

理数科 2 年次生実践報告

「発展研究・論文研究」の取り組み

平成 30 年度の理数科 2 年次では、週 2 単位時間を「発展研究・論文研究」に当て、以下のような要領で計画を立て、これに基づいて実施した。

1 目標

理科及び数学に関する事象について課題を設定し、実験・観察などを通して研究を行い、科学的に探究する問題解決の能力を身に付ける。

2 研究内容

- ・理科及び数学分野の特定の事象に関する研究
- ・理科及び数学分野を発展させた探究活動
- ・理科及び数学分野の歴史的実験例の研究
- ・自然環境に関する調査・研究

3 指導方法

- ・設備・機器などに応じて各グループに課題を設定させ、理科及び数学の教員が指導に当たる。
- ・「発展研究・論文研究」の授業は 2 年次の水曜日に 2 単位時間を設定し、担当教員全員が指導に当たる。
ティーチングアシスタントとして岡山大学の大学院生、留学生、非常勤講師で指導に当たる。また、放課後や夏季・冬季休業中も利用して指導する。
- ・評価については、主担当教員が原案を作成し、指導教員全員で審議して決定する。

4 対象学年 理数科 2 年次生(38 名)

5 1 年次からの流れ

1 年次前期	創生研究(1 単位)	1 年次後期	発展研究(1 単位)
2 年次前期	発展研究(1 単位)	2 年次後期	論文研究(2 単位)

6 「発展研究・論文研究」校内発表会の日程と形態

第 1 回(研究評価, 口頭発表 9 テーマ)

- ・日 時 平成 30 年 10 月 3 日(水) 13:50 ~ 15:30
- ・会 場 岡山県立倉敷天城高等学校
- ・参加者 理数科 2 年次生(37 名)・本校教員
- ・発表時間 1 グループ質疑応答を含めて 7 分

第 2 回(研究評価, 口頭発表 9 テーマ)(第 16 回高大連携理数科教育研究会・第 19 回岡山県理数科理数系コース課題研究合同発表会)ステージ発表選考会)

- ・日 時 平成 30 年 12 月 19 日(水) 13:50 ~ 15:30
- ・会 場 岡山県立倉敷天城高等学校
- ・参加者 理数科 2 年次生(37 名), 本校教員, SSH 運営指導委員
- ・発表時間 口頭発表は 1 グループ質疑応答含めて 7 分

第 3 回(研究評価, 口頭発表 4 テーマ, ポスター発表 9 テーマ, 1 年次生 2 年次生交流会)

- ・日 時 平成 31 年 1 月 30 日(水) 12:55 ~ 15:30
- ・会 場 岡山県立倉敷天城高等学校
- ・参加者 理数科 2 年生(37 名), 理数科 1 年次生(40 名), 2 年次生保護者, 本校教員
- ・発表時間 口頭発表は 1 グループ質疑応答含めて 10 分

7 平成 30 年度 第 16 回高大連携理数科教育研究会・第 19 回岡山県理数科理数系コース課題研究合同発表会の日程(ステージ発表 2 テーマ, ポスター発表 9 テーマ)

- ・日 時 平成 31 年 2 月 5 日(火)
- ・会 場 岡山理科大学 (C 1 号館理大ホール・A 1 号館)

平成30年度「発展研究・論文研究」報告

【物理分野】

1. 伸長過程におけるゴムの分子鎖のふるまい
藤原巧将 須賀潮音 岡佳乃 河端亜弥 pp.3-12
2. タンブラーの側面で踊り出す水の謎 ～不規則な振動現象（ガクット現象）の発見～
貝原命 桑田陽予里 高橋未優 難波静空 pp.13-18
3. 紙飛行機の軌道の解析と終端速度 —空気中と水中での軌道の比較—
上野雄貴 長田光樹 越智光之介 佐々木惇 佃海斗 pp.19-22
4. 自転車の安定性 ～ホイールベースと走行距離～
大谷亮佑 田中太朗 宮谷海史 山崎幹大 宮家心花 山口美海 pp.23-25

【化学分野】

5. デンプンのりとプラスチックの接着において重要な要素
河村祥太郎 大谷拓也 清水泰顕 pp.26-29
6. 身近な食材・食品におけるクロロゲン酸の検出及びその定量法
～化学的性質を利用して～
山本泰世 小西脩太 中田雄飛 野田睦稀 深谷蓮 吉田樹生 pp.30-33

【生物分野】

7. 分裂条件から見るナミウズムシの生存戦略
西山佳吾 福森千隼 山田峻 徳見香菜子 麓雛多 pp.34-38
8. 熱に強いゴーヤジュースの抗菌効果
武原菜々花 土肥桃子 山田奈津実 吉田遥香 pp.39-44

【数学・情報分野】

9. 図形的視点での錯視の発生要因
大塚新太 pp.45-48

指導教員

仲達修一(物理) 小林俊彦(物理) 山本拓(物理) 筒井愛知(物理) 白神陽一朗(物理)
越智雄介(化学) 貴志貫(化学) 大橋崇(化学)
江口仁一(生物) 岩永廣子(生物)
高島定幸(数学) 守安貴史(情報)

ティーチングアシスタント

Yakubu Abdallah

伸長過程におけるゴムの分子鎖のふるまい

藤原巧将 須賀潮音 岡佳乃 河端亜弥

要 旨

ゴムの内部構造を直接観察することは困難である。そこで本研究では、ゴムの伸縮過程における引張応力を測定することにより、応力緩和、ガフ・ジュール効果等に基づいてゴム内部の分子鎖の挙動を調べることを目的とした。結果、折径7 cmのゴムバンドの伸長過程において22 cm以上の伸びで大きく異なる力学的挙動を示した。また、伸縮過程を複数回繰り返す実験を行ったところ、最初の伸縮では以降の伸縮と全く異なる力学的挙動を示した。

The internal structure of rubber is impossible to observe directly. In this research, the aim is to examine the behavior of molecular chain in rubber based on stress relaxation, Gough-Joule Effect and some other conditions, by measuring the tensile stress in stretching and contracting the rubber. The results showed different mechanical behaviors in stretching the rubber band with 14 cm of circumference at an elongation of 22 cm and more. In addition, when an experiment that repeat the stretching and contracting the rubber band multiple times was conducted, the first repetition showed totally different mechanical behavior from the subsequent repetitions.

キーワード：ゴム弾性、分子鎖、ガフ・ジュール効果、ヒステリシス

第 I 部 ゴムの力学的挙動

1. 序論

天然ゴムはイソプレンが付加重合した構造をもつ高分子化合物である。またその付加重合の仕方はシス形の割合が非常に多い。(図1)これによって分子間力が小さくなるため、ほかの高分子化合物には難しいがゴムは長い分子鎖が絡まった状態からある程度自由に動くことができる。これが、ゴムが小さな力で大きな変形を見せる理由である。

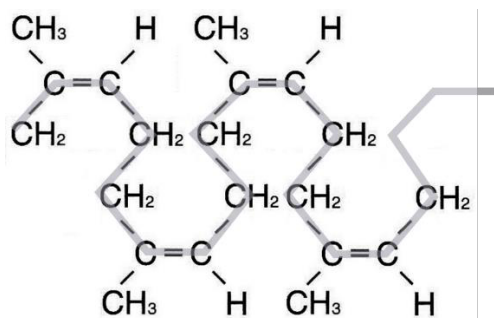


図1 ゴムの分子構造

また我々が普段用いる輪ゴムは天然ゴムに加硫

という操作を行い、人工的に架橋構造をつくり弾性を増すような工夫がなされている。加硫は高温で行い、そののちゴムを冷ますためゴムは非晶質となる。

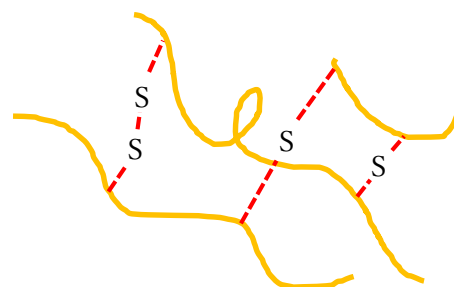


図2 架橋構造

(以下点線が架橋、Sが硫黄、実線がゴムの分子鎖を表す。)

過度にゴムを引き伸ばすと力を除いても元に戻らなくなる塑性変形が起きたり、ゴムを引き伸ばすと発熱するガフ・ジュール効果⁽²⁾や、ゴムをあ

る程度の伸びで伸ばした状態で放置していると、復元力が減少する応力緩和という現象も見られる。

2. 研究内容

実験1 ゴムの力と伸びの関係

ゴムの力と伸びの関係を調べるために以下の実験を行った。

実験1-1 伸びを制御する手法

<実験器具>



図3 本研究で用いたデジタルフォースゲージ

株式会社エー・アンド・デイ
 測定範囲 0~50.00N
 表示分解能 0.01N
 応答速度 約0.2秒, 約0.6秒
 測定精度 $\pm(0.4\%rdg+1dgt)$



図4 本研究で用いたゴム
(共和ゴム オーバンド)

表1 本研究で用いたゴム

折径[m]	切幅[m]	厚み[m]	質量[kg]
7.0	3.0	1.1	4.28
$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-4}$

<実験方法>

(1) 図5に示したように実験装置を組み立てる。以下装置1とする。

(2) ラボジャッキを1 cm ずつ下げゴムを伸ば

し、デジタルフォースゲージの示す力の大きさを記録する。この操作をゴムがちぎれるまで行う。このような手法をとることで比較的容易に短時間で実験を行うことが出来る。

本研究では伸ばした際のゴムの長さを伸びと表現する。また均等にゴムが伸びるように、フックに潤滑油を塗っておく。

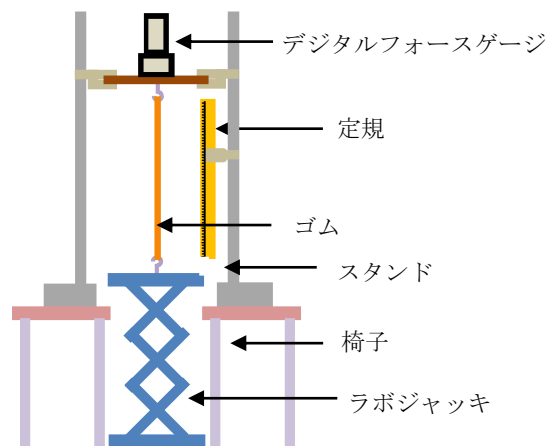


図5 実験装置のイラスト(装置1)

<結果>

実験で得られたデータは他のデータと比較しても十分に一般性の保たれるものであったため、代表として1つのデータを掲載する。

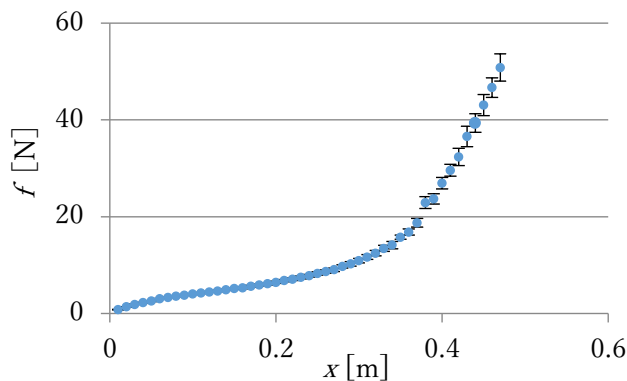


図6 $f-x$ グラフ

線近似を行い最小二乗法を用いて決定係数が最も1に近い伸びの範囲を調べた。その結果伸び4 cm から 22 cm において線形が高精度 ($R=0.9954$) で成立した。以下線形範囲とする。

<考察>

線形範囲の始点が原点でない理由として、ゴムが非晶質であることが考えられる。分子鎖の絡ま

り合いが規則正しいものでないため、伸ばし始めにはゴムに対し力が均一にかからないと考えられる。しかし本研究では非晶質と原点付近での線形の不成立との関係の解明に至らなかったため、このことは今後の課題に挙げられる。

本実験では伸ばしていくうちに分子の絡まり合いも徐々に均一になっていきゴムにかかる力が均一になることで線形が見られ、その始点が4 cmであったと考えた。

線形範囲においては伸びを自然長に戻してもゴムの長さに変化が無くそれ以降の伸びではゴムが自然長より長くなっていた。このことから伸び22 cmを境にゴムの性質が変化したのではないかと考えられる。そこでそのことを定量的に示すために実験2を行った。また実験1-1のデータの妥当性を確かめるために実験1-1とは異なる手法で実験1-2を行った。

実験1-2 振動数から求める手法

<目的>

ゴムの振動を利用するという実験1-1とは異なる手法で実験を行うことで実験1-1から得られたデータの妥当性を確かめる。

<理論>

張力を S [N], 線密度を ρ [kg/m], 弦の長さを r [m], 波長を λ [m] 弦を伝わる横波の速さを v [m/s], 周期を T [s], ゴムの質量を m [kg]とする。また振動は両端が節の基本振動であった。

$$v = \sqrt{\frac{S}{\rho}}$$

で与えられる。

また $\lambda = 2r$ より

$$S = \frac{4r^2\rho}{T^2}$$

この実験では手前のゴムのみを考えるため、

$$\rho = \frac{m}{2r}$$

で与えられることより

$$S = \frac{2mr}{T^2}$$

となり、実験よりゴムの振動の周期を測定することで張力を測定することができる。

<実験方法>

(1) 解析で利用するためゴムの中心に油性ペンでマークしておく。(図7)

(2) 図8ように実験装置を組み立てる。以下装置2とする。

(3) 手で手前のゴムを真下に引いて離し、ゴムの振動の様子をハイスピードカメラ(1200fps)で撮影する。

(4) この操作をゴムの伸びを2 cm, 4 cm, 6 cm...44 cmと2 cmずつ変えて測定を行う。それ以降の伸びはゴムの引く力が強く、実験が困難であったため行っていない。



図7 中心にマークをしたゴム

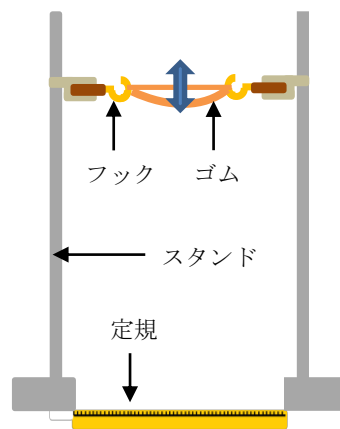


図8 実験の模式図(装置2)

<データ解析の仕方>

(1) 撮影した動画を動画解析ソフト Kinoveaに入れる。

(2) 1コマずつコマ送りしてゴムの中心にマークされた部分を追跡していく。

(3) 横軸に時間、縦軸にゴムに対して鉛直方向の位相をとり、周期を求める。そのうちの1つを図9に示す。

また実験1-1ではゴム2本の力を、実験1-2ではゴム1本の力を見ているため、実験1-1から得られたデータを1/2倍して比較した。

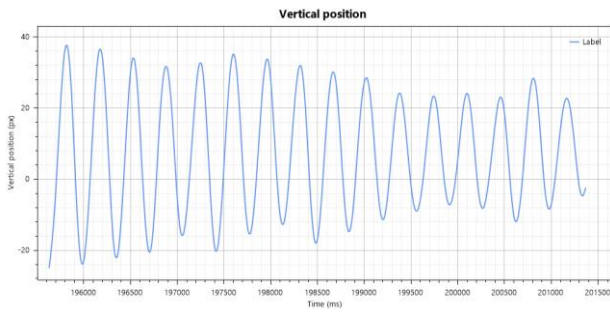


図9 解析した図

<結果>

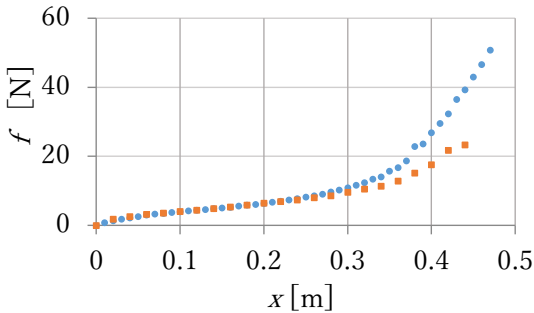


図10 f - x グラフ

(●が実験1-1, ■が実験1-2)

伸びが 22 cm 周辺までグラフは一致したが、それ以降の伸びでは実験 1-1 のデータに比べて力が小さかった。

<考察>

伸びが 22 cm 周辺まではグラフが一致したことから、実験 1-1 のデータの妥当性は確かめられたと言える。

この実験は実験 1-1 に比べ時間が掛かったため、応力緩和の影響が出やすいと言える。よって伸び 22 cm 以降で実験 1-1 のデータに比べて力が小さかったのは応力緩和によるものであると考えられる。伸びが 22 cm 周辺からグラフがずれたことから、やはり 22 cm を境にゴムの性質が変化しているのではないかと思われる。

実験2 エネルギー損失と伸びの関係

ゴムを伸ばす際ヒステリシスによるエネルギー損失が見られる。ゴムを過度に伸ばすとゴムの長さが自然長より長くなるのが実験 1 から分かった。このことからエネルギー損失にはガフ・ジュール効果による熱エネルギーのほかに架橋や分子鎖の化学的結合を切ったエネルギーが含まれると

考えた。そこでこれらのエネルギーの量的関係を調べることでゴムを伸ばした際のふるまいを考察できると考え実験を行った。またガフ・ジュール効果による熱エネルギーや、架橋や分子鎖の化学的結合を切ったエネルギーを含めたエネルギー損失を全エネルギー損失とする。

実験2-1 全エネルギー損失の測定

<目的>

伸びごとのエネルギー損失を測定する。

<実験方法>

装置 1 を用いて実験を行う。本実験では 3 cm, 5 cm, 10 cm, …と 5 cm ごとに 50 cm までの伸ばすとき(以下「行き」と表記する)と自然長まで縮めるとき(以下「帰り」と表記する)の力を調べる。また応力緩和による力の減少を少なくするために素早く実験を行った(補足 1)。

(補足 1)

応力緩和は物体に一定のひずみを与えてそのまま保持するとき、物体の応力が経過時間とともに次第に低下する現象¹⁾として知られている。応力緩和はひずみを与えた状態で保持していると起きる現象であるため、応力緩和の発現にはエネルギーは必要ではないと考えられる。

<結果>

代表として 1 つグラフを下に示す。●が行き、■が帰りを表す。

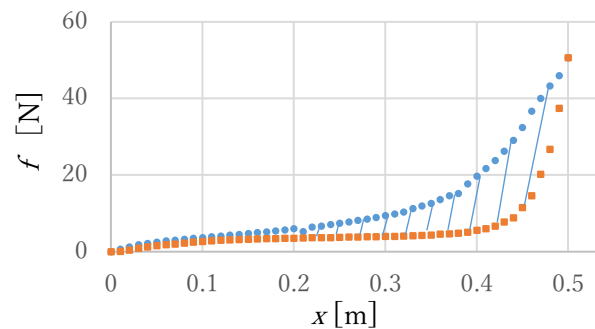


図11 f - x グラフ ~0.5 m

損失したエネルギーであるヒステリシスループの面積(図の斜線部)を積分で求めた。得られたデータを下に示す。

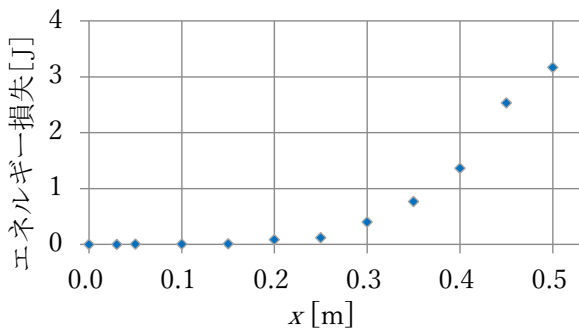


図 12 エネルギー損失

伸びが約 20 cm 付近まではエネルギー損失が見られなかった。

<考察>

実験 1 - 2 より伸びが大きいほど応力緩和による力の減少が大きくなることが分かる。そのため伸び 22 cm を超えた範囲では伸びが大きくなるにつれ、データに応力緩和による誤差が含まれる。また応力緩和は伸ばすとき、縮めるときの両方に起きているためその誤差を見積もることが難しく本実験では応力緩和による影響を加味できていない。

実験 2 - 2 熱によるエネルギー損失の測定

<目的>

熱によるエネルギー損失を測定する。

<実験方法>

ゴム 1 本を伸ばした際の温度上昇を直接測定するのは困難であるため以下のような方法で行った。ガフ・ジュール効果による温度変化が

$$(\delta T)_s = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \delta l$$

エネルギー損失は $(\delta T)_s c_p = T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \delta l$ で与えられる。

よって $\left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \delta l$ つまり伸び一定での力と温度のグラフの傾きを求める実験を行う。

(1) 装置 1 にゴムをかけフォースゲージの示す値が応力緩和による変動がなくなるまで放置する。(伸びによって異なるが、本実験で最も長いものが 5 分程度)

(2) 24 °C, 26 °C, 28 °C の水 (補足 2) を、じょうろを用いて順番にゴムにかけてゴムの温度を変化させ、その時の力を記録した。ゴムの伸びは 3 cm, 5 cm, 10 cm, … 5 cm ごとに 40 cm



図 13 温度制御の様子

まで行った。40 cm 以降は応力緩和による変動がなくなるまでの時間が非常に長く、またゴムの個体差による時間のバラつきが見られたため再現性に欠けると判断し行っていない。

(補足 2) 実験 2 - 1 を行った時の気温が 25 °C であったため 25 °C 周辺のデータをとった。また傾きを求める際一次関数と近似できるように温度の変化量をできるだけ小さくした。

<データ処理の方法>

25 °C での $\left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \delta l$ は次のようにして求めた。24 °C と 26 °C のデータで傾きを求めたものと 24 °C と 28 °C で傾きを求めたものの平均の値を 25 °C での $\left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \delta l$ とした。またこの時一次関数と近似して傾きを求めた。(補足 2 参照)

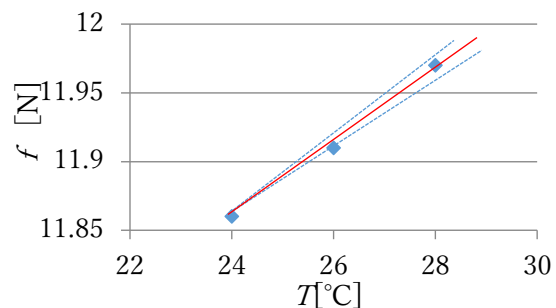


図 14 温度による力の変化 (伸び 30 cm)

上から順に点線が 24 °C と 28 °C のデータの傾き, 実線が 25 °C での $\left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \delta l$, 点線が 24 °C と 26 °C のデータの傾きを表す。

<結果>

$(\delta T)_S C_p = T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \delta l$ で与えられるエネルギー損失を計算しグラフにした。²

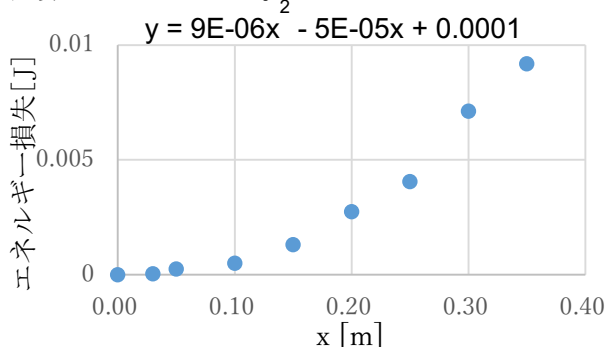


図 15 熱によるエネルギー損失

伸びが大きくなるにつれ、熱エネルギー損失は大きくなるのが分かる。

<考察>

ゴムの熱容量から伸び 30 cm での温度上昇を計算すると $9.0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ と非常に小さい。ゴムを伸ばしほおにあてると温度上昇が感じ取れるという経験則からこの実験方法では上手く熱エネルギー損失を測定できないことが分かる。原因として実際に変化させたゴムの温度が非常に小さかったことが考えられる。この場合 $\left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \delta l$ の値が計算値より大きくなり、得られるゴムの温度上昇も大きくなり考察とよく合う。

しかしゴムの力の温度変化が伸びによって一様であるとは限らないため、一様に得られたデータに何かをかけるなどといった操作は適切でないと考えられる。よって正確な熱エネルギー損失を測定できる実験方法の確立が今後の課題に挙げられる。このデータは定量的な考察には使えず、伸びが大きくなるにつれ、熱エネルギー損失は大きくなるという傾向があることが分かった。そこで温度上昇の見積もりとして実験 2-3 を行った。

実験 2-3 ゴムを伸ばした際の温度上昇の見積もり

<目的>

ゴムを伸ばした際の温度上昇の見積もりを行うことで熱エネルギー損失を定量的に考察する。

<実験方法>

ゴム 1 本を伸ばした際の温度上昇を直接測定するのは困難であるため太いゴムと温度センサを用いて実験を行った。



図 16 使用したゴム
(上が実験 2-3 で用いたゴムで、下が本実験で用いたゴム)

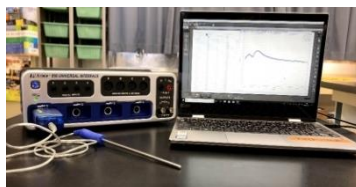


図 17 温度センサ

(1) ゴムを伸ばして温度センサを直接ゴムに触れさせて温度変化を測定する。

(2) 太いゴムの伸びを本実験で用いたゴムの伸びに変換するため、以下に示す還元式を用いる。太いゴムの自然長を L_0 伸びを $L_0 + \Delta L$ 、本実験で用いたゴムの自然長を l_0 伸びを $l_0 + \Delta l$ とすると

$$\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \text{ と表される。}$$

<結果>

上に示す還元式を用いると伸びが約 40 cm で温度上昇は $1.7 \text{ }^\circ\text{C}$ であった。熱エネルギーに換算すると 1.35J であり、実験 2-1 から得られた伸び 40 cm での全エネルギー損失 1.37J と非常に近い値を示した。またこの実験では太いゴムを大量に消費することや実験を始めた時期が遅かったなどの理由でこの方法での伸びと熱エネルギー損失の関係の同定には至らなかった。

<考察>

実験 2-1 では伸びが大きくなるにつれ全エネルギー損失は大きくなった。また実験 2-2 で伸びが大きくなるにつれ、熱エネルギー損失は大きくなるという傾向があった。これらのことから伸び 40 cm だけでなくそのほかの伸びでも熱エネルギー損失は全エネルギー損失と近い値をとることが予想される。しかしこれだけでは正確なデータ

のもとでの結論とは言えないため、改善の余地がある。

<結論>

本実験から得られたデータや現象から、ゴムの伸長過程における分子鎖の様子を考察し、伸び22 cmを境に2つのモデルを用いて解釈した。

(1) ~22 cm 可逆的な変化 分子間が遠い

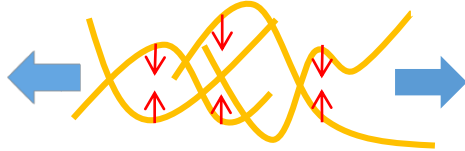


図18 分子鎖のモデル

(2) 22 cm~ 不可逆的な変化 分子間近い



図19 分子鎖のモデル

伸び22 cmまでは比較的分子間が遠く、それ以降ではゴムが伸ばされることで分子鎖同士が近づく。分子鎖間に作用するファンデルワールス力を考慮すると、伸び22 cmまでにおいて分子間にはたらく引力は小さく、それ以降の伸びでの引力は大きくなる。このことにより実験1-1で $f-x$ グラフの傾きが伸び22 cm周辺から大きくなることが説明される。

22 cm 以降では分子鎖の折れ曲がり小さくなり、伸ばそうとすると分子鎖同士がずれるため、一部の分子鎖がすべり、応力緩和を示す。実験後の一度伸ばされたゴムの長さが元の長さより長くなっていたことから、これは不可逆的な変化である。このことにより実験1-2で伸び22 cm付近から応力緩和が見られたことが説明される。

分子鎖の折れ曲がり小さくなったことからエントロピーが小さくなり熱を放出する。このことにより実験2-2でゴムを伸ばすと温度上昇が感じられるという現象が説明される。

実験2-1, 2-2, 2-3からゴムを伸ばし

た際のヒステリシスを生む要因の大部分はエントロピー減少による熱放出であり、化学的結合を切るのに使ったエネルギーは小さい。

<今後の課題>

今後の課題は実験の考察で述べた通りである。また実験で考察したゴムを伸ばした際の分子鎖のふるまいから、粘性や弾性、応力緩和などゴムの力に関係するものを関数で表し、ゴムの力を表す式を作ることが挙げられる。

$$F = k dx \quad (0 \leq x \leq \alpha)$$

$$F = f d\lambda + \lambda \left(\frac{dx}{dt} \right) - g(t) \quad (x \geq \alpha) \text{ など}$$

第1部では伸び一往復におけるゴムの力学的挙動を見てきたが、ゴムの使用用途を考えると一往復だけゴムを伸ばすことはほとんどなく複数回伸ばすことの方が多い。したがってゴムを複数回伸ばしたときの力学的挙動を知ることが必要である。そこで第2部として複数回伸ばしたときのゴムの力学的挙動を知ることが目的として第2部の実験を行った。

第Ⅱ部 複数回の伸長過程におけるゴムの力学的挙動

1. 研究内容

実験3 伸ばした回数に伴う力学的挙動の変化

複数回の伸長過程におけるゴムの分子鎖のふるまいを調べるためにまず第一部同様に、伸ばした回数に伴う力の変化やエネルギー損失を調べた。また伸ばした回数に伴ってゴムが長くなっていくという現象からも分子鎖のふるまいを考察した。

実験3-1 複数回伸ばしたゴムの $f-x$ グラフ

<実験方法>

- (1) 装置1を用いて実験1-1と同様の方法で伸び45 cmまで行う。
- (2) 伸びが45 cmになると1 cmずつ縮め、それぞれの伸びでの力を記録する。ゴムが自然長になるまで行う。
- (3) これらの操作を8回繰り返す。

<結果>

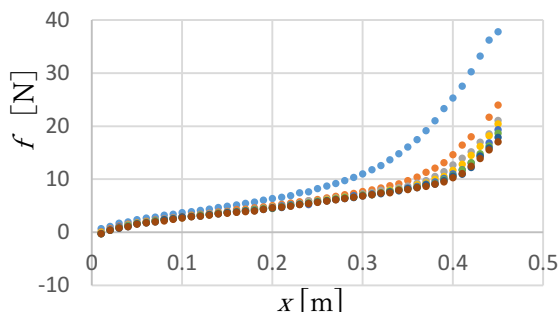


図20 $f-x$ グラフ 行き

45 cmの値の上から順に1往復目、2往復目…8往復目である。また図21も同じマーカーを用いている。1往復目でのゴムの力は大きく、2往復目以降では力は少しずつ減少している。

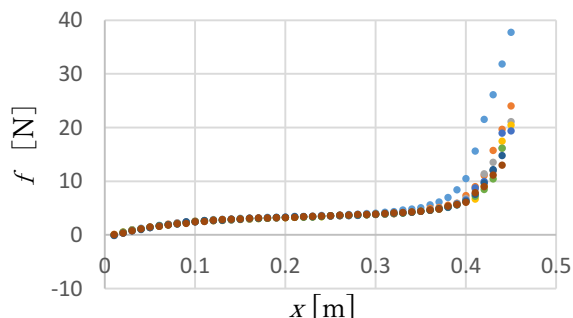


図21 $f-x$ グラフ 帰り

実験2-1同様の方法でエネルギー損失をもとめた。下にそのグラフを示す。

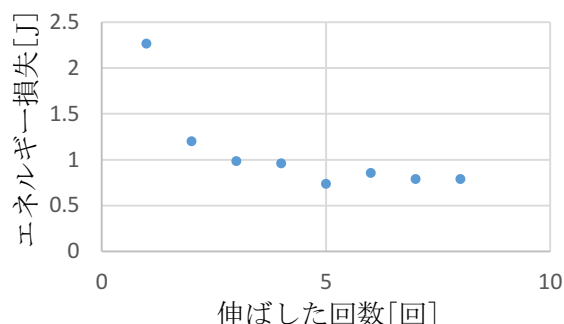


図22 エネルギー損失

1往復目のエネルギー損失は大きい、2往復目で大きく減少し、その後は少しずつ減少している。

<考察>

力にもエネルギー損失にも2往復目以降が1往復目と比べ小さくなる、という結果が得られた。これは1往復目として一度ゴムを伸ばしたこと、つまりヒステリシスが関係すると考えた。そこで力やエネルギー損失以外のデータとしてゴムの切れるまでの長さや伸ばした回数の関係を調べ、そこでどのようにヒステリシスがはたらいっているかを調べる実験を行った。

実験3-2 伸ばした回数とゴムの切れるまでの長さ

<実験方法>

- 装置1で実験を行った。
- (1) ゴムを伸ばしていきゴムのちぎれる伸びを計測する。この操作を1往復とする。
 - (2) 1往復目でちぎれた伸びの1 cm手前までだどちぎれてしまうことが多かったため、45 cmまでゴムを伸ばし、自然長まで縮めてからもう一度伸ばしちぎれる伸びを測定した。この操作を2往復とする。
 - (3) これらの操作を8往復まで行う。

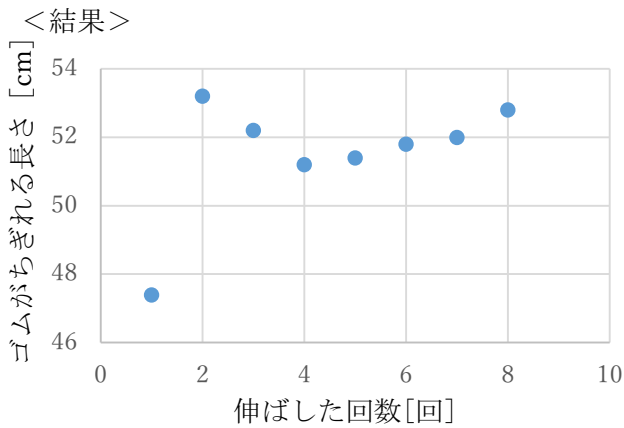


図 23 伸ばした回数とゴムが切れる長さの関係

1 往復目から 2 往復目においてゴムの切れるまでの長さが大きく変化した。

<考察>

実験 3-1 同様に 2 往復目以降の値の変化が 1 往復目と比べ小さくなる、という結果が得られた。実験 3-1, 3-2 からゴムを伸ばす 1 往復目がそれ以降の弾性に大きく影響を及ぼすといえる。この原因としてゴムが非晶質であることが挙げられる。非晶質であることから、ゴムの分子内には不安定な絡まりをしている分子鎖や架橋が含まれていることが考えられる。しかし 1 度ゴムを伸ばし縮めることにより、それらの不安定な絡まりの大部分は解消されると考えられる。このことによる 1 往復目と 2 往復目以降の伸ばす際のゴムの分子鎖の絡まり具合の違いが、1 往復目のデータとそれ以降のデータとの大きな差を生んだと考えられる。

この実験の実験回数が 1 回であることから 2 往復目から 4 往復目にかけて切れるまでの長さが小さくなっているという現象が、ゴムの個体差、実験手法による誤差なのか、実際に存在する現象なのかについての議論に至らなかったため、このことが今後の課題に挙げられる。

実験 3-3 伸ばした回数とゴムの長さ

実験 3-1, 3-2 では比較的伸ばす回数の少ないときについて考察を行ったため、次に多くの回数伸ばした際について考察する。

<実験方法>

- (1) 図 24 のように実験装置を組み立てる。
- (2) ギョムを伸び 45 cm まで伸ばし、その後自然長まで戻す。これを 1 往復とする。
- (3) ギョムを変え、同様の操作を行う。これを 10 回繰り返す。
- (4) この操作を 100 往復まで行う。
- (5) 実験に使用したギョム切断して長さを測定し、往復数ごとに平均をとる。(図 25)

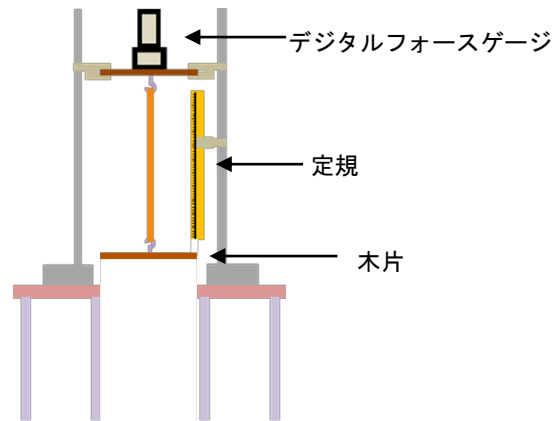


図 24 実験の模式図 (装置 3)



図 25 切断したギョム

<結果>

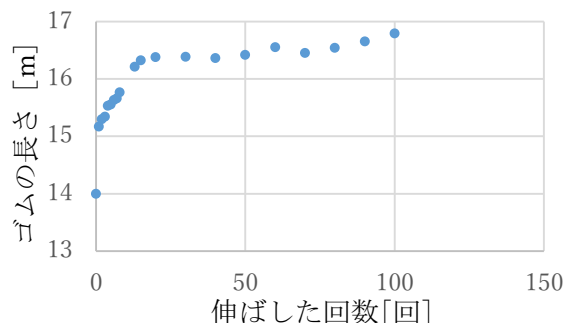


図 26 伸ばした回数とゴムの長さ

20 往復目以降からゴムの長さの変化はほぼ見られなかった。

<考察>

第I部の結論よりゴムを伸ばすと一部の分子鎖がすべり、そのままもとに戻らない。伸ばした回数に伴ってゴムの長さが伸びていくのはそのことが原因であると考えられる。そのため20往復目以降からゴムの長さの変化はほぼなくなった理由は20往復目で最大まで分子鎖がすべり、それ以降は分子鎖のすべりがほぼ起きなくなったためであると考えられる。

<考察>

第一部同様に本実験から得られたデータや現象から、ゴムの伸長過程における分子鎖の様子を考察し、4つのモデルを用いて解釈した。

(1) 伸ばしていない状態

不均一な絡まりが存在する。(図の左部分)



図 27. 分子鎖のモデル

(2) 1 往復目

不安定な絡まりは解消される
分子鎖同士が遠い

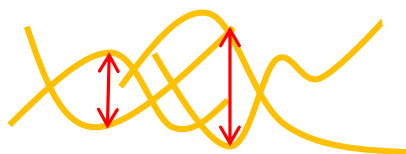


図 28. 分子鎖のモデル

(3) 2 往復目

分子鎖が近づく



図 29. 分子鎖のモデル

(4) 20 往復目

分子鎖間の隙間が最大限まで狭まる



図 30. 分子鎖のモデル

ゴムは非晶質であることから分子内に不均一な

絡まりをしている分子鎖が存在する。ゴムを伸ばすことで不安定な絡まりは解消される(図 27→図 28)ため1往復目のゴムの力学的挙動(第二部で測定した力などのデータ)は2往復目以降と異なる。

ゴムを伸ばすことで分子鎖がすべり、分子鎖同士の隙間が狭まる。(図 28→図 29)このようにして伸ばした回数に伴い、分子鎖同士の隙間が狭まり20往復目で分子鎖同士の隙間がほぼなくなり分子鎖のすべりはほぼ起きなくなる。そのことにより、20往復目以降からゴムの長さの変化はほぼなくなる。

2. 今後の展望

今後の課題は実験の考察で述べた通りである。また本実験で残された課題を解決することで、より高い精度でゴムを伸ばした際のふるまいを記述できるだろう。

3. 参考文献

1)ブリタニカ国際大百科事典 1973 年 ベントン財団

2)一般社団法人 日本ゴム協会: 日本ゴム協会誌: やさしいゴムの物理 2007 年

3)固体とゴムと気体の弾性

www.shoyama.jp/physics/gom.html

4)雑科学ノート - ゴムの話 - - hr-inoue ホーム

<http://hr-inoue.net/zscience/topics/gum/gum.html>

5)雑科学ノート - 粘弾性の話

hr-inoue.net/zscience/topics/viscoelastic/viscoelastic.html

タンブラーの側面で踊りだす水の謎

～不規則な振動現象(ガクット現象)の発見～

貝原命 桑田陽予里 高橋未優 難波静空

要 旨

水が入ったコップを傾けると、コップの側面を水が伝ってしまうことがある。そこで、水が側面を伝う条件を調べるために、ガラス製のタンブラーを用いた独自の装置を製作し、実験を行った。傾けたタンブラーから流れ出る水は、はじめはタンブラーの側面を伝い落ちるが、傾ける角度を徐々に大きくすると伝わらなくなる。しかし、タンブラーの傾きがある角度を越えると、水が再び側面を伝い、離れたたり伝ったりを繰り返す現象が水温を変化させても確認された。我々はこの不規則に繰り返される現象を「ガクット現象」と名付け、この現象について検証した。次に、親水性が異なる容器を用いた実験と、界面活性剤を混ぜて表面張力を変化させた水での実験の2つを行った。その結果、この現象には容器の親水性、水の表面張力、重力が関係していることが判明した。

キーワード:水, 表面張力, ガクット現象, 親水性, 重力

When you tilt a glass with water, sometimes the water runs down the outer wall of the glass. This study was done to investigate the conditions that the water runs down the wall, an original device to tilt a glass tumbler was made for the experiments. From the results of video analysis of the water flow running out of the tumbler, we found that the length of water running on the wall became short, when the tumbler reaches a certain angle, the water flows out the glass without touching the wall and then begins to run down on the wall again, and this phenomenon was confirmed for all temperatures. We named this phenomenon “GAKUTTO phenomenon”. As a result of experiments, it becomes clear that this phenomenon relates to the hydrophilicity of the container, the surface tension of the liquid, and the gravity.

1. 序論

水が入っているコップを傾けてその水をそそいだとき、コップの側面を水が伝うことがある。これは福山氏(2016)の文献¹⁾によれば次のことが理由であると考えられる。

「水分子が、電気陰性度の低い水素と高い酸素より構成されて、強く分極している。例えば、強く分極した官能基(例:ガラス表面のシラノール(Si-OH)基)で表面が覆われている場合、水との表面官能基の間に静電的な引力(双極子-双極子相互作用)が発生する。その結果、空気ではなく極性溶媒である水が固体表面を覆った方が安定になる。」(図1)

また、液体には表面張力があり、その大きさによっ

て濡れやすさ(濡れ性)が決まる。他にも、面に平行な方向へ働く力、粘性がある。一般に、液体の粘性は温度が上昇すると低下する。

そこで我々は、まず温度による水の粘性に着目して伝い方の違いを調べるため実験を行った。

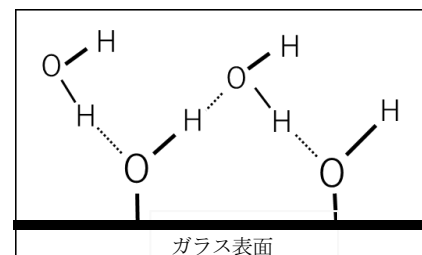


図1 ガラスの表面と水との引力の様子
文献¹⁾を基に作成

2. 研究内容

実験1. タンブラーを傾け、水を流す

<目的>

水の粘性に着目して、タンブラーの側面に水が伝わない条件を調べる。

<器具>

ガラス製タンブラー(全長 14 cm, 内径 6.43 cm, 厚み 0.23 cm), 蝶番で固定した二本の角材にホルダーと分度器を装着した物(図2)

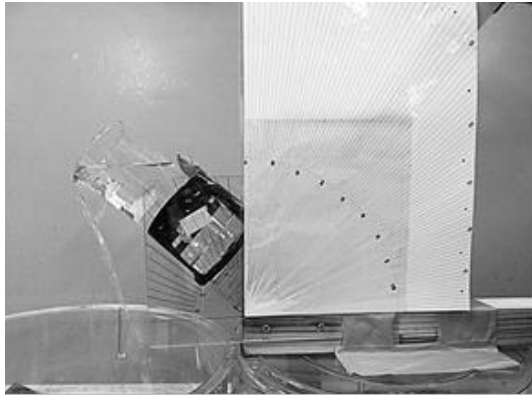


図2 実験装置

水を満たしたタンブラーを傾けて流れ方を観測する。

<仮説>

水は高温になるほど粘性が小さくなり、流れやすくなる。そのため、常温よりも角度が小さいうちに水が流れ終わり、水の流れ方に影響を及ぼすと考えた。

<容器の側面に伝う水の長さの測定方法>

実験では使用する全長 14cm のタンブラーに 3.5cm ごとにマークをつけ、タンブラーの縁から 14cm 水が伝っている状態を 0 点, タンブラーの縁から 10.5 cm まで伝っている状態を 1 点, 7.0 cm まで伝っている状態を 2 点, 3.5 cm まで伝っている状態を 3 点, 完全に伝っていない状態を 4 点として、水の伝い方を記録した(図3)。水のゆらぎが大きく mm 単位での記録が困難なため、この方法を用いた。

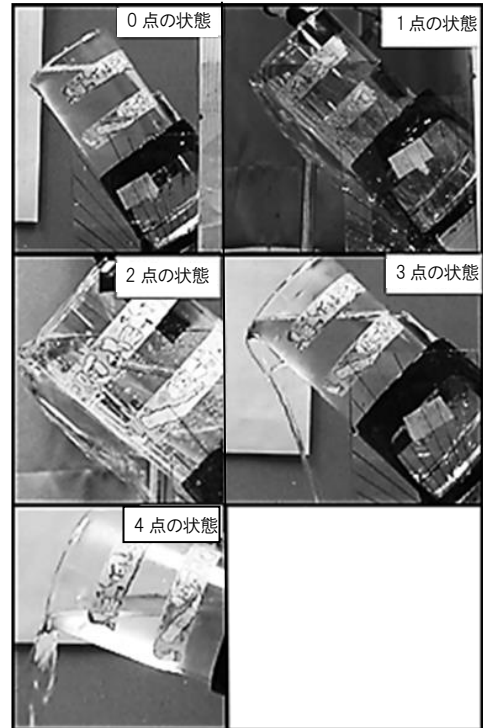


図3 水の流れ方を点数化

<実験方法>

1. 水温 3℃ (粘性:1.7906 Pa·s), 50℃ (粘性:0.5469Pa·s), 90℃ (粘性:0.3156 Pa·s)²⁾ の水が入ったタンブラーを準備し、装置に取り付ける。
2. 毎秒 5° の大きさの角速度でタンブラーを傾ける。
3. タンブラーから水が伝ってこぼれていく様子をビデオ撮影する。動画を再生しながら毎秒 5° で伝っている水の長さをタンブラーの目盛りに従って記録する。

<結果>

1. 水温 3℃, 50℃, 90℃による粘性の違いではグラフから大きな違いを読み取ることはできなかった(図4)。
2. 図4から、角度が 47° 付近ではどの水温(粘性)でも点数が下がり、さらに角度が大きくなると再び点数が上がることを読み取れる。

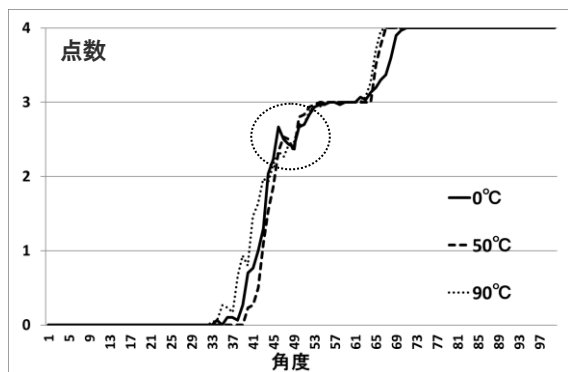


図4 実験を30回行い、作成した平均のグラフ
47°付近で点数が下がっているのが見られる。

<考察>

毎秒5° タンブラーを傾けると、共通して47° 付近で点数が下がっている。この現象は流れる水の量とタンブラーの角度が関係していると考えた。これは、タンブラーを傾けていくと傾きが40° 付近になったとき側面を伝っていた水が離れだすが、タンブラーの傾きが47° 付近になると再び伝いだし、小刻みに伝ったり離れたりを繰り返す現象である。この現象を「ガクット現象」と名付け、原因を解明するため、タンブラーを傾ける角速度の範囲を調べる。

実験2. タンブラーを傾ける角速度を変える

<目的>

ガクット現象が起こる角速度の範囲を調べる。

<実験方法>

実験1と同じ装置を用いて毎秒1°毎秒2°、毎秒2.5°の大きさの3つの角速度での水の伝い方を計測する。角速度ごとの水の伝い方を観察し、ガクット現象が起こる角速度の範囲を調べる。

<結果>

毎秒1°の角速度ではガクット現象が観測されなかった(図5)。

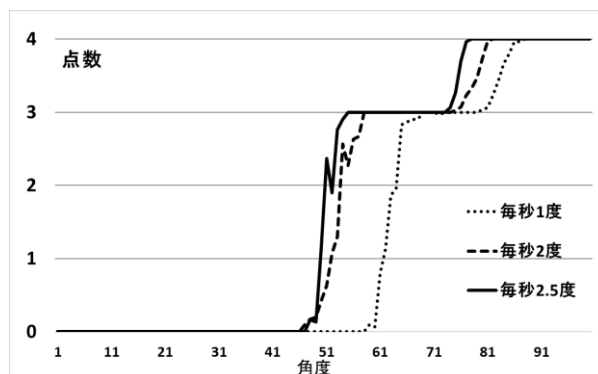


図5 実験2を30回行い作成した平均のグラフ
毎秒1秒ではガクット現象が見られない。

<考察>

結果より、毎秒2°で傾ける角速度の大きさをガクット現象が起こる角速度の下限とする。

水を満たしたタンブラーを傾ける実験では、容器の角度によって流れる水の量が異なるため、この現象が角度に依存するものか、水の流量に依存するものかわからない。そこで、実験3では流水量を一定にする。

実験3. 流水量を一定にして角度を変える

<目的>

流水量を一定にし、タンブラーの角度を固定したときの水の振る舞いを調べる。

<実験方法>

1. 容器にホースを固定し、流水量を一定にし、タンブラーの角度は固定した(図6)。
2. 固定する角度を変化させ、角度ごとにガクット現象が起きているか記録する。



図6 実験3の実験装置

流水量を一定にして実験を行う。

<結果>

38°～54°で伝い落ちる水の先端部がタンブラーのマークの1点と2点の間を行き来する現象が見

られた(表1)。実験3は実験1とは実験方法が異なるため「セカンドガクット現象」と名付けた。

表1 ○=ガクット現象が起こる

×=ガクット現象が起きない

回数/角度	35	36	37	38	~	54	55	56	57
1回目	×	×	×	○	~	○	×	×	×
2回目	×	×	×	○	~	○	×	×	×
3回目	×	×	×	○	~	○	×	×	×

<考察>

角度を固定し流水量を一定にすることで、広い角度の範囲でセカンドガクット現象が見られた。このことから、ガクット現象はタンブラーの角度に関係があるといえる。

実験4. 材質を変える

<目的>

容器の材質を変えて容器と水との親水性が「セカンドガクット現象」に与える影響について調べる。

<仮説>

親水性が低い容器では水が伝いにくくなるため「セカンドガクット現象」は起きないとする。

<実験方法>

1. 材質の異なる容器を4種類用意する(図7)。
2. 角度を「セカンドガクット現象」が最も起きやすい47°に設定する。
3. 実験3と同様に流水量を一定にし、角度を±1°ずつ「セカンドガクット現象」が起きる範囲を計測する。



図7 実験に使用する容器

左からペットボトル, 竹の皮を貼ったコップ, 木製のコップ, 塩ビパイプ

<結果>

材質を変えて「セカンドガクット現象」が起きる角度を計測したが、どの角度になっても起きなかった。

実験5. 各材質の親水性の差を調べる

<目的>

実験4で使用した容器とガラスの親水性の大きさを調べる。

<実験方法>

親水性の大きさを調べるために容器に水を一滴垂らし、デジタルソフトを用いて接触角を測定する(図8)。

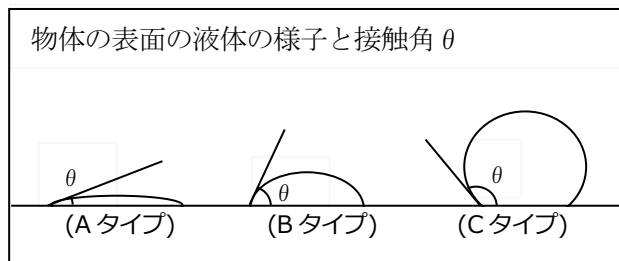


図8 吉野氏の文献³⁾を基に作成

<結果>

ガラスと比べて、他の容器は親水性が低いことが分かった。(図9)

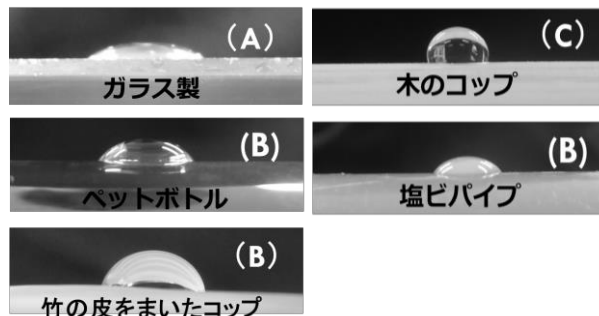


図9

<考察>

ガラスは親水性が極めて高いため、水がタンブラーの側面に伝いやすくなる。一方、ガラス以外の容器では親水性が低いため、水が容器の側面を伝いにくい。このことからガクット現象が起きる原因として容器の“親水性”が関係していると考えられる。また、親水性によってタンブラーの側面に吸着された水と伝っていない水との間で起きる表面張力によって「ガクット現象」が起きていると考えた。

実験6. 表面張力の大きさを弱くする

<目的>

ガクット現象に表面張力が関係しているか調べる。

<仮説>

実験5よりガラスの親水性によって少量の水がタンブラーの側面に伝い、その吸着された水がタンブラーの側面を伝っていない水を表面張力によって引きつける。水は表面張力によって表面積を小さくしようとするが、水を引き付ける力と重力に従って流れようとする力がほぼ拮抗して現象が起きている。

<実験方法>

表面張力によって現象が起きていることを調べるために、3℃の水に界面活性剤36%入りの洗剤を入れて表面張力の大きさを弱める。そして実験1と同じ実験方法を行う。

<結果>

洗剤入りの水ではガクット現象が起こらず、洗剤なしの水と比較してタンブラーの縁から底まで伝う角度の範囲が大きかった(図10)。

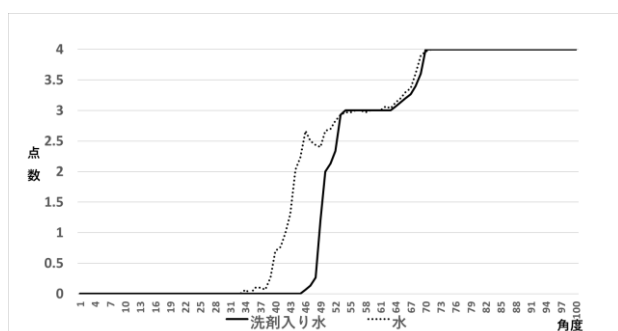


図10 実験5の結果

<考察>

洗剤なしの水より角度が大きくなってもタンブラーの縁から底まで伝っていたのは、洗剤入りの方は表面張力の大きさが弱いため濡れ性が上がり、水がよりタンブラー側面に広がり、水が吸着されやすくなったからと考えられる。

実験7. 表面張力の大きさを徐々に弱くする

<目的>

ガクット現象が起こる表面張力の閾値を特定する。

<仮説>

ガクット現象がガラス製のタンブラーで起こるのはガラスの親水性と水の水素結合による表面張力が大きいからだと考えられる。そこで、界面活性剤の含有量を徐々に増やすことで、表面張力の影響が少なくなり、ガクット現象が起きる、起きない、の境目がわかる。

<器具>

界面活性剤・実験1と同様

<実験方法>

1. 水温が3℃の水を準備する。
2. 界面活性剤を4Lの水に0.1mL, 0.3mL, 0.5mL, 3.0mL, 4.0mL, 5.0mL ずつ入れる。
3. 毎秒5°の角速度でタンブラーを傾ける。
4. 界面活性剤の量とガクット現象が起きる角度を測定する。
5. 表面張力の大きさの違いを実験5と同様の方法で調べる。

<結果>

界面活性剤の量が最も少ない量は0.1mLで、ガクット現象は起きなかった(図11, 12)。

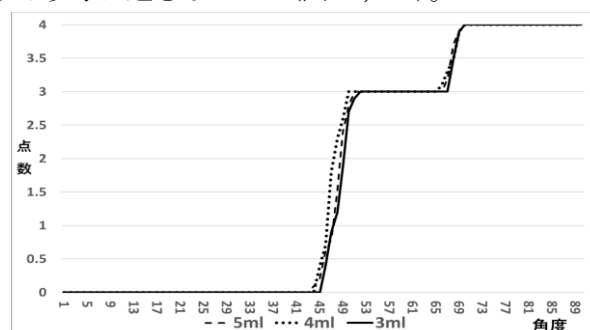


図11 5~3mLの結果

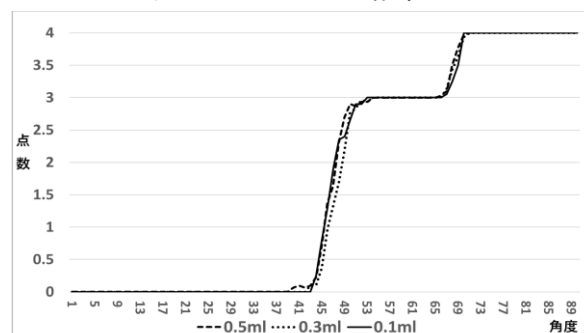


図12 0.5mL~0.1mLの結果

また、接触角より表面張力が小さくなり、その結果濡れ性が上がったことが分かった(表2)。

表2 水滴の接触角

洗剤の量	水滴の接触角(度)
0mL	26.1
0.1mL	42.6

<考察>

ガクット現象が起きる表面張力の閾値は4Lの水に対して洗剤0.1mL以下である。これは、界面活性剤入りの洗剤を混ぜた水は、濡れ性が大きいためタンブラーの側面に僅かな水が伝うが、表面張力が小さいため流れ落ちる水を引き寄せられないためと考えられる。

3. 結論

以上のことから、タンブラーを傾けた際の水は次のように振る舞うと考えられる。まずガラスの親水性によって水が側面に吸着され、側面に吸着された水が、表面張力によって表面積を小さくしようとする。その力が、伝わらずに流れ落ちている水を引き付ける力となり、側面に水が引き上げられる。一方、水には重力によって流れ落ちる力が働くため、ガラス側面を伝う水がガラスから引きはがされる。このとき、流れが多くなるとガラス側面を伝う水が重力によりはがされて下方へ流れ、少なくなると表面張力によって上に引き戻される。この表面張力と重力の2つの力がほぼ拮抗し、流量の微小な変化を繰り返すことによって「ガクット現象」が起きると結論付けた。

4. 参考文献

- 1) 福山真央著:なぜ表面は水で濡れるのか. 化学と教育 64 巻 5 号. p228 (2016)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/kakyoshi/64/5/64_228/_pdf
- 2) アズワン(最終閲覧日 2019/01/09)
<https://www.as-1.co.jp/academy/24/24-2.html>
- 3) 大阪市立大学 吉野治一著:第8章 液体の水3 ~表面と界面~, 物性研究者 吉野治一のページ.
<http://e.sci.osaka-cu.ac.jp/yoshino/edu/water/chapter08.pdf>

4) 協和界面科学株式会社

<https://www.face-kyowa.co.jp/>

紙飛行機の軌道の解析と終端速度

—空気中と水中での軌道の比較—

上野雄貴 長田光樹 越智光之介 佐々木惇 佃海斗

要旨

空気中と水中における紙飛行機の軌道の違いについて、力学的に考察した。紙飛行機は水中で飛ばすことを考慮してラミネートフィルムで作成した。ハイスピードカメラを用いて実際に飛ばした際の軌道を撮影し、動画から動きの解析を行った。

その結果、空気中と水中での軌道の違いには大きな違いが見られたが、最終的にはどちらも安定した滑空（等速直線運動）を見せた。空気中では浮力の影響が小さく、水中では浮力の影響が大きいことが分かった。

The difference in the trajectory of paper airplanes between in the air and in the water was considered from the point of view of dynamics. Paper airplanes were made of laminated film for using it in the water. The trajectory was using a high speed camera and analyzed the motion from a moving image. As a result, there was a big difference in the trajectory in the air and in the water, but in the end both showed a stable glide (uniform linear motion). It was found that the influence of buoyancy is small in the air and large in the water.

キーワード：紙飛行機，軌道，抗力，揚力，仕事とエネルギーの関係式

1. 序論

紙飛行機は一枚の紙で作ることができ、遠くまで飛ばすことができる。今日においても遊びの一種として、さらには世界大会まで開かれるものとなっている。大会などでは、飛行距離や滞空時間などを競う。その目的によって、形状を様々に変化させている。

紙飛行機は空気中において放物線に近い軌道を描く。紙飛行機を水中において同じ条件（水平方向の初速度）で飛ばす場合、その軌道は空気中の軌道とは大きく異なるものになると考えた。紙飛行機に加わる力を考えてみると紙飛行機には、重力、浮力、揚力、抗力の四つの力が作用している。そこで本研究では、紙飛行機の抗力と揚力に着目し、水中と空気中の軌道を調べ、軌道が異なる要因について考察した。

浮力は物体の体積 $V(\text{m}^3)$ 、重力加速度 $g(\text{m/s}^2)$ とすると、

$$F_b = \rho V g$$

と表すことができる。

運動エネルギーを K 、物体の速さ v (m/s) とすると

$$K = \frac{1}{2} m v^2$$

位置エネルギーは基準水平面を h とすると、

$$U = mgh$$

と表せる。

実験で空気中と水中における紙飛行機の軌道を調べようと考えたが、紙飛行機を水中で飛ばすと濡れてしまい、空気中と水中で同じ条件にならない。そこで水中でも濡れず、機体による影響が少ないと考えられるラミネート用紙を使用してラミネート飛行機を制作した(図 1)。また、ラミネート飛行機の形状は一般的な紙飛行機の形を利用する。以下ラミネートで作成した飛行機ではあるが、「紙飛行機」として記述する。

2. 研究内容

<研究方法>

① 空気中における軌道のグラフの作成

発射台(図 2)を机の上に設置し、紙飛行機を飛ばす。手によって輪ゴムを引く力は0.50 Nで統一し、輪ゴムは伸びて加えられる力が変化してしまうために、三回飛ばすごとに新しいものに交換する。

軌道の解析を行いやすくするため、装置の後ろには黒い板を設置し、紙飛行機の先端付近は解析を行いやすくするために油性の赤マーカーで塗った。紙飛行機が飛んでいる様子はハイスピードカメラを利用して撮影する。撮影したデータは解析ソフト(KINOVEA)を用いて水平方向、鉛直方向の座標の値を出す。この時、輪ゴムから手を離れた瞬間の座標を(0, 0)とする。また、紙飛行機の先端の軌道を全体の軌道とし、軌道は0.1秒ごとの座標を取ったもので表す。

② 水中における軌道の解析

水槽の中に発射台全体が浸るように水を満たし、底に発射台を固定する。実験手順は空気中と同様である。

③ 紙飛行機にかかる抗力と揚力を求める

それぞれの軌道のグラフから、座標の変位を出し、速さ v (m/s) を求める。

仕事とエネルギーの関係式に m , g , h , x の値を代入することで機体の進行方向にかかる抗力 $F(N)$ と揚力 $L(N)$ を求める。

<材料・器具>

・材料

合板, ベニヤ板, ラミネート用紙, 釘, ネジ, プラスチックのレール, 輪ゴム, 木材

・器具

発射台, 紙飛行機(ラミネート)

・使用したソフト

解析ソフト(KINOVEA), 表計算ソフト(Excel[®])

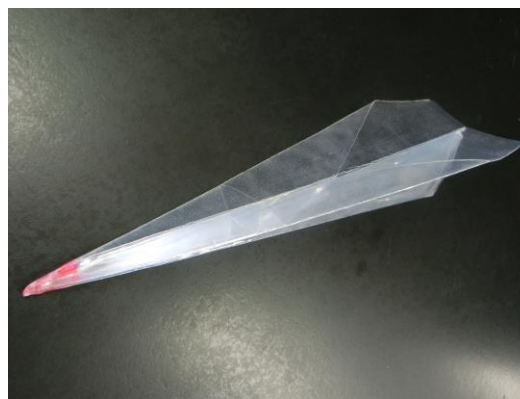


図1 ラミネートを利用した飛行機

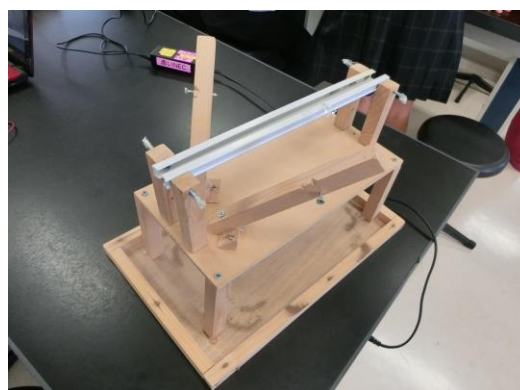


図2 発射台

<結果>

図3~5は、空気中の39個のデータの平均を取って作成したものである。図6~8は、水中の1個のデータから作成したものであり、その他にある10個のデータの軌道に大きな変化は見られなかった。

①空気中

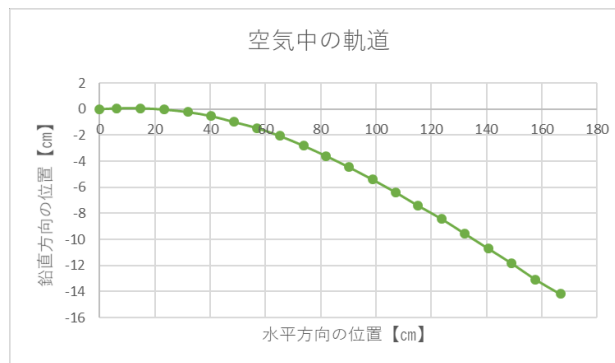


図3 空気中における紙飛行機の軌道

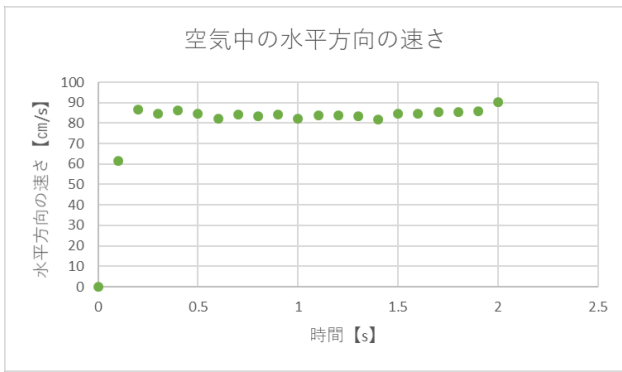


図4 空気中の水平方向の速さ

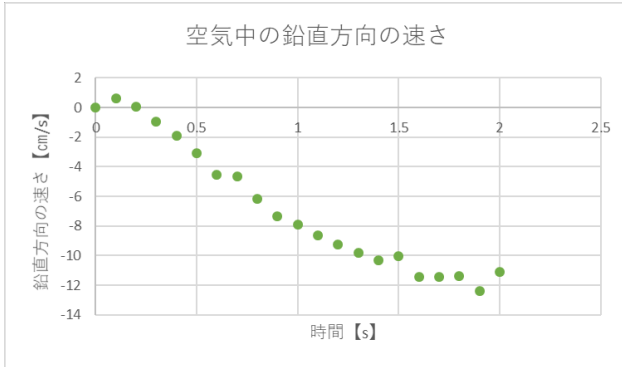


図5 空気中の鉛直方向の速さ

②水中

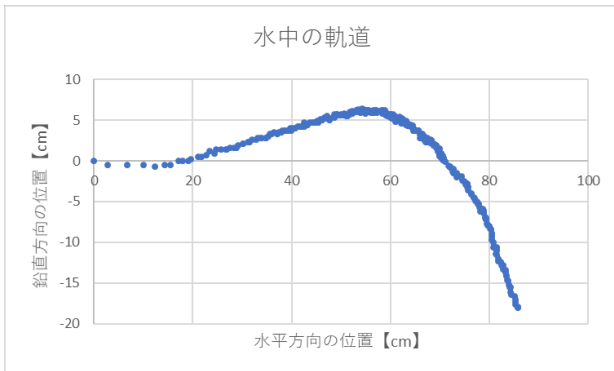


図6 水中の軌道

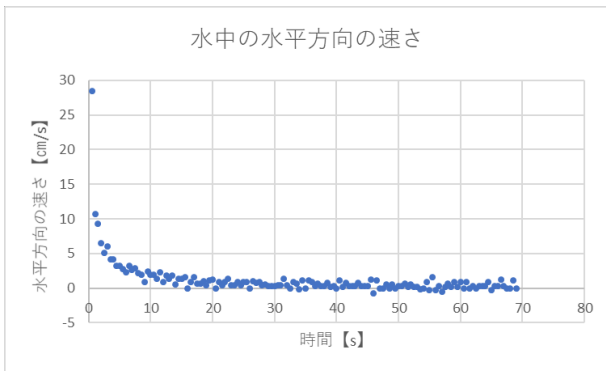


図7 水中の水平方向の速さ

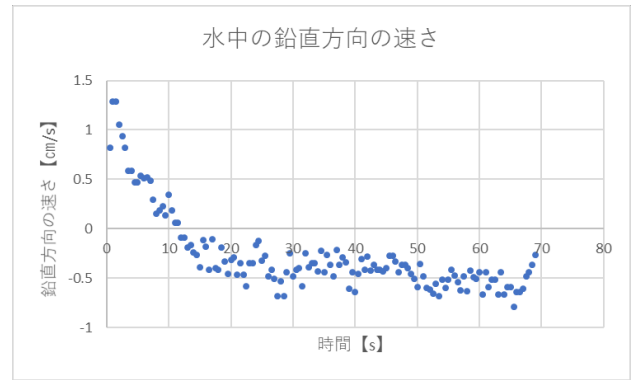


図8 水中の鉛直方向の速さ

<考察>

・空気中

水平方向において、0.2秒まで弾性力で加速する。0.2秒以降は、85(cm/s)の等速運動をしていると考えられる。

鉛直方向において、1.6秒まで重力で負の方向に加速する。1.6秒以降は、12(cm/s)の等速運動をしているものと考えられる。

水平方向、鉛直方向において等速運動をしているものと考えられるため、軌道は直線となることが考えられる。実際に図3より1.6秒以降の軌道は直線に近い。

1.6秒以降の軌道を直線であると仮定すると、紙飛行機の質量を m (kg), 紙飛行機の速さを v_1 (m/s), 基準面からの高さを h_1 (m), 進行方向に対する浮力と抗力の合力を F'_1 (N) とすると1秒間における仕事とエネルギーの関係式より,

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv^2 - mgh + F'_1x$$

($m=0.014$, $v_1=0.85$, $g=9.8$, $h_1=0.12$, $x_1=0.85$) が成り立つ。よって $F'_1=0.019$ Nである。

空気中の浮力は、 6.9×10^{-5} N ($m=0.014$ kg, $\rho_1=1.2$ kg/m³, $V=5.8$ cm³) である。

よって浮力を f_1 とすると進行方向に対する抗力 F_1 は

$$F = \frac{F'(mg - f)}{mg}$$

より、 $F_1=0.019$ N であると求められる。

また図9より揚力 $L_1=0.14$ N である。

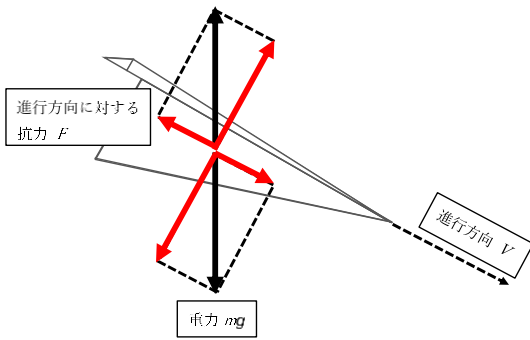


図9 空気中の紙飛行機に加わる力

・水中

水平方向において、30秒まで負に加速して30秒以降は、0.39(cm/s)の等速運動をしていると考えられる。

鉛直方向において、25秒まで重力で負の方向に加速する。25秒以降は、0.47(cm/s)の等速運動をしているものと考えられる。

水平方向、鉛直方向において等速運動をしているものと考えられるため、軌道は直線となることが考えられる。実際に図3より30秒以降の軌道は直線に近い。

30秒以降の軌道を直線であると仮定すると、紙飛行機の質量を m (kg)、紙飛行機の速さを v_2 (m/s)、基準面からの高さを h_2 (m)、飛行距離を x_2 (m)、進行方向に対する浮力と抗力の合力を F'_2 (N) とすると1秒間における仕事とエネルギーの関係式より、

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv^2 - mgh + F'x$$

($m = 0.014$, $v_2 = 0.0061$, $g = 9.8$, $h_2 = 0.0046$, $x_2 = 0.0061$)が成り立つ。よって、 $F'_2 = 0.11$ Nである。水による浮力は、 0.057 N($m = 0.014$ kg, $\rho_2 = 1000$ kg/m³, $V = 5.8$ cm³)である。

よって浮力を f_2 とすると進行方向に対する抗力 F_2 は

$$F = \frac{F'(mg - f)}{mg}$$

より、 $F_2 = 0.059$ Nであると求められる。また図10より揚力 $L_2 = 0.055$ Nである。

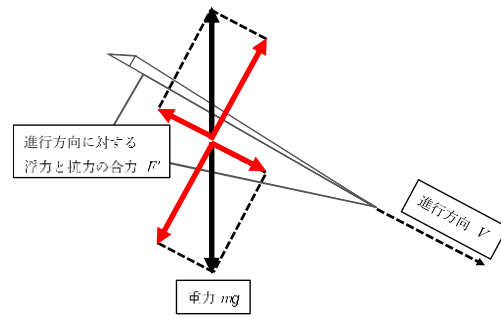


図10 水中の紙飛行機に加わる力

3. 結論

空気中と水中での軌道には大きな違いがあるが、最終的にはどちらも安定した滑空(等速直線運動)となる傾向が見られた。

空気中において、進行方向に対する抗力は終端速度 $v_1 = 0.85$ (m/s) で

$$F_1 = 0.019$$
 N

$$L_2 = 0.14$$
 N

である。

水中において、進行方向に対する抗力は終端速度 $v_2 = 0.0061$ (m/s) で

$$F_2 = 0.059$$
 N

$$L_2 = 0.055$$
 N

である。

	終端速度 V (m/s)	抗力 F (N)	揚力 F (N)
空気中	0.85	0.019	0.14
水中	0.0061	0.059	0.055

よって、空気中と水中では抗力は約3倍の差があり、揚力は約2.5倍の差があるが、終端速度は約100倍の差が生じている。よって紙飛行機の水中と空気中の機動の違いは抗力、揚力による影響よりも浮力による影響の方が大きいことが分かった。

4. 参考文献

- 1) 小林昭夫: 紙飛行機で知る飛行の原理. 講談社ブルーバックス出版, pp. 20, 45, 48, 49, 51, 52, 73-75 (2010)
- 2) 久保田浪之介: 今日からモノ知りシリーズ. トコトンやさしい流体力学の本. B&T ブックス. 日刊工業新聞社, pp. 10, 14, 22, 98, 104 (2007)
- 3) 佐々木達治郎: 航空物理学. 共立社, p. 8 (1930)