

物理チャレンジ 2006

実験問題

2006年8月1日(火)

諸注意・実験器具確認 8:20～ 8:30

実験問題にチャレンジ 8:30～13:20

実験器具後片づけ 13:20～13:30

<注意事項>

1. 実験器具の確認や注意事項の伝達、チャレンジの開始と終了などについては、チャレンジの監督者の指示に従うこと。
2. 実験問題は実験問題1、実験問題2、実験問題3の3つある。どの問題からチャレンジしても良いが、時間の配分をよく考えてチャレンジすること。
3. 解答用紙およびグラフ用紙のすべてのページ、それに封筒に、チャレンジ番号と氏名を必ず記入すること。
4. 机上有る白紙をデータ記入用紙として使用すること。
5. 持参した筆記用具と、与えられた実験装置、電卓以外は使用してはならない。
6. 実験中に、測定装置に不具合が生じた場合や実験の部品を紛失した場合は、監督者に申し出ること。
7. チャレンジ開始から12:00まではチャレンジを終了することはできない。
8. 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、質問があるとき、チャレンジを終了するときは、手をあげて監督者に知らせること。
9. 終了の合図があった場合は、提出する解答用紙とグラフ用紙にチャレンジ番号と氏名が記入されていることを確認の上、これらをまとめて封筒の中に入れ、机上に置くこと。
10. チャレンジ終了後、実験装置をもと通りに机上にまとめること。問題冊子とデータ記入用紙は持ち帰ること。また、机に貼られたチャレンジ番号と名前が書かれた紙をはがすこと。

《実験問題で使用する物品》

実験問題のために各自に配布されているのは以下の物品である。

物品が不足している場合はチャレンジの監督者に申し出ること。

【実験問題1で使用する物品】

- ・ ビースピ（+単4電池2本） 1（使い方は別に記す。2台使用してもよい。）
- ・ バネばかり(1N用) 1

実験で使用するバネばかりは1N(ニュートン)用のはかりであり、最小目盛りは0.01Nである。

質量1kgのおもりに働く重力は9.8Nであるから、質量10gのおもりをこのバネばかりに吊り下げると、目盛りは0.098Nを示すはずである。

はかりの零点調節は、目盛りが書いてある金属板を上下にスライドさせることによっておこなう。

- ・ 実験台(柱) 1
- ・ 実験台(木製ブロック) 2
- ・ ボルト 1
- ・ 蝶ねじ 2
- ・ ワッシャー 2

固定用具

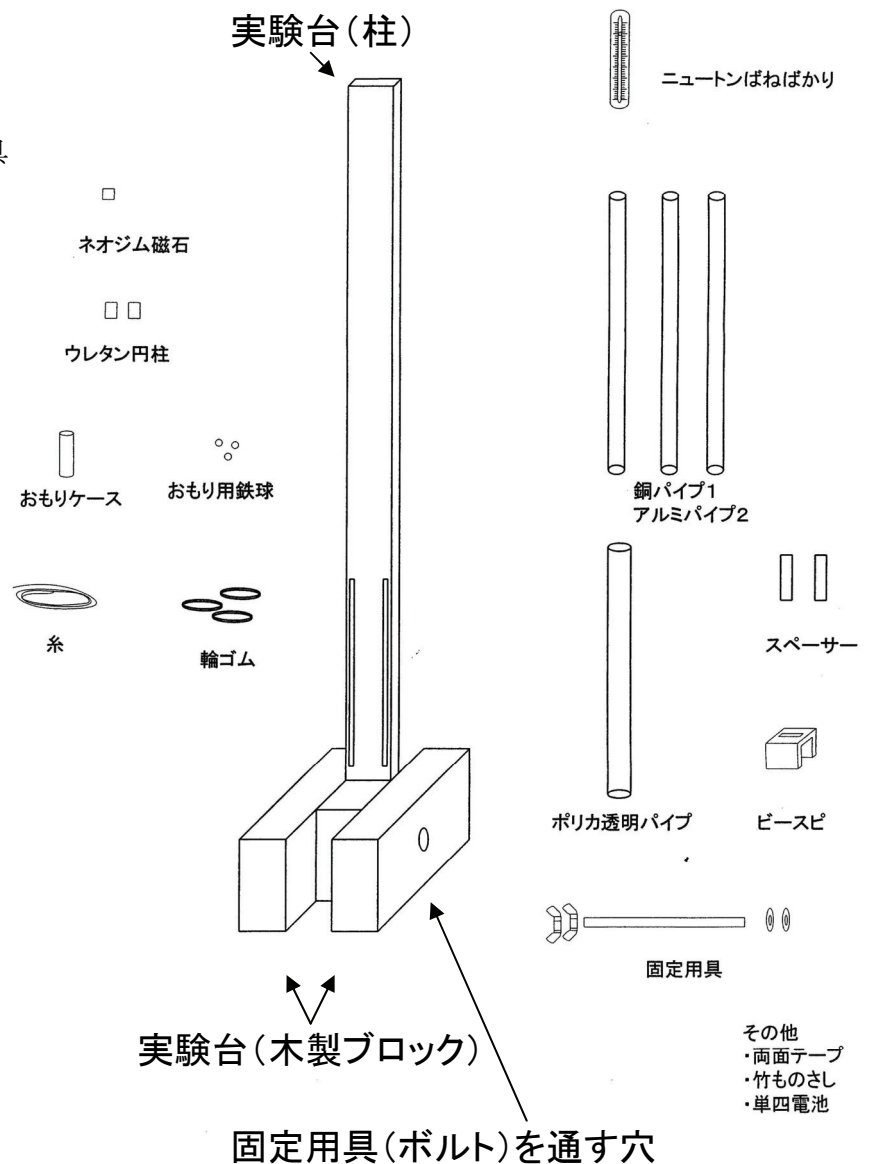
- ・ スペーサー(透明な板) 2
- ・ 輪ゴム 大3 小1
- ・ ネオジウム円柱形磁石
(直径8mm;高さ1cm) 1
- ・ 金属パイプ(長さ50cm)
アルミ製(肉厚0.5mm) 1
- アルミ製(肉厚1.0mm) 1
- 銅製(肉厚0.5mm) 1

- ・ 赤いプラスチックの円筒
(おもりケース) 1
- ・ ウレタン製の円柱
(直径9mm;高さ1cm) 2
- ・ 鉄球(大:質量約4g) 2
- ・ 鉄球(小:質量約2g) 1
- ・ 透明なパイプ 1

- ・ セロハンテープ 1
- ・ 両面テープ 1
- ・ 木綿糸 1巻き
- ・ はさみ 1
- ・ ゼムクリップ 1

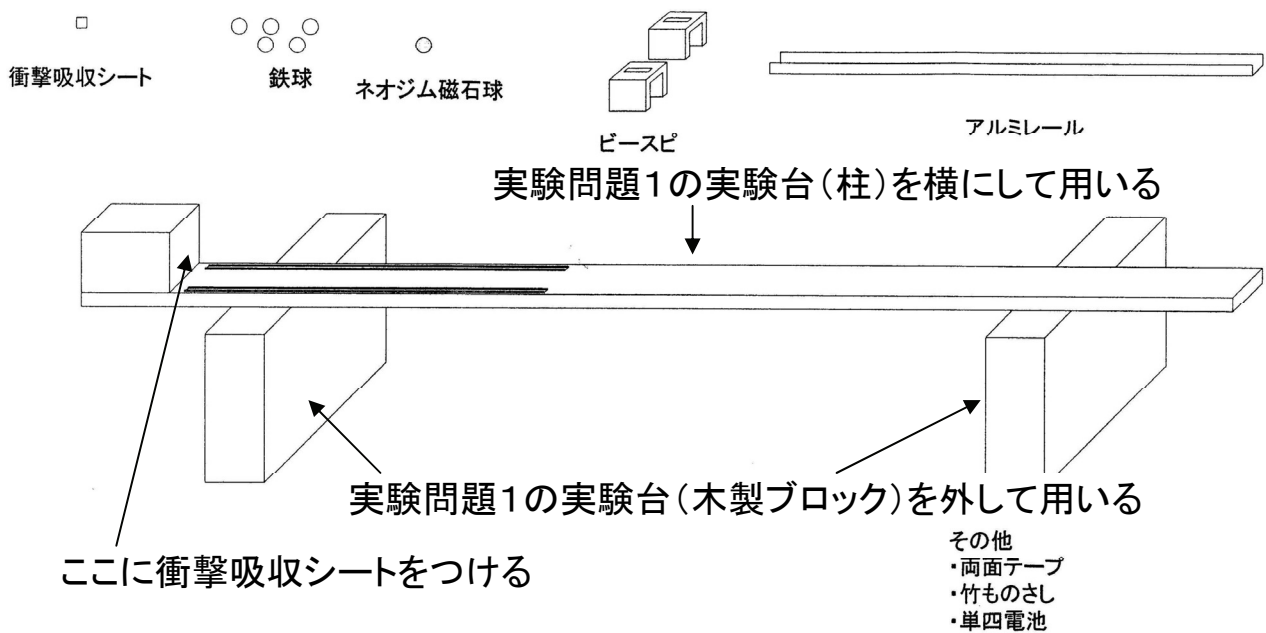
- ・ ものさし 1
- ・ 電卓 1

- ・ 厚紙 1枚:(実験台の傾きを調節するために、必要に応じて切り取って重ね、木製ブロックの下に敷く。)



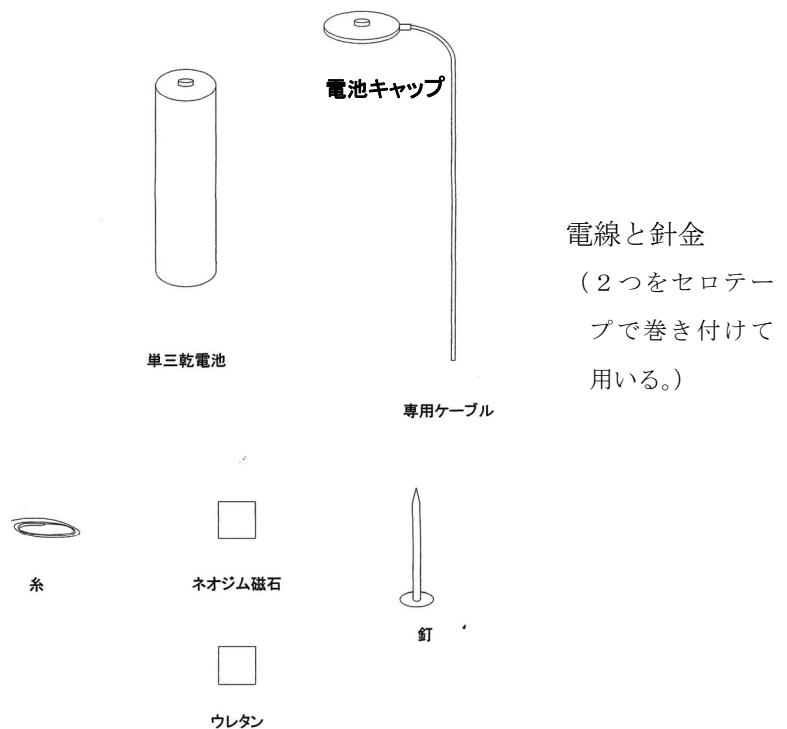
【実験問題2で使用する物品】

- ・ アルミ製のレール 1
- ・ 電卓 1
- ・ ものさし 1:実験問題1と共通
- ・ 実験台(柱) 1:実験問題1と共通
- ・ 両面テープ 1:実験問題1と共通
- ・ 実験台(木製ブロック):実験問題1と共通 2
- ・ バネばかり(1kg用) 1
- ・ ビースピ 2 :実験問題1と共通
- ・ ポリエチレンテープ
- ・ ネオジボール(=ネオジウム磁石球)(直径 10mm) 1
- ・ はさみ 1:実験問題1と共通
- ・ 鉄球(大:直径約 10mm) 5 :一部実験問題1と共通
- ・ 厚紙(厚手のもの)
- ・ 衝撃吸収シート(1cm四方) 2 :レールの延長上のストッパーとなる木片の壁に貼り付けて用いる。
- ・ 厚紙:実験問題1と共通(レールの水平を保つために、必要に応じて、支え足の下に敷いて用いる。)



【実験問題3で使用する物品】

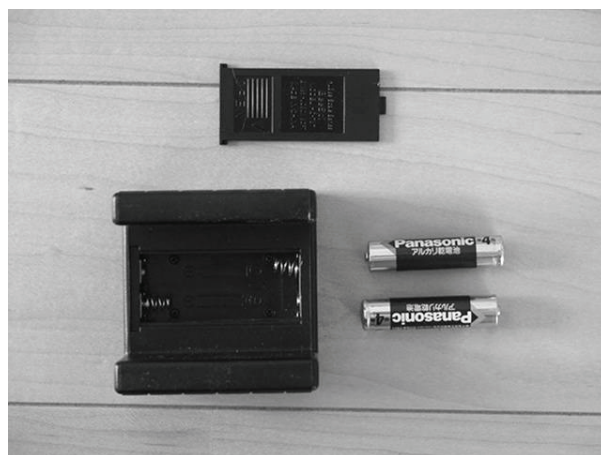
- ・ ネオジウム磁石(円柱状)
1:実験問題1と共通
 - ・ 単三電池 1(予備1)
 - ・ 電池キャップ(配線コード付き) 1
 - ・ 釘 1
 - ・ 糸 1巻き:実験問題1と共通
 - ・ ウレタンの円柱 1:実験問題1と共通
- ※ 糸を外して使うこと



※ 実験問題1と2で使用した実験台
を実験問題3の最後に、自作スタンド
として用いる。

《実験問題で使用する装置の説明》

- ・ ビースピ：簡易速度測定装置



ビースピは光センサーを使って、装置の中を通過する物体の速さを測定する装置である。裏側から単四電池を2本入れて使用する。電池を入れるカバーが外れにくいので、すこしスライドさせて隙間を作り、はさみの先を差し込んではずすと良い。電池を正しく入れると時刻表示になる。(下図①)

本体上面にある表示窓は、測定に使用しない状態では時刻を示しているが、表示窓の下のボタンを長押し（1.5秒程度）すると、速さを測定できるモードに切り替えることができる。この時、図②に示すとおり、画面に0が並び、画面右下の小さな文字（km/h）が点滅する。（下の黒丸の中）

注意：ボタンを長押しするときに、装置の内側に指などを入れて光センサー部をかくさないこと。



① 時刻モードの時の表示



② 測定モードの初期表示



③ 測定結果の例

②の状態では、内部の2カ所のセンサー部分を物体が通過すると、センサー部分を通るときの平均の速さを測ることができる（上図③）。ただし、センサー部分は直径が小さいため、ビースピの中を通過しても、センサー部分を横切らない場合は測定ができない。指などを通過させて、速さを測定してみよ。測定がうまくいって、測定を繰り返す場合は、ボタンを短く押すと③の画面が②の状態に切り替わる。

時刻表示から速さ測定モード：長めに押す（1.5秒程度）

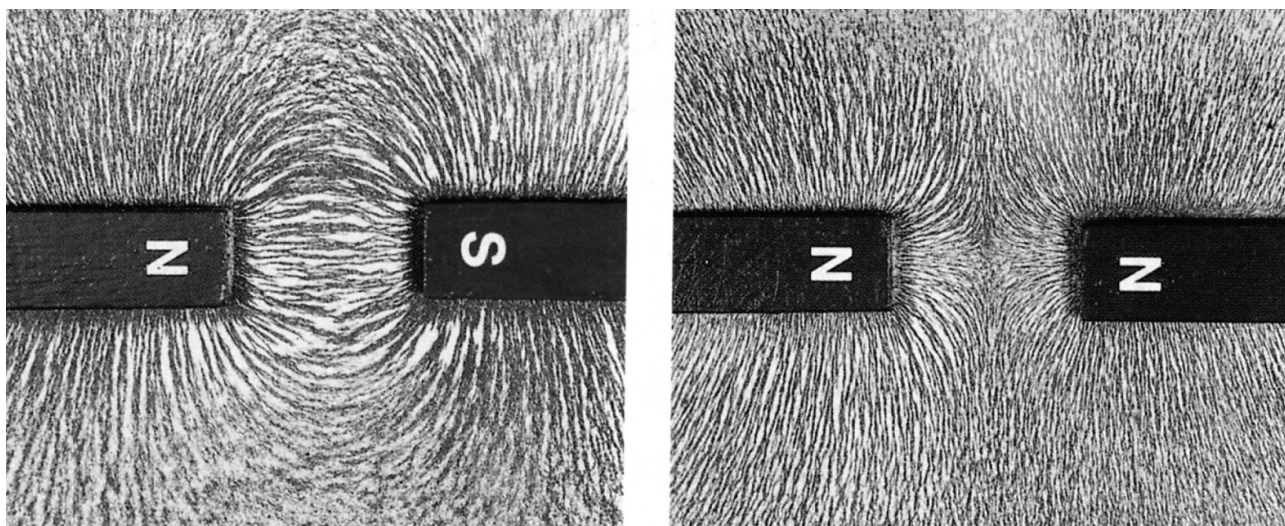
測定モードの測定を繰り返す：短く押す

測定モードのまま長く放置しておくと時刻表示に戻ってしまう。その場合はボタンを長く押して、速さの測定モードに直せばよい。ビースピには積算時間を測るモードなどもあるが、今回の実験では使用しない。その他、使用中に表示がおかしくなった場合は、電池を外してしばらくおいた後に、再び電池を入れると時刻表示モードとなる。(詳しくは、箱の中に添付されている説明書を参考にすること。)

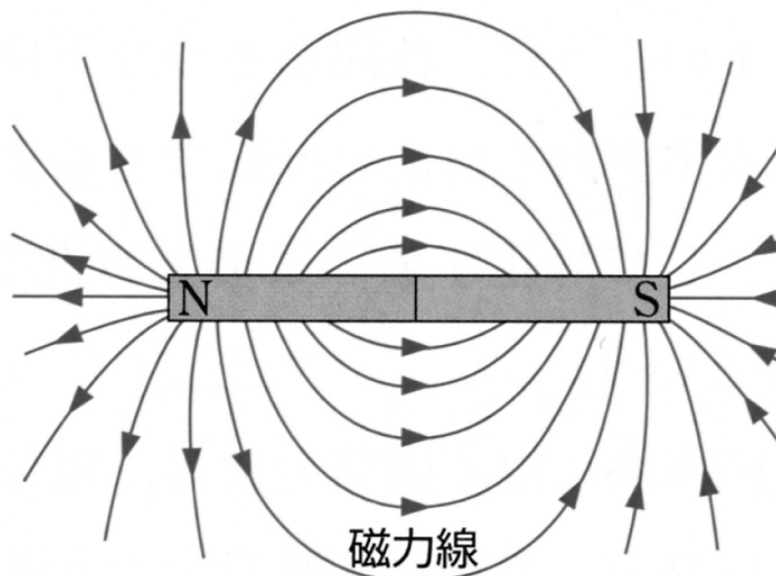
実験問題

《はじめに》

磁石のまわりには、鉄などの一部の物質を引きつけるような、力が働く空間がある。このような空間を磁場（磁界と呼ぶ場合もある）と呼んでいる。磁場は空間そのものの性質であり、直接目で見ることができないが、磁石のまわりに砂鉄をまくことによって、その様子を見ることができる。



このような砂鉄が描く模様になぞらえて、物理学では、磁場の様子を磁力線や磁束線と呼ばれる曲線で表すことにしている。



物理チャレンジ 2006 の実験問題のテーマは、このような磁場と磁石に関する現象の解明である。良い実験を行って、良い測定結果を出し、良い考察によって、良い解答が書かれることを期待する。（このページの図は 実教出版 物理Ⅱの教科書に掲載されている図を引用させていただいたものである。）

実験問題1

予備実験:

与えられた3本の金属パイプ（どれも長さ 50cm）の中から、アルミ製のパイプ（灰色で肉厚の薄い方でよい。）を取りだして垂直に立て、中に円柱形のネオジウム磁石を入れて落下させ、磁石の落下のようすを観察しなさい。

次に、磁石をパイプの中に入れてから、外に出るまでのおよその時間を測りなさい。ストップウォッチなどは用意していないので、各自の時計等でおよその秒数を求めればよい。

続いて、銅パイプ（赤褐色）で同じ実験を行ない、磁石がパイプを通過するおよその時間を求めなさい。それぞれの場合のおよその時間を解答用紙に書きなさい。

次に、アルミ製のパイプと銅製のパイプの外側から、これらの金属が磁石に引きつけられるかどうかを試しなさい。静止している磁石は、アルミや銅の金属を引きつける働きを示さないのに、動いていると力が働くのはなぜだろうか。

実験の目的:

銅やアルミなどの磁石の性質を持たない金属のすぐ近くを磁石が運動すると、磁石に対して運動を妨げる力が働くために、磁石の運動が遅くなる。金属パイプと円柱形のネオジウム磁石を使って、磁石に働く力と磁石の運動の速さの関係を調べ、この力の物理的な意味を解明する。

実験の背景：（電磁誘導の式）

予備実験で試みたように、金属のすぐ近くで磁石が動くと、磁石に力が働くのは、電磁誘導によって金属の中に電流が流れるからであると考えられる。このような電磁誘導の実験は、学校の実験ではコイルと検流計（敏感な電流計）でおこなうことが多いが、磁石の動きによって電流が流れる仕組みは、金属パイプの場合も同じであると考えられる。

コイルの場合で考えると、コイルの断面を通過する磁石の磁力線（磁石のまわりの磁場の強さを表す力線）の本数（磁束 Φ （ファイ）で表す）が、ある一定時間（ t で表す）の中で変化すると、その変化によってコイルに起電力（ V で表す）が生じると考えられる。このような変化を Δ という記号で表すと、コイルに生じる起電力は

$$V = -\Delta\Phi/\Delta t$$

と書くことができる。

この式のマイナスの符号は、電磁誘導によってコイルに生じる起電力が、コイルに生じる磁束の変化を妨げる向きに働くことを表している。

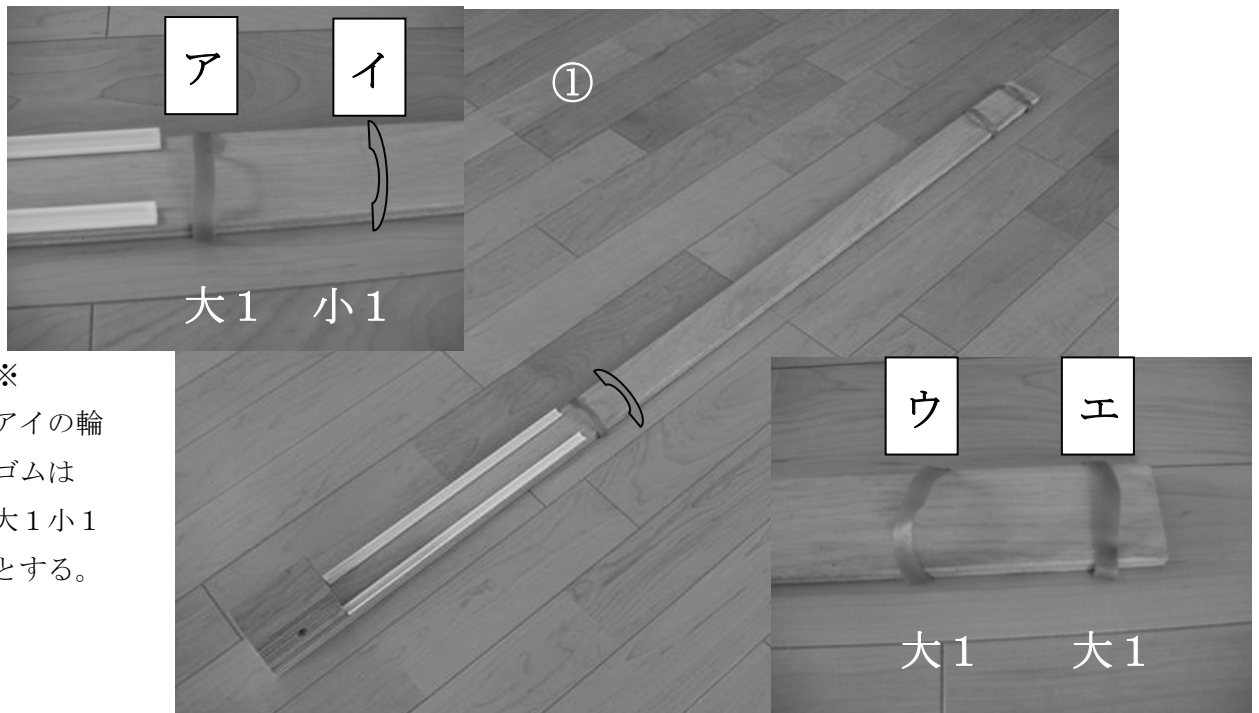
また、この電磁誘導は、磁石が静止していてコイルが動く場合にも、コイルの断面を貫く磁束が変化をするので、上記の式が同様に成り立つ現象である。

実験の準備：

1 実験装置の組み立て

実験装置の各部品を、測定をおこなうために以下の順序で組み立てる。

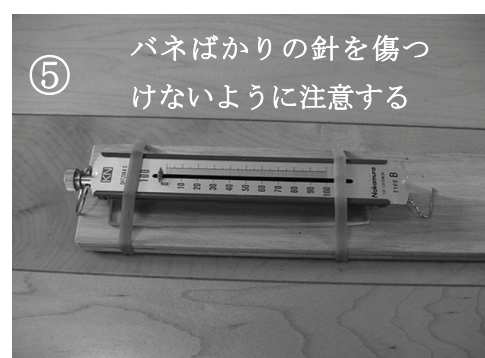
- ① 実験台（長さ約 140cm の合板）に、輪ゴムを 4 つ（大 3 小 1）通して、図の位置に取り付ける。



- ② 透明なパイプに両面テープでスペーサー（透明な厚いプラスチックの板）を貼り付ける。
③ バネばかりの裏側に両面テープでスペーサー（透明な厚いプラスチックの板）を貼り付ける。

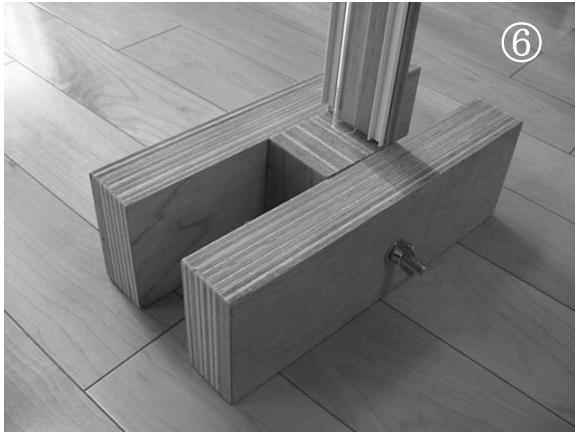


- ④ ①で付けた輪ゴムのうち、ア・イの輪ゴムで②の透明なパイプを図のようにスペーサーの位置で実験台に固定する。この透明パイプはおもりケースが落下するときのガイドとなる。台から 2 cm 間隔をあけておく。



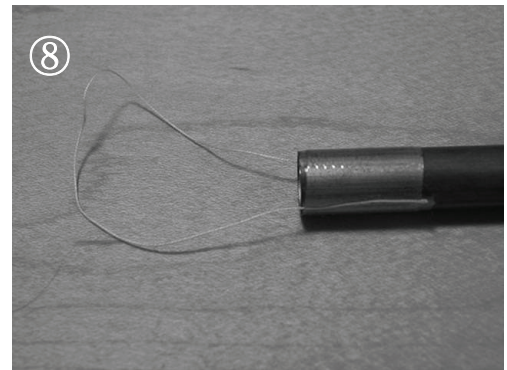
⑤ ①で付けた輪ゴムのうち、ウとエの輪ゴムでバネばかりを図の位置で実験台に固定する。このとき、バネばかりの針を指で傷つけないように注意する。

⑥ 実験台を垂直に立て、支えとする2つの木製ブロックで両側から挟み、穴にボルトを通して、両側からワッシャーを入れ、蝶ねじで締めて軽く固定する。



⑦ 1N用バネばかりの目盛りがついた金属板は、上下にずらすことができる。目盛りがちょうど0(ゼロ)を示すように、金属板をずらして調節する。

⑧ 糸を約12cm程度の長さに切り取り、銅パイプ(赤褐色)の一端に、右図のようにセロハンテープで貼り付ける。

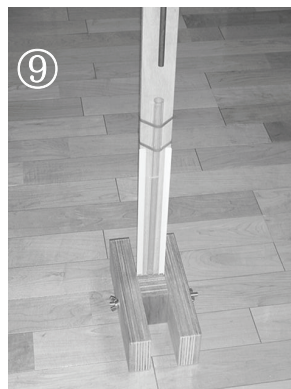


⑨ ⑧の糸を付けた金属パイプをバネばかりに吊り下げる。このとき、金属パイプが正面から見たときに測定台のほぼ中心にあり、真横から見たときに、測定台とほぼ並行になるように調整する。

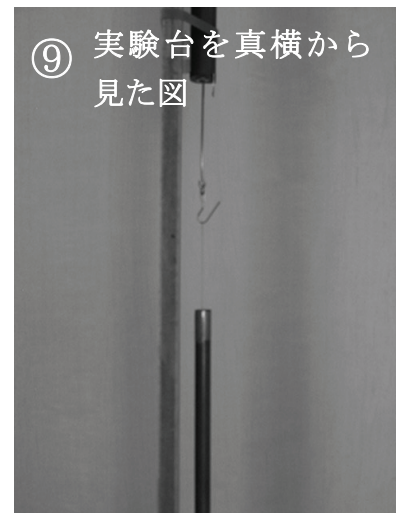
この傾きの調整は、ボルトのまわりの測定台の回転と、木製ブロックの下に厚紙を切って重ねることでおこなう。

この⑨の調整は磁石をスムーズに落下させるためのものである。

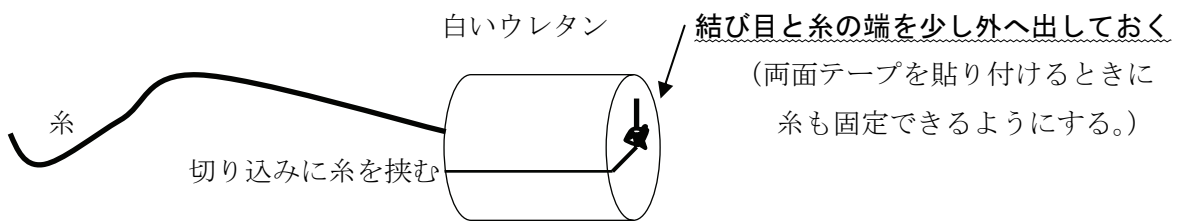
調節ができれば、蝶ねじをしっかり締めて固定する。



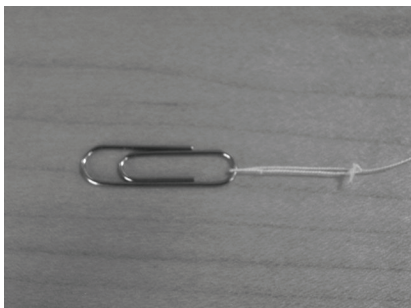
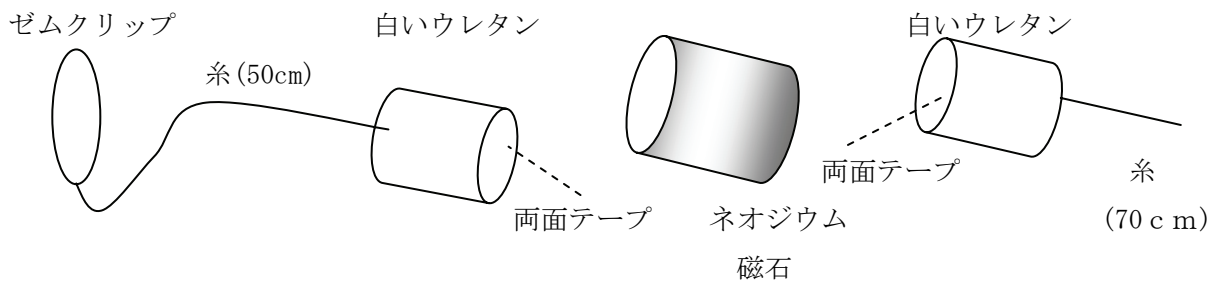
⑨ 実験台を真横から見た図



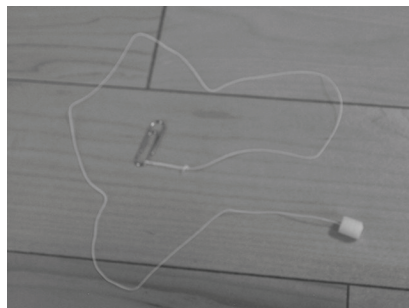
- ⑩ 実験用の小物が入ったビニール袋から、白いウレタンの円柱を2個取り出す。次に、糸を長さ約50cm と約70cm の2本切り取り、一方の端に結び目を作り、下図のようにウレタンの切り込みに糸を挟み込む。2個とも同様に糸を挟むこととする。



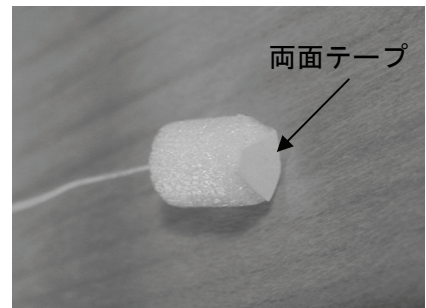
ウレタンの糸の結び目が出ている面に両面テープを丸く切り取って貼り付ける。このとき、両面テープが磁石の底面からはみ出さないように注意すること。はみ出ていたら、はさみで切り取ればよい。次に、両面テープの上面のシールを剥がしてウレタンを円柱状のネオジウム磁石に貼り付ける。



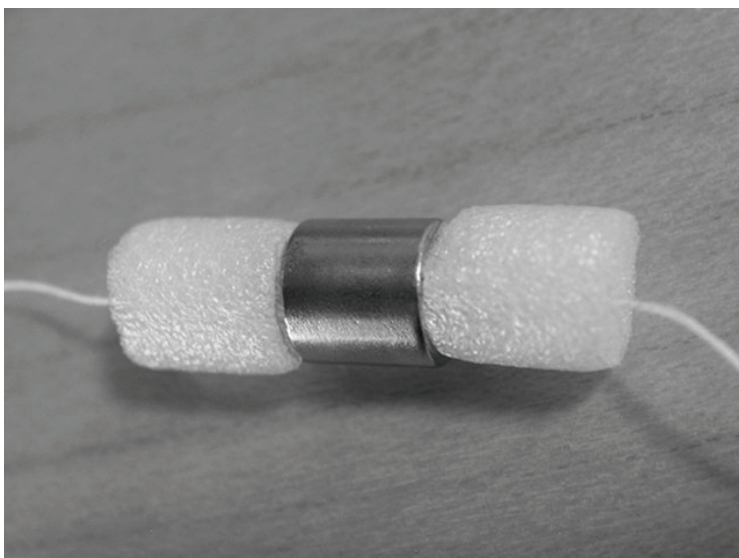
糸をクリップに結びつける



クリップ+糸+ウレタン



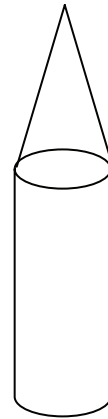
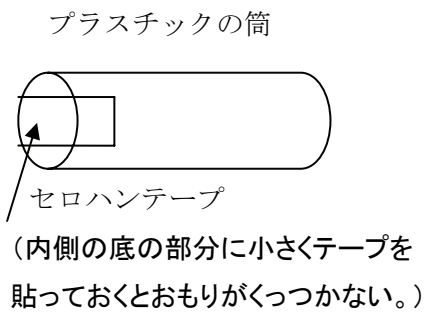
ウレタンの裏に両面テープ



↑ウレタンと糸のみ

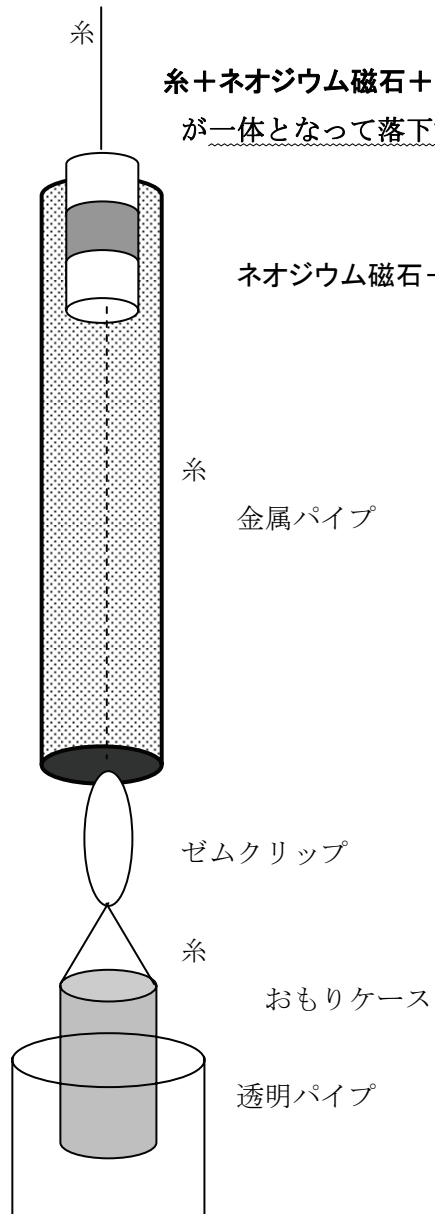
磁石とウレタンができるだけ一直線になるようにする。また、両面テープが側面にはみ出していないか、に注意する。

- ⑪ 赤いプラスチック製の円筒に図のようにセロハンテープで底を作る。底ができれば、筒の上部に金属パイプの時と同様に、吊り下げるための糸を取り付ける。



- ⑫ ⑩で作った磁石とウレタン糸(+ゼムクリップ)の部品を、ゼムクリップを取り付けた方を下にして、銅パイプの中に入れ、図のような位置で上の糸を板の上部に貼り付けた両面テープで固定する。スムーズに入らない場合は、⑩のステップをやり直せ。

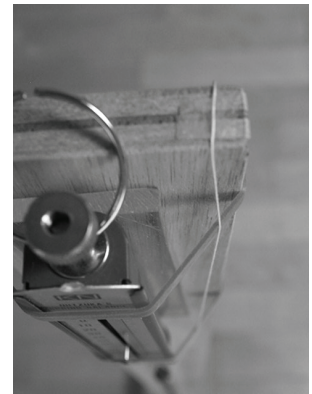
ゼムクリップがパイプの下端から出たところに、おもりを入れるための筒を糸で吊り下げる。この筒は透明パイプの中に入るようにする。筒の中に磁石を落下させるときには糸を止めた両面テープから糸をはずし、糸を指で支えてから静かに糸を放すこととする。



糸+ネオジウム磁石+ウレタン+糸+クリップ+おもりケース(+鉄球のおもり)が一体となって落下する

ネオジウム磁石+ウレタン

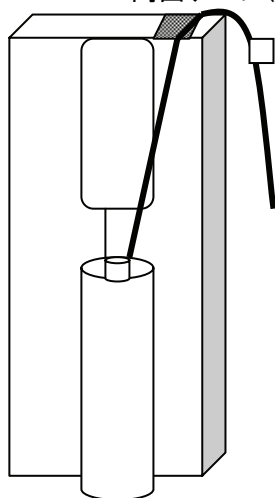
実験台の上部に両面テープで糸を止める



この位置で糸を放して磁石を落下させる！！

- ⑬ 上の糸のウレタンから長さ 55cm ほどの場所の所を，図のように長さ 3 cm ほどのセロハンテープを真ん中から折りたたんで挟む。このようにセロハンテープを付けておくと，磁石が金属パイプの中を通過して金属パイプの外に出ても，上の糸は金属パイプから出てしまうことはない。

両面テープ(糸を貼り付け止めておくときに用いる)



セロハンテープで糸を挟む

(糸が金属パイプから抜けてしまわないようにする。)

磁石を落下させるときは，セロハンテープの所を持って上に持ち上げ，両面テープから糸をはがして，糸・・・磁石・・・おもりケースが鉛直にまっすぐ並ぶようにしてから，静かに放す！！

- ⑭ 磁石を支えている糸を放して磁石を落下させてみる。※

このとき，バネばかりの目盛りが，少し変化することを確認すること。

磁石が落下しているとき，バネばかりは，銅パイプが受ける力（落下中に磁石が受ける力の反作用の力）を示している。したがって，このときのバネばかりの目盛りの増加分を測定することによって，磁石が受けている力を測定することができる。

磁石がパイプから出ると，バネばかりの目盛りがどのように変化するかも確認すること。

※ 磁石やおもりケースがなめらかに落下しない場合は，金属パイプや透明パイプ，磁石などの位置を調節しなさい。磁石に取り付けたウレタンがパイプに引っかかっている場合も考えられる。

また，磁石がパイプ中を落下していくときに，バネばかりの目盛りの変化が，どのようになっているかをよく観察しなさい。この観察から，どの場所にビースピを取り付けるとよいかを考えなさい。

- ⑮ 銅パイプの上部の口にかかっている糸（磁石につながっている）を，銅パイプの下端から出ている磁石を下からパイプの中に差し込みながら，ゆっくり引き上げ，磁石を最初の位置に戻し，糸を再び実験台の上面に貼り付けた両面テープにくっつけて，磁石を支える。

- ⑯ ビースピのボタンを長押しして速度測定モードにし，**9**と同じように磁石を支えている糸を，指でつまんで支えて静止させてから放して落下させ，ビースピによって磁石（+おもりケース）が落下する速さが測定できていることを確認する。

注意： 次ページの課題 1—1 等の測定は，バネばかりの値の測定と，ビースピによる速さの測定の 2 つである。ここまでの準備が不十分であると，以後の測定を行うことが困難になる。ここまでの実験のやり方に十分習熟してから次の実験を行うこと。

装置の組み立てとセッティングがうまくいかず，この測定がうまくできない場合は，手をあげて席を離れ，試験会場の後ろに用意されている装置の見本を見に行き行って良い。

課題 1－1. 銅製パイプ (肉厚 0.5mm) の中を落下する磁石に働く力と落下の速さの測定

前頁の予備実験で行った操作を精密におこなう。

- ① おもりケースは空のまま、磁石を銅製パイプの中に落下させる。このとき、落下中の磁石に働く力 (N) をバネばかりによって測定せよ。
 - ② このときの磁石の落下の速さを、ビースピによって測定せよ。(測定値は km/h であることに注意する。結果の記録はこの値のままでもよい。)
 - ③ ①②の実験を何度か繰り返し、測定結果 (測定の平均値) を解答用紙に記入せよ。※ 速度の測定に大きなばらつきがあるときには、大きく異なる測定結果を除いた残りの測定値で平均を計算するなどの処理をしてかまわない。
- ※ 解答用紙に記入するときに、速さの単位は km/h を m/s に直すこと。
- ④ おもりケースの中に、おもりを小 1 個, 大 1 個, 小・大各 1 個, 大 2 個と入れ、それぞれのおもりの場合に①～③と同様の測定を行い、測定結果 (測定の平均値) を解答用紙に記入せよ。

おもりとして用いた鉄球の質量は、大きな鉄球が 4.07g, 小さな鉄球が 2.11g である。おもりケースと磁石及び糸の合計の質量は 4.10g とする。(作り方によって若干のちがいが生じると考えられるが、結果の整理はこの値でおこなってよい。)

これらの値を、自分で測定したい場合は、部屋の後ろに用意してある電子天秤を用いて測定すること。また、重力加速度の大きさは 9.8m/s^2 とする。

- ⑤ 以上の測定結果から、磁石の速さ (m/s) と磁石に働く力 (N) のグラフを描け。グラフの横軸 (x 軸) を磁石が銅製パイプの中を通過する速さとし、縦軸 (y 軸) を磁石が受ける力の大きさとする。

課題 1－2. アルミ製パイプ (肉厚 0.5mm) の中を落下する磁石に働く力と落下の速さの測定

- ⑥ 実験課題 1－1 の最後の実験の状態から、金属パイプを取り替える。
おもりケースをクリップからはずし、磁石を持ち上げて銅製パイプから抜き出す。肉厚 0.5mm のアルミ製パイプ (肉厚の薄い方) の一端に吊り下げる糸を取り付け、実験台の銅製パイプに代えて、このアルミ製パイプを吊り下げる。
- ⑦ アルミ製パイプの中にネオジウム磁石を入れ、おもりケースを空として下のクリップに吊り下げ、磁石をアルミ製パイプの中を落下させる。
このとき、落下中に磁石に働く力をバネばかりによって測定せよ。
- ⑧ 磁石の落下の速さをビースピによって測定せよ。
- ⑨ 鉄球のおもり (大・小) を用いて、課題 1－1 と同じ実験を何度か繰り返して測定の精度を高め、測定結果を解答用紙に記入せよ。
- ⑩ 以上の測定結果から、磁石の速さ (m/s) と磁石に働く力 (N) のグラフを描け。グラフの横軸を磁石がアルミ製パイプの中を通過する速さとし、縦軸をこのとき磁石が受ける力の大きさとする。

課題 1-3. アルミ製パイプ(肉厚 1.0mm)の中を落下する磁石に働く力と落下の速さの測定

- ⑪ 肉厚 1.0mm のアルミ製パイプ (肉厚の厚い方) の一端に吊り下げる糸を取り付ける。実験台の肉厚の薄いアルミ製パイプに代えて、肉厚が厚いアルミ製パイプを吊り下げる。
- ⑫ アルミ製パイプの中にネオジウム磁石を入れて糸を支えてから、おもりケースを空として、磁石をアルミ製パイプの中を落下させる。このとき、落下中に磁石に働く力をバネばかりによって測定せよ。
- ⑬ 磁石の落下の速さをビースピによって測定せよ。
- ⑭ 鉄球のおもりを用いて課題 1-1 と同じ実験を何度か繰り返して測定の精度を高め、測定結果を解答用紙に記入せよ。
- ⑮ 以上の測定結果から、磁石の速さ(m/s)と磁石に働く力(N)のグラフを描け。グラフの横軸を磁石がアルミ製パイプの中を通過する速さとし、縦軸をこのとき磁石が受ける力の大きさとする。

課題 1-4.

課題 1-1, 課題 1-2, 課題 1-3 で描いたグラフから、パイプの中を落下している磁石が受ける力 (f) は、磁石の速さ (v) の何乗に比例しているとみなすことができるか。

下記の式の□の中にどのような数字が入るか、その数字を答えよ。

$$\text{磁石が受ける力} : f = k \cdot v \quad \square$$

(k は比例定数である)

課題 1-5.

- (1) 上記の式の比例定数 k の値を、銅製のパイプの中を磁石が動く場合について、課題 1-1 で書いたグラフを用いて求めよ。求めた値を $k(\text{Cu})$ とする。
- (2) 上記の式の比例定数 k の値を、肉厚が薄いアルミ製のパイプの中を磁石が動く場合について、課題 1-2 で書いたグラフを用いて求めよ。求めた値を $k_1(\text{Al})$ とする。
- (3) 上記の式の比例定数 k の値を、肉厚が厚いアルミ製のパイプの中を磁石が動く場合について、課題 1-3 で書いたグラフを用いて求めよ。求めた値を $k_2(\text{Al})$ とする。

課題 1-6. 実験の考察

$k(\text{Cu})$ と $k_1(\text{Al})$ の比, $k(\text{Cu})/k_1(\text{Al})$ を求めよ。また $k_2(\text{Al})$ と $k_1(\text{Al})$ の比, $k_2(\text{Al})/k_1(\text{Al})$ を求めよ。これらの値は、アルミニウムと銅の、物質としての性質の何の比を表していると考えることができるか。また、これらの実験の結果から金属パイプ中で磁石が受ける力を、どのように説明することができるか、簡潔に述べよ。解答欄が不足する場合は解答用紙の裏に記しても良い。

課題 1-7.

以上の実験問題 1 の測定において、良い測定結果を得るために、どのような理由で、どのような事柄に工夫・留意して実験をおこなったか。各自の実験の工夫について簡潔に述べよ。解答欄が不足する場合は解答用紙の裏に記しても良い。

実験問題2

実験の目的：

図1のように磁石球と鋼球を直線レール上で組み合わせ、鋼球1を磁石球めがけて衝突させると、予想もできないほどの猛スピードで鋼球2が飛び出す。いったいこのエネルギーはどこから来るのだろうか。ガウス加速器と呼ばれるこの衝突実験の仕組みを解明する。

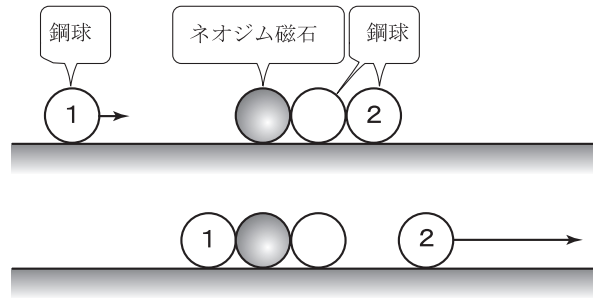


図1

実験問題2で使用する物品：

- | | | |
|---------------------------|----------------------------|---------|
| (1) ビースピ 2個 | (2) 鋼球（鉄球 大：直径10mm） 5個 | |
| (3) ネオジボール(球形のネオジウム磁石) 1個 | (4) アルミレール（長さ500mm，幅4.3mm） | |
| (5) 実験台 | (6) セロハンテープ 1個 | |
| (7) 厚紙（画用紙） | (8) 30cm ものさし 1 | |
| (9) 1 kg バネばかり | (10) ポリエチレンテープ 少々 | |
| (11) はさみ | (12) 厚紙（厚手のもの） | (13) 電卓 |

※ (3)ネオジボール，(4)アルミレール，(9)，(10)，(12)以外は実験問題1と共通である。

実験の背景：

(1) 運動量保存の法則

質量 m [kg] の物体が速度 \vec{v} [m/s] で運動するとき、この物体は速度の向きに運動量 $m\vec{v}$ [kgm/s] を持つ。運動量は向きと大きさを持つベクトルである。

いま、一直線上を速度 \vec{v}_1 ， \vec{v}_2 で運動している質量 m_1 の物体1と質量 m_2 の物体2が衝突

し、それぞれの速度が \vec{v}'_1 ， \vec{v}'_2 になったとする。

もしこれらの物体がお互いに及ぼしあう力以外の力を受けなければ、衝突前後で物体1，2の持つ運動量の合計は不変である。

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2$$

これを運動量保存の法則という。一直線上であれば、速度 \vec{v} の向きを v の正、負で表すことができる。

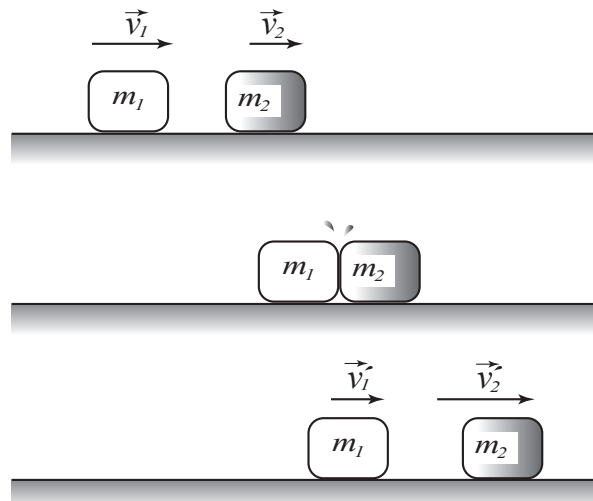


図2

(2) 運動エネルギー

質量 m [kg] の物体が並進速度 \bar{v} [m/s] で運動するとき、この物体の並進運動のエネルギーは

$$K_T = \frac{1}{2}mv^2 \text{ [J]}$$

で表される。 K_T のみを持つ物体は、止まるまでのあいだ、他の物体に対して K_T [J] の仕事を行うことができる。もし、この物体が回転運動を伴う場合には、

$$K_R = \frac{1}{2}I\omega^2 \text{ [J]}$$

の回転運動のエネルギーをあわせ持つ。 ω [rad/s] は回転の角速度である。 I [kgm²] は慣性モーメントと呼ばれる量で、その物体の回転運動のしにくさを表す。

質量 m [kg]、半径 R [m] の球体が、球の中心を通る軸の周りに回転運動する場合には、

$$I = \frac{2}{5}mR^2$$

である。

図3のように、球が平面上を滑らずに回転するとき、

$$v = R\omega$$

の関係がある。

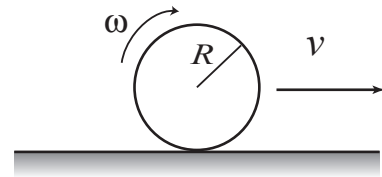


図3

球体がレール上を滑らずに回転する場合、 v と ω の関係はもう少し複雑になる。

図4で、レール幅を Δ [m]、球の中心から左右のレールの先端を結んだ水平面までの距離を r [m] とすれば、これらのあいだには

$$\begin{cases} R^2 = r^2 + \left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 \\ v = r\omega \end{cases}$$

の関係がある。

球体がレール上を回転しながら運動するとき、その並進速度を \bar{v} とすると、このときの回転運動のエネルギーは

$$K_R = \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2} \times \frac{2}{5}mR^2 \times \left(\frac{v}{r}\right)^2 = \frac{1}{2}mv^2 \times \left[\frac{2}{5}\left(\frac{R}{r}\right)^2\right] = \frac{1}{2}mv^2 \times \frac{2}{5} \times \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta}{2R}\right)^2}$$

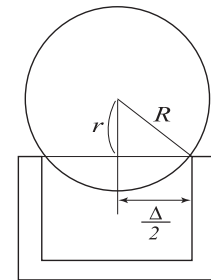


図4

と表せる。したがって、球体がレール上を速度 \bar{v} で並進運動しているとき、球体の持つ並進運動と回転運動のエネルギーの合計は

$$K_T + K_R = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2}mv^2 \left[1 + \frac{2}{5} \times \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta}{2R}\right)^2} \right]$$

と表すことができる。

(3) 磁力による位置エネルギー

磁石球 A が原点に固定されているとき、そこから x の位置にある鋼球 B を磁力に逆らって無限遠方まで引き離すのに必要な仕事を $W(x)$ とする。磁石球 A—鋼球 B 間の距離が無限大のときの、磁力による位置エネルギーを 0 とすると、点 x における磁力による位置エネルギー $U(x)$ は

$$U(x) = -W(x)$$

と表すことができる。磁石球 A—鋼球 B 間に他の鋼球 C がはさまれているときは、両球間が真空であるときに比べて働く磁力は大きくなるが、同様に x の位置にある鋼球 B を磁力に逆らって無限遠方まで引き離すのに必要な仕事を $W'(x)$ とすると、この場合の点 x における磁力による位置エネルギーは

$$U(x) = -W'(x)$$

と表すことができる。

もちろん作用反作用の法則により、磁石球 A (+鋼球 C) の受ける力と鋼球 B の受ける力は大きさが等しく向きは反対である。

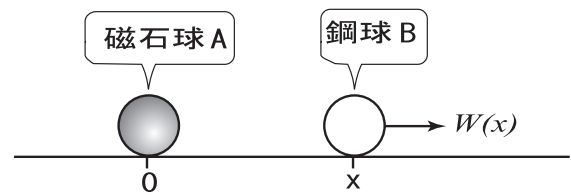


図5

(4) 鋼球の衝突

ニュートンボール、あるいはカチカチボールと呼ばれるおもちゃがある。左端の鋼球が図6①のようにして衝突すると、弾性パルス波が生じそれが②、③と伝わって、右端のボールをはじく(④)。第一近似として左端の鋼球の衝突直前の運動エネルギーがすべて右端の鋼球の衝突直後の運動エネルギーになると考えることができる。

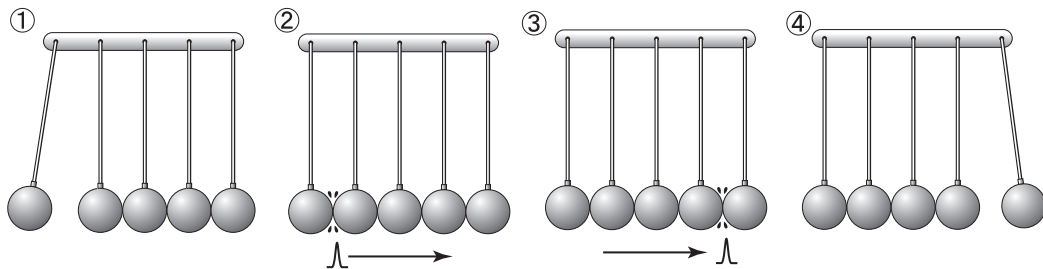
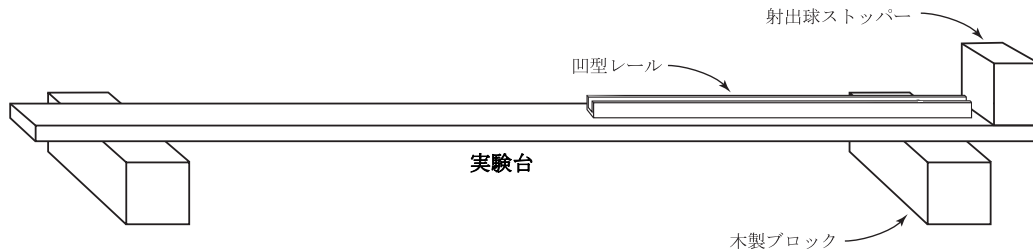


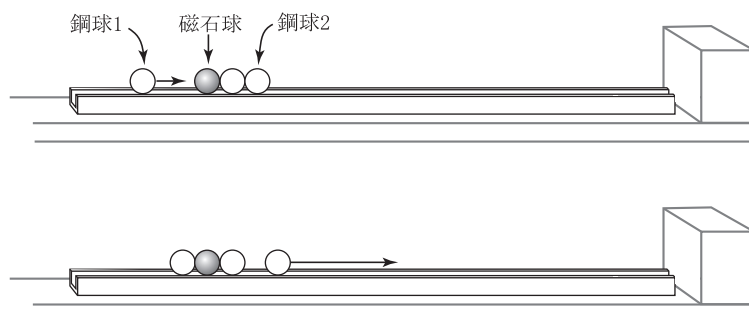
図6 衝突するとパルス波が伝播してエネルギーを伝える。

実験の準備：

- 1 実験問題 1 で実験台の台座に用いた木製ブロックを机の左右に配置し、その上に実験台（柱）を置く。その際、実験台はビースピをセットするプラスチックレールが固定されている面を上にし、これらの間に、凹型のアルミレールを置く。次に、衝撃球ストッパーのアルミレールの延長上の壁に、衝撃吸収シートを 1 枚、両面の保護フィルムをはがしてストッパーの壁に貼り付ける。このシートがストッパーに当たる鉄球が飛び跳ねることを防いでくれる。もう一枚は予備である。

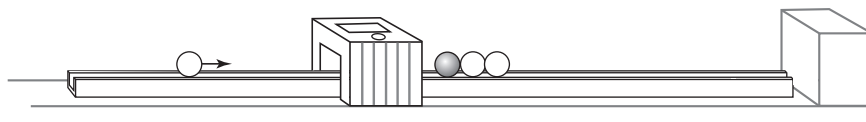


- 2 凹型のアルミレールが水平になるように、木製ブロックと実験台の間に厚紙を挟んで調節する。レール上に鋼球を置いたとき、どちらにも転がらなければ、水平がとれていると判断する。
- 3 凹型のアルミレール上に鋼球 2 個と磁石球 1 個を図のように配置し、磁石球側から鋼球（これを鋼球 1 とする）をゆっくりとした速さで衝突させる。すると反対側の鋼球（これを鋼球 2 とする）が猛スピードで飛び出すことを確認する。

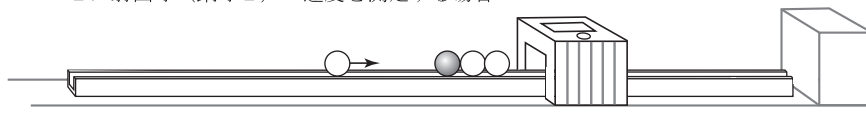


- 4 入射球（鋼球 1）や射出球（鋼球 2）の速度を求める際、ビースピを図のように配置して測定する。実際にうまく測定できるかどうか確認する。

1. 入射球（鋼球 1）の速度を測定する場合



2. 射出球（鋼球 2）の速度を測定する場合



課題 2-1. 鋼球 3 個による衝突実験

図 1-1 のようにレール上に鋼球を 2 個並べ、そこに入射球 1 を衝突させると射出球 2 が飛び出す。入射球 1 が直接衝突する鋼球は動かないようにゼロハンテープでレールに固定する。球 1 の入射速度 v_1 と球 2 の射出速度 v_2 をビースピ 2 個を用いて測定し、 v_1 と v_2 の関係を調べる。

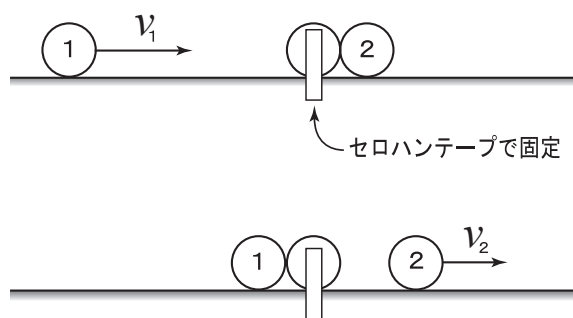


図 1-1

入射球 1 の速度を測定するときは、できるだけ衝突直前の速度を知りたいので、ビースピを十分に鋼球 2 個側に近づけて測定する。(図 1-2)

また、射出球 2 の速度を測定するときは、できるだけ衝突直後の速度を知りたいので、ビースピを十分に射出側から鋼球に近づけて測定する。(図 1-2)

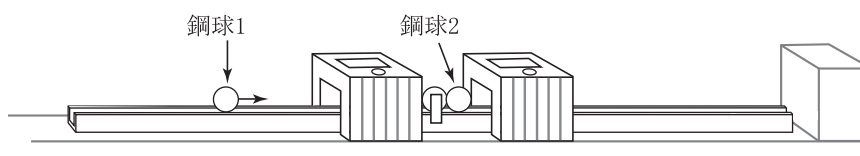


図 1-2

なお、鋼球の半径は $R = 4.95\text{mm}$ 、凹型レールの幅は $\Delta = 4.05\text{mm}$ とする。

- ① 入射球 1 を鉛筆などではじき、異なる速度で衝突させ、 v_1 と v_2 のセットを何通りか求めよ。等しい v_1 に対して異なる v_2 が得られたときは、より大きな値の v_2 を持つセットを採用せよ。より大きな v_1 に対し、より小さな v_2 が得られたときは、そのセットを破棄せよ。測定した中から、適切なセットを 3 つ記録せよ。 v_1 の値は、 $1.0 \sim 2.0\text{km/h}$ の範囲にあるものとする。
- ② 入射球 1 をガウス加速器を利用して高速で鋼球 2 個に衝突させ、①と同じ方法で測定し、適切な v_1 と v_2 のセットを 3 つ記録せよ。 v_1 の最小値は 6.0 km/h 程度とする。

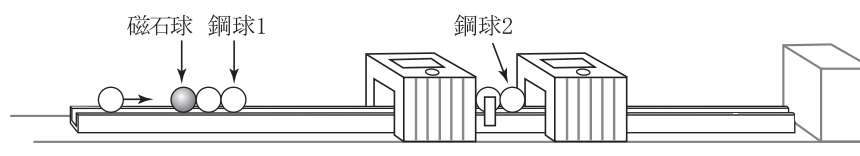


図 1-3

- ③ 実験①も②も、 v_2 は v_1 より小さくなっており、摩擦によるエネルギーの散逸がその原因の一つであることは明白である。しかしそれでも実験①のデータセットと実験②のデータセットでは、異なる傾向が見られる。二つの測定結果は、どのような点で異なる傾向にあるか。
- ④ 実験①、②のデータセットに、このような異なる傾向が見られたのはなぜか、その理由を推察せよ。

課題 2-2. ガウス加速器の実験

図 2-1 の実験で、運動量は保存されているのだろうか。衝突後、合体した左 3 個の球（以下「3 個球」）と射出球 2 の速度を求めて調べてみよう。

入射球 1 の速度をできるだけ小さくして衝突させる。衝突直後の射出球 2 と 3 個球、それぞれの運動量を以下の要領で求める。

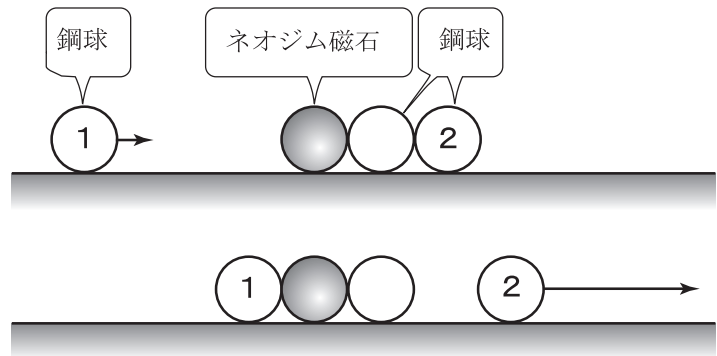


図 2-1

【射出球 2 の運動量】

射出球 2 の速度は、ビースピの測定位置により異なることが予想される。

そこで図 2-2 のように、射出球 2 の右側面がビースピ 1 の左側ゲート面に接するように、またビースピ 2 をビースピ 1 に接するように配置する。この配置により、各ビースピは射出球 2 の 3.0cm, 9.0cm の位置における瞬間の速度を測定するものとする。（ビースピの長さは 6.0cm である）

射出球 2 の運動を等加速度運動と考える。射出球 2 の衝突前の位置を原点 0 として、そこでの衝突直後の速度を v_0 、位置 x における速度を v 、加速度を a とすれば、 $v^2 = v_0^2 + 2ax$ の関係が成り立つ。

- ① ビースピ 1, 2 の測定結果 v_1, v_2 を $v^2 - x$ グラフに記入し、 $x = 0$ の点に外挿することにより、 v_0 を求め、これを射出球 2 の速度とせよ。データは 3 回取り、それぞれから得られた v_0 の平均値を求めよ。
- ② 鋼球 1 個の質量は 4.07g である。これより射出球 2 の運動量を求めよ。

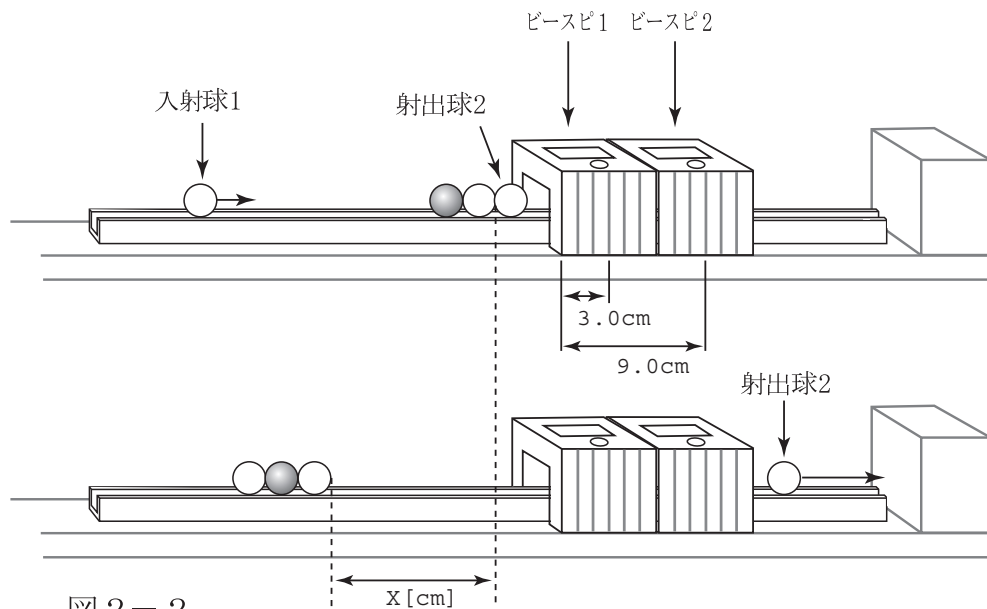


図 2-2

【3個球の分裂直後の速度】

3個球の分裂直後の速度 v は、3個球がレール上を滑って止まるまでの距離 X [cm] より求める。(図2-2) 重力加速度の大きさを g 、動摩擦係数を μ' とすれば、 $v^2 = 2\mu'gX$ と表される。 g は重力加速度の大きさで、 $g=9.8\text{m/s}^2$ である。

3個球のレールとの動摩擦係数 μ' は、図2-3のようにレールを傾け、3個球を滑らせることにより求める。ビースピ1、2を適当な距離 z 離して設置する。ビースピ1、2の速度をそれぞれ v_1 、 v_2 、3個球の受ける動摩擦力を f' 、3個球の質量を M とすれば、

$$\frac{1}{2}Mv_1^2 + Mgz \sin \theta - \frac{1}{2}Mv_2^2 = f'z$$

一方、斜面上の3個球の受ける垂直抗力 N と動摩擦力 f' の関係 $f' = \mu'N$ より、

$$f' = \mu' Mg \cos \theta$$

以上の2式より、

$$\mu' = -\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g \cos \theta \times z} + \tan \theta$$

となる。 $\tan \theta$ 、 $\cos \theta$ は

$$\tan \theta = \frac{b}{a}, \quad \cos \theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

の関係式より計算する。

- ③ X [cm] を3回測定し、その平均値を X の値とせよ。
- ④ 3個球がすべる条件で、 a 、 b 、 z を適当に決め、 v_1 、 v_2 を3回測定し、それぞれ μ' を求めよ。その平均値を μ' の値とせよ。
- ⑤ 3個球の分裂直後の運動量を求めよ。鋼球1個の質量は4.07g、磁石球1個の質量は3.93gである。

【実験結果の検討】

- ⑥ ②と⑤の結果は適当であるか、検討せよ。

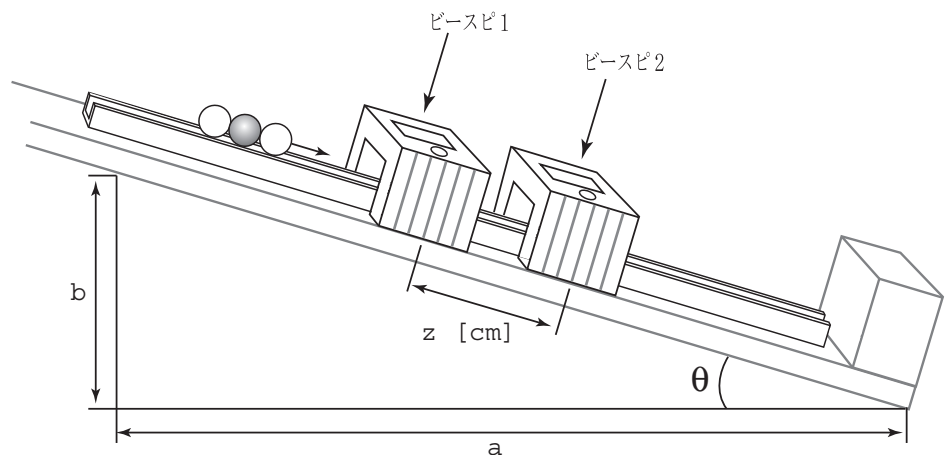


図2-3

【ガウス加速器のエネルギー】

- ⑦ 衝突直後の射出球2と3個球の持つ運動エネルギーの合計を②と⑤の実験結果より求めよ。ただし、射出球2の射出直後の速度は大きいので、球は滑ったまま並進運動し、回転運動は伴わないとする。

チャレンジ実験 【磁力のする仕事】

この実験は、3つの実験問題がすべて終了し、時間に余裕のある場合におこないなさい。

なお、解答の内容については、ボーナスポイントを与えることとする。

⑦で生じた運動エネルギーは、磁石球と鋼球の磁力による位置エネルギーが転化したものと考えられる。入射球1が磁石球と合体する過程で、磁力のする仕事を W_1 とする。もし摩擦が無視できれば、 W_1 のエネルギーが弾性波として反対側の射出球2に伝わる。射出球2が磁力を振りはらって飛び出するのに必要な仕事を W_2 とすれば、衝突後に解放されるエネルギーは $W_1 - W_2$ である。そこで W_1 、 W_2 を以下の要領で測定して $W_1 - W_2$ を求め、⑦の結果と比較する。

⑧ 厚紙を20mm×20mmのサイズに十数枚切り取り、すべて重ねて10mm程度の厚さとし、重ねたまま物差しを目盛り当てて全体の厚さを測る。この測定値を枚数で割って、厚紙1枚の厚さを求めよ。(図2-4)

⑨ 図2-5のようにして磁石球から鋼球を引き離すのに必要な力を求める。磁石-鋼球間に厚紙を0枚、1枚、2枚、3枚・・・と順に挿入していき、それぞれの場合で引き離すのに必要な最低限の力をバネばかりを用いて求めよ。鋼球をバネばかりで引く際、結んで輪の形にしたポリエチレンテープを利用する。また、鋼球が勢い余って飛び出ないように、セロハンテープで鉄球をポリエチレンテープに貼り付けておくとよい。

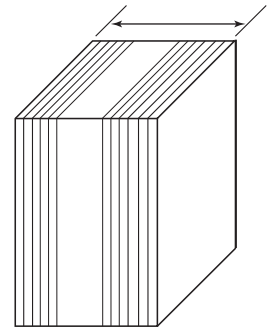


図2-4

まず、1kg用のバネばかりを用いて磁石球-鋼球の実験をおこなって、結果を表にまとめよ。

直接接触しているときの両球間距離を0とし、以下、厚紙1枚分、2枚分・・・と、離れるときの磁力を測定する。離れる瞬間ははかりの目盛りが大きく動くので、注意が必要である。

次に磁石球・鋼球-鋼球の2つの場合について実験をおこなう。

このときは、1Nのバネばかりも、力が小さい時に用いるとよい。

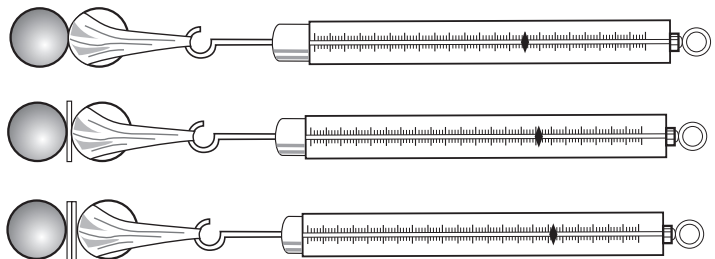
⑩ それぞれの表から磁力-距離グラフを作成せよ。

⑪ 磁力-距離グラフの面積が仕事である。それぞれのグラフのマス目の数を数えて W_1 、 W_2 を求めよ。

1マスの中をグラフが横切っているときは0.5マスとして数えよ。

⑫ こうして得られた $W_1 - W_2$ が⑦の結果と整合的かどうかを検討せよ。

(1) 磁石球-鋼球



(2) 磁石球・鋼球-鋼球

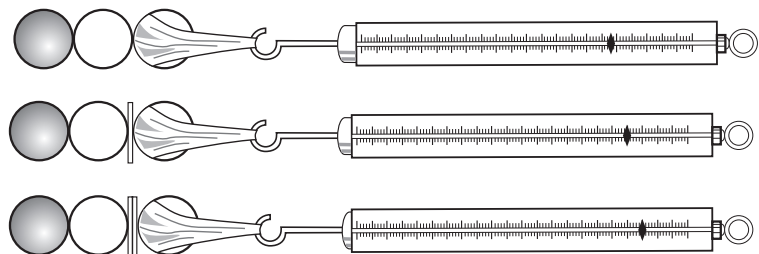


図2-5

(引く力が50gw以下の時は1Nバネばかりを使うとよい。)

実験問題3

目的：この実験では、単極モーターと呼ばれる現象を体験し、その仕組みを考察する。

使用物品：単3乾電池、電池の+極に押し込むことができるリード線付のスナップ端子（※1）、円柱状ネオジウム磁石及び円柱状ウレタン、（※2）、鉄釘、糸、自作スタンド（※3木製ブロックと柱を組み合わせる）、セロハンテープ、両面テープ

※1 スナップ端子にはリード線と針金に取り付けてある。リード線と針金をセロハンテープで束ねると、リード線を一定の形に固定することができる(図1, 図5を参照)。

※2 実験問題1で使用した物。両面テープの糊のあとや糸をきれいにとっておくこと。

※3 自作スタンドの様子は図6として問題の最後に示す。

予備実験：まず、ネオジウム磁石の円柱面に糸をセロハンテープで貼り付けて吊り下げ、N極とS極を見分け、目印を付ける。(右図)

※ 会場の南北の方向は試験監督から示される。



課題3-1. 実験1

ネオジウム磁石のN極側の面の中心に鉄釘を吸い付かせて立てる。電池の+極にリード線付スナップ端子を押し込んで取り付ける。電池の+極を上にして片手で保持し、鉄釘を付けた磁石を電池の-極から釘を介してぶら下げる。

図1のように、リード線の他端を磁石の円柱面に触れてみよう。磁石は円柱軸の周りに回転するであろう。このとき、大電流が流れるので、短時間だけ接触させること。長時間流し続けると、電池が消耗するだけでなく、リード線や電池が加熱される。

これが、単極モーターと呼ばれる現象である。磁石の極性（NSの向き）を入れ替えて、回転の方向を調べ、磁石の極性と回転方向の関係を記録せよ。



図1

実験問題3の目的は、この回転がどのような仕組みで起こるかを解き明かすことである。予備知識として次の事柄を挙げておこう。

(1) 電流の作る磁場（磁界）（磁束密度 B ）

1 A. 直線電流の周りには、電流に垂直な平面内に電流を中心とする同心円状に磁場が生じる。向きは、

電流の向きに進む右ねじが回転する向きである (図 2 A)。

1 B. 一周する電流は、電流を縁とする面を貫くように磁場を作る。向きは電流の向きに回転する右ねじの進む向きである (図 2 B)。

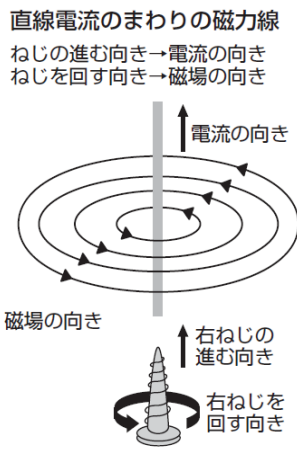


図 2 A

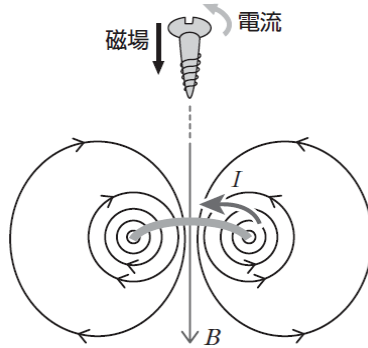


図 2 B

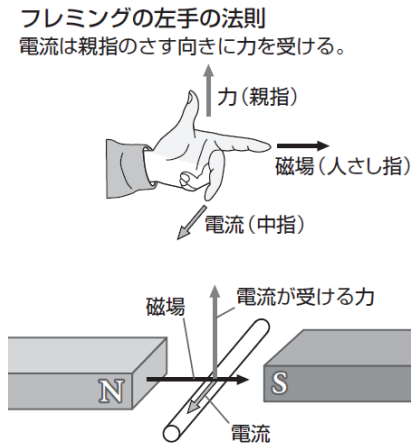


図 3

(2) 電流 (の流れている導体) が磁場から受ける力 (ローレンツ力)

磁場中の電流は磁場と電流の両方に垂直な方向に力を受ける。向きは磁場と電流の両方に垂直においた右ねじを電流の向きが磁場の向きに重なるように回転するとき、右ねじの進む向きである。この関係はフレミングの左手の法則とも呼ばれる (図 3)。

課題 3-1 では、ネオジウム磁石自身に電流が流れる。この電流がネオジウム磁石の作る磁場から受ける力を考えてみよう。それには磁石内部の磁場の様子を知る必要がある。単独の N 極や S 極が存在しないことから、電荷が電場を作るのと同様に磁極が磁場を作るのではなく、磁場はすべて電流が作ると考えられている。磁石の場合は、それを構成する原子や分子が微小な円電流として磁場を作ると考える。円柱形の磁石では、磁石内部の隣り合った微小円電流の重なり合う部分は打ち消し合い、全体では、円柱面に沿って流れる電流だけが残る。したがって、円柱形の磁石はソレノイドと同じような磁場を作ることになる。つまり、磁場の向きは、磁石の外では N 極から S 極へ向かい、磁石の内部では、S 極から N 極へ向かい、磁場の向きを表す磁束線は始点も終点も無く、ループを描く (図 4)。

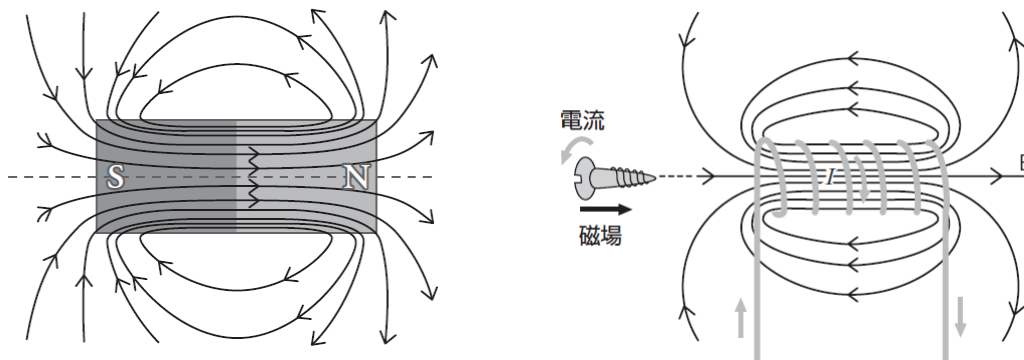


図 4 永久磁石の内外の磁場とソレノイドの周りの磁場

課題3-2. 考察1

課題3-1で流れる電流は、リード線と磁石の円柱面の接点から円柱の軸方向に流れ、中心軸に達した後は軸に沿って流れて釘に流れ込むものと仮定しよう。このとき磁石内の電流が受けるローレンツ力の向きおよび、それによる円柱軸の周りの回転力（力のモーメント、これを T_1 と呼ぶ）の向きを考察せよ。課題3-1で観測された回転の向きと一致するか？

ところで、私たちは2つの物体が及ぼしあう力について運動の第3法則（作用・反作用の法則）が成り立つことを知っている。ローレンツ力の場合にもこれが成り立つとすると、電流が受けるローレンツ力の反作用は磁場を作り出している磁石が受けるはずである。

課題3-1では、磁石内の電流が受ける回転力 T_1 の反作用（これを T_1' と呼ぶ）は磁場を作っている磁石自身が受けることになる。結局、磁石には回転力 T_1 と T_1' の和が働くことになるが、 T_1 と T_1' は打ち消しあうので、磁石には円柱軸の周りの回転力は働かないはずである。

このことと、課題3-1で磁石が回転したことは矛盾しないのだろうか？ 磁石を回転させている力の反作用はどこへ行ったのだろうか？ これを直接探る実験をしてみよう。電池とリード線を支えて、磁石を自由にして行った課題3-1では磁石が回転した。今度は逆にしてみよう。

課題3-3. 実験2

リード線付スナップ端子に糸（スナップの穴から抜けないように結び目を作っておくこと）を付け、自作スタンドから吊り下げる。（次頁の図6を参照すること。）

N極に釘を吸い付けた磁石のS極に、円柱状ウレタンを両面テープで貼り付ける。

糸を付けたリード線付スナップ端子を電池の+極に取り付け、釘を吸い付けた磁石がぶら下がったとき、磁石の円柱面にリード線の他端が触れる位置になるようにリード線を折り曲げる。

図5のように、ウレタンの部分を手で持ち、釘の先端が糸で吊られた電池の一極の中心付近に接し、同時に、磁石の円柱面がリード線の端に触れるように磁石を支える。このとき起こる現象を記録しなさい。

また、手を放した状態で、釘の先端と電池の一極、および、リード線の端と磁石の円柱面が触れるようにすると何が起こるか？

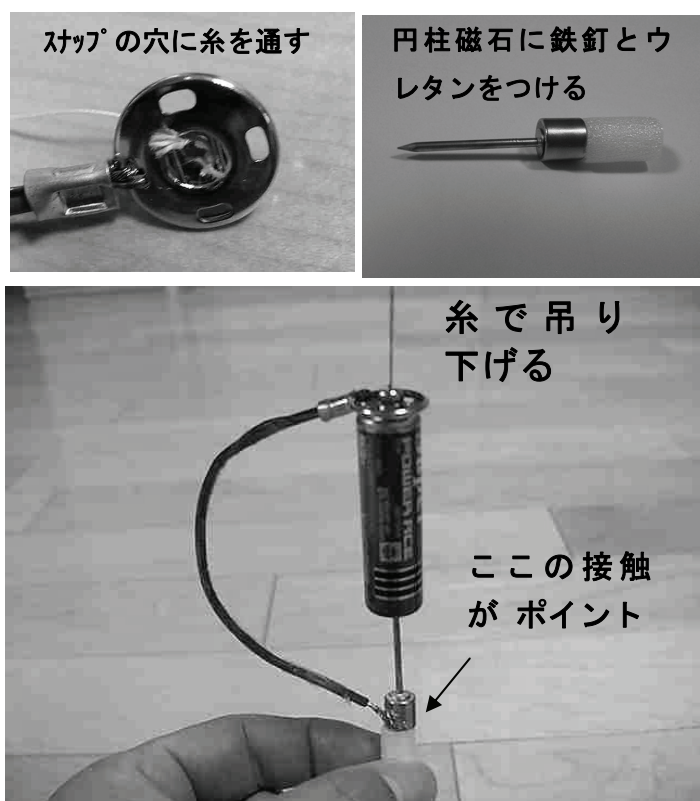


図5

課題3-1と課題3-3の実験結果から、磁石と電池+リード線の間で回転力を及ぼし合っているらしいことが分かるが、これをさらに詳しく調べて見よう。

課題3-4. 実験3

2つの実験から、課題3-1の場合に限らず磁石の近くを電流が流れれば磁石は回るとはならないか？という疑問が湧いてくる。これを調べるため、課題3-1の配置で、リード線の本端を磁石の円柱面以外のいろいろなところ（上下の底面、その縁あるいは中心、釘、電池の一極）に触れてみよう。また、思いつくいろいろな場合を実験して、どのような場合に磁石が回転するか、規則性を探ってみよう。

私たちは、方位磁針に磁場を加えると、磁針を磁場と平行な向きにするような回転力が働くことを知っている。ところが、課題3-1で磁石を回転させた力は、方位磁針の向きを変えるような力ではなく、NS極を結ぶ軸の周りに磁針あるいは磁石を自転させるような力である。

課題3-5. 考察2

棒磁石をNS極を結ぶ軸の周りに自転させようとするような力を及ぼすには、どのようにすれば良いか、考察せよ。

課題3-6. 結論

以上の実験や、疑問点の考察から、課題3-1で磁石を回転させた力はどのようなものであるか、またその回転力は T_1 とどのような関係にあるか説明しなさい。

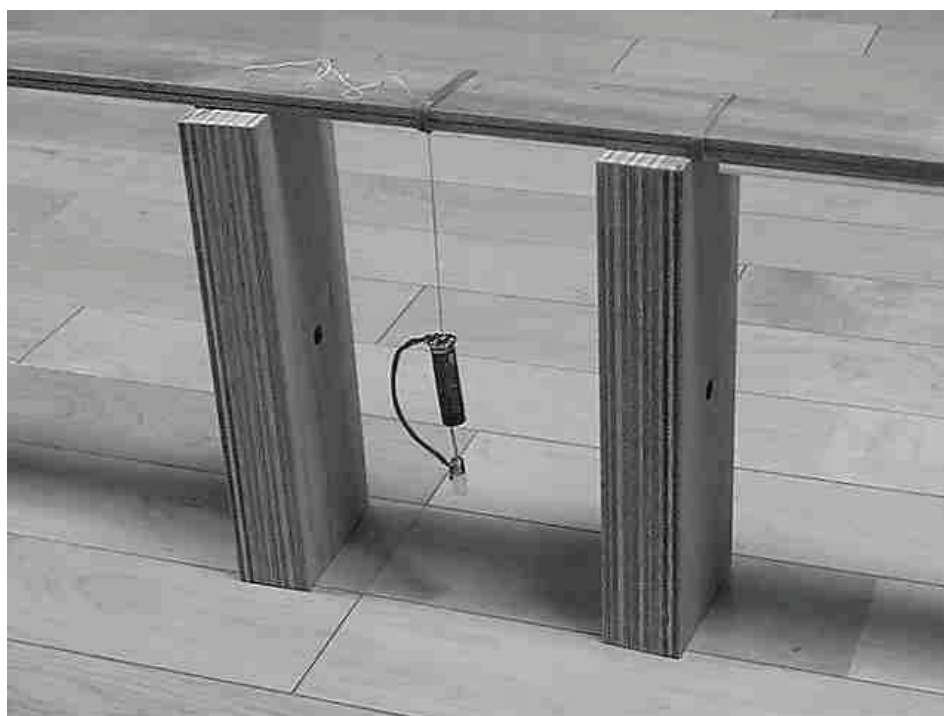


図6