんどできず、9 滴では 10 滴のときよりもアンチバブルができにくかった。

⑵ 予備実験２　洗剤と水道水を用いたときのアンチバブルの崩壊時間

＜目的＞

ストローで吸い取る界面活性剤水溶液の量を変えた場合にアンチバブルの崩壊時間がどのように変化するかを調べる。

＜実験操作＞

① 100 mL メスシリンダーに実験室の水道水 100 mL を入れた。
② 市販の洗剤を 10 滴分入れて混ぜた。洗剤には「JOY」を使用した。
③ ストローに 0.5~5.0 cm まで 0.5 cm 間隔で印をつけ（図 4)、界面活性剤水溶液の滴下量を 0.5 cm 間隔で増やして各々滴下した。この操作をそれぞれ 3 回行い、アンチバブルが崩壊するまでの時間の平均を求めた。

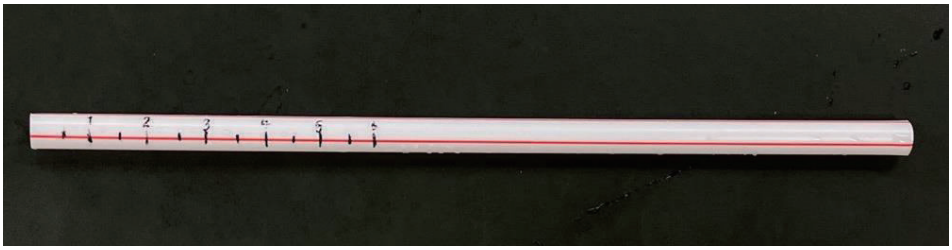


図 4. 印をつけたストロー

＜結果＞

結果として以下のグラフが得られた。また、吸い取る界面活性剤水溶液の量を増やすと大きなアンチバブルができることを確認できた。

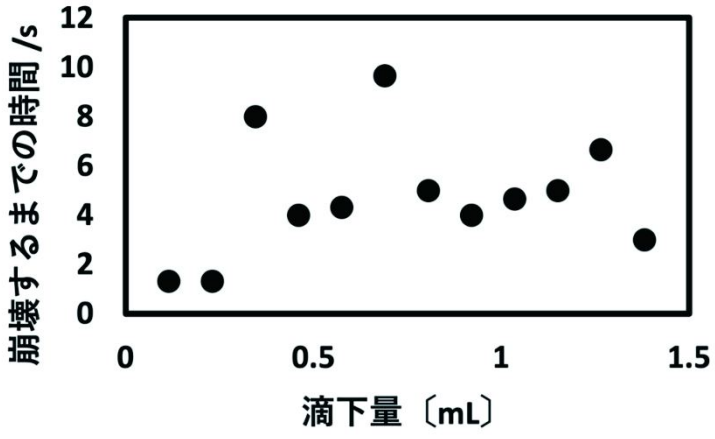


図 5. ストローの長さとアンチバブルが崩壊するまでの時間

＜考察＞

ほとんどのアンチバブルが水面に付着していた泡に触れると崩壊していたため、アンチバブルは泡と触れることが一つの崩壊する要因だと推測できる。アンチバブルは親水基が外側に向いているのに対し、泡は疎水基が外側に向いているため、親水基と疎水基は結合できないことから、アンチバブルは泡に触れると崩壊してしまうのだと考えられる。

⑶ 予備実験３　硬度の異なる水とドデシル硫酸ナトリウムの様子

＜目的＞

ドデシル硫酸ナトリウムを水道水、イオン交換水、硬水にそれぞれ溶かしたとき、どのような違いがみられるかを調べる。

＜動機＞

ドデシル硫酸ナトリウムは陰イオン性界面活性剤であるため、Mg^{2+}や Ca^{2+}を多く含む水（硬水）中では難容性の沈殿を生じて洗浄力が低下してしまう可能性が高い。そのため、本実験を行っていく上で、水道水にドデシル硫酸ナトリウムを入れても沈殿が生じないかどうかを検証することとした。

＜実験操作＞

① 100 mL ビーカーに水道水、イオン交換水、硬水をそれぞれ 100 mL 入れた。

② ドデシル硫酸ナトリウム 0.288 g（0.01 mol/L）を入れて混ぜた。（硬水には「Contrex」を使用した。）

＜結果＞

左から、水道水、イオン交換水、硬水の順に並べている。

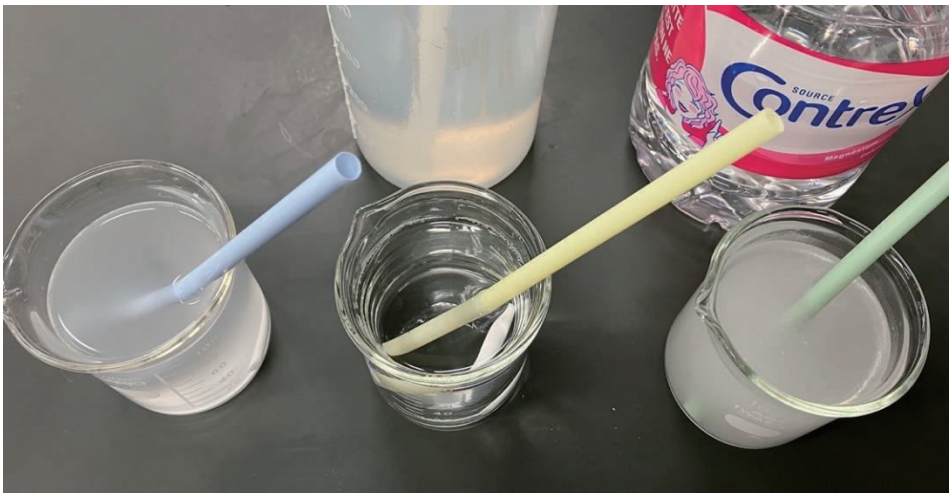


図 6. ドデシル硫酸ナトリウムを溶かした様子

硬水には多くの金属イオンが入っているため、ミセルが沈殿し水溶液が白濁した。同じように、水道水でもミセルが沈殿し、水溶液が白濁してしまった。しかし、イオン交換水は水中のイオンを除去しているため、ドデシル硫酸ナトリウムが金属イオンと反応することはなく、水溶液は沈殿を生じなかった。したがって、以下の実験ではすべてイオン交換水を使用して、実験を行った。

5. 本実験

⑴ 実験１　洗剤とイオン交換水を用いたときのアンチバブルのできやすさと濃度の関係

＜目的＞

アンチバブルと界面活性剤水溶液の濃度の関係を調べ、アンチバブルが最もできやすい界面活性剤水溶液の濃度を見つける。

＜実験操作＞

① 100 mL ビーカーにイオン交換水 100 mL を入れた。

② 市販の洗剤をイオン交換水に滴下し、ゆっくりと混ぜた。洗剤には「JOY」を使用し、滴下量を 1~12,17 滴として、それぞれの濃度におけるアンチバブルのできやすさを調べた。

③ ストローを用いて界面活性剤水溶液を吸い取り、それぞれの濃度で 20 回滴下した。（吸い取った水溶液の 1 滴当たりの質量は 0.024 g、体積は 0.0027 mL だった。）

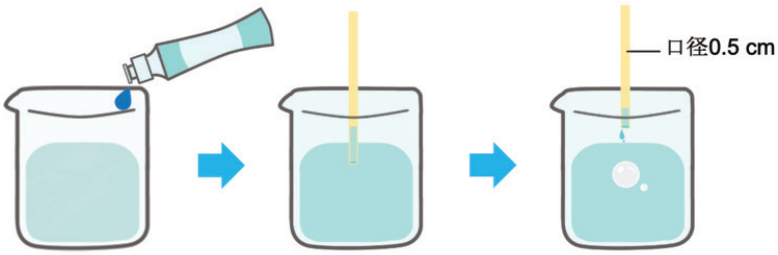


図 7. 実験操作

＜仮説＞

予備実験 1 では実験室の水道水と、この実験と同じ洗剤を使って実験した際、水道水 100 mL に対して 10 滴の洗剤を滴下した場合の濃度が最もアンチバブルができやすかった。そのため、イオン交換水を用いた場合でも、イオン交換水 100 mL に対して 10 滴の洗剤を滴下したとき、最もアンチバブルができやすくなると考えた。

＜結果＞

結果として以下のグラフが得られた。

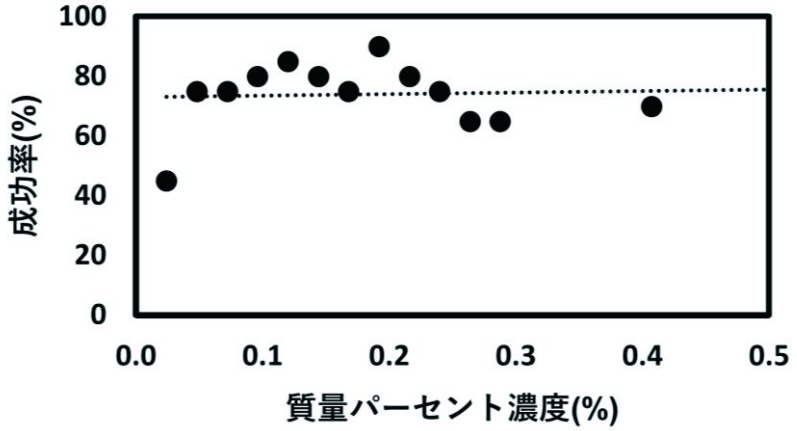


図 8. 水溶液の濃度とアンチバブルのできやすさ

洗剤 1 滴を入れ混ぜたときの濃度ではアンチバブルができる確率が 50%を下回ったが、洗剤の滴下量を増やしていったところ、2 滴目以降のアンチバブルができる確率に大きな違いはみられなかった。

＜考察＞

この実験とともに、試験的にイオン交換水 100 mL に対して 30 滴以上の洗剤を入れたところ、アンチバブルができる確率は、ほとんど上記の結果と変わらなかった。そのため「JOY」とイオン交換水を使用した場合には、水溶液の濃度によってアンチバブルのできやすさは変わらないと考えられる。もしくは、今回の実験で滴下した洗剤の量の範囲が小さかったために、アンチバブルのできやすさが変わらなかったと考えられる。

⑵ 実験２　洗剤とイオン交換水を用いたときのアンチバブルの大きさと滴下量の関係

＜目的＞

ストローで界面活性剤水溶液を滴下する量とアンチバブルの直径の関係から、アンチバブルの大きさがどのように変化するかを調べる。

＜実験操作＞

① 500 mL ビーカーにイオン交換水 500 mL を入れた。
② 市販の洗剤を 20 滴分入れて混ぜた。洗剤には「JOY」を使用した。
③ 予備実験 2 の 0.5~5.0 cm まで 0.5 cm 間隔で印をつけたストロー（図 4）を使用し、界面活性剤水溶液の滴下量を 0.5 cm 間隔で増やして各々滴下する操作を 3 回行った。
このとき、アンチバブルができる確率は実験１の結果とほとんど変わらなかった。

＜仮説＞

予備実験２において、吸い取る界面活性剤水溶液の量が多いと大きなアンチバブルができることがあった。そのため、吸い取る界面活性剤水溶液が多くなるほど、大きなアンチバブルができるのではないかと考えた。

＜記録方法＞

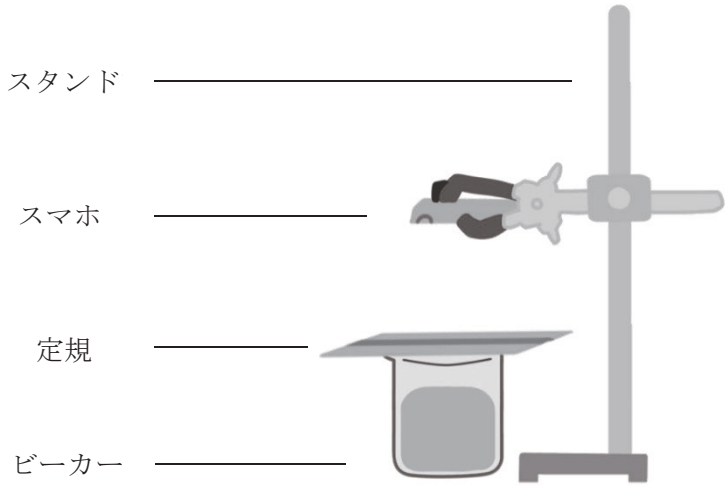


図 9. 記録方法

界面活性剤水溶液を入れたビーカーの上に定規を設置し、スタンドで固定したスマホで上からアンチバブルを録画した。上から録画した動画を用いてアンチバブルの大きさを調べたため、得られたデータは、実際のアンチバブルの直径よりも大きくなっている。

＜結果＞
結果として以下のグラフが得られた。

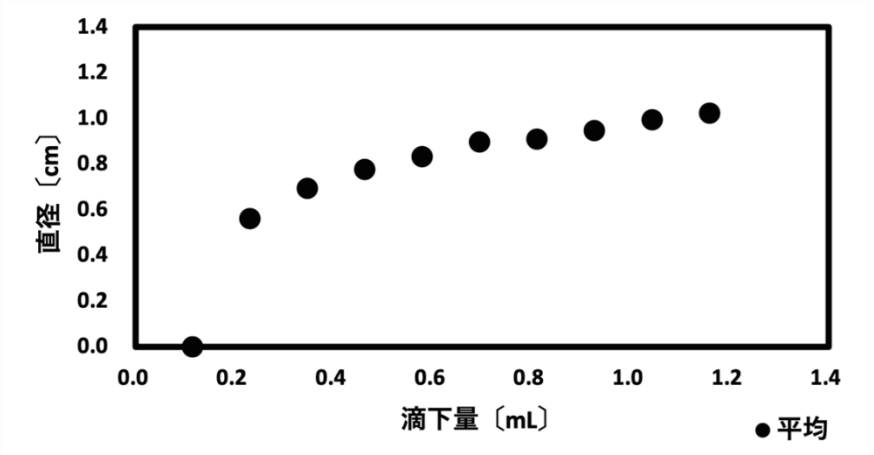


図 10. 水溶液の滴下量とアンチバブルの直径

0.5 cm のときの滴下量の場合でのアンチバブルのできる確率は小さかったが、それ以降の滴下量ではアンチバブルのできる確率に違いはみられなかった。

＜考察＞
界面活性剤水溶液の滴下量が多いほど、アンチバブルができる際に、より多くの界面活性剤水溶液を含むため大きなアンチバブルができやすいと考えられる。よって、大きなアンチバブルを作るためには、界面活性剤水溶液の濃度に関わらず、水溶液の滴下量を多くすることが重要であると推察できる。

⑶ 実験３　ドデシル硫酸ナトリウムとイオン交換水を用いたときのアンチバブルのできやすさと濃度の関係
＜目的＞
界面活性剤の成分の一つとして知られているドデシル硫酸ナトリウムを使用して実験を行い、アンチバブルができる適切な濃度を見つける。

＜実験操作＞
① 100 mL ビーカーにイオン交換水 100 mL を入れた。
② 表 1 の値に従って 0.001 mol/L~0.010 mol/L の濃度となるように、それぞれドデシル硫酸ナトリウムを入れ混ぜた。
③ ストローを用いて界面活性剤水溶液を吸い取り、それぞれの濃度で滴下した。

表 1. ドデシル硫酸ナトリウムの濃度と質量

モル濃度〔mol/L〕	質量パーセント濃度 (%)	100mL あたりの質量〔g〕
0.001	0.0288	0.0288
0.002	0.0576	0.0577
0.003	0.0864	0.0865
0.004	0.1152	0.1154
0.005	0.1440	0.1442
0.006	0.1727	0.1730
0.007	0.2015	0.2019
0.008	0.2302	0.2307
0.009	0.2589	0.2595
0.010	0.2876	0.2883

＜結果＞

結果として以下のグラフが得られた。

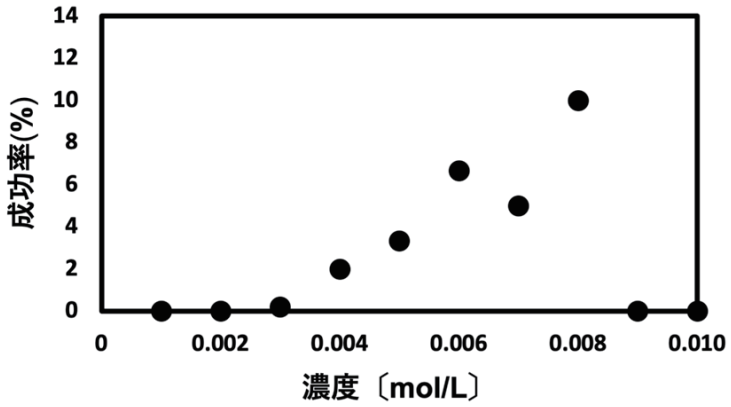


図 11. ドデシル硫酸ナトリウムの濃度とアンチバブルのできやすさ

＜考察＞

ドデシル硫酸ナトリウムとイオン交換水を使用した場合には、アンチバブルができる条件として 0.003~0.008 mol/L の濃度の間であることが考えられる。この濃度の間となった理由として、ドデシル硫酸ナトリウムの臨界ミセル濃度 0.008 mol/L を境にアンチバブルができなくなったことから、ミセルが多くなりすぎるとアンチバブルができる上での妨げになると考えられる。ドデシル硫酸ナトリウムを使用した場合と、「JOY」を使用した場合のアンチバブルのできやすさが全く異なるため、アンチバブルのできやすさは界面活性剤の種類によって決定づけられると推測できる。界面活性剤の種類は陰イオン性界面活性剤だけでも多く存在するため、ドデシル硫酸ナトリウムだけでなく他の陰イオン性界面活性剤の成分を使用することでアンチバブルができる条件について細かく調べられるのではないだろうか。

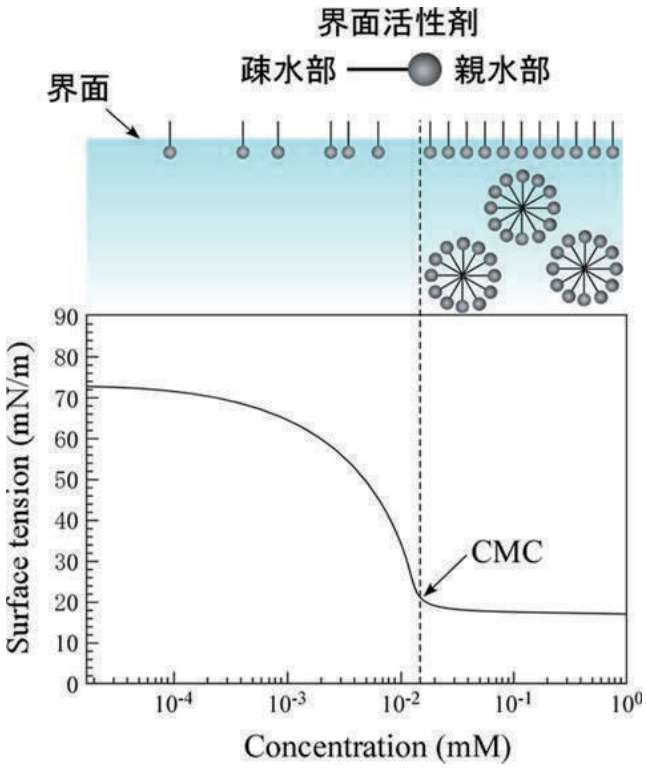


図 12. 表面張力による臨界ミセル濃度（CMC）の決定 [2)]

臨界ミセル濃度とは、界面活性剤水溶液において疎水基の会合によって、親水コロイドであるミセルが形成され始める濃度のことである。界面活性剤は疎水基と親水基をもち、疎水基は水を避けるために界面活性剤の分子は界面活性剤水溶液の水面に集まる。界面活性剤の濃度が上昇していくと界面に分子が並ぶ隙間が無くなるため、モノマーの状態の界面活性剤の分子が水中へと入っていく。このとき、界面活性剤水溶液の表面張力はほぼ一定となる。臨界ミセル濃度を超えると、疎水基の会合により、モノマーの状態からミセルの状態となる。界面活性剤の濃度をさらに上昇させていくと、ミセルの大きさは変わらず、数が増えていく。

6. 今後の展望

アンチバブルができる条件を水溶液の滴下の仕方や、滴下するときの高さ、アンチバブルの割れ方のような観点に分けて実験し、アンチバブルができる条件をさらに明確にしていきたい。さらに、市販の洗剤とドデシル硫酸ナトリウムでの実験をさらに行い、他の陰イオン性界面活性剤の成分などを用いて、それぞれの薬品におけるアンチバブルのできやすさがどのように変化するか検証していきたい。特に、界面活性剤の疎水基の長さに着目して調べていきたいと考えている。また、アンチバブルの実験自体は小さな子どもでも簡単に楽しめるものである。しかし、その構造や界面活性剤には化学が大きく関わっている。そのため、アンチバブルができる条件を明らかにし、子どもの探究心につながる研究となれば、アンチバブルは人々が科学に関心を持つ機会となり得るだろう。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、加藤文孝先生を始めとした多くの先生方から終始熱心なご指導をいただきました。心から感謝いたします。発表会においては各大学、研究機関の方々から多くのご助言をいただました。最後に、本研究の遂行にあたり、快く実験に参加してくださった方々から多大なご助言、ご協力いただきました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

8. 出典

1) 富士フィルム和光純薬株式会社.分子生物学用試薬.ドデシル硫酸ナトリウム.
https://labchem-wako.fujifilm.com/jp/product/detail/W01W0119-1398.html（2025/04/21 参照）
2) 公益社団法人高分子学会.高分子分析計算科学の原理・技術とメーカーリスト.物性評価法.表面張力
(Surface Tension)測定
https://www.spsj.or.jp/equipment/news/news_detail_41.html（2025/04/21 参照）

9. 参考文献

・界面活性剤水溶液のモル濃度とアンチバブルの生成（千葉県立船橋高等学校）
https://www.chiba-c.ed.jp/funako/fttp_kousin/ssh/reserch/2019/2019_06p6.pdf（2025/04/21 参照）
・アンチバブルの継続時間について（茨城県立竜ヶ崎第一高等学校）
https://www.ryugasaki1-h.ibk.ed.jp/wysiwyg/file/download/18/2209（2025/04/21 参照）
・水がこぼれない!? 水中にシャボン玉!?（大阪教育大学わくわくかがく実験グループ）
https://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~chem09/wcg/FLPDF/p202001.pdf（2025/04/21 参照）
・水の中でプカプカ浮かぶシャボン玉を作ってみよう！（神戸市水道局）
https://kobe-wb.jp/kids/archive/syabon/（2025/04/21 参照）
・界面活性とミセル形成 2012.2（九州大学講義資料）
http://takahara.ifoc.kyushu-u.ac.jp/講義資料/表面化学 2012/2.界面活性とミセル形成 2012.pdf（2025/04/21 参照）

向かい風でめくれないレインコートのフード

千葉市立千葉高等学校　普通科（SSH コース）２年

小田　紗璃安　　中塚　結美

1. Abstract ／ 要約

When we ride a bicycle in a raincoat, the hood sometimes turns over because of head wind. Therefore, we started this research to find out the cause of the hood turning over and to find a way to make it difficult for the hood turn over. Our hypothesis is that the cause of turning over the hood is accumulated air pressure in the hood by the headwind. So, we thought that if we make a small hole in the hood, it will be easier for the air to escape, and the pressure of the hood will decrease, making it difficult to turn it over. In the experiment, we used a human head model, a raincoat hood, and a circulator, and we compared the flipping sizes in some cases. Not making a hole, making a hole in the back where air tends to accumulated, making a hole in the front where the air doesn't build up easily, and also, change the size of the hole and change the position of making a hole. As a results, the flipping size was the smallest when making the hole closer in front and the hole diameter was 4 cm. In conclusion, from the hydrodynamic point of view, it can be thought that the cause of the hood turning over is not the accumulated air pressure, but the pressure generated when the flowing air hits the hood. Also, it can consider that making a hole in front and make the size of a hole big makes it difficult for the hood to turn over.

レインコートを着て自転車に乗ると、向かい風によりフードがめくれてしまうことがある。そこで、フードがめくれる原因を解明し、めくれなくする方法を探ることを目的とし、本研究を行った。フードがめくれる原因は、フード内に空気が溜まり、その圧力で、押し上げるためであると仮説を立てた。そこで、フードに小さな穴を開け、空気の逃げ道を作ることで、空気が溜まるのを防ぎ、めくれなくなると考えた。本研究では、人の頭のモデルを作りレインコートのフードを被せ、サーキュレーターで風をあて、めくれた大きさを測定した。穴をあけない場合、空気が溜まりやすい奥に穴をあける場合、空気が溜まりにくい手前に穴をあける場合、また、穴の大きさも変え実験を行った。結果、フードの手前に直径 4 cm の穴を開けることでフードはめくれにくくなることが確認された。結論として、流体力学的観点から、フードがひっくり返る原因は、蓄積された空気圧ではなく、流れた空気がフードに当たったときに発生する圧力であると考えられる。また、手前に穴を開け、穴の大きさを大きくすることで、フードがひっくり返りにくくなると考えることができた。

2. 序論

レインコートを着たまま自転車に乗ると、フードがめくれることがある。そこで、向かい風を受けてもめくれないフードをつくれたら便利だと考えた。本研究では、レインコートのフードがめくれる原因を解明し、めくれにくくする方法を発見することを目的とする。仮説として、向かい風がレインコートの内部に溜まり、その圧力により、フードが押し上げられると考えた。そこで、フードに穴を開けて空気の逃げ道を作ることで、フードを押し上げる圧力を減らし、めくれにくくなると考え、検証することにした。

3. 実験装置

図 2 に装置図を示す。

〈実験装置〉

・サーキュレーター（電圧 13.44 V，風速 3.3 m/s）
・デジタルマルチメーター
・整風装置（図 1）
・球形のモデル（直径 100.0 mm、材質：発泡スチロール）
・レインコート（材質：ビニール）

図 1-1 整風装置、横から見た写真

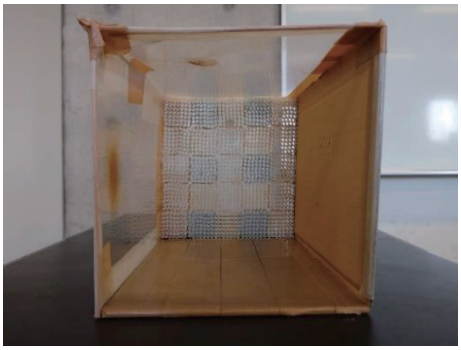


図 1-2 整風装置、縦から見た写真

図 2 装置図

4. 予備実験

4.1 予備実験 1　流れてきた空気が最も溜まる位置を調べる。

〈方法〉

レインコートのフードをモデルに被せ、正面からサーキュレーターで風をあてる。フードのめくれ具合を観察し、空気が最も溜まっている箇所を特定した（図 3）。

〈結果・考察〉

フードの奥が大きく膨らんで、フードがめくれた。よって、フードの奥に空気が最も溜まっていたことがわかった。

4.2 予備実験 2　フードに穴をあける前の、めくれた大きさを調べる。

フードがめくれた大きさは、モデルの先端（点 A）から、めくれたフードの頂点（点 C）に垂直におろした点（点 B）までとする（図 4）。

〈方法〉

フードに穴を開ける前に、フードのめくれた大きさを調べた。

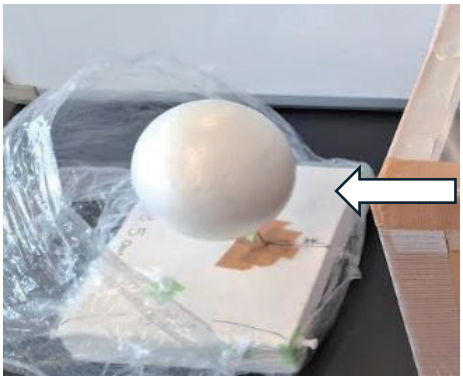


図 3 予備実験 1　めくれている様子

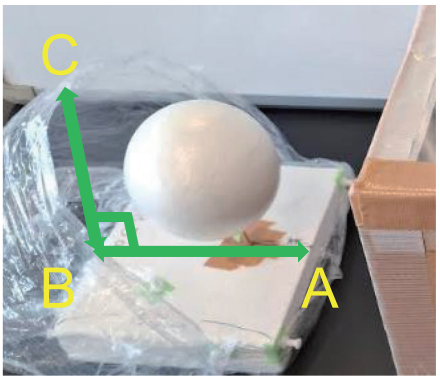


図 4 予備実験 2　めくれた大きさ

〈結果・考察〉

表 1 フードに穴を開けない場合のフードのめくれた大きさ

	平均	標準偏差
フードがめくれた大きさ（cm）	9.85	1.75

5. 実験

5.1 実験 1　穴の有無によるめくれ方の影響

〈方法〉

予備実験 1 から、最も空気が溜まっていたところに直径 2 cm の穴❶（図 5）を開け、めくれた大きさを予備実験と比較した。

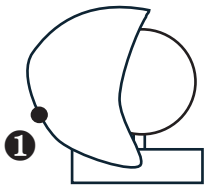


図 5 最も空気が溜まる位置に開けた穴❶

〈結果・考察〉

表 2 空気が最も溜まっていたところに直径 2 cm の穴を開けたときのめくれた大きさ

	平均	標準偏差
フードのめくれた大きさ（cm）	10.41	1.51

表 3 予備実験との比較

	平均	標準偏差
予備実験 2（穴なし）	9.85	1.75
実験 1（穴❶、直径 2 cm）	10.41	1.51

表 3 より、穴の有無による差異はほぼ見られなかった。これは、穴を開けた位置が、風の進路と一致しておらず、空気の逃げ道として機能しなかったものと考えられる。そこで、穴の位置を風の進路と一致する位置（手前）にして実験を行った（実験 2）。

5.2 実験 2　フードに開ける穴の位置によるめくれ方への影響

5.2-1

〈方法〉

穴の位置を穴❶より手前の❷（図 6）に変え（同じ直径 2 cm）、フードのめくれた大きさを予備実験、実験 1 と比較した。

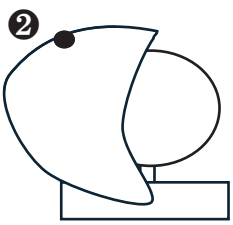


図 6 ❶の穴より手前の位置に開けた穴❷

〈結果・考察〉

表 4 穴の位置を実験 1 より手前にしたときの
フードのめくれた大きさ

	平均	標準偏差
フードのめくれた大きさ(cm)	8.61	0.66

表 5 予備実験、実験 1 との比較

	平均	標準偏差
予備実験（穴なし）	9.85	1.75
実験 1（穴❶、直径 2 cm）	10.41	1.51
実験 2（穴❷、直径 2 cm）	8.61	0.66

表 5 より、穴を手前に開けたとき実験 2、穴が奥のとき実験 1 と開けてないとき予備実験に比べて、めくれる大きさは小さくなった。(図 7) より、穴の位置を手前にした場合 (❷) は、風が穴を通り抜けるため、ぶつかった空気の圧力が減り、めくれにくくなったと考えられる。また、穴の位置が奥にあった場合（❶）は、そこには風が流れていないため、穴の影響を受けないことがわかる。

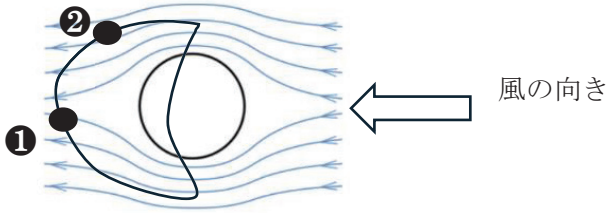


図 7「流体力学」によるフード内部の風の流れ

5.2-2

〈方法〉

穴❷よりも位置を 5 cm 手前(❸)に変え（図 8)、直径 2 cm の大きさで、めくれた大きさを予備実験、実験 2 と比較した。

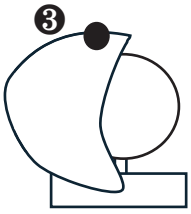


図 8 穴❷より位置を手前にした穴❸

〈結果・考察〉

表 6 穴の位置を実験 2-1 より手前にした
ときのフードのめくれた大きさ

	平均	標準偏差
フードのめくれた大きさ(cm)	7.77	0.79

表 7 予備実験、実験 2-1 との比較

	平均	標準偏差
予備実験（穴なし）	9.85	1.75
実験 2-1（穴❷、直径 2 cm）	8.61	0.66
実験 2-2（穴❸、直径 2 cm）	7.77	0.79

実験 2 のときと比較して、めくれた大きさが小さくなった。穴の位置が前であるほど風が穴を通って逃げるのが早いので、フードに加わる圧力が小さくなり、めくれにくくなったと考えられる。

5.3 実験 3　穴の大きさによる影響

5.3-1

〈方法〉

実験 2 の穴の位置(❷)のまま穴の大きさを直径 4 cm にし、予備実験、実験 2-1 とめくれた大きさを比較した。

〈結果・考察〉

表 8 穴の位置が手前で（実験 2 と同じ）直径 4 cm
の穴を開けたときのめくれた大きさ

	平均	標準偏差
フードのめくれた大きさ(cm)	7.40	0.77

表 9 予備実験、実験 2、実験 3 との比較

	平均	標準偏差
予備実験（穴なし）	9.85	1.75
実験 2-1（穴❷、直径 2 cm）	8.61	0.66
実験 3-1（穴❷、直径 4 cm）	7.40	0.77

穴の大きさが 2 cm のとき実験 2 と比べて、めくれた大きさが小さくなった。穴の位置を大きくしたことで、実験 2 と比べて、穴から通り抜ける空気の量が増え、フードにぶつかる空気による圧力がさらに減ったことで、めくれにくくなったと考えられる。

5.3-2

〈方法〉

穴❸の位置で穴の大きさを直径 4 cm に変え、めくれた大きさを予備実験、実験 2-2 と比較した。

〈結果・考察〉

表 10 穴の位置がより手前で（5.3-1 より手前)、直径 4 cm のとき

	平均	標準偏差
フードのめくれた大きさ(cm)	5.68	0.92

表 11 予備実験、実験 2-2 との比較

	平均	標準偏差
予備実験（穴なし）	9.85	1.75
実験 2-2（穴❸、2 cm）	8.61	0.66
実験 3-2（穴❸、4 cm）	5.68	0.92

基準、実験 2-2 と比較して最もめくれた大きさが小さくなった。穴をより手前に開けること、穴の大きさをより大きくすることで、風が穴を通って逃げるのがより早く、穴を通る風の量がより大きくなるので、めくれにくくなったと考えられる。

6. 考察

フードがめくれる原因は、フードの内側にあたる空気の圧力であると考えられる。そのため、フードの手前に穴を開けることで、穴の位置と風の進路が一致し、空気を外に逃がすことができ、フードめくれにくくなると考えられる。また、穴の大きさを大きくすることでより多くの空気を外に出すことができるため、フードにぶつかる空気の量を減らすことができ、めくれにくくなると考えられる。

表 12 すべての実験でのめくれた大きさの比較

	平均	標準偏差
予備実験（穴なし）	9.85	1.75
実験 1　（穴❶、直径 2 cm）	10.41	1.51
実験 2-1 （穴❷、直径 2 cm）	8.61	0.66
実験 2-2 （穴❸、直径 2 cm）	7.77	0.79
実験 3-1 （穴❷、直径 4 cm）	7.40	0.77
実験 3-2 （穴❸、直径 4 cm）	5.68	0.92

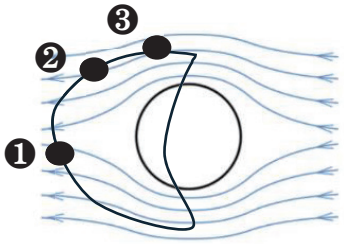


図 9 流体力学と穴の位置

7. 今後の課題

今回の研究で、レインコートのフードに穴を開けるとフードがめくれにくくなることが確かめられた。しかし、フードに穴を開けると、雨が中に入ってきて本来のレインコートの機能を果たさなくなる。そこで、穴ではなく通気性のよい生地にするなど対策を考えていきたいと思う。今後の課題は、この結果をどのように生かしていけば実用化ができるかを考えることである。

8. まとめ

・フードがめくれる原因はフードの内側にあたる空気の圧力である。
・風の進路に穴を開けると、フードがめくれにくくなる。
・穴の大きさは、大きいほどめくれにくくなる。

9. 謝辞

本研究の遂行にあたり、指導教官として終始多大なご指導を賜った、田崎先生に深謝致します。並びに千葉市立千葉高等学校 SSH 担当の先生方には、本論文の作成にあたり、適切なご助言を賜りました。ここに深謝の意を表します。最後に、物理の先生方には、物理室の使用にご協力くださいましたこと、ここに感謝の意を表します。

10. 参考文献

(1) 飯塚尚彦,基礎流体力学編集委員会、「基礎-流体力学」、産業図書株式会社
1989 年 5 月 23 日初版、pp.26-27,63-64
(2) https://vis-tech.site/air-resistance/
2025/5/22 最終閲覧

ペットボトルロケットで長い距離を飛ばす方法

～中の液体との関係性～

千葉市立千葉高等学校　普通科（SSH コース）２年　川野　一輝

1. 概要

The aim of this research is to clarify how the liquid inside of plastic bottle rocket's affect its distance. The reason why I tried to research it that when I searched for thesis about plastic bottle rockets, I realized that nobody researched about the liquid inside of the plastic bottle rockets. So, I got interested in it wondered why. Therefore, I decided to carry out my project focusing on the liquid density, water temperature and viscosity. First, I compared difference of the distance between water and saturated saline. Second, I compared difference of the distance between water and hot water. Third, I compare between water and sugar water about it. As a result, when I used liquid sugar water, distance was slightly shorter than water. With this result, I assumed when I want to make plastic bottle rocket fly far away, it's good to use liquids with lower viscosity than water such as benzene and hexane as liquid inside of plastic bottle rocket. However, these liquids are dangerous to the human body. So, I assume water is good for safely flying plastic bottle rockets far away.

本研究の目的は、ペットボトルロケットの中の液体が飛距離にどのような影響を与えるかを明らかにすることだ。研究を行おうとした理由は、ペットボトルロケットについての研究を調べていたとき、誰も「中の液体」に注目した研究を行っていなかったので、興味や疑問を持ったためだ。そのため、液体の密度、温度、粘度に注目した研究をしようと思った。研究方法としては、実験 1 では水と飽和食塩水の飛距離の差を比較した。また実験 2 では水と熱水、実験 3 では水と砂糖水の飛距離の差を比較した。結果としては、砂糖水を使った場合、飛距離がわずかに短くなった。この結果から、私はペットボトルロケットを遠くに飛ばすにはベンゼンやヘキサンなどといった、水より粘度が低い液体をペットボトルロケットの中の液体として用いるのが良いのではないかと考えた。しかし、これらの液体は人体に危険であるため、安全にペットボトルロケットを遠くに飛ばすには、水道水が良いのではないかと考える。

2. 序論

動機・目的

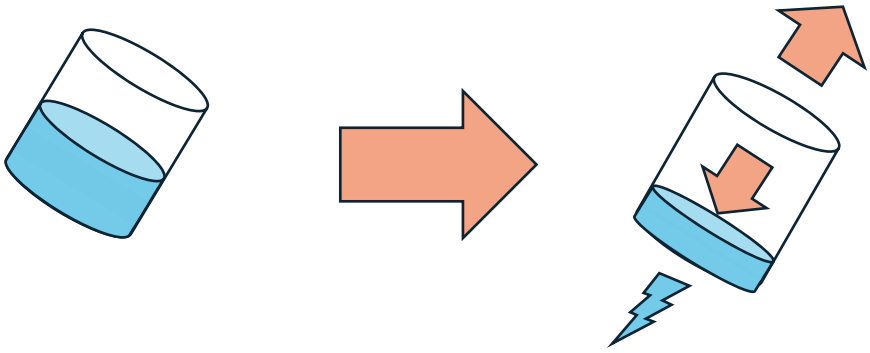
ペットボトルロケットに関しての先行研究を閲覧していた際、ペットボトルロケットの中の液体に関しての先行研究が確認できなかった。そのため、ペットボトルロケットの中の液体を変化させた際の飛距離への影響について、興味や疑問を抱いたため、この研究に取り組もうと思った。本研究の目的は、ペットボトルロケットに入れる中の液体の「密度」、「温度」、「粘度」を変化させて、これらがペットボトルロケットを遠くに飛ばす条件であるのかを解明するということだ。

ペットボトルロケットについて
ペットボトルロケットとは、炭酸飲料用のペットボトルと安定翼、シリコン製のトップによって作られる模型ロケットである。

ペットボトルロケットにおいての液体の役割について
・ペットボトルロケット内の圧縮された空気を逃さない役割
・強い推進力をペットボトルロケットが受けられるようにする役割
→空気よりも重い液体と空気が噴射口から同時に外部に出るため、ペットボトルロケットは空気だけの場合と比べて、より強い反作用を生み出すことができる。

原理

① ペットボトルロケットの中に水を入れ、空気入れによって圧縮された空気を加える。
② ストッパーが付随している発射装置にペットボトルロケットを設置する。
③ ストッパーを開放することにより、圧縮された空気が外気圧と同じ気圧になろうとする力に対する反作用が機体に働くことによって空へ飛ぶ。



実験の共通事項

・ペットボトルロケットには、本体に使用している 580 mL のペットボトルに対して、200 mL の液体を入れた。
・自転車専用の空気入れで 30 回空気を注入した。
・射出角度は、水平に対して 45°に定め、飛ばす方角を北東に固定した。
・評価方法として、実験を屋外で行ったことから、外部からの影響を可視化するため、飛距離に加えて、「滞空時間」も用いた。
・飛距離は、発射台からペットボトルロケットが着弾したトップの先端までの水平距離とした。
・飛距離の計測方法としては、2 本のメジャーを使い、三平方の定理を利用して値を出した。
・滞空時間においては、発射装置のレバーを引いたときにストップウォッチで計り始め、ペットボトルロケットが着弾したのを目視で確認した瞬間に止めた時間とした。

左の写真は研究の全ての実験で用いたペットボトルロケット本体と、このペットボトルロケット専用の発射装置、自転車専用の空気入れである。

評価方法について

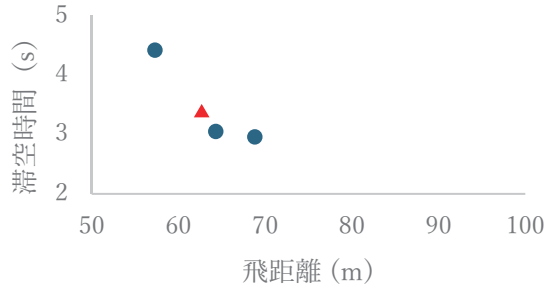


図 1 実験 1 の記録とその平均値（液体：水）

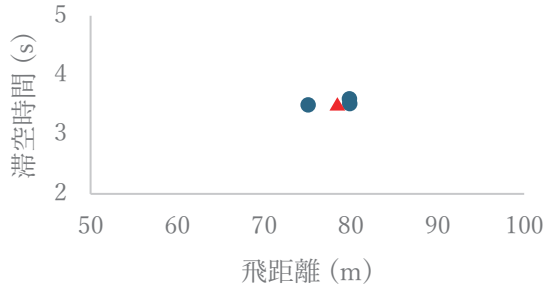


図 2 実験 2 の記録とその平均値（液体：水）

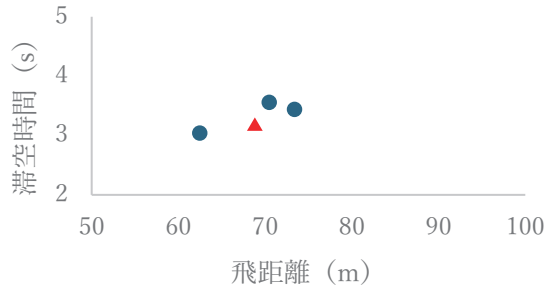


図 3 実験 3-1 の記録とその平均値（液体：水）

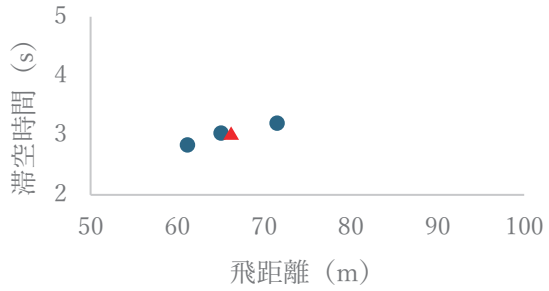


図 4 実験 3-2 の記録とその平均値（液体：水）

この 4 種類の散布図の丸の点はそれぞれのデータ、三角の点はそれらのデータの平均値を表している。これらの散布図は同じ実験内容において、飛ばした水のときの記録とそれぞれのデータの平均値をまとめたものである。散布図から、全ての記録は各データの平均から±6.31 m 以内に位置しているのが確認できる。ゆえに、水による飛距離の影響は（3 回計測した際の）平均値と比べ、±6.31 m であると考えられるため、比較する 2 種類の液体の平均値の差が±6.31 m 以下のとき、中の液体による影響は出なかったとみなした。

3. 実験器具

自転車用空気入れ
ペットボトルロケット本体
50 m メジャー
飽和食塩水（1.20 g/cm^3）
砂糖水 1（22.5 mPa･s）
ストップウォッチ
発射装置
水道水（1.00 g/cm^3、21℃、1.0 mPa•s）
熱水（70℃）
砂糖水 2（180 mPa•s）

※単位 mPa•s とは粘度の単位であり、値が大きいほど、その物体の流動性が低いことを示している

4. 研究概要

［実験 1］液体の密度を変化させた際の飛距離の影響を調べる

目的

ペットボトルロケットの中の液体の密度を変化させて飛距離が変化するのかを調べる。

方法

この実験では、ペットボトルロケットの中の液体として水道水、飽和食塩水を用いて実験を行った。この実験で用いた溶液の密度は、水道水が 1.00 g/cm^3 であり、飽和食塩水が 1.20 g/cm^3 である。

〈実験の手順〉

① 実験時の気候を計測する。
② ペットボトルロケットに 200 mL の水を入れ、発射装置に取り付ける。
③ 自転車用の空気入れで 30 回空気を入れる。
④ 発射装置のレバーを引き、ペットボトルロケットを飛ばし、滞空時間を計測する。
⑤ メジャーを用いて、飛距離を計測する。
⑥ 液体を飽和食塩水に変えて、同様にペットボトルロケットを飛ばし、計測する。
⑦ ②〜⑥をあと 2 回繰り返す。

仮説

飽和食塩水は水と比べて密度が高い。そのため、飽和食塩水のとき、圧縮された空気が外に食塩水を押すための力が水の場合よりも必要となるため、ペットボトルロケットが飛ぶ瞬間に空気が液体を押し出す力に伴った、反作用の力が大きくなると考えた。ゆえに、食塩水のほうが飛距離は大きくなるのではないかという仮説を立てた。

結果

実験時の気候：天気：晴れ，気温：14℃，風：東 1 m/s
※時の気候：天気：曇り，気温：22℃，風：北東 5 m/s（1 回目、2 回目と別日に実験を行ったため）

表 1 水のときの記録

	飛距離〔m〕	滞空時間〔s〕
1 回目	57.26	4.42
2 回目	64.30	2.99
※	68.80	3.03
平均	63.45	3.48

表 2 飽和食塩水のときの記録

	飛距離〔m〕	滞空時間〔s〕
1 回目	51.22	2.56
2 回目	70.82	3.05
※	68.60	2.96
平均	63.55	2.86

表 1 から、中の液体が水のときの飛距離の平均値は 63.45 m、滞空時間の平均値は 3.48 秒である。また表 2 から、飽和食塩水のときの飛距離の平均値は 63.55 m、滞空時間の平均値は 2.86 秒である。これらの記録より、2 種類の液体の飛距離の平均値の差が 1.00 m であることから、ペットボトルロケットの中の液体を水から飽和食塩水に変化させても飛距離には影響を与えないことがわかった。

また図 1，2，3，4 より、この実験”水のときの記録”の 1 回目以外の滞空時間がそれぞれの平均値と比べ、±0.49 秒以内に位置している。そのため、水のときの記録の 1 回目の滞空時間が平均値と比べ、0.94 秒長くなってしまった理由は、飛ばした際に風などの外部からの力が加わってしまったのではないかと考えた。しかし、試行回数が計 6 回と少ないため、一概には言えず試行回数を増やして、正確な誤差の範囲、原因を求める必要があると考えた。

考察

水と飽和食塩水の密度には、0.20 g/cm^3 の差があった。それに伴い、液体自身が水より重くなったため、その分機体全体の重さが、水の場合と比べて重くなった。しかし、ペットボトルロケットのする運動を斜方投射運動とすると、下の式から、質量は水平方向および鉛直方向の変位に影響しないことがわかる。この点から、飽和食塩水と水の飛距離の差は表れなかったのではないかと考えた。

参考　斜方投射運動の変位
水平方向：$x = v_{0x}t = v_0 cos\theta \cdot t$
鉛直方向：$y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2 = v_0 sin\theta \cdot t - \frac{1}{2}gt^2$
v_{0x}：水平方向の初速度　v_{0y}：鉛直方向の初速度　v_0：初速度　t：経過時間　g：重力加速度

［実験 2］液体の温度を変えた際の飛距離の影響を調べる

目的

ペットボトルロケットの中の液体の温度（水温）を変化させて、飛距離が変化するのか調べる。

方法

この実験では、中の液体を水道水と熱水を用いて実験を行った。この実験で用いた水道水の温度は 21℃であり、熱水の温度は 70℃である。

〈実験の手順〉
① 実験時の気候を計測する。
② ペットボトルロケットに 200 mL の水を入れ、発射装置に取り付ける。
③ 自転車用の空気入れで 30 回空気を入れる。
④ 発射装置のレバーを引き、ペットボトルロケットを飛ばし、滞空時間を計測する。
⑤ メジャーを用いて、飛距離を計測する。
⑥ 液体を熱水に変えて、同様にペットボトルロケットを飛ばし、計測する。
⑦ ②～⑥をあと 2 回繰り返す。

21℃の際の水の蒸気圧は、0.25×10^2 Pa であり、70℃の際の水の蒸気圧は 0.3×10^5 Pa である。これらから、21℃の際の水の蒸気圧と、70℃の際の水の蒸気圧とでは、120 倍の差があることがわかる。そこから以下のような仮説を立てた。

仮説

熱水の蒸気圧は水の蒸気圧と比べて非常に高く、注入した際に圧縮された空気に蒸気圧が加わり、熱水の場合のペットボトルロケット内の空気圧が水の場合と比べて高くなる。そのため、ペットボトルロケットの射出される力が大きくなり、それに伴って反作用の力も大きくなるので、熱水のほうが飛距離は大きくなるのではないか。

蒸気圧とは
ある空間において、水は水面から蒸発する水分子と、空気中から凝縮する水分子の個数が同じになろうとする。この 2 つの分子の数が同じになった際（気液平衡）の気体の圧力が「蒸気圧」である。

結果

実験時の気候：天気：晴れ，気温：16℃，風：南南西 2 m/s

表 3 水のときの記録

	飛距離〔m〕	滞空時間〔s〕
1 回目	75.08	3.50
2 回目	79.86	3.60
3 回目	79.87	3.52
平均	78.27	3.54

表 4 熱水のときの記録

	飛距離〔m〕	滞空時間〔s〕
1 回目	82.29	3.06
2 回目	80.60	3.32
3 回目	79.06	3.33
平均	80.65	3.24

表 3 から、中の液体が水のときの飛距離の平均値は 78.27 m、滞空時間の平均値は 3.54 秒である。また表 4 から、熱水のときの飛距離の平均値は 80.65 m、滞空時間の平均値は 3.24 秒である。これらの記録より、2 種類の液体の飛距離の平均値の差が 2.38 m であることから、ペットボトルロケットの中の液体を水から熱水に変化させても飛距離には影響を与えなかったことがわかった。

考察

ペットボトルロケットを飛ばす際、内部が圧縮された空気で満たされている。そのため、大気圧上では 21℃と 70℃の蒸気圧には大きな差があった。しかし、ペットボトルロケット内では、ペットボトルロケットを飛ばす際に圧縮された空気が存在していたため、蒸気圧による影響が極めて小さくなる環境になってしまったのではないかと考える。

［実験 3］液体の粘度を変化させた際の飛距離の影響を調べる

粘度の値の算出方法について

粘度の値を出すにあたって、「トップシリンジ外筒法」を利用して、計測した。トップシリンジ外筒法とは、50 mL のシリンジ外筒を用いて、50 mL が滴下し切るまでの時間を利用して粘度の値を出す方法である。粘度を導出する際に利用した表をグラフ化したのが図 5 である。

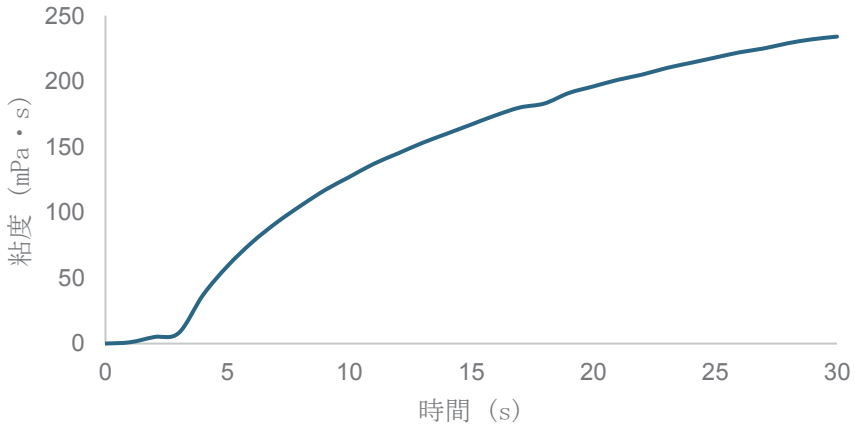


図 5 滴下時間に対する粘度の変化

（引用元：横浜嚥下研究会　https://yokohamaenge.com/professionals/2377）

目的

ペットボトルロケットの中の液体の粘度を変化させて、飛距離が変化するのか調べる。

方法

この実験では、中の液体を水道水と 2 種類の砂糖水を用いて実験を行った。2 種類の砂糖水は、1 つは水 100 mL に対して 100 g の砂糖を溶かした液体（以後、砂糖水 1 と表記）、もう 1 つは水 100 mL に対して 200 g の砂糖を溶かした液体（以後、砂糖水 2 と表記）とした。トップシリンジ外筒法を利用して、砂糖水 1 の粘度は 22.5 mPa•s、砂糖水 2 の粘度は 180 mPa•s であると算出した。また、水道水の粘度は 1.0 mPa•s である。

水と砂糖水 1 の飛距離を比較した実験を「実験 3-1」，水と砂糖水 2 の飛距離を比較した実験を「実験 3-2」と設定した。

〈実験 3-1 の手順〉

① 実験時の気候を計測する。
② ペットボトルロケットに 200 mL の水を入れ、発射装置に取り付ける。
③ 自転車用の空気入れで 30 回空気を入れる。
④ 発射装置のレバーを引き、ペットボトルロケットを飛ばし、滞空時間を計測する。
⑤ メジャーを用いて、飛距離を計測する。
⑥ 液体を砂糖水 1 に変えて、同様にペットボトルロケットを飛ばし、計測する。
⑦ ②〜⑥をあと 2 回繰り返す。

実験 3-2 においても、同様に飛距離、滞空時間を計測した。

仮説

粘度が高い液体は流動性が低い。そのため、砂糖水をペットボトルロケットの外に出すための力が水と比べて必要となる。よって、ペットボトルロケットが飛ぶ瞬間に空気が液体を押し出す力に伴った、反作用の力が水と比べて砂糖水の方が大きくなるのではないかと考えたため、砂糖水のほうが飛距離は大きくなるのではないかと考えた。

結果

［実験 3-1］

実験時の気候：天気：晴れ，気温：11℃，風：北北東 4 m/s

表 5 水のときの記録

	飛距離〔m〕	滞空時間〔s〕
1 回目	70.47	3.56
2 回目	62.46	3.04
3 回目	73.37	3.44
平均	68.77	3.25

表 6 砂糖水 1 のときの記録

	飛距離〔m〕	滞空時間〔s〕
1 回目	63.93	3.04
2 回目	66.06	3.03
3 回目	63.06	3.41
平均	64.35	3.16

表 5 から、中の液体が水のときの飛距離の平均値は 68.77 m、滞空時間の平均値は 3.25 秒である。また表 6 から、砂糖水 1 のときの飛距離の平均値は 64.35 m、滞空時間の平均値は 3.16 秒である。これらの記録より、2 種類の液体の飛距離の平均値の差が 4.42 m であることから、ペットボトルロケットの中の液体を水から砂糖水 1 に変化させても飛距離には影響を与えなかったことがわかった。

［実験 3-2］
1 回目計測時の気候：天気：晴れ，気温：11℃，風：西南西 2 m/s
2 回目計測時の気候：天気：晴れ，気温：10℃，風：西南西 7 m/s
3 回目計測時の気候：天気：晴れ，気温：10℃，風：西 3 m/s

表 7 水のときの記録

	飛距離〔m〕	滞空時間〔s〕
1 回目	65.06	3.04
2 回目	71.51	3.21
3 回目	61.17	2.84
平均	65.91	3.03

表 8 砂糖水 2 のときの記録

	飛距離〔m〕	滞空時間〔s〕
1 回目	64.64	3.16
2 回目	50.99	2.68
3 回目	58.36	2.86
平均	58.00	2.90

表 7 から、中の液体が水のときの飛距離の平均値は 65.91 m、滞空時間の平均値は 3.03 秒である。また表 8 から、砂糖水 2 のときの飛距離の平均値は 58.00 m、滞空時間の平均値は 2.90 秒である。これらの記録より、2 種類の液体の飛距離の平均値の差が 7.91 m であることから、ペットボトルロケットの中の液体を水から砂糖水 2 に変化させた際、わずかに飛距離が短くなることがわかった。

考察

粘度がある液体は、流動性が低く、ペットボトルロケットの外に出づらい。そのため、ペットボトルロケットを飛ばす際、液体（砂糖水）がペットボトルロケットの外に出ようとする空気を妨げるような働きをしたのではないかと考える。

5. 結論

今回の 3 つの実験より、ペットボトルロケットの中の液体の「密度」、「温度」はペットボトルロケットの飛距離に影響を与えず、「粘度」はペットボトルロケットの飛距離にわずかに影響を与えたのではないかと考えた。

補足：水の粘度 1.00 mPa·s　ベンゼンの粘度 0.65 mPa·s　ヘキサンの粘度 0.33 mPa·s

そこから、私はペットボトルロケットを遠くに飛ばすには、水より粘度が低い、ベンゼンやヘキサンなどの液体を用いると良いのではないかと考えた。しかし、これらの液体は人体に有害であるため、ペットボトルロケットの中の液体として飛ばすのは、非常に危険であり不適切である。ゆえに、ペットボトルロケットを安全に遠くに飛ばすには、水道水を中の液体として使用するのが良いのではないかと考える。

6. 今後の課題

データ数が十分とは言えなかったため、今後はもっとデータ数を増やし、さらに確実な結論を出せるようにしていきたい。また、今後はこれらの条件についてさらに深く研究していくと同時に、今回液体の量を 200 mL に固定していたが、これを変えてみて、飛距離にどのような影響が出るのかということも調べていきたい。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、元吉先生、玉川先生には、指導教員として、終始協力していただきました。心から感謝申し上げます。また、終始快く化学実験室の物品を貸してくださった加藤先生を初めとする化学科の先生方、並びに実験場所である上グラウンドを貸してくださった体育科の先生方にも大変お世話になりました。お礼申し上げます。加えて、手伝ってくれたクラスの友人たちにもこの場を借りて感謝の意を伝えます。最後に、課題研究に携わったすべての先生方には、本論文の執筆にあたり、たくさんの助言をいただきました。本当にありがとうございました。

2025.3.6

8. 参考文献

1) 小田良次他（2022）サイエンスビュー　新化学資料　実教出版
2) ペットボトルロケット｜Wikipedia 2025.1.22
https://ja.m.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9A%E3%83%83%E3%83%88%E3%83%9C%E3%83%88%E3%83%AB%E3%83%AD%E3%82%B1%E3%83%83%E3%83%88
3) 理系ラボ（蒸気圧とは）　https://rikeilabo.com/vapor-pressure
4) 横浜嚥下研究会　https://yokohamaenge.com/professionals/2377

Y 字ペグの折れにくい形状

千葉市立千葉高等学校　普通科（SSH コース）２年　近藤　碧海

要約(Abstract)

A peg is a thin metal rod that is driven into the ground to secure a tent. Pegs are widely used in camping and mountaineering, but they can break if they are driven incorrectly or if someone's foot hits them during use. To solve this problem, I decided to research peg shapes that break less easily.
The aim of this research was to find out how the shape of the peg affects its strength. In this research, I focused on the Y-shape, which is commonly used, and aims to identify the best shape by adjusting the thickness and length of each section. I used pegs made with a 3D printer for the experiment. First, I hung weights from the pegs and tried to see at which point they broke when the weights were hanging. Then I recreated the same conditions in simulation software and collected data using eight different types of pegs with different shapes. From this data, we also conducted experiments on the best shape. The results showed that the position of the weight when the peg breaks depend on the shape, and that the strength differs a lot depending on the shape. Simulations also showed that the shape with a thicker outside and thinner inside is the strongest.

ペグとは、テントを固定するために地面に打ち込む金属製の細い棒であり、キャンプや登山で広く使用される。しかし、打ち込み方が不適切だったり、使用中に足を引っかけたりすると、曲がったり折れたりすることがある。本研究では、この問題を解決するため、折れにくい形状について調べた。本研究の目的は、ペグの断面形状が強度に及ぼす影響を明らかにすることである。特に、一般的に使われている、Y 字の断面形状に注目し、各部分の太さや長さを変化させ、最適な形状を研究した。実験では 3D プリンタで作成したペグを使用し、荷重試験とシミュレーションを行った。最初に、ペグにおもりを吊り下げ、どの位置でおもりを吊り下げるとペグが折れるのかを調べた。シミュレーションでは、ペグに荷重を加えたときの応力をシミュレーションで再現し、異なる断面形状を持つペグを用いて強度解析を行った。その結果、断面形状によってペグが折れるときのおもりの位置が異なり、形状により強度に大きな差があることが判明した。また、シミュレーションによる強度解析から、Y 字形状の外側が太く内側が細い形状が最も高い強度を示すことが明らかになった。

1. 序論

私は山岳部に所属しており、山行時にテントを設営する機会がある。テントの設営には、ペグ(金属製の細い杭)を使用して地面と固定するが、打ち込み方が悪いときや、足を引っかけたときにペグが曲がることや折れることがある。この問題を解決するため、本研究を行うこととした。

本研究の目的は「折れにくいペグを作成すること」にある。そのために、「ペグの断面形状と強度の関係性」に着目し、特に Y 字の断面形状を基本として各部分の太さや長さを変化させながら最適な形状を調べた。

2. 実験装置

今回の実験では、ペグの模型を全て 3D プリンタで作成した。

<使用機材>

・プリンタ:Creality Ender-3 V3 SE
・フィラメント:ELEGOO 3D printer Filament PLA+ 1.75mm 1kg
・モデリング/シミュレーションソフトウェア:Autodesk Fusion 2.0.20981 x86_64

ペグの作成は、次の制限のもと行い、基本形状を定めている(図 1)。
・断面形状が Y 字形状であること
・ペグ部分を長さ 130 mm に統一、直径 12 mm の円柱の中にペグの腕を収めること
・共通部分は全てのペグで統一すること
・根元から先端までねじれを設けないこと
・インフィルを Gyroid、20%とすること
・図示したとき、上から下へ荷重をかけていること

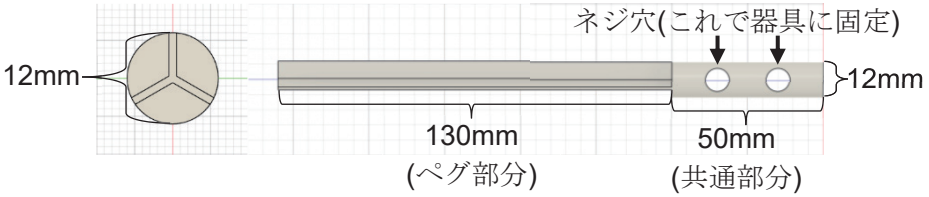


図 1:ペグの基本形状

3. 実験方法

3-1. 予備実験 1:積層方向を決定する

<実験目的>
ペグを実験で使用するにあたり、強度に影響の少ない積層方向を決定する。
<実験方法>
ペグを地面と水平に固定し、各おもりをペグ先端から 1.0 cm~10 cm 間に吊り下げる。
<評価方法>
ペグに白化/折れが発生したときのおもりの位置から、強度の大小を判断する。白化:プラスチックが荷重によって白っぽく見えるようになること。白化により、素材に永久的な曲げが発生していることがわかる。
<実験器具>
・ペグの模型①、②(図 2)
・おもり(0.50 kg, 1.0 kg)
・ペグ固定器具(図 3)

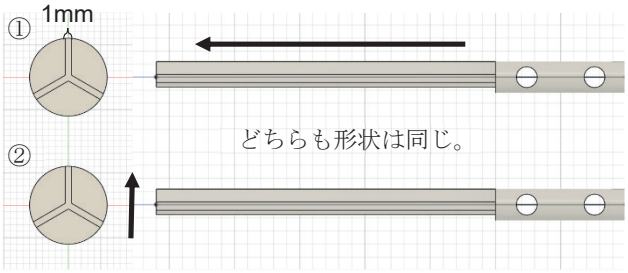


図 2:ペグ二面図(矢印は積層方向を示す)

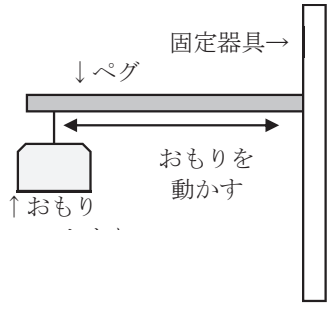


図 3:実験器具の概略図

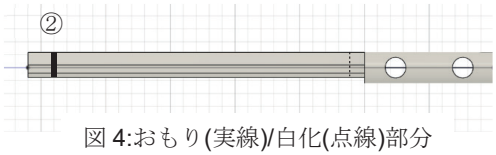


図 4:おもり(実線)/白化(点線)部分

<結果>
ペグ①. 積層面が荷重のかかる方向に平行なもの
・おもりの質量が 0.50 kg のとき:折れ、白化 共になかった
・おもりの質量が 1.0 kg のとき:積層面に沿って折れた
ペグ②. 積層面が荷重のかかる方向に垂直なもの
・おもりの質量が 0.50 kg のとき:折れ、白化 共になかった
・おもりの質量が 1.0 kg のとき:先端から 1.0 cm におもりを吊り下げると、根元から 0.60 cm が白化した(図 4)

<考察>
プラスチックは荷重を加えると、破断する前に白化が起こるため、この場合は積層面が力に垂直なもの(ペグ②)の方がより強度があったと判断できる。また、ペグ①では、積層割れにより本来の性能が出ていなかったと考えられる。そのため、これ以降の実験では、**積層面を力と垂直な方向にする**こととした。

3-2. 実験 1:断面形状、向きによる強度への影響を調べる

<実験目的>
断面形状により強度に違いがあることを確かめ、向きにより強度に変化があるのかを検証する。

<実験方法>
ペグを固定し、各おもりをペグ先端から 1.0 cm~10 cm 間に吊り下げる。

<評価方法>
白化、もしくは折れが発生したときのおもりの位置から、強度の大小を判断する。

<実験器具>
・ペグの模型③～⑤(図 5):これ以降は基本的に断面図のみ記載する。
・おもり(0.50 kg, 1.0 kg)
・ペグ固定器具(組立図:図 3)

<結果>
ペグ③.ペグ①の上下を反対にしたもの
・おもりの質量が 0.50 kg のとき:折れ、白化 共になかった
・おもりの質量が 1.0 kg のとき:折れ、白化 共になかった
ペグ④.腕の内側が太いもの
・おもりの質量が 0.50 kg のとき:折れ、白化 共になかった
・おもりの質量が 1.0 kg のとき:折れ、白化 共になかった
ペグ⑤.先端が細いもの
・おもりの質量が 0.50 kg のとき:折れ、白化 共になかった
・おもりの質量が 1.0 kg のとき:先端から 2.0 cm におもりを吊り下げると、根元から 1.3 cm が白化した(図 6)

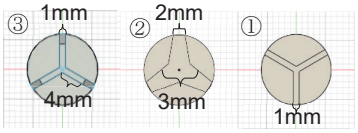


図 5:ペグ断面図

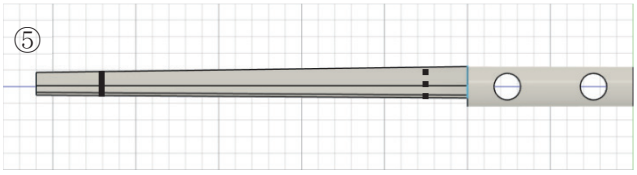


図 6:おもり(実線)/白化(点線)部分

<考察>
断面形状は同一だが、向きによって強度が変化すること、断面形状によって強度に差があることが認められた。この形状では、**力に平行な面**(これを今後、**梁**と呼ぶ)が**引張(=②)よりも圧縮(=③)に強い**と考え、以降の実験を行った。

これまでの実験より、ペグの形状を次の通り決定した。
・ペグ⑤のように断面形状が変化すると、研究する形状が膨大になるため、これ以降の実験では、ペグに設けた制限に「根元から先端まで断面形状が一定であること」を追加した。
・ペグの回転を抑制するため、共通部分の形状を変更した(図 7)。どちらも長さは 50 mm である。

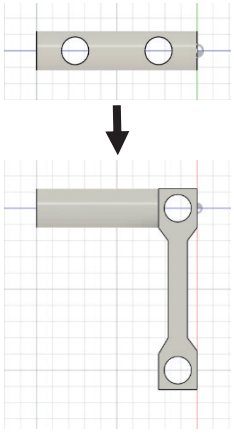


図 7:共通部分の形状変更

これらの変更をもとに、今後の実験で基本となるペグの形状を図 8 に示している。

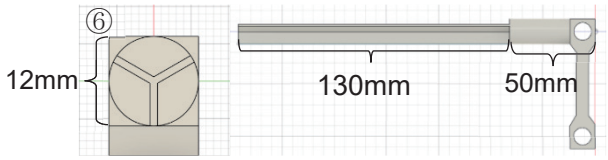


図 8:変更後のペグの基本形状

3-3. 予備実験 2:材料特性を近似する

<実験目的>

3D プリント品で、本来の材料(鋼)の特性に近似できるかを確かめる。

<実験方法>

ペグの(図 8)で示した部分に荷重をかける。

<確認方法>

最大応力(MPa)、先端変位(mm)、最小安全率(-)を使用し、強度を**(-/(MPa・mm))と定義**する。この値が鋼、ABS とも、梁にかかる力に対する強度が引張強度＜圧縮強度の関係であることを確認する。

※安全率とは、「安全率(-)=$\frac{\text{降伏強度(MPa)}}{\text{設計上発生する応力(MPa)}}$」で定義される量であり、この値が 1 以下の場合、永久的な曲げ、または分解の可能性がある。

<実験器具>

・ペグの模型⑥(図 9)

<シミュレーション条件>

・素材:鋼、ABS

・荷重:静的応力 9.8 N(図 10)

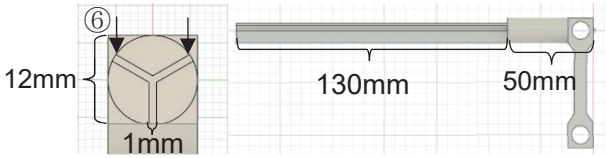


図 9:ペグ二面図(矢印は荷重を示す)

図 10:荷重をかける部分

これ以降の実験では、ペグの向きを梁が下側となるような向きとし、荷重を最も高い位置にある 2 辺にかけるとそれぞれ統一している。そのため、各ペグへ荷重をかけている部分を示す矢印は、今後省略する。

<結果>

結果は以下の表の通り。なお、この数字は大小の比較にのみ用いることができる。

表 1:負荷 9.8N

	最大応力(MPa)	先端変位(mm)	最小安全率(-)	**強度(-/(MPa×mm))**	素材
圧縮	33.7	0.142	6.14	**1.28×10^{0}**	鋼
引張	67.4	0.283	3.07	**1.61×10^{-1}**	
圧縮	33.4	13.3	0.598	**1.35×10^{-3}**	ABS
引張	66.9	26.5	0.299	**1.68×10^{-4}**	

<考察>
　どちらも梁にかかる力に対する強度について引張強度よりも圧縮強度の方が大きいことが確認できたため、**本来の材料特性に近似できた**とした上でこれ以降の実験を行った。

3-4. 実験 2:強度の高い断面形状の概形を探す

<実験目的>
　複数の断面形状の中で、強度の高くなる断面形状を探す。
<実験方法>
　予備実験 2 と同様。
<評価方法>
　最大応力(MPa)、先端変位(mm)、最小安全率(-)を使用し、強度を(-/(MPa・mm))と定義し、この値が高いものを折れにくい形状とする。
<実験器具>
・ペグの模型⑦～⑭(図 10)
<シミュレーション条件>
・使用ソフトウェア:Autodesk Fusion
・素材:ABS
・荷重:静的応力 4.9 N、9.8 N

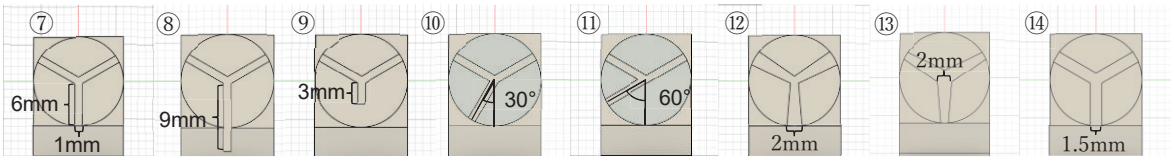


図 11:ペグ断面図(記載のない部分の太さは 1mm)

<結果>
　結果は以下の図に示すようになる。

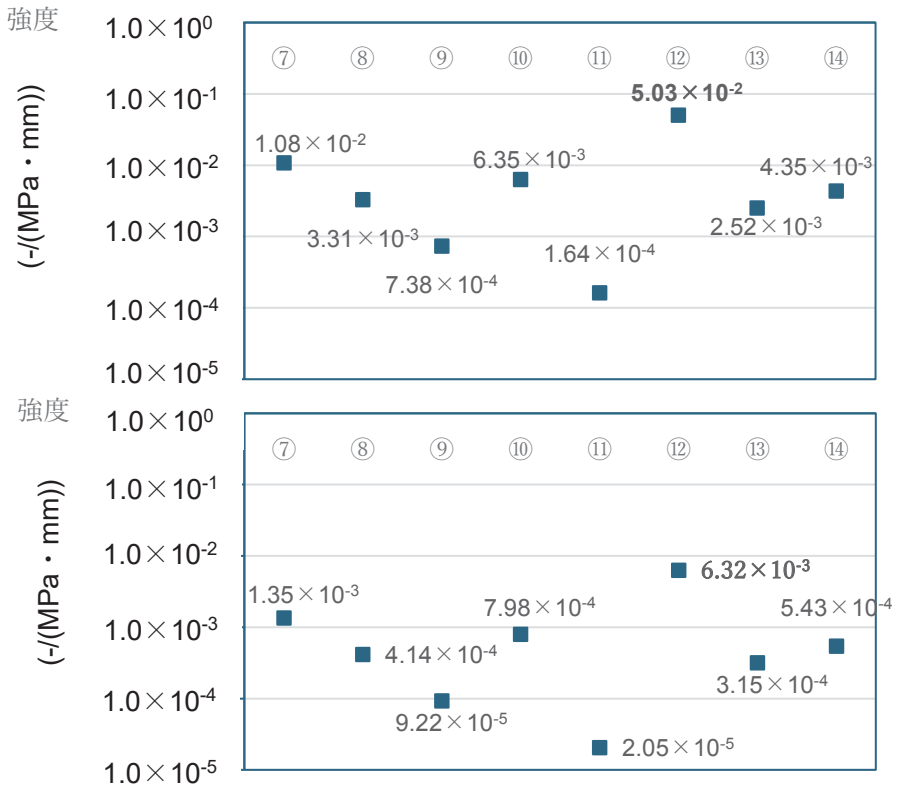


図 12:荷重 9.8 N における各ペグの強度

<考察>

1. 梁部分の大きさの比較:ペグ⑦(60 mm)、⑧(90 mm)、⑨(30 mm)
   梁部分の大きさが⑧＞⑦＞⑨であるのに対し、強度は⑦＞⑧＞⑨となった。つまり、**梁の部分が大きければ大きいほど強度があるという訳ではない**。
2. 梁部分の角度の比較:ペグ⑦(0°)、⑩(30°)、⑪(60°)
   梁部分と力の角度の差が⑪＞⑩＞⑦であり、強度は⑦＞⑩＞⑪となった。つまり、**梁の部分が力と平行に近ければ近いほど強度がある**。
3. 腕の内外の太さの比較:ペグ⑫(外側が太い)、⑬(内側が太い)、⑭(外側と内側の太さが等しい)
   ペグの腕部分の外側の太さは⑫＞⑭＞⑬であり、強度は同じく⑫＞⑭＞⑬となった。つまり、ペグの**腕は、内側より外側が太い方が、強度がある**。

今回の実験の結果から、この 8 種類のペグの中では、**⑫の腕の内側よりも外側が太い形状が、最も強度が高い**と判断した。以下の実験では、この形状を細分化していく。

荷重を 9.8 N から 4.9 N にすると応力と変位は 0.5 倍、安全率は 2 倍と相関関係が見られ、片方の実験を行うことでもう片方の結果を出すことができ、また、荷重が 9.8 N、4.9 N のどちらでも強度の大小の順は等しいため、今後の実験では**荷重を 9.8 N のみ**とした。

3-5. 実験 3:腕の外側の太さの最適化を行う

<実験目的>

<実験 2>での断面形状について、腕の外側の太さについて検討する。

<実験方法>

予備実験 2 と同様。

<評価方法>

最大応力(MPa)、先端変位(mm)、断面積(mm^2)を使用し、強度を**(1000/(MPa・mm・mm^2))と定義**し、この値が高いものを折れにくい形状とする。強度の定義を変更したため、以前の実験と数的な強度比較はできない。

<実験器具>

・ペグの模型⑮～⑳、⑫(図 13)

<シミュレーション条件>

・素材:ABS
・荷重:静的応力 9.8 N

〈ペグの断面形状〉

ペグの各腕の断面形状が扇形となるので、これの中心角(10°≦a≦110°)を変化させることで、腕の外側の太さを変える。この場合、内側が細くなりすぎるため、**中心に直径 1 mm の軸を設ける**。また、参考としてこれらと⑫を比較する。

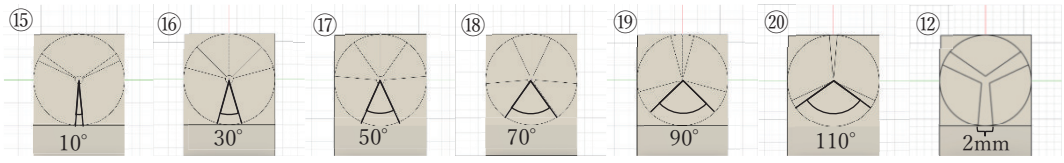


図 13:ペグ断面図(記載のない部分の太さは 1 mm)

<結果>
結果は以下の図に示すようになる。

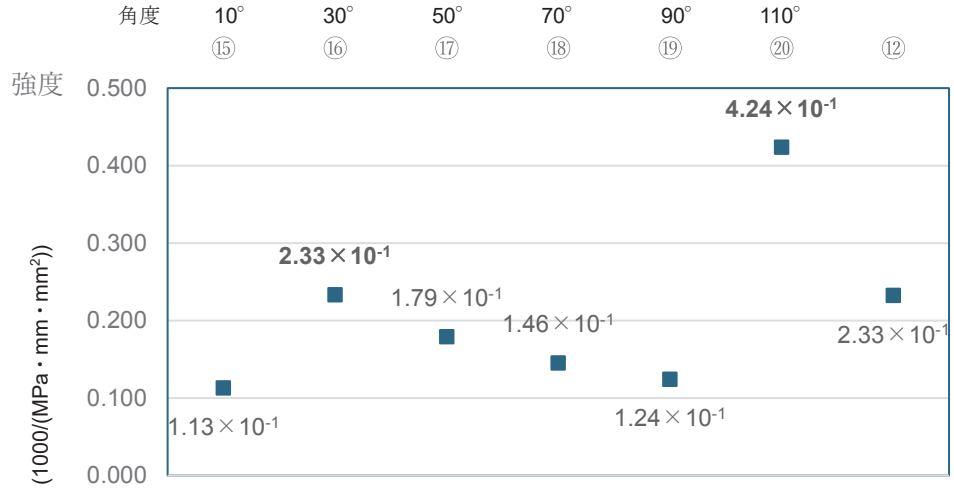


図 14:荷重 9.8 N における各ペグの強度

<考察>
ペグ⑳が最も高い強度を示し、ペグ⑯が〈実験 2〉における最も高強度のものと同じ強度を示した。この結果では⑳が優位ではあると判断できるが、この形状では Y 字よりも円柱に近いため、除外して⑯をもとに更に中心角を細分化して実験を続行する。

3-6. 実験 4:腕の外側の太さの最適化を行う
<実験目的>
<実験 3>での断面形状について、中心角についてさらに検討する。
<実験方法>
予備実験 2 と同様。
<評価方法>
最大応力(MPa)、先端変位(mm)、断面積(mm²)を使用し、強度を(1000/MPa×mm×mm²)と定義し、この値が高いものを折れにくい形状とする。
<実験器具>
・ペグの模型㉑～㉖、⑮～⑰(図 15)
<シミュレーション条件>
・素材:ABS
・荷重:静的応力 9.8 N

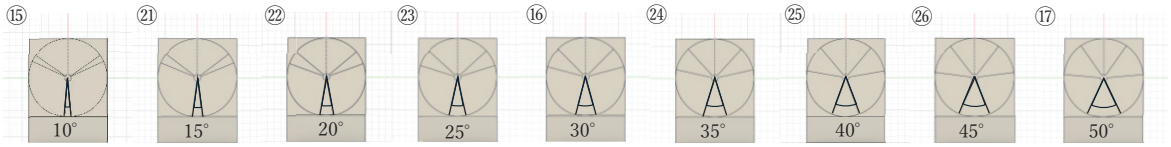


図 15:ペグ断面図(数字は中心角を示す)

〈結果〉

結果は以下の図に示すようになる。

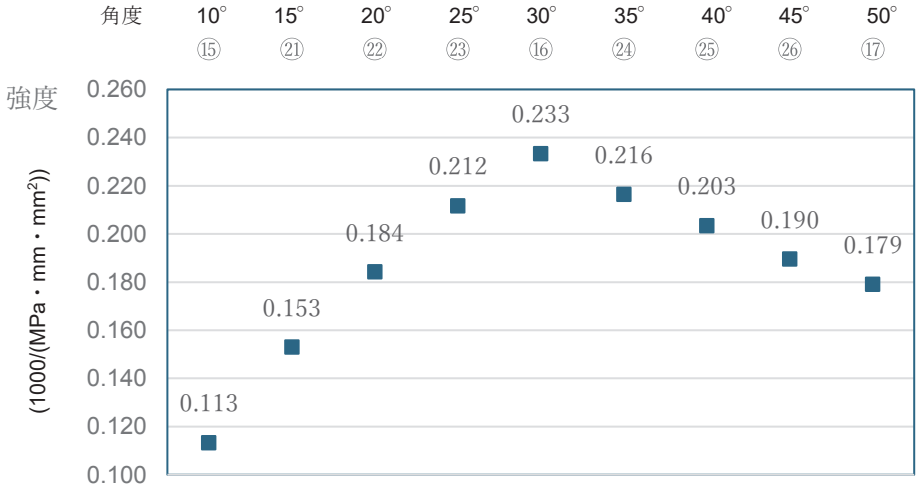


図 16:荷重 9.8 N における各ペグの強度

<考察>

図 13、図 14 において、グラフ 4 においても、⑯が最も高い強度を示した。そのため、**中心角は 30°が最適である**と判断した。このデータをもとに、次の実験では内側の太さを変化させる。

3-7. 実験 5:腕の内側の太さの最適化を行う

<実験目的>

<実験 4>での断面形状について、腕の内側の太さについて検討する。

<実験方法>

予備実験 2 と同様。

<評価方法>

最大応力(MPa)、先端変位(mm)、断面積(mm²)を使用し、強度を(1000/MPa・mm・mm²)と定義し、この値が高いものを折れにくい形状とする。

[器具]

・ペグの模型⑯、㉗～㉞(図 17)

[シミュレーション条件]

・素材:ABS

・荷重:静的応力 9.8N

<ペグの断面形状>

ペグの弧長を中心角が 30°のものに固定し、弦の垂線と腕の角度に差をつけることで、内側の太さを変える。

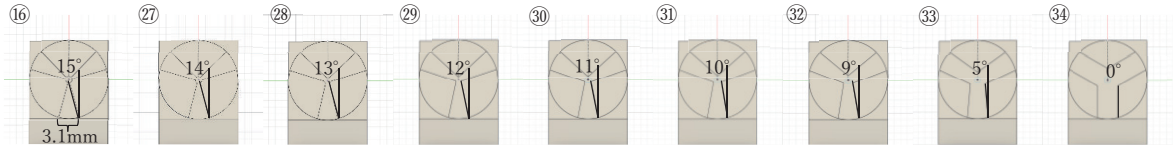


図 17:ペグ断面図(全ての弧長は⑯に等しい)

〈結果〉
結果は以下の図に示すようになる。

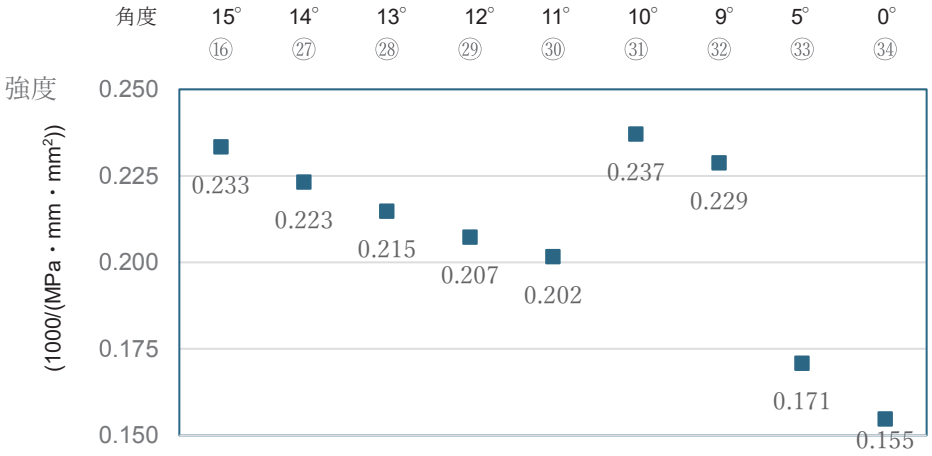


図 18:荷重 9.8N における各ペグの強度

〈考察〉
ペグ㉛が最も高い強度を示した。㉛で値が急上昇したのは、断面積の増加に対し応力・変位の減少が大きかったため、また、㉝で値が急降下したのは、応力・変位の減少に対し断面積の増加が大きかったためと考えられる。これらの結果より、**弦の垂線と腕の角度の差は 10°が最適**であると判断した。

4. 結論

断面形状が Y 字のペグにおいて、最も高い強度を示すものはペグ㉛(図 19)である。これを元に、「折れにくいペグ」として作成したものが(図 20)である。

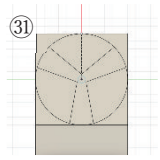


図 19:ペグ㉛の断面形状

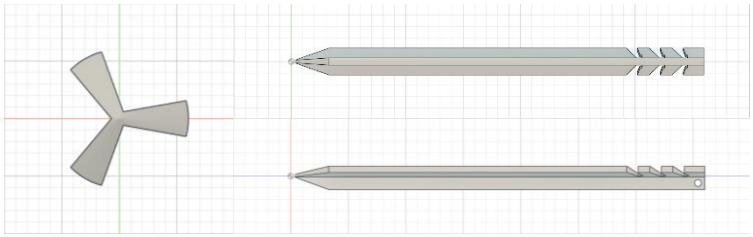


図 20:「折れにくい形状」のペグ

折れにくい形状として最適な条件は、
・3D プリンタで作成する場合、積層面を荷重に垂直にする。
・腕の外端である弦を形成する円の中心角を 30°にする。
・弦の垂線と腕の角度の差を 10°にし、中心に向かって細くする。
である。また、本実験で得たデータから、3 か所の切れ込みの入っている部分(紐をかける部分)を、3 つの腕のうち 2 つに設け、梁にかかる力を圧縮方向にしている。
データが必要な場合、筆者まで連絡してください(Mail:kondoforschool53@gmail.com)。

5. 今後の課題

今回の研究では三叉形状かつ断面形状が一定という条件のもと実験を行ったが、このペグにねじりや断面形状の変化を加えたとき、結果にどのような影響を及ぼすか不明なため、これを確かめたい。また、今回は「強度」を応力、変位、安全率、断面積を使用し定義したが、これらのパラメータで実際の強度と比較するのは妥当か、強度の値に絶対的な関係性が出来るような値を模索していきたい。その他、ペグ⑳を「円柱に近い」という曖昧な理由で排除したため、これも含めて検証したい。

6. 謝辞

本論文の作成や課題研究を行うにあたって、アドバイスや添削を頂いた担当の田崎先生、要旨の添削をいただいた星先生、発表会での助言や講座をしてくださった先生方をはじめ、たくさんの方々に支援をいただきました。本当にありがとうございました。

7. 参考文献

・ジェネレーティブデザインの安全率の定義を知りたい (最終閲覧日: 2025 年 3 月 5 日)
https://www.autodesk.com/jp/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/kA93g000000H0Hp.html
・合成樹脂用語集(試験・物性編) (最終閲覧日:2025 年 3 月 5 日)
http://www.shoei-chem.co.jp/knowledge105.html

アミラーゼの分泌量と食事条件の関係

千葉市立千葉高等学校　普通科（SSH コース）２年

坂本　心奈音　　矢守　紗菜

Abstract

We researched how the secretion of amylase is related to the time elapses after eating meals and the types of food consumed. We want to specifically reveal the connection between these and understand the ideal meal time with efficient digestion. The research method involves measuring the color change of iodine solution mixed with starch and saliva. The experiment was conducted to observe the differences in the speed of starch decomposition by salivary amylase at 2 hours and 5.5 hours after eating meals in the first research. The results of the research show the longer the time elapses after eating meals, the faster the speed of color changes in the first research. Based on the first research, the experiment was conducted to observe the differences in the speed of starch decomposition by salivary amylase at 1 hour, 3hours and 5hours after eating meals in the second research. In the second research, the color changes occurred in the order of 5 hours, 1 hour, and 3 hours after eating meals. Before the third research, the food consumed consisted of carbohydrates (rice balls) and protein (salad chicken). The experiment was conducted in the same manner as the second research. In the third research, when the elapsed time after eating was kept constant and the focus was placed on the type of food, there was no significant difference in color development depending on the food. However, when the type of food was kept the same and attention was given to the elapsed time after eating, the most rapid color development was observed 3 hours after the meal. Therefore, we found the amount of secretion of salivary amylase is significantly influenced by the time elapses after eating meals.

要約

私たちは、アミラーゼの分泌量と食後の経過時間や食べた物がどのように関係しているのかを研究した。私たちは、この研究を通して唾液アミラーゼの分泌量がどのように変化するのかを明確にし、消化効率の良い食事の時間を考察したいと考えた。実験方法は、デンプン水溶液にヨウ素液と唾液を加え、呈色の変化を観察した。1 回目の実験では、食後 2 時間と食後 5 時間半における唾液アミラーゼによる単位時間あたりのでんぷん分解の変化の違いについて実験を行なった。この論文において、この実験を実験 1 とする。実験 1 の結果として、食後の経過時間が長いほど呈色の変化が早かった。2 回目の実験では、実験 1 を踏まえ、食後 1 時間、食後 3 時間、食後 5 時間における唾液アミラーゼによる単位時間あたりのでんぷん分解の変化の違いについて実験を行なった。これを実験 2 とする。実験 2 の結果として、食後の経過時間が 5 時間、1 時間、3 時間の順に呈色の変化が早かった。私たちは、この結果が得られた原因として、身体的ストレスと食後に分泌される唾液の量が変化することであると考えた。3 回目の実験では、実験前に食べるものを炭水化物（おにぎり）、タンパク質（サラダチキン）として、実験 2 と同様に実験を行なった。これを実験 3 とする。実験 3 の結果として、食後からの経過時間を同時間にし、食べるものに注目したとき、食べるものによる呈色の変化には大きな差は見られなかった。しかし、食べるものを統一し、食後の経過時間に注目すると、食後 3 時間が最も早く呈色の変化が見られた。したがって、唾液アミラーゼの分泌量は食後の経過時間によって大きく影響を受けることがわかった。

序論

私たちは、「でんぷんは唾液に含まれるアミラーゼによって分解される」という話を聞いた。また、生物基礎の授業で酵素について学び、興味を持った。そこで、私たちはアミラーゼの分泌量には食事の条件が関係していると考え、研究することにした。本研究では、食後の経過時間との関係と食べ物との関係に焦点を当て研究を行った。私たちは過去の論文や資料から、仮説を立てた。実験 1 では、食べた直後に口内で唾液アミラーゼによって分解されることより、食後の経過時間が短い方が、唾液アミラーゼがより活発になると考えた。実験 2 では、実験 1 の結果より、食後の経過時間が長い方がアミラーゼの分泌量が増えると考えた。実験 3 では、実験 1 の結果及び唾液アミラーゼは米の主成分であるでんぷんを分解することより、おにぎりを食べて食後の経過時間が長い方がアミラーゼの分泌量が増えると考えた。これらの仮説とともに実験を行い、原因を考察した。

器具

薬さじ、薬包紙、電子天秤、50 mL ビーカー、100 mL ビーカー、200 mL ビーカー、ガラス棒、マッチ、ガスバーナー、金網、三脚、試験管、試験管立て、マイクロピペット、3 mL ピペット、10 mL ピペット、ヨウ素液、片栗粉、ボルテックスミキサー、恒温槽

方法

＜実験 1＞

1. 準備
   - I. でんぷん水溶液の作成
     40℃のお湯 100 mL に片栗粉 20 g を溶かし、でんぷん水溶液 2.0 g/L を作成する。
   - II. 呈色による色の指標の作成
     青紫色を 5、薄紫色を 1 として、呈色の濃さにおける色の指標を作成する。
2. 方法
   ① 準備で作成した、でんぷん水溶液を 3 本の試験管に 3 mL ずつとる。
   ② 微量のヨウ素液を 3 本の試験管にそれぞれ滴下する。
   ③ 唾液を 1 mL ずつ 3 本の試験管に滴下する。
   ④ 各試験管を、ボルテックスミキサーを用いて撹拌する。
   ⑤ 恒温槽を用いて、試験管を 5 分間 40℃に保温しながら、30 秒ごとに呈色の変化を観察する。
   ※実験 1 では食事を炭水化物（おにぎり）に統一し、食後 2 時間、食後 5 時間半に実験を行った

＜実験 2 及び 3＞

1. 準備
   - I. でんぷん水溶液の作成
     水 1 L に片栗粉 0.02 g 加え、熱しながら溶かし、でんぷん水溶液 2.0×10^{-3} g/L を作成する。
   - II. 希釈
     でんぷん水溶液とヨウ素液をそれぞれ以下のように希釈する。
     ・でんぷん水溶液 2.0×10^{-3} g/L を 10 倍希釈する。
     ・ヨウ素液を 100 mL に 10 滴滴下し希釈する。
   - III. ヨウ素でんぷん反応による呈色のでんぷん濃度別カラーチャートの作成
     色の指標を、でんぷん水溶液 2.0×10^{-3} g/L を 10、2.0×10^{-4} g/L を 1 として、でんぷん水溶液 2.0×10^{-3} g/L を 2〜10 倍希釈して作成した。このカラーチャートを用いて各実験におけるでんぷん濃度を考察し、グラフ化した。

2. 方法

① 準備で作成した、でんぷん水溶液を 3 本の試験管に 3 mL ずつとる。

② 希釈したヨウ素液 1 mL と唾液 0.15 mL を 3 本の試験管に加え、ボルテックスミキサーを用いて撹拌する。

③ 恒温槽を用いて、3 本の試験管を 5 分間一定の温度に保温しながら、30 秒ごとに変化を観察する。

※保温する温度は、実験 2 では 40℃、実験 3 では 36℃とする

※実験 2 では、食事を炭水化物（おにぎり）に統一し、食後 2 時間、食後 3 時間、食後 5 時間に実験を行った

※実験 3 では、食事を炭水化物（おにぎり）、タンパク質（サラダチキン）とする

※実験 3 では、咀嚼回数を 1 口あたり 30 回とする

結果

＜実験 1＞

図 1 は実験 1 の準備で作成した呈色の濃さにおける色の指標の図である。図 1 は数値が大きくなるほど、水溶液中のでんぷん量が多いことを示している。

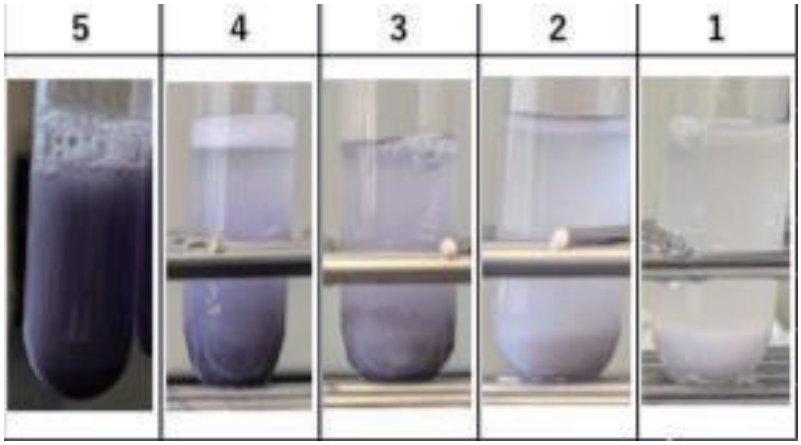


図 1 呈色の濃さにおける色の指標

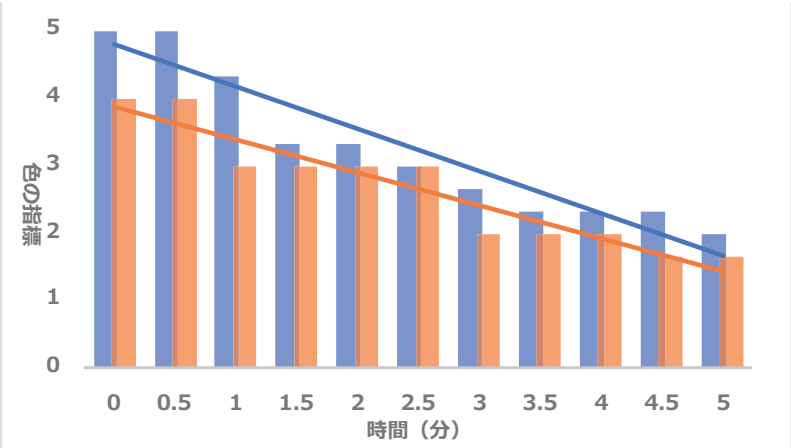


図 2 経過時間ごとの唾液アミラーゼによる
でんぷん分解の推移（坂本）

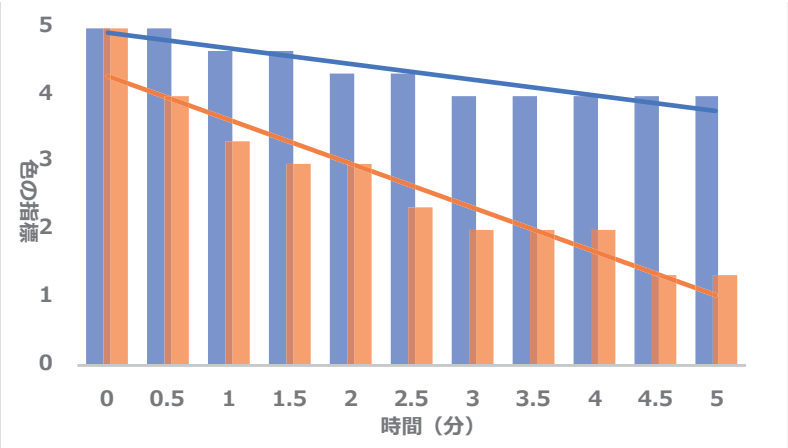


図 3 経過時間ごとの唾液アミラーゼ
によるでんぷん分解の推移（矢守）

※各グラフにおいて、右から食後 2 時間、5 時間半の結果を示している

図 2、図 3 は、30 秒ごとに観察して得られた 3 本の試験管の呈色を、図 1 を用いて数値化し、得られた数値の平均値を用いて作成した。図 2 より、食後 2 時間と食後 5 時間半のグラフの近似線を比較すると、食後 2 時間の近似線の傾き、すなわち、食後 2 時間の呈色の変化の速さに比べ、食後 5 時間半の近似線の傾き、すなわち、食後 5 時間半の呈色の変化の速さの方が速いことがわかる。したがって、食後の経過時間が長い方が、でんぷんが分解される速さ、つまり、唾液アミラーゼの分解作用がより活発になっていることがわかる。また、図 2、図 3 を比べると、各近似線の傾き、すなわち、グラフの変化の仕方に差があることから唾液アミラーゼの活性には個人差があることもわかる。

＜実験 2＞

図 4 は、実験 2 及び 3 の準備で作成したでんぷん濃度別カラーチャートである。図 4 を用いて、得られた結果を数値化し、グラフを作成した。

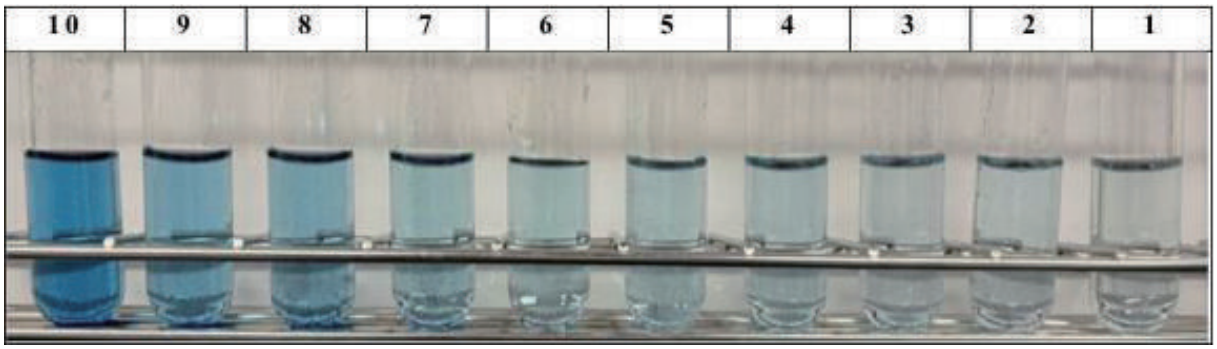


図 4 でんぷん濃度別カラーチャート

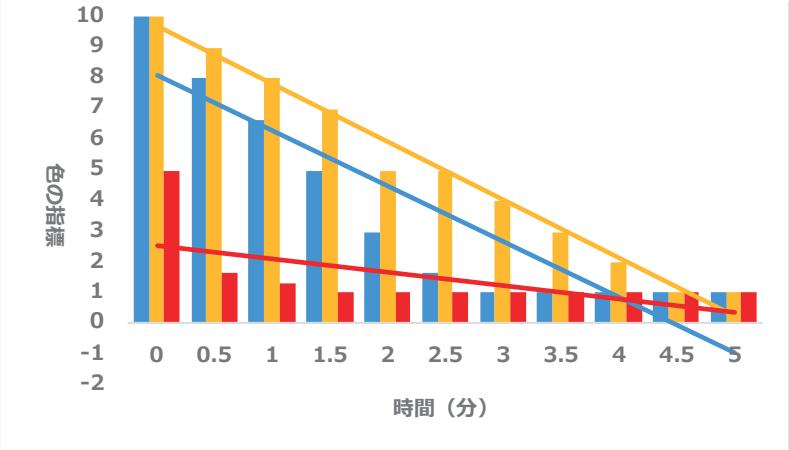


図 5 経過時間ごとの唾液アミラーゼによるでんぷん分解の推移（坂本）

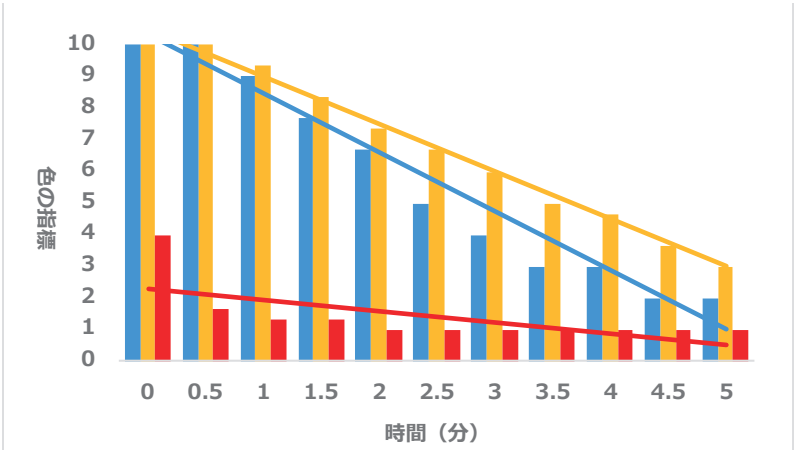


図 6 経過時間ごとの唾液アミラーゼによるでんぷん分解の推移（矢守）

※各グラフにおいて、右から食後 1 時間、3 時間、5 時間の結果を示している

図 5、図 6 は、30 秒ごとに観察して得られた 3 本の試験管の呈色を、図 4 を用いて数値化し、得られた数値の平均値を用いて作成した。図 5、図 6 より、どちらも食後 5 時間の近似線の傾き、すなわち、食後 5 時間の呈色の変化の速さが最も速く、食後 3 時間の近似線の傾き、すなわち、食後 3 時間の呈色の変化の速さが最も遅いことがわかる。また、実験 1 と同様に、各近似線の傾き、すなわち、グラフの変化の仕方に差があるため、唾液アミラーゼの分泌量または、40℃における唾液アミラーゼの活動には個人差があることもわかる。

＜実験 3＞
図 4 を用いて、得られた結果を数値化し、グラフを作成した。

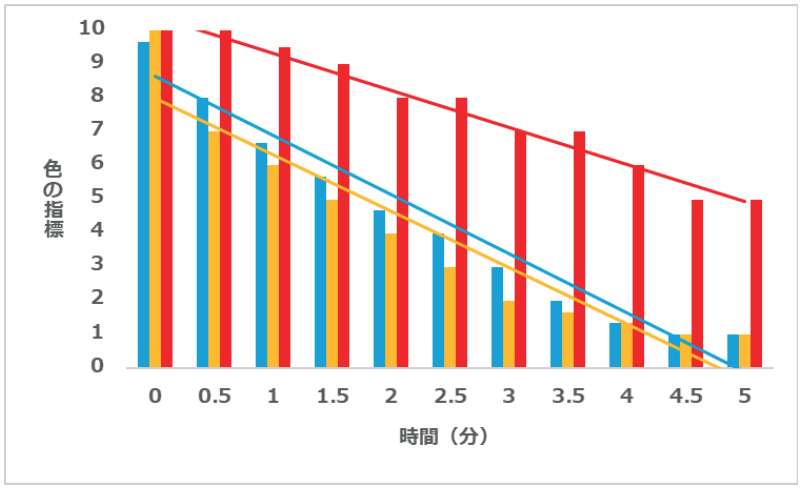


図 7 おにぎり摂取後の経過時間ごとの
唾液アミラーゼによるでんぷん分解の推移（坂本）

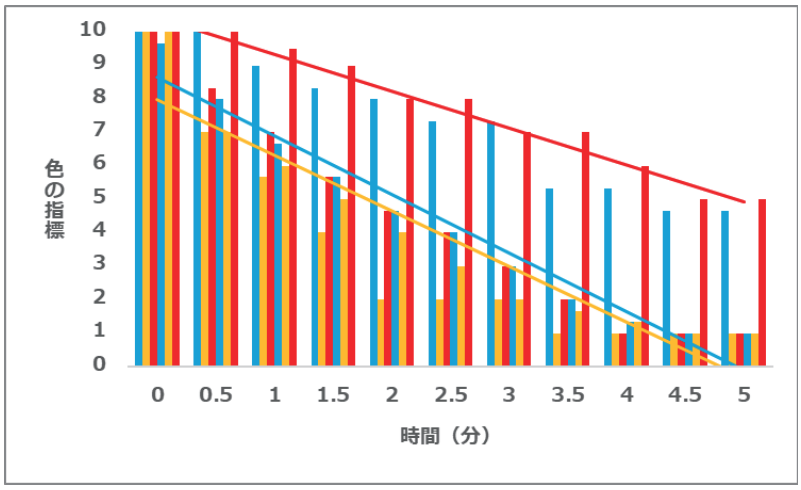


図 8 サラダチキン摂取後の経過時間ごとの
唾液アミラーゼによるでんぷん分解の推移（坂本）

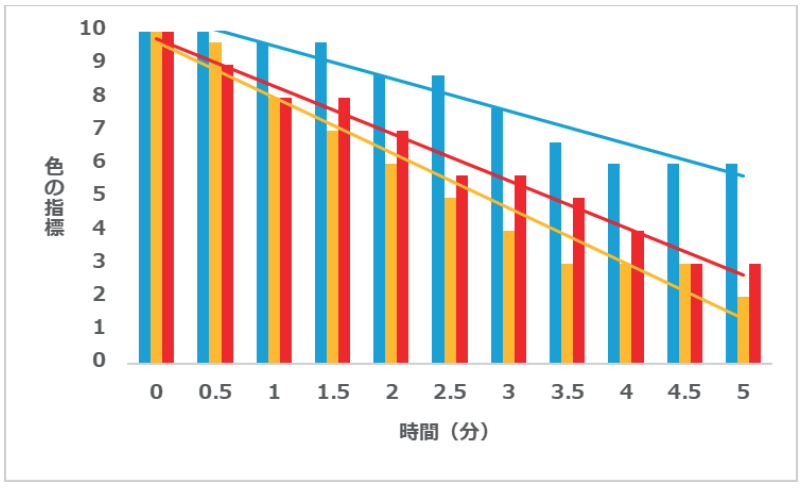


図 9 おにぎり摂取後の経過時間ごとの
唾液アミラーゼによるでんぷん分解の推移（矢守）

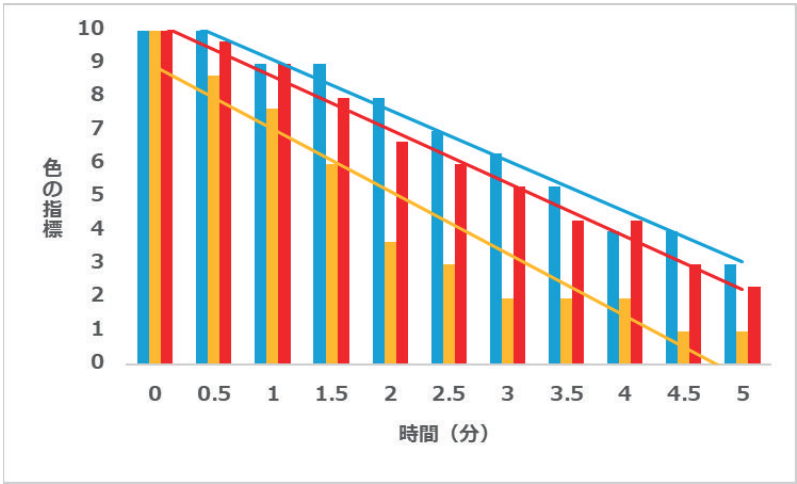


図 10 サラダチキン接種後の経過時間ごとの
唾液アミラーゼによるでんぷん分解の推移（矢守）

※各グラフにおいて、右から食後 1 時間、3 時間、5 時間の結果を示している

図 7・8・9・10 は 30 秒ごとに観察して得られた 3 本の試験管の呈色を、図 4 を用いて数値化し、得られた数値の平均値を用いて作成した。図 7・8、図 9・10 より、どちらも食後 3 時間の近似線の傾き、すなわち、食後 3 時間の呈色の変化の速さが最も速いことがわかる。また、図 7・8 では食後 5 時間の近似線の傾き、すなわち、食後 5 時間の呈色の変化の速さが最も遅く、図 9・10 では食後 1 時間の近似線のグラフの傾き、すなわち、食後 1 時間の呈色の変化の速さが最も遅いことがわかる。このようにグラフの変化の仕方に差が見られることから、唾液アミラーゼの分泌量または、36℃における唾液アミラーゼの活動には個人差があることがわかる。

考察

＜実験 1＞

実験方法より、食後の経過時間を変化させて実験を施行しているため、時間によって変化するものが原因となっていると考えられる。肉体的ストレスにより、唾液アミラーゼの活性がより活発になることが報告されている [1]。本実験では、空腹が肉体的ストレスとなり、食後の経過時間が長くなるほど唾液アミラーゼがより活発になったのではないかと考える。

＜実験 2＞

実験 1 と同じく、食後の経過時間を変化させて実験を試行しているため、時間によって変化するものが原因となっていると考えられる。肉体的ストレスにより、交感神経が働き唾液アミラーゼの分泌量が増えることが報告されている [1]。また、食前より食後の方が、唾液が多く分泌されることより、唾液アミラーゼの分泌量が増えることが報告されている [2]。本実験では空腹による身体的ストレスと食後に分泌される唾液の量が変化することにより、このような結果が得られたのではないかと考える。

＜実験 3＞

実験結果のグラフの傾きより、食べるものによってアミラーゼの分泌量は変化しないと言える。これは、実験 1 の結果と合わせて考えると、アミラーゼの分泌量は食べるものには関係なく時間によって変化すると考えられる。また、アミラーゼの分泌量は午後になるにつれて増加する傾向が見られる。［3］

実験 3 を行った時間は午後が主であったが、実験 1・2 を行った時間は午前が主であった。そのため、実験 3 において実験 1・2 と結果が一致しないのは、唾液の分泌機序が複雑であることが原因であると考えられる。［4］

今後の課題

各実験において、実験を行う時間帯にばらつきがあったため、実験を行う時間帯を午前または午後に統一し実験を行う。また、実験 3 において炭水化物（おにぎり）とタンパク質（サラダチキン）についての実験は行ったが、脂質などの他の栄養素における変化についても実験を行いたい。

謝辞

本論文の作成にあたり、多くの方々からご指導、ご助言を賜りました。特に指導教官の千葉市立千葉高等学校三坂先生には終始適切なご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

［1］ 中野敦行、山口昌樹(2011):唾液アミラーゼによるストレスの評価
https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjbf/38/1/38_KJ00007476203/_article/-char/ja/&ved=2ahUKEwiHgsmY19mLAxXVmq8BHZvbH68QFnoECCAQAQ&usg=AOvVaw3Gxle4pEFv8CPwLO6YW2iw

［2］ 柴芳樹、原久美子(2009):食事の楽しさと唾液アミラーゼ・ペルオキダーゼ量解析から食育指導を目指して
https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/26343/files/14675&ved=2ahUKEwjI2p6g19mLAxX6kq8BHd5bB8cQFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw05pVrGvg-5AN6hDng8ooBS

［3］ 田中伸子、岡村浩(1983):日常生活における唾液中 α－アミラーゼ活性の変動に影響を及ぼす要因に関する検討
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jhej1951/34/1/34_1_13/_pdf/-char/ja

［4］ 喜多村尚、小原郁夫(2010): 女子大生の月経周期における唾液分泌反応の日内変動
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsnfs/63/2/63_2_79/_pdf/-char/ja

信号反応における糖の減少量について

千葉市立千葉高等学校　普通科（SSH コース）２年　松久　陽斗

1. 要旨

Traffic signal reaction is a chemical reaction, changing watercolor to yellow, red and green. It is a redox reaction caused by oxygen and a sugar which has the power of reduction. If the conditions, such as concentration of sugar, potential hydrogen are different, this reaction rate and the color change will be different. Today, I researched the time difference to change watercolor by using various sugars. First, I put one type of sugar, such as glucose, fructose, maltose and lactose into a Sodium hydroxide solution. Then I put indigo carmine in it and I waited until its color turned yellow. Next, I stirred it. I checked RGB every minute using my smartphone application software. And I measured the time of its color change. As a result, I couldn’t see any difference between the three types of sugars, glucose, maltose and lactose, which have the same number of Formed Mill Group. That is why, I think there is a connection between reaction rate and the number of Formed Mill Group. To prove this Next, I checked the color change which direction of reduction in contrast, the first experiment to make sure consideration. First, I soaked Sodium hydroxide solution into constant temperature water bath with 20 degrees. After five minutes, I put indigo carmine and the four types of sugars which I mentioned before. Observing RGB. In the near future, I will use a wider variety of sugars for this experiment. I will also observe the color change by using absorbance. I tried Bertrand's method to research the amount of sugar for Traffic signal reactions. However, it didn’t go well. So, I have to find another method.

信号反応とは還元糖と空気中の酸素が酸化還元反応を起こし、色が緑、赤、黄色と変化していく反応である。この反応は糖の濃度や pH、外部条件などによって反応時間や色の変化が異なる。本実験は糖の減少量に着目し、様々な糖を使用して色が変化する時間の違いについて調べる。実験方法として水酸化ナトリウム水溶液と還元糖（グルコース、フルクトース、マルトース、ラクトース）を溶かし、その後、インジコカルミン水溶液を入れて撹拌した。その色の変化の様子をスマートフォンのアプリを使用して RGB 値を 1 分ごとに測定し、色が変化する時間を調べた。その結果、フルクトース以外の 3 つの糖では反応時間に大きな差はみられなかった。このことより、反応時間とホルミル基の数に関係性があるのではないかと考察を立てた。また、次の実験として 1 つ目の実験とは反対に還元の方向の色の変化を見た。実験方法として、水酸化ナトリウム水溶液が入っている容器を恒温槽に入れて 5 分間待機した後、インジコカルミン、還元糖（グルコース、フルクトース、マルトース、ラクトース）を混合させ、酸化方向の実験と同様に RGB 値を調べた。今後の展望として、実験で使用する糖の種類を増やす。吸光度を用いて色の変化を測定する。糖の減少量を定量する実験ではベルトラン法を用いて行っていたが、反応が上手く起こらないなどの課題があったので、ベルトラン法以外の糖の定量方法を模索していく必要がある。

2. 序論

＜研究背景＞

はじめに、信号反応とは塩基性条件下にあるインジコカルミンが糖によって還元されることで色が緑、赤、黄色と変化する。その後、振り混ぜることにより空気中の酸素に酸化されて色が還元のときとは逆に変化していく反応である。色が緑、赤、黄色である理由としては、インジコカルミンが pH11.4～13.0 の間では緑色を呈色する。還元されることによって生じるロイコインジコカルミンが黄色を呈色することが挙げられる。この反応は条件を変えることで色の変化の仕方や時間が変わってくる。例えば、溶液の pH を低くすることで、色の変化の仕方が 3 色の他にオレンジや青緑などグラデーションになる（ゲーミング反応）。私は、部活で新入生歓迎ガイダンスを行った際に、この信号反応で演示実験を行った。その際に、使用する試薬の質量や実験をするたびに色が変わる時間が変化することに興味をもち、具体的に使用した物質および信号反応における色の変化の関係性について調べたいと考えた。

＜研究目的＞

先ほど述べた通り、信号反応は使用する試薬の物質量が異なる場合、反応にかかる時間が異なる場合がある。今回は、還元糖に着目し、糖の種類を変えることによる反応時間の変化、反応中の還元糖の減少量の違いについて求めることを目的とする。また、そのときに具体的な手法として RGB 値を用いて反応時間を求めた。

3. 実験 1　信号反応における酸化反応の色の変化を見る

(1) 使用する試薬と器具

0.625 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液
還元糖（グルコース、フルクトース、マルトース、ラクトース）0.0025 mol
1%インジコカルミン水溶液
マグネチックスターラー
三角フラスコ
ホールピペット

(2) 方法

① 三角フラスコに 0.625 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液 80 mL と還元糖 0.0025 mol を混合した。
② そこにホールピペットを用いて 1%インジコカルミン水溶液 5 mL を加え、溶液の色が黄色になるまで放置した。
③ 黄色になった溶液をマグネチックスターラーで撹拌した。その様子をスマホで 1 分ごとに撮影した。
④ 1 分ごとに撮影されたものを RGB 値を使って反応に経過した時間を調べた。

RGB 値の測定の方法
右図のように光の反射などによる誤差を防ぐために
5 点プロットしてそれぞれの平均を求めた。

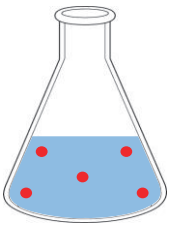


図 1 RGB 値の測定法

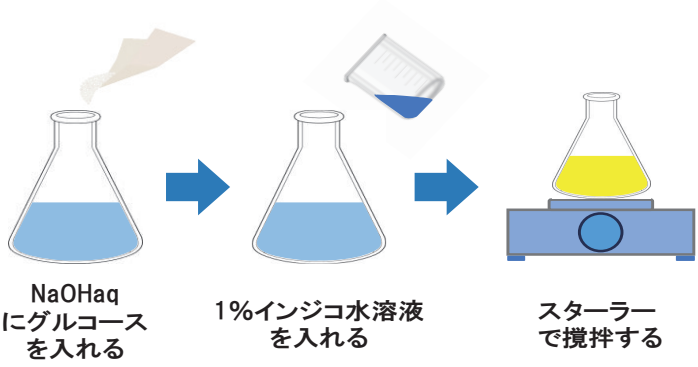
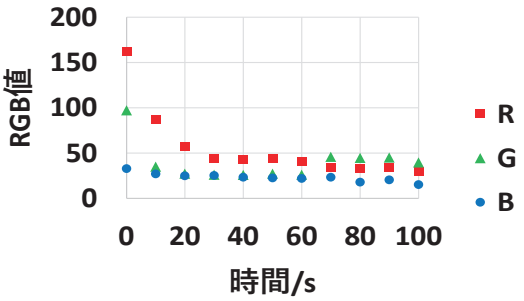


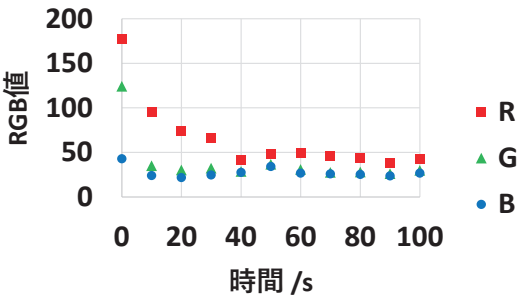
図 2 操作手順

(3) 結果

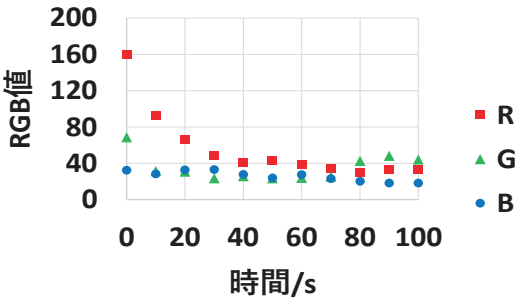
下図は各糖における色の変化である。



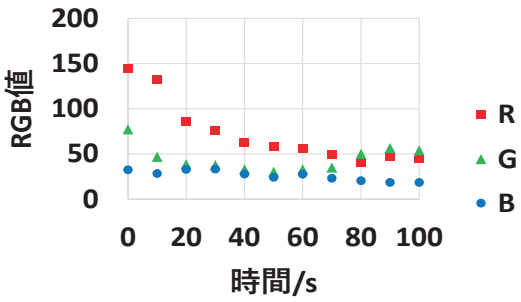
グラフ１　グルコースの色の変化



グラフ２　フルクトースの色の変化



グラフ３　マルトースの色の変化



グラフ４　ラクトースの色の変化

図 3 各糖の経過時間における RGB 値の変化

グラフ中にある R（□）は赤、G（△）は緑、B（○）は青を表している。

表 1 黄色から緑色になるまでの時間〔s〕

グルコース	フルクトース	マルトース	ラクトース
70	——	80	80

今回は G 値が大きく上昇した範囲が緑色に変化した点と捉えた。その結果、おおまかな結果として黄色から緑色になるまでにかかる時間は、RGB 値の上がり方、下がり方に差はあるものの、グルコースは 70 秒、フルクトースは緑色に変化する様子が確認できず、マルトースは 80 秒、ラクトースも 80 秒という結果になった。

(4) 考察

まず、単糖であるグルコースとフルクトースを比較した際、フルクトースの方はG値が上昇していないことが確認できる。これはフルクトースには C の二重結合の両端にヒドロキシ基がついたエンジオール構造（図 4）が含まれており、この構造は酸化されやすく図 4 のように酸化された後、ジケトン構造に変わり H が脱離する。それによって、還元の作用が他の糖と比べて強くなり緑にならず赤で留まると考えられる。また、二糖であるマルトースと乳糖を比較した際に反応時間の差がないのは構造式（図 5）を見比べた際、構造式の中にあるホルミル基の数に差がないためだと考えられる。二糖と単糖を比較した際に反応時間に大きな差がないのも同じ理由であると考えられる。以上の結果、考察より信号反応の反応時間と還元糖に含まれるホルミル基の数に関係性があると考える。

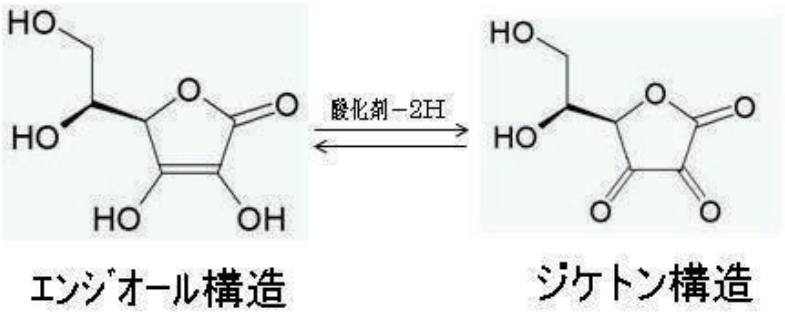
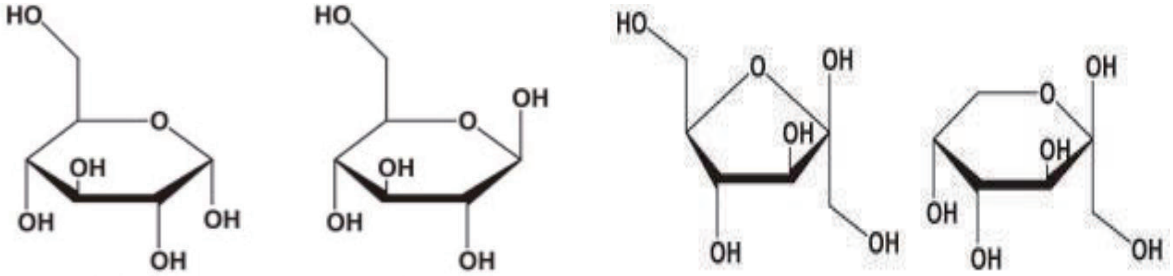
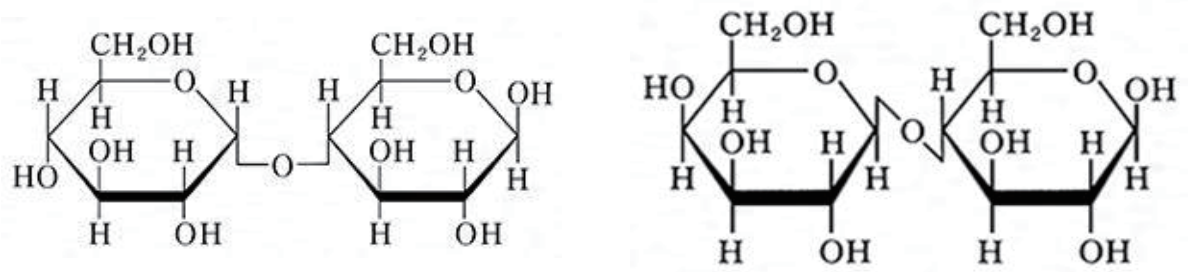


図 4 構造の変化



グルコース　　フルクトース



マルトース　　ラクトース

図 5 各糖の構造式 [1)]

4. 実験２　信号反応における還元方向の色の変化を見る

(1) 使用する試薬と器具

0.625 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液
還元糖（グルコース、フルクトース、マルトース、ラクトース）0.0025 mol
1%インジコカルミン水溶液
マグネチックスターラー
三角フラスコ
ホールピペット
恒温槽

(2) 方法

① 三角フラスコに 0.625 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液 80 mL を入れた後、恒温槽に入れて５分間待機した。
② 三角フラスコを恒温槽に入れたまま 1%インジコカルミン水溶液 5 mL と還元糖 0.0125 mol を加えてゴム栓をして放置した。
③ 反応の様子をスマホで撮影し RGB 値を使って反応時間を調べた。

(3) 結果

下図は各糖における色の変化である。

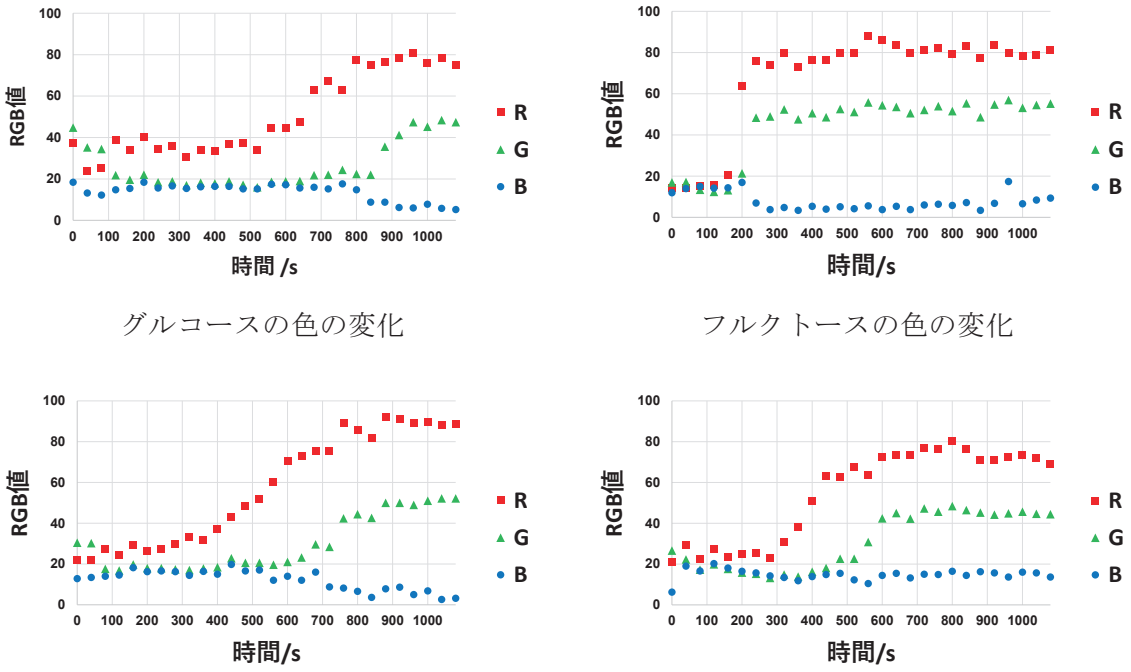


図 6 各糖の経過時間における RGB 値の変化
グラフ中にある R（□）は赤、G（△）は緑、B（○）は青を表している。

(4) 考察

還元の方向でも同じようにフルクトースのみ、他の糖とは異なり黄色に変化する時間が短いため、他の糖と比べ還元力が強いと考えられる。また、グルコースとマルトースは近い反応時間になったが、ラクトースでは半分ほどの時間で黄色に変化した。また、同じ実験を何回か繰り返したが、そのたびに反応時間が大きく異なる場合があった。これについては、インジコカルミンは塩基を加えると分解されるという研究結果が出ていることや、インジコカルミンには強酸性を示すスルホ基が含まれていること、溶け残りが発生したことなど様々な要因が絡んでいると考えられるため、実験の試行回数を増やすことで、より正確な反応時間を求める必要がある。また、酸化の場合とは対照的に糖の量を増やしたのにも関わらず黄色に変化するまでの時間が 15 分ほどかかった。これは酸化の場合、振り混ぜることにより溶液全体が反応するが、還元の場合は対流しないため下の方に溜まり、反応がしにくくなったのではないか。また、酸化の方が還元された状態より安定なのではないかと考えられる。

5. 今後の展望と課題

今回の実験では 4 種類の糖しか用いていないため、考察の立証のためにもホルミル基の数が違う還元糖やホルミル基の有無で比較して実験を行っていきたい。また、実験２を窒素置換した状態で行った場合の有効性を調べることや、より多くの結果を得るために反応時間を速めたこと、RGB 以外の反応時間の計測の仕方として吸光度を用いた測定も行っていきたい。糖の減少量を定量する実験ではフェーリング液や硫酸鉄（Ⅱ）などを使ったベルトラン法を用いて行っていたが、還元糖水溶液だけで行う予備実験の時点で反応の終点が非常にわかりづらいことや、反応自体が適確に起こらないなどベルトラン法そのものの再現性が問題であったため、そこが課題であり、ベルトラン法以外の糖の定量方法を模索していく必要がある。

6. 謝辞

まず、今回の論文そして 1 年を通して課題研究を行うに当たって担当である加藤先生、英語要旨を見てくださった星先生、研究倫理講座や実験ノート講座等の講座をしてくださった先生など、たくさんの方々にご支援ご指導をいただいたことに心から感謝いたします。課題研究をすることは初めてで、どのように実験を進めたり、実験ノートの書き方だったりわからないことばかりでしたが、丁寧にご指導してくださったおかげで、ここまでくることができました。誠にありがとうございました。

7. 参考文献

1) コトバンク
2) 東 拓優.2024.信号反応の還元機構に糖が与える影響
3) 千葉県立大原高等学校 生物部 化学研究班 青から始まる交通信号反応
4) 中平真央・岩田栞莉・清水光.信号反応の研究

プロテインのダマの解消方法

HOW TO DISSOLVE DAMA IN PROTEIN DRINKS

千葉市立千葉高等学校　普通科（SSH コース）２年　山本　悠翔

I research how Dama, many lumps of powder, is made in protein drinks. When we make protein drinks, if Dama doesn't appear, we can have protein drinks easily and may apply to other powder drinks. This research will find out the way to prevent Dama from producing and how to dissolve it. For the first purpose, I aim to identify the conditions in which it's produced easily. My hypothesis is that the way many lumps of powder touch the water surface is related to producing Dama. First, I prepared two sample protein drinks which are different in how to add water. For Sample A, I put half of the water first, then poured the rest. For Sample B, I added water all at once. Both of them were stirred with a magnetic stirrer. After that, I filtered the drinks with a tea strainer, and I dried Dama left in it. Then I weighed each one and compared the amount. As a result, Sample A had more Dama than Sample B. Thus, I found that wet powder coated the dry powder is preventing the lumps of powder from dissolving. To prove it, I created a model to illustrate this process. For the second experiment, I prepared another two sample protein drinks which I left different lengths of time before collecting Dama. For Sample C, I filtered the drink with a tea strainer immediately after I made it.　For Sample D, I left it for 30 minutes before filtered. I dried the Dama left in them then I weighed each one and compared the amount. As a result of this, I found out that the film created between water and powder is broken as time passes.

プロテインを溶かすときにできる粉の塊であるダマの発生条件を特定することで、プロテインを飲みやすくなり、また他の粉末飲料に応用できるかもしれない。本研究では、プロテインにおけるダマの発生を防ぐ方法および、発生したダマを溶かす方法の発見を目的とする。私は粉が塊状で水と触れることがダマの発生に関係しているのではないかと仮説を立て、それを確かめるためにダマをモデル化した。ダマのモデルの観察をもとに、ダマの発生を防ぐための実験と、発生したダマを溶かしてなくすための実験を行った。1 つ目の実験の方法は、水を 2 回に分けて入れ、水よりもプロテインの割合が大きい状態を作ったサンプル A と、水を 1 回で入れたサンプル B をマグネチックスターラーで攪拌する。そのあと茶こしでダマだけを取り出して乾燥させる。ダマの量は、乾燥させたダマの重さで判断する。その結果、サンプル B よりもサンプル A のほうがダマの量が多かった。2 つ目の実験の方法は、プロテインを作ってからすぐに茶こしでこしたサンプル C と、30 分置いてから茶こしでこしたサンプル D のダマの量を比較した。結果はサンプル D のほうがサンプル C よりもダマの量が少なかった。このことから、プロテインの粉末は塊状で水と触れると攪拌直後は表面に水の侵入を拒む膜ができ、ダマが発生するが、しばらく経つと膜が壊れるということがわかった。

1. はじめに

1.1 本研究の背景と目的

プロテインとはタンパク質を主成分とした粉末である。通常、タンパク質の補給を目的として、水や牛乳やジュースなど好きな飲み物を入れたプロテインシェイカーにプロテイン粉末を溶かして飲用される。しかし、プロテインをはじめとした粉末飲料は、溶かすときに粉の塊であるダマが発生することがあり、それが飲用を阻害している。そのため、ダマの発生を防ぐ、または一度できたダマを溶かすことはできないかと考えこの研究を行った。これらの方法を発見することができれば、プロテインだけでなく、ココアなどの他の粉末飲料への応用や、粉末を用いた工業的操作の効率改善に貢献できるのではないかと考えている。そこで、本論文では日常生活においてのプロテインのダマ解消方法を発見することを目的とする。

1.2 本研究の想定環境

プロテインを飲むときの水と粉を入れる順序は、粉を先に入れてから水を入れる場合と、水を先に入れてから粉を後から入れる場合の 2 種類ある。私は学校にプロテインを持っていくとき、袋ごと持っていくのはかさばって大変なため、シェイカーに粉を入れて持って行っており、後から水を入れるため前者を採用している。そのため、日常生活で活用できるという点に重点を置いている本研究では、同様に前者を採用する。また、使用したプロテインは私がいつも飲んでいるプロテインの中で一番ダマができやすいと感じる『ザバス ホエイプロテイン 100 抹茶風味』を用いた。以下、プロテインと呼ぶ。

1.3 本研究の仮説

参考文献〈1〉〈3〉より、プロテインのダマ発生のメカニズムとして次のような仮説を立てた。塊状に固まった粉末が水と接することで、分散する前に塊の表面の分子が水和し、周囲の分子とくっつきあって水の侵入を拒む膜を形成する。つまり、意図的に粉末を塊状で水と接させたときは、ダマが多く発生するのではないかと考えられる。

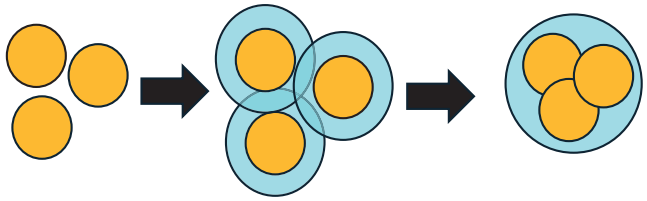


図 1　水の侵入を拒む膜の形成のされ方

2. ダマの発生モデルの作成

2.1 目的

参考文献〈1〉〈3〉より、ダマの発生メカニズムについて仮説を立てた。これが正しいかどうか、ダマをモデル化して確かめる。

2.2 方法

① プロテインの粉末 1.0 g をふるいにかけ、均一にする。
② そのプロテインを均一にアクリル板に乗せる。
③ ②の上から 2 mm の隙間が空くように、別のアクリル板を被せる（図 2）。
④ これを輪ゴムで固定し、水槽の中にゆっくり沈める。
⑤ 5 分後、10 分後、15 分後、20 分後、25 分後、5 回観察する。
⑥ この実験を 6 回行い、結果に違いがないか確認する。

2.3 装置説明

図 2 のような装置を作ることによって、仮説にある粉末が塊状で水と触れるという状況を作り出している。アクリル板で上と下からはさみ、2 mm の隙間から水が入るようにし、水槽に沈める。このとき、アクリル板を上から見たときの粉末の様子は、ダマの断面の様子と考えることができる。

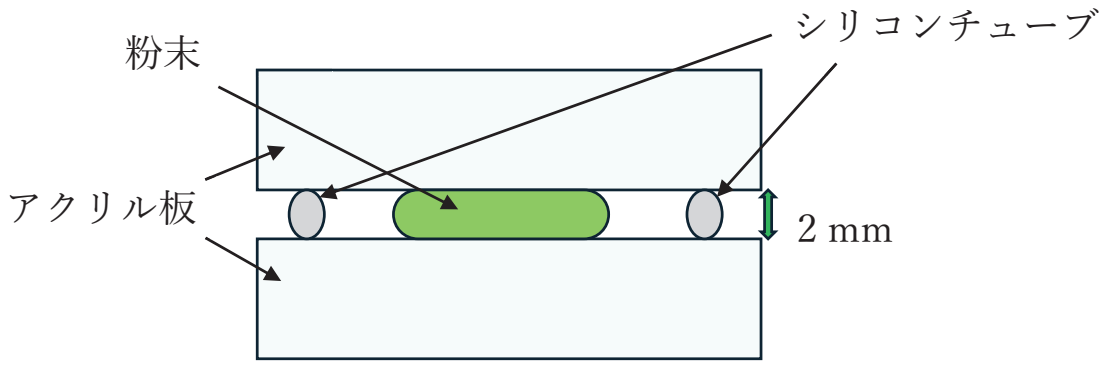


図 2　ダマのモデル化の装置

2.4 結果

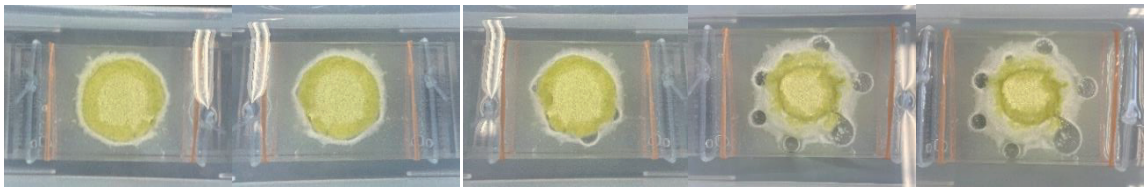


写真 1　ダマのモデル（左から 5 分後、10 分後、15 分後、20 分後、25 分後）

写真 1 からわかる通り、10 分後まではあまり変化が見えなかったが 15 分後から 25 分後にかけてダマの内部から気泡が出てきており、同時に内部の乾燥している部分（色の薄い部分）の面積が小さくなっているように見える。

2.5 考察

10 分後までは内部の乾燥した粉末の面積が変化しなかったことから、粉末が塊状で水と触れるときにはダマの表面に水の侵入を拒む膜ができていると考えられる。この膜の正体について、ハラルド・マギーは著書『マギー キッチンサイエンス』の中で、タンパク質が過度に密集・結合すると「凝集・凝固してコンパクトな塊にな」ると述べている [1]。本実験の環境下においても、粉末投入直後の表面ではタンパク質濃度が極めて高く、これと同様のメカニズムによって「凝集・凝固してコンパクトな塊」としての性質を持つ高密度な水の侵入を拒む膜が形成されたと考えられる。しかし、15 分後から気泡が発生しダマが崩れ始めたことから、水の侵入を拒む膜は時間経過によって壊れると考えることができる。

また、今回の実験ではダマのモデル化には成功したものの攪拌時での検証がされていないため、それを行うため以下の実験を行った。

2.6 今後の方針

プロテインは筋トレをしてからすぐに飲むのが効果的であり、私は水を入れてから 5 分以内に飲むようにしている。そのため、上記の結果からはプロテインのダマは時間を置くことで溶けてなくなることが考えられたが、日常生活で応用するにはそもそもダマを発生させない方法も考える必要がある。したがって、今後の実験では 10 分後までの、ダマに比較的変化が見られなかった状態を想定したダマの発生を防ぐための検証（本実験 1）と、10 分以上放置した状態を想定した検証（本実験 2）の 2 つの状態を想定して実験を行う。

3. 予備実験

3.1 マグネチックスターラーとは

マグネチックスターラーは、液体を攪拌するために使用される装置。磁石の力によって、容器内で撹拌子という小さな棒を回転させることで発生する水流を利用して、攪拌している。マグネチックスターラーを使用することによって、一定の力で攪拌することが可能になり、実験結果の信頼性が向上するため、本実験で用いようと考えた。しかし、マグネチックスターラーを用いた内部から水流を発生させる攪拌方法は通常のシェイカーを上下に振り外から力を加える攪拌方法と原理が根本的に異なるため、マグネチックスターラーの攪拌力を検証する必要があると考えた。なお、本論文では「IKA マグネットスターラーTopolino blue」を用いて実験を行った。（型番 Topolino blue）

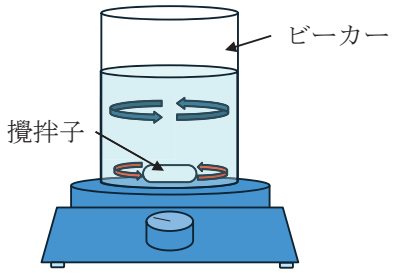


図 3　マグネチックスターラー

3.2 目的

マグネチックスターラーを用いた攪拌方法では、通常のシェイカーを上下に振る攪拌方法と根本的に攪拌方法が異なる。本予備実験では、攪拌方法が通常と異なるマグネチックスターラーを用いて今後の実験を進めていくために、マグネチックスターラーを用いた攪拌方法でダマが発生するのか検証した。

3.3 方針、方法

方針：マグネチックスターラーの最小の力と最大の力で攪拌しダマが発生するか観察する。

方法

① プロテイン 11.2 g と水 100 mL をビーカーに入れる。

② ①をマグネチックスターラーの最小の力と最大の力でそれぞれ 20 秒間攪拌する。

最小の力…出力のメモリを回して初めてマグネチックスターラーが動くときの攪拌力

角速度：約 20π

最大の力…出力のメモリが最大の値を取るときの攪拌力

角速度：約 60π

③ ②をふるい（2.00 mm）振るいダマの発生を確認する。

この実験では、ふるいに残ったものをダマとした。

④ これを 6 回ずつ行う。

3.4 結果

表 1　予備実験の結果

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目
最大	×	×	×	×	×	×
最小	×	○		○	○	×

表より最大の力ではダマが発生しなかったが、最小の力では発生することがわかった。また、最小の力の 3 回目の実験では水面に沈まなかったプロテイン粉末が残ってしまったため、ダマの判定ができなかった。

3.5 考察

予備実験より、最小の力での攪拌では、ダマが発生するため本実験に使えるということがわかった。また、マグネチックスターラーを用いた攪拌方法では粉末が水中に沈まずに水面に残ってしまうことがあり、それがマグネチックスターラーを用いた攪拌方法の欠点だと私は考えた。そのため、水面に浮いているプロテインの粉末を強制的に水中に沈める装置が必要だと考え、以下の検証をした。

4. マグネチックスターラーの攪拌における欠点とその改善

装置を作るにあたって、装置を試作し問題点を見つけて改善していった。

4.1 試作装置 1

蓋のような部品を水面に浮かせることで、マグネチックスターラーによって発生した水流と連動して回り、強制的に水面の粉末を水中に沈めることを狙った。しかし、水面に浮いている粉末が予想よりも重く装置が回らず、水面の粉末を水中に沈めることも失敗した。

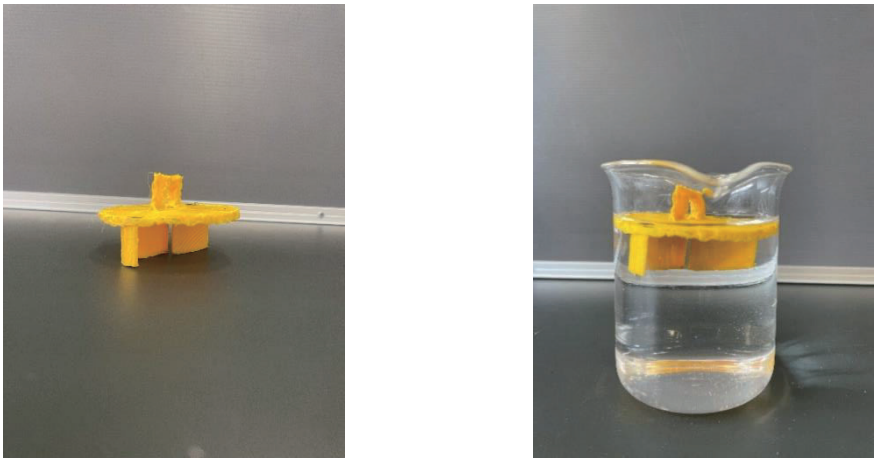


写真 2　試作装置 1

4.2 試作装置 2

4.1 試作装置 1 より、水面に蓋を被せるだけでは効果がないことがわかった。このことから、水面に浮かばせるのではなく上から吊り下げる形を取れば、水面の粉末を混ぜ、沈めることができるのではないかと考えた。しかし、吊り下げてもマグネチックスターラーが生み出す水流の動きと連動してしまい、粉末を混ぜることができなかった。

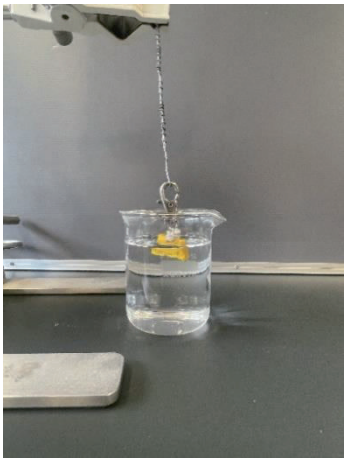


写真 3　試作装置 2

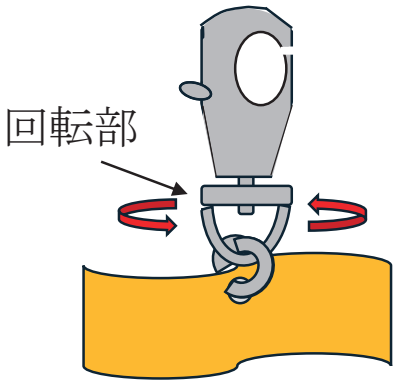


図 4　試作装置 2

4.3 試作装置 3

4.2 試作装置 2 より、マグネチックスターラーが生み出す水流の動きと連動してしまうと粉末を混ぜることができないとわかった。そのため、装置を浮かせたり、装置に回転部を取り付けたりするのではなく、完全に水流の動きから独立した装置が必要と考えた。参考文献〈4〉より、容器にバッフル（邪魔板）を置くことで上下方向の水流を発生させ、攪拌力が上がる（図5)。このことを参考にして、写真のような装置を開発した。これをビーカーの上に被せ、マグネチックスターラーの最小の力で攪拌を始めることで静止している板に水面の粉末がぶつかり、粉末が水中に沈むのを助けるという仕組みである。

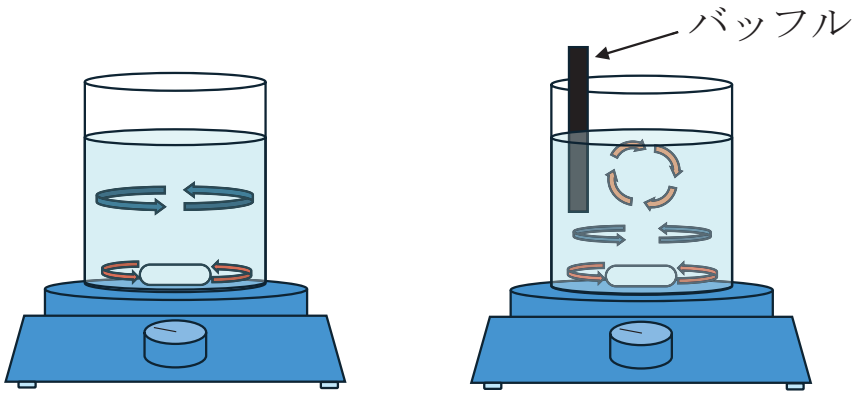


図 5　バッフルがない場合の水流の動き（左)、バッフルがある場合の水流の動き（右）

写真 4　試作装置 3

試作装置 3 では、板と粉末がぶつかる強さが弱いためか板で粉末が止まってしまいうまくいかなかった。

4.4 試作装置 4

4.3 試作装置 3 より、水流の速さを速くし、板と粉末がぶつかるときの衝撃を大きくできれば粉末が水中に沈んでくれるのではないかと考えた。ここで、運動エネルギー、圧力エネルギー、位置エネルギーの 3 つは各々交換することが可能で、その和が一定になるというベルヌーイの定理より、液体は幅が大きい場所を通るときよりも、幅が小さい場所を通るときのほうが圧力エネルギーが増大するため、速く動くという性質を利用して、写真と図のような装置を開発した〈2〉。このような構造にすることで、水面付近の水が狭い隙間を通って速くなり粉末を水中に沈めるのを助ける。

写真 5　試作装置 4

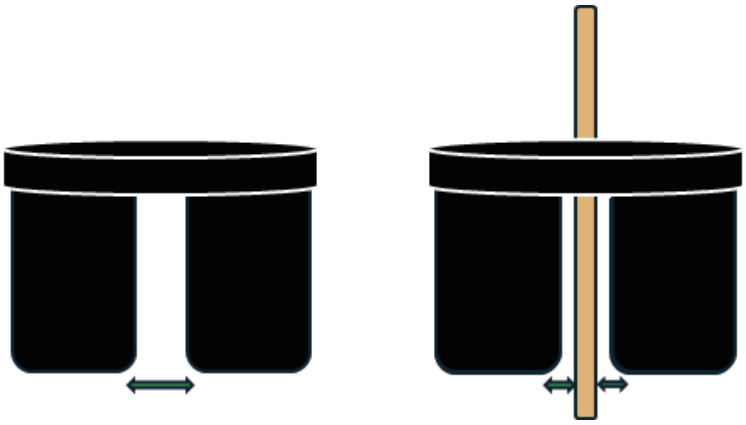


図 6　試作装置 3 と試作装置 4 の水面に
付近の水が通る場所の幅の違い

この装置を使うことで水面の粉末を水中に沈ませることに成功した。そのため、本実験ではこの装置を使って実験を行った。以下、装置 1 とする。

5. 本実験 1（ダマの発生の防止）

5.1 目的

粉末が水と接触する際に、粉末が塊状のまま水と接触する部分がダマになると仮説を立てた。これを確かめるため、プロテインに水を半量ずつ 2 回に分け入れることで粉が塊状のまま水に接触しやすい状況を作り、水を全量一度に入れた場合と比較した。

5.2 方針、方法

方針：粉末が塊状で水と触れることがダマ発生の要因の 1 つと考えられるため、プロテインに水を半量ずつ 2 回に分けて入れ、意図的に粉末が塊状で水と触れる環境を作り出し、比較する。

方法

① プロテインの粉末 11.2 g と水 100 mL をこの順にビーカーに入れる。
このとき水の入れ方を 2 つに分ける。
(1) 水 100 mL を 1 回でビーカーに入れる
(2) 水 100 mL を 50 mL ずつ 2 回に分けてビーカーに入れる

② これらをそれぞれマグネチックスターラーの最小の力で 20 秒間攪拌する。
このとき、装置 1 を被せて攪拌する。

③ 攪拌されたものを茶こしでこし、穴を開けたラップをかけて水が蒸発し乾燥するまで放置する。

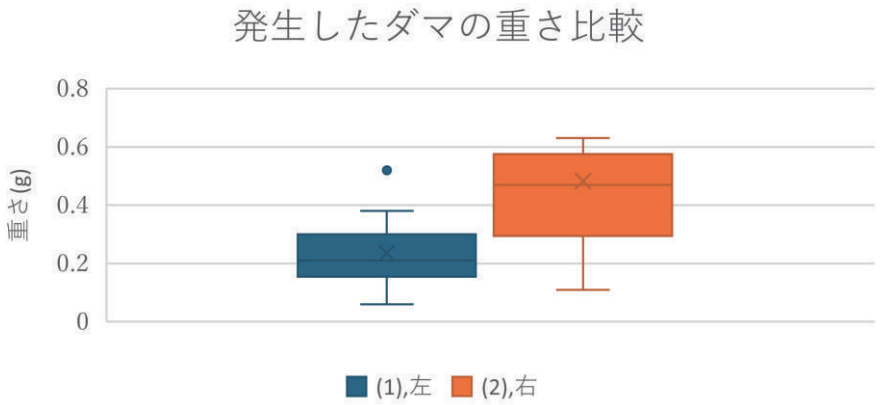
④ ③をシャーレに移し、茶こしに残ったものをダマとして重さを量って記録する。

5.3 結果

写真 6　(1)の水の入れ方で発生したダマ（左）と
(2)の水の入れ方で発生したダマ（右）の大きさの違い

表 2　本実験 1 の結果〔g〕

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	7 回目	8 回目	9 回目	平均
(1)	0.16	0.21	0.06	0.15	0.38	0.52	0.21	0.21	0.22	0.24
(2)	0.48	0.52	0.47	0.37	1.18	0.63	0.54	0.11	0.25	0.51



グラフ 1　本実験 1 の箱ひげ図

グラフより、(1)の箱ひげ図よりも(2)の箱ひげ図のほうが、数値が重い値の方に散らばっていることがわかる。また、茶こしに残ったダマは(1)よりも(2)のほうがひとつひとつの大きさが大きかった(写真 6)。

5.4 考察

結果より、(1)、(2)では発生したダマの重さに約 2 から 3 倍ほどの差があることがわかった。また、(1)より(2)のほうが大きいダマが発生することからも、粉末が塊状で水と触れることで表面に膜が形成されるが、水が多いと膜が発生しづらくなるということが考えられる。したがって、プロテインを作る初期段階では粉末と水の触れ方にダマの発生の要因があると考えることができる。

マグネチックスターラーを用いた撹拌方法では、モデル化して確かめたダマの発生メカニズムが、撹拌時にも適応されることがわかった。しかし、本研究の目的はダマの解消方法を見つけ、日常で応用することである。日常で応用させるためには、マグネチックスターラーを用いた撹拌方法ではなく、通常のシェイカーを用いて一定の力で撹拌させる方法での検証が必要だと考えた。以下では、その撹拌方法を取るために使用する装置の検証である。

6. プロテインの攪拌方法についての検討

6.1 上下振動を用いた攪拌方法の検証

試作装置 1′

プロテインの攪拌に上下振動を用いるために図 7 のような装置を考えた。

この装置は雫状の回転部をモーターで回転させ、支点を固定された棒を持ち上げることにより棒の先端に取り付けられているシェイカーに上下振動を与えるという仕組みである。

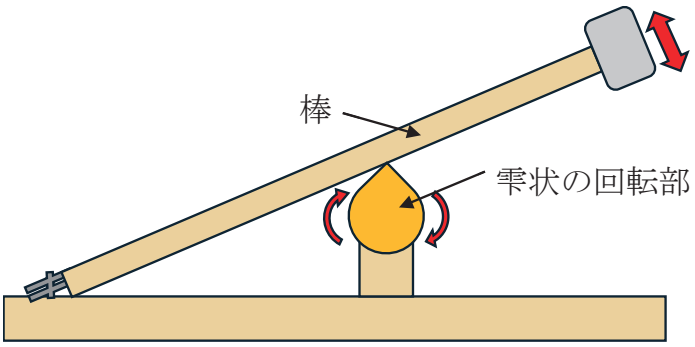


図 7　試作装置 1′

雫状の回転部のモーターにギアをかませてトルクを大きくしたり、棒の素材を重たい木材から固くて軽いプラスチック製のものにしたり、様々な工夫をした。しかし、棒は持ち上がらず、図 7 のようなモーターの回転によって、棒を持ち上げる形の装置は実現できないと考えた。

6.2 外からの力による攪拌方法の検証

6.1 より棒に上下振動を与えるのは、棒が重すぎるため難しいということがわかった。そのため、扇風機を改造して強力なモーターを使用して、上下ではなく外からの力によって振動させる装置を考えた。この装置では、これまでの装置とは違いシェイカーに振動を与えることができた。しかし、この振動はプロテインを攪拌させることができるほど大きな振動ではなく、さらに、振動の周期が一定でなかったため、実験で用いることはできなかった。

写真 6　試作装置 2′

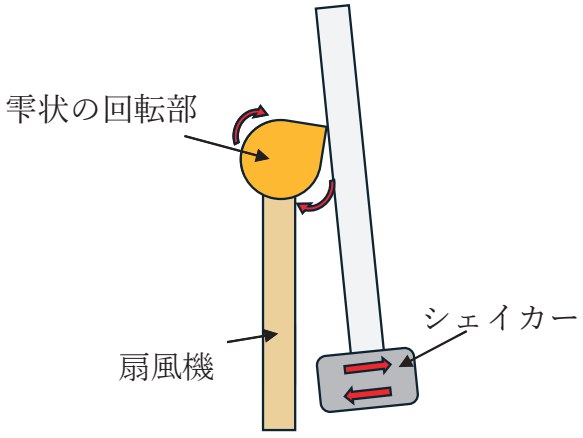


図 8　試作装置 2′

研究期間のうち装置開発にかなりの時間をかけてしまったため、研究が難航した。そこで、研究の目的に立ち返ると、私の研究の目的はプロテインの自動攪拌装置の開発ではなく、実生活で使えるプロテインのダマの解消方法であるため、装置開発はここで断念し、実験 2 では、マグネチックスターラーを用いて実験を行う選択をした。

7. 本実験 2（ダマ時間経過による変化の検証）

7.1 目的

2.ダマの発生モデルの作成で確認した時間経過による水の侵入を拒む膜の崩壊が、攪拌時にも適応されるのかどうかを検証する。

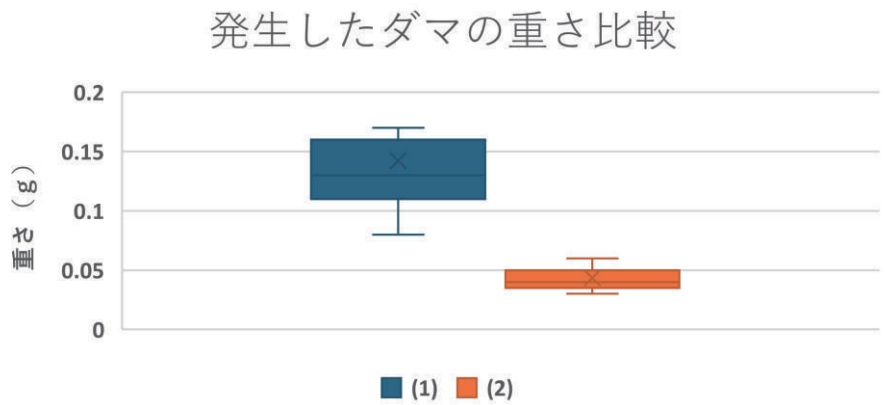
7.2 方法

① プロテインの粉末 11.2 g が入ったビーカーに水 100 mL を一度で入れる。
② ①をマグネチックスターラーの最小の力で攪拌する。
このとき、装置 1 を被せて攪拌する。
③ 茶こしで②でできたプロテインをこす。
このとき、茶こしでこすまでの時間次のように変えて対照実験を行う。
(1) 時間を置かずすぐに茶こしでこす
(2) 30 分放置した後に茶こしでこす
④ その後ラップ（穴あき）をかけて水が蒸発し乾燥するまで放置する。
⑤ ④をシャーレに移して、茶こしに残ったものをダマとして重さを量って記録する。

7.3 結果

表 3　本実験 2 の結果〔g〕

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	7 回目	8 回目	9 回目	平均
(1)	0.11	0.28	0.17	0.08	0.15	0.15	0.12	0.11	0.13	0.14
(2)	0.04	0.04	0.05	0.03	0.03	0.05	0.04	0.05	0.06	0.04



グラフ 2　本実験 2 の箱ひげ図

表 3、グラフ 2 より時間を置かずにダマの量を測定したものよりも、30 分置いてからダマの量を測定したもののほうがダマの量が少ないことがわかる。このことから、粉末が水に触れたときにできる水の侵入を拒む膜は時間経過によって崩壊すると考えられる。

7.4 考察

ダマの表面に形成される水の侵入を拒む膜のメカニズムについて次のように考察した。

ハラルド・マギーの著書『マギー キッチンサイエンス』によれば、水中に分散した物質の中には「実際に水分子を結合して動けなくしてしまうものもあり」[1]、それが流動性を低下させるとある。ダマの表面に形成された膜は、タンパク質が密集した状態であり、この作用が強く働いていると考えられる。すなわち、膜に含まれるタンパク質が周囲の「水分子を結合して動けなく」したことで、表面の分子が物理的な壁になり、内部への水の浸透を拒んでいたと考えられる。また、時間が経過するとダマがなくなるということについて、図 9 のようなモデルを考えた。

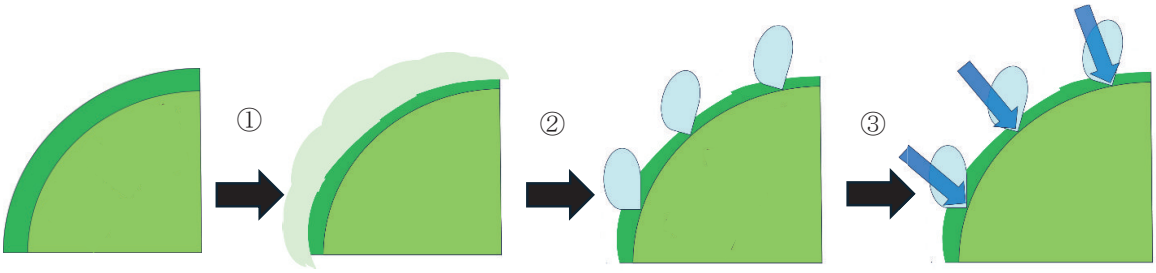


図 9　ダマの時間経過による変化

ダマの水と触れる表面は水の侵入を拒む膜（緑色の濃い部分）ができている。また、ダマの内部は乾燥した粉末（緑色の薄い部分）になっており、空気が含まれている。水の侵入を拒む膜は時間が経過すると少しずつ溶けていく（①）。それによって、膜が薄くなり外部から水が浸透・拡散しようとする作用によって、膜を破り気泡が発生する（②）。膜が破られたときに、同時に水が外から侵入し（青矢印）、内側からダマが破壊される（③）。この膜の崩壊プロセスを高分子における拡散として考える。ハラルド・マギーの著書『マギー キッチンサイエンス』によれば、理想的な溶解状態とは、「分子同士が離れて水分子の中に分散」[1] することであると述べている。ダマの形成直後ダマの表面では分子同士が絡まり合っていたが、時間の経過とともに水分子が隙間に浸透し、絡まり合いがほどけて膜の表面が溶けていくことで膜の厚みが薄くなり崩壊したと考えられる。

8. 結論

本論文では、本実験 1 で粉末と水の触れ方について検証し、本実験 2 では時間経過における水の侵入を拒む膜の崩壊について検証した。本実験 1 では、粉末が塊状で水と触れることで表面に水の侵入を拒む膜ができることが示唆され、本実験 2 ではその膜が時間経過によって崩壊するメカニズムについて考察できた。また、本実験 1 の結果より水の入れ方によってダマの発生を完全に防ぐことは現時点では難しく、本実験 2 の攪拌したプロテインを放置して、水の侵入を拒む膜がなくなるまで待つのが効果的であると考えられる。そのため、ダマの少ないプロテインを飲むには筋トレを始める前にプロテインを作り、筋トレしている間は放置するのが理想であると言える。

9. 今後の展望

結論でも述べているように本実験では、粉末と水の触れ方と時間経過における水の侵入を拒む膜の崩壊について検証し考察してきた。5.4 考察ではこの 2 つの検証における新たな見方を見出した。この考察に従って考えると、ダマが発生してしばらくの間は水の侵入を拒む膜は厚く強固であり、外部からの水の侵入に対し十分な耐性を持っているため、内部は乾燥状態が保たれる。その後、水の侵入を拒む膜が溶けていくにしたがって、水が侵入してこようとする力が大きくなりダマが崩壊する。このことから、水の侵入を拒む膜の強度によってダマのできやすさが違い、他社のプロテインおよびココアなどの他の粉末飲料においてダマの発生のしやすさが異なっているのは水の侵入を拒む膜の強度の違いによるものと考えることができる。また、水の侵入を拒む膜の強度と水が侵入してこようとする力の拮抗として以下のようなモデルを考えた。

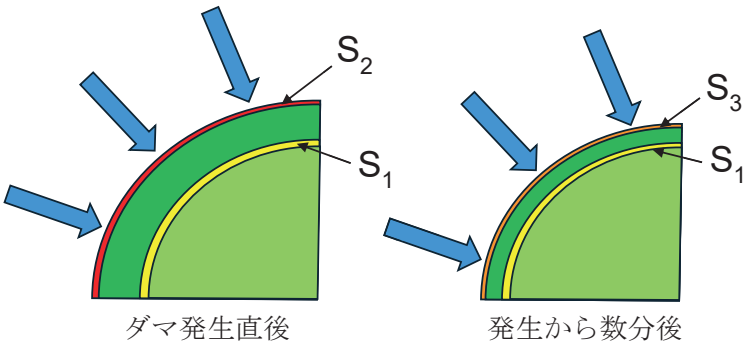


図 10　ダマの表面における力の拮抗

図 10 はダマの表面の様子を拡大したモデルである。左がダマ発生直後のモデルで、右は発生から数分が経過したものである。両者のモデルは水の侵入を拒む膜（緑色の濃い部分）が溶けて厚さが薄くなったときの様子を比較している。ここで図 10 のように、ダマ発生直後において水の侵入を拒む膜（緑色の濃い部分）のダマの内部の表面積を S_1、外部の表面積を S_2、発生から数分経過したときの外部の表面積を S_3 とおく。

ここで、ダマ発生から数分後のときのダマの内部の表面積は変化していないため S_1 は不変である。一方、時間経過とともに膜（緑色の濃い部分）が溶解し厚みが減るため、外部表面積について以下の関係が成り立つ。

$$S_2 > S_3$$

表面積が小さくなるとともに、ダマの水の侵入を拒む膜の厚さが薄くなることによって脆くなり、膜の物理的な強度が低下する。膜の強度が水の侵入しようとする圧力に耐えきらなくなった時点で、内部に水が入ってきてダマが崩壊する。

以上のことより、ダマ発生直後では強固な水の侵入を拒む膜によって水の侵入は防がれるが、時間の経過に伴い、その膜が溶けだし強度が落ちることによって水が浸入しダマが崩壊すると考える。また、ダマの表面が水から受ける圧力に着目すると、時間経過に伴い水から受ける圧力を大きくし、水が侵入しようとする作用を大きくすることによって、ダマの崩壊を速めることができたのならば、ダマの発生には圧力が関係していると言える。

すなわち、ダマの存在時間には膜が溶解して薄くなる速度と、水が侵入しようとする作用の大きさの少なくともどちらかが関係していると考えられる。

以下ではダマの崩壊にかかる要因の解明を目的に今後行おうと考えている実験構想を示した。

2.ダマの発生モデルの作成で用いたモデルを用いた再検証

上記のモデルが正しいかを検証するため、図 11 の加圧装置を用いる。 ダマの崩壊のメカニズムとして膜が溶解し薄くなることだけが関係しているのならば、外から圧力をかけても崩壊時間は変わらない。一方で水が浸入しようとする作用が膜の崩壊を促進するのであれば、外部から人為的に水圧を高めることで、膜がまだ分厚い状態でも強制的に水を浸入させ、ダマを早期に崩壊させることが可能であると考えた。

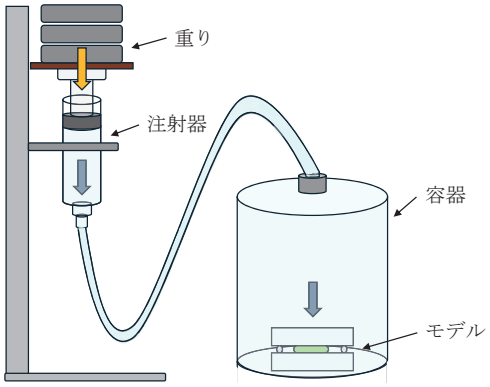


図 11　実験装置のイメージ図

この実験装置はパスカルの原理を用いて考案した。この装置では、重りの重さや個数を変えることによって注射器に入っている水が容器に流れ込み、ダマにかかる水圧を定量的に変化させることができる。この装置を用いることによって、ダマの水から受ける圧力を時間経過によって大きくすることができ、前述した水が侵入しようとする作用を強くすることができる。この装置を通してダマの崩壊と圧力の関係性を解明することができると考えている。

また、逆のアプローチとして、モデルを入れた容器に水を完全に入れるのではなく、水と空気の割合を半分ずつにして、空気を抜いていくことによって水圧を下げるという方法も考えられる。空気を抜いていくことによって水圧が小さくなるため、図 11 の装置を用いた実験とダマの崩壊の進行の違いを比較することによって、より実験結果に信頼性が増すと考えている。

10.　謝辞

本研究の指導にあたり、指導教官である山田先生に多大なるご指導をいただきました。本当にありがとうございました。

11.　参考文献

〈1〉 Harold McGee.マギー キッチンサイエンスー食材から食卓までー.香西みどりほか訳.東京,共立出版,2008,864p.

〈2〉 竹内淳,高校数学でわかる流体力学　ベルヌーイの定理から翼に働く揚力まで.東京,講談社,2014,249p

〈3〉 MP 五協フード＆ケミカル.“ダマってなんだろう？～ダマができる原因と解決方法①～”多糖類.com.2024 年 5 月 14 日 https://www.tatourui.com/trivia/trivia_vol.48,（参照 2024-12-11）

〈4〉 ユニテックフーズ株式会社.“ダマを作らない増粘多糖類の溶解方法”食品開発ラボ.2024 年 5 月 1 日 https://shokulab.unitecfoods.co.jp/article/detail193/,(参照 2024-2-7)

〈5〉 MONOVATE 株式会社.“ダマを無くす方法とは？”ダマを無くす方法とは？2024 年 7 月 9 日 https://www.monovate.co.jp/blog/blog/b-column-clumping-problems/,(参照 2024-12-3)

あとがき

本論文集には、SSH コース２年次から３年次にかけて、皆さんが試行錯誤を重ねながら取り組んできた課題研究の成果が収められています。ページをめくるごとに、そこに至るまでの思考の積み重ねや、長い時間をかけて研究に向き合ってきた姿勢が伝わってきます。

まず何よりも、SSH コースに進もうと決断した皆さんの意思そのものが評価されるべきものであると感じています。自分の興味や関心と向き合い、この環境を選択したことは、進路や学び方を主体的に考え、行動につなげた点において大きな価値を持っています。課題研究を通して一つのテーマを継続的に掘り下げたことで、物事を表面的に捉えるのではなく、根拠をもとに考える姿勢が育ち、日常の授業や学校生活への向き合い方も、より主体的なものへと変化していったように感じます。

課題研究において重要なことは、自ら問いを立て、その問いに自分の力で向き合い続ける点にあります。教科の学習では、与えられた問題に対して正解を導くことが中心となりますが、課題研究では「何を課題とするのか」「どのように検証するのか」を自分で判断し進めていかなければなりません。思うように成果が出ず、苦しい時期もあったと思いますが、それを乗り越えたことで他の教科ではなかなか得ることのできない、探究活動ならではの学びがあったはずです。

担任として私は、研究の節目で皆さんの姿を見てきました。発表直前まで資料の修正を重ね、時には寝る間も惜しんで準備を進めていたこと、定期考査の期間の合間を縫って実験や考察をまとめていたことは、今でも強く印象に残っています。課題研究発表会で、自らの研究内容を聴衆の前で堂々と発表する姿は立派でした。こうした経験を通して身につけた、課題を見極め、情報を整理し、自分の考えを他者に伝える力は、今後の進学や社会生活のさまざまな場面における支えとなっていくはずです。

本論文集が、皆さんの高校生活の努力を振り返る記録であると同時に、次の学びへと向かう確かな土台となることを願っています。SSH コースでの経験に自信を持ち、それぞれの場所で探究をさらに深めていく皆さんの今後を、担任として心から期待しています。

千葉市立千葉高等学校　３年 G 組担任　元吉　勇人

令和７年度
普通科SSHコース
課題研究論文集