

# 物理チャレンジ 2009

## 実験問題

2009年8月4日(火)

諸注意・実験器具確認 8:30～8:40  
実験問題にチャレンジ 8:40～13:20  
実験器具後片付け 13:20～13:30

実験問題へチャレンジを始める前に下記の **<注意事項>** をよく読むこと。

チャレンジ開始後、次ページ以降に記載の**実験の目的**や**実験で使用する装置・部品**などを読み、そのうえで、実験問題 I, II の**課題 1**から**課題 4**の順に取り組むこと。

### <注意事項>

1. 開始の合図があるまで、問題冊子、解答用紙および方眼紙が入った封筒、実験器具箱を開けてはいけない。
2. 解答用紙のすべてのページおよびすべての方眼紙の右上隅に、チャレンジ番号と氏名を記入すること。
3. 実験結果や計算結果、式の変形など、採点して欲しい事項は解答用紙の所定の場所に記入すること。下書き用紙は回収・採点しないので、解答はすべて解答用紙と方眼紙に記入すること。
4. 持参した筆記用具と、与えられた実験装置、部品、定規、電卓、ビニールテープ以外は使用してはならない。
5. 実験中に部品を壊した場合には、1回だけ新しいものと交換できるので、手をあげて監督者に申し出ること。2回以上同じ部品を壊した場合には、さらに新品と交換できるが、減点となる。ただし、数には限りがあるので、交換できない場合もある。
6. チャレンジ開始後から 12:00 まではチャレンジを終了することはできない。
7. チャレンジ時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき、あるいは質問があるとき、チャレンジを終了するときには、手をあげて監督者に知らせること。
8. 終了の合図があれば、解答用紙とグラフ用紙を封筒の中に入れ、机におく。その後、実験器具をもと通りに箱に入れること。また、机に貼られたチャレンジ番号と氏名が書かれた紙をはがし、箱に張り付けること。問題冊子と下書き用紙は持ち帰ってよい。

## 実験問題 I (ばねの弾性実験)

### 実験に向けて：

実験のテーマは、プラスチックばねを使用したばね定数の測定と、その測定結果を用いて、おもりを付けずにばねをつり下げた時の、ばね自体の質量によるばねの振動周期を調べて考察することである。

よく知られているように、万有引力や電磁気のクーロン力は 2 物体の距離が離れるにしたがって弱くなる。他方、距離が離れるにしたがって引きつける力が強くなる力も存在する。例えば、2つのクォーク粒子間にはたらく力は遠くに離すほど作用が強くなる。このように、自然現象の中にはさまざまな力が現れている。この実験では、距離が離れるに従って引きつける力が強くなる身近な例として、ばねの弾性力を取り上げた。

ばねの弾性力は平衡位置からのずれの大きさに比例し、ずれた部分にはもとに戻そうとする力がはたらくため、振動現象が現れる。ばねの伸縮に伴う振動が伝わっていく波は音波にみられると同じく縦波で、弦の振動や電磁波のような横波とともに、われわれの身の回りに数多く見受けられる現象である。

### 実験の目的：

ばねを引っ張るとばねは伸び、伸びの長さが加えた張力に比例することはフックの法則として知られている。そのときの比例係数をばね定数と言い、ばねを特徴づける定数である。水平に張った丈夫な支え糸をばねの輪の中に通してばねを水平に支え、ばねの一端を板に固定して他端に軽い細糸を付け、支え糸に沿って軽い細糸を水平に引っ張る。軽い細糸は水平にのびされ、仕切り板に取り付けられた定滑車を通して鉛直下向きに曲げられ、先端には留め具（フック）が取り付けられている。留め具（フック）におもりを掛けることによりばねの張力を調整し、ばね定数を求める。

ばねの質量が無視できる軽いばねにおもりを付けて鉛直につるし、静止した位置から少しおもりを下げて静かに離すと、おもりは振動をはじめますが、この振動についてはすでに学んでいることと思う。それでは、ばねの質量を考えに入れたときのおもりの振動はどうなるであろうか。おもりをまったく付けずに極端な場合でも、ばね自体には質量があるため、同様な振動をはじめます。では、どのくらいの違いがでるであろうか。

実験では、ばねの張力とばねの伸びを測定してばね定数を求め、ばね定数がばねの長さによりどのように変化するか調べる。次に、ばねの向きを水平から鉛直に変え、ばねにおもりを付けずにつり下げ静止させる。ばねの下端部を静止の時の位置より少し押し上げ離すと、ばねは自体に質量があるため振動をはじめます。ばねにおもりを付けずに、ばね自体の質量を考慮した振動が、ばねにおもりを付け、ばね自体の質量を無視した時に予想される振動と、どのように異なるか直接測定して確認し理解する。

### 実験で使用する装置・物品：

ばねの弾性実験装置を以下の写真に示す。

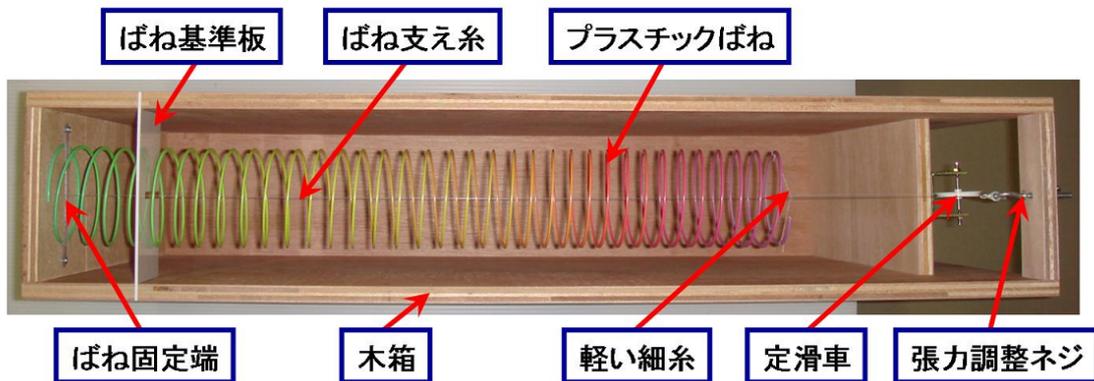


写真 1-1 ばね弾性実験装置上面図

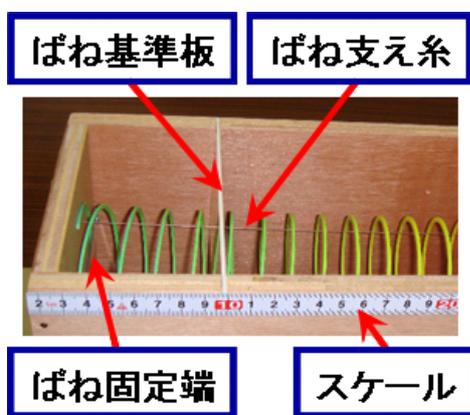


写真 1-2 端部拡大図

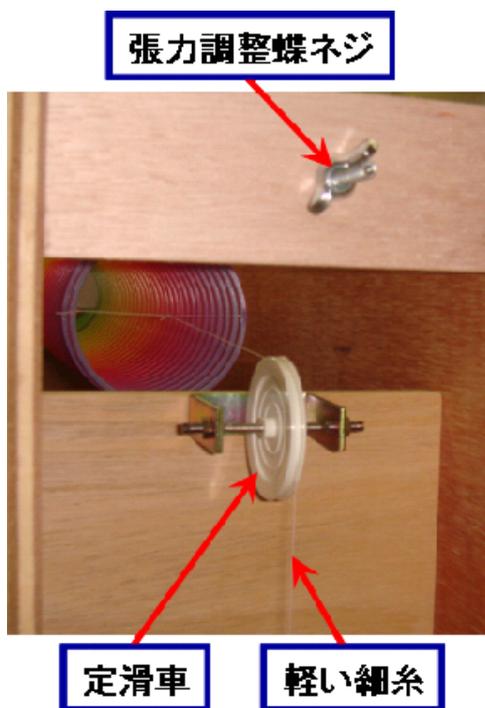


写真 1-3 定滑車拡大図

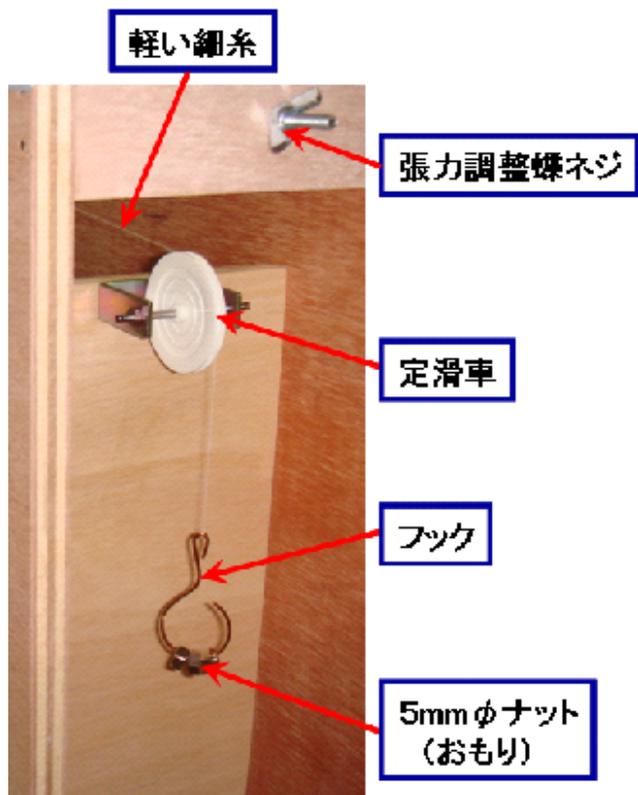


写真 1-4 フックとおもりの拡大図

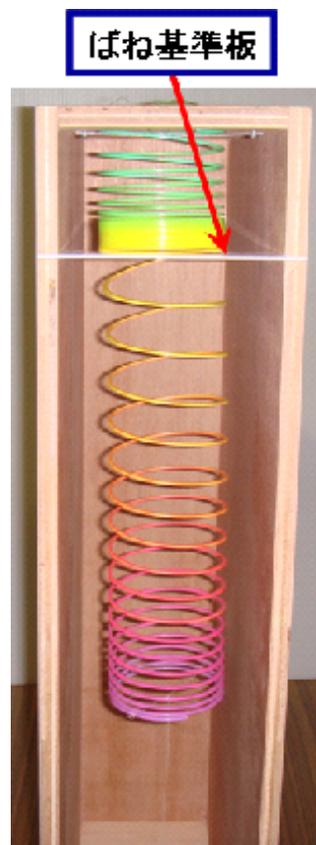


写真 1-5 ばねつり下げ図

実験装置は、

- (1) 木箱,
- (2) ばね固定用プラスチック細板,
- (3) ばね基準板,
- (4) ばね支え糸,
- (5) 張力調整ネジ,
- (6) プラスチックばね,
- (7) 軽い細糸,
- (8) 定滑車,
- (9) フック,
- (10) 5mmφナットのおもり,
- (11) 赤印厚板 (伸び測定用),
- (12) 小型プラスチック定規 (つり下げ伸び測定用),
- (13) 黒印ばね支持板 (つり下げ振動開始用),
- (14) ストップウォッチ

で構成されている。

以下各物品について説明する。

◆木箱

ばね定数測定には写真 1-1 のように木箱を横にして、木箱に沿ってばね支え糸を水平に張り、支え糸によってばねを水平に支える。ばねつり下げ実験の時は、張力調整ネジをはずしてその面を下にし、写真 1-5 のように木箱を立ててばねをつり下げる。つり下げるばねの長さは、ばね基準板を差込み調整する。

◆ばね固定用プラスチック細板

ばねの端の一巻きを木箱に固定するのに使用する。この透明プラスチック細板と木箱の板の間にばねの端の一巻きを差し込んだり引き出したりする。ばねの切り口が、写真 1-1 のように上側に来るようにする。留めネジは動かさない。

◆ばね基準板

白いプラスチック板で、写真 1-1 のように木箱の両方の横板に渡って板の切れ目に差し込む。ばねの伸びはこの位置を基準として求める。写真 1-2 に示されているように、横板に取り付けたスケールで 10cm の場所にばね基準板は位置している。

◆ばね支え糸

丈夫な糸 (テグス) で、写真 1-1 に見られるようにばねの輪の中を通して水平に張り、ばねを水平に保つ。ばね支え糸の一端は糸の張力調整ネジに結びつけられており、写真 1-3 にあるように張力調整蝶ネジを回すことによりばね支え糸の張力を調整する。ばねとばね支え糸の間には摩擦があるため、ばねはおもりに対応して伸びないので、ばね支え糸を手ではじいてばねを適度にゆすり、ばねが等間隔で安定するように調整する必要がある。

◆張力調整ネジ

ばね支え糸の張力は蝶ネジを回して調整する。

◆プラスチックばね

ばね支え糸により水平に保たれ、一端は木箱の板に固定され、約4巻き後にばね基準板が差し込まれて、他端に付けられた軽い細糸を通してばねに張力が加えられる。質量はばねを入れる箱の透明部分に記載されている。

◆軽い細糸

ばねの終端部の直径に沿って付けられ、またその中心から伸びてばねを引っ張っている白のミシン糸である。ばね定数測定の時、ばねから水平に伸びたこの軽い細糸は、定滑車を通して鉛直下向きに曲げられフックに結び付けられている。つり下げ振動実験の時は、十分にたるませて木箱の横板に粘着テープで留めておき、振動実験の邪魔にならないようにする。

◆定滑車

写真 1-3 に示されているように、木箱の仕切り板に取り付けられ、ばねからの水平な細糸を鉛直下向きに曲げる。滑車がなめらかに回転するか実験の始めに確認し、なめらかでない時は、回転軸のねじを回して調整する。

◆フック

写真 1-4 に見られるように、軽い細糸に接続され 5mmφのおもりのナットを掛けて、ばねに張力を与える。

◆5mmφナットのおもり

フックに掛け、ばねに張力を与える。

◆赤印厚板（伸び測定用）

ばねの伸びを測定するのに使用し、赤印が上部に付いているプラスチック板である。軽い細糸が付いているばねの端部に軽く接触させて木箱と直角になるように差し入れ、ばねの端部の位置をスケールで読み伸びを測定する。

◆小型プラスチック定規（つり下げ伸び測定用）

つり下げ実験の時にばねの伸びを測定するのに使用する。

◆黒印ばね支持板（つり下げ振動開始用）

つり下げ実験の時、ばねを下部より支え、少しばねを上を持ち上げてすばやく下ろし、ばねを振動させるのに用いる黒印のプラスチック板である。

◆ストップウォッチ

ばねのつり下げ振動の周期の測定に用いる。スタート・ストップ及びリセットのボタンがある。

## 課題 1. ばね定数の測定

### 課題 1-1. ばねの伸びの実験

フックの法則より自然長からのばねの伸びは、加えた張力に比例する。ばねを水平にし、張力にはおもりの重力を利用してばね定数を求める。

- (1) プラスチックばねを水平に支える支え糸が、ばねの輪の中を通り木製の箱の上側に張られている。支え糸に適度な張力を与えるために、張り加減を調節するねじが木箱の端に取り付けられているので、ねじを調整してばねがほぼ水平になるようにしなさい。ばねの一端は木箱の壁に固定され他端には軽い細糸がばねの直径に沿いほぼ水平に付けられていて、その軽い細糸の中心から同じ軽い細糸がのびて仕切り板の定滑車にかけられ、鉛直下向きに曲げられているのを確認しなさい。軽い細糸の先端にはフックが付けられているので、フックに3個のおもりを掛けてばねが適度に伸びることを確認しなさい。定滑車の動きが鈍いときは、滑車の軸棒のねじを調整し定滑車がなめらかに動けるようにしなさい。

**注意点:** [1]ばねとばねを支える支え糸との間に摩擦があるため、おもりを掛けてもばねは対応する長さに伸びないので、ばねの伸びを測定するときは、常に支え糸を指で何度かはじいてばねをゆすり、ばねの伸びが安定するように工夫しなさい。[2]細糸がばねの直径に沿って接着され、中心からばねを引く構造になっている。直径の細糸がほぼ水平になりばねの支え糸と接触していないことを確かめておきなさい。接触していた時はばね全体を回転させ、直径の細糸をほぼ水平にしなさい。

- (2) ばねの固定端からほぼ4巻伸ばした場所にばね基準板が木箱に差し込まれているのを確認し、ばね基準板から先のばねの巻き数を初期巻き数(整数値)としなさい。写真 1-1 がそうした状態になっている。ばねの終端の位置を測定する時は、ばねの終端部に軽く接触させて赤印厚板(厚さ10mm)を木箱に直角に差し込んで、側面に貼ってあるスケールを読んで、ばねの伸びを出しなさい。
- (3) ばねを引く力が弱いとばねの伸びが不安定になるので、おもりとして初めに5mmφのナットを1個、写真 1-4 のようにフックに掛けた状態を基準とし、そこからナットの数を増やしてばねを伸ばし、張力とばねの伸びの関係を5点以上測定しなさい。ナット1個の質量は1.1g、重力加速度の大きさは $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ としなさい。
- (4) ばね基準板を抜き取り、ばね基準板より先のばねの巻き数を初期巻き数の2/3程度の整数値になるようにばね基準板を木箱に差し込みなさい。細糸の先端のフックにおもりのナットを掛け、ばねの伸びと張力との関係を5点以上測定しなさい。ばねの支え糸を指ではじいてばねをゆすり、ばねの伸びが一様に安定させることに注意して測定しなさい。
- (5) ばね基準板を抜き取り、ばね基準板より先のばねの巻き数を初期巻き数の1/2程度の整数値になるようにばね基準板を再度木箱に差し込みなさい。同様にばねの伸びと張力との関係を5点以上測定しなさい。

- (6) ばね基準板より先のばねの巻き数を初期巻き数の  $1/3$  程度の整数値になるようにばね基準板を木箱に差し込み、ばねの伸びと張力との関係を 5 点以上測定しなさい。

## 課題 1 - 2. 実験の整理・考察

- (1) おもりのナットを 1 個掛けた時を基準とし、ばね基準板より先のばねの長さを測定してばねの伸びを求め、初期巻き数 ( $n_0$ ) (●印で記入),  $n_0 \times 2/3$  程度 (▲印で記入),  $n_0 \times 1/2$  程度 (○印で記入),  $n_0 \times 1/3$  程度 (■印で記入) の各ばねについて、伸びを横軸にとり、ばねを伸ばす力を縦軸にしたグラフに測定点を記入し、グラフ上の各点が一つの直線の近傍に位置することを確認しなさい。
- (2) 測定により得られた直線の傾きから、各ばねに対するばね定数 ( $k_{n_0}, k_{n_0 \times 2/3}, k_{n_0 \times 1/2}, k_{n_0 \times 1/3}$ ) を求めなさい。
- (3) 初期巻き数  $n_0$  のばね定数  $k_{n_0}$  と  $n_0 \times 2/3$  巻き及び  $n_0 \times 1/3$  巻きの各ばね定数  $k_{n_0 \times 2/3}, k_{n_0 \times 1/3}$  との関係式を、測定値から求めなさい。また、初期巻き数  $n_0$  のばね定数  $k_{n_0}$  と  $n_0 \times 1/2$  巻きのばね定数  $k_{n_0 \times 1/2}$  との関係式も測定値から求めなさい。

## 課題 2. ばねのつり下げ実験 (おもり無し自重のみ)

### 課題 2 - 1. 自重によるばねの伸び

- (1) ばねをつり下げる実験を行う。軽い細糸のフックからおもりをはずした後にはばね基準板を引き抜き、ばねの固定端を引き抜いて木箱からはずしなさい。ばね支え糸の張力調整用のねじをゆるめて抜き取り、支え糸をばねからはずして実験の邪魔にならないように木箱の側面に粘着テープで固定しなさい。定滑車が付いている側を下にして木箱をゆっくりと立てなさい。ばね基準板を差し込み、その上にばねを乗せて、ばねの上部の端の一巻きを、引き抜く前と同じ状態になるように、ばね固定用プラスチック細板と木箱の間に押し込みなさい。手でばねを受けながら基準板を引き抜き、固定端から約 10 巻きの位置に再度基準板を差し込みなさい。ばねを静かにつり下げ、振動させて下端が木箱に接触しないことを確認しなさい。写真 1-5 がそうした状態になっている。接触した場合あるいは短すぎると思われた時は、基準板を引き抜き基準板より上側のばねの巻き数を増減させなさい。ばねの下端についている軽い細糸は振動実験の邪魔にならないように、十分にたるませて木箱の側面等に粘着テープで固定しなさい。

ばね全体の巻き数と基準板から先のばねの巻き数の比から、振動するばねの質量を求めなさい。ただし、ばね全体の質量はばねを入れる箱の透明部分に書かれている。

- (2) ばねを静かにつり下げて静止させなさい。ばねは質量があるため自然に伸び、写真 1-5 に見られるように上部のばねの伸びの方が下部の伸びより大きくなる。下端部の軽い細糸がばねの伸びに影響を与えないように注意しなさい。

- (3) ばねの上部から 8 巻きについて、一卷き毎のばねの長さを、プラスチック定規を用いて測定しなさい。

#### 課題 2-2. 実験の整理・考察

- (1) 課題 1-2 で求めたばね定数の測定値を基にして、ばね一卷きのばね定数を求め、また求めた方法も書きなさい。
- (2) ばね一卷きのばね定数を用いて、つり下げているばねの上部から 8 巻きについて、一卷き毎の伸びを計算し、計算方法とともに記入しなさい。また、対応するばねの長さの測定値を記入しなさい。

#### 課題 2-3. 自重によるばねの振動

ばね自身に質量があるため、おもりを付けなくてもばねは伸び、平衡位置から下端部をわずかに変位させ離すと、ばねは振動をはじめめる。この実験では、振動の周期を測定し、ばねの質量を無視しておもりを付けたときに予想される振動の周期と比較検討する。

- (1) ばねの下端部の軽い細糸が振動に大きな影響を与えないように注意して、水平にした黒印ばね支持板の上にはばねを乗せ、下端部の平衡位置より例えば 3cm 程度持ち上げてすばやく黒印ばね支持板を下げ、ばねに振動を与えなさい。ストップウォッチを用いて、振動の 10 周期を測定しなさい。同じ測定を 3 回繰り返しなさい。
- (2) 振動部のばねの巻き数が前実験の 3/4 程度の整数値になるように、基準板を差し込み直しなさい。軽い細糸に注意しながら 10 周期を測定し、同じ測定を 3 回繰り返しなさい。
- (3) 振動部のばねの巻き数が 1/2 程度の整数値になるように基準板を再度差し込み、ばねをつり下げなさい。10 周期を測定し、同じ測定を 3 回繰り返しなさい。
- (4) 振動部のばねの巻き数が 1/4 程度の整数値になるように基準板を差し込み、黒印ばね支持板を用いてばねを振動させ 10 周期を測定しなさい。同じ測定を 3 回繰り返しなさい。

#### 課題 2-4. 実験の整理・考察

- (1) 始めに設定した巻き数の 4/4, 3/4 程度の整数値, 2/4 程度の整数値, 1/4 程度の整数値のそれぞれの巻き数のばねについて、質量  $m$  とばね定数  $k$  を算出し、その比  $m/k$  を単位を含めて記入しなさい。
- (2) 4 種類の巻き数のそれぞれのばねに対して周期  $T$  の平均値を求め、記入しなさい。
- (3) 両対数グラフ用紙（解答用紙では、上（右）端が下（左）端の 500 倍である）に、質量とばね定数の比  $m/k$  を横軸に、ばね振動の周期  $T$  を縦軸にして実験点を記入し、直線と考えて傾きを出しなさい。傾きから周期  $T$  と質量とばね定数の比  $m/k$  との間どのような関係式が成り立つと考えられるか説明しなさい。
- (5) ばね定数  $k_0$  のばねで質量が無視できる時に、質量  $m_0$  のおもりをつり下げて振動させたときの周期  $T_0$  を表す式を導出しなさい。
- (6) 巻き数が 4/4, 3/4 程度の整数値, 2/4 程度の整数値, 1/4 程度の整数値のそれ

それぞれのばねの周期  $T$  と、ばねの自身と同じ質量のおもりを付けた質量の無視できるばねの振動周期  $T_0$  との比を、方眼紙に記入しなさい。また、その結果から、ばねの周期  $T$  と  $m/k$  との関係式を書きなさい。

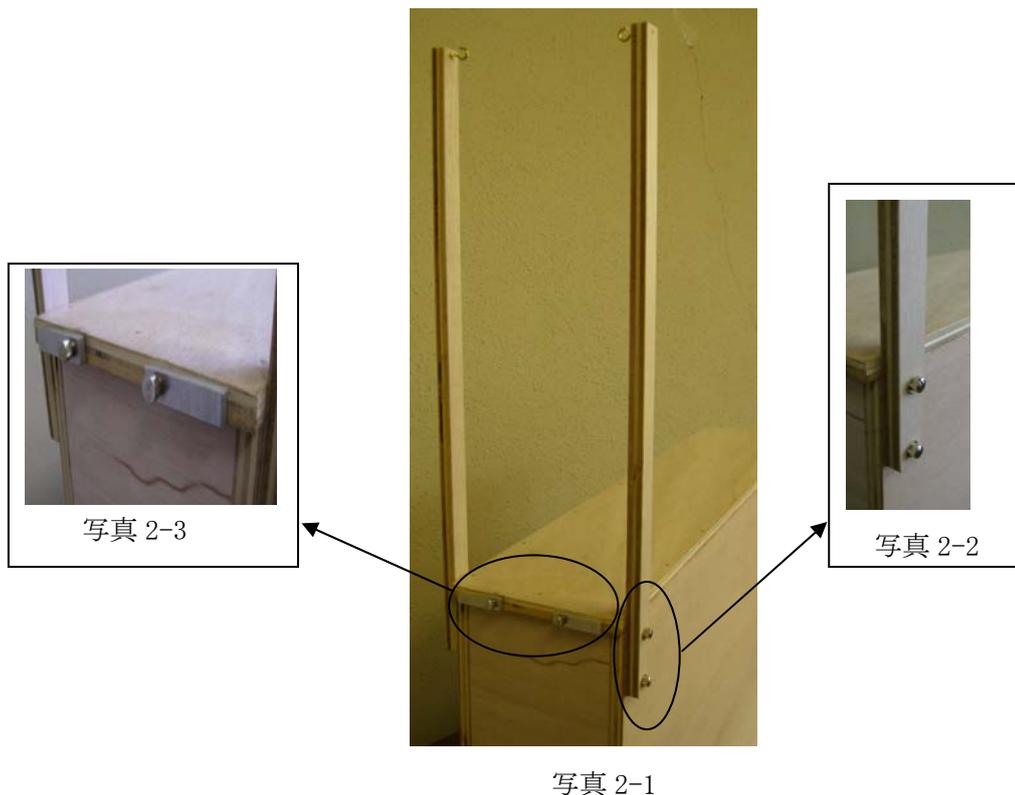
## 実験問題Ⅱ（エネルギーおよび運動量の保存則）

### 実験の目的：

重力中の物体の運動には、重力による位置エネルギーと運動エネルギーとが深く関与する。ここでは投射台を使ってさらに、平面内の物体の衝突におけるエネルギーおよび運動量の保存則を検証する。

### 実験で使用する装置・物品：

この実験では、ある高さから物体を水平方向に飛ばし、その落下位置から、水平に飛ばされた物体の初速度を求める。実験問題Ⅰで使用した箱を上下逆にして、投射実験の架台として使用する。架台は机の端に設置する。この架台の左側側面上部に、写真 2-1 のように、支柱を、上方に取り付けられているフックが内向きなるように 2 本のねじで取り付ける（写真 2-2）。また、長さ 4cm、幅 1cm のアルミの支柱 2 枚を、写真 2-3 のように、架台前面に横向きにねじで止めておく。この支柱の役割は方法(6)で述べる。



飛ばされた物体の着地点を知るために、予想される着地点付近のプラスチック板の上に A4 サイズのトレース方眼紙を置く。移動しないように、角に重し（大きなナット）を置く。その上にカーボン紙をかぶせる。投げ出された物体がこのカーボン紙の上に落下した場合、

カーボン紙をめくると、下にある方眼紙に黒く跡が付いている。その座標を調べることに  
よって、物体の落下位置を定量的に知ることができる。読み取った落下跡には目印を付け  
ておく。落下跡が識別しにくくなったら、随時、方眼紙を交換したり、位置を変えるよう  
にする。

付属品：この実験で使用する投射用の物体として、次の4種類が用意されている。

- ・ ビー玉（大）直径 17mm、重さ 6.2g、 個数 5 個
- ・ ビー玉（小）直径 12mm、重さ 2.5g、 個数 3 個
- ・ 鉄球 直径 16mm、重さ 16g、 個数 1 個
- ・ リング 外形 30mm、肉厚 2mm、 重さ 9g、 個数 1 個

ただし、ビー玉の重さには 0.2g 程度のばらつきがある。

#### 用いる物品リスト

1. プラスチックダンボール 1 枚
2. プラスチック板（片面に罫線の描かれたシートが貼られている） 1 枚
3. ガイドレール付の台 1 台
4. 振り子吊り下げ用支柱（フック付） 2 本
5. アルミの支柱（長さ 4cm, 幅 1cm） 2 枚
6. アクリル棒とその台それぞれ 1 個
7. ビー玉を乗せる台（つりひも付き） 1 個
8. ビー玉（大） 4 個, ビニールテープ付ビー玉（大） 1 個
9. ビー玉（小） 2 個, 鉄球 1 個, リング 1 個
10. 大きなナット（トレース方眼紙おさえ用重し） 8 個
11. サインペン 1 本, カーボン紙 2 枚, トレース方眼紙 6 枚
12. アクリル板（4cm×6cm） 1 枚, アクリル板（3cm×10cm） 1 枚

### 課題3：力学的エネルギーの保存則の検証

#### 実験の目的：

物体の重力による位置エネルギーと、運動エネルギーの関係を調べる。以下の2つの場合について検証する。



写真 2-4



写真 2-5



写真 2-6

**課題3-1.** 支柱から吊り下げられた物体を、ある高さから静かに離し、物体が最下端にきたときの水平方向の速さを求め、最初の物体の位置エネルギーと、最下端での物体の運動エネルギーを比較する

#### 方法

- (1) 写真 2-4, 2-5 のように、架台の左右の支柱に物体を乗せる台をぶら下げ、ダブルクリップのつまみ部分に径の大きいビー玉（直径 17mm）をのせる。
- (2) 支柱を前後に微調整して、写真 2-6 のように、物体を乗せたクリップのつまみが出ているアルミ面が、架台の先端の鉛直上方にくるようにする。このときのビー玉の位置を位置エネルギーの基準にする。そのために、架台上面からビー玉の下端までの距離  $h_1$  を測定しておく。
- (3) この位置で、ビー玉から鉛直に線を降ろしたときの位置 P をプラスチック板上にマー

クする。さらに、ビー玉の下端からプラスチック板上面までの距離  $H$  を測定する。

(4) 写真 2-7 に示すように、ビー玉の乗った台の背後にかけられている糸をアクリル棒に引っ掛け、ゆっくり後方に引っ張りながら移動することによってビー玉を持ち上げる。その際アクリル棒にひっかけた糸の高さを徐々に上にずらしていくとよい。このようにして、ビー玉を架台から 10cm ほど持ち上げる。

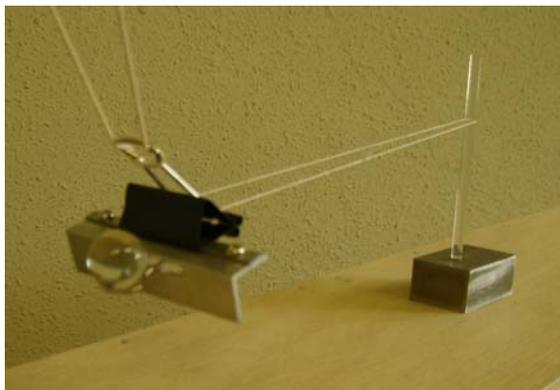


写真 2-7

(5) この状態で、ビー玉の乗った台を引っ張っている糸を、写真 2-8 で示すように、指で静かにアクリル棒からはずす。ビー玉の乗った台がスムーズに前後に振れることを確認する。台がねじれて振れるような場合は、もう一度(2)から調整しなおす。

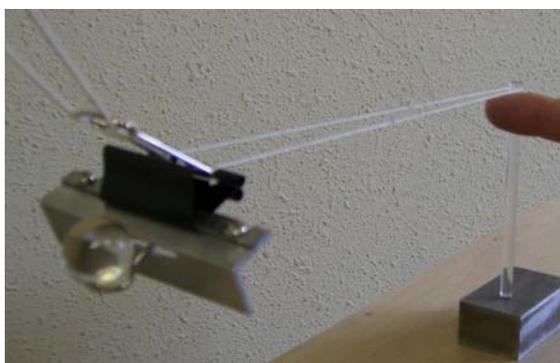


写真 2-8

(6) 台がスムーズに振れることが確認できたら、最下点で物体の乗った台を止めてビー玉を水平方向に飛び出させるために、架台の先端に取り付けた 2 枚の支柱を写真 2-9 のように垂直にしてネジでとめる。この状態で、(4)のように、ビー玉の乗った台を静かに持ち上げる。架台の上面からビー玉の下端までの距離が、 $10\text{cm}+h_1$  になるようにする。ここで、写真 2-8 のように糸をアクリル棒からそっと離す。真下に来たとき、台が支柱にぶつかり（写真 2-10）、ビー玉が慣性により水平に飛び出す。そのビー玉の落ちた位置  $Q$  は、カーボン紙でつけたマークによって知ることができ、水平方向の飛行距離  $S$  が求まる。



写真 2-9



写真 2-10

- (7) 同じ高さからの測定を 5 回行い、それぞれの結果を記録する。
- (8) (3) で測定したビー玉の下端からプラスチック板上面までの距離  $H$  から、ビー玉の落下時間が求まる。さらに、水平方向に飛んだ距離からビー玉の飛び出したときの速さが決まり、運動エネルギーが求まる。
- (9) 測定された、ビー玉の位置エネルギーと運動エネルギーの関係を考察する。
- (10) 位置エネルギーの基準からの高さが 8cm の場合に対して、同じような測定を行い、結果について考察する。
- (11) 以上の実験が終了したら、課題 3-1 で使用した物体を乗せる台および支柱等を架台からはずしてケースにしまう。

**課題 3-2.** 写真 2-11 に示すように、ガイドレールでできた斜面上のある高さから、静かに物体をころがし、最下端で水平方向に架台から打ち出す。この場合の物体の位置エネルギーと運動エネルギーの関係を調べる。物体として、球と円環を用いて測定し、斜面上の落下について物体の形による違いを調べる。

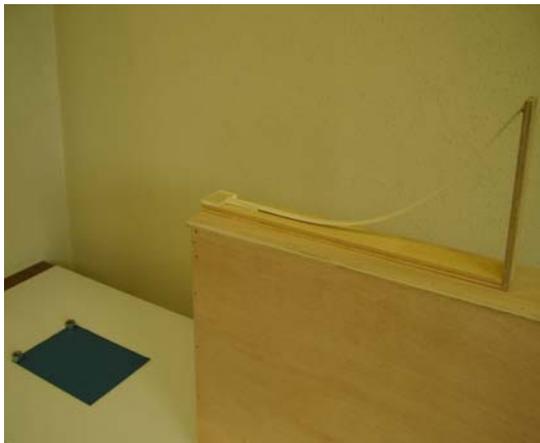


写真 2-11



写真 2-12



写真 2-13

## 方法

- (1) 写真 2-11 に示すようなガイドレールのついた台を、架台の上に設置する。さらに、ガイドレール出口に厚さ 6 ミリのアクリルの板を置く。これによってガイドレールから出た物体はスムーズに水平方向に運動を続けることができる。このアクリル板の中央付近に直径 2 ミリメートルの小さな穴があいている。この穴は、後の実験でビー玉を安定して乗せるための穴である。この穴はアクリル板の中心から前後 10 ミリメートルずれてあいている。後の実験のため、この穴の位置が、ガイドレール出口より、架台出口に近い位置に来るようにアクリル板を置く。
- (2) ビー玉が架台から水平方向に飛び出す真下の位置をプラスチック板上の紙にマークする。ビー玉が落下する高さとして、プラスチック板からアクリル板の上面までの距離  $H$  を測定する。
- (3) 課題 3-1 で使用したのと同じビー玉を斜面上ある高さ（約 15cm 程度）に載せ、写真 2-13 に示すように、ビー玉が滑り落ちないようにプラスチック板で支え、ガイドレールの端にサインペンでしるしを付けておく（写真 2-12）。このときの、ビー玉の滑り台水平面からの高さを測定する。
- (4) ビー玉を止めていた支えを静かに放し、ビー玉をガイドレール上に転がし、滑り台から水平に飛び出させた後、着地した位置から飛行距離を測る。
- (5) 課題 3-1 のときと同じようにビー玉が水平方向に飛び出したときの速さを求める。
- (6) おなじ高さからの落下の測定を 3 回行いそれぞれの結果を記録する。
- (7) ビー玉の位置エネルギーと最下端での運動エネルギーの関係を考察する。
- (8) 同じような測定を大きさの違うビー玉、鉄球および、円環で測定し、それらの結果について考察する。

## 課題 4 : 運動量の保存則の検証

### 実験の目的 :

運動量の保存の法則を、2 物体の直線上の衝突、および平面内の衝突について実験的に検証する。同時に衝突前後における運動エネルギーの変化について調べる。

### 課題 4-1-1. 直線上（一次元）の衝突

#### 方法

- (1) 課題 3-1 で使用した大きなビー玉を前回課題 3-2 の実験と同じようにサインペンでしるしをつけた高さから静かにころがし、滑り台から水平に飛び出させた後、飛行距離を測る。
- (2) アクリル板に空けた小さな穴の上に同じ種類のビー玉を標的として乗せる（写真 2-14）。

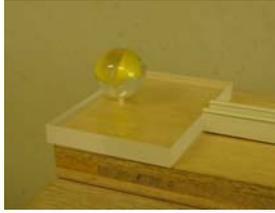


写真 2-14

- (3) (1)と同じようにサインペンでしるしをつけた高さから静かにビー玉をころがし、水平方向の飛び出し口におかれた標的のビー玉に正面衝突させる。衝突されたビー玉の落下の方向が、①の場合の方向から大きくずれているようだったら、ビー玉を乗せているアクリル板の位置を微調整して、できるだけ正面衝突となるようにする。
- (4) 着地した位置からそれぞれのビー玉の衝突後の飛行距離を測定する。
- (5) 同じ測定を3回行う。
- (6) 衝突前後での運動量および運動エネルギーの関係を調べる。また反発（跳ね返り）係数を求める。
- (7) 別に、ビニールテープを張ったビー玉が用意されている。見つからない場合は、手を上げて監督員からもらう。
- (8) テープを張ったビー玉をアクリル板の上に乗せる。テープを張ったところが衝突面となるように置く。
- (9) 前回のビニールテープのはっていない場合の衝突実験と同じ条件で衝突させる。それぞれのビー玉の落下位置を測定する。
- (10) 同じ測定を3回行う。
- (11) これらの測定結果から、衝突前後での運動量および運動エネルギーの関係を調べる。また、このときの反発（跳ね返り）係数を求める。

**課題4-1-2（チャレンジ実験）** 時間に余裕のあるものは、異なる種類のビー玉での正面衝突実験から衝突前後でのエネルギーおよび運動量の関係を調べる。また反発（跳ね返り）係数を求める。

#### 課題4-2. 平面上（二次元）の衝突

##### 課題4-2-1. 大きさ、質量とも同じビー玉の衝突

方法

- (1) 一次元での衝突実験と同じように、斜面の同じ高さからビー玉をころがし、落下位置を計測する。
- (2) 標的となる同じ大きさのビー玉をアクリル板の穴の上に乗せ、アクリル板を正面から横にずらして設置する。
- (3) (1)と同じように、斜面からビー玉をころがし(2)で設置したビー玉に斜めに衝突した

2 球が、水平方向に飛び出して着地した位置を観測する。2 つのビー玉の落下位置が計測しにくい場合は、標的の位置をずらして、衝突させる。2 つのビー玉が、進行方向に対して 30 度から 60 度程度の範囲に飛ぶようにすると観測しやすい。

(4) 標的の位置が決まり、それぞれのビー玉の落下位置がほぼ予想できたら、それぞれの落下位置に方眼紙と、カーボン紙を置く。(方眼紙、カーボン紙は A4 サイズで小さく、広い範囲をカバーすることができないので、あらかじめ落下位置を予想する必要がある)

(5) 衝突実験を行い、それぞれのビー玉の落下位置の座標を読み取る。(1)で計測したビー玉の運動量ベクトルと、衝突後のそれぞれのビー玉の運動量ベクトルとの関係を調べる。

(6) 標的の位置をわずかに移動させ、同じような衝突実験を行い、衝突後のそれぞれのビー玉の運動量ベクトルとの関係を調べる。

(7) これら一連の衝突において、ビー玉の運動エネルギーは、衝突前後でどのように変化したか。

#### **課題 4-2-2. 大きさ、質量のちがうビー玉の衝突**

方法

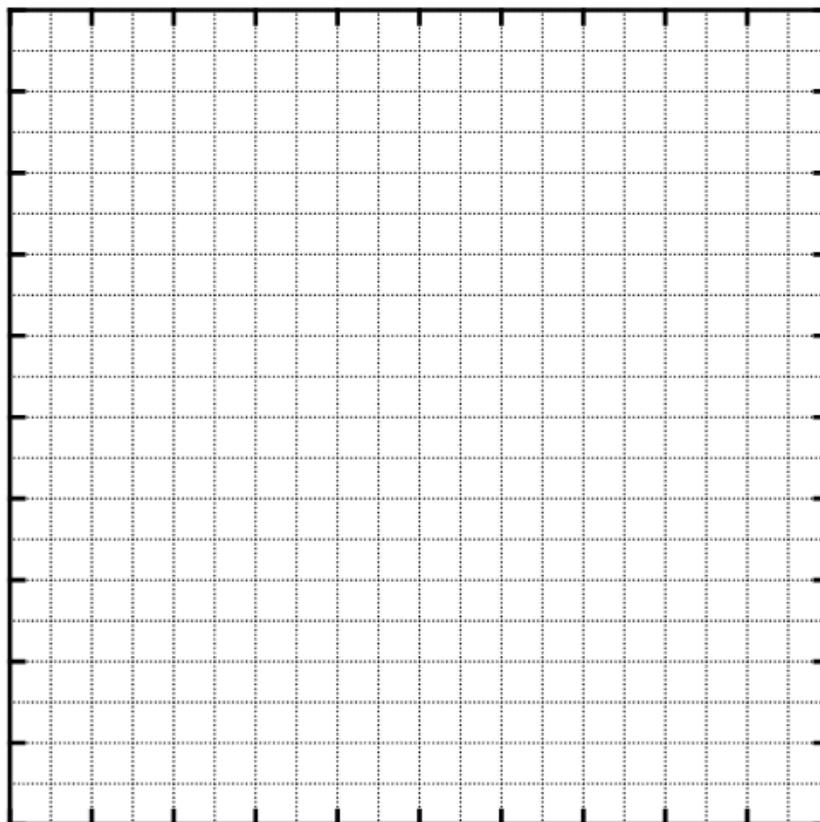
課題 4-2-1 と同じ衝突実験を行う。今回は標的として小さなビー玉を使用する。

(1) 標的位置を微調整することによって、衝突後の 2 つのビー玉の落下位置が、計測可能な範囲になるような条件を見つけて行う。

(2) 適当な条件を見つけたら、前回の実験と同じ方法で衝突前後における、運動量および運動エネルギーの関係を調べよ。

チャレンジ番号	氏 名

課題 1-2 (1)



初期巻き数( $n_0$ )                      巻き

点

課題 1-2 (2)

	巻き数(整数)	ばね定数(N/m)
$n_0$		
$n_0 \times 2/3$ 程度		
$n_0 \times 1/2$ 程度		
$n_0 \times 1/3$ 程度		

点

チャレンジ番号	氏 名

課題 1 - 2 (3)


点
---

課題 2 - 2 (1)

--

点
---

チャレンジ番号	氏 名

課題 2-2 (2)

上から	1 巻き目	2 巻き目	3 巻き目	4 巻き目	5 巻き目	6 巻き目	7 巻き目	8 巻き目
長さの 測定値	cm							
伸びの 計算値	cm							
計算方法								

点
---

課題 2-4 (1)

	× 4/4 巻き	× 3/4 巻き	× 2/4 巻き	× 1/4 巻き
巻き数				
質量 $m$				
ばね定数 $k$				
$m/k$				

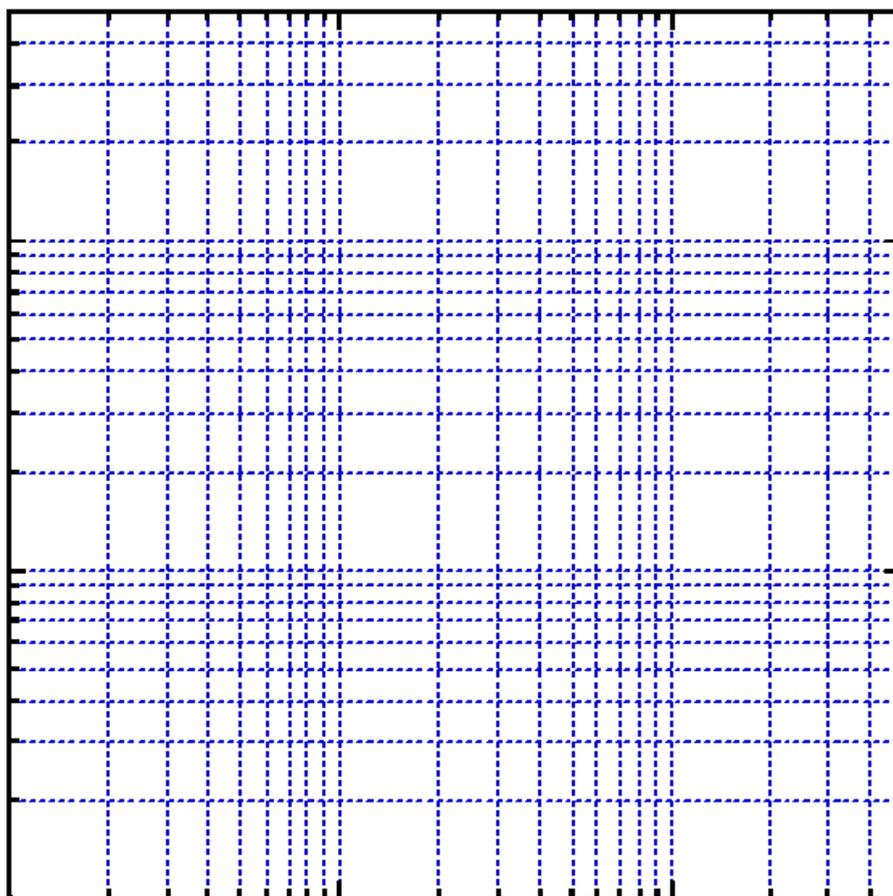
点
---

チャレンジ番号	氏名

課題 2-4 (2)

$\times 4/4$ 巻き	$\times 3/4$ 巻き	$\times 2/4$ 巻き	$\times 1/4$ 巻き
周期 $T$			

課題 2-4 (3)



点
---

説明
----

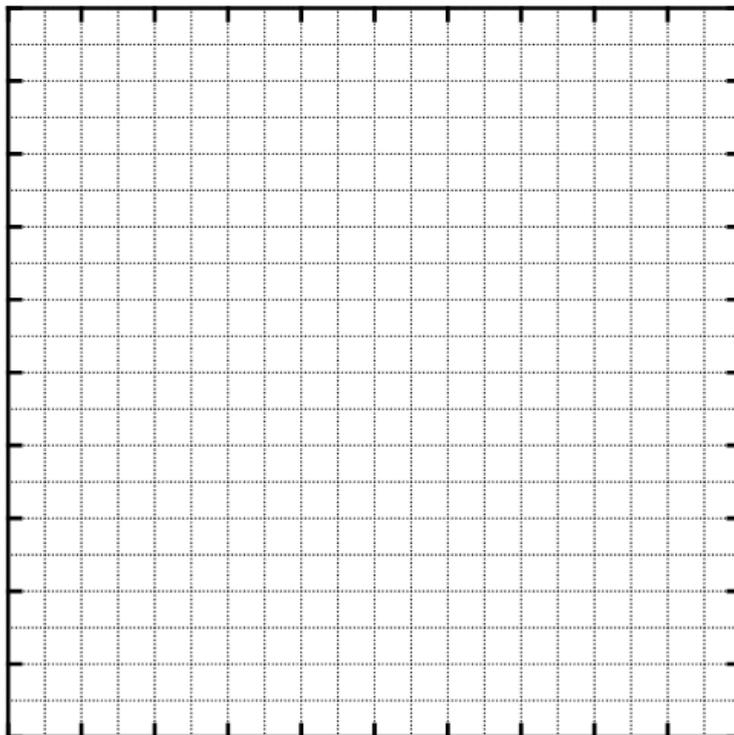
点
---

チャレンジ番号	氏名

課題 2-4 (4)

点

課題 2-4 (5)



$T =$

点

チャレンジ番号	氏名

## 課題 3-1

測定データ 1 : 位置エネルギーの基準からの高さが 10cm のときの、水平飛行距離  $S$  の測定結果 :

1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均

測定データ 2 : 位置エネルギーの基準からの高さが 8cm のときの、水平飛行距離  $S$  の測定結果 :

1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均

今回測定した、位置エネルギーの基準からの高さ、水平飛行距離  $S$ 、自由落下距離  $H$  の間にどのような関係式が成り立つか、力学的エネルギーの保存則を用いて考察せよ。またその結論を測定値と比較して議論せよ

点
---

チャレンジ番号	氏 名

**課題 3-2**

ビー玉 (大)、ビー玉 (小)、鉄球、円環を、同じ高さからガイドレール上を転がしたときの、水平飛行距離の測定値。

	1 回目	2 回目	3 回目	平均値
ビー玉 (大)				
ビー玉 (小)				
鉄球				
円環				

ガイドレール上を転がした場合の位置エネルギーと運動エネルギーの関係を考察せよ。転がす物体の種類によって違いが見られた場合その理由を考察せよ。

点
---

チャレンジ番号	氏 名

**課題 4-1-1** 直線上（一次元）の衝突

水平飛行距離の測定結果

- ・ 同じビー玉どうしの衝突

	1 回目	2 回目	3 回目	平均
標的がない場合				
標的のビー玉				
ぶつけたビー玉				

- ・ 結果について考察せよ。

- ・ 標的のビー玉にビニールテープを張った場合の衝突

	1 回目	2 回目	3 回目	平均
標的がない場合				
標的のビー玉				
ぶつけたビー玉				

- ・ この測定結果は、前回のビニールテープの張っていない衝突と大きく違う。その理由について考察せよ。また今回の衝突において、衝突前後で、全体の運動量および運動エネルギーはどのように変化したか。

点
---

チャレンジ番号	氏 名

**課題 4-1-2** 直線上（一次元）の衝突

水平飛行距離の測定結果

- ・ 小さなビー玉を標的とした衝突

	1 回目	2 回目	3 回目	平均
標的がない場合				
標的のビー玉				
ぶつけたビー玉				

- ・ 結果について考察せよ。

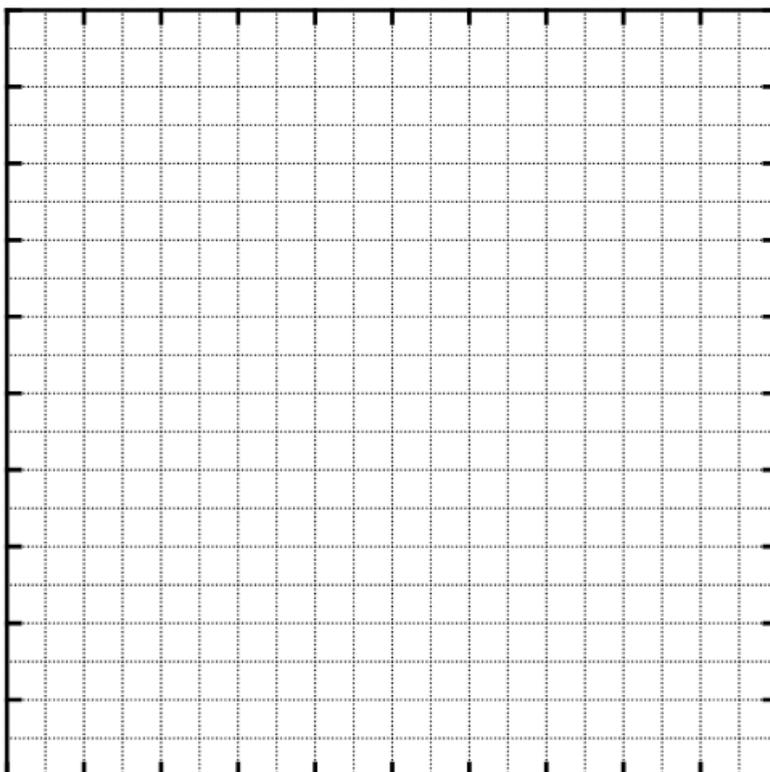
点
---

チャレンジ番号	氏 名

課題 4-2 平面上（二次元）の衝突

課題 4-2-1 大きさ、質量とも同じビー玉の衝突

衝突前後のビー玉の運動量ベクトルを下のグラフ用紙に示すことによって、運動量保存則について議論せよ。

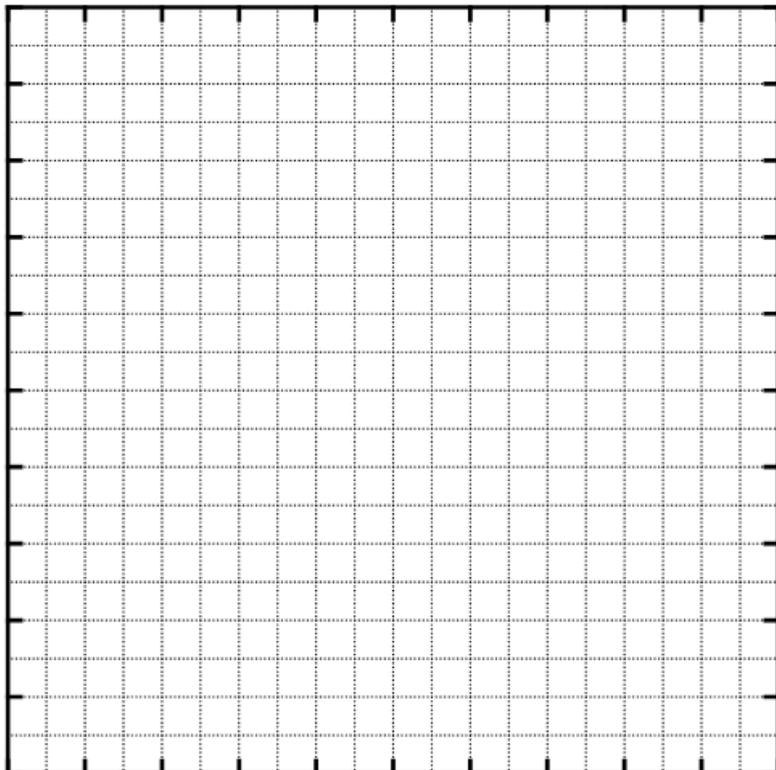


点
---

チャレンジ番号	氏 名

**課題 4-2-2** 大きさ、質量のちがうビー玉の衝突

衝突前後のビー玉の運動量ベクトルを下のグラフ用紙に示すことによって、運動量保存則について議論せよ。

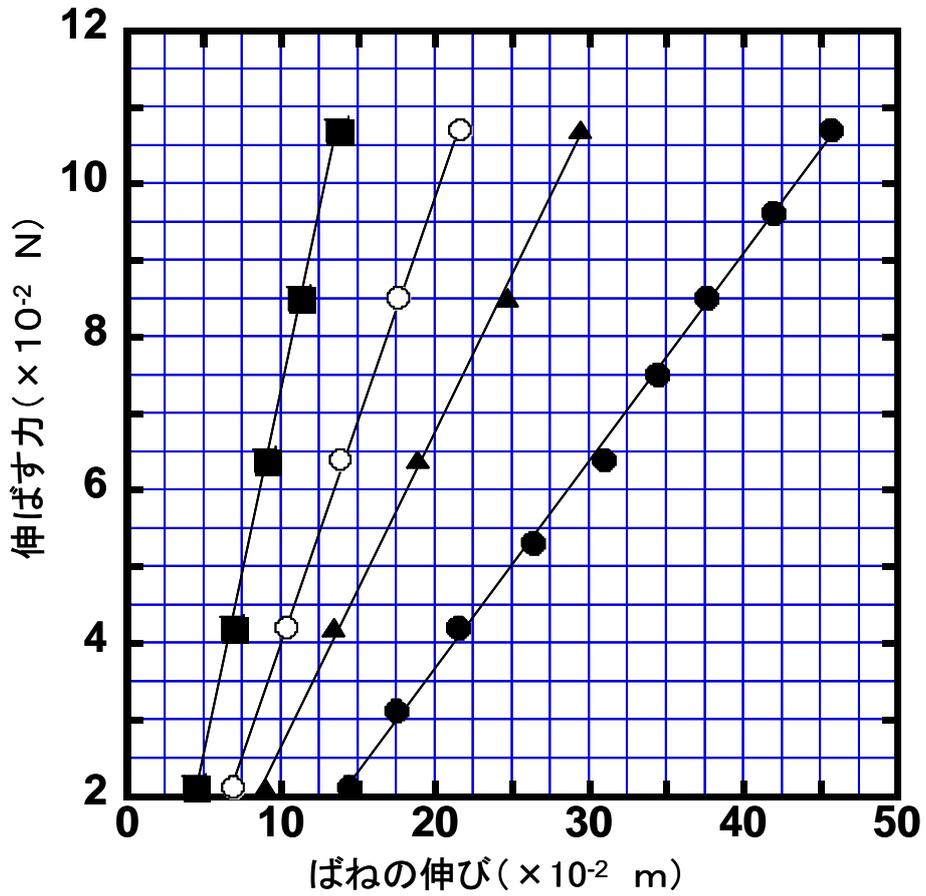


点
---



チャレンジ番号	氏 名

課題 1-2 (1)



初期巻き数( $n_0$ ) 31 巻き

点

課題 1-2 (2)

	巻き数 (整数)	ばね定数 (N/m)
$n_0$	31	0.27
$n_0 \times 2/3$ 程度	20	0.42
$n_0 \times 1/2$ 程度	15	0.58
$n_0 \times 1/3$ 程度	10	0.90

点

チャレンジ番号	氏 名

## 課題 1 - 2 (3)

ばね定数は、 $k_{n_0} = 0.27$ ,  $k_{n_0 \times 2/3} = 0.42$ ,  $k_{n_0 \times 1/2} = 0.58$ ,  $k_{n_0 \times 1/3} = 0.90$  と測定されたので、  
 $k_{n_0} / k_{n_0 \times 2/3} = 0.64 \approx 2/3$ ,  $k_{n_0} / k_{n_0 \times 1/2} = 0.47 \approx 1/2$ ,  $k_{n_0} / k_{n_0 \times 1/3} = 0.30 \approx 1/3$  と近似されると  
 考えられる。したがって、 $1/k_{n_0 \times 2/3} + 1/k_{n_0 \times 1/3} = (2/3 + 1/3)1/k_{n_0} = 1/k_{n_0}$

$$1/k_{n_0 \times 1/2} + 1/k_{n_0 \times 1/2} = 1/k_{n_0}$$

点
---

## 課題 2 - 2 (1)

31 巻き、20 巻き、15 巻き、10 巻きの各ばね定数より、各巻き数のばねに対する 1 巻き当りのばね定数は、それぞれ 8.4 (N/m)、8.4 (N/m)、8.7 (N/m)、9.0 (N/m) となり、平均をとると 8.6 (N/m) となる。

点
---

チャレンジ番号	氏 名

課題 2-2 (2)

測定値	4.4 cm	4.1 cm	4.0 cm	3.9 cm	3.7 cm	3.6 cm	3.5 cm	3.3 cm
計算値	3.7 cm	3.5 cm	3.4 cm	3.2 cm	3.0 cm	2.9 cm	2.7 cm	2.6 cm

計算方法  
ばね全体の質量と巻き数より、1巻き当りのばねの質量を算出する。対象とする1巻きのばねより下のばねの重力と1巻き当りのばね定数よりばねの伸びを求める。ばねの自然長などを考慮していないので測定値とのずれが生ずる。

点
---

課題 2-4 (1)

	× 4/4 巻き	× 3/4 巻き	× 2/4 巻き	× 1/4 巻き
質量 $m$	0.034 (kg)	0.025 (kg)	0.017 (kg)	0.0084 (kg)
ばね定数 $k$	0.36 (N/m)	0.48 (N/m)	0.72 (N/m)	1.4 (N/m)
$m/k$	0.094 (s <sup>2</sup> )	0.052 (s <sup>2</sup> )	0.024 (s <sup>2</sup> )	0.0060 (s <sup>2</sup> )

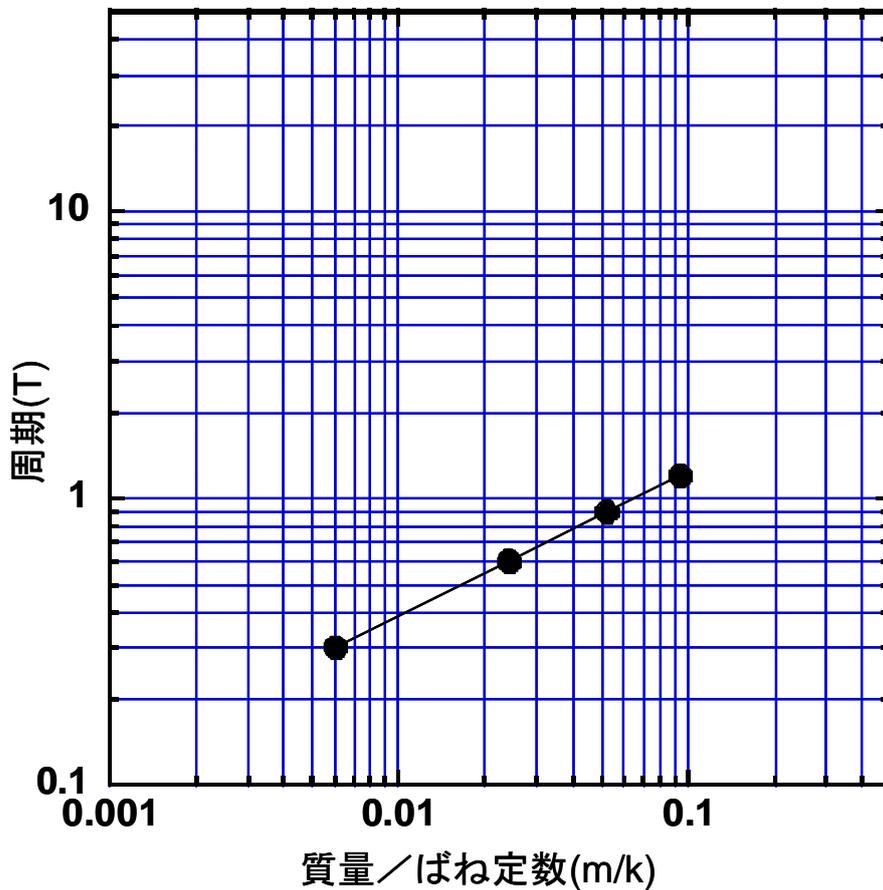
点
---

チャレンジ番号	氏 名

課題 2-4 (2)

	× 4/4 巻き	× 3/4 巻き	× 2/4 巻き	× 1/4 巻き
周期 $T$	1.20 秒	0.89 秒	0.60 秒	0.30 秒

課題 2-4 (3)



点

説明 A と B を定数とし、 $T = A(m/k)^B$  で表されるとすると、  
 $\log T = \log A + B \log(m/k)$  となり、両対数グラフ上の直線の傾きが B となる。実験点をプロットすることにより、直線の傾きから、B がほぼ 0.5 になり、 $T \propto \sqrt{m/k}$  になることが知れる。

点

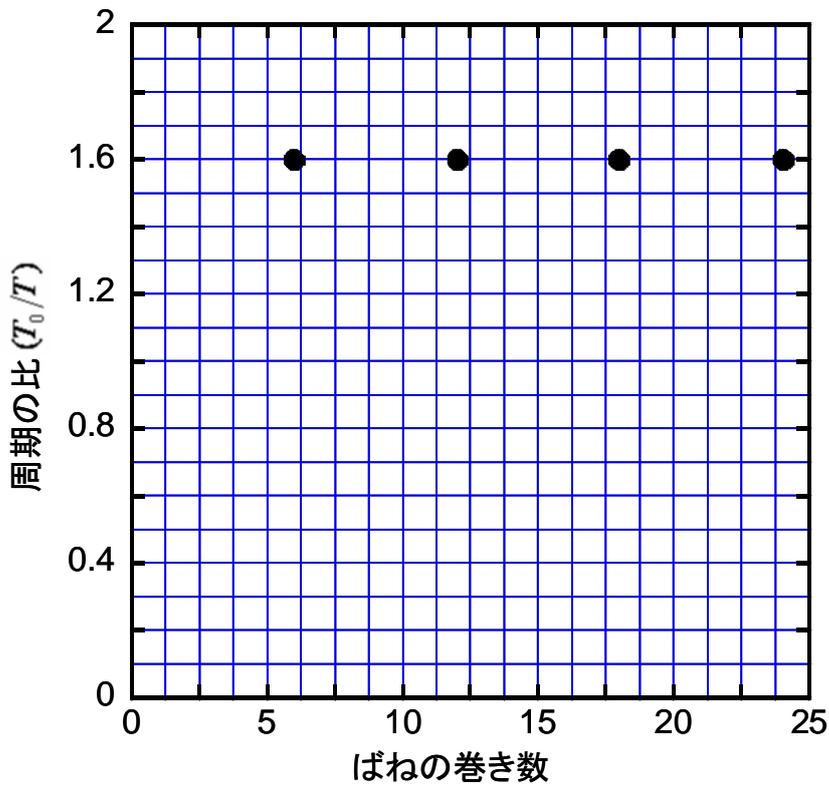
チャレンジ番号	氏 名

課題 2-4 (4)

フックの法則により、物体には変位  $x$  の大きさに比例する復元力がはたらき、物体は単振動をする。単振動の角振動数を  $\omega$  とすると、 $m_0\omega^2 = k_0$  より  $\omega = \sqrt{k_0/m_0}$ 、  
従って、周期は  $T_0 = 2\pi/\omega = 2\pi\sqrt{m_0/k_0}$  で表される。

課題 2-4 (5)

点



$$T = \frac{T_0}{1.6} = \frac{2\pi}{1.6} \sqrt{\frac{m}{k}} = 3.9 \sqrt{\frac{m}{k}} \approx 4 \sqrt{\frac{m}{k}}$$

点

チャレンジ番号	氏 名

## 課題 3-1

測定データ 1 : 位置エネルギーの基準からの高さが 10cm のときの、水平飛行距離  $S$  の測定結果 :

1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
415	410	420	414	415	415 mm

測定データ 2 : 位置エネルギーの基準からの高さが 8cm のときの、水平飛行距離  $S$  の測定結果 :

1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
370	365	368	368	367	368 mm

今回測定した、位置エネルギーの基準からの高さ、水平飛行距離  $S$ 、自由落下距離  $H$  の間にどのような関係式が成り立つか、力学的エネルギーの保存則を用いて考察せよ。またその結論を測定値と比較して議論せよ

$H = 420$  mm なので、自由落下時間を  $t$  とすると、 $\frac{1}{2}gt^2 = H$  より、

$$t = \sqrt{2H/g} = 0.293 \text{ s}$$

つまり、自由落下時間は一定となる。一方、力学的エネルギー保存則から、

$$mgh = \frac{1}{2}mU^2$$

なので、 $U$  を求めると、

$$U = \sqrt{2gh}$$

$U = S/t$  より、

$$S = U \cdot t = \sqrt{2gh} \sqrt{2H/g} = 2\sqrt{hH}$$

高さ  $h = 10$  cm のとき、水平移動距離  $S = 2\sqrt{Hh} \approx 410$  mm となる。

高さ  $h = 8$  cm のとき、水平移動距離  $S = 2\sqrt{Hh} \approx 367$  mm となる。

どちらも、誤差の範囲内で測定値と一致している。

点
---

チャレンジ番号	氏 名

## 課題 3-2

ビー玉 (大)、ビー玉 (小)、鉄球、円環を、同じ高さからガイドレール上を転がしたときの、水平飛行距離の測定値。

	1 回目	2 回目	3 回目	平均値
ビー玉 (大)	375	376	376	376 mm
ビー玉 (小)	375	370	365	370
鉄球	385	380	378	381
円環	303	305	305	304

ガイドレール上を転がした場合の位置エネルギーと運動エネルギーの関係を考察せよ。転がす物体の種類によって違いが見られた場合その理由を考察せよ。

実験条件：斜面の高低差 150 mm - 6 mm = 144 mm

エネルギー保存則から  $\frac{1}{2}mU^2 = mgh$  が成り立つとすると、 $U = \sqrt{2gh} \approx 1.68$  m/s となる。

一方、水平投射の高さ (自由落下距離) は 430 mm より、落下時間は  $\sqrt{2H/g} = 0.296$  秒。以上より、位置エネルギーと水平方向の運動エネルギーで力学的エネルギー保存則が成り立つなら、水平飛行の距離は、

$$S = U \cdot t \approx 497 \text{ mm}$$

となるはずである。これに対して、上記の測定値は、誤差を考えても大きく異なり、一致していない。

次に、この理由を考察する。まず、ビー玉の大きさは大きな作用をしていないので、空気の抵抗などは、この不一致の大きな原因ではないと考えられる。球形の形をしているビー玉と鉄球は似た値を与えているのに対して、円環が大きく異なる水平飛行の距離を与えていることから、この違いは、重さより形状が大きな作用をしていると考えられ、質量の分布の違いが大きな違いを生み出している可能性が高い。このような質量の分布が大きな違いを生み出すエネルギーを考えると、形状により物を同じ速度で回転するのに必要な力が変化するので、回転のエネルギーがこの違いの最も大きな要因と予想できる。

点
---

チャレンジ番号	氏 名

## 課題 4-1-1 直線上（一次元）の衝突

水平飛行距離の測定結果

- ・ 同じビー玉どうしの衝突

	1 回目	2 回目	3 回目	平均
標的がない場合	382	380	380	381 mm
標的のビー玉	364	372	365	367
ぶつけたビー玉	100	96	98	98

- ・ 結果について考察せよ。

ぶつけたビー玉は、衝突後いったん静止し、その後、回転を続けて飛び出すように見える。つまり前問より、ぶつけたビー玉の水平飛行は回転のエネルギーによって起こっていると考えられるので、無視する。飛行距離は速さに比例するので、運動量は水平飛行距離に比例し、それより、衝突前後での運動量の比は、水平飛行の距離で考えることができるので、

$$\text{反発係数 } e = 367/381 \approx 0.96$$

となり、1 に近く弾性衝突と見なせる ( $e = -(98 - 367)/381 = 0.71$  でも正解)。

- ・ 標的のビー玉にビニールテープを張った場合の衝突

	1 回目	2 回目	3 回目	平均
標的がない場合	386	384	386	385 mm
標的のビー玉	240	242	244	242
ぶつけたビー玉	152	154	152	153

・ この測定結果は、前回のビニールテープの張っていない衝突と大きく違う。その理由について考察せよ。また今回の衝突において、衝突前後で、全体の運動量および運動エネルギーはどのように変化したか。

ビニールテープの重さを無視すると、

$$\text{運動量の比 } 385/(242+153) \approx 0.97$$

となり、保存していると考えられる。一方、

$$\text{運動エネルギーの比 } 385^2/(242^2+153^2) \approx 1.8$$

となり、これは保存していない。ビニールのため、反発係数は  $e = -(153-242)/385 \approx 0.23$  となり、非弾性衝突となるためと考えられる。

点
---

チャレンジ番号	氏 名

## 課題 4-1-2 直線上（一次元）の衝突

水平飛行距離の測定結果

- ・ 小さなビー玉を標的とした衝突

	1 回目	2 回目	3 回目	平均
標的がない場合	384	386	382	384 mm
標的のビー玉	515	530	524	523
ぶつけたビー玉	182	182	180	181

- ・ 結果について考察せよ。

いままで見てきたように、ビー玉の速度  $U$  は、水平飛行距離と比例する。そこで、この問題でも運動量が、水平飛行距離に比例することから、運動量の保存を、水平飛行距離から考えることとする。まず、小さなビー玉と等しい運動量を持つ大きなビー玉があるとする、その飛行距離は、

$$523/2.5 \approx 209 \text{ mm}$$

となる。これから、衝突後の運動量を考えると、 $209+181=390 \text{ mm}$  に比例すると考えられ、この値は、標的がない場合の水平飛行距離  $384 \text{ mm}$  とほぼ一致している。つまり運動量保存則が成り立っていると考えられる。

次に力学的なエネルギーについて考察する。同様に速度が水平飛行距離に比例するので、

$$523^2/2.5 + 181^2 \approx 377^2$$

となる。つまり、標的がない場合の水平飛行距離  $384 \text{ mm}$  とほぼ一致しているので、力学的エネルギー保存則が成り立っていると考えられる。

最後に反発係数  $e$  について考える。同様に速度が水平飛行距離に比例するので、

$$e = -(181 - 523)/384 \approx 0.89$$

弾性衝突に近い値を与えていることがわかる。

点
---

チャレンジ番号	氏 名

課題 4-2 平面上 (二次元) の衝突

課題 4-2-1 大きさ、質量とも同じビー玉の衝突

衝突前後のビー玉の運動量ベクトルを下のグラフ用紙に示すことによって、運動量保存則について議論せよ。

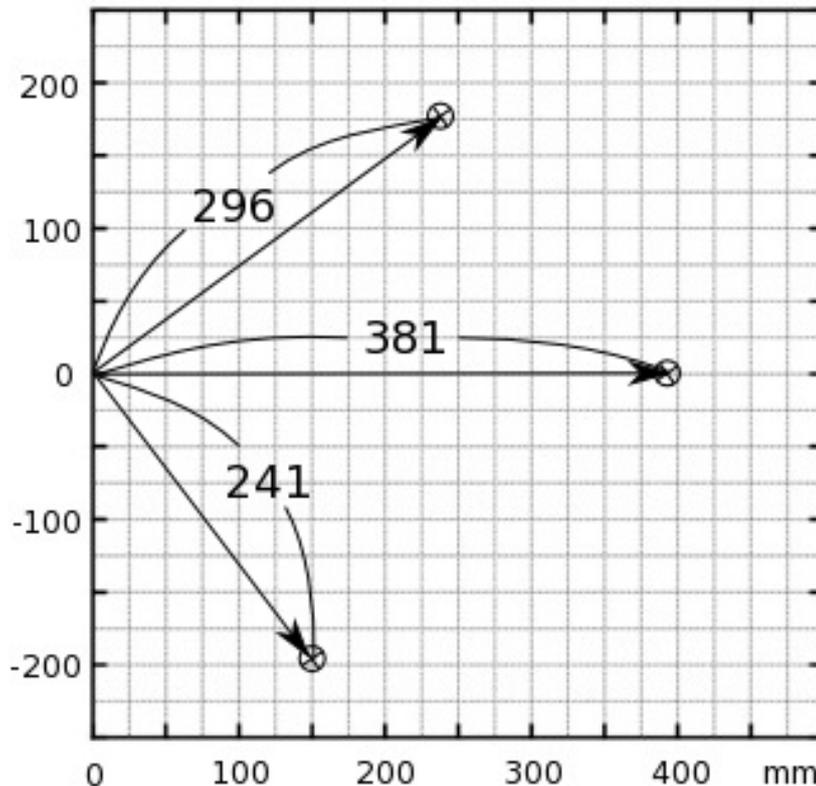
ビー玉の速さは飛行距離に比例するので、以下では飛行距離を用いて保存則について議論する。

まず、衝突をしないビー玉については、その飛行距離は 380mm なので、これを衝突前のビー玉の速度と考える。

次に衝突後のビー玉の落下位置については、標的は前方 235mm で右 180mm となり、その衝突地点から飛行距離は 296mm であった。

また、投射したビー玉については、前方 148mm で左 190mm に落下した。以上の値から、運動量保存則については、前方には  $234+148 \approx 383$ 、左右には  $180 \approx 190$  となっており、方眼紙の横軸方向、縦軸方向の両方の向きについて、運動量保存則が成立していることがわかる。また、このときエネルギー保存則についても、 $241^2 + 296^2 \approx 381^2$  より、ほぼ成立していることがわかる。

何回か測定を行っても、すべての場合について、同様の関係が成り立っている。



点

チャレンジ番号	氏 名

**課題 4-2-2** 大きさ、質量のちがうビー玉の衝突

衝突前後のビー玉の運動量ベクトルを下のグラフ用紙に示すことによって、運動量保存則について議論せよ。

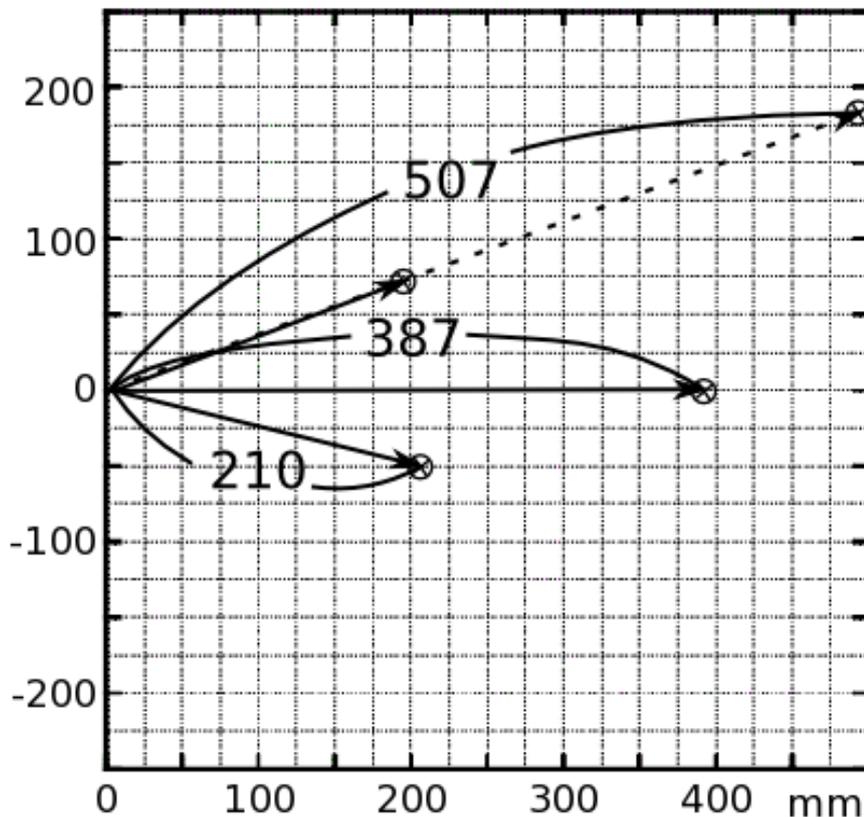
前の課題と同様に、飛行距離を用いて、それぞれの保存則について議論する。

まず、衝突をしないビー玉については、その飛行距離は 387mm なので、これを衝突前のビー玉の速度と考える。

次に衝突後のビー玉の落下位置については、標的は前方 480mm で右 164mm、飛行距離が 507mm となった。この小さい玉は、大きい玉の質量の 1/2.5 なので、大きい玉を基準として、小さい玉の運動量は、その飛行距離の 1/2.5 に比例するので、上記の飛行距離を 1/2.5 して、前方 192mm で右 66mm と考える。

大きい方のビー玉については、前方 204mm で左 50mm なので、前方には 204+192≈387、左右には 50≈66 となり、ほぼ一致している。

一方、衝突後の運動エネルギーについては、 $\frac{1}{2.5}507^2 + 210^2 \approx 383^2$  に比例する。一方、衝突前のエネルギーは  $387^2$  に比例するので、この場合もほぼ運動エネルギーが保存している。



点