

音による消火

櫻田侑也 山崎孝太 山田幸海 吉田航

要旨

本研究では、音波による空気の密度変化を利用して炎の消火に挑戦した。初めに1個の音源を用いた予備実験において、音の振幅が大きいほど、また音の振動数が小さいほど炎が大きく揺れることを確認した。この結果から、音の振幅を大きくし、振動数を小さくすることでより空気の密度変化が大きくなると予想した。次に本実験では、さらに空気の密度変化を大きくするために、複数の音源による音の干渉の利用を考えた。そこで関数アプリを用いて、空気の密度変化が大きくなる点を座標として算出し、実際に教室の中で座標平面の測定、ろうソクの設置を行った。そして、同じ4台の音源から同時に同位相の音を発生させ、各々の炎の様子を観察した。その結果、どの炎にも変化は見られなかった。この結果の原因として、音の振幅の不足、不正確なろうソクの配置、音を発生させるタイミングのずれ等が考えられた。

1. はじめに

音波は疎密波である。そのため、空気中を伝わる時、空気の密度変化が引き起こされている。私たちはこの現象を利用して火を消すことができないかと考えた。

2. 材料・研究方法

2-1. 予備実験

予備実験として、スピーカー(ANKER-Sound-Core)1台からスマートフォンアプリ Garage Bandを用いて一本のろうソクに向かって一定の音を発生させ、ろうソクの炎の変化を観察した。外部からの風をできる限り避け、炎の揺れの原因を音波の密度変化のみにするため、ろうソクの炎の周りを5面の段ボールで囲んだ。その際、スピーカーから出る音の振幅、音の振動数の一方を固定し、他方を変化させて炎の変化を調べた。

その結果、音の振幅が大きいほど炎が大きく揺れ、また振動数が小さいほど炎が大きく揺れた。火が消えることはなかったが、この予備実験から、振幅を大きくし、かつ振動数を小さくすることで、より空気の密度変化が大きくなると予想した。よって

本実験では音の干渉を利用することで、より大きな空気の密度変化を引き起こし、火の消火ができると考えた。

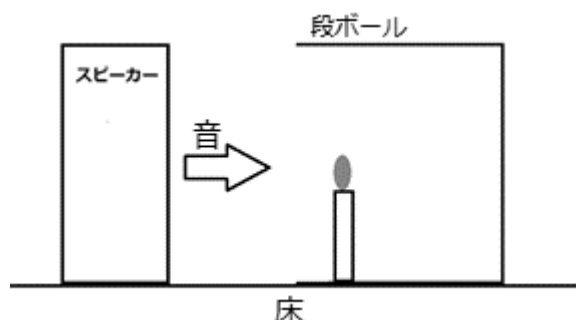


図1 予備実験における模式図

2-2. 研究道具、使用アプリケーション

本実験においては、高さ15 cmの亀山ろうソクと、音源としてスピーカー(ANKER-Sound-Core)を用いた。

音が干渉し強め合う点を算出するために、関数アプリ GeoGebra を用いた。また、音源から音を発生させるためにアプリ onsA440 を用いた。

2-3. 算出方法

はじめに、同位相で音が出る音源が S_1, S_2 の2個の場合を考える。強め合う位置をPとすると次の式が成立する。

$$|\overline{S_1P} - \overline{S_2P}| = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad - (1)$$

(S_1, S_2 :音源の位置, λ :波長[m])

関数アプリ GeoGebra を用いて P の軌跡を算出すると、P は S_1, S_2 を焦点とする双曲線を描くことが分かった(図 2-1, 2-2)。

図の対称性から下図のような2個の音源を選択しても一般性を失わない。

なお、(1)式の整数 m の範囲, λ , $\overline{S_1S_2}$ の具体的な数値の決定理由については 2-4 で述べる。

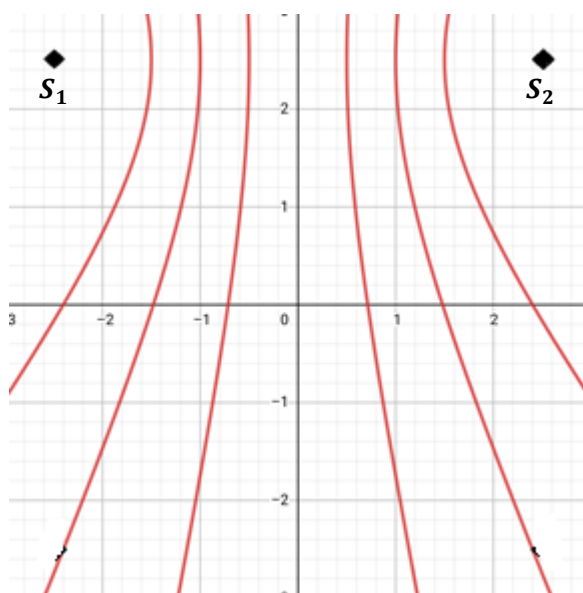


図 2-1 2 個の音源が 1 辺 5 m の正方形の一辺上にある場合

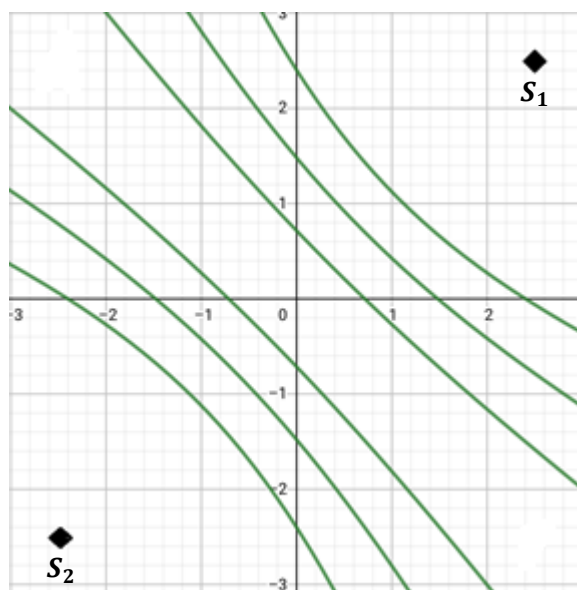


図 2-2 2 個の音源が 1 辺 5 m の正方形の対角線上にある場合

次に、本実験の目標である音源が 4 個の場合を考える。図の対称性から図 2-1 を 90° 毎に回転させた図を 4 つと、図 2-2 を 180° 毎に回転させた図を 2 つの合計 6 つの図を重ねればよい。

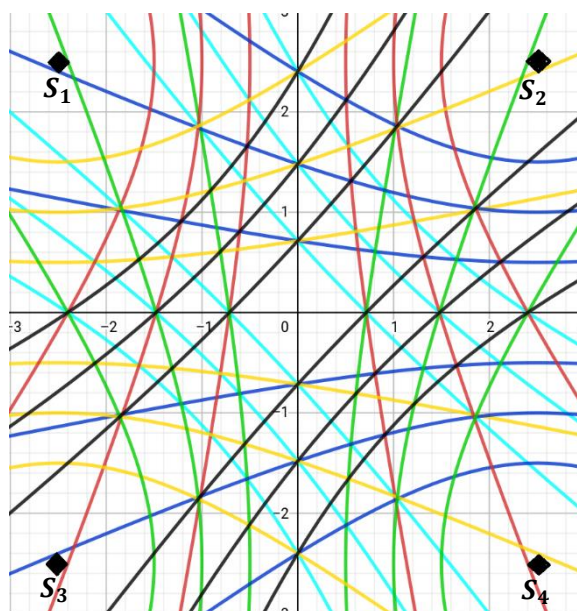


図 3 音源が 4 個の音源が 1 個 5m の正方角の各頂点にある場合

※図 3 の双曲線の焦点について各々、

赤色: S_1, S_2

黄色: S_1, S_3

黒色: S_1, S_4

水色: S_2, S_3

青色: S_2, S_4

緑色: S_3, S_4

を示している.

※図 2-1, 図 2-2, 図 3 の◆は音源をしめす.

2-4. 具体的数値の決定

学校内で十分な広さを確保し, かつ風の影響を無視できる場所として教室を選択した. また, 実験者が動き回ることが可能なように, 教室内に 1 辺が 5 m の正方形を描き, その各頂点に音源を置き, 2 個の音源間の距離は 5 m または $5\sqrt{2}$ m とした. 前者は 2 つの音源が正方形の 1 辺上の場合, 後者は 2 つの音源が正方形の対角線上の場合である.

$$\overline{S_1 S_2} = 5 \text{ (図 2-1)}$$

$$\overline{S_1 S_2} = 5\sqrt{2} \text{ (図 2-2)} \quad -(2)$$

次に, 点 P の存在条件を考える. 2 個の音源と点 P が三角形の頂点となるためには, 以下の不等式が成立することが必要である. (図 4)

$$|\overline{S_1 P} - \overline{S_2 P}| < \overline{S_1 S_2} \quad -(3)$$

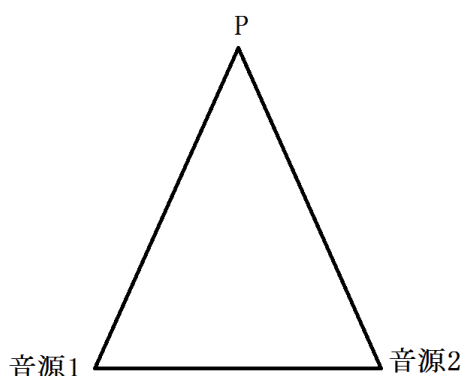


図 4 点 P の存在条件

本実験において, 上記の 3 式が同時に成立することから, 以下の不等式も成立する.

$$m\lambda < 5 \text{ (図 2-1)}$$

$$m\lambda < 5\sqrt{2} \text{ (図 2-2)} \quad -(4)$$

音速 v [m/s], 振動数 f [Hz], 波長 λ [m] の 3

数の間には次以下の等式が成立する.

$$v = 340 \quad -(5)$$

$$f\lambda = 340 \quad -(6)$$

(4)式, (5)式及び(6)式を用い, 本実験のために十分な数の整数値 m が存在し, かつ音が干渉する点を正方形内にある程度確保するために, 振動数を 340 Hz, 波長を 0.7 m と定めた.

2-5. 研究方法

はじめに, 無風状態の教室内にメジャーで 5 m×5 m の正方形を測り, 1 m 毎に定めた格子点及び算出した強め合う点でロウソクを床に固定した.

次に, 4 台の iPad に接続したスピーカー 4 台から同時に 340 Hz の音を発生させた.

3. 結果

音波が干渉し合う点上, 及び格子点上に置いた炎も消えなかった. 何の変化も起こらなかった.

4. 考察

本実験で, 仮説とは異なる結果になった要因として考えられるのは 3 つある.

1 つめの要因として, 単純に振幅が足りていなかったということが考えられる. 今回使用したスピーカーはそれほど性能がよいものではなく, この 5 m 四方の領域で使用するには振幅が不足していたように思われる.

2 つめの要因として, 計算した座標に正確にロウソクを配置できていなかったということが考えられる.

3 つめは, スピーカー間での接続をできなかったため, 4 つのスピーカーから音を出す作業を手動で行わなければならない, それぞれのスピーカーによって, 音の出すタイミングが異なっていたことである.

5. まとめと今後の課題

本実験の反省として, 音の反響や減衰を考慮し

ていなかったということがあげられる。音の反響や減衰は、音に関する実験を行う上で重要な条件であるが、高度な計算を要するため、やむを得ず本実験では断念した。また、音が2次元ではなく3次元で伝わることを考慮していなかったことも大きな要因である。

実験規模を大きくしすぎたことや使用するスピーカーの性能の悪さ、不正確な座標配置など反省点は多い。すべての条件を考慮して適切な実験を行うということが、今後の課題であろう。

エッグドロップ実験を活用した保護構造の研究

～シェルターの構造と落下速度、卵の割れ方の関係～

加藤龍之介 三双清央 原田太一 吉川昂甫

要旨

本研究では、保護構造を考えるという観点から、ケント紙製のシェルターに食用鶏卵を入れて落下実験を行った。シェルターの大きさを変化させると落下速度が変化した。その結果、シェルターの母線の長さを変化させることによって空気抵抗や質量が変化し、物体の落下速度を低下させることはできたが、円錐のみの保護構造で卵を割らずに着地させることはできなかった。

1. はじめに

最近の科学コンテストなどで、「エッグドロップ甲子園」と呼ばれるイベントがある。「エッグドロップ甲子園」とはエッグドロップ(ある一定の高さから落とす生卵を紙だけで制作したシェルターで保護し、割れないようにする)という実験を利用したイベントである。そこで、私たちはエッグドロップをテーマとして実験を行うことにした。シェルターの形状として、円錐型に絞って研究することにした。その理由は、同条件で実験を行うために、シェルターが作りやすい、円錐のとげ(矢印をつけた部分)が卵よりも先に接地することで、衝撃が吸収されやすい構造を持つという2つの条件を満たすからである。(図 1)また、円錐型シェルターの各部の構造は本論文では(図 2)のように呼称する。私たちは学校の屋外にある高さ 7.35 m 階段の踊り場(平面で真下に地面、地面との間に障害物なし)の地点から卵を落下させ、予備実験および本実験を行った。(図 3)予備実験として各シェルターの大きさ(母線)を変えることで卵が割れるかどうかを確かめた。その結果、どの長さ(12, 15, 18, 21, 24 cm)でも割れた。よって、本実験でのシェルターは母線の長さを 18 cm、展開図にしたときの扇形の中心角を 257 度に設定することにした。なお、展開図におけるのりしろは 6 cm である。次に、シェルターのとげに台をつけて実験を行っ

たところ卵は割れなかった。そこで卵を守るシェルターを作るという目的は達成できたので、私たちは次のような本実験を考えた。それは台無しのシェルターに工夫を加えて卵を割れないようにするという実験である。そのために、空気抵抗を増やして速度を落とす必要があると考えパラシュート(図 3)をつけたり、パラシュートが風にあおられる影響を減らしたりするための姿勢安定装置をつけるということを考えた。

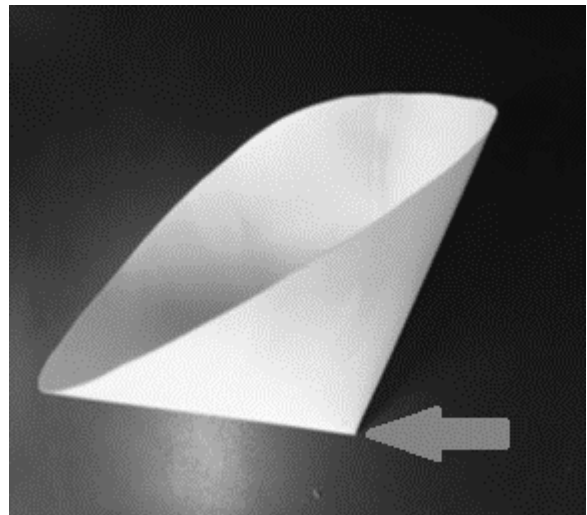
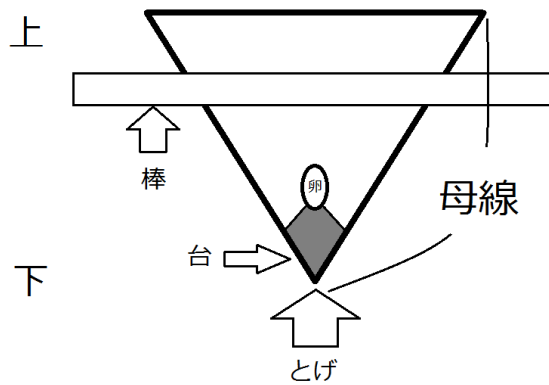


図 1 円錐型シェルター



※本実験では、パラシュートは図4のように上部に取りつけた。

図2 円錐型シェルターの構造の説明



図3 落下実験の様子

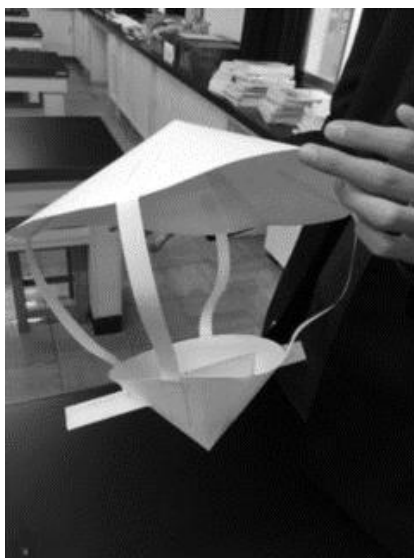


図4 実験4で取りつけたパラシュート

2. 材料・研究方法

2-1. 研究試料

本研究で用いた鶏卵は、市販で販売されている食用卵(白・L サイズ・65g)を用いた。シェルターを作成するのに使用したケント紙は厚さ 0.20 m, 大きさ A2 サイズ 420×594 mm, 157 g/m² のものを用いた。紙と紙の接合部分には木工用ボンド、シェルターの形を作成するのにコンパス、カッターを使用した。

2-2. 研究方法

卵が入ったシェルターを 7.35 m の高さから落とし、落下地点から 5 m 離れたところからハイスピードカメラで固定撮影して落下の様子・速度を記録した。落下地点には新聞紙を敷き、白身・黄身の飛散を抑えた。以上のことは、以下の実験すべて同条件で行った。

実験 1. 直径 18 cm (図 1) の円錐型シェルターを、何も乗せずにそのまま落下させた。

実験 2. 直径 18 cm のシェルターに卵を入れ、そのまま落下させた。

実験 3. 直径 15 cm のシェルターの上部に直径 21 cm のシェルターを傘代わりに反対向きに 4 本の 5 cm×1.5 cm の紙でつなげてパラシュートに取り付け、卵を下のシェルターに入れて落下させた。

実験 4. 直径 15 cm のシェルターの上部に直径 21 cm のシェルターを傘代わりに反対向きに 4 本の 5 cm×1.5 cm の紙でつなげてパラシュートとして取り付け、シェルターには下部の頂点から 10 cm 上に地面と平行にシェルターに穴を開けて棒を設置し、卵を下のシェルターに入れて落下させた。

実験 5. ここでは、3.5 cm×3.5 cm×8.5 cm の直方体型の錘を利用して卵の耐性を調べた。

3. 結果

円錐型シェルターのみに入れた状態で落下させた場合、母線の長さにかかわらず円錐の先端部分ががつぶれ衝撃を吸収しきる前に卵が地面

に接触してしまい、地面に触れた部分の全面にひびが入りエッグドロップは失敗した。また、シェルター上部に棒などの遮蔽物を配置していない状態では、落下途中に卵がシェルターから飛び出してしまい、衝撃から守ることはできなかった。シェルター内部の下から数センチメートルの部分に直径 5 cm の台を作った場合では、先端部分が衝撃を吸収することに成功し、母線の長さが 18 cm のものでエッグドロップを完了することに成功した。この方法は、衝撃吸収という観点からエッグドロップ成功を目指したものである。

次に、卵の上に錘をのせる実験で、卵がどれ位の力に耐えられるのかを調査した。その結果は以下の表の通りである。

表 1 卵の耐久力調査

回数	卵が割れた際の錘の質量(g)
1	1539
2	2063
3	3147
4	2561
平均	2327.5

以下の表 2 は各シェルターの形と、実験の様子をハイスピードカメラで撮影し、その映像から算出した地面に衝突する直前のシェルターの速度との関係である。

表 2 各シェルターの速度

シェルター	落下直前の速度(m/s)
実験 2	16.25
実験 3	3.56
実験 4	4.60

また、以下の図は各実験における卵の割れ方である。写っている箇所は最も卵の損傷が激しかったところである。



図 5 実験 2 の様子



図 6 実験 3 の様子



図 7 実験 4 の様子

4. 考察

実験 2 では卵全体にひびが入り、また落下開始時には(図 2)のように縦向きに卵を入れたにもかかわらず、卵が横向きに倒れ、側面に大きくひびが入っていることから、地面からの衝撃をシェルター下部のとげで受けきれていないのではないかと考えられる。実験 3 では一点に集中してひびが入っていることから地面にぶつかってひびが入ったのではないかと考えられる。実験 4 では実験 3 のようなひびが見られないため地面には衝突していないが、全体的に小さなひびが見られるため地面からの衝撃がまだ残っているということが考えられる。実験 2 における落下速度が 16.25 m/s であったことに対して、実験 3 での落下速度が 3.56 m/s に減少したのは、シェルター上部に取り付けた傘型のパラシュートによって空気抵抗が増加したためだと考えられる。パラシュートを取り付けて落とす方法は、落下速度を落とすのに有効であるが、そのためには風などの影響を受けにくく、シェルターのとげ部分が地面に垂直に接地するという安定した落下が必要であると考えられる。実験 3 における落下速度が 3.56 m/s であったことに対して、実験 4 での落下速度が 4.6 m/s に増加したのは、姿勢を安定させるために加えた棒によって質量が増したからではないかと考えられる。また、この棒により地面に衝突時に卵がシェルターから飛び出ることを防ぐことができた。以上のような工夫を加えたが、卵が割れない台無しの構造を製作することはできなかった。

5. まとめと今後の課題

本実験の目的である台無しで卵を割れないようにする構造を作るという目的を果たすことはできなかったが、パラシュートにより速度を 4 分の 1 ほどに落とすことができた。また、パラシュートを加えることでとげを下向きに保たないまま落下する不安定さを、棒をつけ軽減することができた。実験を成功させるために今後考えられる工夫としては、棒を二つにしてより姿勢を安定させ、またシェルター

が落下したときにシェルターから卵が出ないようにすることやパラシュートとシェルター間の距離を縮めることがある。そのほかにパラシュートを二個つけることや、パラシュートの角度を広げることなどが考えられる。

6. 参考文献

- エッグドロップ甲子園実行委員, 2017, エッグドロップ甲子園,
<https://eggdropkoshien.org>, 2018.10.11
- 佐藤広基, 森正樹, 渡辺諒, 2014, 卵落下実験による衝撃吸収構造の研究,
<https://school.gifu-net.ed.jp/ena-hs/ssh/H26ssh/sc2/21421.pdf>, 2018.11.15
- JAXA クラブ, 2013, エッグドロップコンテストで勝負,
http://www.jaxaclub.jp/space_lab/04/, 2018.11.15

ドップラー効果の逆

～ Anti-Doppler Sound を用いたドップラー効果の相殺 ～

尾崎遼太郎 後藤拓都 酒井翔大 白倉崇生

要旨

本研究は、本来ドップラー効果が起きる状況下において、ドップラー効果が起きないようにすることが目的である。そこで我々はドップラー効果を相殺する音、すなわち Anti-Doppler Sound (以下 AD 音) を作成し、その音を用いて実験を行い、目的の達成を目指した。

1. はじめに

ドップラー効果は、波(本実験では音波)の発生源(本実験では音源)と媒質(本実験では大気)との相対的な速さ、観測者(本実験ではマイク)と媒質(本実験では大気)との相対的な速さの存在によって、周波数が異なって観測される現象であり、例えば救急車のサイレンに代表されるように日常生活においても何気なく発生している現象である。我々は、このドップラー効果に対して何らかの操作を行うことで、本来ならばドップラー効果が観測される状況下において、ドップラー効果を阻害することが可能なのではないかと考え、これを研究テーマとした。

まず我々は、ドップラー効果を数的に把握するため、一般的に「ドップラー効果の公式」として知られている式(以下「公式」)を用いて考察を行った(図 1, 2)。その結果、音源が観測者のちょうど前を通過する瞬間(すなわち公式において符号が逆転する瞬間)に周波数が急激に変化するという結論を得た。ここで、「通過の瞬間に音源の周波数を変更することでドップラー効果を相殺する」という、本研究の基本的な方針が決まった。

次に、実験内容の大枠を決定した。

我々が行うべきと考えた実験は 3 段階に分かれている。すなわち、「台車の速度を把握する段階」(以下「第 1 段階」)、「ドップラー効果を観測する段階」(以下第 2 段階)、「AD 音を観測する段階」

(以下第 3 段階)である。

まず第 1 段階であるが、我々がこれを第 1 段階としたのは、本研究で使用する主たる実験器具(「研究試料」にて詳述)の多くが製作したものであり、諸器具が正常に動作するかどうか、加えて正常に動作したとき台車の速度がどのように推移し、どの程度の速度であるかを調べる必要があったためである。第 2 段階は、一定の周波数を発する音源を走らせることで、ドップラー効果の観測を行った。ここで得られた結果は、本研究の基準として考察で利用した。第 3 段階は、AD 音を発する音源を走らせ、周波数の推移を観測した。ここで得られた結果と第 2 段階で得た結果を比較することで、AD 音がドップラー効果を相殺できたのか判断した。

$$f = \frac{V}{V - v_s} f_0$$

V : 音速(本研究では 340 m/s とした)

v_s : 音源の速度(ただし、音源から観測者への方向を正とする)

f_0 : 音源の出す周波数

f : 観測される周波数

図 1. 観測者が静止している場合の公式

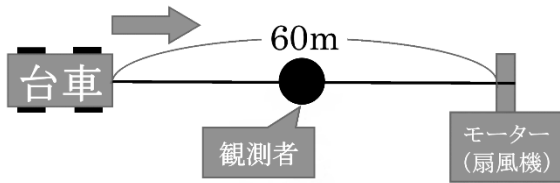


図 2. 分析段階で用いた図

2. 材料・研究方法

2-1. 研究試料

本実験で使用した研究試料及び実験器具は主に 8 つである(添付資料 1). すなわち, 台車, モーター, タコ糸, スタンド, AD 音, 集音マイク, パソコンである. 順に説明する.

まず台車であるが, ライトレースカーを活用して製作した. モーターは, 扇風機のモーター部分にペットボトルの上部を装着することで, タコ糸を巻き取れるようにした. そして, 台車とモーターをつなぐのがタコ糸である. また, モーター(特にペットボトル部分)の回転軸をより安定させるため, ペットボトルの口にスタンドで固定したリングを添えた.

AD 音は前述の通り“Anti-Doppler Sound”の略であり, 文字通りドップラー効果の相殺, すなわち観測される周波数が常に 1020 Hz となるように作成した音である. AD 音は, 周波数を時間単位で変化させる関数を, 公式を利用することで導き, その関数を Excel に入力することで作成した(図 4). パソコンは集音マイクを接続して周波数の観測および出力, 解析に使用した. なお, グラフによる出力および解析には“WaveSpectra”を使用した.

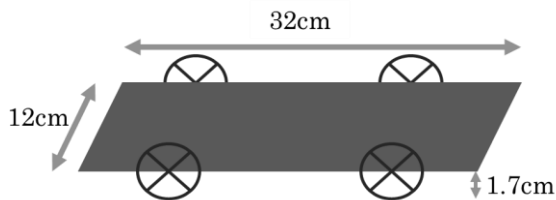


図 3. 台車のサイズ

$$y_s = A \sin 2\pi f(\hat{t}) \hat{t}$$

$$y_o \left(\hat{t} + \frac{\sqrt{d^2 + v_s^2 \times \hat{t}^2}}{V} \right) = A \sin 2\pi f \hat{t}$$

$$t = \hat{t} + \frac{\sqrt{d^2 + v_s^2 \times \hat{t}^2}}{V}$$

$$\hat{t} = \frac{V^2 \pm \sqrt{V^2 \cdot v_s^2 + (V^2 - v_s^2) \cdot \left(\frac{d}{S}\right)^2}}{V^2 - v_s^2} \cdot t$$

$$y_o(t) = A \sin 2\pi f(t) \frac{V^2 \pm \sqrt{V^2 \cdot v_s^2 + (V^2 - v_s^2) \cdot \left(\frac{d}{S}\right)^2}}{V^2 - v_s^2} \cdot t$$

$$f_c = f(t) \frac{V^2 \pm \sqrt{V^2 \cdot v_s^2 + (V^2 - v_s^2) \cdot \left(\frac{d}{S}\right)^2}}{V^2 - v_s^2}$$

として, f_c が一定となるよう $f(\hat{t})$ を定める.

$$f(t) = \frac{V^2 - v_s^2}{V^2 \pm \sqrt{V^2 \cdot v_s^2 + (V^2 - v_s^2) \cdot \left(\frac{d}{S}\right)^2}} \cdot f_c$$

$$f(\hat{t}) = \frac{V^2 - v_s^2}{V^2 \pm \sqrt{V^2 \cdot v_s^2 + (V^2 - v_s^2) \cdot \left(\frac{d}{\hat{t} + \sqrt{(d^2 + v_s^2 \times \hat{t}^2)/V}} \right)^2}}$$

y_s : 音源が発する音の式

y_o : 観測される音の式

d : 観測者とコースとの距離

v_s : 台車の速度

V : 音速(本研究では 340 m/s とした)

t : 測定開始からの経過時間

f : 振動数

図 4. AD 音を表す関数とその導出方法

2-2. 研究方法

2-2-1. 実験 1 (第 1 段階)

①全長 60 m のコースを設け, スタート地点から 10 m, 20 m, 30 m, 40 m の各地点を計測地点として設定した.

②音源(スマートフォン)を搭載した台車を走らせ, 各地点通過時の時間を計測した.

②を 5 回繰り返し, 得られたタイムの平均値をとつ

た後、グラフを作成した。

(注)この実験はあくまで速度の把握が目的であるため、音源からは一切音を出していない。

2-2-2. 実験 2 (第 2 段階)

- ①実験 1 と同様に 60m の直線コースを設けた。
- ②スタート地点から 30m, コースから 1m 離れた地点にパソコンを設置し、周波数測定地点とした(図 5)。
- ③音源が常に 1020 Hz の音を発するようにして台車に乗せ、周波数を測定した(1 回)。

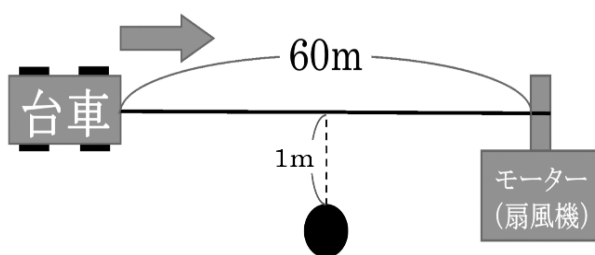


図 5.概略図

2-2-3. 実験 3 (第 3 段階)

- ①実験 2 と同様に直線コース、及び観測地点を設けた。
- ②音源が AD 音を発するようにして台車に乗せ、周波数を測定した(1 回)。

2-2-4. 解析

- ①“WaveSpectra”を用いて収集した音波をフーリエ変換によって、周波数を抽出した。
- ②抽出した周波数から、グラフを作成した。

3. 結果

3-1. 実験 1 (第 1 段階)

表 1. 車の通過時間およびその平均

距離	測定1	測定2	測定3	測定4	測定5	平均
0 m	0.00 s	0.00 s	0.00 s	0.00 s	0.00 s	0.00 s
10 m	2.61 s	2.74 s	2.78 s	2.33 s	2.41 s	2.57 s
20 m	4.59 s	4.68 s	4.71 s	4.16 s	4.28 s	4.48 s
30 m	6.12 s	6.16 s	6.17 s	5.65 s	5.56 s	5.93 s
40 m	7.88 s	7.68 s	7.74 s	7.03 s	6.88 s	7.44 s

表 2. 速度およびその平均

距離[m]	速度1[m/s]	速度2[m/s]	速度3[m/s]	速度4[m/s]	速度5[m/s]	平均[m/s]
0	0	0	0	0	0	0
10.0	3.83	3.65	3.60	4.29	4.15	3.89
20.0	4.36	4.27	4.25	4.81	4.67	4.46
30.0	4.90	4.87	4.86	5.31	5.40	5.06
40.0	5.08	5.21	5.17	5.69	5.81	5.37

表 1 は各測定地点における台車の通過時間、およびその平均を表したものであり、また表 2 はこのデータをもとに各地点における台車の速度、およびその平均を計算したものである。また、表 1, 2 をそれぞれグラフ化したものとして、図 7, 8 を挙げた。以上の表より、「台車の加速(モーターの加速)は一定ではないこと」、「10 m 以降はほぼ一定の速度変化をすること」、「30 m 地点通過時の速度はおおよそ 5 m/s であること」の 3 点が分かった。

なお、予備実験中に台車の車輪部分の破損が何度か起き、その都度全く同種のライトレースカーの車輪と交換した。そのため、車輪交換に起因する台車の性能変化(特に速度面に関して)が起きる可能性は著しく低いと考え、車輪交換を行ったタイミングは記録しなかった。

3-2. 実験 2・実験 3 (第 2 段階・第 3 段階)

図 9 は台車が 30m 地点に到達した時間を基準(すなわち 0)とし、到達 1.5 秒前(表中 -1.5)から 1.5 秒後(表中 1.5)までの 0.1 s 毎の周波数の変化をグラフ化したものである。なお表中では、実験 2 の結果を α 、実験 3 の結果を β とした。

このグラフより、AD 音の周波数は想定よりも小さいレベルで推移していたことが分かった。

4. 考察

4-1. 実験1（第1段階）

前述のように、本研究で使用した実験器具の多くが製作したものであったが、結果を鑑みるに台車の速度は安定して推移しており、実験2, 3でも使用可能であると結論づけた。

4-2. 実験2・実験3（第2段階・第3段階）

①区間：かなりの障害物を挟んでいたため、考慮しないこととする。

②区間：α音の結果もβ音の結果も振動数が一定となっていたため、AD音により一定に保たれたと断定することはできない。

③区間：α音の時は、計測点通過が近づくにつれて振動数が上がっているため、ドップラー効果らしき現象が見られるが、β音の場合は最後まで上がっているものの一定になっている時間が長い。そのため、少し効果はあるように見える。しかし、②から継続している点と、1020Hzに達していないという点から、②の区間での効果の有無が曖昧なこともあり、実際的な効果の度合いは正確には分からない。

④区間：α音もβ音もどちらも同じような波形となっており、AD音による効果はないといえる。

以上の点と、β音で一度も観測予定の1020Hzに達していない点を考えると、AD音がうまく機能していない可能性が高意図考えられる。原因については、AD音の作成ミスが考えられるが、しかし、観測地点前を通過した際の周波数は1020Hzになるように作っているため、それも観測できていないことから、他の外的要因が考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、「1020 Hzの周波数」を「一定に保つ」という、細分すれば2つの目標があったが、いずれの目標も達成することができなかった。そのため、今後はまず失敗の原因を分析し、実験内容の改善策を模索していきたいと考えている。

6. 参考文献

小野測器, 身近な計測—ドップラー効果,

<https://www.onosokki.co.jp>, 2018.5.17

啓林館, 第4節ドップラー効果,

http://www.keirinkan.com/kori/kori_physics/kori_physics_1_kaitei/contents/ph-1/4-bu/4-2-4.htm, 2018.5.17

Toda Kengo, 物理学解体新書,

<https://www.rs.kagu.tus.ac.jp/yamalab/2007/toda/Doppler.html>, 2018.5.17

ネオアーク株式会社, ドップラー効果とは,

<http://neoark.co.jp/galileo/g-vibration-meter/doppler-effect>, 2018.5.17

7. 添付資料



図 6. 本研究で使用了した主な実験器具

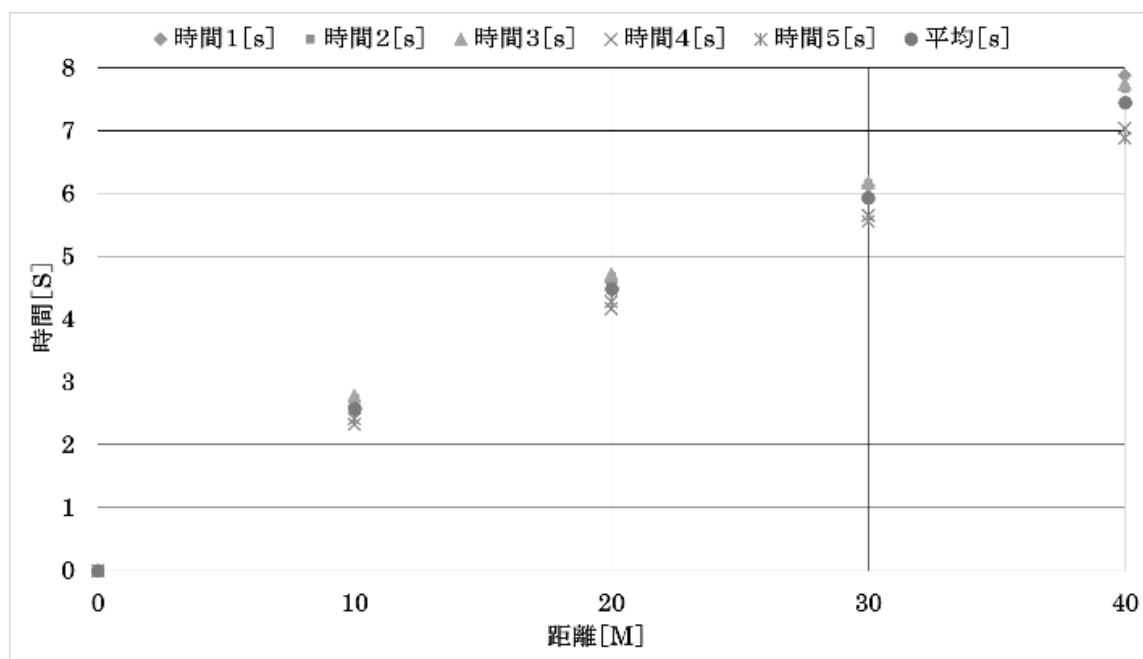


図 7. 通過時間の散布図

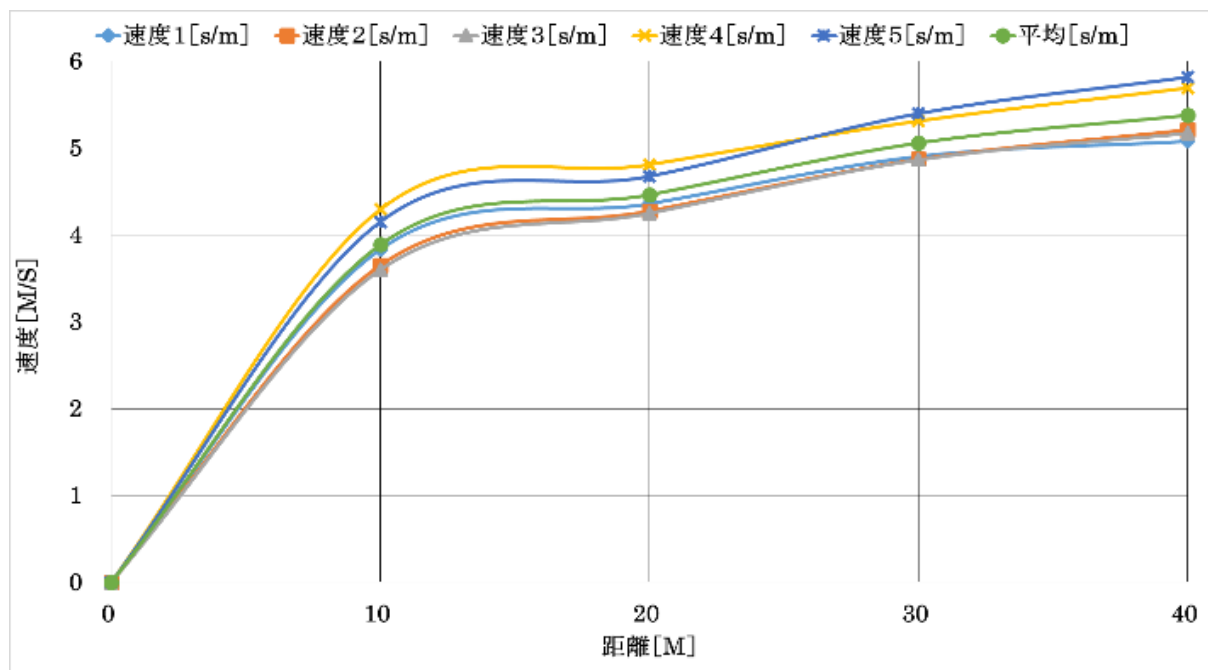


図 8. 速度の散布図

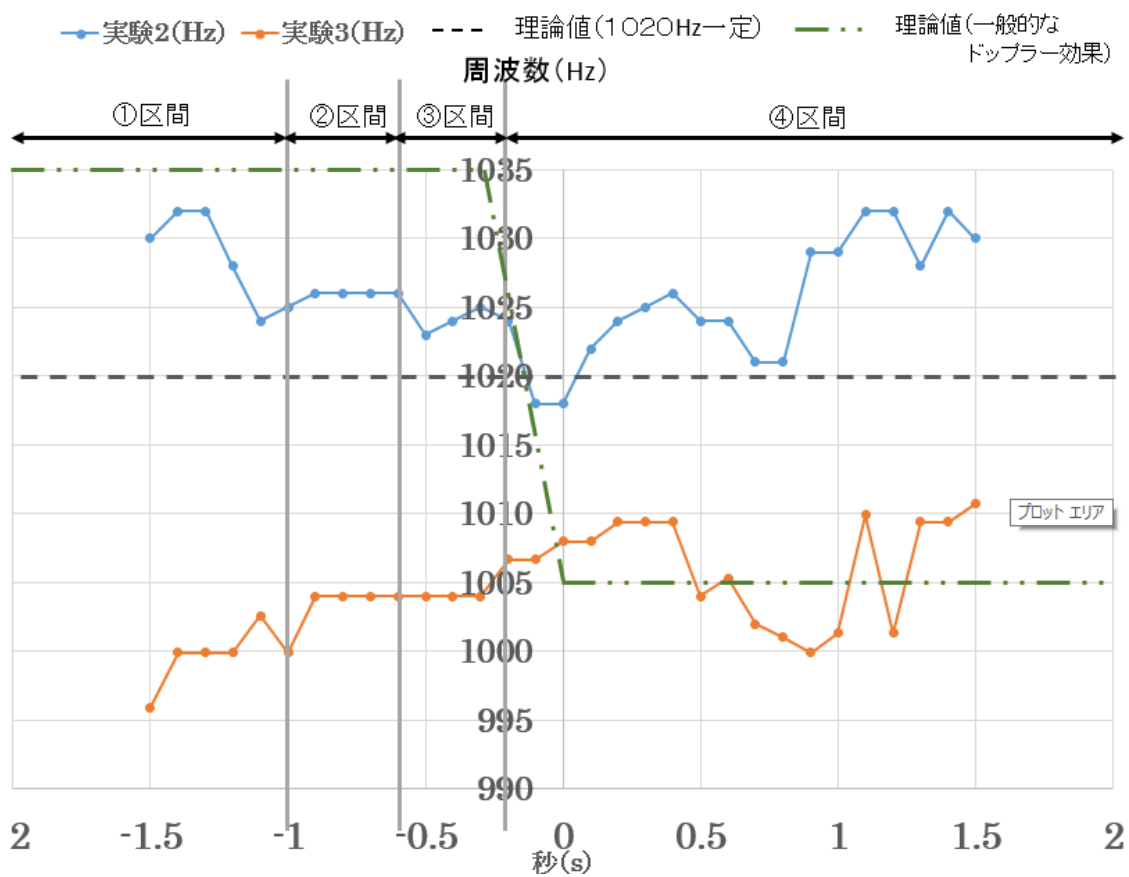


図 9. 0.1 s 毎の周波数の変化

粘土の銀イオン吸着

～ モンモリロナイトに対する金属イオン吸着率の測定 ～

川島悠香 竹田真実子 西田涼乃 吉田依未

要旨

本研究は、効率的なミネラル供給源としての粘土食料を完成させることを目的として行った。銀(I)イオンを含む水溶液にモンモリロナイトを加え、前後の濃度変化から金属イオンの吸着度合いを調べた。濃度変化は、塩化ナトリウム水溶液を用いた銀滴定で測定した。その結果、粘土鉱物に対する銀イオンの吸着率の変化を確認できた。

1. はじめに

モンモリロナイトは粘土鉱物の1種であり、層間に水を取り入れ著しく膨潤する性質を持つ。

1960年代、国際宇宙ステーション(ISS)では活動する宇宙飛行士にモンモリロナイトを含む食事を与えていた。宇宙飛行士のカルシウム不足を補う目的である。

1964年から1965年にかけて行われた研究によると、粘土を含む餌はラットの食餌性カルシウム源としての役割を果たすことが示されている(Ershoff & Bajwa, 1965)。

本研究では、より効率的なミネラル供給源としての粘土食料を完成させることを目的として、モンモリロナイトを加えた際の金属イオンを含む水溶液の濃度変化から粘土に対する金属イオン吸着率を調べる実験を行った。

事前に Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} の3種について粘土に対する金属イオン吸着率の測定を行ったが、モンモリロナイトを洗浄していなかったため、吸光度計では正確な測定が出来なかった。またモンモリロナイトと水の混合溶液の上澄み液を総合地球環境学研究所のイオンクロマトグラフィー装置で分析していただいた結果から、未洗浄のモンモリロナイトに含まれている種々のイオンが水溶液中に流出していることがわかった。

そこで本実験では事前処理として、遠心分離を

用いてモンモリロナイトを洗浄した後、銀イオンを吸着させ、銀滴定によって銀イオン吸着の程度を求めた。

2. 材料・研究方法・結果

2-1. 研究試料

通常の銀滴定に用いられる実験器具を使用したほか、モンモリロナイトは株式会社ナトゥリアルが販売するグリーンモンモリロナイトクレイ(フランス産、モンモリロナイト、イライト、カオリンを含む)を、遠心分離機は久保田商事株式会社製テーブルトップ遠心機 2420 を、濾過で用いたシリンジフィルターは Merck Millipore 社(Millex-GV, 0.22 μm PVDF)のものを使用した。

2-2. 研究方法および結果

モンモリロナイトに純水を加え、4000回転×5分間遠心分離にかけ、上澄み液を取り除き、再度純水を加えて遠心分離機にかける作業を10回行った。

洗ったモンモリロナイトをA、B、C、D、Eの5つに分けた。

Aには純水、Bには $1.0 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ の AgNO_3 水溶液、Cには $1.0 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ の AgNO_3 水溶液を加えて混ぜ、遠心分離機にて分離させた上澄み液をシリンジフィルターに通した濾液を

10 倍希釈した。ただし、表 1 の AgNO_3 水溶液の濃度値は希釈前のものである。これらを 10mL ずつ取り、A は $1.8 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 、B は $1.8 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ と $1.8 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$ 、C は $1.8 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ と $1.8 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ の NaCl 水溶液での銀滴定を各濃度 3 回ずつ行った。

表 1 NaCl 水溶液, AgNO_3 水溶液の濃度値を変化させたときの白濁の程度 (+ は白濁がはっきりと見られたもの, - は白濁が視認出来なかったもの, ± はわずかに白濁が確認できたものである。)

AgNO_3 [mol/L] NaCl [mol/L]	A 純水	B 1.0×10^{-2}	C 1.0×10^{-3}
1.8×10^{-3}			±
1.8×10^{-5}	—	+	—
1.8×10^{-6}		—	

A の結果から、 Ag^+ がモンモリロナイトに元から含まれているとしても、実験結果には影響しないものとして良い。また、B で白濁が確認出来たことや、C では高濃度の NaCl 水溶液に対し僅かしか白濁が見られなかったことから、 Ag^+ の吸着は起こっているもののどこかに限界があると考え、精査するために以下の D と E の実験を行った。

ここでは沈殿管から上澄み液をできるだけ取り除いた後、D には $1.0 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 、E には $1.0 \times 10^{-1} \text{ mol/L}$ の AgNO_3 水溶液を加えて混ぜシリンジフィルターに通した濾液を 10 倍希釈した。ただし、表 2 の AgNO_3 水溶液の濃度値は希釈前のものである。これらを 10mL ずつ取り、 NaCl 水溶液の濃度を D では 1.8 mol/L 、 $1.8 \times 10^{-1} \text{ mol/L}$ 、 $1.8 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 、 $1.8 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ の 4 通り、E では $1.8 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 、 $1.8 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 、 $1.8 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ の 3 通りにしてそれぞれ 3 回ずつ滴定を行った。また、モンモリロナイトを通していない AgNO_3

水溶液に対しても滴定を行った。

表 2 NaCl 水溶液の濃度のみを変化させたときの沈殿の様子 (+ は白濁がはっきりと見られたもの, - は白濁が視認出来なかったもの, ± はわずかに白濁が確認できたものである。また、表中の数値は滴定量[mL]を、①～③については回数を示している。)

AgNO_3 [mol/L] NaCl [mol/L]	D 1.0×10^{-2}		E 1.0×10^{-1}	
	モンモリロナイト		モンモリロナイト	
	無し	有り	無し	有り
1.8	+	—		
0.2 (一滴)		20.5		
1.8×10^{-1}	+	—		
0.09 (一滴)		8.23		
1.8×10^{-2}	+	—	+	+
0.17 (一滴)		3.09	0.24 (一滴)	①0.07 ②0.08 (一滴)
1.8×10^{-3}	+	—	+	+
1.39		3.50	0.65	①1.01 ②1.10 ③1.01
1.8×10^{-4}			+	+
			3.43	2.54

なお、D および E の沈殿の様子は添付資料 (p.53) に添付している。

3. 考察

D において「モンモリロナイト無し」では見られた白濁が「モンモリロナイト有り」では見られず、また、 NaCl 水溶液の濃度が 1.8 mol/L という高濃度でも白濁が確認できなかったため、ほとんどの Ag^+ がモンモリロナイトに吸着されていることが確認できた。一方で、E では NaCl 水溶液が低濃度の場

合, モンモリロナイトの有無にかかわらず同程度の白濁が見られた. これは, 元の AgNO_3 水溶液の濃度が濃すぎるため, 吸着できた割合がかなり低くなっていることを示している. このことを D の結果と比較すると, Ag^+ を加えた量に対し, モンモリロナイトへの吸着率を最大にできる AgNO_3 水溶液の濃度は $1.0 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 以上 $1.0 \times 10^{-1} \text{ mol/L}$ 未満の範囲に存在すると考えられる.

4. まとめと今後の課題

粘土鉱石の一つであるモンモリロナイトに対する銀イオンの吸着程度を測定した. その結果, モンモリロナイトは銀イオンを吸着したため, 本実験の目的であったミネラルなど他種の陽イオンも吸着が可能といえる.

また, 効率よく吸着させることのできる濃度の範囲を絞ることができた. しかし, 現状この範囲はかなり広いものである.

今後, 細かい調整や様々な条件の変更を行うことで, より詳細な結果を得られると考えられる.

5. 謝辞

総合地球環境学研究所のセンター研究員の藪崎志穂氏には, モンモリロナイトと水の混合溶液の濾過についてご助言を賜った上, モンモリロナイトと水の混合溶液の上澄み液の元素分析を行っていただいた.

6. 参考文献

- Ershoff & Bajwa, NASA, 2019, NASA Technical Reports Server,
<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19660023330>, 2019.1.7
- クニミネ工業株式会社, 2018, よくわかるクニミネ工業,
<https://www.kunimine.co.jp/bent/basi>, 2019.1.7
- 水守啓, 2019, 身体を浄化する驚異の粘土食,
<http://www.keimizumori.com/articles/c>

7. 添付資料



写真 1



写真 2



写真 3



写真 4

写真 1～4は、それぞれ $1.8 \times 10^{-3} \sim 1.8 \text{ mol/L}$ の NaCl 水溶液で $1.0 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ の AgNO_3 水溶

液を滴定したものである。(左:モンモリロナイト有り, 右:モンモリロナイト無し)



写真 5



写真 6



写真 7

写真 5 は NaCl 水溶液 $1.8 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$
(左から純水, モンモリロナイト無し, モンモリロ
ナイト有り×3)

写真 6 は NaCl 水溶液 $1.8 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$
(ビーカーの配置は写真 5 と同じ)

写真 7 は NaCl 水溶液 $1.8 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$

クロロフィルにおける蛍光条件の研究

市川亮大 土橋拓馬 平尾早耶 村上凜

要旨

本研究では、紫外線を照射すると光る紙の作製を目的として、クロロフィルが蛍光する状況を実験により調べた。実験では溶媒にジエチルエーテル、サラダ油、アセトン、純水を用いてコマツナ、ホウレンソウ、ワカメからクロロフィルを抽出し、その濾液を含ませた濾紙にブラックライトを照射した。実験により、有機溶媒中でのみクロロフィルは強い蛍光を発することが明らかとなった。

1. はじめに

紫外線を照射すると蛍光する物質があることを知り、予備実験において紫外線に波長が近い、ブラックライトを照射して身の回りにあるものを光らせた。その中でコマツナはそのままの状態でごくわずかに赤く光り、有機溶媒での抽出液は更に赤く光った。名古屋市科学館の佐伯平二によれば、光る原因はクロロフィルであることが明らかとなっている。植物の葉緑体の中に存在するクロロフィルは光合成に必要な光を吸収すると、電子励起される。このとき、クロロフィル中では電子が基底状態に戻る過程でエネルギーを放出し、通常、その放出したエネルギーを隣接したクロロフィル分子に渡していく。このようなエネルギーの流れを作ることで、植物は光合成を行う。しかし、流れが途絶え、光合成に使用することができなかったエネルギーは赤い光として放出される。この赤い蛍光は、肉眼で見ることができる(図 1)。

今回、比較的身近にあり、手に入れやすいクロロフィルがこのような仕組みで赤く蛍光することが分かり、それを応用することで、市販の紫外線チェッカーのような紫外線を照射することで変化が表れるような紙を作製することができるのではないかと考えた。そこで、本研究では、クロロフィルを含み、ブラックライトを照射することで赤く蛍光する濾紙を作製することを目指した。

そこで主に二つの実験を行った。この実験では、予備実験で赤く蛍光することが確認できたコマツナ・ホウレンソウと、更に構造が異なるクロロフィルも含むワカメを用いた。植物には基本的に 3:1 の割合でクロロフィル a とクロロフィル b が含まれている。それに対し、ワカメなどにはクロロフィル a だけでなくクロロフィル c が含まれる。クロロフィル a とクロロフィル c の構造式はそれぞれ図 2、図 3 に示す。図 2 のフィトール鎖は疎水基であるため、コマツナ・ホウレンソウのクロロフィル a は水には溶解しない。しかし、図 3 のクロロフィル c はフィトール鎖がないため、ワカメのクロロフィル c は比較的水に溶解する。そのため、クロロフィル a に加えてクロロフィル c も含んでいるワカメを本実験の試料に追加した。

一つ目の実験では、抽出したクロロフィルを含ませた濾紙がブラックライトで赤く蛍光するかどうかを調べた。濾紙は赤く蛍光し、そして、ブラックライトを照射し続けるとクロロフィルが分解されるため、蛍光が弱まっていくと考え、実験を行った。しかし、予想した結果は得られず、有機溶媒が揮発し、乾燥すると蛍光を発しなくなった。その原因を探るため、二つ目の実験を行った。

日本植物生理学会によると、クロロフィルを有機溶媒で抽出すると、クロロフィルの環構造内に取り込まれていたマグネシウムイオンが溶媒中に外れる。そこで、平衡を利用してマグネシウムイオンが

クロロフィルから外れにくい状態をつくり、一つ目の実験と同様の操作を行った。仮説として、マグネシウムイオンを持ったままのクロロフィルがより多く残ることで、濾紙が乾燥した後も蛍光すると考えた。

2. 材料・研究方法

2-1. 研究試料 1

本実験では、クロロフィルの抽出にコマツナ、ホウレンソウ、ワカメを用いた。コマツナ、ホウレンソウは生のもの、ワカメは乾燥されたものを使用した。

2-2. 研究方法 1

コマツナ・ホウレンソウについて、それぞれ以下の操作を行い、試料を調整した。

- ①葉を細かくちぎり、シリカゲルを加えて砕きながらすり鉢・すり棒ですりつぶして粉末状にした。
- ②①を2つずつに分けた。ジエチルエーテルを加えたもの、サラダ油を加えたものの2種類を作製し、濾過した。本実験ではジエチルエーテル、サラダ油どちらも 8 mL 使用した。
- ③1/4 サイズに切った濾紙を②の濾液に浸した後、取り出す。これを試料とする。
- ④乾燥させる過程でブラックライトを照射し、蛍光を調べた。

2-3. 研究方法 2

ワカメについて以下の操作を行い、試料を作製した。

- ①ミキサーを用いて粉末状にした。
- ②①に純水を加えたもの、アセトンを加えたものの2種類を作製し、濾過した。
- ③1/4 サイズに切った濾紙を②の濾液に浸した後、取り出す。これを試料とする。
- ④乾燥させる過程でブラックライトを照射し、蛍光を調べた。

純水についてはワカメ 2 g 水 30 g で実験を行い、アセトンについてはワカメ 1 g アセトン 7 mL、またはワカメ 2 g アセトン 7 mL で行った。

3. 結果 1

研究方法 1, 2 について、結果を以下に示す。

コマツナとホウレンソウについて、それぞれほぼ同様の結果が得られ、それは以下の通りである。ジエチルエーテル、サラダ油のどちらの溶媒においても試料は赤く蛍光した(図 4)。その後、溶媒が揮発し、乾燥するにつれ蛍光が弱まり、完全に乾燥すると蛍光しなくなった(図 5)。再び溶媒を含ませ、ブラックライトを照射すると、最初に照射したときと同様、赤く蛍光した。その後再び乾燥するとまた蛍光しなくなった。しかし、このとき乾燥した後も濾紙表面の端の部分に、非常に小さな点であったが、ブラックライトを照射すると赤く蛍光する部分が残った。そこで、更に濾紙を切断し、断面についても調べてみたが、蛍光はなかった。また、サラダ油は実験時間中に乾燥させることができなかったため、乾燥後に蛍光するかどうかは調べられなかった。

ワカメについて、以下のような結果が得られた。

溶媒に純水を用いた場合は蛍光しなかった。アセトンを用いた場合は、赤く蛍光したが、乾燥すると蛍光しなくなった。ワカメの量を変えて 2 g と 1 g の試料を調整して実験を行ったが、両者に蛍光の違いは見られなかった。しかし、ワカメを 2 g 用いた方は蛍光しなくなるまでの時間が比較的長かった。また、ワカメ自体にブラックライトを照射してみると、ワカメの表面部よりも内部が蛍光していた。

以上の結果は以下の表 1 の通りである。

表 1. 研究方法 1, 2 の結果

	コマツナ	ホウレン ソウ	ワカメ
ジエチル エーテル	+→-	+→-	/
サラダ油	+	+	/
アセトン	/	/	+→-
純水	/	/	-

+・・・蛍光した →・・・乾燥後の変化
-・・・蛍光しなかった

4. 材料・研究方法 3

4-1. 研究試料 3

酸化マグネシウムの粉末少量に純水、酢酸を加えて溶かした。これを A 液 (pH2~3) とし、A 液に水酸化ナトリウムを加えて中和したものを A' 液 (pH6~7) とした。

粉末状にしたワカメと、アセトンを用意した。

4-2. 研究方法 3

①ワカメ 1 g, A 液 6 mL, アセトン 9 mL を加え、濾過した。

②ワカメ 1 g, アセトン 9 mL を加え濾過したものに酢酸を加えた。

③ワカメ 1 g, A' 液 6 mL, アセトン 9 mL を加え、濾過した。

④ワカメ 1 g, 純水 6 mL, アセトン 9 mL を加え、濾過した。

①から④の濾液に 1/4 サイズに切った濾紙をひたし、ブラックライトを照射して蛍光を確かめた。さらにそれぞれの pH も測定した。

この①から④の液を図 6 に示す。

5. 結果 2

研究方法 3 について、結果を以下に示す。

①から④のすべてについて、浸した濾紙は赤く蛍光した。濾液の色や pH に差は見られたが、結

果として差はあまり見られなかった。

以上の結果は以下の表 2 の通りである。

表 2. 研究方法 3 の結果

	pH	Mg+	濾液の色 ※1	赤い光 ※2
①	5	+	黄色	+
②	/	-	黄緑	+
③	6~7	+	緑	+
④	7	-	黄緑	+

※1 緑の濃さ ③>④>②>①

※2 赤色の濃さ ③≒④>②>①

+・・・蛍光した -・・・蛍光しなかった

6. 考察

6-1. 考察 1

研究方法 1, 2 の結果について以下のように考察した。

有機溶媒中でクロロフィルの強い蛍光が見られ、完全に乾燥した後にも、再び溶媒を加えることにより、最初に照射したときと同様に赤く蛍光した。このことから以下のように考えた。

クロロフィルは有機溶媒中に単量体で存在するため、吸収した光エネルギーを他のクロロフィル分子に伝達できなくなり、赤い蛍光を発する。アセトンが揮発して失われると、クロロフィル分子が会合して再びエネルギーの伝達が可能となり、赤い蛍光が観測できなくなる。日本植物生理学会の佐藤公行によると、会合すると蛍光が見られなくなる理由として、蛍光を発する度合い（蛍光の収率）が減る、蛍光の寿命が速くなる、蛍光の波長（色）が変化するなど、様々な場合を考えることができる。また、再び有機溶媒に浸すと蛍光するようになったことから、クロロフィル分子自体は変形していない。

また、濾紙の端のみ光る部分が残ったことについて、毛細管現象を原因の一つとして予想した。

濾紙の内部が蛍光する状態にあるのではないかと考え、切断した断面を調べたが、蛍光は見られなかった。ほかの要因として、その部分における乾燥速度などが考えられる。

ワカメに含まれるクロロフィル c について、純水を用いた場合に蛍光が見られなかった。原因として、クロロフィル c が純水中には抽出されなかったため、または強い蛍光を観察できるのは有機溶媒中のみであるため、の 2 点が考えられる。

6-2. 考察 2

研究方法 3 の結果について以下のように考察した。

結果 2 の①、②より、Aを加えた場合と加えなかった場合で結果に違いが見られなかったため、酸性の状態では蛍光にマグネシウムイオンは関係していなかった可能性が高いと考えられる。

③、④より、中性の状態では蛍光にマグネシウムイオンは関係していなかった可能性が高いと考えられる。

①、③より、濾液の色はpHによって変化したと考えられる。

7. まとめと今後の課題

クロロフィルは有機溶媒中に抽出することができ、濾液や濾液に浸した濾紙にブラックライトを照射すると赤く蛍光する。しかし、濾液に浸した濾紙は、有機溶媒が揮発すると光らなくなる。その原因は、クロロフィルからマグネシウムイオンが外れるからではなかった。有機溶媒中でクロロフィル分子間のエネルギー伝達が阻害され、蛍光を発しやすい状態になっているのではないかと考えられた。

今後の課題は、有機溶媒が揮発すると、クロロフィルが蛍光しなくなる原因を突き止めることである。本研究を簡易のブラックライトからより純粋な紫外線にも応用できれば、紫外線チェッカーのような利用が可能だと考える。

8. 参考文献

JSPP サイエンスアドバイザー 佐藤公行, 2015.8.

20, 日本植物生理学会 クロロフィルの変性について,

https://jspp.org/hiroba/q_and_a/detail.html?id=3329, 2019.1.10

JSPP サイエンスアドバイザー 佐藤公行, 2019.1.

12, 日本植物生理学会 クロロフィルとアセトンの関係について,

https://jspp.org/hiroba/q_and_a/detail.html?id=4332, 2019.1.17

実験監修:名古屋市科学館学芸員 佐伯平二

※監修者の役職は掲載当時のもの、企画制作:

日本ガイシ株式会社, NGK サイエンスサイト 緑の野菜がワインカラーに,

<https://site.ngk.co.jp/lab/no126/>, 2019.1.10

代谷沢, 片岡慶子, 勝本みどり, 1972.11. ほうれん草の調理科学的研究,

http://repo.kyoto-wu.ac.jp/dspace/bitstream/11173/1227/1/0100_027_004.pdf, 2019.1.31

光合成色素からみる海藻の生態, <https://www.jst.go.jp/cpse/jissen/pdf/houkoku/SG150069-A-16010.pdf>, 2019.1.31

9. 添付資料

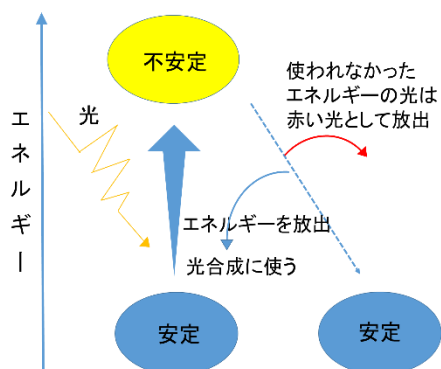


図1. クロロフィルの
エネルギー変化

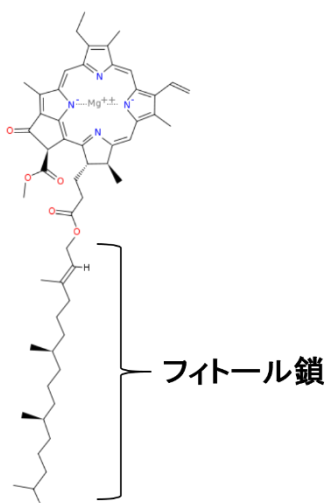


図2. クロロフィル a

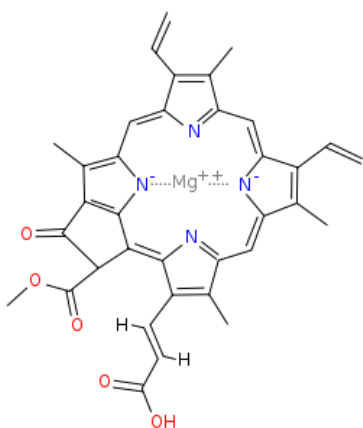


図3. クロロフィル c

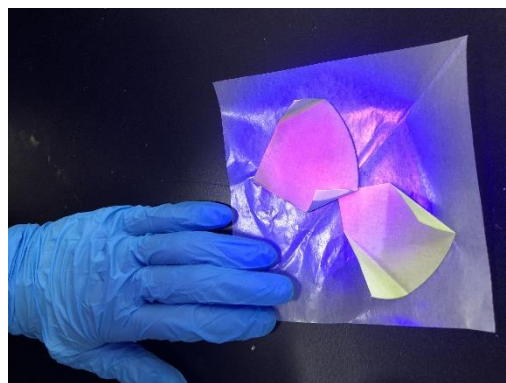


図4. コマツナ・ホウレンソウの抽出液を
染み込ませた濾紙（乾燥前）

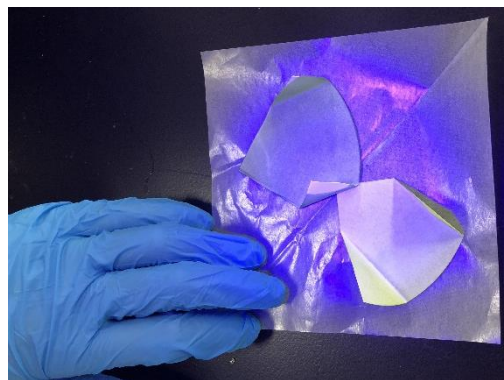


図5. コマツナ・ホウレンソウの抽出液を染
み込ませた濾紙（乾燥後）

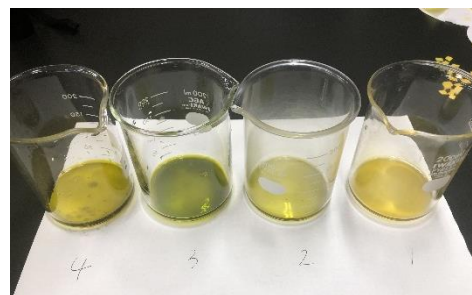


図6. マグネシウムイオンの平衡状態・
pH を調整したワカメの溶液①から④