

物理の原理をバーのウェイトレスに説明できないのであれば、
それはウェイトレスではなく、その原理に問題があるのだ。

アーネスト・ラザフォード

Vol.2 目次

輪ゴムの内部構造が伸びに与える影響について－高分子と架橋に注目して－

小野祐 3

水中を落下する物体の終端速度

小野祐 22

この部誌の作成に関わった部員の紹介

部員一同 44

終わりに～返歌

部員一同 45

輪ゴムの内部構造が伸びに与える影響について

—高分子と架橋に注目して—

小野祐

はじめに

本実験の目的は、輪ゴムにフックの法則が成り立つかどうか調べる、というものである。この実験は、昨年の物理チャレンジ実験課題として行った実験に、さらなる考察を加えたものである。

実験の概要

この実験では、おもりが輪ゴムを引く力と輪ゴムの伸びとの関係を調べた。引く力を増やすときと減らすときの両方で、フックの法則は特定の範囲内でしか成立しなかった。また、①引く力が小さいとき、力が大きくなるほど輪ゴムは伸びやすくなる、②おもりを減らし始めた直後で伸び方が大きく変動する、③おもりを増やすときと減らすときで伸びに大きな差がある、といった特徴が見られた。

輪ゴムを構成する高分子の絡まり合い、という観点から特定の範囲でフックの法則が成り立つ理由と特徴①が説明できた。また、高分子は「架橋」で互いにつながっており、これが絡まりの復元を可能にしている。しかし大きな力がかかって架橋が破断すると、絡まりの復元が不可能になる。このことから特徴②が説明できた。さらに、特徴③も架橋の破断で説明できると考え、大きな力をかけた輪ゴムについて、おもりを増やすときと減らすときの伸びの違いを調べた。その結果、伸びの違いは大きな力をかけなければかけるほど縮まり、引く力を増やすときと減らすときの伸びに差がある原因の一つは架橋の破断であるとわかった。

1. 実験の背景と目的

ばねばかり等で使用される金属製のばねではフックの法則が成り立ち、弾性力の大きさとばねの伸びが正比例する。

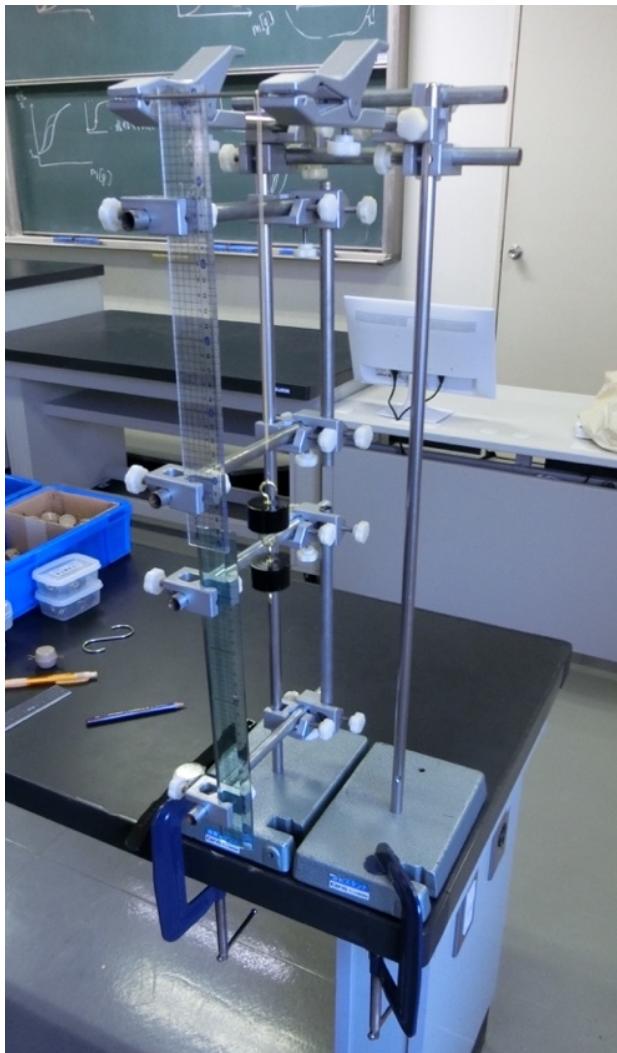
それでは、輪ゴムにおいてもフックの法則が成り立つのだろうか。これを確かめるために、おもりが輪ゴムを引く力と輪ゴムの伸びとの関係を調べた。輪ゴムの一端を固定し、もう一端におもりをかけて輪ゴムにかかる力を大きくしていったところ、力の大きさと輪ゴムの伸びは正比例しなかった。さらに、今度はおもりを外し、輪ゴムにかかる力を小さくしていった。すると、輪ゴムに同じ力がかかっていたとしても、おもりを増やしていくときと減らしていくときでは輪ゴムの伸び大きく異なることがわかった。

それでは、なぜ輪ゴムはフックの法則が成立しないような特殊な伸び方をするのか、おもりを増やすときと減らすときの伸びの違いは何によって引き起こされるのかを知りたいと思い、輪ゴムの化学的構成に着目した。輪ゴムは高分子が絡まりあった構造をしており、それぞれの高分子は架橋と呼ばれる部分で他の高分子とつながっている。輪ゴムを引き伸ばすと絡み合っていた高分子鎖が引き伸ばされ、絡み合いが崩れるが、高分子は架橋によってつながっているため、引く力が弱まると元の絡まりを復元できる。しかし、輪ゴムを引く力に耐えられなくなると架橋は破断し、高分子が元の絡まりを再現できなくなる（参考文献 1,3）。この「高分子の絡まり」や「架橋の破断」の考え方を用いることで、輪ゴムの特徴的な伸び方の理由が説明できた。同時に、おもりを増やすときと減らすときの伸びの差にも、架橋の破断や高分子鎖の絡まりの崩壊が関係しているのではないかという仮説を立てた。このことを確かめるために、大きな力をかける作業を何回も繰り返した輪ゴムについて、おもりを増やすときと減らすときの伸びの違いを調べる追加実験を行った。

2. 実験手法

2-1 実験装置

写真1に示すような実験装置を作成した。以下に装置の作成手順を記す。



(写真1) 実験装置全体

a) 輪ゴム上端を支える装置の設置

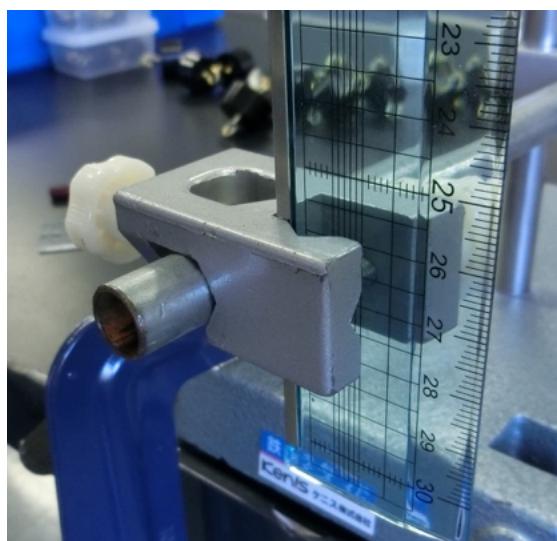
2台のスタンドを並べ、スタンド棒の上部にクリップ式自在挟みを直角クランプで取り付けた。さらに2本の自在挟みで細い金属棒をはさんだ（写真2）。この金属棒は輪ゴムをかけるのに用いる。



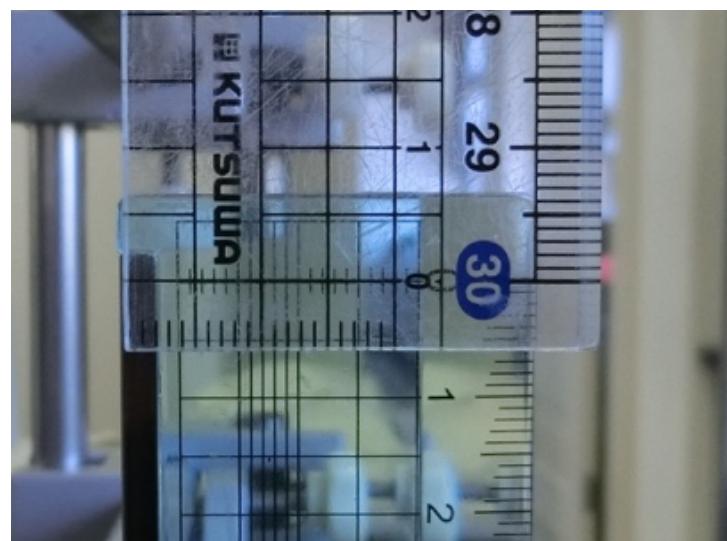
(写真2) 実験装置上部

b) 長さを測定する器具の設置

輪ゴムの伸びの測定には、2本の30cmものさしを使用した。プラスチックのものさしは長さが微妙に違うことがあるため、完全に長さが一致するものさしを選んだ。これらの30cmものさしの上部と下部を直角クランプで支持棒に取り付け、さらにその支持棒を直角クランプでスタンドに固定した（写真3）。この作業を2本のものさしについて行った。上側のものさしについて、0cmの目盛りと、細い金属棒にかけた輪ゴムの上端が同じ位置になるように調節した。さらに、上側のものさしの30cmの目盛りと、下側のものさしの0cmの目盛りがちょうど重なるようにした（写真4）。これで、合計60cmの長さの測定が可能になった。



（写真3）ものさし固定部分



（写真4）ものさしの重なった部分

c) 輪ゴムとおもり

実験で使用する輪ゴムの製造条件をできるだけ均一にするために、「オーバンド#140 100g入り」の箱を1つ入手し、その箱に入っている輪ゴムのみを使用した。また、輪ゴムに力を加える方法として、写真5に示すような20gのおもりを使用した。



（写真5）実験で使用したおもり

2-2 測定方法

輪ゴムの上端に触れている細い金属棒と、輪ゴムの下端に触れているクリップについては、これらの幅は十分に細いとした。したがって、金属棒やクリップに触れている部分も、触れていない部分と同様に伸びているといえる。このように考えると、輪ゴムの上端はものさしの 0 cm の目盛りに合わせてあるため、輪ゴムの下端がものさしに対して指す目盛りが、輪ゴム折径（輪ゴムを抑えて一直線上にした時の端から端までの長さ、図 1 参照）と等しくなる。この考えに基づいて輪ゴムの折径を測定した。以下に注意した二点を記す。

- ・輪ゴムは、力をかけていない状態では丸い形をとるため、折径が輪ゴムによってまちまちになる。そこで輪ゴムの折径の測定は、最初のおもりをかけ、輪ゴムがある程度直線状になった段階から始めることにした。
- ・輪ゴムは新しいおもりをかけた瞬間に大きく伸びるが、その後も徐々に伸びていく。したがって、決まった時間ごとにおもりをかけ、輪ゴムの折径を測定する必要がある。これは、おもりを外していく際も同様である。

具体的な測定方法を記す。まず、最初のおもり（20 g）をクリップにかける。その 20 秒後に折径を測定し、同時に次のおもりをかける。その 20 秒後にまた輪ゴムの折径を測定し、次のおもりをかける。この作業を繰り返して輪ゴムを引く力を大きくしていく。

輪ゴムを引く力を小さくする際も同様のことを行った。折径を測定すると同時に一番下のおもりを外す。その 20 秒後に再び折径を測定し、一番下のおもりを外す。この作業を繰り返し、輪ゴムにかかる力を小さくしていった。



(図 1) 折径の定義

2-3 測定原理

ある力がかかるった時点での輪ゴムの折径を x' [m] とし、輪ゴムの折径の自然長を x_0 [m] とする。オーバンドを販売している共和株式会社のホームページを調べたところ、オーバンド#14 では $x_0 = 50$ [mm] とわかった（参考文献2）。したがって、 $x_0 = 50 \times 10^{-3} = 5.0 \times 10^{-2}$ [m] として議論を進める。

先に述べたように、細い金属棒とクリップの幅は十分に細く、輪ゴムについては金属棒やクリップに触れている部分も、触れていない部分と同様に伸びているとする。このとき、輪ゴム全体の伸びを x [m] とすると、折径は輪ゴムの半分の長さだから

$$x = 2(x' - x_0) \quad \text{より} \quad x = 2(x' - 5.0 \times 10^{-2}) \text{ [m]}$$

が成立する。また、図2のようなおもりに関するつり合いの式

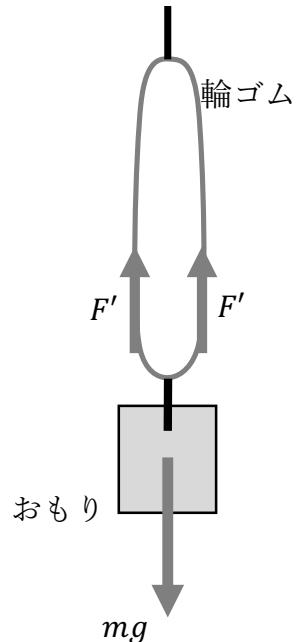
$$F' + F' = mg \quad \text{よって} \quad F' = \frac{1}{2}mg \quad \cdots \textcircled{1}$$

F' : 輪ゴム半分（上端から下端まで）の弾性力の大きさ [N]

m : 輪ゴムにかかったおもりの質量の合計 [kg]

g : 重力加速度 [m/s^2]

が成立する。



(図2) おもりに関するつり合い

フックの法則が成立するとき、

$$F' = kx \quad \cdots \textcircled{2}$$

が成り立つ。 $\textcircled{1}$ と $\textcircled{2}$ より

$$\frac{1}{2}mg = kx$$

が成り立つ。したがって、 $mg - x$ グラフが一次関数となれば、輪ゴムは線形弾性を持ち、フックの法則が成り立っているといえる。一方、 $mg - x$ グラフが一次関数でなければ、輪ゴムは非線形弾性を持ち、常にフックの法則が成立するわけではないと考えられる。

2-4 測定条件

輪ゴムにかかる 20 g のおもりの数を増やしていく、一定の個数をかけた後、外していくという実験を行った。輪ゴムにかけるおもりの質量の合計に対する上限は 1.0×10^3 g とした。さらに、この測定が終わった後、おもりの質量の合計に対する上限が以下の 7 種類の場合においても測定を行った。

1.0×10^2 g, 1.6×10^2 g, 1.8×10^2 g, 2.0×10^2 g, 2.4×10^2 g, 3.2×10^2 g, 4.0×10^2 g

また、輪ゴムはおもりをかけ、外していくという 1 回の測定につき 1 個ずつ使用し、おもりをすべて外し終えた後は新しい輪ゴムに取り替えてから次の測定を始めることにした。

3. 実験結果

実験は以下の7日にわたって行った（表1）。それぞれで天気・気温・気圧の大きな変化はなく、これらの条件が輪ゴムの伸びに大きな誤差を与えたとは考えにくい。

日(全て 2018 年)	3/28	3/29	4/15	4/21	5/1	5/2	5/3
天気	快晴	快晴	晴	快晴	晴	晴	晴
気温 [°C]	22.2	22.2	19.9	23.8	24.8	24.0	24.3
気圧 [hPa]	986.0	986.0	984.0	985.8	983.0	983.1	977.2

(表1) 実験日の天気、気温、気圧

輪ゴムにかけたおもりの質量の合計に対する上限と、各上限で行った実験の回数は以下の通りで、全部で95回である（表2）。なお実験の全データはレポート巻末にまとめて載せている。¹

力の上限(g)	1.0×10^3	1.0×10^2	1.6×10^2	1.8×10^2	2.0×10^2	2.4×10^2	3.2×10^2	4.0×10^2
実験回数(回)	5	17	25	5	9	15	3	16

力の上限が 1.0×10^3 g の場合において、輪ゴムにかかる力の大きさ mg [N] と、輪ゴムの伸び x [m] の関係をグラフに表すと図3のようになった。なお、一次関数のグラフでは横軸が変数である。今回の実験では mg が変数だったうえ、このグラフは一次関数

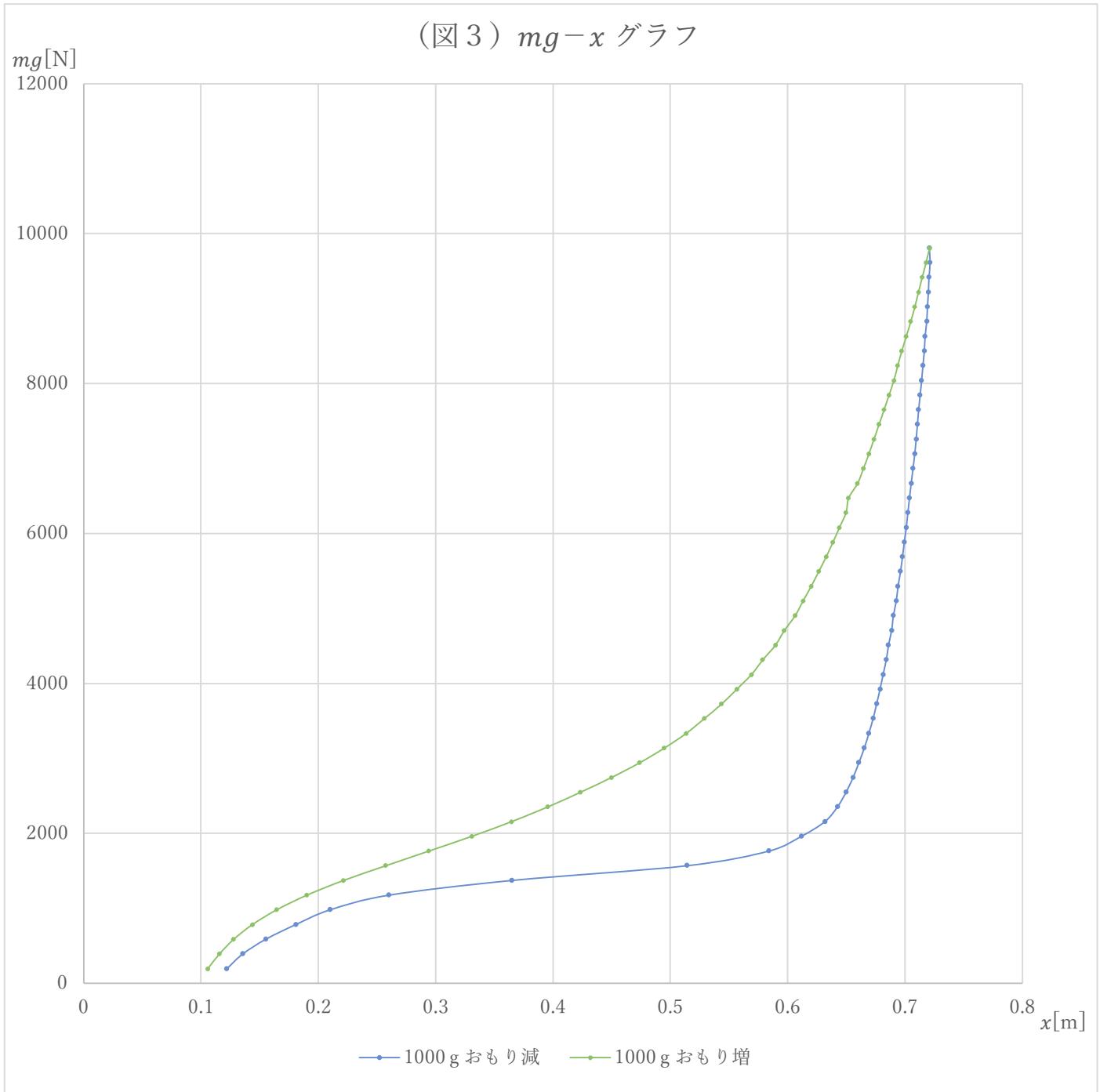
$$\frac{1}{2}mg = kx$$

が成り立つかどうかを調べるものであるから、 mg を横軸にとるべきである。しかし、これを変形した式

$$k = \frac{mg}{2x}$$

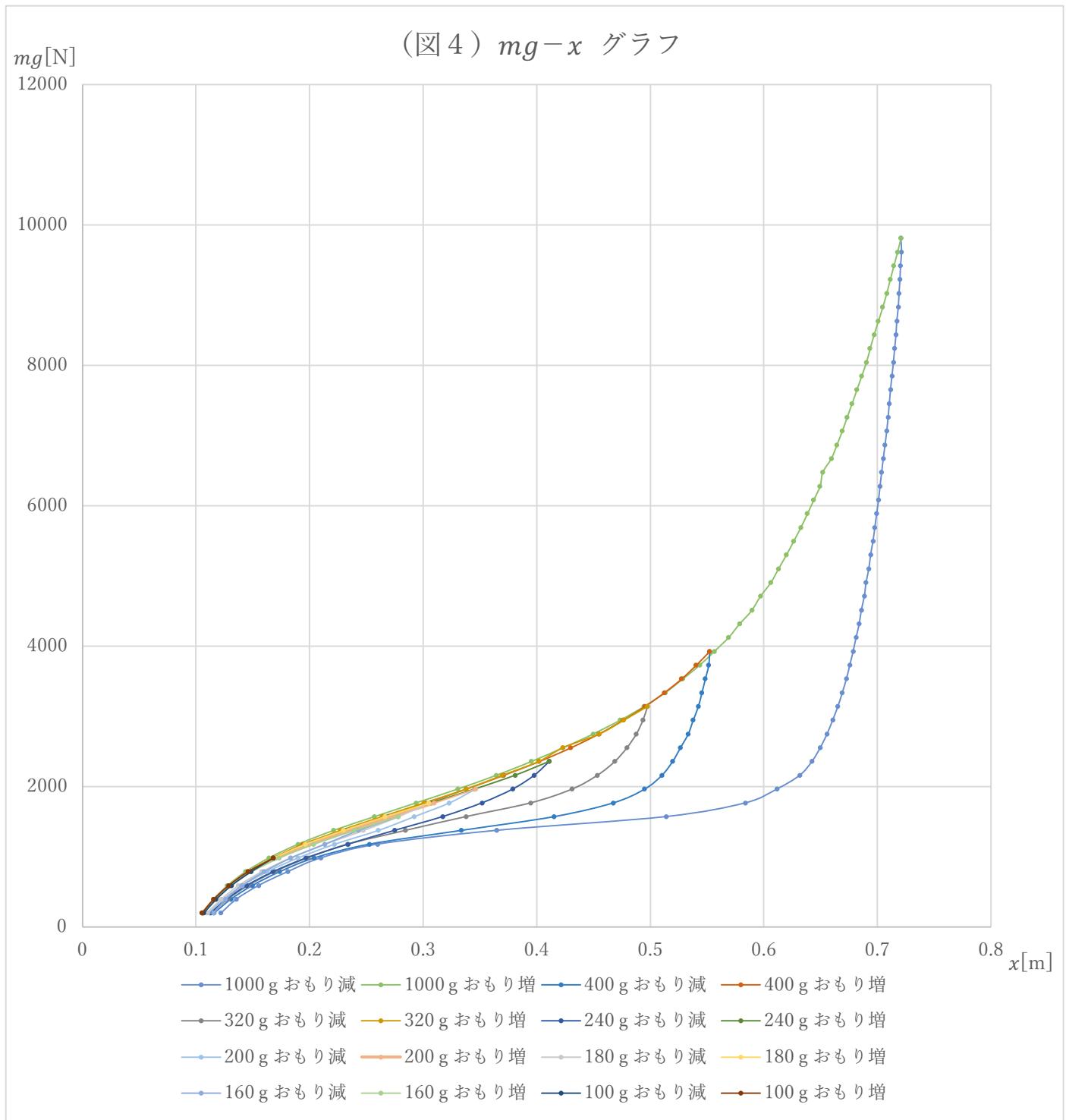
を考えると、 mg を縦軸、 x を横軸にとれば k の値がグラフの傾きで表されるため理解しやすい。そのため、あえて mg を縦軸にとった。

¹ この部誌では紙面の都合上データを掲載していない。データをご覧になりたい方は、koyobutsuri@gmail.comまでご連絡いただきたい。



おもりを増やしていくときは、最初は伸び方にぶく、力をかけると伸びやすくなつていった。しかし、力をかけすぎると伸びにくくなり、以後伸び方は徐々ににぶくなつていった。おもりを減らしていくときのグラフは、おもりを増やすときのグラフとは大きく異なる経路をとつた。おもりを増やしたときの伸び方よりも緩やかに縮んでいき、輪ゴムにかかる力がかなり小さくなつたところで急に縮み始めた。最後は、輪ゴムにおもりをかけ始めたときよりも全長が長くなつた。

おもりの質量の合計が $1.0 \times 10^3 g$ になる前の段階でおもりを外していった測定の結果を $1.0 \times 10^3 g$ のグラフ上に表したところ、図4のようになった。



おもりを増やす過程においては、すべてのグラフが同じような曲線に乗った。一方で、おもりを減らす過程においては、どのタイミングでおもりを減らしていくかによって、輪ゴムの全長に大きな違いがあった。また、どのタイミングでおもりを減らしていくたとしても、おもりを増やしていくときのグラフと異なるグラフを描くが、おもりがより多くかかった段階で減らした方が、おもりを増やすときのグラフと減らすときのグラフの差は大きくなつた。なお、「おもり増」に関して8種類ある上限のグラフ全てがほぼ同じ曲線を描いていることから、今回の実験で使用した輪ゴムは1つずつに高い再現性があると考えられる。

4. 考察

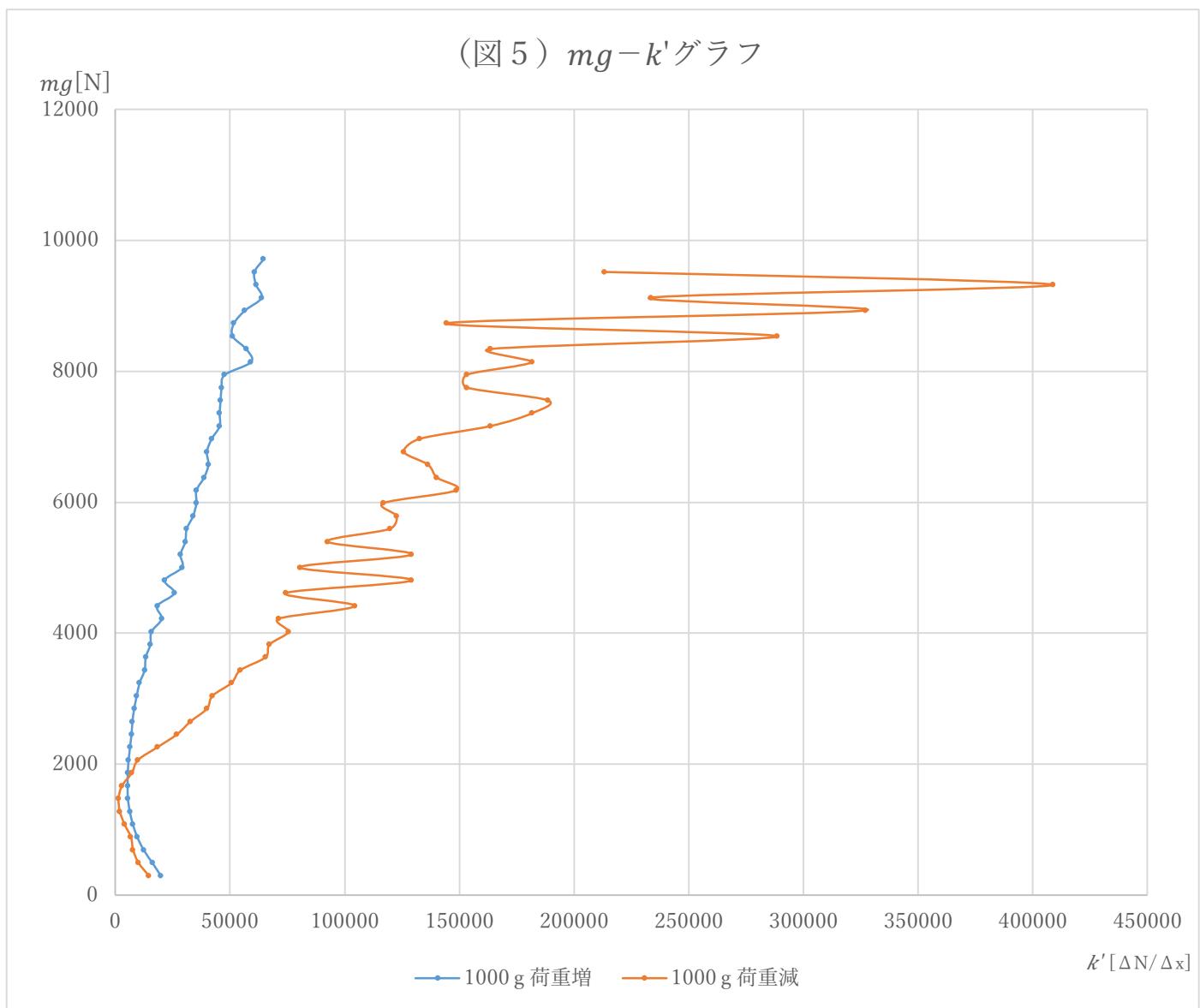
実験結果から得られた $mg-x$ グラフは一次関数にならず、輪ゴムでは引く力を増やすときと減らすときの両方において、常にフックの法則が成立するわけではないといえる。しかし、例えば「 $1.0 \times 10^3 g$ おもり増」や「 $1.0 \times 10^3 g$ おもり減」に注目すれば、一定範囲内ではグラフが直線に近い形となっている（なお、「おもり増」とは、おもりを増やして輪ゴムにかかる力を大きくする過程のこと、「おもり減」とはおもりを減らして輪ゴムにかかる力を小さくする過程のことを指す）。そこで「 $1.0 \times 10^3 g$ おもり増」と「 $1.0 \times 10^3 g$ おもり減」のグラフにおいて、

$$k' = \frac{\Delta mg}{\Delta x}$$

Δmg : 隣接二点間の mg の差

Δx : 隣接二点間の x の差

で与えられる隣接二点間の平均変化率 k' を求め、 mg との関係をグラフにした（図 5）。



このグラフには、以下のような特徴が見られる。

- $mg < 1000\text{ N}$ の範囲では、 mg が大きくなるにつれて k' は減少する。
- mg が 1000 N から 3000 N の間にある場合、輪ゴムにかかる力を増やしていくとき「おもり増」で k' がほぼ一定である。また、「おもり減」でもわずかではあるが k' が一定になる部分がある。
- mg が $2000\sim 3000\text{ N}$ を超えると、「おもり増」と「おもり減」の両方で F が大きくなるほど k' も大きくなっているが、「おもり減」は「おもり増」と比べてかなり大きな値をとるようになる。また、 mg が 10000 N に近づくと、「おもり減」では k' が大きく変動する。

これらは、フックの法則が成り立たない、輪ゴム独特の伸び方から現れる特徴である。これらの特徴が生じる理由を具体的に説明するために、輪ゴムが伸びる機構に注目した。

輪ゴムが伸びる仕組みについて調べてみると、「輪ゴムは高分子が絡まりあった構造をしており、力を加えると高分子鎖が引き伸ばされ、輪ゴムが伸びる。さらに、高分子同士は架橋点でつながっており、引く力がなくなると元の絡まりを再現する能力を与えていた。また、架橋点は耐久限界以上の力がかかると破断し、引く力がなくなっても高分子の元の絡まり方を再現することができなくなる」ということがわかった（参考文献 1, 3）。このことから、上記の特徴 a), b) を次のように説明できる。

- 輪ゴムは最初、高分子同士が密接に絡まっている。このような状況では、同じ力をかけていても、高分子同士がしっかりと絡まっているときの方が、絡まりがゆるいときよりも状態を変化させにくく、 k' は大きくなる。
- 輪ゴムに力をかけていて絡まりがほぐれ、高分子がある程度自由に動けるようになると、力を加えた分だけ高分子の絡まりがほどけるようになり、 Δmg と $\Delta x'$ は比例する。このとき、 k' は一定となる。

さらに、特徴 c)を説明するために下のような仮説を立てた。

架橋の耐久限度以上の力を輪ゴムに加えると、架橋が破断し、高分子は元の絡まりを再現する能力を失う。架橋が切れてしまうと高分子から次の高分子へ引く力が伝わらず、輪ゴムは伸びにくくなる。力を加えるほど架橋が切れていくため、より輪ゴムは伸びにくくなり、 k' も大きくなる。架橋の耐久限度以上の力を加えている間は、架橋は破断し続けるためにおもりを減らし始めても輪ゴムの縮み方は小さく、 k' のグラフはおもりを増やす場合と減らす場合で大きな差が生じる。

また、架橋が切れると、高分子の動きの自由度が高くなる。そのため、おもりを外すタイミングがわずかにずれた、おもりの重さが均一でない、といった外部の条件に伸びが左右されやすくなる。加えて、おもりを引く力を減らし始めてすぐの Δx の値は微小であるため、誤差の影響が大きくなり、 k' は大きく変動する。

このように、「おもり増」と「おもり減」で輪ゴムの伸び方や k' の値が大きく異なる原因は、大きな力によって、架橋が破断するなど輪ゴム内部の高分子の状態が変化することにあると考える。

これが正しければ、「結果」の章で述べた、おもりが相対的に多い状態でおもりを外して行った方が、おもりを増やすときのグラフと減らすときのグラフの差が大きい、という特徴も説明できる。すなわち、おもりの多い方が破断した架橋の割合が多くなり、高分子同士がよりばらばらになってしまるために、元の状態を復元しにくくなる。そのため、高分子同士が絡まり始めるまでに時間がかかるてしまい、その間は縮み方の非常に小さい状態を保ち続けるからだと説明される。以上の仮説を立証するために、下のような追加実験を行った。

5. 追加実験

5-1 実験の目的

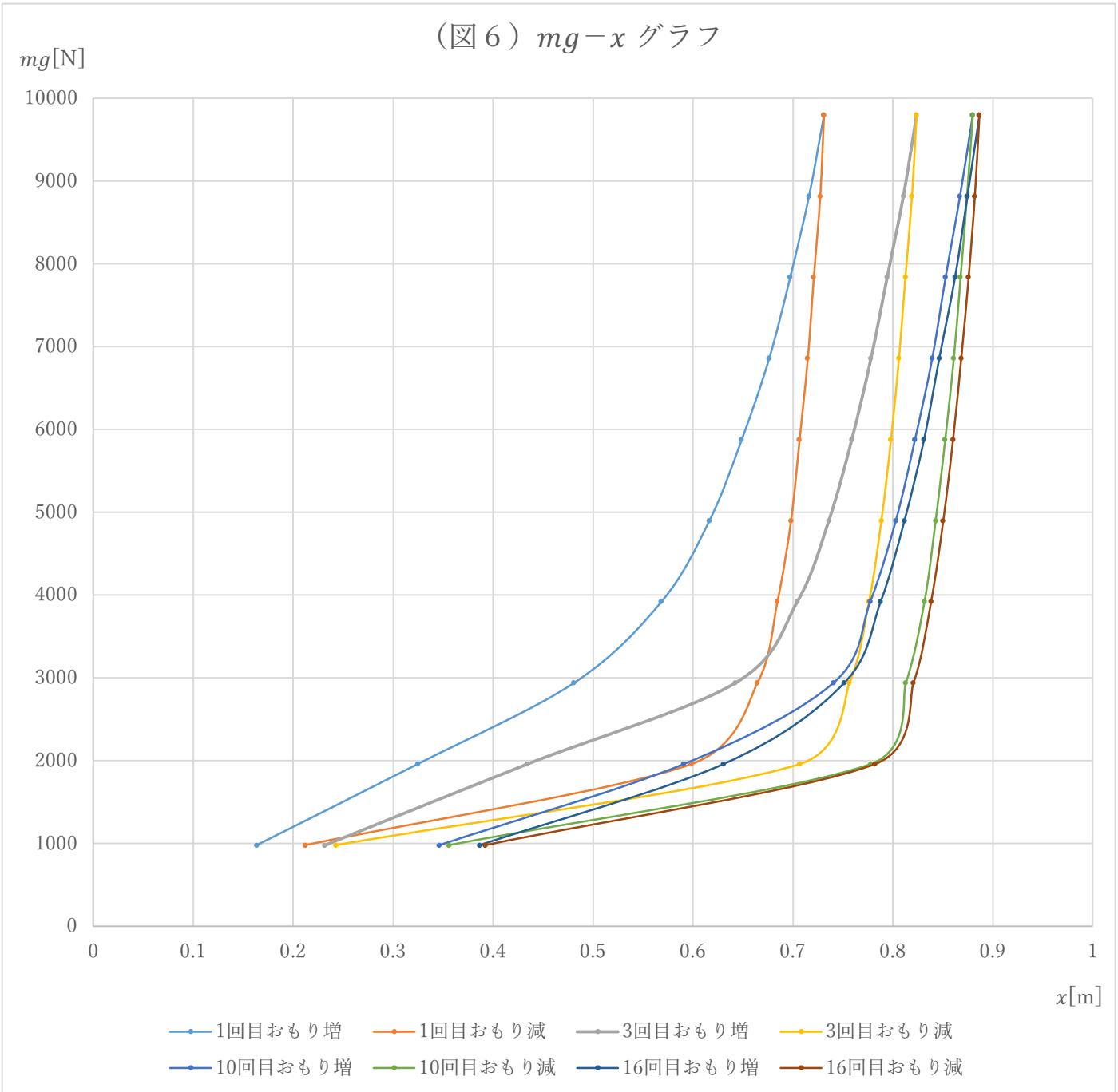
仮説が正しければ、 $1.0 \times 10^3 g$ の質量のおもりをかける、すなわち $9.8 \times 10^3 N$ の力を輪ゴムにかけることで、輪ゴムの架橋は破断する（以下では、このように大きな力をかけることで輪ゴム内部の状態が変化し、伸びが飽和していくことを「輪ゴムが疲労する」と表現する）。これによつて、「おもり増」と「おもり減」でグラフの形が大きく異なってくるのだが、もし輪ゴムを増加させる前の段階すでに輪ゴムが疲労していたなら、「おもり増」でも、高分子の状態は「おもり減」と同じになるはずである。この場合、 $mg - x$ グラフ や $mg - k'$ グラフにおいて、「おもり増」と「おもり減」のグラフは一致すると考えられる。

5-2 実験方法

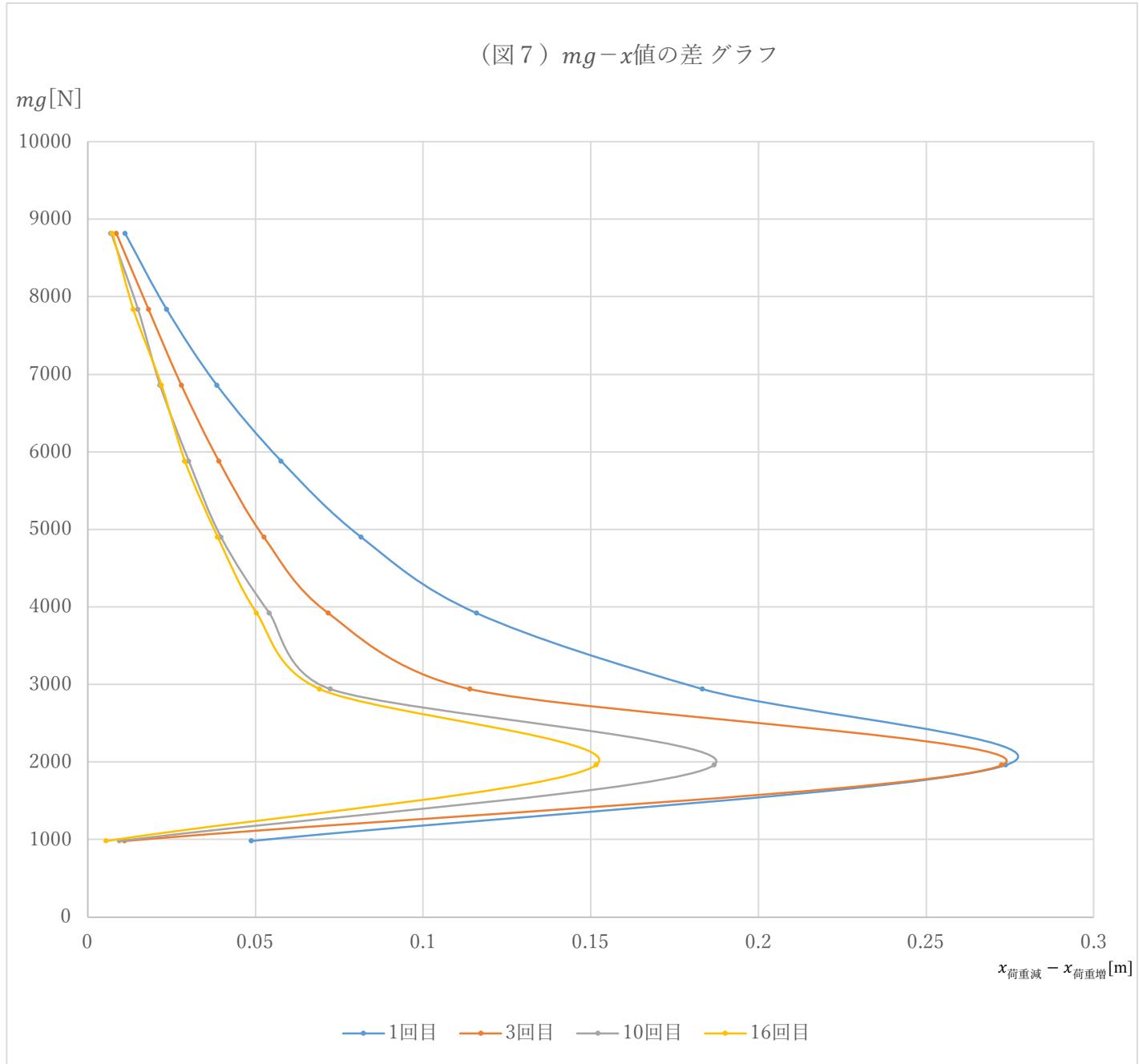
前述の実験で使用した実験装置を用いて、以下の実験を行った。輪ゴムの伸びの測定方法と測定間隔は変えないが、おもりは $1.0 \times 10^2 g$ のものを使用した。また、輪ゴムにかけるおもりの質量の合計に対する上限は $1.0 \times 10^3 g$ とした。今回の実験では、おもりを $1.0 \times 10^3 g$ 分かけてから外していくところは同じだが、おもりが最後の 1 個になってから 20 秒後に、おもりを再び増やしていく。つまり、輪ゴムにおおきな力をかけることを繰り返していく。

5-3 実験結果

輪ゴムにかけるおもりの質量の合計を $1.0 \times 10^3 g$ まで増やしてから、再び $1.0 \times 10^2 g$ まで減らすと言う作業を 1 回として、1 回目・3 回目・10 回目・16 回目に伸びの測定を行った。その結果を表したのが図 6 である。本実験の結果で述べた通り、今回の実験で使用した輪ゴムは 1 つずつに高い再現性があると考えられるため、測定は 1 回のみ行った。

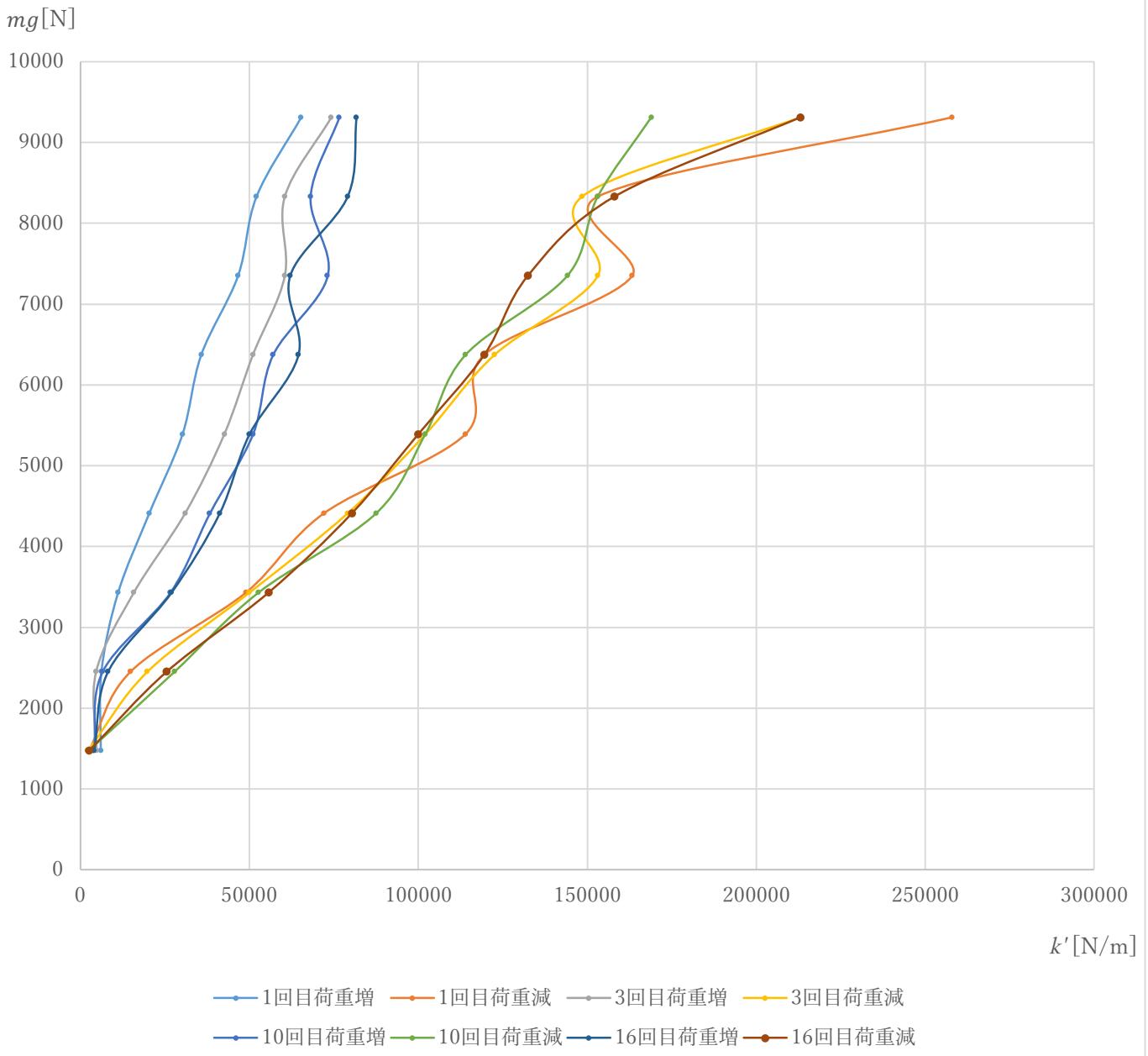


さらに、図6において mg 値が同じときの、「おもり減」の x 値から「おもり増」の x 値を引いた値を表したのが図7である。



5-4 考察

図7に示した「 $F - x$ 値の差 グラフ」を見ると、回数が増えるにつれて x 値の差が詰まってくることがわかる。したがって、回数の増加と共に「おもり増」と「おもり減」のグラフの形がより近似するといえる。また、本実験と同じ方法で k' を求めると、 $F - k'$ グラフは下の図8 ようになつた。

(図8) $F-k'$ グラフ

この図を見ると、「おもり減」の4本のグラフでは k' の値の大小が頻繁に入れ替わっており、あまり変化がないのに対して、「おもり増」の4本のグラフでは、 mg の値が同じであるとき、10回目、16回目のグラフの方が1回目、3回目のグラフよりも k' の値が大きい。

これらより、輪ゴムにかける力を増減させる回数が増えるにつれて「おもり増」と「おもり減」の差は縮まり、特に「おもり増」のグラフが「おもり減」のグラフに近づいているということがいえる。これはすなわち、輪ゴムが疲労したことで、輪ゴムにかかる力が大きくなるときも、小さくなるときと同様の動きを示すようになったということである。逆に言えば、本実験で「おもり減」のグラフが「おもり増」と明らかに異なった形をしていたのは、輪ゴムの疲労が原因だったと考えられる。

6. 結論

今回の研究の目的は、輪ゴムを引く力と伸びの関係にフックの法則が成り立つかどうか、引く力を増やすときと減らすときの違いに注目して調べるというものであった。引く力としておもりを使用した実験によって、引く力を増やすときと減らすときの両方で、常にフックの法則が成立するとはいえないことがわかった。引く力を減らすときと増やすときの共通点としては、

- ・引く力が小さいとき、引く力が大きくなるほど輪ゴムは伸びやすくなる。
 - ・引く力が特定の範囲内であれば、引く力の増減と伸びの増減が正比例する
- の二つが観察された。先に挙げた二つの共通点は「輪ゴム内部の高分子の絡まり合い」によって説明できた。

また、引く力を増やすときと減らすときで輪ゴムの伸び方の相違点としては、

- ・引く力を減らしていくとき、輪ゴムが縮みにくい状態が長く続く。
 - ・引く力が大きいと、引く力を小さくしていく過程で伸び方が大きく変動する。
- の二つが大きな特徴としてあげられた。

さらに、高分子と架橋に注目した追加実験によって「輪ゴムにある大きさ以上の力をかけると、架橋が破断するなど輪ゴム内部で絡まっている高分子の状態が変化する」ということが相違点の原因の一つであることがわかった。

7. 参考文献

- 1 株式会社共和「輪ゴムの知識 配合剤」<<http://www.kyowa-ltd.co.jp/tips/nr03.html>> (参照 2018-5-3)
- 2 同上「標準バンドの寸法と本数」<<http://www.kyowa-ltd.co.jp/products/bandsize.html>> (参照 2018-3-31)
- 3 錦城護謨株式会社 「ゴムの特徴」<<http://www.kinjogomu.jp/rubber/qa.html>> (参照 2018-5-3)

8. 謝辞

甲陽学院中学校教諭の江本豊先生には、実験室の提供、実験を行うまでの助言など、様々な面から援助していただきました。深く感謝申し上げます。

世の中には、本当に深刻な問題があって、
そういうときは、笑うしか術がないのだ。

ニールス・ボーア

水中を落下する物体の終端速度

小野祐

はじめに

本実験の目的は、水中を落下する物体の終端速度が物体の大きさや密度によってどう変化するのかを調べる、というものである。この実験は、今年の物理チャレンジ実験課題として行った実験に、追加実験とさらなる考察を加えたものである。

実験の概要

この研究では、第1に、水中での金属球の終端速度が大きさや密度によってどう変化するのかを調べた。大きな円筒容器を使用し、条件をつけてデータを絞りこむことで、誤差を極力小さくする工夫をした。異なる種類の金属球について実験したところ、「球体の終端速度 v_f 」と「球の半径 r 」、「球の密度から水の密度を引いた密度 ρ 」の間に $v_f = 0.258\sqrt{\rho r}$ という関係式が得られた。

第2に、これを説明するためのモデルを構築した。まず、「球が水を押し下げ、水粒子に運動量を付与することで抵抗を受ける」とするモデルを考えた。このとき終端速度は、水の密度を ρ_w として $v_f = \sqrt{\frac{4\pi g}{3\rho_w}} \cdot \sqrt{\rho r}$ と表されるが、比例定数は実測値よりも小さかった。そこで、球の周りの水の運動をより詳細に考えた修正モデルを立てた。

第3に、これらのモデルが現象を正確に記述しているかを調べた。水の動きを可視化するため、チョークの粉を水中に散布する工夫を施した。球の周りの粉の挙動を観察することで、元のモデルの妥当性が確認されたが、修正モデルで言及した水流が起きているとは結論付けられなかった。

1. 実験の目的

水中を落下する物体は水からの抵抗を受け、やがて物体が受ける重力と浮力、水からの抵抗が釣り合いで、終端速度に達する。本実験の第一の目的は、球体が水中を落下するときの終端速度と球の大きさ・密度の関係を明らかにすることである。これを調べるために、金属球を、水を張った円筒容器内で落下させる。高さ 60cm、半径 15cm の大きな円筒容器を使用し、条件をつけてデータを絞りこむことで、誤差を極力小さくした実験を行うことを可能とした。

実験結果の詳細は後述するが、上記の実験において、異なる種類の金属球について終端速度を測定した結果、「球体の終端速度 v_f 」と「球の半径 r 」、「球の密度から水の密度を引いた密度 ρ 」の間に、 k を比例定数として、 $v_f = k\sqrt{\rho r}$ の関係があることがわかった。この関係式を説明するモデルを立てるのが、本実験の第 2 の目的である。

まず、「球が通過経路上の水を下に押し込み、水粒子に運動量を付与することで、抵抗力を受ける」というモデルを立てた。しかし、このモデルに基づき導出した比例定数 k は、実測値から得られた比例定数 k よりも小さく、モデルの正当性が確かめられなかった。そこで、球が衝突する水の運動をより詳細に考えた修正モデルを立てて実験結果を説明する。

さらに、これらのモデルが現象を正確に記述しているかを調べるのが、本実験の第 3 の目的である。この目的のために、落下する球の周りの水の流れを観察する。この追加実験において、水の流れを可視化するため、チョークの粉を水中に散布する工夫を施した。チョークの粉は質量が非常に小さいため、水の流れに沿って動く。球の通過経路上のチョークの粉の挙動を観察することで、球の落下経路にある水の動きを明らかにし、構築したモデルとその修正モデルの妥当性を検証する。

2. 実験方法

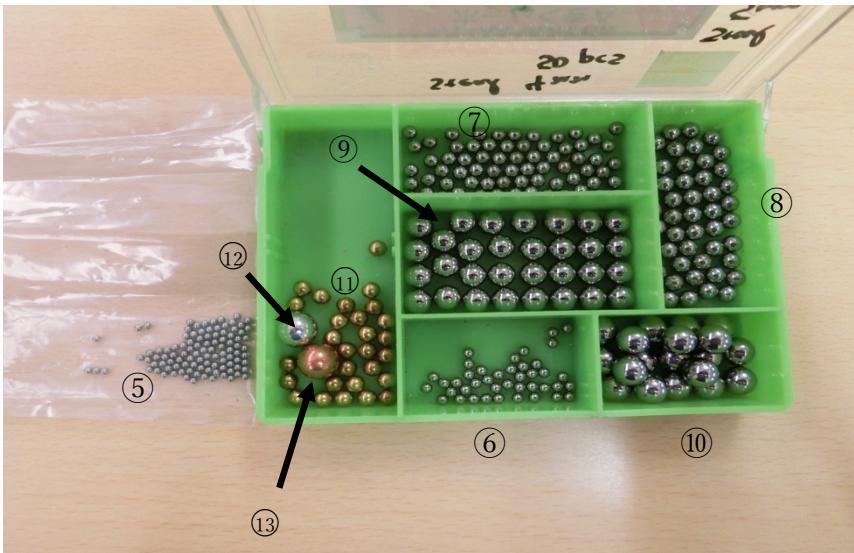
2-1. 実験で用いた器具

実験で使用した器具を以下の表に示す。

	品名	内容	数量
①	円筒型容器	底面は直径の円、高さ 59cm	1
②	ものさし	長さ 1m	2
③	L字型の部品	1cm × 1cm × 1cm	3
④	コンパクトデジタルカメラ	CASIO EXILIM EX-ZR1600EO	1
⑤	スチール球	半径 1.0mm	100
⑥	スチール球	半径 1.5mm	50
⑦	スチール球	半径 2.0mm	30
⑧	スチール球	半径 2.5mm	30
⑨	スチール球	半径 3.5mm	20
⑩	スチール球	半径 4.0mm	20
⑪	真鍮球	半径 2.38mm	30
⑫	アルミ球	半径 5.0mm	1



(左)写真 2-1: ①円筒型容器と②ものさし (右)写真 2-2: ①円筒型容器と③L字型の部品の接合部(赤丸)



2-2. 実験装置のセットアップ

(1) 水槽の設置

円筒型容器の、鉛直方向にのびる継ぎ目部分に、ものさしをあてた。次に、写真 2-3 のような L 字型の部品で、ものさしの前面・後面と壁面を接着することで、ものさしを壁面と垂直に保った。L 字型の部品をものさしの下部・中部・上部に付け、ものさしがどの部分でも壁面と垂直を保つようにした(図 2-1)。

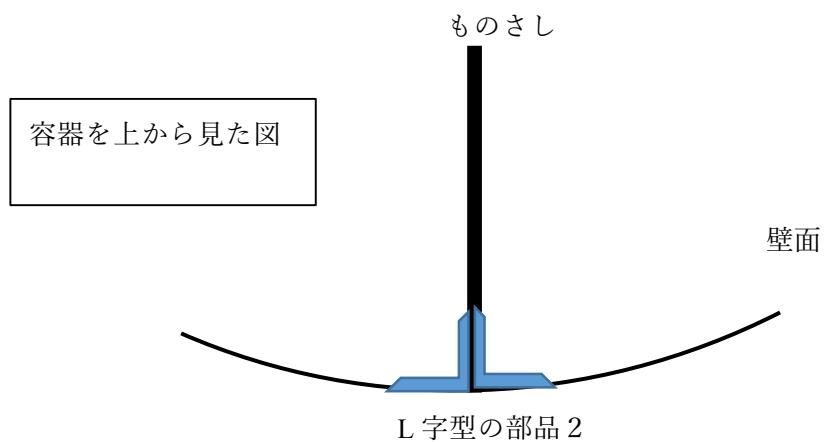


図 2-1 : L 字型の部品を上から見た図

(2) 撮影の準備

コンパクトデジタルカメラを下の図 2-2 のように設置した。

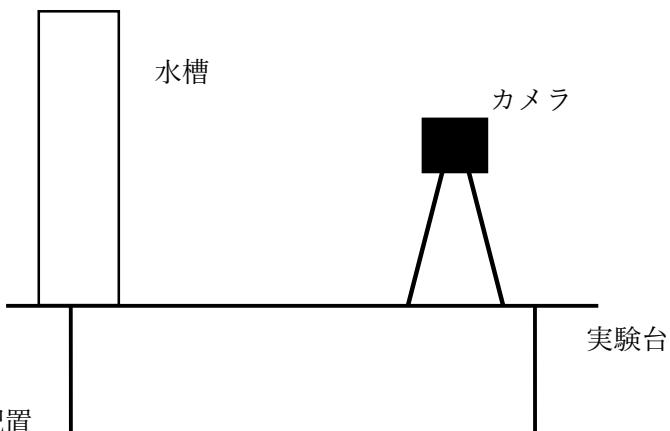


図 2-2：カメラの配置

(3) 落下させる球の種類

以下に示す 8 種類の球を落下させた。

球の種類	スチール						真鍮	アルミ
球の半径 [m × 10 ⁻³]	1.0	1.5	5.0	2.0	2.5	3.5	4.0	2.38
球の密度 [kg/m ³]	7815	7815	7815	7815	7815	7815	8500	2788

2-3. 測定方法

(1) 球の落下の撮影

球を水面がつくる円の中心(ものさしの端から 5mm のところ, 図 2-2)から静かに球を離して落下させ, コンパクトデジタルカメラで 30fps の動画を撮った。球はものさしに非常に近い場所を落ちていくので, ものさしの指す位置と球の位置は一致し, 容器の壁面による光の屈折や, 球を見上げたり見下ろしたりして観察したことによる, 実際の位置と測定した位置のずれはないと考えられる。

球が円筒容器内を落ちる際に, 球の軌道が斜めになることがある。そこで, 球が底面のどこに落ちたかを確認し, 球が底面の円の中心から半径 3.0cm の円よりも内側に落下した球のみをデータとして用いた。

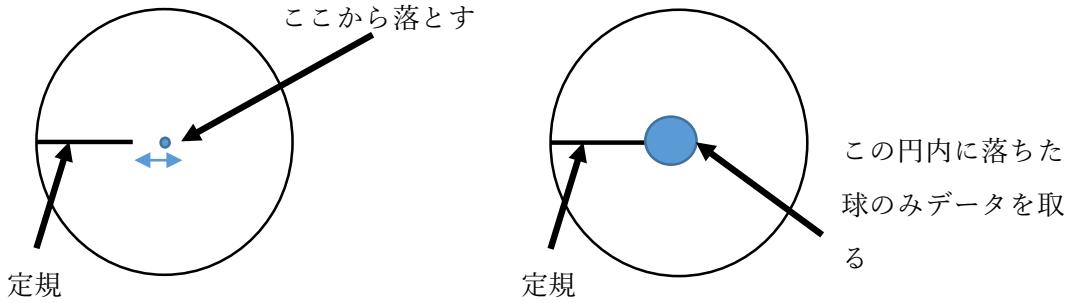


図 2-2：容器を上から見たとき、水面(左)と、底面(右)

(2) 撮影の誤差を縮める工夫

カメラの性能上、円筒容器全体を撮影すると、動画を分析したときに球が見えにくく、かつ、ものさしの目盛りが 0.1cm までしか読めないので誤差が大きくなる。そこで、円筒容器の下部約 20cm のみを撮影し、目盛りを 0.02cm まで読めるようにした。

(3) データの測定

カメラで撮った動画をコンピュータに取り込み、コマ送りで再生し、1 コマごとに、ものさしが示す球の最下部の位置を記録した。動画は 30fps であるから、1 コマごとの時間間隔は 1/30 秒である。

2-4. 測定原理

球がカメラの撮影範囲に入つてから n コマ目の球の最下部の位置を x_n とする ($n \geq 2$)。このコマにおける球の速度 v_n は、

$$v_n \approx \frac{x_n - x_{n-1}}{\Delta t}$$

に近似される。ここで、1 コマごとの時間間隔は $\Delta t = \frac{1}{30}$ [s] だから、 n コマ目と $n-1$ コマ目の位置の差を Δx_n [cm]、 n コマ目の球の速度を v_n [m/s] とすると、 Δt が十分に小さいと考えて、

$$v_n \approx \frac{\Delta x_n}{\Delta t} = \frac{\Delta x_n \cdot \frac{1}{10^{-2}}}{\frac{1}{30}} = 0.3\Delta x_n$$

となる。特に、 Δx_n がほぼ一定のとき、 v_n もほぼ一定であるから、球は終端速度に達しているとできる。 Δx_n と v_n は係数を除いて等しいと近似されるから、 Δx_n と球の大きさや密度の関係を調べること、 v_n と球の大きさや密度の関係がわかる。この理由から、以下の結果・考察では主に、球の半径や密度と Δx_n の関係を分析した。

3. 実験結果

3-1. 測定日と有効測定回数

以下の7日間、実験を行った。実験は、空調で気温を管理した部屋でおこなったため、気温によって水の性質が変化することはなかったと考えられる。また、今回の実験は水中で行ったため、湿度は実験結果にほとんど影響を与えず、気圧についてもその影響は無視できると考えられる。

日付	5/1(水)	5/2(木)	5/3(金)	5/14(火)	5/15(水)	5/28(金)	6/7(金)
気温	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C

表 3-1：実験日と気温

実験で得られた動画を分析し、2-3.(1)で述べた底面の範囲に落ちた球のみについて、データを取ったところ、以下に示す個数のデータが得られた。球の密度は、球数十個の重さを球の数で割ることで球1つの質量を求め、この値と球の半径から導出した。

球の種類	スチール						真鍮	アルミ
球の半径 [mm]	1.0	1.5	5.0	2.0	2.5	3.5	4.0	2.38
球の密度 [kg/m^3]	7815	7815	7815	7815	7815	7815	8500	2788
データの 個数[個]	45	64	16	73	56	8	5	21

表 3-2：データ個数

3-2. 実験データ

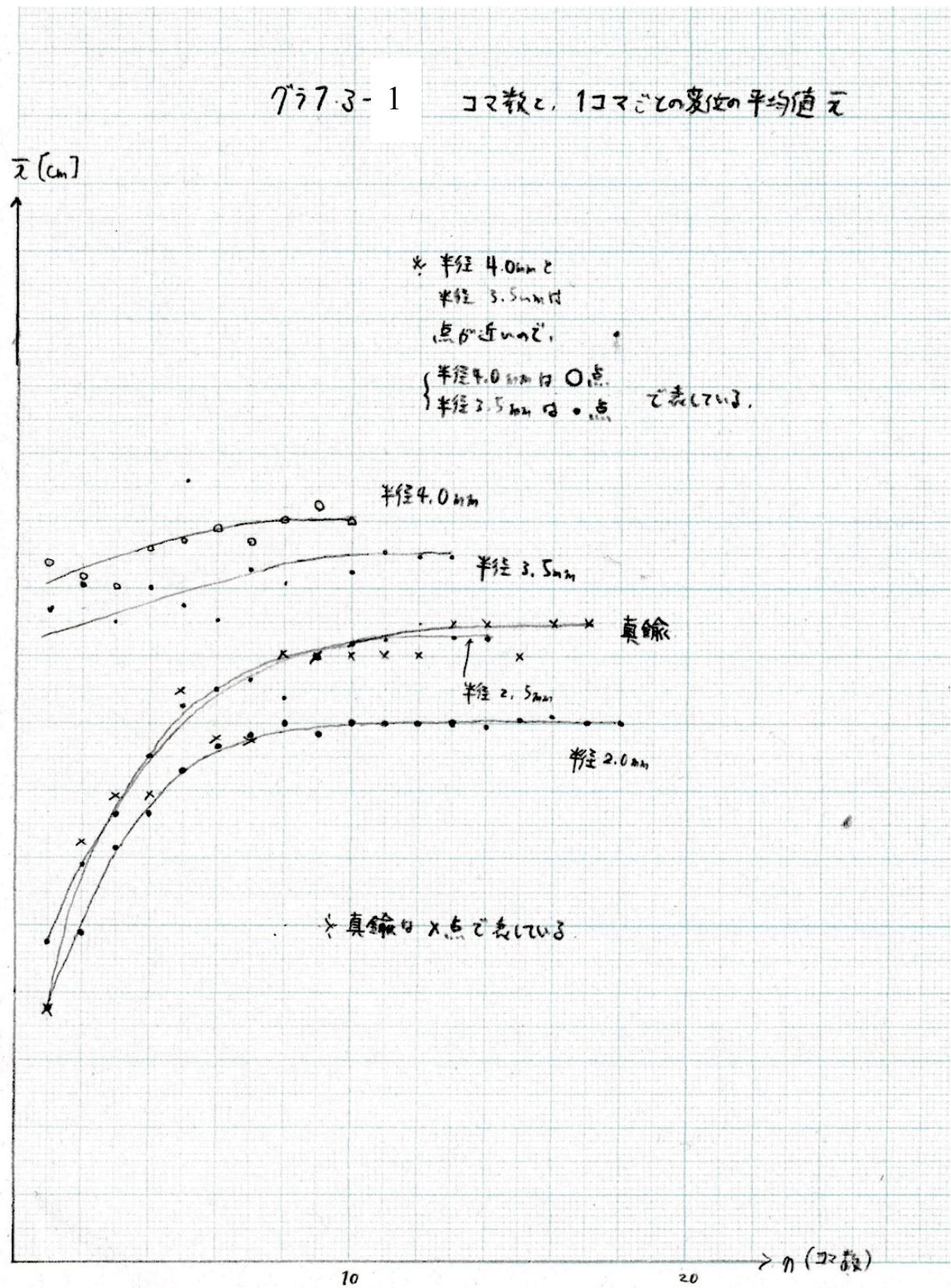
実験で得られたデータは以下に示すようになった。

金属球の種類と、1コマごとの変位の平均を次ページの表3-3に示す。ここで、半径3.5mmと4.0mmの球は、水面から落とすと、常に速度が増加し続けてしまった。そこで、水面より10cm上から球を落とし、水中で終端速度に達するようにした。

また、半径2.0mm, 2.5mm, 3.5mm, 4.0mmのスチール球と真鍮球について、円筒容器全体を撮影して、ものさしの最小目盛りが0.1cmのおおまかな変位の変化を調べた。球が手から離れてからのコマ数と、1コマごとの変位の関係は次々ページに示すグラフ3-1のようになった。

球の種類	スチール						真鍮	アルミニウム
半径[mm]	1.0	1.5	2.0	2.5	3.5	4.0	2.38	5.0
密度[kg/m^3]	7815	7815	7815	7815	7815	7815	8500	2788
$\overline{\Delta x}_1$ [cm]	2.192	2.802	3.244	3.618	4.220	4.492	3.737	2.434
$\overline{\Delta x}_2$ [cm]	2.153	2.771	3.272	3.636	4.263	4.644	3.773	2.539
$\overline{\Delta x}_3$ [cm]	2.173	2.751	3.225	3.648	4.238	4.480	3.869	2.514
$\overline{\Delta x}_4$ [cm]	2.161	2.769	3.193	3.629	4.140	4.490	3.837	2.519
$\overline{\Delta x}_5$ [cm]	2.184	2.756	3.198	3.514			3.816	2.569
$\overline{\Delta x}_6$ [cm]	2.174	2.789						2.561
$\overline{\Delta x}_7$ [cm]	2.166	2.724						2.463
$\overline{\Delta x}_8$ [cm]	2.206							

表 3-3 : 各種球の 1 コマごとの変位



グラフ 3-1：コマ数と、1コマごとの変異の平均値

4. 考察

4-1. 測定の誤差

(1) 球の材質による誤差

球は市販の一般的な金属球であるから、形は完全に球であるとみなしてよい。実験開始直前に購入した金属球であるため、サビなどによる表面の劣化もない。したがって、球の材質によって誤差が生じたとは考えられにくい。

(2) 球を落下させる実験者による誤差

球の直径は、円筒容器の直径に対して十分小さく、かつ落下速度は十分に速いので、球の落下によって動いた水が壁面で反射して球に影響を及ぼすことはないといえる。また、球は静かに手から離して落下させたが、実際には手との摩擦による回転がかかってしまうことがある。このような場合、球は回転によって軌道が鉛直方向から傾いてしまう。実験 2-3(1)で述べた通り、このような球に関してはデータから除外しているため、データをとった球については落下させた実験者による誤差は極めて小さいと考えられる。さらに、データをとった球については、円筒容器は水面から底面までが 50cm で、2-3(1)で述べた通り、最大 3.0cm 水平方向にずれる。このとき、鉛直方向に真っ直ぐ落ちた場合と比べた球の落下距離の誤差は最大で

$$\frac{\sqrt{50^2 + 3.0^2} - 50}{50} \times 100 = 0.18\%$$

である。

(3) ものさしのメモリを読む際の誤差

ものさしのメモリは 0.2mm 単位だから誤差はその 10 分の 1 の ±0.02mm の範囲に収まる。この誤差の、1 コマごとの変位の平均値 \bar{dx} に対する割合は、最大でも

$$\frac{0.02}{2.161} \times 100 = 0.93\%$$

である。

以上より、誤差は最大で

$$\{1 - (1 - 0.0018)(1 - 0.0093)\} \times 100 = 1.1\%$$

しかなく、ほぼ無視できると考えられる。

4-2. 終端速度の決定

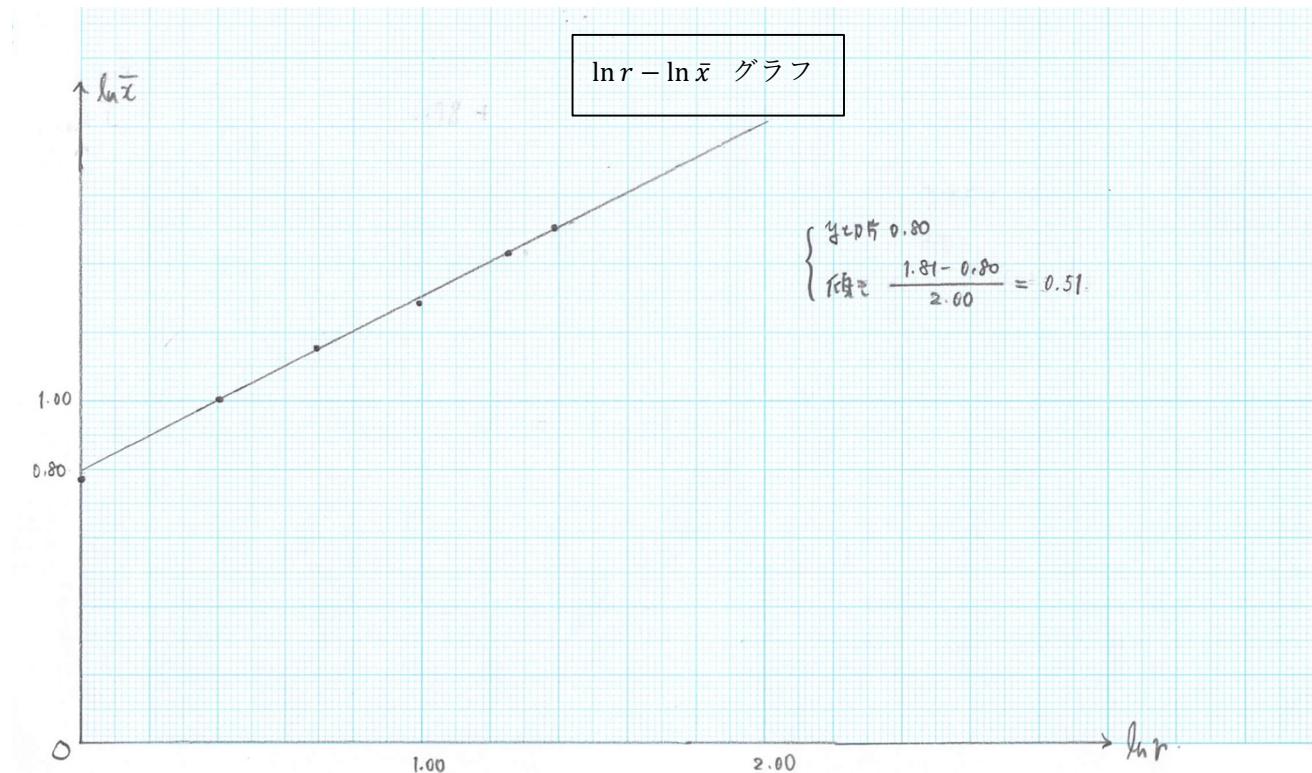
表 3-3 により、すべての種類の金属球は、円筒型容器の下部 20cm では速度が増加しておらず、終端速度に達しているといえる。コマ数が少ない半径 2.0mm, 2.5mm, 3.5mm, 4.0mm のスチール球と真鍮球については、グラフ 3-1 より終端速度に達していることがより明確にわかる。

したがって、測定した金属球はすべて、円筒型容器の下部 20cm では終端速度で移動しているとみなして、議論を進める。1 コマの変位を \bar{x} [cm], 終端速度を v_f [m/s] とするとき、2-4 で述べた通り、 $v_f = 0.3\bar{x}$ が成り立っている。したがって、1 コマの変位 \bar{x} と終端速度 v_f は係数を除いて等しいから、以下では

すでに値がもとまつておらず扱いやすい球の大きさや密度と 1 コマの変位 \bar{x} の関係を調べた後で、間接的に球の大きさや密度と終端速度との関係を求める。

4-3. 終端速度と球の大きさの関係

密度が等しいスチール球 6 種類について、1 コマの変位 \bar{x} と球の半径 r の自然対数を取り、それらの関係を示したのがグラフ 4-1 である。



グラフ 4-1 : $\ln r - \ln x$ グラフ

このグラフの点にベストフィットする直線を引くと、以下の関係式が得られる。

$$\ln \overline{\Delta x} = 0.80 + 0.51 \ln r$$

両辺の対数を外すと、

$$\overline{\Delta x} = (2.23r)^{0.51}$$

$\overline{\Delta x}, r$ がそれぞれ次元を持つことを考えると、上式で $\overline{\Delta x} \propto r^n$ の n は簡単な分数で表されると推測される。したがって、

$$\overline{\Delta x} \approx \sqrt{2.23r} = 1.49\sqrt{r}$$

とできる。 $v_f = 0.3\overline{\Delta x}$ より、

$$v_f = 0.45\sqrt{r}$$

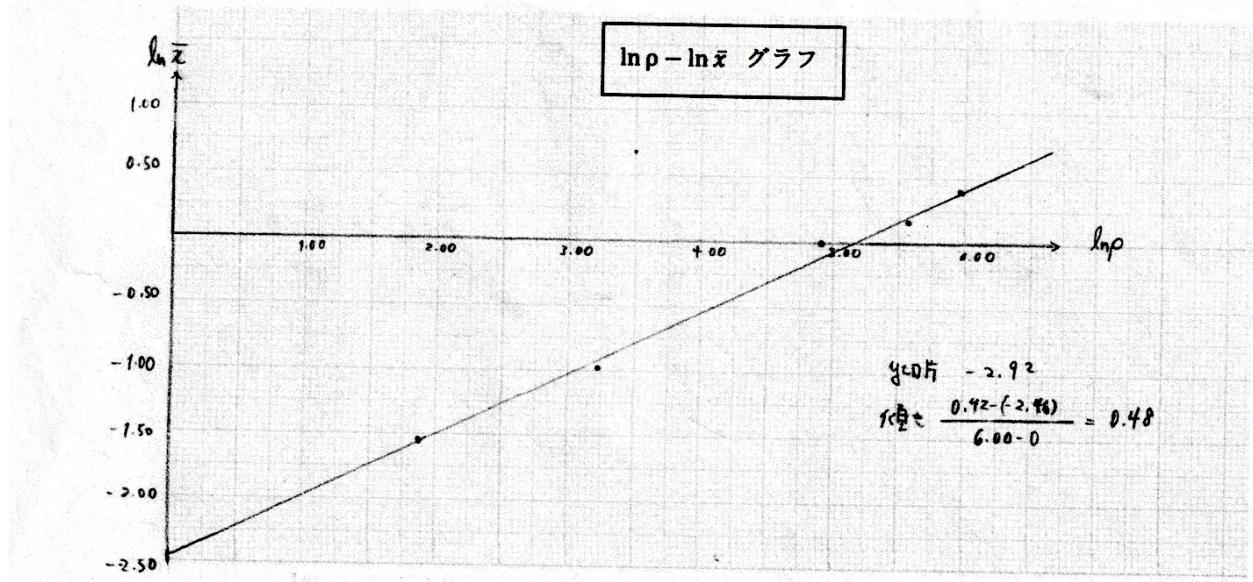
すなわち、終端速度は半径の $\frac{1}{2}$ 乗に比例する。

4-4. 終端速度と球の密度の関係

金属球について、4-3. で求めた関係式

$$\overline{\Delta x} = 1.49\sqrt{r}$$

が成り立つとして、すべての種類の球の半径が 2.5mm になったときの 1 コマの変位 $\overline{\Delta x}$ と、球の密度から水の密度を引いた値 ρ の対数を取り、それらの関係を示したのが次ページのグラフ 4-2 である。

グラフ 4-2 : $\ln \rho - \ln \bar{x}$ グラフ

このグラフにベストフィットする直線を引くと、以下の関係式が得られる。

$$\ln \overline{\Delta x} = -3.18 + 0.50 \ln \rho$$

両辺の対数を外すと、

$$\overline{\Delta x} = \left(\frac{\rho}{24.0} \right)^{0.50}$$

とできる。 $\overline{\Delta x}, \rho$ がそれぞれ次元を持つことを考えると、上式で $v_f \propto \rho^n$ の n は簡単な分数で表されると推測される。したがって、

$$\overline{\Delta x} \approx \sqrt{\frac{\rho}{24.0}} = 0.204\sqrt{\rho}$$

とできる。 $v_f = 0.3\overline{\Delta x}$ より、

$$v_f = 0.018\sqrt{\rho}$$

すなわち、終端速度は球の密度から水の密度を引いた値 ρ の $\frac{1}{2}$ 乗に比例する。

4-5. 終端速度と球の性質の関係

4-3, 4-4 での考察により、球の終端速度と半径・密度の関係は、 k を比例定数として以下のように表さるとできる。

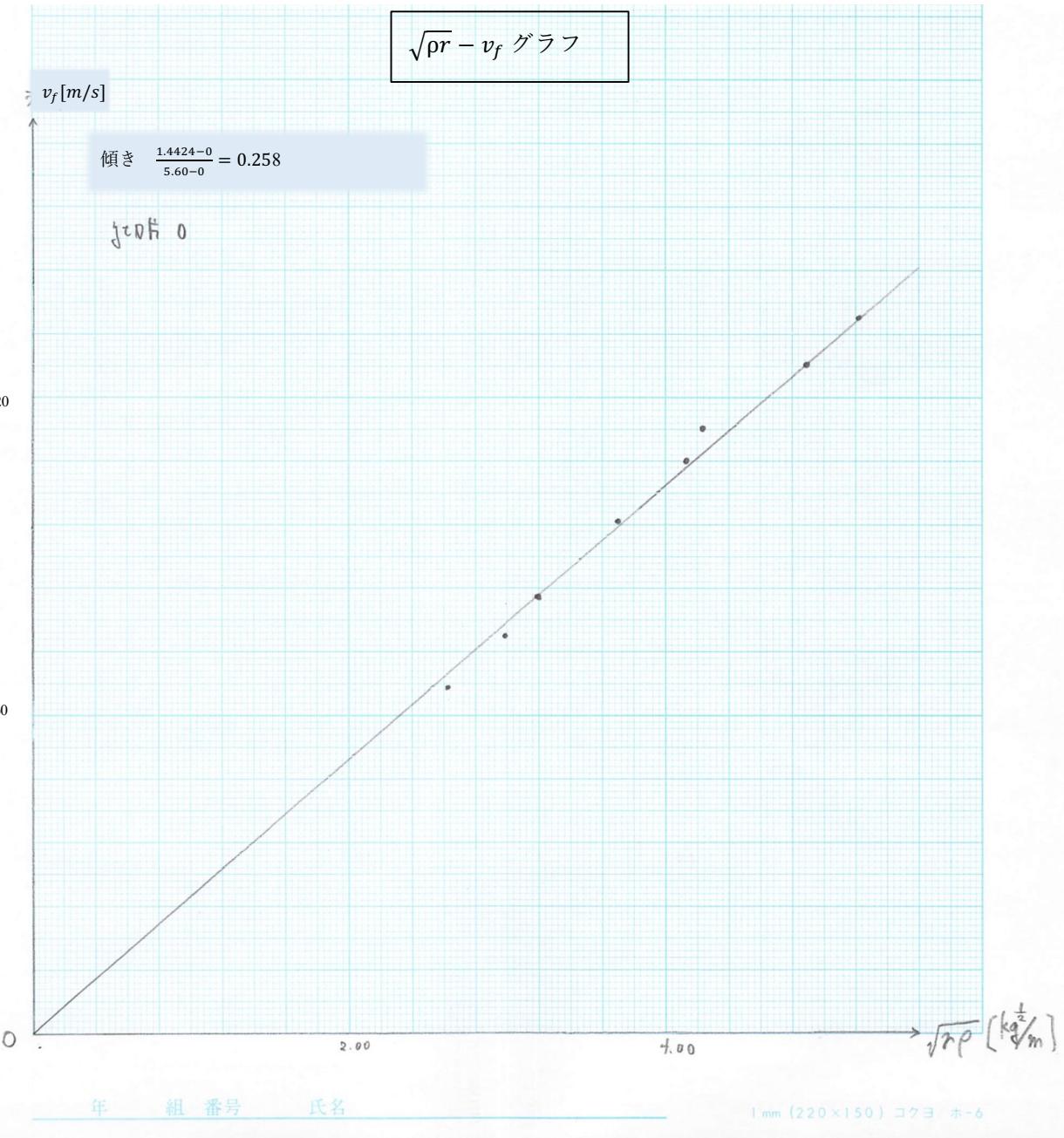
$$v_f = k\sqrt{\rho r}$$

v_f : 終端速度[m/s]

ρ : 球の密度から水の密度を引いた値[kg/m^3]

r : 球の半径[m]

この v_f と $\sqrt{\rho r}$ の関係をグラフにすると、次ページに示すグラフ 4-3 のようになった。なお、手書きのグラフをスキャンした後で、 v_f 軸の座標と傾きの式に一部誤りが見つかったため、コンピュータ上で編集している部分がある。

グラフ 4-3 : $\sqrt{\rho r} - v_f$ グラフ

グラフ 4-3 から、比例定数 k は $k \approx 0.258$ となり、

$$v_f = 0.258\sqrt{\rho r}$$

と表せる。

4-6. 関係式の説明

4-5 で得られた関係式

$$v_f = 0.258\sqrt{\rho r}$$

が成り立つ理由を、終端速度で落下する球体と水粒子の簡単なモデルを用いて説明する。

[モデル]

終端速度 v_f で落下している球体に水の粒子(質量を m とする)が衝突する。水粒子の運動は球の運動に比べてはるかに小さく、無視できる。球は終端速度 v_f で自身の下にある水を押すので、球と衝突した水粒子の速度も v_f になると考えられる(図 4-1)。このとき、球が水粒子 1 つから受ける力積は

$$I = mv_f$$

である。球は微小時間 Δt の間に距離 $v_f \Delta t$ だけ落下するので、水の密度を ρ_w とすると、微小時間 Δt の間に球が押しのける水の体積は、球の断面積を S として

$$\rho_w S v_f \Delta t$$

と表される(図 4-2)。したがって、球が水から受ける抵抗の大きさ F は、 v_f が時間に依存しない定数であることに注意すると、

$$F = \frac{dI}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\rho_w S v_f \Delta t \cdot v_f}{\Delta t} = \rho_w S v_f^2$$

とできる。

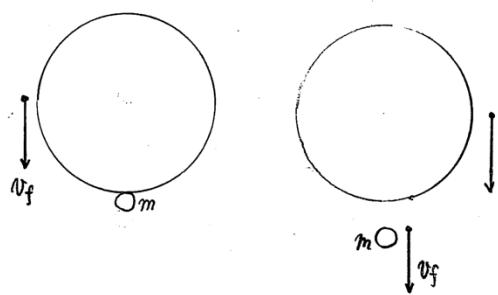


図 4-1：球と水粒子のモデル

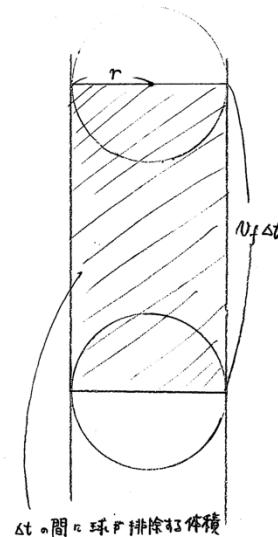


図 4-2：球の微小時間 Δt の運動

ここで、球の力の釣り合いの式は、球の密度を ρ_s 、体積を V とすると、

$$\rho_s V g = \rho_m V g + \rho_w S v_f^2$$

したがって

$$v_f = \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w)Vg}{\rho_w S}} = \sqrt{\frac{4\pi g}{3\rho_w} (\rho_s - \rho_w)r}$$

となり、 $\rho = \rho_s - \rho_w$ を用いると、

$$v_f = \sqrt{\frac{4\pi g}{3\rho_w}} \cdot \sqrt{\rho r}$$

とできて、4-5の関係式が得られた。ここで、参考文献によると、流体の抵抗には粘性抵抗と慣性抵抗の2種類があり、慣性抵抗の場合は、抵抗の力の大きさは、物体の速度の2乗に比例する。したがって、このモデルは慣性抵抗を考えているとすれば、現実に存在する流体の抵抗を考えたことになる。

このモデルにおいて、 $v_f = k\sqrt{\rho r}$ 式の比例定数 k は

$$k = \sqrt{\frac{4\pi g}{3\rho_w}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 9.8}{3 \times 1000}} \approx 0.203$$

であり、グラフ 4-3 から求めた比例定数との誤差は

$$\frac{0.203 - 0.258}{0.258} \times 100 = -21.4\%$$

である。実測値が理論値よりも大きくなった理由について、以下のような修正モデルを考えて説明する。

[修正モデル]

球が落下する際、球は自身の下にある水を下に押し込むが、球の端の方の水は、球の横に逸れることができるために、その押し込まれ方は小さい。したがって、球が付与する運動量は元のモデルで考えた値 $F = \rho_w S v_f^2$ よりも小さくなる。したがって、比例定数は元のモデルの値 $k = 0.2026$ よりも大きくなり、実測値により近づくと考えられる。

以上のように、修正モデルを考えることで、実際に水が球に対してどのように動いているのかを見ない限りは、モデルで述べたような現象が実際に起きているかはわからず、モデルの現実性は疑問として残る。そこで、以下のような追加実験を行った。

5.追加実験

5-1.実験の目的

考察で述べたモデルあるいは修正モデルで説明された現象が実際に起こっているか観察するため、チョークの粉を水中に散布して水の流れを可視化し、球が落下するときの水の流れを観察する。

5-2.実験方法

円筒型容器の底に、黒板消しからとった細かいチョークの粉をまきいれ、それから水を入れる。チョークの粉は水中を漂うので、水の流れが可視化される。さらに、チョークの粉の質量はとても小さいので、チョークの粉の動きは、付近の水の動きと等しいと考えられる。この状態で球を落とし、チョークの粉の動きを観察して、水の動きを調べた。

5-3.実験結果

- ① 球の最下点付近に当たったチョークの粉は、そのまま球とともにしばらく下に落ちて行った後、球から離れた。
- ② 球の最下点付近にはなかったが、球の通過経路上にあった粒子は、しばらく球に引きずられて落下した後、落下をやめ舞ったり、上に上昇したりした。

以上の動きを図 5-1 に示す。

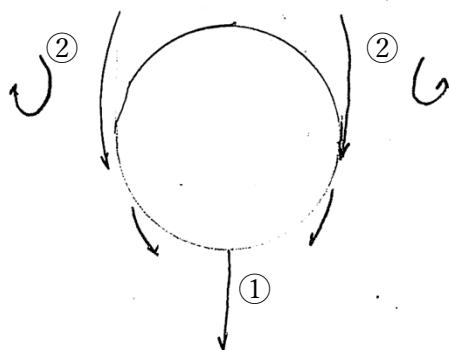
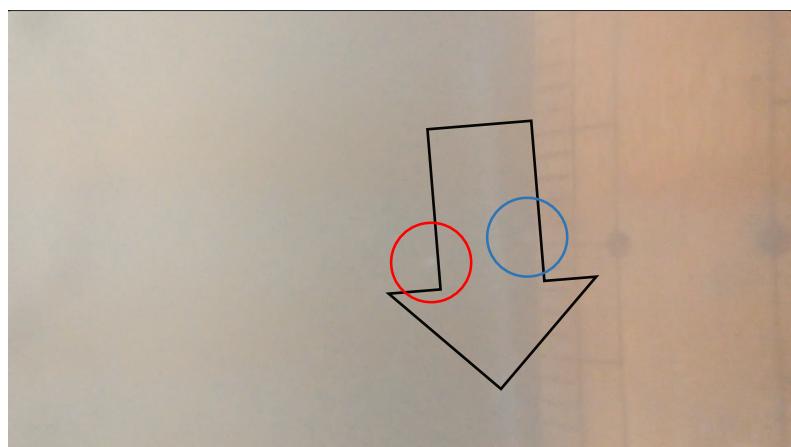
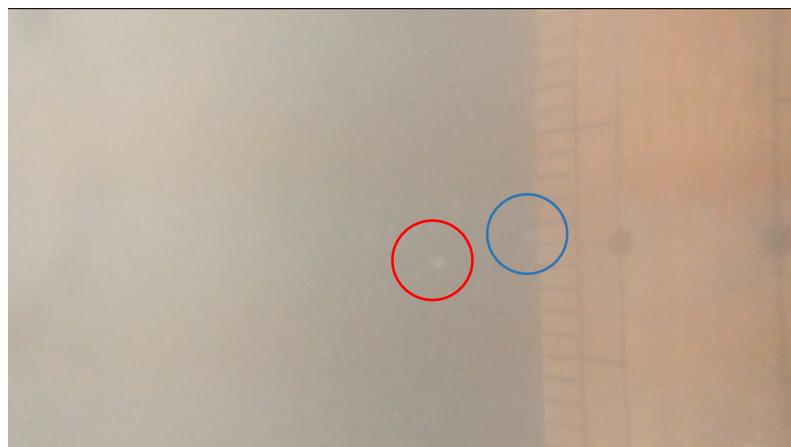


図 5-1：球の周りのチョークの粉の流れ(矢印で示し、上記の流れの種類と対応する番号をつけた)

以下の写真 5-1(a)~(c)では、球によって押し込まれたチョークの粉の動きが確認できる。(a)では、赤丸内と青丸内にそれぞれ1つずつ粉がある。(b)では球が2つの粉の付近を通過している。白灰色の線となって見えているが、半径4mmの球を落としているので、ものさしのめもりと比較して、実際には矢印の大きさくらいの球が通ったと考えられる。この際、赤丸の粉と青丸の粉はともに球の経路上にあり、(c)で球に押し込まれて下向きに運動している様子が観察される。このように、球の通過経路上にある粉が押し込まれ、下に運動する様子が観察できた。その一方で、前ページで述べた①と②の動きをする粉について、どちらの方が押し込まれ方が強いかということは、明確には観察できなかった。



上から写真 5-1(a),(b),(c)

5-4. 考察

チョークの粉の観察によって、球の経路上にあるチョークの粉は球によって押し込まれ、下に運動していることがわかった。チョークの粉は質量が非常に小さく、その動きは粉が位置する水の流れと同じであることを踏まえると、球の通過経路上にある水も球によって押し込まれ、下向きに運動する、と考えられる。このことは、「球が水分子を押し込んで水に運動量を与えることで抵抗が生じている」とするモデルを支持している。したがって、実験の考察で述べたモデルは現実性の高いものであるといえる。

一方で、球の経路の端の方の水は、球の経路の中心付近の水よりも押し込まれ方が小さいかどうかは確認できず、修正モデルが正しいかどうかは、今回の実験では結論付けることができなかった。

6.まとめ

今回の研究の目的は、球体の終端速度が大きさや密度によってどのように変わるのかを調べる、というものであった。この目的のために、円筒容器内を落下する金属球について、「球体の終端速度 v_f 」と「球の半径 r 」、「球の密度から水の密度を引いた密度 ρ 」の関係を調べた。実験により、以下の関係式が得られた。

$$v_f = 0.258\sqrt{\rho r}$$

この関係式が成り立つ理由を説明するため、「終端速度で落下する球が自身の下にある水を押し下げ、水粒子が球と同速度で運動し始めることで、球が受ける力積の時間微分が水の抵抗力である」とするモデルを考えた。このとき終端速度は、水の密度を ρ_w として

$$v_f = \sqrt{\frac{4\pi g}{3\rho_w} \cdot \sqrt{\rho r}}$$

と表された。しかし、この場合

$$v_f = 0.203\sqrt{\rho r}$$

となり、実測値の場合と比べて比例係数が 21.4% 小さい。この理由を説明するため、「球の端の方の水は、球の横に逸れることができるため、球による押し込まれ方は小さい。その結果、球が水に付与する運動量はモデルよりも小さく、抵抗力の大きさもモデルより小さい。したがって、比例定数はモデルの理論値よりも大きい値をとるはずである」とする修正モデルを考えた。

さらに、これらモデルが実際の現象に合致しているかを確かめるため、落下する球体の周りの水の流れを、チョークの粉を用いて可視化し、球の経路上の水の流れを調べた。すると、

- ① 球の最下点付近に当たったチョークの粉は、そのまま球とともにしばらく下に落ちて行った後、球から離れた。
- ② 球の最下点付近にはなかったが、球の通過経路上にあった粒子は、しばらく球に引きずられて落下した後、落下をやめ舞ったり、上に上昇したりした。

という 2 種類の粉の動きが観察された。これらはともに、球の通過経路上の水が球に押し込まれていることを示しており、元のモデルはある程度正しく現象を記述していたといえる。その一方で、球が通過した瞬間にどちらの方が強く押し込まれていたかということは、明確には観察されなかった。したがって、修正モデルが現実の現象を記述できているかどうかは、今回の実験からは結論付けられなかった。

7.今後の展望

今回の実験では行うことができなかったが、あらゆる速度の球に対して関係式

$$v_f = 0.258\sqrt{\rho r}$$

が成り立つかを調べることが望まれる。物理チャレンジ独習ガイド（物理オリンピック日本委員会編・杉山忠男著、丸善出版、2016年）によると、今回考えた慣性抵抗とは別に、物体の速度に比例する粘性抵抗があるという。今回の実験ではチョークの粉によって水流を可視化したが、同様の方法で、慣性抵抗と粘性抵抗における、物体付近の水の流れ方の違いを調べることも可能だと考える。実際、追加実験の間に、興味本意でプラスチック型カプセルの中に水を入れて、密度を非常に小さくした球を観察したところ、金属球とは異なりチョークの粉が表面を緩やかに通り過ぎていく様子が観察された。しかし、プラスチック型カプセルは半径が大きく、壁から反射した水の影響を受けて横揺れしやすい。また、カプセルの結合部分が出っ張っていて完全な球ではないなど、誤差が大きく、測定には向いていない。金属球と同じ大きさで、金属球よりもはるかに密度の小さい球、あるいは中空の金属球があれば、それらについて実験することで、慣性抵抗と粘性抵抗の違いを明らかにすることも可能だろう。

8. 参考文献

物理オリンピック日本委員会編・杉山忠男 物理チャレンジ独習ガイド（丸善出版 2016年）

9. 謝辞

甲陽学院高等学校の藤原・倉本両先生と同中学校の江本先生には、実験室や実験器具の提供、実験を行う上での助言などをしていただきました。深く感謝申し上げます。

この部誌の作成に関わった部員の紹介

1年 安藤祐輝
進藤亮太

2年 小野祐

以上の3名である。部員の紹介については、以下のサイトを参照されたい。



<https://koyophy.netlify.com/page/クラブ紹介/>

※甲陽学院物理部のホームページ上にある部員紹介記事へ飛ぶ。

終わりに

今年の物理部は1年生3人、2年生1人、（そして受験等で忙しいため音展活動にはあまり参加しておられませんが、常に支援してくださった3年生3人）と少人数でしたが、よく頑張ったと思います。事情により部長が音展当日欠席しますが、1年生が頑張って盛り上げてくれると信じています。改めまして、本日は物理部にお越しいただきありがとうございました。

この部誌のVol.1冒頭で紹介した言葉は数学に限った話ではなく、物理にも当てはまると思います。AINシュタインやファインマンのようになれるかはともかく、彼らのように想像しようと努力することは誰にでもできますし、それは楽しい過程でもあります。ところで、日本の數学者久賀道郎が、冒頭の言葉に送った‘返歌’は、次のようなものです。

冒頭の言葉への返歌

あなたがガウスになれるかどうかは神のみが知りたまう。そして、どうしてもガウスになれるんでなければイヤだ、さもなければ数学なんかやってもしょうがないと言われる方には、こう申し上げます：

あなたは数学が好きなのではない。何か別のものが好きなのです。

久賀道郎