

第96回記念祭物理部小冊子

物

理

部

open

目次

| | | |
|------------------------|-----------|------|
| ・はじめに | 中 3 小島 | p.3 |
| ・物理部って？ | 高 2 吉村 | p.4 |
| ・二足歩行ロボットの制作 | 高 2 牧 | p.5 |
| ・紙の曲がり方に関する研究 | 高 2 吉村 | p.8 |
| ・タイヤ横滑り時の摩擦力 | 高 3 藤本・藤崎 | p.18 |
| ・高校生科学技術チャレンジ（JSEC）体験記 | 高 3 藤本 | p.27 |
| ・終わりに | 中 3 高橋 | p.31 |

※「製本機の作成報告 中3合同」は都合により別配布とさせて頂きます。

はじめに

中3 小島 明泰

本日は武蔵高中第96回記念祭の物理部にお越しいただき、
誠にありがとうございます！中3の小島と申します。

まず、物理部の展示をご覧いただく前に、物理部とはどのような部活なのかご説明させていただきますと、「物理分野の中で部員の興味のあることについて探求していく部活」と、物理分野であればどんなことにも幅広く扱っている部活になっています。詳しくは「物理部って？」をお読みください。
その中でこの物理部が一年間扱ってきた四つの研究テーマを本日は発表します。

物理に詳しい人、そうでない人でも楽しめる内容になっていますので安心してご覧いただけるかと思います。
それでは、物理部の展示をお楽しみください！！

物理部って？

部長 吉村共生

物理部は自分の気になった物理学に(多分)関係のある現象を実験を通して研究したり、木材や金属を加工して何か（ロボット、機械の機構とか）を製作したりする部活です。

部の歴史は長いらしいです。僕は把握してない。

活動日は週4回程度、部員は十数人です。

スペース余ったので、本ページの一、二行目を詳しく説明します。

研究内容を見ればわかると思いますが物理部は実験装置を作り、実験を行い、その結果から推論する「実験物理」の手法を大切にしています。

物理学といつてもいろいろな分野があり、太陽観測部がやっている天文学、それに続く原子、素粒子とか相対性理論とかを差し引くと、

物理部が主にやるのは力学、熱力学、電磁気および光学、物性物理、音響物理そして、工学、電子工学の範囲になると思います。

（実験器具手作りできればなんでもあり）

特に研究では物理学の基礎的な考えを身に着けるいい機会になると思います。

数学が好きで多分理系になるかなあ、と思っている人にはお勧めの部活です。

二足歩行ロボットの制作

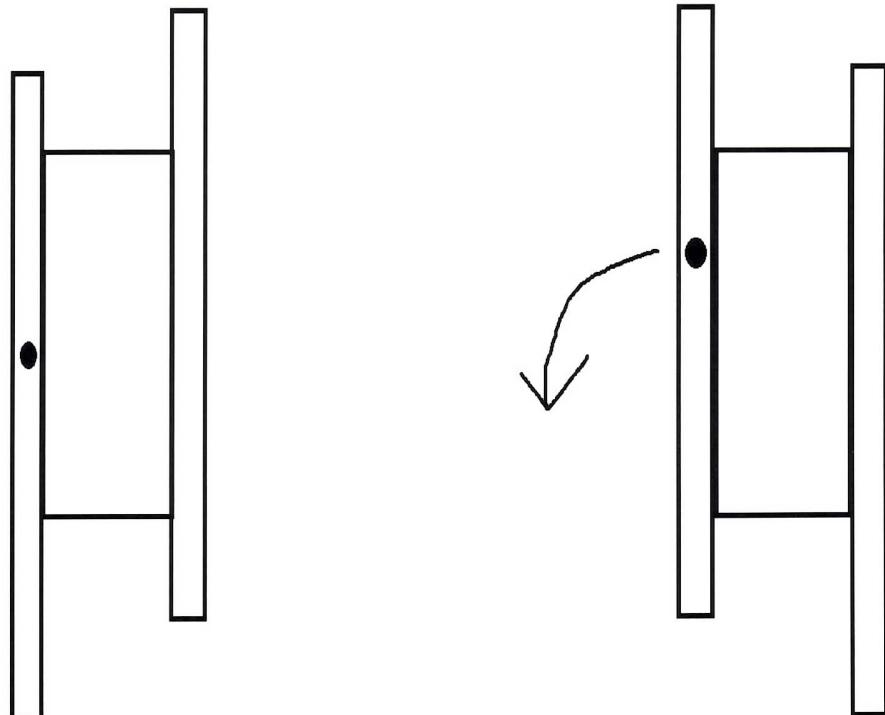
高校2年 牧 雄大

1、動機

去年はロボットに使っている機構の説明を主に説明したが、重心調整が出来ておらず、補助ありでしか歩くことが出来なかった。今回は重心調整の方法を主に検証した。

2、去年の復習

二足歩行ロボットは人間と同じで二つの足を交互に上げ下げして前に進んでいる。
(二つの足を交互に上げ下げしている機構については今回あまり関係ないので割愛)
当然、そのままだと重心の位置は地面に触れている足の場所が変わっても変化しないため、図のように倒れてしまう。そのため、重心を足の動きに合わせて調整する必要がある。



重心を片足に置いたとしても…

その足が上がったときに
倒れてしまう

3、重心調整の方法

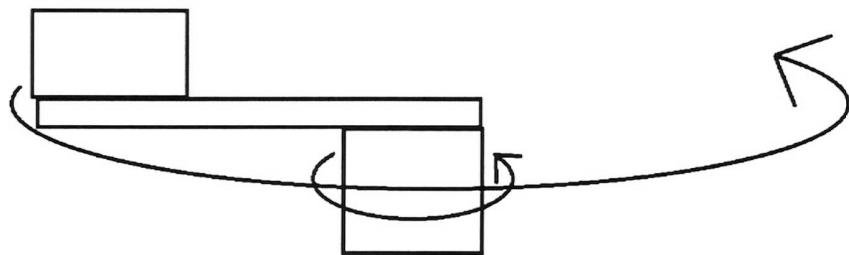
重心調整の方法は去年と合わせると合計3つの案が浮かんだ。

- ・1つ目が写真のようなパイプ内に入った鉄球を使ったものである。足が上がると、それに対応してパイプの片側が上がり、鉄球が上げた足の逆方向へと滑り、地面に接している側の足を軸に安定するというものである。しかし鉄球が滑るまで若干の誤差があり、それによって上げた足の方向がより重くなり、逆に倒れやすくなってしまった。



- ・2つ目は足の裏にスポンジを貼り付けて柔らかくすることで多少傾いても耐えられるようにするというものである。(これはあまり重心調整の方法とは言えないが)しかし、それで耐えられるということもなく、逆にスポンジが持つ摩擦によって前後に倒れやすくなってしまった。この方法は主な方法として使うのではなく、別の方法の補佐的なものとして使用するのが良いと思われる。摩擦はスポンジのさらに下に厚紙を貼ることで解消できると思われる。

・3つ目は図のようにモーターの回転を利用して、棒の先についた重りを回して重心調整するというものである。今回はこの案を採用した。理由として、足の上下運動により生じる重力を利用するといういくつかの段階を踏む第1案と違い、この案は純粹にモーターの回転を利用するため、誤差が生じづらくなっているためである。デメリットとして第1案とは違い鉄球は回転するため、前後のバランスが不安定になってしまう恐れがある。前後に倒れる可能性を考慮して、足を前後に長くする、できる限り前後のバランスを安定させておく、等の対策が求められる。



4、今後の展望

今回で重心調整は希望が見えてきたため、前に進むことしかできないロボットにさらに細かい動作をさせていきたい。次はセンサー等を利用して目の前の障害物を回避できるようにしていく予定である。

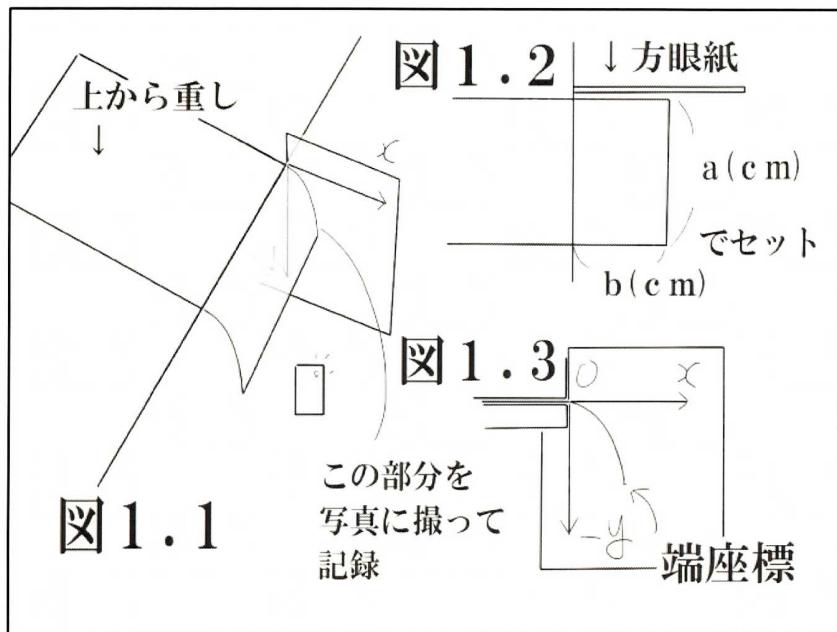
(この小冊子を書いている時点ではまだ完全に制作は終わっていません。
そのため、発表段階では少し内容が変わる可能性があります。ごめんなさい。)

紙の曲がり方に関する研究

高1 吉村共生

1、目的

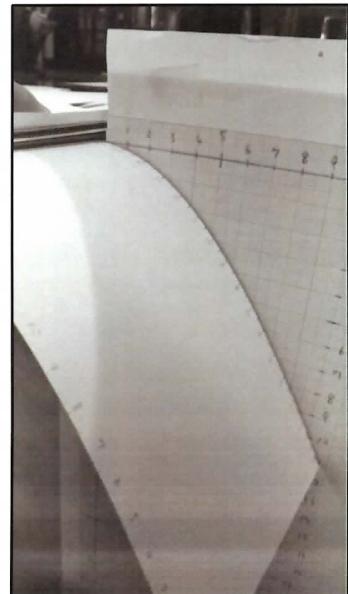
紙が自重でしなっている時の曲線にどのような法則性があるのか明らかにすることを本研究の目的とした。



跡を記録し、その一番端の座標(端座標)を測り、実験データとした。

←実験装置

↓撮った写真



3、実験誤差

実験A B Cの誤差は b 辺設置誤差 $\pm 2\text{ mm}$ 、x 座標は b 辺の誤差と読み取り誤差で $\pm 6\text{ mm}$ 、y 座標も同様に $\pm 8\text{ mm}$ で共通。

x/b はそれぞれの誤差を代入して、実験A Bは横目 $b = 7$ から ± 0.08 、実験Cは縦目 $b = 15$ から ± 0.05 の値を得た。

理科棟発表会までの実験まとめ

—— a、 b 辺を変化させた時の端座標の変化

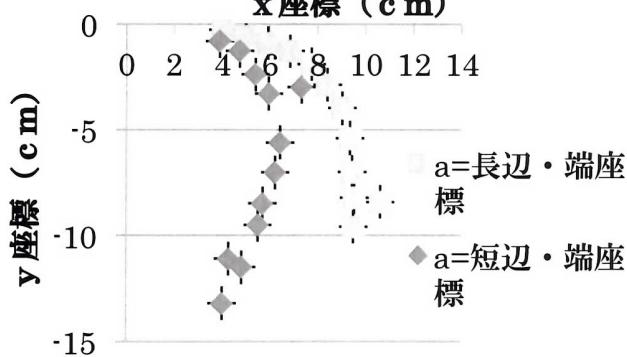
4、 5、 実験手順 A、 B

- A 実験用紙の長辺、短辺を a 辺にし、b 辺を 4 ~ 15 cm の間で 1 cm ずつ増やしてそれぞれに端座標を記録した（短辺 a = 182mm で縦目、長辺 a = 257mm で横目）
B 実験用紙の長辺を 200mm、150mm、100mm、50mm に切りそれぞれを a 辺にして b 辺を 5 cm と 10 ~ 15 cm の 1 cm 間隔で増やしてデータをとった。

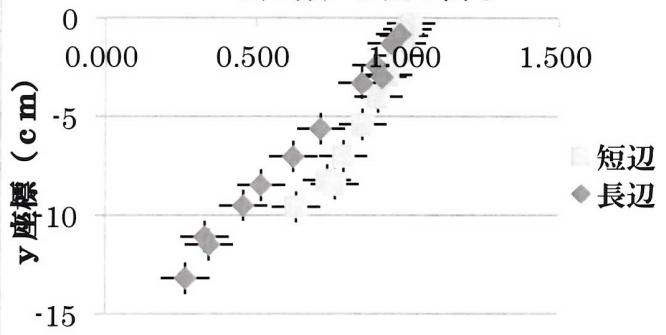
実験結果 A - 1、 2

それぞれの端座標を一枚にしたのが A - 1、 横軸を x / b にした物が A - 2 である。

A - 1 端座標の集計結果
x 座標 (cm)



A - 2 x / b と y 座標の関係
x 座標 / b 辺の長さ



b 辺を長くするほど右下に垂れていって、長辺の方は途中から左下に向かっている。

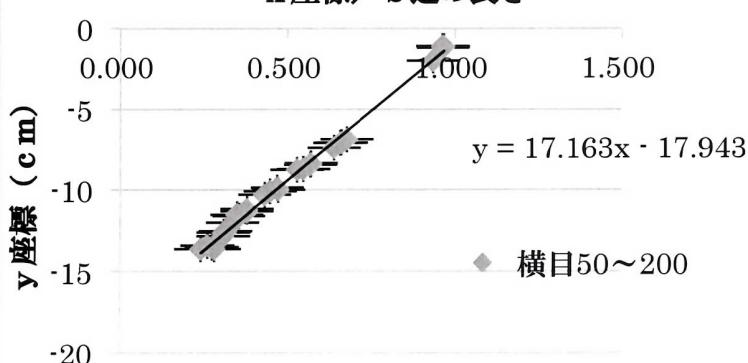
（グラフ中の三つの点が誤差範囲より大きくずれているがこれはコピー用紙と方眼紙が擦れておきてしまったもので、写真でも確認できた。）

長辺の方が傾きがなだらかで点の間隔が広い。

近似線をそれぞれ出してみた結果、近似線の傾き (x / b y) は、短辺が 27 (1 / cm)、長辺の傾きが 17 であった。

実験結果 B

グラフ B a 辺の変化としなり方
x 座標 / b 辺の長さ

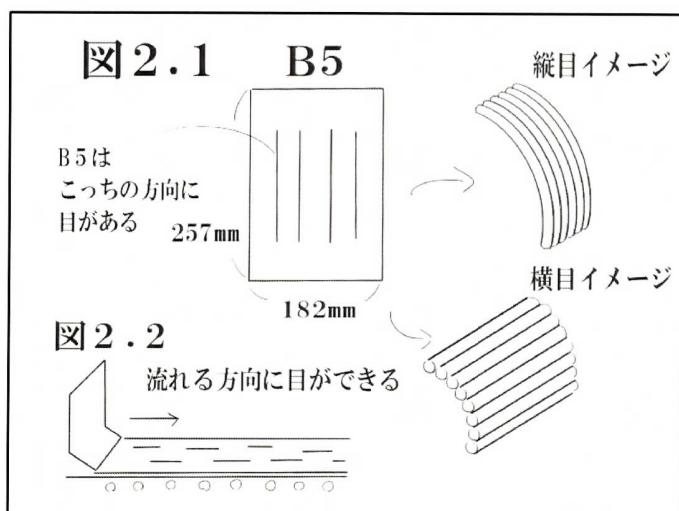


四つの (x / b, y) のグラフを重ねたのが横のグラフである。

四つのグラフがきれいに重なっていて、傾きも点の間隔も変わっていない。

6、考察

- ・グラフA-1から、長辺の方のデータが短辺の方よりしなっていることがわかる。
- ・グラフA-2から、紙を垂らした時、横方向への紙の長さを元の長さに比べた割合と、下方向への長さが比例することがわかる。
- ・そして、グラフBの四つのデータが重なっていることからa辺の長さを変えても、 $(x/b, y)$ グラフの傾き、点の間隔は変化しないことが、つまりしなりやすさが変わらないことがわかる。
- ・このことから、実験Aの結果は縦目と横目の差によるもので、横目の方がしなりやすいと結論づけられる。



縦目・横目とは

紙を作る際には図2,2のようにパルプの纖維を流すので、このときに流れる方向に沿って纖維が並ぶので目ができる。

B5サイズのコピー用紙では目は縦長に置いたときに縦に入っている。(図2.1)

実験に使った紙も同じ種類の紙を千切ったりして同じように目が入っていることを確認した。

前回の実験ではa辺をB5の短辺だと縦目、長辺だと横目で垂らしたことになる。

7、まとめ

- ・紙が自重で垂れる時、a辺の長さを変えても端座標は変わらない。
- ・紙が自重で垂れる時、横方向への紙の長さを元の長さに比べた割合と、下方向への長さは比例する。つまり、

$$k(x/b - 1) = y$$

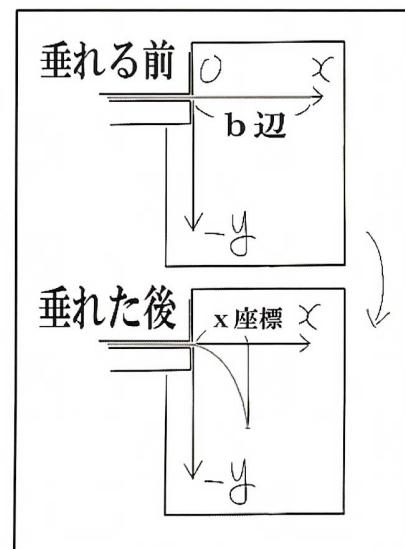
(k はグラフA-2の傾き) となる。

- ・縦目より横目の方がしなりやすく、 k の値でみたとき約1.5倍の違いがある。

x/b の値とは→

紙を垂らした際に横方向への長さがもとの何倍になったかの値。

8、湿度について(旧)

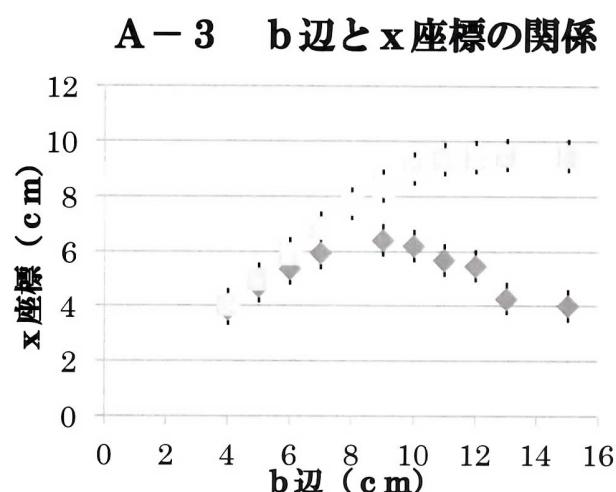


この実験Aは湿度71%、実験Bは湿度58%だった。湿度が曲がり方にどう影響するのかも実験してみたい。

今回やったこと

前回、 $k(x/b - 1) = y$ (k はグラフA-2の傾き) という仮説を立てた。

しかしこれはxが分からないとyが分からない。できれば、条件から結果を導き出したい。そこで、前のデータでbとxの関係をグラフにしてみると、このようになる。



A-1の縦横を入れ替えたような感じになる。

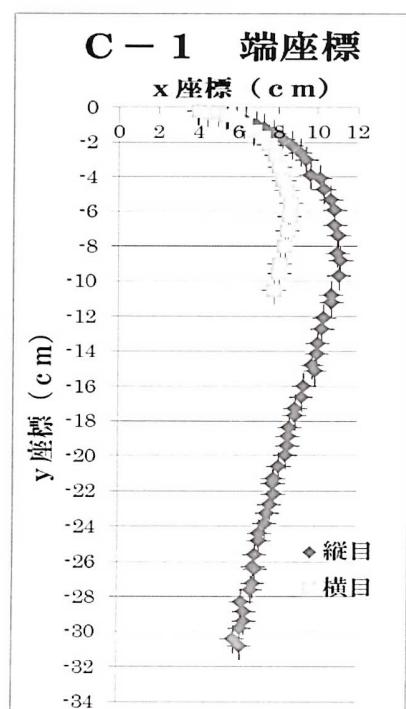
原点に近いところはほとんど曲がっていないので $x = b$ の直線に近いはず。

何か見えるような気もするが、データが少なく、荒いためよくわからない。

そこで今回はB4版のコピー用紙を使いb辺を33cmまで取った。 →実験C

また実験Cの $b = 30$ の時のデータを細かく見ることで、紙が垂れている時に形成される曲線についても考えてみた。 →実験C'

そして前回実験用紙は部室内の折れ目などのないコピー用紙だったのだが、日本製紙のリボンフレンドリーという製品名の紙に統一した。



9. 実験C

実験手順

B4版のコピー用紙の短辺を10cmに切りa辺として、b辺を4~33cmの間で0.5cm間隔で増やしながら端座標をそれぞれ記録した。

また比較用としてA4版のコピー用紙で横目のデータを4~13.5cmで同じく、0.5cm間隔で端座標を記録したが、こちらはa辺はそのままa4の長辺で行った。

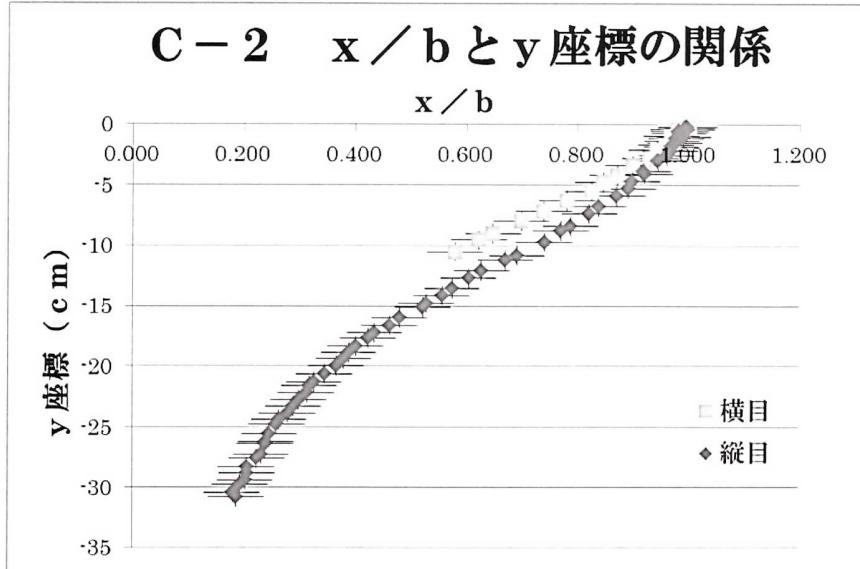
実験結果C-1

見やすさの関係でABの方と縦目横目のマークが逆になっている。

縦目のデータのxが減少していくところが新たに取れた。

下の方では x 座標の減少が緩やかになり、線が反っている。
 (エラーデータは縦目 b = 5 の一つで、写真から確認できたので除外した)

実験結果 C - 2



実験 A と同じように横軸を x / b で取ったグラフ。

今回取れたデータから直線ではなく、うねりのある曲線だったとわかる。

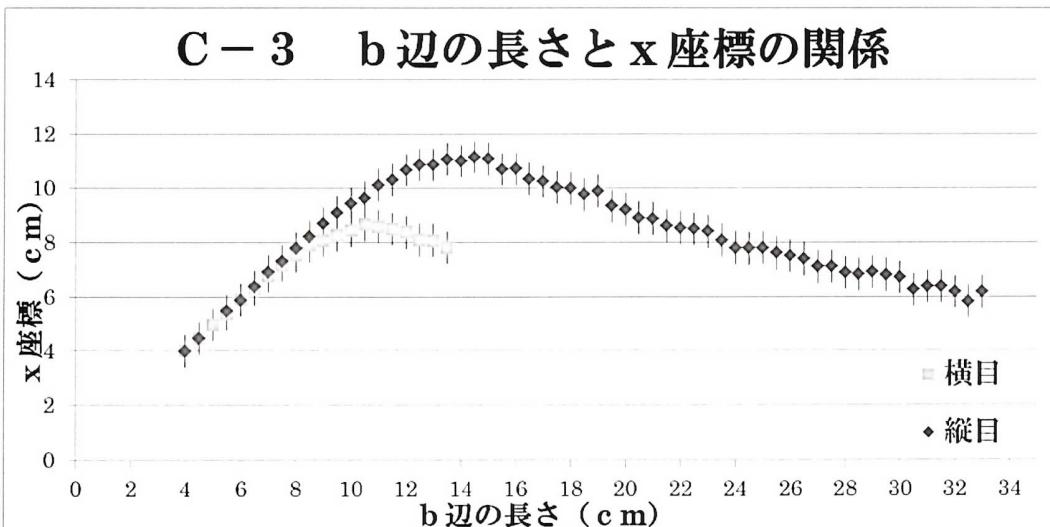
真ん中の方は直線に近似しているが次第に x / b の減少量が減っていき、y 軸に接触しそうにない。

また $x / b = 1$ に近いところも少し曲がっているが、真ん中のかすかな

曲がり具合を考えると 3 つの要素から構成されているのではなくて、連続した曲線だと思われる。

また、 x / b と y / b もグラフにしてみたが円よりは少し縦につぶれていた。縦目と横目の違いも分かりにくく多分参考にはならない。

実験結果 C - 3

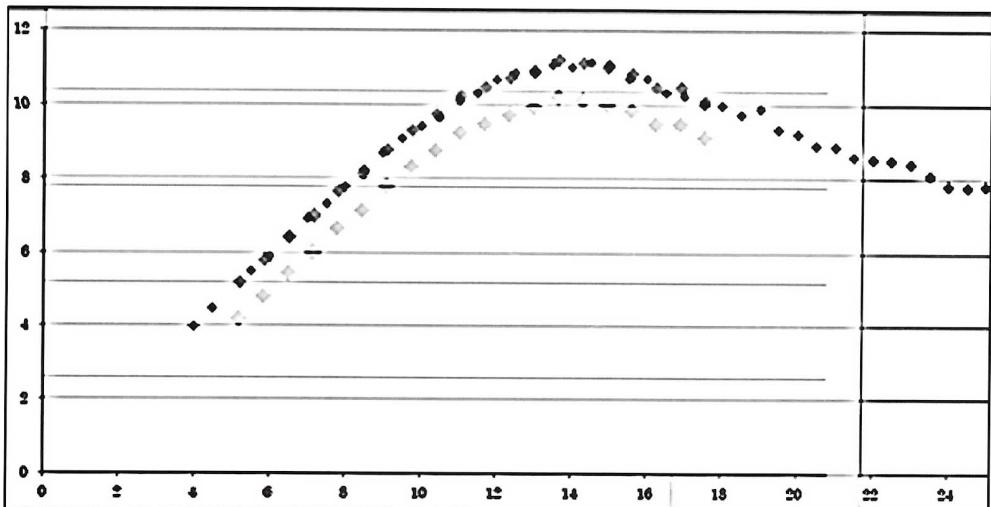


気を取り直して b と x のグラフを見てみると、

データが細かくなつたことではっきりとした曲線になった。

$x = b$ の直線から増加量が減っていき、-になるが減少量も次第に減っていき、傾きが緩やかになっている。

横目の方は曲がり始めが縦目に比べて早い。



左は横目のデータを原点を基準に縦横同じ倍率で拡大したものを縦目のデータと重ねてみたものである。
(下はずらしてみた横目のデータ)

横目のデータが短いので確実ではないものの、データがある部分はかなり重なっているように見える。

10、考察C

- ・データが長く細かくなつたことによりはっきりとした曲線になり読み取りやすくなつた。
- ・ x/b とyで見たとき紙は、最初はある程度まで垂れず、比例に似た部分を経た後、徐々に曲がりにくくなつていく。また、この変化は連続した曲線で表される。
- ・グラフC-2が比例ではなくうねりのある曲線だったので、前回立てた

仮説「 $k(x/b - 1) = y$ 」が間違つていたことがわかつた。

- ・グラフC-3の縦目と横目のデータが拡大、縮小して一致しているとすると、この「へ」の字型はどのような物体でも同じ形になつて、その大きさが曲がりやすさと関係していると推測できる。

11、実験C'

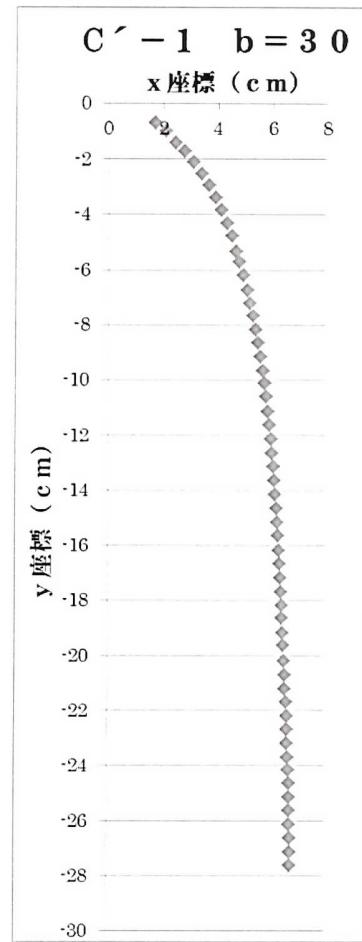
実験A、Cではb辺を変化させた時の変化を調べているが、C'では紙が自重で垂れている時に形成される曲線を、資料を参考にしつつどのようなものか考えていく。
(微積とかができないので、非常に大雑把かつずさんなものになつてゐる)

実験手順

実験Cの横目 $b = 30$ で垂らした時の写真から実験用紙につけた5mm間隔の印のそれぞれの座標を読み取り、記録した。

撮影の関係上0.5~1.5もデータが読み取れなかつた。また誤差は両方±0.2でグラフ点の下に隠れている。

実験結果 C' - 1



このような曲線になった。

n次関数よりは最初の曲がり方に比べ最後の方の傾きの激しい。

何人かの先生方から端を固定して垂らすという観点から懸垂線に近いのではないかという助言をいただいた。

懸垂線とは

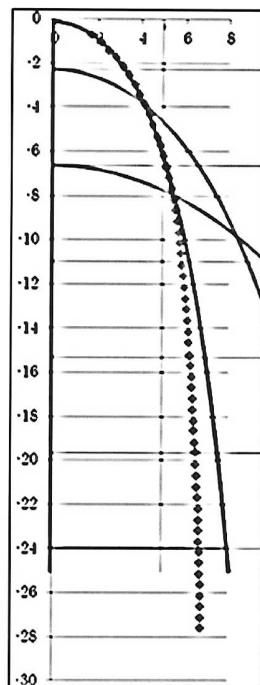
カテナリーとも呼ばれるもので、糸や電線など両端を固定した線が形成する曲線である。

自重と張力をなんやかんや微分すると双曲線関数 \cosh 、 $e^x + e^{-x}$ ぽくなるらしい。

半分、上下逆にして重ねてみると右のようになるが、実験データの方が傾きが急になっていて違うものだとわかる。

原点に近いところはかなり重なって見えるが、関係があるのかはわからない。

懸垂線は線を持ち上げているのは両端からの張力だが、実験データの方は物体が歪んだ時に生まれる応力であると考えられる。



応力とは

わからん。←結論。どこの資料あさってもわかる言葉で書いてくれてなかった。

△S、テンソル、断面二次モーメント、F/x?さん…。すいません。どなたですか?
というわけで完全に知らないことを考え始めました。

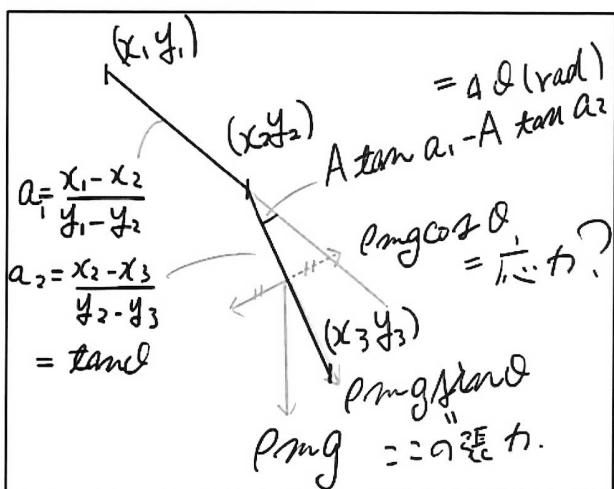
(わかる人にはわかる危険性。ここからは9割がた困惑と錯乱。二度目のてきと一宣言)

(つまり読む価値なし)

多分、歪んで出るんだからバネ的な力。歪みはデータの傾きの変位しかない気がする。
資料に『常に垂直ではない』とか見えるけれど曲線の垂直方向にはたらくものと仮定する。(願望)

角度と応力だけではなく張力が関わってくるはず。こいつが多分ネックになる。だって計算方法わかんないんだもん。とりあえず下の分の重量を足していく。

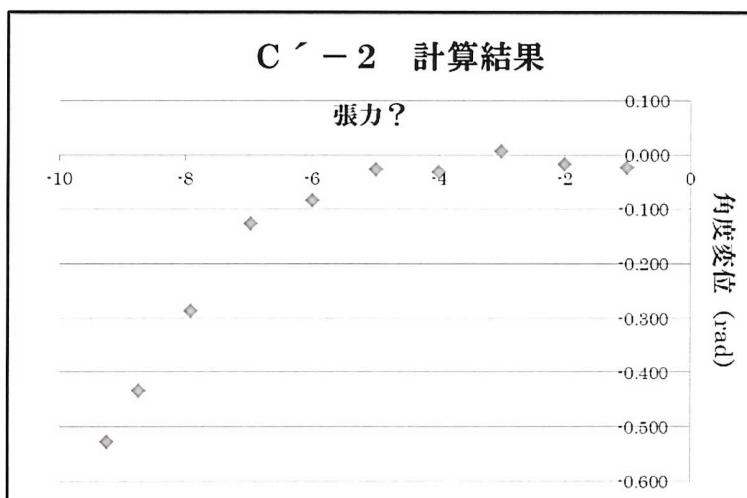
線密度とかは一定だから省いてもいいはず。



左の図のように考える。曲線を部分に分けるとそれぞれ静止しているはず。水平方向が張力、垂直方向が応力と釣り合うはず。

応力は角度変位と何らかの関係があるはずなので張力？ ($\sin \theta$ を単純に足しただけ) と比べてみる。

計算のためグラフの点を 3 cm 間隔 10 個にしたが、それって誤差の関係じゃなくて式が汎用できただけじゃないの？



計算結果 C' - 2

C' - 1 でいう下から上の順に原点から並んでいる。

バネっぽいというなら二次関数にならなきゃいけないんだけど。

なんじゃこりや。

数値いじくってよくわからないものがいたら、方法が間違っていた事しかわからないです。

これ見て誤差考えたくなる？

考察 C'

- 懸垂線ではなかった。応力が関係しているはず。
- 2 は出直して済むレベルではない気がする。とりあえず資料を少しは理解したい。
- できとーが過ぎた。張力足すところに角度かませたり、計算方法ましにしてみる。

12、全体のまとめ

- データが長く細かくなつことによりはつきりとした曲線になり読み取りやすくなつた。
- 前回立てた仮説 $f(x/b - 1) = y$ は間違つていた。
- 垂らす紙の幅 (b 辺) と横方向への長さ (x 座標) のグラフが縦目と横目のデータが相似であれば、グラフを $f(b) = x$ とした時、
 $f(kb) = kx$ が成り立つ。 $(k$ はしなりやすさの定数)
- 紙がしなる時に形成される曲線は懸垂線ではなかつた。
- 応力からその曲線を考えるのは課題が多い。

13、実験用紙について

今回は実験用紙を統一したわけだが、下の品質規格書、特に「クラークこわさ」の数値が手軽に調べられたのがこれしかなかったので日本製紙のリボンフレンドリーというコピー用紙にした。

| リボンフレンドリー 品質規格書 | | | |
|-------------------|----------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 項目 | | 規格値 | 試験規格 |
| 坪量 | g/m ² | 64 ± 5 | JIS P 8124 |
| 厚さ | μm | 89 ± 3 | JIS P 8118(100kPa) |
| 平滑度 表 裏 | sec | 15 ≤ | JIS P 8155(王研) もしくは JIS P 8119(ベック) |
| | | 15 ≤ | |
| 透気抵抗度 | sec | 10 ≤ | JIS P 8117 |
| クラークこわさ 縦 横 | cm ³ /100 | 60 ≤ | JIS P 8143 |
| | | 25 ≤ | |
| ペン書きサイズ度 | | 4 ≤ | J.TAPPI No12 |
| ISO白色度 | % | 81.0 ± 3.0 | JIS P 8148 |
| 表面抵抗率 | Ω / □ | 1 × 10 ¹¹ ~ 5 × 10 ¹² | |
| 古紙パルプ配合率 | % | 20 ± 5 | |

注) 試験環境は温度23±1°C、湿度(50±2)%r.h. (JIS P 8111)
本規格値については、品質の維持・向上のため変更することがあります。変更時には、webにて掲載いたします。
各個々の測定方法は該当JIS・J.TAPPIに準じます。

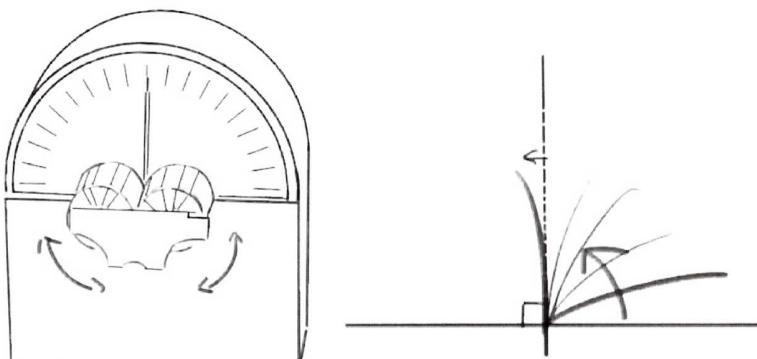
紙の特に薄いコピー用紙はクラークこわさ (JIS P 8143) というものが基準らしく、
独特な試験方法がある。

図の左にあるのが試験機で、
二つのロールで紙を挟む。

二つのロールごと左右に回転
でき、水平の状態から紙を垂直
までゆっくり起こす。

そして、図の右のように逆側
に振れる紙の一番短い長さを測
る。長いと無理なのは想像に難
くない。

そして、長さ (cm) を3乗して100で割る。 (ナンデ1000ジャナイノ)



湿度について

紙を扱う試験環境は規格があり、実験用紙は23°C相対湿度50%で長時間置いたもの
を使うらしい。

また、一度湿度の高いところに置くと湿度を下げても同じ性質にならないので、注意が
必要とのこと。

暗室でも高温高湿室化しないと無理なので考えどころ。

14、今後の課題

- ・C-2のデータが本当に相似なのか確かめたい。（A3の短辺が297mm）
- ・考えている実験としては紙を出すところの角度を変えてデータを取ること装置が出来次第やる。クラークこわさのため。
- ・データの精度と紙の長さは十分あると思う。でも変な曲線出てきたときに困るし、資料でもネックになっているので微積勉強してみたい。
- ・クラークこわさ用の実験装置は今のと別に小さいのを作ってはみたい。
- ・薄い板の端に重りをつけて垂らす実験の計算式が資料にあったので試してみたい。

今回も締め切り間近で編集が雑なところ（図番号欠如とか）があります。お許しください。

15、参考文献

これから参考にしそうなものを含む。この他にもあと何冊かあるはず。

生井澤寛『物理のキーポイント4 キーポイント連続体力学』岩波書店 1999年
大籠幸治、江前敏晴、尾鍋史彦『塗工紙の曲げこわさの評価法と制御』

東京大学大学院農学生命科科学研究科生物材料科学専攻 1997年
後藤憲一、山本邦夫、神吉健『詳解 力学演習』

共立出版 1971年 224~229頁

E.ハイラー、G.ヴァンナー（蟹江幸博訳）『解析教程 上』

丸善出版 2012年 158~173頁

前野昌弘『ヴィジュアルガイド 物理数学 —1変数の微積分と常微分方程式—』

東京図書 2016年 162~167頁

『印刷と用紙 2005』紙業タイムス社 2005年

304~317頁

『紙の文化事典』朝倉書店 2006年

510~530頁

『リボンフレンドリー 品質規格書』 日本製紙株式会社

www.nipponpapergroup.com/products/information/mt_pdf/170101rbfn.pdf

（最終閲覧 2018年1月31日）

『公式集 — 断面性能（面積・断面係数・断面二次モーメント・断面二次半径）』

設計ハンドブック

www.geocities.jp/iamvocu/Technology/kousiki/kousikidanmen.htm

（最終閲覧 2018年1月31日）

タイヤの横滑り時の摩擦力

この論文は、JSEC2017に提出したものです。

ただし、注釈¹←こんなやつは全て記念祭原稿にするときに追加したものです。

注釈を追加した理由は、提出後に判明した論文の問題点に対応するためです。

私立武蔵高等学校

研究者 高2 藤本 樹（代表）

高2 藤崎 混

1.研究目的

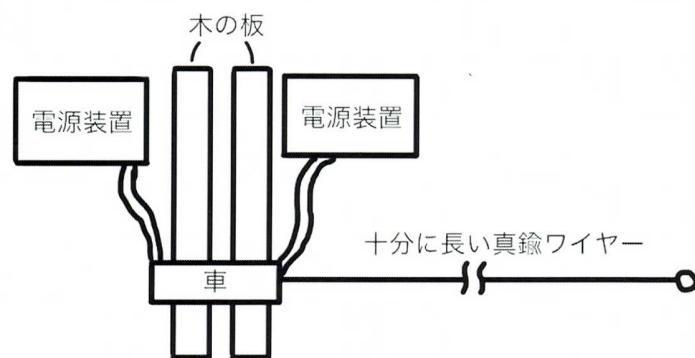
車のタイヤが横滑りしている状態において働く摩擦力について、何か特有の性質を持ち、動摩擦力とは区別されるものなのではないかと考え研究するに至った。類似した先行研究として横滑り角の研究があるが、横滑りに関する摩擦力を研究している例は少なく、その点でこの研究は独自性がある。研究目的はタイヤ横滑り時の摩擦力の特徴を調べ、その実態を突き止めることである。

2.研究方法

○測定原理：横滑り時の摩擦力の大きさを次のように定義した。

「タイヤが空転しながら一定速度で横滑りしているときに、その横滑りを妨げる方向に働く方向に働く摩擦力」

○実験装置：装置図（図1）、装置写真（図2）、車の拡大写真（図3）



(図1 装置図)



(図2、図3 装置写真 ワイヤーの端は写っていない。)

タイヤはブーリーを重ねて画用紙を巻くことで作った。金属ワイヤの長さを十分な長さとした点に関して、円周の一部を直線と近似するためである。電源装置を2つ用いた点に関して、モーターの個体差などを考慮し、前輪と後輪をそれぞれ速度を合わせるためにある。

○実験方法

-準備-

- i . 装置を用意する (図 1~3)。
- ii . タイヤの目印を見ながらストロボを用いて、タイヤの回転速度を合わせる。この操作に関して、車体の質量など条件の変化により、回転速度も変化するため条件を変えるごとに合わせなおした。
- iii . タイヤを回転させ、タイヤ回転方向に対して左右の方向に車が動かない位置に印を付け測定するタイミングの基準とする。これは測定点においてワイヤーの張力が横滑り時の摩擦力の一部として誤測定されるのを防ぐためである。

-測定-

- iv . タイヤを回転させ、車をばね秤を用いて、一定の速度で横滑りさせる。
一定の速度とした理由に関して横滑り時の摩擦力とばね秤の張力とをつり合わせるためである。
- v . 測定点においてのばね秤の値を測定値として記録する。これを 12 回くり返す。なお、1 つの条件で得られた 12 回の結果のうち、最大・最小を除いた 10 個分を分析に使用した。

実験は上の手順で 2 種類行った。

・実験 A : 垂直抗力と横滑り時の摩擦力の大きさの関係を調べる実験

(タイヤの回転速度 : 1.5 回転/s)

垂直抗力は車の重さと等しくなるため、車に錘を載せてその大きさを変化させた。

・実験 B : タイヤの回転速度と横滑り時の摩擦力の大きさの関係を調べる実験

(車の質量 : 1604g)

タイヤの回転速度を変化させた。

※全実験統一のパラメータ : 紐の長さ…7.82m 車を引く早さ…3.0cm/s 車輪半径…2.5cm

3.結果

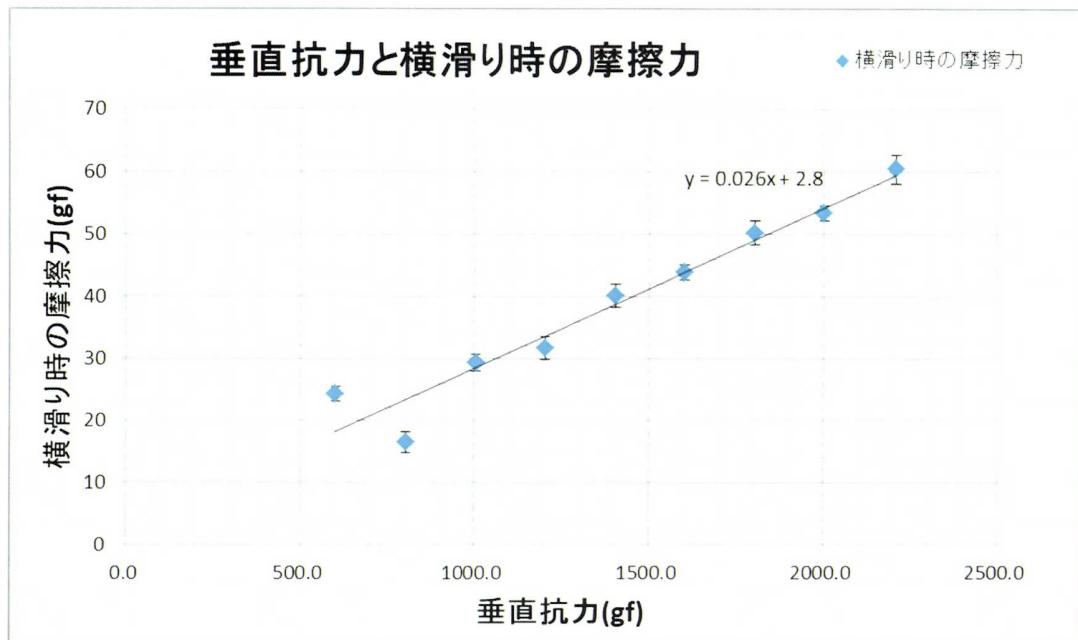
実験 A の結果が表 1 である。

| 垂直抗力(単位:gf)→ 回数↓ | 601.0 | 803.0 | 1004 | 1202 | 1404 | 1602 | 1803 | 2002 | 2208 |
|---------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 26 | 15 | 28 | 31 | 37 | 44 | 49 | 52 | 60 |
| 2 | 24 | 13 | 29 | 28 | 39 | 42 | 47 | 53 | 58 |
| 3 | 23 | 16 | 28 | 33 | 39 | 43 | 50 | 51 | 60 |
| 4 | 25 | 17 | 29 | 32 | 41 | 43 | 50 | 53 | 58 |
| 5 | 23 | 18 | 30 | 31 | 38 | 45 | 49 | 53 | 63 |
| 6 | 23 | 16 | 30 | 30 | 39 | 46 | 49 | 54 | 57 |
| 7 | 25 | 17 | 31 | 31 | 41 | 43 | 49 | 55 | 63 |
| 8 | 24 | 19 | 32 | 33 | 43 | 44 | 53 | 55 | 64 |
| 9 | 26 | 18 | 28 | 35 | 42 | 44 | 53 | 53 | 60 |
| 10 | 23 | 15 | 28 | 33 | 42 | 45 | 53 | 54 | 61 |
| 平均値 | 24 | 16 | 29 | 32 | 40 | 44 | 50 | 53 | 60 |
| 標準偏差 | 1.2 | 1.7 | 1.3 | 1.8 | 1.9 | 1.1 | 2.0 | 1.2 | 2.2 |

引っ張る速さ:3.0cm/s
タイヤの回転速度:1.50回転/s
結果の単位:gf

(表 1: 垂直抗力と横滑り時の摩擦力の関係性を調べる実験の結果)

これについて、横軸に垂直抗力、縦軸に横滑り時の摩擦力をとてグラフ化したものがグラフ 1 である。



(グラフ 1: 垂直抗力と横滑り時の摩擦力の関係を調べる実験の分析グラフ1)

このグラフから、垂直抗力が大きくなると、横滑り時の摩擦力も増加する傾向にあることがわかる。また、その変化の仕方は直線としてみることができ、その傾きは 0.026 である。切片を小さい物として無視すれば、横滑り時の摩擦力は垂直抗力に比例すると言える。

比較用に測定した動摩擦力の測定結果が表 2 である。

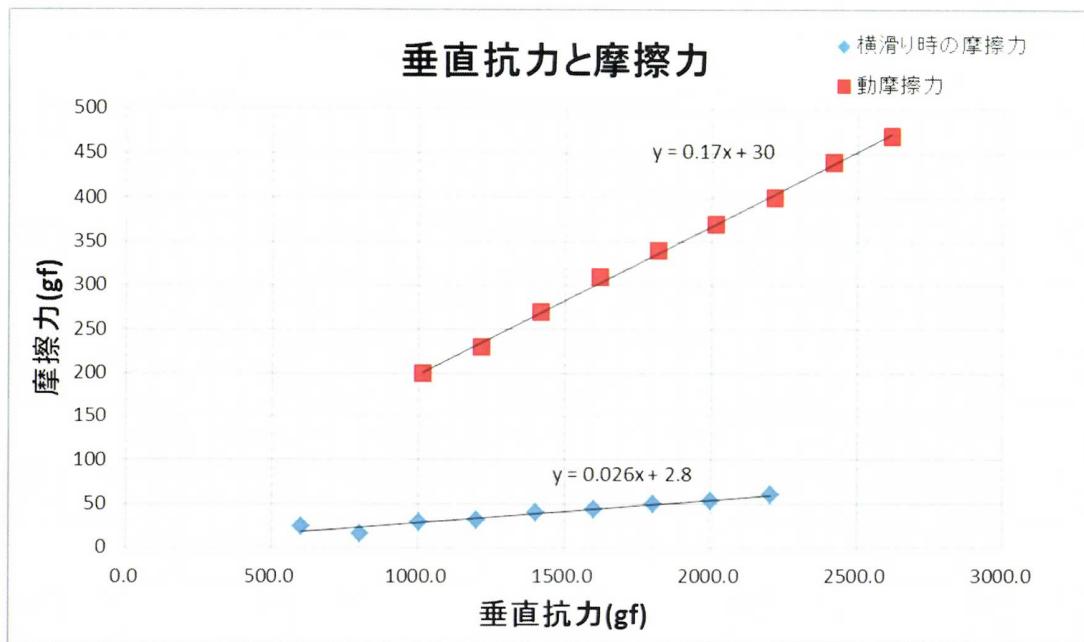
| 垂直抗力(単位:gf)→ 回数↓ | 1015 | 1216 | 1417 | 1618 | 1818 | 2017 | 2219 | 2419 | 2618 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 20 | 23 | 27 | 31 | 34 | 37 | 40 | 44 | 47 |
| 2 | 20 | 23 | 27 | 31 | 34 | 37 | 41 | 44 | 47 |
| 3 | 20 | 23 | 27 | 31 | 34 | 37 | 40 | 44 | 47 |
| 4 | 20 | 24 | 27 | 31 | 35 | 37 | 41 | 43 | 47 |
| 5 | 21 | 23 | 27 | 31 | 34 | 38 | 40 | 44 | 48 |
| 6 | 20 | 24 | 28 | 31 | 35 | 37 | 40 | 43 | 47 |
| 7 | 20 | 23 | 27 | 31 | 34 | 37 | 41 | 43 | 47 |
| 8 | 20 | 23 | 28 | 31 | 34 | 37 | 40 | 43 | 48 |
| 9 | 21 | 23 | 28 | 31 | 35 | 37 | 40 | 44 | 47 |
| 10 | 20 | 23 | 27 | 31 | 34 | 37 | 41 | 44 | 47 |
| 平均値 | 20 | 23 | 27 | 31 | 34 | 37 | 40 | 44 | 47 |
| 標準偏差 | 0.40 | 0.40 | 0.46 | 0.00 | 0.46 | 0.30 | 0.49 | 0.49 | 0.40 |

結果の単位:10gf

(表 2: 垂直抗力と動摩擦力の関係性を調べる実験の結果)

また、先程のグラフ 1 に動摩擦力のデータも載せたものがグラフ 2 である。

¹ 本来は、回帰直線は実験した定義域の外まで引くべきであった。以下他のグラフも同様。



(グラフ 2:垂直抗力と横滑り時の摩擦力、動摩擦力の関係を調べる実験の分析グラフ)

一般に、動摩擦力は垂直抗力に比例すると言われているが、今回の実験でもそれが確認できた。すなわち、横滑り時の摩擦力と動摩擦力は垂直抗力に対し共に比例の関係を持つという点で共通している。また、横滑り時の摩擦力は動摩擦力に比べてとても小さいことがわかる。

実験 B の結果が表 3 である。

| 回転速度(単位:/s)→ 回数↓ | 0.60 | 0.80 | 1.00 | 1.20 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 76 | 61 | 53 | 46 | 43 | 36 | 25 | 34 |
| 2 | 82 | 61 | 55 | 40 | 38 | 44 | 33 | 35 |
| 3 | 76 | 60 | 48 | 44 | 38 | 37 | 29 | 30 |
| 4 | 80 | 59 | 49 | 49 | 38 | 36 | 34 | 35 |
| 5 | 80 | 64 | 54 | 45 | 34 | 36 | 34 | 34 |
| 6 | 82 | 62 | 53 | 49 | 38 | 37 | 34 | 33 |
| 7 | 84 | 59 | 49 | 44 | 39 | 38 | 31 | 34 |
| 8 | 82 | 61 | 51 | 49 | 34 | 37 | 29 | 33 |
| 9 | 84 | 60 | 56 | 46 | 37 | 39 | 32 | 33 |
| 10 | 82 | 57 | 53 | 50 | 40 | 39 | 30 | 31 |
| 平均値 | 81 | 60 | 52 | 46 | 38 | 33 | 31 | 33 |
| 標準偏差 | 2.7 | 1.8 | 2.6 | 3.0 | 2.5 | 2.3 | 2.8 | 1.5 |

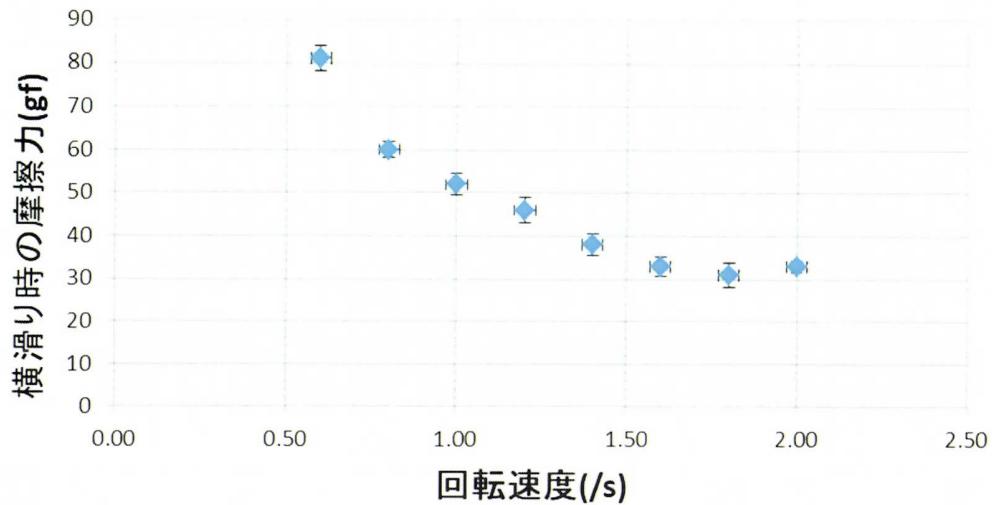
引っ張る速さ:3.0cm/s
垂直抗力:1600gf
結果の単位:gf

(表 3:タイヤの回転速度と横滑り時の摩擦力の関係性を調べる実験の結果)

このデータについて、横軸を回転速度、縦軸を横滑り時の摩擦力としてグラフ化したものがグラフ 3 である。簡易的な誤差検証実験（ストロボを用いて回転速度を合わせたあと、スロー撮影を用いて実際の回転速度を検証）から測定された回転速度設定の誤差（横軸方向の誤差）は 0.03 (/s) である。

回転速度と横滑り時の摩擦力

◆ 横滑り時の摩擦力

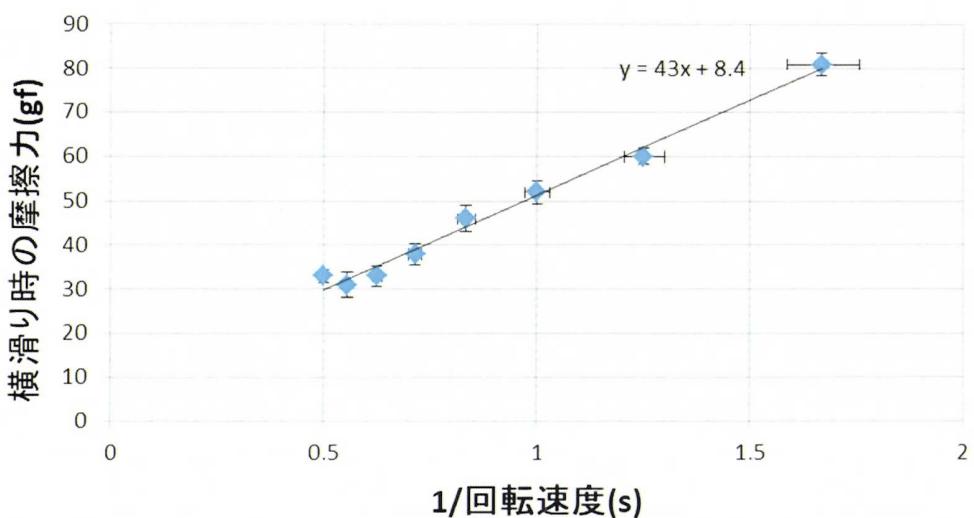


(グラフ 3:回転速度と横滑り時の摩擦力の関係を調べる実験の分析グラフ)

回転速度が速くなるほど横滑り時の摩擦力は減少する傾向が見られる。これが反比例のグラフであるか確かめるため、横軸を回転速度の逆数にした物がグラフ 4 である。

回転速度と横滑り時の摩擦力

◆ 横滑り時の摩擦力



(グラフ 4:回転速度の逆数と横滑り時の摩擦力の関係グラフ)

横滑り時の摩擦力は回転速度の逆数に対し比例傾向を示す。そのため、グラフ 3 は反比例のグラフであるとわかる。すなわち、横滑り時の摩擦力は回転速度に反比例する。

4. 考察

得られた結果から、横滑り時の摩擦力について以下のようにになっているのではないかという考察に至った。結論から述べると、「横滑り時の摩擦力の正体は動摩擦力を分解した一部である」ということである。

詳細な説明は以下のようになる。まず、タイヤのある一点と床のある一点の相対速度を考える。このとき、タイヤと床の間に動きを生む要因としてはタイヤの回転と実験者が車を引っ張ることの二つがある。タイヤの回転による速度はタイヤの周の長さ ($2\pi r$ とする) と回転速度 (v_r とする²) の積で表される。この大きさを v_x とおく。また、実験者が引っ張ることによる速度の大きさを v_y とする。またそれらの合成速度と、タイヤの回転による速度がなす角を θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) とする。この合成速度 (大きさを v とする) がタイヤと床の間の相対速度になる (図 4)。

次に、この相対速度に対して発生する動摩擦力について考える。動摩擦力は物体が滑って運動しているのを妨げるよう働く力であるので、この相対速度に対し正反対の向きに働く。また、その大きさは垂直抗力 (N とする) と動摩擦係数 (μ' とする) によって決まり、すべりの相対速度 v の大きさによらない。この動摩擦力の大きさを F' とする。ここで、この動摩擦力を、実験者が引っ張った方向の正反対方向と、その垂直方向に分解する。そのうち、実験者が引っ張った方向の正反対方向の成分の大きさを $F'_{y'}$ とすると、これが横滑り時の摩擦力の大きさとして検出されたものなのではないかということだ (図 5)。

これを数式化すると次のようになる。

$$F'_{y'} = F' \sin \theta \quad (\text{ただし, } \tan \theta = \frac{v_y}{v_x})$$

また、 F' と v_x について、それぞれ $\mu'N$ と $2\pi rv_r$ に置き換えると、次のようになる。

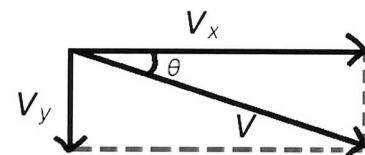
$$F'_{y'} = \mu'N \sin \theta \quad (\text{ただし, } \tan \theta = \frac{v_y}{2\pi rv_r})$$

ここで今回の実験において、実際に $\tan \theta = \frac{v_y}{2\pi rv_r}$ を計算してみると、最も大きい場合 (回転速度が 0.6/s、引っ張る速さが 3.0cm/s のとき) でも 0.32 であり、またこのとき $\sin \theta$ は 0.30 程度である。すなわち $\sin \theta$ と $\tan \theta$ の差は常に 0.02 以下であり、これを十分に小さいとみて $\tan \theta \approx \sin \theta$ として近似する。先程の式の $\sin \theta$ に $\tan \theta = \frac{v_y}{2\pi rv_r}$ を代入すると、

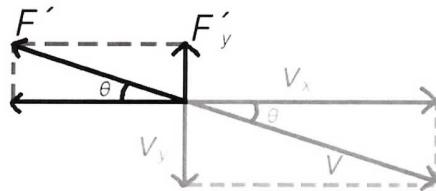
$$F'_{y'} = \mu'N \times \frac{v_y}{2\pi rv_r}$$

² 実はここに致命的な間違いがあった。回転速度は角速度なので文字は ω を使うべきであったのだ。この後出てくる式が一見すると次元が合わない式になってしまい、発表の時に混乱を招いてしまった。

³ この図のベクトルについて、右下の色が薄い 3 本が速度、左上の濃い 3 本が力である。白黒印刷になる都合上かなりわかりづらくなってしまうことをお許しいただきたい。



(図 4 考察 : 2 つの速度の合成)



(図 5 考察 : 横滑り時の摩擦力の正体³)

となる。これは、横滑り時の摩擦力が垂直抗力に比例すること、回転速度に反比例することを示しており、実験結果を説明可能である。

この考察に基づけば、 $\frac{\text{横滑り時の摩擦係数}}{\text{動摩擦係数}} = \frac{v_y}{2\pi r v_r}$ となるはずである。計算すると、垂直抗力との関係を調べる実験において、

$$\frac{\text{横滑り時の摩擦係数}}{\text{動摩擦係数}} = 0.15$$

$$\frac{v_y}{2\pi r v_r} = 0.13$$

となっている。

また、 $F'_y = \mu' N \times \frac{v_y}{2\pi r v_r}$ の式は F'_y は v_r に反比例することを示しているが、この時の比例係数は $\frac{\mu' N v_y}{2\pi r}$ である。

グラフから求められる実際の比例係数と計算値 $\frac{\mu' N v_y}{2\pi r}$ の比較を行う。回転速度を逆数にしたグラフから比例係数を求める

$$F'_y \times v_r = 43$$

となる。一方、 $\frac{\mu' N v_y}{2\pi r}$ については

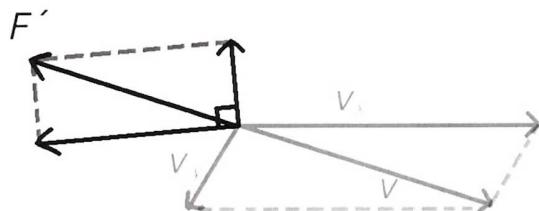
$$\frac{\mu' N v_y}{2\pi r} = 52$$

となる。なお、これらの 0.15 と 0.13、43 と 52 の差を大きいと見るべきか小さいと見るべきかは現時点ではわからない。

仮に $F'_y = \mu' N \times \frac{v_y}{2\pi r v_r}$ が成立する場合、以下のようなことが予想される。

- ・横滑り時の摩擦力は $2\pi r$ 、すなわちタイヤの半径に反比例する。
- ・横滑り時の摩擦力は v_y 、すなわち横滑りの速さに比例する。

また、タイヤの回転と横滑りの合成速度に対しての動摩擦力を分解する、という発想は、車の進行方向に対し真横方向のみでなく、任意の方向への横滑りにおける摩擦力の任意の方向の成分を取り出せる、ということを示唆している(図 6)。



(図 6 考察：合成・分解の考え方の応用例

5.結論と今後

結論は以下の通りである。

- ・横滑り時の摩擦力は垂直抗力に比例する
- ・横滑り時の摩擦力は回転速度に反比例する

- ・動摩擦力を μ' 、垂直抗力を N 、横滑りの速さを v_y 、タイヤの半径を r 、タイヤの回転速度を v_r とすると、横滑り時の摩擦力 F'_y について

$$F'_y = \mu' N \times \frac{v_y}{2\pi r v_r}$$

と表されると考えられる。

今後の課題は以下の通りである。

- ・考察で予想した 2 つの性質、すなわち横滑り時の摩擦力は横滑りの速さに比例すること、タイヤの半径に反比例することについての検証実験を行う。
- ・タイヤが空回りしている状態からではなく、地面としっかりとグリップして回転している状態から横滑りを開始させる条件を調べる。
- ・実際の車における問題への応用を考える。具体的には、ドライビングテクニックとしてのドリフトへの応用や、スリップ事故の防止への活用などが考えられる。

6.謝辞

電源装置などの貸し出しで支援してくださった物理科の先生方および助手さん、そして、物理部その他理科系部活の部員およびOB、理科系の先生方、その他この研究にアドバイスを下さったすべての方々に感謝申し上げます。

7.参考文献

角田和雄 著 『とことんやさしい摩擦の本』 今日からモノ知りシリーズ 日刊工業新聞社 2006

高校生科学技術チャレンジ(JSEC)体験記

高3 藤本

元部長（もちよ）の藤本です。この間、僕らの研究「タイヤの横滑り時の摩擦力」で高校生科学技術チャレンジ（以下JSEC）に参加してきたので、そこであったことをあれこれ綴らせていただきます。「タイヤの横滑り時の摩擦力」についてはこの冊子のどこかに掲載してあるはずなのでそちらを参照してください。あと、この文章はあくまで体験記であって正式な報告書ではないのでご了承ください。書きたいことを書きたいままに書いていきます。

まずJSECについて軽く説明をさせていただきます。JSECは朝日新聞・テレビ朝日主催の科学・数学系自由研究コンテストです。読売新聞主催の日本学生科学賞のライバル的な感じかと思われます。伝統が長い日本学生科学賞に比べればJSECは後発の大会ですが、それでも日本学生科学賞と同じく上位者にはIntel ISEF（アメリカで開かれる国際大会）への道が用意されているなど、結構スゴイ大会です。JSECは数学分野も扱っているのが特徴的です。中学生の部がないのが中高一貫校生としては残念です。

なぜ今回JSECに参加したのかについては、正直なところ思いつきでした。発端はこんな一言だったと思います。

「せっかくだしなんかコンテスト出ようぜ？（。△。）」

こんなノリで始めてしまったものだから酷いですね。

しかしノリの勢いとはスゴイ物で、そう日が経たないうちにもう応募論文を書き始められました。が、不運にもこの思いつきは〆切のたったの一ヶ月前。しかも校内の自然科学系部活動合同発表会の準備の時期でもあったためとても苦労しました。ここで、先程述べた日本学生科学賞とJSECの二つのコンテストで迷いましたが、応募論文の形式が書きやすそうだった（そんな理由でいいのか…）JSECの方にしました。

そんなこんなで〆切ぎりぎりに論文が完成し、公式ホームページから応募しました。応募した後はもう部活を引退した気になって勉強に打ち込んでいました。論文を作っていた一ヶ月で某会の通信教育がたまってしまいましたので…。

ところがある日顧問の島崎先生から「どうやら予備審査を通過したらしい」とのメールが。さらに日が経ったあと、島崎先生から電話が飛んできたのです。「一次審査を通過して、どうやら最終審査に行く権利を得たらしい。行くか？」と。島崎先生から電話が飛んで

くるなんて今まで一度もなかつたのでびっくりしました。すぐに共同研究者の藤崎君に電話を飛ばし、出場意志を確認して先生に折り返し電話をしました。

ここからが大変でした、なにしろ物理部からのJSEC出場者が今までいなかつた（多分）ため、何をどうすれば良いのか分からなかつたのです。おまけに、運営からの各種資料もなかなか来ない。とりあえず公式ホームページを漁って去年の最終審査会の様子をしらべ、手探りで発表準備を進めるしかありませんでした。JSECの最終審査はポスター発表形式で行われる、ということまでは分かつたのですが使える発表ブースの大きさや発表時間がわからず苦労しました。昨年出場者の記念写真からブースの大きさを推定する、なんてこともしていました。後に運営からブースの資料が届きましたが、結構正確に予想できていました。まあとにかく、各種資料や記入して返送する書類が届くのが遅かったのはつらかったです…出場者アンケートに書いておいたので来年以降は改善されることを祈っています。

ポスター作りと発表練習を藤崎君と二人でちまちまと進めていましたが、やはり研究当事者だけでの作業では全くダメでした。試しに太陽観測部顧問の物理科・川端先生に見せてみましたがあまりにボロボロでした。しかしその時にもらえたたくさんの指摘のおかげで発表内容は大分向上し、本番数日前に物理科の先生四人（実際は皆優しいのになぜか雰囲気が結構怖い！）相手に最終練習を行ったときにはなかなかの好感触を得ることができました。

発表内容以外で苦労したことと言えば、ポスターをどう用意するかと、引率の先生探しでした。まずポスターについてなのですが、やはりポスター発表形式となるとA0やB0などいわゆる大判印刷が必要になります。しかし、学校では残念ながら印刷できない。仕方なく外注することにしましたが、やっぱり結構値段がかかってしまいました。（だいたい8000円！）しかも一度印刷してしまったら再注文でもしない限りあとから大幅な変更はできず、小さな修正をペンで加筆することしかできませんでした。

引率の先生探しも必要でした。というのも、最終選考会は期末試験期間の真っ最中で、先生達もとても忙しい期間だったのです。島崎先生一人に一日半の引率を全て押しつけるわけにもいかず、もう一人の顧問である大山先生と、組主任の中尾先生に助つ人で来てもらいました。

さてここからは最終審査会当日のお話。最終審査会は土曜日の午後と、日曜日の丸一日を使って、お台場の日本科学未来館で行われました。しかしその土曜日はまさに期末試験期間中。スーツ（武藏は制服がないので正式な場でに行くときはスーツを自前で用意しな

ければいけない！）で学校に行き、期末試験を受け、終わったらダッシュでお台場に行くという滅多にない経験をしました。30分でポスターの設営をし、開会式の後専門審査の時間となりました。この専門審査は、審査員の方々からそれぞれの研究に関わりの深い分野の先生が審査を行う、という時間です。15分×5コマ（ただし空きコマがあり実際は3~4コマ）の時間制審査と、時間制限のない自由審査があります。審査会前は複数人の審査員を同時に相手するのではと考えていましたが、基本的に一人ずつでした。

審査員の先生は皆さんとても優しくて安心しました。しかし、回数を重ねるたびにボロボロ見つかるポスターのミスが悔しかったです。その日は審査が終わり次第速やかに帰宅しました。

審査会二日目は朝8時15分集合というスケジュールのもと、いつもより早起きを強いられました。さらに山手線周辺が線路立ち入りにやられてしまっていて迂回に苦労しました。結果的に数分遅刻しましたが当たり前のように許して下さいました。審査二日目はまず総合審査から始まりました。総合審査は、発表時間などは一日目の専門審査と同じですが、専門外の審査員が見に来るほか、協賛企業の企業審査員も加わります。昨日と同じように一回に一人の審査員に対応すれば良いのだろうと思っていたら企業審査員のときは一度に4人ひとかたまりで來たので緊張感が苦しかったです。

総合審査が終わり、支給されたお弁当と昼休憩を楽しんだ後は一般公開とファイナリスト同士の発表会の時間となりました。ここでの発表はコンテストの結果に関係しません、おそらくこの時間の内に運営と審査員で協議して各賞を決めていたのでしょう。実はこの一般公開の時間で大きな不意打ちを食らうことになりました。というのも、審査と同じく15分間の発表をするのかと思いきや、一回の発表は4分という制限をつけられてしまったからです。これは事前に全く耳にしておらずとても苦しました。あとは、周りの研究のレベルの高さに驚きました。最先端の研究があまりに数多く並んでいた故に、自分たちがここにいていいのかと感じられるほどでした…中には教科書に新たに載るとの噂がある研究もありました。

一般公開の後はついに待ちわびた表彰式となりました。いくつかの挨拶の後次々と各賞の受賞者が発表されましたが、残念ながら特に高い賞を受賞するには至りませんでした。最終審査会に出場したよ、という優等賞止まりのため、順位としては30/174以上ということになります。「まあまあすごい」、ってくらいですかね…。思い返してみれば、審査の時に審査員の方々が口にしていた「この先に期待している」という言葉は優しいながらも、現時点での高評価は出来ないと言うことをにじませていたのが分かりました。

表彰式の後は、交流会という名前での立食パーティーでした。食べ物はとてもおいしかったです。そのときに窓の外をふと見たところに、遠くに車のドリフト場（？）があつてそこで車がリアルにドリフトをしているのを見ることができたのが印象的でした…なんとなく救われた気がしました。

最終審査会全体を通して、得るものはとても大きかった様に思えます。まずやはり大学の教授、それもかなりすごい教授の方々に発表を見てもらえて意見をもらえたのはとても大きいです。今後のこのテーマの研究に活かされるであろう指摘や、発表の仕方、ポスターの作り方に関する意見もたくさんもらいました。さらに、学校外での発表という経験は今後とても活かされることになると信じています。全国大会の厳しさを思い知ったのも、どこかで活かされると、いいな…

余談ですが、未来館への行き帰りに利用したゆりかもめから見る景色は、昼も夜もとても綺麗でしたよ。ゆりかもめは新交通と名乗るだけあって、高いところをタイヤで走る、基本自動運転、といった電車と比べてもモノレールと比べてもイレギュラーなところが多くとても興味深いです。綺麗な景色が見たい方も、交通に興味がある方も、是非一度乗ってみてはいかがでしょうか。

長くなってしまいましたね。最後に、研究に様々な意見・指導・指摘・応援をくれた部活の先輩後輩OBの方々とその他理科棟の仲間・先生方、発表準備・練習に付き合っていただいた理科棟の先生方（特に、2回も付き合っていただいたうえにたくさんの指導をして下さった川端先生）、JSECというすばらしい大会を用意して下さった関係者の方々、忙しい中引率教諭として付き合って下さった中尾先生と大山先生、そして、研究開始から発表までの全てをともに歩んでくれた島崎先生と藤崎君への、最大限の感謝を表明させていただきます。最後までこの文章にお付き合いいただきありがとうございました。

終わりに

中三 高橋 潤

「え一本日はお忙しい中、足をお運びいただきまして一」が常套句のような気がしますが、この御挨拶はなんて書きましょうか。どうも、中三の高橋と申します。

発表は如何でしたか？面白かったでしょうか？分かりにくかったかもしれませんね。発表だけでなく、小冊子の方も楽しんでいただけたと嬉しいです。

さて、今回の記念祭は現在僕らが使用している理科棟（旧理科棟）における最後の記念祭で次年度からは、此の度新設された理科・特別教室棟（新理科棟）を使用します。新理科棟は旧理科棟に比べて設備も内装も段違いで素晴らしい、何より綺麗です（笑）。

そんな旧理科棟、僕の入学当時には新進気鋭の若手に取って代わられることもなく、ただただ理科棟と呼ばれておりました。しかし、ものの一年もする内に、新しい棟をつくることになり、いつしか理科棟は新・旧をつけられていきました。以前、OBの方が物理部にいらした際に、この旧理科棟ができたての頃で勉強していたんだよ、とおっしゃったことを覚えています。僕は旧理科棟と二年程度しか一緒にいない新参者ですが、OB や先輩、教職員や清掃員の方々の思いはひとしおなのでしょうか。そんなことを知ってか知らずかなんなく、物理部の皆さんにもなにか気合いの入っているような、いないような、気がします。

やはり、何かの節目として思うところがあるのかもしれません。そんなデリケートな神経をしているとは（僕を含めて）思えませんが。どうでしょう（笑）。

いずれにせよ旧理科棟とはお別れになってしまいます。ですがご来場の皆様、是非、そんな旧理科棟を楽しんでいってください！そして物理部も！その際、物理部の御観覧とともに、展示の裏手にあります感想ノートに皆様の思いを寄せていくってください！部員一同、どのようなコメントが来るのか、密かに楽しみしております（笑）。

最後になりますが、物理部の発表、ならびに本冊子を最後まで御観覧頂きましたこと、厚く御礼申し上げます。

書名：第 96 回記念祭物理部小冊子
発行日：2018 年 4 月 29 日 発行
顧問：物理科 島崎亮浩教諭 大山輝雄教諭
編著者：2018 年度在籍 物理部員一同
発行元：武藏高等学校中学校 物理部

※乱丁落丁がございましたら、記念祭期間中かつ残部があればお取り替え致します。



(一路整然と並ぶ精密はかり達。物理科移転の手伝いにて)