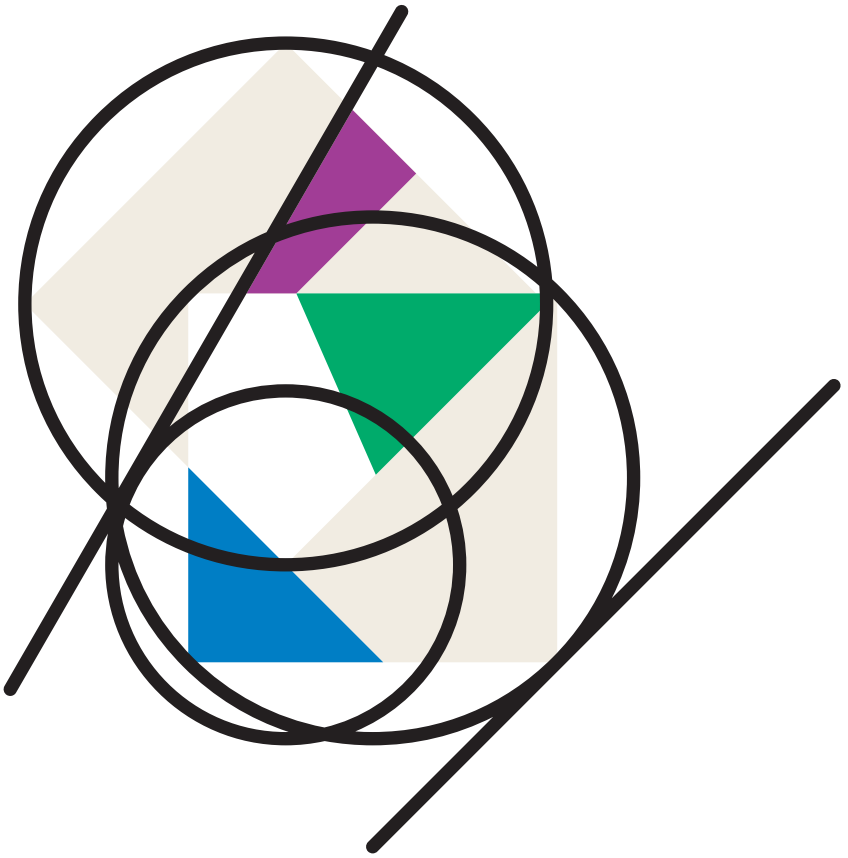
VERIOR INTERPRETATIO NATURAE

物理学講義実験ハンドブック

第5版



物理学講義実験研究会　編

はじめに（第 5 版の出版にあたって）

本冊子は、大学低年次に開講されている物理学の授業の教育効果を高めるため、各大学の担当教員が開発した講義実験の教材、および授業法をまとめたものです。

黒板でどれだけ丁寧に解説しても、学生に物理概念を理解させ、定着させることはなかなか容易なことではありません。演習問題を何度も解かせたはずなのに、期末試験の結果に失望したという経験をお持ちの方も多いのではないでしょうか。学生の中には、演習問題の計算を実行する力はあっても、実際の自然現象に法則を適用できない人も見受けられます。

そこで、「物理学講義実験研究会」では、物理法則を可視化し、学生が直観的に物理概念を把握できるような講義実験を開発しています。また、講義実験を新規開発するだけではなく、既存の講義実験の効果的な提示方法も検討しています。

講義実験に求められる要件も整理しました。たとえば「開発の秘訣」として、短時間で明快な結論が出ること、特別な実験設備を必要としないこと、安全であることなどを挙げています。また、「実施の秘訣」として、まず実験の結果を予想させ、その根拠を問い、実験で確かめること、最後は必ず計算して確認させることなど、学生に主体的に考えさせることを念頭に置いた要件をまとめています。

この冊子を参考にして、読者の方々のそれぞれの授業で、よりよい教材の開発や、効果的な使用方法を考えていただければ幸いです。本研究会の Web サイト[1]では動画を含めて順次公開していますので、そちらもぜひご参照ください。

本研究会の活動に際しては、名古屋大学総長裁量経費を 2 年間、続いて科学研究費補助金[2-5]を何年にも渡って助成いただいていることに感謝申し上げます。また、活動にご協力いただいた名古屋大学の高等教育研究センター、理学部装置開発室、および教養教育院物理学実験準備室にも御礼申し上げます。

2020 年 3 月　物理学講義実験研究会 幹事 安田 淳一郎

1 URL: http://physicsdemo.org/

2 基盤研究(C)「大学講義で物理的概念の理解を促進させる系統的演示実験とリアルタイム評価の開発」(H23〜H25, No. 23501062)

3 基盤研究(C)「大学で学生に自主的に企画させる物理学体験学習と評価法の開発」(H26〜H28, No. 26350191)

4 基盤研究(C)「非物理系の大学初年次物理学教育における系統的演示実験・講義の展開」(H29〜R1, No. 17K00988)

5 基盤研究(B)「アクティブラーニング型初年次物理学コースデザインと標準テストによる効果検証」(H30〜R3, No. 18H01065)

本書の使い方

物理学の基礎的、入門的な授業では、実際の現象と物理的な概念や法則とが対応していることを学生によく理解してもらう必要があります。そのために用いられるのが「講義実験」、すなわち、教員が教壇で実験してみせる「演示実験」や、学生が机上で簡便な実験を行う「机上実験」です。これらにより、概念や法則を現象のイメージを伴って理解する姿勢が涵養されたり、特異な現象を発見する感度が上がったりすることが期待されます。

ただし、もともと内容が詰まっている物理学の講義のなかに実験を取り入れるには、手際よい準備、授業全体における適切な位置づけ、効果的な実施などが求められます。そのためのガイドラインがこの冊子にまとめられています。

◆第 1 部「物理学講義実験の秘訣」

第 1 部では、「講義実験の機能」「開発の秘訣」「実施の秘訣」「留意すべき点」の 4 つの観点から秘訣をまとめました。ここで挙げられている知見には、教育研究によって効果がある程度確かめられているものと、経験的に見出されて教員間で共有されているものの両者が含まれています。書かれていることすべてを同時に満たす必要はないので、ご自身の授業内容や目的に応じて、組み合わせてご活用ください。

◆第 2 部「物理学講義実験の実例集」

第 2 部では、33 の講義実験の実例をまとめました。ここで挙げられている実例には、単一の現象、もしくは対照させた現象を提示する「シングル実験」と、段階的に連続した現象を提示する「シリーズ実験」の両者が含まれています。「シリーズ実験」は実験タイトルの後ろに「S」を付して区別してあります。

それぞれの実験には、【キーワード】の項目が設けてあります。キーワードは、実際の授業のニーズに合うよう、平成 20 年度に名古屋大学教養教育院物理学小部会でまとめられた「物理学講義キーワード」を参考に選択されています。それに含まれないキーワードには、「*」印をつけてあります。

◆第 3 部「講義実験を始めるために」

第 3 部では、これから講義実験を始めようとしている方のために、有用な情報をまとめました。具体的には、実験器具の準備に不慣れな教員の方のために、器具の入手方法や、器具製作の依頼方法などが掲載されています。また、講義実験に関する文献のなかで、とくに有用な文献を精選してまとめました。

目次

はじめに 1
本書の使い方 2

第 1 部 物理学講義実験の秘訣

1. 講義実験の機能 7
2. 開発の秘訣 7
3. 実施の秘訣 8
4. 留意すべきこと 9

第 2 部 物理学講義実験の実例集

【主なキーワード】

第 1 章 力学

1. オハジキを用いた弾性衝突 14 【運動量保存則、剛体の運動】
2. 弾まないボールの位置エネルギーの行方 16 【エネルギー保存、位置エネルギー】
3. 重ねた弾性球の反発 18 【運動量保存則、エネルギー保存則】
4. 放物線飛行で実現する無重力 20 【放物運動、慣性力、自由落下*】
5. オハジキを用いた連星モデル 22 【2 体問題、重心】
6. 斜面を用いた慣性モーメントの理解 S 24 【剛体の運動、慣性モーメント】
7. 斜面を用いた回転エネルギーの理解 26 【剛体の運動】
8. T 字型振り子の周期 28 【慣性モーメント、剛体振り子*】
9. 回転加速を用いた慣性モーメントの理解 30 【剛体の運動、慣性モーメント】
10. バネで理解する免振機構 32 【単振動、共振*】
11. メトロノームによる同期現象 34 【同期*、引き込み*】
12. 物理シミュレータによる二重振り子の運動 36 【二重振り子*、カオス*】
13. 斜面上の質点の落下 38 【質点、シミュレーション*】
14. 直線運動と回転運動の相互変換 40 【運動量保存、エネルギー保存】
15. 直線運動と回転運動 42 【慣性の法則、運動量、力積】
16. ２つの単振り子による連成振動 44 【単振り子、連成振動*、うなり*】

第 2 章 電磁気学

17. ガウス加速器 S 50 【ポテンシャル、運動量保存則】
18. 静電場の可視化 54 【電荷、電気力線、電場】
19. アルミホイルを用いた電磁力の可視化 56 【磁場中の電流に働く力】

20. 単極モーター 58 【磁場中の電流に働く力】
21. 単極ローラー 1 60 【磁場中の電流に働く力】
22. 単極ローラー 2 62 【磁場中の電流に働く力】
23. 渦電流ブレーキ S 64 【電磁誘導、渦電流*、ジュール発熱*】
24. 銅板パターンを用いた渦電流の理解 66 【電磁誘導、渦電流*】
25. 立体模型を用いた法則の理解 68 【座標、電場、ガウスの法則】
26. 赤外線カメラを用いた内部エネルギーの観察 70 【内部エネルギー*、赤外線カメラ*】
27. トロイダルコイルで理解するアンペールの法則 72 【アンペールの法則】
28. 風船によるクーロン力の体験と電荷の理解 74 【静電気、クーロン力、電荷】
29. リバーシ盤で強磁性体の人力シミュレーション 76 【強磁性体*、磁区*】

第 3 章 熱・波動・流体

30. ブラウン運動のシミュレーション 80 【ブラウン運動*、拡散現象*】
31. 熱機関としての水飲み鳥の理解 82 【熱機関*】
32. 複屈折を利用した偏光の理解 84 【偏光*、複屈折*】
33. マグヌス効果の演示 86 【マグヌス効果*】

第 3 部 講義実験を始めるために

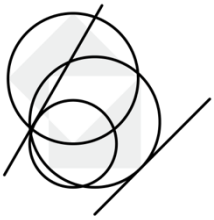
講義実験器具の準備 91
講義実験に関する参考文献 92

コラム一覧

1.【失敗談】羽の自由落下 10
2.【失敗談】弾性衝突と運動量保存則の実験 15
3. 落下事故とエア・バッグと火星着陸 17
4. 地球潮汐現象—地面の干満とは？— 23
5.「落ちる変化球」と放物運動—変化球の誤解— 46
6. 超高層気球と深海艇の浮力 47
7. エネルギーの概念と講義実験 53
8.「粉ふるい」は光もふるい分ける？ 78
9. 遺伝情報から立体的な蛋白質ができる様子 88

注
1）題目についた「S」の印は、段階的に連続した実験を提示する「シリーズ実験」であることを表します。
2）キーワードについた「*」の印は、名大物理小部会でまとめられた「物理学講義キーワード」に含まれていないことを表します。

第１部　物理学講義実験の秘訣



1. 講義実験の機能

物理学講義実験には現象と概念を架橋するという大きな役割があります。さらに、その設計や実施の方法により、以下のようなさまざまな機能をもたせることが可能です。

- □ 学生の興味関心を惹く（A）
- □ 学生のもっている知識や直観的理解の様子を把握する（B）
- □ 学生の授業への参加を促す（C）
- □ 学生に考える機会を与える（D）
- □ 得られた知識や体験を学生の記憶にとどめる（E）

2. 開発の秘訣

講義実験の機能を把握し、取り入れる意図を定めたら、講義実験の開発に移ります。ここでいう「開発」という言葉には、一から発案して実験を製作することだけではなく、文献などを参考にして実験を製作することも含まれます。以下では、講義実験の「開発の秘訣」を、大きく３つに分類して紹介します。

❶ 意図を設計に反映させる

注）括弧内は、「1. 講義実験の機能」で挙げた分類 A~E との対応を表しています。

- □ 意外な結果が得られる（A，D，E）
- □ 日常的または時事的な要素を含む（A，C，E）
- □ 見栄えがする（A，C，E）
- □ 過度に娯楽化していない（D，E）
- □ 結果が簡単に予想できない（B，D）
- □ 学生が段階的に理解できるように、実験が順序立てられている（B，E）

❷ 学生が現象を認識しやすい設計にする

- □ 講義室のどの位置からでも、実験の内容と結果を認識できる
- □ 器具の構造が単純で、ブラックボックスがない
- □ 対応する物理概念が１つに絞られている、または複数の物理概念の関連が単純である
- □ 現象が視覚的・聴覚的に明快であり、１通りにしか解釈できない
- □ ごまかしなく、直接的に現象が提示される
- □ 実験が高い確率で成功する

❸ 身近な物品や安価な部品を用いる

- □ 身近な物品や安価な部品を用いる
- □ 持ち運べる大きさ、重さにする
- □ 組み立てと分解が容易であるか、または小型なデザインにする
- □ 運搬中や実験中に壊れないようにする
- □ 実験に要する時間を 15 分以内とする
- □ 実験をすぐに繰り返せるようにする
- □ 保管しやすくする
- □ 安全性の高いデザインにする
- □ 講義室の環境や教員の技能によらず、安定した実験結果が得られるようにする

3. 実施の秘訣

「学生は講義実験を一度見せられただけでは、何も習得することができない」ということが、これまでに多くの物理教育研究者らの研究によって結論づけられています[4]。たとえ、講義実験の器具が優れた特性を備えていたとしても、それをどのように授業で実施するかによって学生への教育効果は変わってくるのです。ここでは、実験前・実験中・実験後に分けて、講義実験の「実施の秘訣」を紹介します。

❶ 実験前

- □ 実験の設定を確実に伝える
- □ 実験の注目すべきポイントを提示する
- □ 結果を学生に予想させる
  - 予想を学生から集め、いくつかの選択肢としてまとめる
  - 学生が正誤のみにとらわれないように配慮する
  - 学生の予想分布を集計し、共有する
  - 予想を理由とともに記録させる
- □ グループで結果予想について議論させる
  - 議論の際に、予想を変更することを認める
  - 議論の後に、学生の予想分布を再度集計し、共有する
  - 議論の後に、予想を理由とともに再度記録させる

4 例えば、Majerich（2008, p.13）は“*Namely, students will fail to learn from an event when exposed to it only once.*”と述べています。

❷ 実験中

- □ 学生に実験の補助を頼む
- □ 実験を複数回行って、学生に現象をよく確認させる
- □ 現象を把握できたかどうか、学生に尋ねる

❸ 実験後

- □ どのような現象が起きたかを学生に説明させる（教員が実験結果を説明した場合、結果の解釈を一方的に与えてしまうことになる）
- □ どうしてその結果が得られたか、物理的解釈をグループで議論させる
- □ 定性的な解釈を述べたのちに、定量的に計算してみせる
- □ 実験結果とシミュレーション結果を照合させる
- □ 実験内容に関連・類似した身近な現象について解説する
- □ 思考実験をさせて、実験結果の解釈を論理的に補強する

4. 留意すべきこと

- □ 安全性の確認を事前に十分に行う
- □ 新しく設計した実験は同僚教員と議論し、正確さやわかりやすさなどを確認する

Column

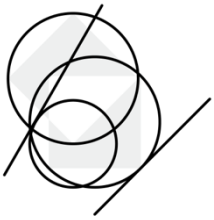
【失敗談】羽根の自由落下

羽根と本を使った自由落下の講義実験を見たことはあるだろうか？「羽根を本の上に載せて本から手を離すと、羽根と本が同時に落下する」という、シンプルな実験である。この実験の後に、「羽根に加わる空気抵抗は本があるために無視できるので、物体が重力加速度で自由落下するときの速度は、物体の質量によらない」と教員が説明するまでが型になっている。

一聞したところ、これはもっともらしい説明のように聞こえるが、実は見落としている点がある。本が落下する際に、本と羽根の間の気圧が低下するため、羽根が吸引される効果が生まれることだ。自由落下しているように見えた羽根は、実は吸引効果によって加速されているのである。この事実は、本を手ですばやく引き下げることで確認できる。重力加速度より大きな加速度で下に動かすと、羽根も加速して本とともに落ちる。もし羽根が自由落下しているならば、急速に落下する本についていけず、遅れるはずだ。

この講義実験は、著名な講義実験の本にも紹介されるような有名な実験であっても、誤った説明が流布しているケースがあることを教えてくれる。そして、それに気づかずに授業で使ってしまう教員もいる（私もその一人だった）。新しい講義実験を授業に導入する際には、事前にいろいろ試してみることや同僚と議論することが大切であると痛感した。（安田）

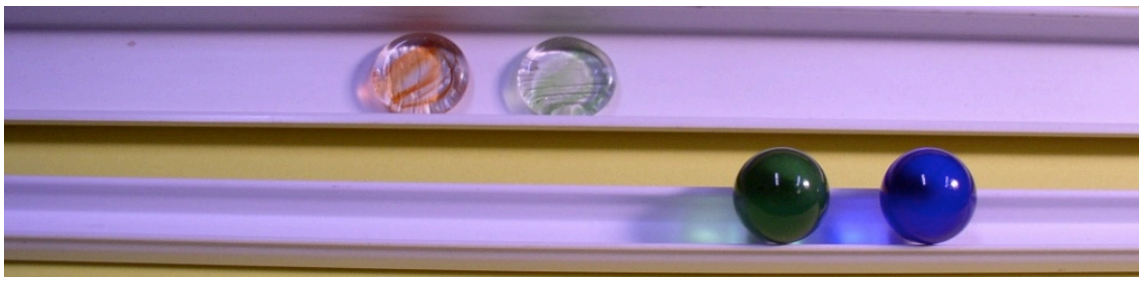
第 2 部　物理学講義実験の実例集



第 1 章　力学

1 オハジキを用いた弾性衝突

レール上でオハジキ同士・ビー玉同士を衝突させ、その違いを観察する。



キーワード	運動量保存則、剛体の運動（直線運動、回転運動）
目的	静止した物体に同質量の物体を弾性衝突させたとき、運動量が保存することを理解させる。
実験時間	５分
用意するもの	● プラスチックレール……１本 1m 程度は必要。ここでは、電気ケーブル固定用のレールを使用。 ● オハジキ……２個 ● ビー玉……２個
実験準備	なし
実験手順	① 静止したオハジキに、同質量のオハジキを衝突させる。結果：衝突させたオハジキは停止する。 ② 静止したビー玉に、同質量のビー玉を衝突させる。結果：衝突させたビー玉は減速するものの、停止しない。
教員による説明	オハジキを衝突させた場合、運動量はほぼすべて受け渡される。一方で、ビー玉を衝突させた場合に、その回転エネルギーは受け渡されない。そのため、衝突させたビー玉は静止しない。
注意点・備考	初めて力学を履修する学生には、オハジキの衝突実験だけを示すだけで十分である。すでに物理を履修したことのある学生には、ビー玉の衝突実験も示し、衝突させたビー玉が静止しない理由を考えさせるとよい。 回転エネルギーは後で履修する内容なので、ここでは軽く触れる程度にする。

Column

【失敗談】弾性衝突と運動量保存則の実験

静止した質点に、同じ質量の質点を速度 v で弾性衝突させる。衝突した質点は静止し、止まっていた質点は v で飛び出す。これは、最も単純な運動量保存の例として多くの教科書に掲載されている。しかし、黒板で計算しただけでは、非物理系の学生が実感をもてるかどうか不安になる。そこで、ビー玉とプラスチック・レールを授業中に回覧させて、学生みずから確認実験をさせた。

実験してみると、速度 v で衝突したビー玉は減速したものの静止はしなかった。「これは弾性係数が 1 でないため」と、その場をしのいで先に進んだ。しかし、後でとんでもない誤りであることに気がついた。学生から指摘される前に気がついたのは、幸いであった。

原因は、お察しのとおり「回転自由度」にある。球の回転エネルギーの大きさは、重心の並進運動の運動エネルギーの約 4 割もある。しかも、この比率は球の半径によらない。「球が小さくなれば、質点に近づくだろう」というのは私のとんでもない錯覚であった。

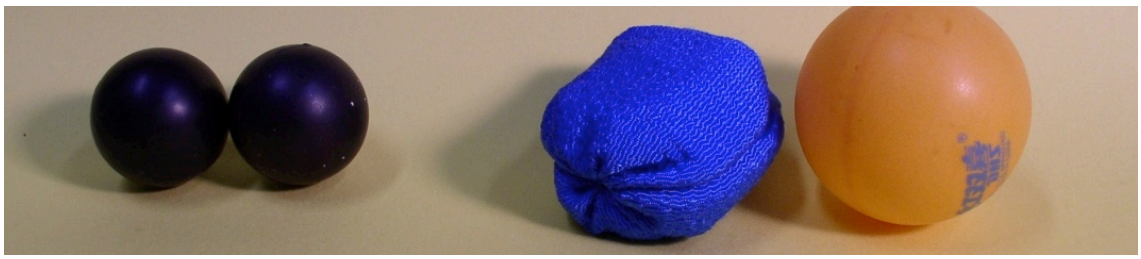
速度 v で衝突したビー玉は、重心の並進運動の運動量だけを静止した玉に渡す。しかし残りの回転エネルギーをもったままであるため、減速するものの静止はしない。ならば、回転を止めれば良い。そこで、ビー玉を「オハジキ」に交換して学生に再度実験させた。速度 v で滑って衝突したオハジキは見事に静止し、止まっていたオハジキは速度 v で飛びだした。どうやら、ガラスの弾性係数は 1 に近いらしい。

言い訳であるが、私がビー玉を転がしたのは、レールとの摩擦を避けるためだった。つまり、理想的な衝突を見せようとして、逆にやっかいな回転効果を取り込んでしまった。心配した摩擦については、オハジキはレールの上をよく滑り、気にならないレベルであった。中途半端な配慮が裏目に出た例である。

冷や汗をかいたものの、これで一件落着である。なおこの実験では、レールを用いることで確実に直線的に衝突させる工夫をしている。プラスチック・レールとオハジキは名古屋大学教養教育院の物理学実験準備室に用意してあるので、ご利用いただきたい。（三浦）

2 弾まないボールの位置エネルギーの行方

お手玉を使って、ボールが弾まない理由を示す。



キーワード	エネルギー保存、位置エネルギー、摩擦*、熱エネルギー*
目的	位置エネルギーから熱エネルギーへの変換を理解させる。
実験時間	5分
用意するもの	● 弾むボールと弾まないボール……1組 ペアで市販されているもの ● お手玉……1個 直径 30〜40mm ● ピンポン玉……1個
実験準備	なし
実験手順・教員による説明	① 弾むボールと弾まないボールを同じ高さから落下させる。結果：弾むボールはもとの高さの近くまで跳ね上がるが、弾まないボールはほとんど跳ね上がらない。 ② 静止した弾まないボールの位置エネルギーの行方を、学生に質問する。ただし、ここではまだ現象の理由の説明はしない。 ③ お手玉とピンポン球を同じ高さから落下させる実験をする。結果：ピンポン球はもとの高さの近くまで跳ね上がるが、お手玉はほとんど跳ね上がらない。 ④ 静止したお手玉の位置エネルギーの行方を、学生に質問する。③の実験ならば、お手玉のなかの細かい種がこすれ、摩擦が起きていることを学生は想像しやすい。 ⑤ 位置エネルギーが熱エネルギーに変換されることを説明する。
注意点・備考	教壇で演示するときは、学生に見えるように大きいボールを使用し、学生に回覧させるときは小型のボールを使用する。

Column

落下事故とエア・バッグと火星着陸

停止と激突の違いは「程度の問題」だと強調して教えたい。速度と加速度の違いを理解するにもよい例である。

先日テレビ局からきた依頼は、マンション8階から地面まで20m転落した幼児にかかる衝撃力を教えてくれ、というものだった。加速度運動だから、停止距離が必要だ。いくらに設定したら現実的か。人体の構造も考慮しなければならない。

少しの条件変更で衝撃力（減速のための力）が激変する。計算すると、運よく助かるケースがあることがわかった。条件ごとに値を伝えたのだが、テレビ局はオーバーな数値が好きらしく、最悪のケースがテロップ付きで報道されてしまった。

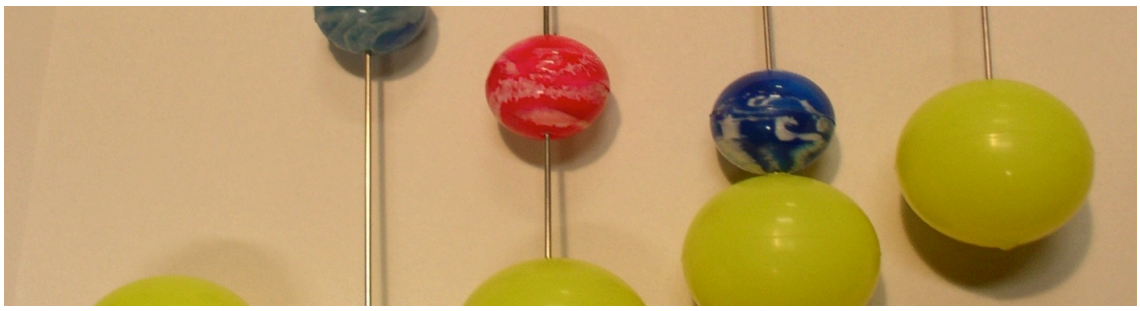
最悪のケースとは、停止距離を10cmと設定してみたものである。背中からコンクリートに当たるとその程度かなと思ったが、自信はない。衝撃力は3トンを超える。手をつくだけで衝撃はとても小さくなる。柔道の受け身の原理である。地面の土が少しへこむだけでも、効果は大きい。実際に、生垣や芝生に落ちて助かった例もある。

さて、その子だが、自転車置き場の屋根に落ちて軽傷だった。片持ち構造の屋根は大きくたわんで、停止距離を長くしてくれたのである。よかった。

最近の自動車に装備されているエア・バッグも停止距離をかせぐ原理は同じであるが、なんとNASA-JPLは火星探査機の着陸にこれを使った。経費節減のためだそうだが、驚きである。六輪の探査車の着陸のときで、15m以上も弾んだそうだ。40Gまで耐える設計だが、実際には2G程度で済んだそうだ。こういう発想はなかなか浮かばない。（三浦）

3 重ねた弾性球の反発

弾性球を重ねて落とすと、元の高さを越えて反発する。



キーワード	運動量保存則、エネルギー保存則、弾性衝突*、相対座標*
目的	弾性衝突を利用して、運動エネルギーが別の物体へ移る機構を理解させる。
実験時間	30 分（議論を含む）
用意するもの	● 弾性ゴム球……大 1 個、中 4 個、小 2 個 大、中、小球の直径はそれぞれ、60mm、42mm、26mm。穴を貫通させた球と、金属棒を突き刺した球を用意する。 ● 金属棒……1 本 ガイドとして使用する直径 1.6mm、長さ 20cm のステンレス棒。これは TIG 溶接棒として市販されている。 ● テフロンパイプ……7 本 穴の摩擦を低減するため使用。内径/外径は 2mm/3mm、長さ 3mm。各球の貫通穴の両端に差し込む。 ● 紐……1 本 球の連結に用いる。
実験準備	反発する硬い床面を探しておく。
実験手順・教員による説明	① 位置エネルギー、運動エネルギー、および弾性衝突の内容を授業で取り上げた後に実験を行う。大・小の球を別個に一定の高さから落とし、床面で反発して跳ねあがった高さを確認する。つぎに、大・小の球を縦に重ねて落とした場合の反発後の高さについて学生に質問する。 ② 大・小の球を縦に重ねて落とす。小球は強く反発し、もとの高さをはるかに超えて跳ねあがる。その理由を考察させる。 ③ 小球が強く反発する原因のヒントとして、図 1 のように大・小の球に 15cm 程度の間隔を開けて落とす。このとき、大・小の球が衝突する時点の大球の速度の向きに注意を喚起する。 ④ 2 つ目のヒントとして、衝突直前の大球から見た小球の相対速度を質問する。つぎに、大球に固定した座標系において、衝突前後の小球の速度を質問する。

⑤ 床面に固定した座標系から見た小球の衝突前後の速度を質問する。この段階では、衝突の前後で大球の速度は変化しないとし（大きいため）、弾性係数を１と仮定して議論する。

⑥ 大・小の球の衝突前後のエネルギーを計算し、衝突前後で２つの球のエネルギーの総量には保存則が成立していることを確認させる。

⑦ 図２に示す条件ではどのように反発するか予想させる。(a) 大球の上に小球を重ねて（上が小さい）、紐で連結した場合。(b) 中球と中球（同じサイズの球２つ）を重ねた場合。(c) 小球の上に中球を重ねた場合（上が大きい）。さらに、３段重ね、４段重ねの場合に上の球の速度が落下速度 v の何倍になるかを計算させる。

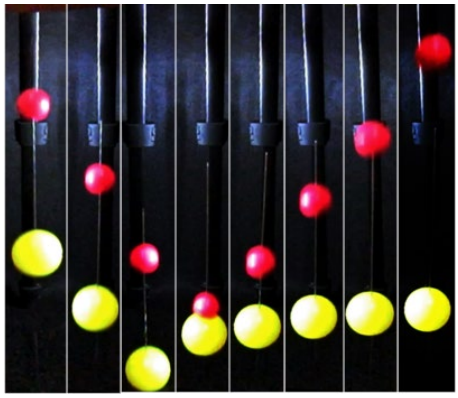


図 1.
重ねた弾性球の運動の様子。
撮影間隔約 0.04 秒の写真を時系列（t1→t8）に並べている。衝突する時点の球の速度方向を明示するため、球に間隔をあけて落とす。

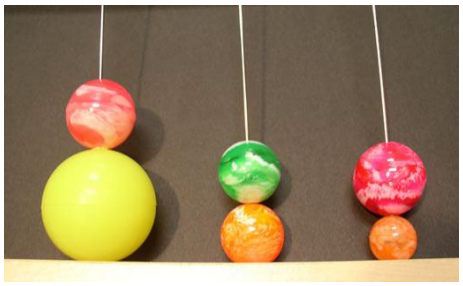


図 2.
[上部]/[下部]という表記で左から、
(a) 小球/大球（紐で連結）、
(b) 中球/中球、
(c) 中球/小球。

注意点・備考

図１に示すように、床面近傍の大球の速度 v として、衝突の瞬間の大球は上方向に v で運動しており、落下する小球と正面衝突する。大球から見た小球は $2v$ で落下し、衝突後大球から見て上方向に $2v$ で運動する。これを床面に固定した座標系から見ると、小球は $3v$ で上方向に運動することがわかる。衝突の前後で運動量保存則とエネルギー保存則が成立していることがわかる。

球に貫通穴をドリルで開ける際は、球の固定が難しい。怪我をしないように注意すること。金属棒がゴムに触れると摩擦でエネルギーが失われる。そこで球の貫通穴の両端に短く切ったテフロンチューブを差し込んで、棒とゴムが触れないように配慮する。

参考文献

[1] Walter Roy Mellen, *The Physics Teacher*, **33**, p.56, 1995.

4 放物線飛行で実現する無重力

無重力の実現と、力の方向が運動の方向と異なる状況を理解する。

キーワード	放物運動、慣性力、自由落下*、無重力*
目的	放物線に沿って運動する容器の内部は無重力となることを示す。自由落下する容器と比較して、無重力となる条件を明確にする。
実験時間	10 分
用意するもの	● 小さい台車……1 つ 小型軽量の台車が望ましい。写真（図 1）はダンプのミニカーである。荷台に板バネを固定する。 ● 板バネ……1 枚 玉の重量に合わせた板バネを用意する。写真（図 1）では、0.2mm 厚のプラスチックを切ったものを用いた。 ● ゴム玉……1 つ 飛んでも安全なもの。図 1 では、直径 2cm のゴム玉を載せた。 ● マット……1 枚 台車が軟着陸するために使う。
実験準備	板バネのバネ定数を玉の重量に合わせて最適化しておく。また、玉の打ち上げを観察しやすいように、背景とのコントラストや照明に配慮しておく。
実験手順・教員による説明	① 以下の実験を行う前に、授業で放物線運動について解説する。 ② 学生に図 1 の台車を見せ、自由落下すると板バネの上の玉がどうなるか質問する。

図 1.
視覚的な重力計の例。
板バネの上の玉は、無重力になると打ち上げられる。

③ 図 1 の台車を自由落下させ、板バネの上のゴム玉を観察する。このとき、無重力になると玉が台車から打ち上げられることがわかる。よって、台車を重力計とみなせる。

④ 放物線に沿って運動する容器内部の重力を考察する。学生に「内部が無重力になるのはいつか」を尋ね、以下の 2 つの選択肢を与える：(a) 放物線沿って上昇を開始した時点、(b) 頂点に達した後、落下を始めた時点。(残念なことに、これまでの結果では (b) の答えが圧倒的に多かった。)

⑤ 台車を斜面から斜め上に発射し、放物運動させる。このとき、荷台の玉の動きを観察する[1]。肉眼でも観察できるが、高速カメラがあると、さらに分かりやすい (図 2)。

⑥ (多くの学生が (b) と答えた場合) 正解は(a)なのに、なぜ多くの学生が(b)と答えたか、その理由を学生に考察させる。

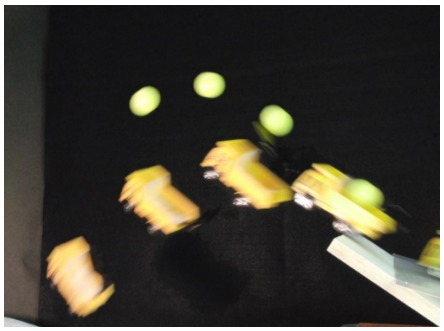


図 2.
放物線に沿った台車から打上げられる玉 (ストロボ写真)。
台車が斜面から出た瞬間から、無重力状態が始まっていることがわかる。

注意点・備考

ほとんどの学生は、自由落下する容器の内部が無重力になることは理解していた。しかし、放物線に沿って上昇する場合には誤解していた。これは、重力の方向と、運動の方向が異なるために錯覚が生じたと考えられる。つまり、容器と一緒に落ちることはわかっても、下向きの力が働くなかで上昇することには違和感があるようだ。

玉の打ち上げが観察しやすい条件と環境を整える。放物線の大きさは空気抵抗が無視できるよう、飛距離 1m程度が適当である。

図 2 を見ると、玉は板バネによって斜め後方に打ち上げられている。玉を垂直に打ち上げるほうが望ましいので、バネを改良する予定である。

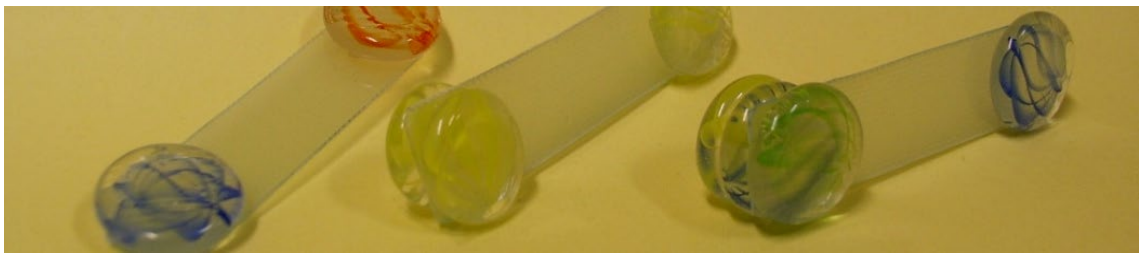
高速カメラも一緒に容器に入れて動画撮影した[2]。軟着陸するよう配慮したが、衝撃でカメラが次第に不調になった。カメラにとって過酷な撮影なので、壊れることは覚悟して撮影する必要がある。

参考文献

[1] Y. Miura, Y. Nakamura, J. Yasuda a, T. Konishi, K. Senyo b, A. Furuzawa, Y. Saitoh, *J. Phys. Sci. J. Suppl.* 017012, 2014.
[2] 投稿者“The Weightless World”「突然 無重力！」NHK 投稿 do 画, 2016.

5 オハジキを用いた連星モデル

連結されたオハジキを弾き、その回転する様子を観察する。



キーワード	2 体問題、重心
目的	2 体問題の回転中心について理解させる。
実験時間	5 分（実験器具が小さいので、箱に器具を入れて学生に回覧させる）
用意するもの	● オハジキ…… 9 個 ● 薄板…… 3 枚 0.5 mm 厚のガラスエポキシ板。 ● 滑らかな平面 たとえば、ビーズを撒いたレター・ボックスなど。

図 1 .
異なる質量を連結した回転体。左から質量比は 1：1、2：1、3：1。オハジキと比較して軽い腕の質量は無視できる。

実験準備	図 1 のようにオハジキを薄板に接着し、「連星モデル」を自作する。また、弾き方には少々コツが要るので、事前に練習をしておく。
実験手順・教員による説明	① 連星モデルの一端を指で弾いて回転させ、その回転中心を観察する。回転中心は重いオハジキに近いことがわかる。 ② ①の結果をもとに、「2 つの質点の重心を回転中心としてよさそうだ」という見当をつけてから、実際に質点系の重心を計算する。すると、重心の両側の遠心力がつり合っており、先ほどの推論が正しいことがわかる。
注意点・備考	実験後に宇宙における本物の連星を紹介すると、さらに理解を深められる。

Column

地球潮汐現象—地面の干満とは？—

目の前で毎日起きているのに、ほとんど知られていない現象がある。地面の「干満」、すなわち「地球潮汐」現象である。海の干満はみな知っているのに、どうしたわけだろう。筆者自身も「地球潮汐」を測定している人から聞くまでは、まったく考えてもみなかった。言われてみれば当たり前の現象である。なぜ認識されていないのか、その原因を考えることは意義がある。「見れども、見えず」で、力学法則も長いこと認識されなかった歴史があるからだ。

第一に、変位の基準がないこと。地面の上にいる我々もいっしょに上下するので、気がつかない。海の場合は、海岸に満潮時の潮位を示す模様が見える。第二に、変位が小さいこと。海の干満は数メートルもあるが、地形の影響で地域差が大きい。フランスでは干満が 8m もあり、河口をせき止めて発電している程である。

地面の上下の変位はどれくらいだろう？ 東京天文台の研究者に尋ねたところ、石垣島のデータをいただいた。上下の変位は約 44cm だった。地球は堅いので、やはり変位は小さかった。値の求め方も教えてもらったが、大変複雑だった。実際に測れるのは地殻の歪みであり、それから地球全体の変形を計算して求めるという。

GPS を使えば簡単に測定できるのではないかと考えるかもしれない。これは研究されているそうだが、簡単ではない。まず、GPS 衛星の軌道も月と太陽の重力の影響を受ける。さらに、地球が変形すると重力分布が変わり、軌道も変わる。おまけに、太陽輻射の影響も受けており、驚いたことに地球からの照り返しも無視できない。この照り返しは雲の量による。よって、GPS 衛星の正しい軌道を求めるには、世界の気象状況が必要とのこと。まったくあきれるほど大変な作業だ。

木星の月「イオ」は潮汐力で変形を受け、そのエネルギーで火山噴火している。太陽から遠いにもかかわらず、地球より高温とのことだ。（三浦）

6 斜面を用いた慣性モーメントの理解［S］

２つの物体を斜面で転がし、速度の違いの要因を考察する。

キーワード	剛体の運動（回転運動）、慣性モーメント
目的	形状や材質の異なる物体を斜面で転がして速度を比較し、慣性モーメントの概念を理解させる。
実験時間	30 分
用意するもの（１グループ分）	● アクリル板……１枚 180mm×320mm 程度。A4 デスクトレーに入る大きさ。 ● A4 デスクトレー……１個 側面に板を立てかけて斜面を作る。また、すべての実験器具を収納する。 ● 定規……１本 15cm あれば十分。物体を同時スタートさせるために使用。 ● 糸巻き状の物体、パイプ状の物体……各１個 要製作。名古屋大学の物理学実験準備室で借り入れ可（図１参照）。 ● アルミ円柱（細）……2 個 市販のもので可。たとえばφ25mm×H25mm。 ● 真ちゅう円柱（細）……1 個 市販のもので可。たとえばφ25mm×H25mm。 ● アルミ円柱（太）……1 個 市販のもので可。たとえばφ50mm×2H5mm。 ● アルミ球……１個 市販のもので可。たとえばφ25mm。 ● ピンポン球……１個 公式球など真球に近いものを選ぶ。

図 1.
糸巻き状の物体（左）と
パイプ状の物体（右）。

実験準備　事前に、物体を同時スタートさせる練習をしておく（注意点・備考も参照）。

実験手順・教員による説明　用意した物体を２つずつ斜面で転がして速度を比較する（図２）。転がす前にどちらが速いか学生に予想させ、その理由も聞いておく。下記の実験手順①～④で段階的に実験を進めながら、物体の転がる速度を決める要因（直径、形状など）について定性的に考察させる。その後、慣性モーメントの概念を導入し、運動方程式を解くことで、物体の形状と物体の転がる速度との関係を定量的に理解させる。

【実験手順】

① 同じ直径のアルミ円柱を転がし、その速度を比較する。結果：ほぼ同じ速度で転がる。これより、同じ物体を転がす場合でも多少の違い（誤差）があることを確認させる。

② 同じ直径のアルミ円柱と真ちゅう円柱を転がし、その速度を比較する。結果：ほぼ同じ速度で転がる。これより、物体の転がる速度は質量によらないことを考察させる。

③ 異なる回転半径のアルミ円柱を転がし、その速度を比較する。結果：ほぼ同じ速度で転がる。これより、物体の転がる速度は回転半径に依らないことを考察させる。

④ 球、球殻（ピンポン球）、円柱、パイプ状の物体をそれぞれ２つずつ転がし、速度を比較する。結果：速度は速い順に、球 ＞ 円柱 ＞ 球殻 ＞ パイプとなる。この結果をもとに、速く転がる物体の性質を定性的に考察させる。

⑤ （教員による説明）各物体の慣性モーメント、および剛体が斜面を転がる加速度を計算し、実験で転がした物体の加速度が質量と半径に依存せず、慣性モーメントに依存することを示す。また、各物体の慣性モーメントと実験 ④ の結果を照合し、理論と実験が整合していることを確認する。

⑥ パイプと糸巻きを転がし、その速度を比較する。結果：糸巻きのほうが速く転がる。これまでの実験および教員による説明を理解していれば、正しく予想できるはずである。

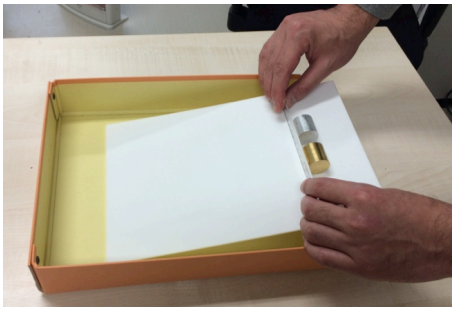


図 2.
物体を同時スタートさせるときの配置。定規は物体の進行方向にスライドさせる。あらかじめアクリル板にペンでスタートラインを描いておき、それに定規を合わせるとよい。

注意点・備考　物体を同時にスタートさせるには練習が必要である。定規を物体の進行方向にスライドさせると、物体を弾くことなく安定して同時スタートができる。

参考文献

[1] 島野公利，小出雅之，宮地祐司「ころりん」仮説社，2003.

7 斜面を用いた回転エネルギーの理解

斜面をゆっくり転がり下りる軸付き円盤は、地面に着くと急に加速する。

キーワード	剛体の運動（回転運動）
目的	回転運動がエネルギーをもつことを直観的に理解させる。
実験時間	10 分
用意するもの	● 軸付き円盤（図 1）……1 個 直径 40mm、真ちゅう製。名古屋大学の物理学実験準備室で借り入れ可能。 ● コの字状の板（図 1）……1 組 1mm 厚のアルミ板。斜面として使う。同上にて借り入れ可能。 ● 厚太の輪ゴム……3 つ 斜面に張り、円盤が滑り落ちないようにする。また円盤の中央にも張り、円盤が真っ直ぐ進むようにする。 ● 糸巻型とパイプ型の回転体（図 2）……各 1 個 真ちゅう製。同上にて借り入れ可能。 ● 谷型の斜面……1 枚 1mm 厚のガラスエポキシ板を曲げて作製。

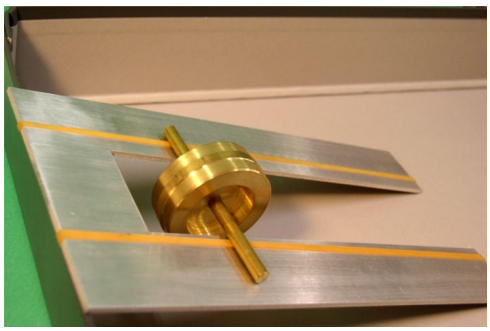


図 1.
斜面を下る軸付き円盤。

図 2.
糸巻型とパイプ型の回転体。

実験手順

① 円板の軸を斜面で支え、回転させながら降下させる（図１）。円板の中心はゆっくり降下するが、回転速度は増大していく。
② 円板が床に接触した瞬間、突然加速して進む。学生にその理由を考察させる。
③ 斜面を降下した分の位置エネルギーと円板の並進の運動エネルギーが等しいか否か、学生に質問する。
④ 谷型の斜面（図２）で糸巻きとパイプを転がす。同時にスタートさせると、下り斜面でパイプは糸巻きから大きく遅れる。その理由を学生に考察させる。
⑤ 谷底で回転体をいったん停止させ、このあと両者がどの高さまで斜面を上るかを学生に予想させる。
⑥ 回転体を出発点まで戻したのち、改めて２つの回転体を転がし、両者とも出発点と同じ高さまで上ることを確認させる。そして、この実験結果から何がわかるか、学生に考察させる。

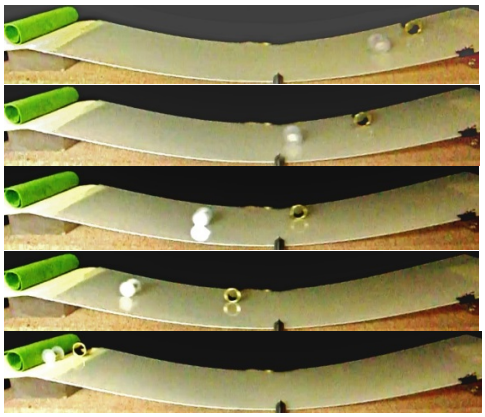


図 3.
谷型の斜面を下って上る時系列写真（上→下）。
斜面を下るとき、パイプの並進速度は上がらず、糸巻きから大きく遅れる。しかし最終的には両者とも出発点と同じ高さまで上る。

教員による説明

① 円板が軸で回転しながら斜面を下るとき、中心の並進速度の加速が小さいのに対し、回転速度の加速が大きいことに注意する。これにより、位置エネルギーの多くが回転エネルギーに変換されていることを直観的に理解させる。
② 谷底の斜面の実験では、２つの回転体の並進速度が大幅に異なるにもかかわらず、両者とも出発点と同じ高さまで上る。この結果から、両者とも同じエネルギーをもっていることがわかる。
③ 全体のエネルギーは同じであるから、並進速度の小さいパイプは、糸巻きに比べて回転エネルギーの比率が大きいことがわかる。

注意点・備考

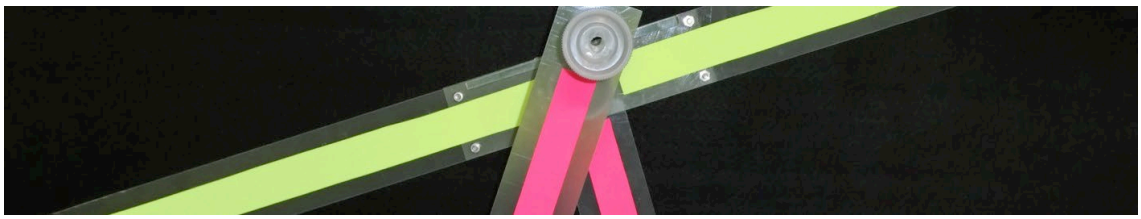
軸付き円盤が着地面に接触した瞬間に横に曲がることがある。円盤に輪ゴムを巻くなど、接触面の中央部を高くすることにより、前方にまっすぐ加速できる。

円盤の慣性モーメントを維持しながら総質量を低減すれば、より鋭い加速が期待できる。たとえば、円盤の中央部を軽量化するとよい。

本実験は「斜面を用いた慣性モーメントの理解 S」の続編であり、エネルギーの観点から回転運動を理解させる実験である。

8 T字型振り子の周期

異なる剛体振り子の周期測定から慣性モーメントを理解する。



キーワード　慣性モーメント、剛体振り子*

目的　異なる質量分布をもつ振り子の周期を測定することで、慣性モーメントの概念を理解させる。

実験時間　10 分

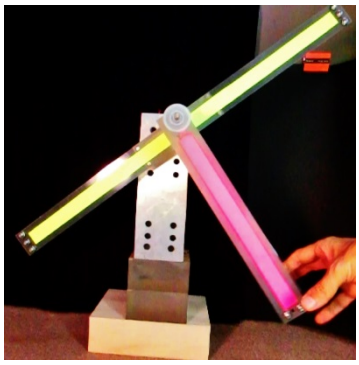
用意するもの

- 直線型振り子……1つ（図1左下）
  半径 r（r=15cm）の位置に質量 $2m$（m=10g）のおもりを配置。腕の素材は0.5mm のガラスエポキシ板で、おもりに比べてその質量は無視できる。
- T字型振り子……1つ（図1右上）
  半径 r の位置に質量 $2m$、左右の半径 r の位置に $3m$ のおもりを配置。
- 振り子を支える真鍮の軸（直径 5mm）……1組。

図1.
2種類の剛体振り子。直線型振り子（左下）とT字型振り子（右上）で、丸い部分が支点。

実験手順

① 学生に直線型振り子の復元力と慣性モーメントについて考察させる。
② T字型振り子の復元力と慣性モーメントについて考察させる。復元力は同じであるが、慣性モーメントは4倍（$I = 8mr^2$）であると気付く必要がある。
③ 2つの振り子の周期を予想させる。
④ 2つの振り子を同時にスタートすると、T字型振り子の周期は直線型振り子のちょうど2倍であることがわかる。



a

b

c

図 2.
２種類の剛体振り子の揺れる様子。
直線型振り子の周期を τ として、
写真 a ：時刻ゼロで同時にスタート。
写真 b ：τ 後の様子。Ｔ字型振り子は反対方向にある。
写真 c ：2τ 後の様子。両者は出発点で合流する。
Ｔ字型振り子の周期は、直線型振り子の周期のちょうど２倍であることがわかる。

教員による説明

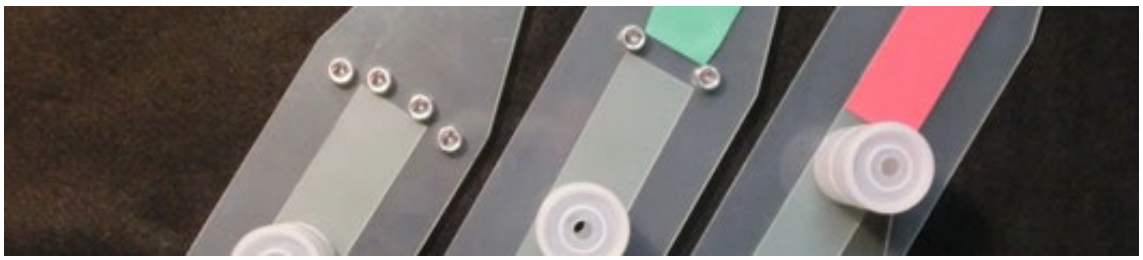
① ２種類の振り子を学生に回覧させ、回転半径と質量分布の違いを確認させる。また、両者の復元力（駆動力）が同じであることに着目させる。
② 学生に振り子の周期を予想させる。また、その根拠を考察させる。
③ 手順④の結果を踏まえ、「振れやすさ」すなわち慣性モーメントの概念を理解させる。
④ 周期測定の結果から、慣性モーメントの表式を考察させる。すなわち、実験結果を説明するためには、慣性モーメントが回転半径 r および質量 m とどのような関数になっているべきか、考察させる。

注意点・備考

この実験では、回転軸の摩擦低減はそれほど重要でない。そのため直径 5mm の真ちゅう棒を回転軸に用いた。

9 回転加速を用いた慣性モーメントの理解

質量分布の異なる回転体の加速度の違いから慣性モーメントを理解する。



キーワード　剛体の運動（回転運動）、慣性モーメント

目的　異なる質量分布をもつ回転体を一定の力のモーメントで回転させ、回転が加速する様子から慣性モーメントの表式を理解させる。

実験時間　10 分

用意するもの

- 回転体……３種類（図１）
  要製作。赤色は半径 r に質量 m（m=20g）、緑色は半径 $r/2$ に質量 $2m$、黄色は半径 $r/2$ に質量 $4m$ を配置。回転体の腕の材質は、0.5mm 厚のガラスエポキシで、おもりに対して質量は無視できる。
- 回転軸……１つ
  直径 5mm、長さ 10cm のテフロン棒。回転体に２つ取り付けて同時に回転させる。
- 回転駆動のためのおもりと糸……回転体ごとに１組ずつ
  ナット（17g）を糸で吊り下げ、軸に３周巻きつけ回転させる。

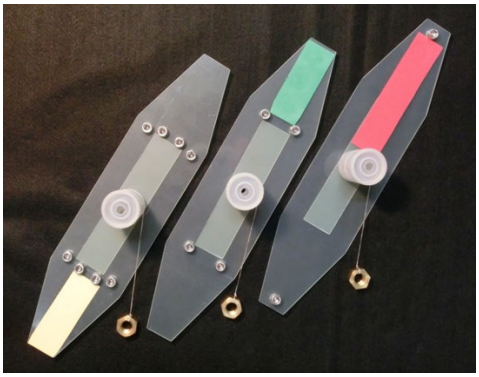


図 1.
３種類の回転体。

実験準備　とくになし

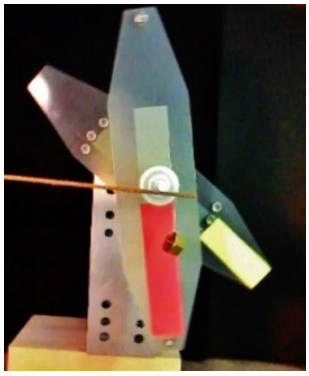
実験手順・教員による説明　２つの回転体を同時に回転開始させ、回転の加速を比較する。どの２つの回転体が同じ加速をするかを学生に予想させ、その根拠を考えさせる。

【実験手順】

① ３つの回転体を学生に回覧させ、回転半径と質量分布の違いを確認させる。

② 赤色と緑色の回転体を比較する。結果：緑色の回転加速の方が大きいことがわかる。
③ 赤色と黄色の回転体を比較する。結果：同程度に回転加速することがわかる。
④ これまでの結果を踏まえ、回転のしやすさ、すなわち慣性モーメントの概念を理解させる。
⑤ 実験手順②と③の結果から、慣性モーメントの表式を考察させる。すなわち、実験結果を説明するためには、慣性モーメントが回転半径 r および質量 m とどのような関数になっているべきか、考察させる。

a


b

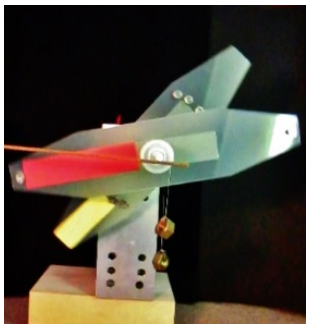

c

図２.
一定の力のモーメントで回転が加速する時間発展の様子。
赤色と黄色の回転体の回転加速が等しいことがわかる（a, b, c)。一方、赤色と緑色の回転体を比較すると、緑色の回転加速が大きい。

注意点・備考　この実験では、回転軸の摩擦低減が重要である。本実験では回転軸として直径5mm のテフロン棒を用いた。ただしテフロン棒は軟らかいため、回転体の重量で曲がってしまう。そこで、図２のように軸の手前を定規で支えている。

関連トピック　本書の「斜面を用いた慣性モーメントの理解 S」および「T 字型振り子の周期」も参照されたい。

10 バネで理解する免震機構

バネの共振によって、共振を避ける免震機構の原理を理解する。

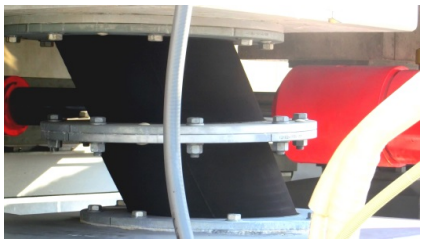
キーワード	単振動、共振*
目的	単振動の固有振動数や共振現象を理解させる。
実験時間	10 分
用意するもの	● バネ……1 本 弱い（ばね定数の小さい）もの。 ● ボール……1 個 固有周期が約 1 秒になるように合わせる。
実験準備	ボールを取り付けたバネの固有振動数がどの程度か、事前にリハーサルをして確認しておく。
実験手順	① バネの上端を持って上下に振る。固有振動数に合うように、バネを振動させる。結果：共振現象が起こり、バネの振幅は徐々に増大する。 ② 固有振動数よりも非常に大きな振動数で（非常に素早く）、バネを振動させる。結果：バネにつるしたボールはほとんど動かない。

教員による説明

① 学生に、「地震計は地面に置いてあるが、地面と一緒に揺れたら、揺れの大きさがわからないのではないか。さて、どうするか？」と、問いかけをして考えさせる。この問いには、学生たちも頭をひねる。聞かれて初めて、動かない基準が必要だ、と気がつく。

② 問いかけによって学生に問題意識をもたせてから、演示実験を行う。固有周期より短い振動ではバネにつるしたボールは動かない。このことから、地震計の原理を説明することができる。

③ 最後に、共振現象の原理を応用した免振構造を紹介し（たとえば図 1）、理解を深める。



a

b

c

図１.
地震時の免震ゴムの動き（a〜c）。
名古屋大学の減災館屋上にある減災・体感実験室での公開実験の様子。油圧ピストン（赤色）で、地震時に相当する横向きの力を実験室に加えている。写真は長周期振動の再現で、振幅は約１m、周期約６秒。減災館本体（５階建てビル）と、その屋上の実験室はそれぞれ免震ゴムとローラーで支えられている。両者の固有振動数を一致させることにより、地面からの地震の振動エネルギーは屋上実験室に転送され、減災館本体の振幅を軽減する設計である。つまり巨大な二重振り子の構造になっている。

注意点・備考　バネの振動で記述される共振現象はさまざまな分野で現れるので、法則の普遍性を理解させるのにもよい例である。

参考文献

[1] 名古屋大学減災連携研究センター「減災・体感実験室」
http://www.gensai.nagoya-u.ac.jp/?p=2560

11 メトロノームによる同期現象

「同期現象（引き込み現象）」を、空き缶の上に載せたメトロノームを用いて再現する。

キーワード	同期*、引き込み*
目的	隣接する振り子時計、心臓の鼓動やカエルの合唱、ホタルの集団発光のように、周期的な運動をするものが複数集まったときに、外部の制御機構なしに全体が自発的にそろって振動する同期現象を観察する。
実験時間	10 分
用意するもの	● メトロノーム……２個以上 数が多いほうが引き込み現象の様子がはっきり見える。置き場所を考えると、小型のほうがよい。 ● 平らな板……１枚 ここでは、A４サイズのプラスチックのクリップボードを用いた。 ● 円筒……２個 ２個は同じものにすること。ここでは缶コーヒーの空き缶を用いた。
実験準備	必ず、使用する講義室でリハーサルをしておく。 机が水平であることを確かめておく。机が水平でない場合、メトロノームを載せた板が円筒から転がり落ちてしまうことがある。 メトロノームから出る音が大きいため、講義室が音を出してよい環境であることを事前に確認しておく。

すべてのメトロノームの振動数を同じ値に設定しておく。理論的には多少ずれがあっても相互作用が強ければ同期は起きるはずだが、実験ではうまくいかないことがある。振動数は大きな値のほうが同期しやすい。

実験手順

① 机の上に 2 つの円筒を平行に置き、その上に板を載せる。
② 板の上にメトロノームを載せる。振れる向きは円筒の軸と直交方向。
③ すべてのメトロノームを動かして、観察する。はじめは、メトロノームの位相はまちまちであるが（図 1)、やがて同期して振動する（図 2)。
④ メトロノームが十分に同期した後、どれかのメトロノームを手で止めたり、板を動かしたりするなどの摂動を加え、その後同期が回復するのを見てもよい。

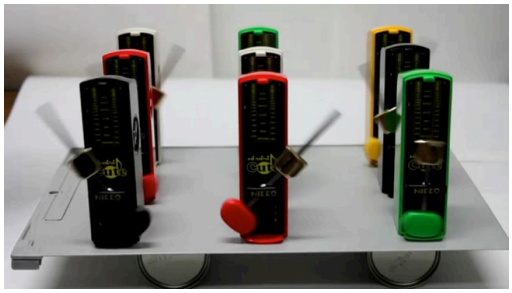


図 1.
動かし始めたばかりのときのメトロノームの動き。

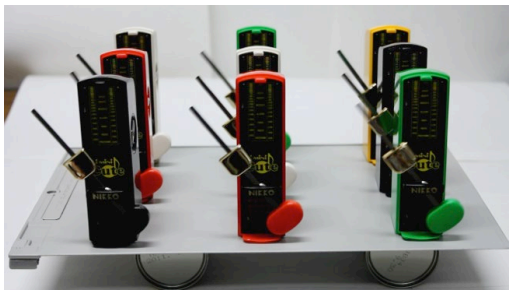


図 2.
少し時間がたったころのメトロノームの動き。

教員による説明

① 隣接する 2 つの振り子時計、心臓の鼓動、カエルの合唱、ホタルの集団発光など、同期現象にはどのようなものがあるかを説明する。
② 参考文献をもとに、同期する原因について解説する。

注意点・備考

振り子時計の発明者でもあるホイヘンスが、隣り合って設置された振り子時計が同期することを 17 世紀に発見したのが、同期現象の最初の発見であるとされている。

このメトロノーム実験の動画が次のサイトにある：
http://www.youtube.com/watch?v=DD7YDyF6dUk

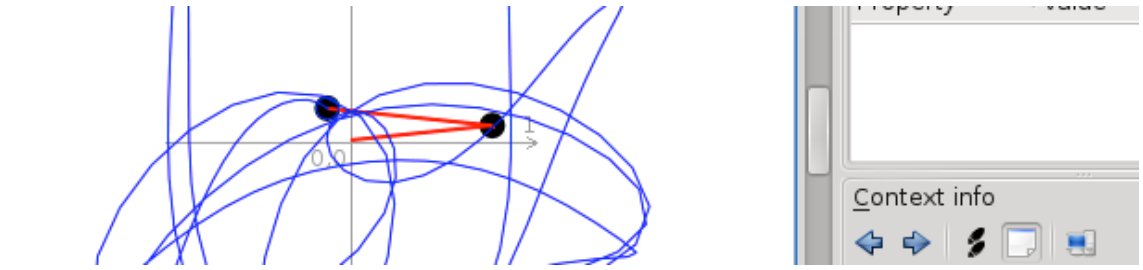
参考文献

[1] J. Pantaleone, “Synchronization of metronomes”, *American Journal of Physics*, **70**, p.992, 2002.

注）同著者による解説が次のサイトにあり、実験をする上での注意なども書かれているので、一読をお勧めする：http://salt.uaa.alaska.edu/dept/metro.html

12 物理シミュレータによる二重振り子の運動

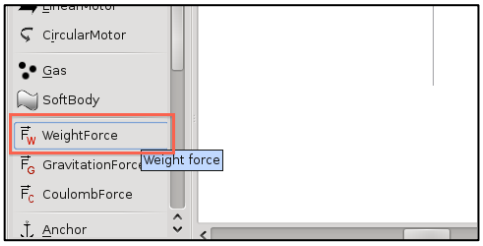
物理シミュレータ Step を用いて二重振り子をモデル化し、その運動の様子を観察する。



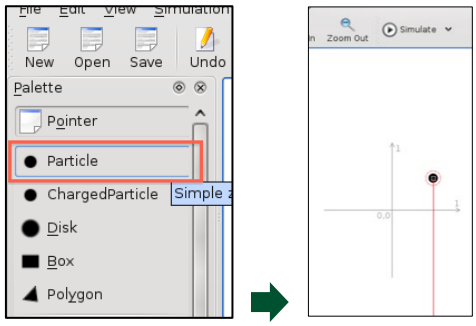
キーワード	二重振り子*、カオス*、シミュレーション*
目的	古典力学の 2 次元運動を扱える物理シミュレータ Step を用いて、二重振り子をグラフィカルにモデル化し、シミュレーションを実行した様子を観察する。
実験時間	20 分
用意するもの	● MathLibre DVD……1 枚 最も手軽に Step の環境を構築できる。参考文献[1]から DVD イメージをダウンロードすることも可能。 ● PC……1 台 MathLibre が起動できることが条件。
実験準備	モデルの作成から演示を行う場合は、あらかじめ作成手順をよく確認し、練習しておくこと。教員が途中で戸惑ってしまうと、学生の注意が散漫になりやすい。

実験手順

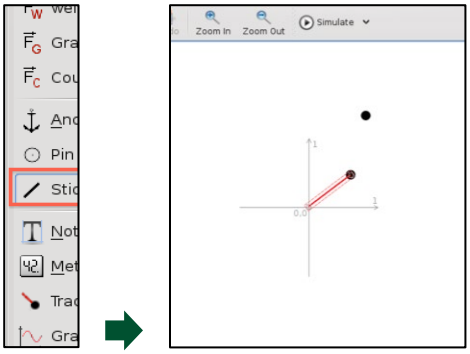
① Step の左側に並んでいるパーツのから Weight Force を選択し、中央の白い部分をクリックする。これにより、重力下での運動をシミュレートすることが可能となる。



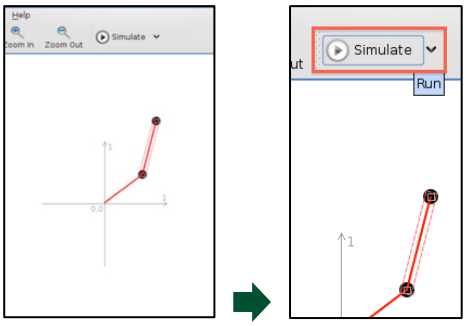
② Step の左側のパーツから Particle を選択し、質点を配置したい場所でクリックし質点を作成する。右図で、質点から下に延びる赤い線は質点に働く重力を示している。



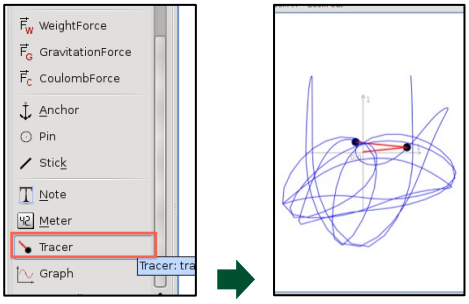
③ 同様な作業で質点を２つ作成した後、質点を接続する棒を作成する。Step の左側のパーツのうち、Stick を選択し、原点でクリックし、そのままドラッグして１つ目の質点の中心でリリースすることにより棒が作成される。



④ 同様の作業により、もう１つの棒を作成し、二重振り子を完成させる。Step の上部中央の Simulate ボタンをクリックすることにより、直ちにシミュレーションが実行され、運動の様子を観察することができる。



⑤ 運動の様子をわかりやすくするために、質点の運動の軌跡を描かせる。Step の左側のパーツのうち、Tracer を選択し、軌跡を描かせたい質点をクリックする。再び Simulate ボタンをクリックすると、シミュレーションが実行され、軌跡が描かれる。



注意点・備考

ここでは仮定として、二重振り子は大きさの無視できる質点が、質量を無視できる固い棒で接続され、棒の端を軸として平面上を運動するものとした。また、鉛直下方に重力が働いているとした。

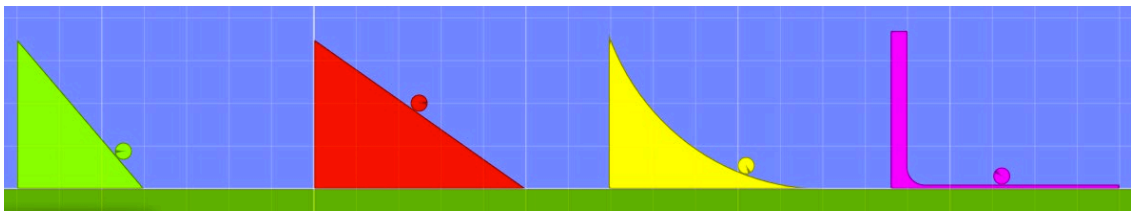
Step の特徴の１つは物理モデルをグラフィカルに作成できることである。学生から「こんなシミュレーションを実行してほしい」というさまざまな要求に応えられるよう、Step によるモデル作成に習熟しておくことが理想的である。

参考文献

[1] MathLibre Project
http://www.mathlibre.org/
[2] The KDE Education Project – Step,
http://edu.kde.org/step/
[3] Anne-Marie Mahfouf, The Step Handbook,
http://docs.kde.org/development/en/kdeedu/step/step.pdf

13 斜面上の質点の落下

Algodoo を使って、斜面にそって落下する質点の運動を観察する。



キーワード	質点、シミュレーション*
目的	斜面の形状による質点の運動の違いを理解する。
実験時間	10 分
用意するもの	● コンピュータ……1 台 OS は Windows、あるいは mac OS。 ● Algodoo……1 本 参考文献[2]から無料でダウンロード可。
実験準備	あらかじめ Algodoo をインストールし、正常に動作することを確認しておく。
実験手順	① Algodoo を起動する。 ② ポリゴンツールを使って斜面として用いる三角形を作成し、水平面上に配置する（図 1）。 ③ サークルツールを使って質点を作成し、三角形の上部に、斜面に接するように配置する（図 1）。 ④ 三角形、質点をダブルクリックし、物性として「摩擦の度合」「反発の度合」などを設定する。 ⑤ 手順 ②〜④ を参考に他の形状の斜面を作成する。 ⑥ 学生にどの質点が最も早くゴール（同じ水平距離の位置）に到達するかを予想させ、シミュレーションにより結果を確認する。 ⑦ 得られた結果について計算によって確かめられるものについては検証を行う。

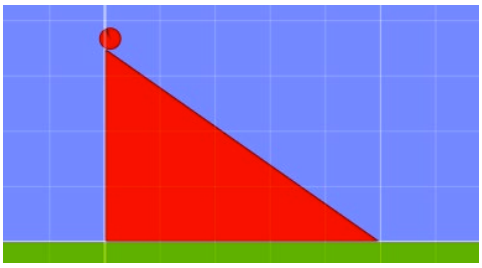


図 1.
ポリゴンツールにより斜面としての三角形を、サークルツールにより質点をそれぞれ作成し、適切な場所に配置する。

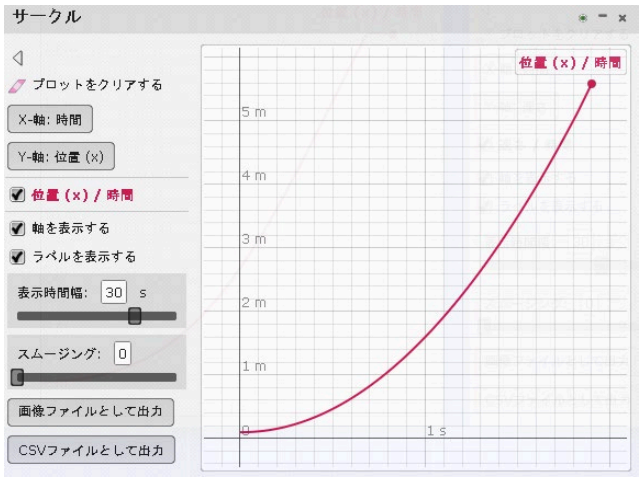


図 2.
図 1 の場合の時間（横軸）と質点の水平移動距離（縦軸）との関係を表すグラフ。

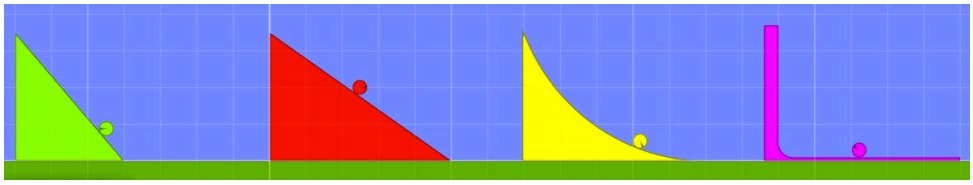


図 3.
ポリゴンツール（とその組み合わせ）により作成した様々な斜面。
左から(a), (b), (c), (d)。

注意点・備考

実際に板で斜面をつくってその上で小さな球を転がすことにより、実際の実験は手軽に行うことができる。斜面が曲面の場合など、さまざまな斜面を作成する場合は、シミュレーションを利用することが有効である。そのような一連の実験のなかで、図 3 (c)のような最速降下線の導入とすることもできる。

また、図 2 のように質点の運動をグラフ表示することにより、運動の様子を理解しやすい。さらに、図 3 の(a)(b)のような 2 種類の斜面を転がる質点の運動の場合、同じ水平距離を進むために要する時間は斜面が 60 度の傾斜のときに最も短くなることが簡単な計算により確認できるため、練習問題とすることができる。

図 3 (c)の斜面は、「図形の組み合わせ」の「差集合」を利用して三角形と円の差集合として作成することができる。

Algodoo は iPad 版も提供されており、学生に iPad を配布すれば学生みずから斜面を作成して各自で試すことも可能である。

参考文献

[1] Y. Nakamura, et al., “Concurrent Use of Demonstrations and Simulations for Teaching of Basic Physics”, *JPS Conf. Proc.* 1, 017037 (2014)
[2] http://www.algodoo.com/
[3] 高橋善樹, 『物理シミュレータ Algodoo で学ぶ力学』, 工学社, 2011.

14 直線運動と回転運動の相互変換

弾性衝突により直線運動を回転運動に変換し、エネルギーの保存を理解させる。

キーワード	運動量保存、エネルギー保存、弾性衝突*
目的	弾性衝突により直線運動を回転運動に変換し、衝突前後のエネルギーの計算から、エネルギーが保存していることを理解させる。
実験時間	30 分（議論を含む）
用意するもの	● 滑らかな基盤……30cm x 60cm 程度の化粧木板など 1 枚 ● 軽い腕の回転体……半径が異なる回転体（r=3cm、5cm）を各 1 個 本実験では 0.5mm 厚のガラス・エポキシ板を用いて、板の片端にオハジキを接着して自作した。回転中心はピンで板に固定できるようにした。 ● オハジキ……1 個 ● 直線運動のレール……60cm 程度のものを 1 本 オハジキが自由に動ける内幅の電気ケーブル固定用のプラスチックなど。
実験準備	基盤を水平に設置する。
実験手順・教員による説明	① 直線の滑らかなレール上で静止した物体 B に、速度 v で物体 A を弾性衝突させる。衝突後の物体 A、物体 B それぞれの速度を受講生に尋ね、運動量保存則を用いて計算した後に、実験で確認する。 ② 滑らかな平面上で、半径 r の軽い腕に付いたオハジキ b に、フリーな状態のオハジキ a を速度 v で弾性衝突させる（図 1）。衝突後のオハジキ a とオハジキ b の速度を学生に尋ねる。実験により、衝突後にオハジキ a が停止し、オハジキ b が接線速度 v で回転することが分かる（図 2）。

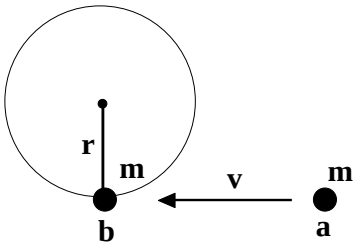


図 1.
a が b に衝突する際の図。

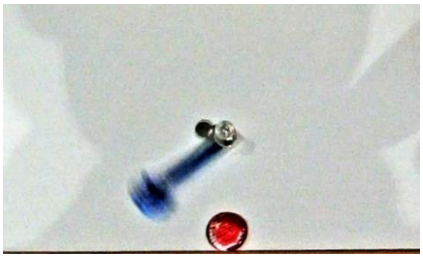


図 2.
a が b に衝突する際の写真。

③　角運動量は $l = r \times p$ であり、回転半径 r に依存して値が変わることを理解させる。慣性モーメントと角速度からオハジキ b の回転エネルギーを求め、オハジキ a の運動エネルギーが保存されていることを説明する。

④　異なる回転半径の物体どうしが弾性衝突する場合を考察する（図 3）。半径 r のオハジキ b を接線速度 v で半径 R のオハジキ a に衝突させ、衝突後のオハジキ a とオハジキ b の速度を尋ねる。

⑤　実験により、衝突後にオハジキ b が停止し、オハジキ a が接線速度 v で回転することがわかる（図 4、5）。

⑥　接線速度 v が保存され、回転エネルギーが保存されることを説明する。

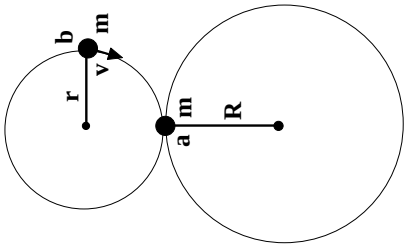


図 3.
b が a に衝突する際の図。

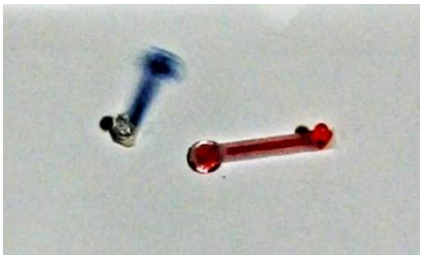


図 4.
小半径の b が a に衝突。

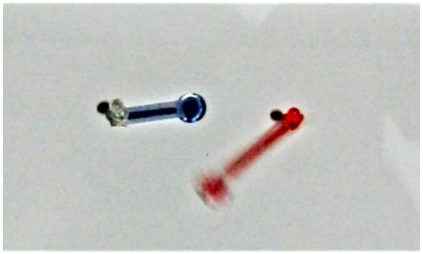


図 5.
b が静止し、a が回転開始。

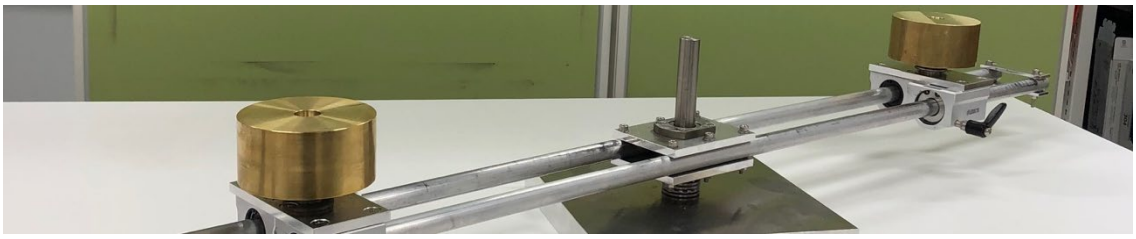
注意点・備考

直線運動の運動エネルギーが回転エネルギーに変換され、保存することを理解させる。②の実験では、一回転したオハジキ b が静止していたオハジキ a に衝突して静止し、オハジキ a が速度 v で再び発進することを実験で確認する。このとき、図 6 のように衝突後に静止するオハジキ a の位置が円の真下になるようオハジキ b を少し左側に設置すると、一回転したオハジキ b がオハジキ a の真横に衝突する。回転半径が異なる④の実験では、角運動量が保存されないことを指摘する。

図 6.
オハジキ b をわずかにずらして設置。

15 直線運動と回転運動

直線運動と回転運動の関係について考察する。



キーワード	慣性の法則、運動量、力積、拘束条件*、極座標
目的	直線運動の理解をもとにして、回転運動する物体に働く力を考察させる。
実験時間	20 分（議論を含む）
用意するもの	回転の力学演示教材（自作）回転するアーム上を自由にスライドする台が取りつけられており、台には質点となるオモリが載っている。このスライド台はアーム上の任意の位置で固定するためのロックを備えている。さらに、このオモリは台の上で自転運動が可能である。詳しくは本会 Web サイトを参照。

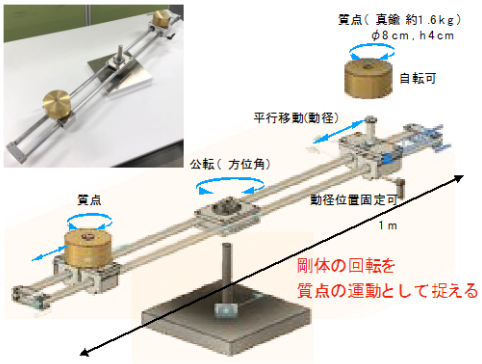


図 1.
回転の力学演示教材。

実験準備	しっかりした台上に教材をおく。教材による演示と動画の視聴、板書による講義を同時に行える環境が望ましい。
実験手順・教員による説明	① 教材の構造を説明する。極座標についても説明するとよい（図 1）。 ② 質点のアームに対するロックを外した状態で、質点をアームとは別の方向に直線的に押して手を離す。この時、質点が等速直線運動することに気づかせる（図 2）。

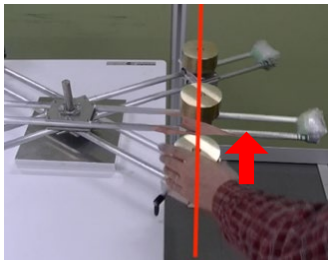


図 2.
直線運動のデモ。

③ ロックをした状態で、①と同様に質点を押すと円運動することを示し、その違いを考察させる（図 3）。

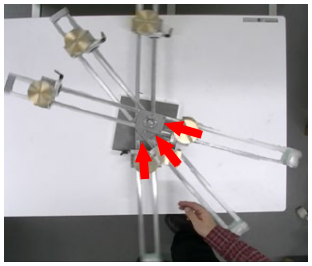


図 3.
回転運動のデモ。

④ 回転している最中にロックを外した時の質点の運動を予想させ、演示してみせたのち、このような現象になる理由についてグループで議論させる。演示では直線運動になることが見えづらいため、事前に撮影した動画をスロー再生するなどして確認させるとよい（図 4）。

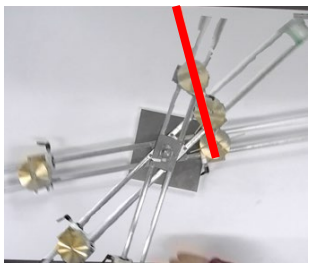


図 4.
ロックを外した後。

⑤ さらに、質点がアームの先端に達すると円運動に変化することを演示してみせ、このような現象になる理由についてグループで議論させる。質点の並進運動の物理と関連付けながら、物体の回転運動を表す物理量を導入する（図 5）。

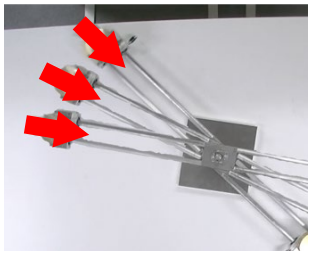


図 5.
先端に達した後。

注意点・備考

その場の目視では運動を捉えづらいため、事前に撮影した動画をスロー再生しての検証が必要となる。タブレットにスロー再生できる動画アプリを入れておき、その場で撮影した動画のスロー再生をスクリーンに映してもよい。直線運動の演示や、回転中にロックを外す演示では、直後には直線運動を始めるが、徐々に進路が曲がっていく。また、アームを手で急に動かしても、質点は自転しない。しかし、アームを回し続けると徐々に質点は自転を始める。また、質点が自転している状態でアームを急に止めると、自転し続けるが徐々に止まる。これらの現象の原因について議論を行うと、より高度な内容につなげることができる。

16 ２つの単振り子による連成振動

２つの単振り子の振動が互いに影響を及ぼす様子を観察させる。

キーワード	単振り子、連成振動*、うなり*
目的	２つの単振り子を用いた連成振動系で、“うなり”という物理現象を観察させる。
実験時間	10 分程度
用意するもの	● スタンド……２台 ● ペットボトル（小）……２個 ● ビー玉……約 30 個 ● 角材……5 ㎝×5 ㎝×1m ● たこ糸
実験準備	ビー玉を入れたペットボトルをおもりにし、フタにたこ糸を取り付けた単振り子を２個作る。図１のように、２つの単振り子の支点を１本のたこ糸に取り付け、水平な角材と２台のスタンドを使って吊り下げる。振り子の振動中にスタンドが揺れないように、万力などでスタンドをしっかりと固定する。 図 1. ２つの単振り子の連成振動
実験手順・教員による説明	一方の単振り子の糸がたるまないように、おもりを角材に対して垂直な面内で持ち上げ、他方の振り子は静止させておく（図１）。おもりを放して振り子を振動させると、他方の振り子も振動を始める。一方の振り子は徐々に振動が小さくなりいずれ静止し、そのとき他方の振り子は最大の振幅で振動する。時間経過とともに、２つの振り子の振動が入れ替わる様子（片方の振動が徐々に小さくなり、一方の振動が徐々に大きくなる）が観察できる。このような連成振動は、“うなり”という物理現象である。

次の①～④のように、２つの単振り子の間の距離や振り子の糸の長さを変えたり、ばねで２つの単振り子を連結し、連成振動がどのようになるのかを観察させる。

① 長さが同じ・おもりの重さが同じ２つの単振り子の間の距離を近づけて配置して、連成振動させる（図２左）。

② 長さが同じ・おもりの重さが同じ２つの単振り子の間の距離を遠ざけて配置して、連成振動させる（図２右）。

③ おもりの重さが同じで、糸の長さが異なる２つの振り子を配置して連成振動させる（図３）。

④ 長さが同じ・おもりの重さが同じ２つの単振り子の間をばねで連結させて連成振動させる（図４）。

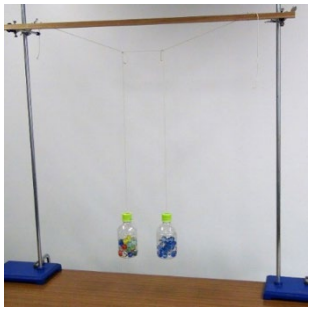
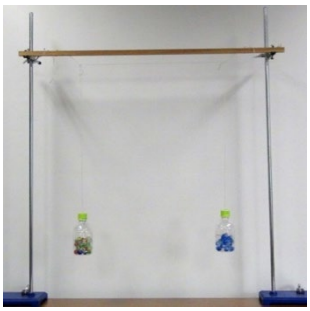



図２.
長さが同じ・おもりの重さが同じ２つの単振り子。
左）距離を近づけたところ
右）距離を遠ざけたところ

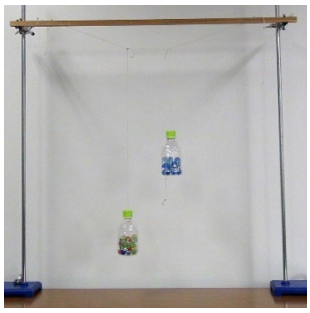


図３.
おもりの重さが同じで、糸の長さが異なる２つの振り子。

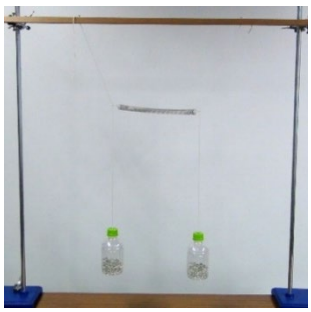


図４.
長さが同じ・おもりの重さが同じ２つの単振り子の間をばねで連結したところ。

注意点・備考

この連成振動の実験には様々なバリエーションが考えられる。パラメータとしては、単振り子のおもりの重さ、糸の長さ、振れ幅、単振り子間の距離、２つの単振り子の初期状態（同位相や逆位相）、ばねの位置などがある。これらのパラメータを変えたとき、連成振動がどのようになるのかを観察させる。

Column

「落ちる変化球」と放物運動—変化球の誤解—

野球の「落ちる変化球」に各種あるなかで、約 1m も急激に落ちるフォーク・ボールは魔球として有名である。しかし、無回転であり積極的に「落ちる」要素がないのが不思議である。高速度カメラで軌道を調べた研究では、単なる放物線に近かった。なぜ魔球という誤解が生じたのか、考えてみよう。

フォークは投げるのに苦労する。指でボールを挟んで投げてみると、スッポ抜ける。よって、大変な握力が必要であり、プロでも爪が割れたり、ボールをはさむ指の血行障害を起こしたりして、なかには引退した投手もいた。単なる放物運動をさせるために、これほど苦労して投げるのでは割に合わない。

しかし、計算すると急激に落ちて見えるのは錯覚であることがわかる。時速 140km のボールでも、捕手まで飛行すると重力で約 1m も落ちるのである。落下距離は時間の 2 乗である。打者に接近しながら落ちることになるので、打者からは落差が拡大されて見える。この 2 つの効果で「急激に落ちる」という錯覚が生じる。もっとも投手としては、錯覚だろうが何だろうが、打たれなければよいのであるが。

となると、直球の軌道のほうが「異常」ということになる。スナップで回転をかけ、約 1m も引き上げていることになる。よって、真空中では何を投げてもフォーク・ボールになってしまう。また、無重力の大気中では、直球は上に 1m 近く浮き上がり、逆にフォークは直進するため容易に打たれるだろう。

ここでは完全に無回転のフォークを仮定したが、実際には投手は意識的に回転を残して変化させ、打者を惑わせているそうだ。（三浦）

Column

超高層気球と深海艇の浮力

物体が排除した気体や液体の体積の分だけ浮力が得られることは、よく知られている。しかし空と海の極限状況において、浮力が科学的な観測手段と深く関わっていることはあまり知られていない。

気球はどこまで上昇できるだろうか？ 一定の厚みのフィルムで気球を作ったとすると、自重は表面積に比例するので半径の 2 乗で増える。一方、浮力は体積、つまり半径の 3 乗で増えるので、大きくなるほど到達高度は高くなる。計算上は限界がないように思えるが、フィルムには一定の強度が必要で、また大気密度が高層で急激に低下するため、現実には限界がある。高高度の気球は、気象の観測だけでなく、地上では観測できない赤外線天文学や X 線天文学で重要な観測手段である。

1972 年に米国で直径 138m（体積 1,350,000m^3）という巨大気球で高度 51.8km が達成された。そのまま大きくすればさらに上昇できるが、もっと賢い方法はないだろうか？ 気球のフィルムを薄くできれば自重が減るので小型でも高く上れるだろう。そこで宇宙航空研究開発機構（JAXA）は 3.4 μm 厚の極薄ポリエチレンで、直径 50m（65,000m^3）という、米国より小型の気球を作り、高度 53km の新記録を樹立した（2002 年 5 月、その後さらに更新）。薄くて触るのが怖いような巨大な気球である。

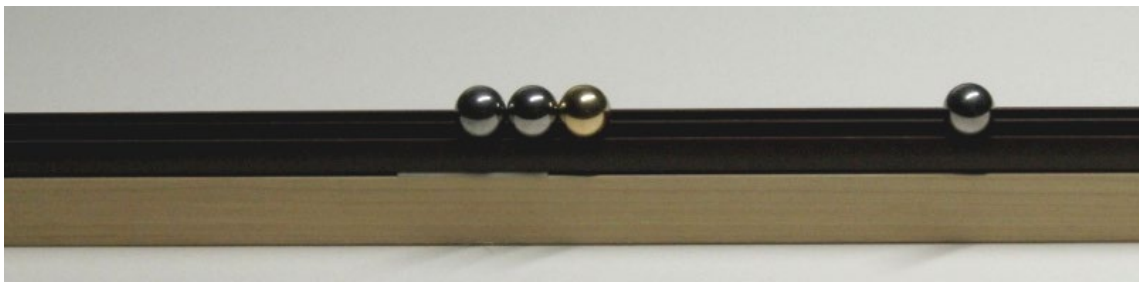
高度 51km の地点では大気密度は地上の約 0.07%になるため、この気球の浮力は 60kg に過ぎない。それでも、気球の重量はフィルムが 24kg、ヘリウム気体が 8kg、計 32kg なので、さらに上昇できることがわかる。

つぎに、下方向の深海での浮力を考えよう。日本の深海調査船「しんかい 6500」は 26 トンの重量があり、水圧が最大 650 気圧かかる。浮上のための浮力をいかに得たらよいのか。発砲スチロールは論外として、浮力材が潰れては海面に帰還できない。そこで中空のガラス玉（バルーン）を使うとのこと。「割れ物」の代名詞であるガラスを過酷な環境で使うとは、驚きである。その秘密は、球の直径をミクロン単位にまで小さくして、強度を上げる点にある。直径約 100 μm と約 40 μm の 2 種の玉を使用し、小玉を大玉の隙間に入れてエポキシで固めると、互いに支え合って比重が小さいままで、さらに強度が高まるとのことである。（三浦）

第 2 章　電磁気学

17 ガウス加速器［S］

ネオジム磁石球を使って、鉄球を加速して射出させる。



キーワード	ポテンシャル、運動量保存則、剛体の運動（直線運動、回転運動）
目的	エネルギー保存則と運動量保存則が一見すると破れているように思える実験を考察することにより、エネルギーや運動量が保存する現象と、磁気的なポテンシャルエネルギーの存在を理解させる。あわせて、剛体の運動についても理解させる。
実験時間	20 分
用意するもの	● プラスチック・レール……1 本 1m 程度は必要。電気ケーブルの固定用レールで可。 ● ネオジム磁石球……1 個以上 球の直径は 10mm が適当。 ● 鉄球……4 個以上 球の直径は 10mm が適当。 ● ビー玉……4 個 ● 非対称な斜面をもつレール……4 本 ここでは自作したものを使用。
実験準備	なし
実験手順	① レールの上に同質量の鉄球 3 つを接するように設置する。つぎに、右からもう 1 つの鉄球を目で追える程度の速度で入射する。結果：一番左の鉄球は入射球より少し遅い速度で左へ射出される。残った 3 つの鉄球も少し左へ運動する。 ② レールの上に同質量の鉄球 2 つを接するように設置する。さらに、その右側にネオジム磁石球を接するように置く。つぎに鉄球を右方向から可能な限りゆっくり入射する。結果：一番左の鉄球が非常に速い速度で左方向に射出される。その反動で、残った 3 つの球は、右方向へ運動する。

③「発射される鉄球の速度を上げるには、どのように鉄球・磁石球の数や配置を変えればよいか」について、学生に根拠を含めて考察させたり、さらにその考えを実際に試させたりする。結果：磁石に対して鉄球が非対称に配置されたときにだけ、鉄球の射出が起こる。

④ 非対称な斜面をもつレールの上に、同質量のビー玉３つを接するように設置する（図１）。次に、ビー玉を右方向から可能な限りゆっくり入射する。結果：一番左のビー玉が非常に速い速度で左方向に射出される。

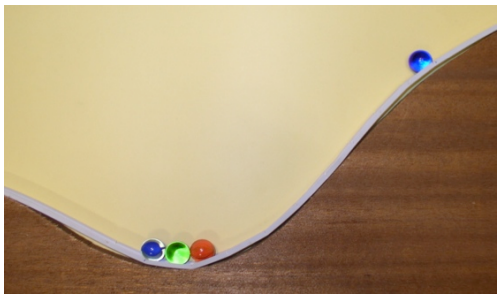


図 1.
非対称な斜面をもつレール上でのビー玉配置。

教員による説明

手順①では、鉄球の直線運動のエネルギーと運動量は移行するが、回転運動のエネルギーは移行しない。そのため、真んなかに残された３つの球は少し動いてしまう。

手順①ではエネルギー・運動量が保存されているように思えるが、手順②では、それらが保存していないように思えてしまう。しかし当然ながら、ネオジム磁石によるポテンシャルエネルギーを含めればエネルギーは保存しており、残された３つの鉄球･ネオジム磁石球の反跳を考慮に入れれば、運動量も保存している。

手順④の結果を踏まえて、磁気ポテンシャルと重力ポテンシャルが対応していることを述べる。重力ポテンシャルならば、３つのビー玉の左右の重力ポテンシャルの差が原因で、左方向にビー玉が射出されることが明確であるため、この現象の類推から、手順②、③の結果を説明する。すなわち、磁石に対して鉄球が非対称に配置されたときにだけ鉄球の射出が起きるのは、「磁石の引力による左右のポテンシャルエネルギーの差」が運動エネルギーに変換されるためであることを説明する（なお、これを確認するために、引力を実測した結果を【関連トピック】にまとめた）。

注意点・備考

入射球と発射球の速度を測定する装置を設置すると、結果がより明確になる。

手順の②では、手順①と比べて十分に遅い速度で鉄球を入射したほうが、印象が強まる。

オハジキのように摩擦が十分小さい鉄球や磁石球を使う、もしくは、レール上にマイクロビーズを敷いて摩擦を減らせば、回転運動を考えずに済む可能性がある。

安全性にとくに問題はないが、鉄球の飛び出す方向に柔らかい布などをストッパーとして置くと、より安全である。

高速度撮影によれば、磁石球の近傍では鉄球は回転せずに滑って衝突しているようにも観察された。

運動の際に摩擦でエネルギーが一部損失するため、エネルギー保存則については定性的な議論にとどめる。

参考文献

[1] David Kagan, “Energy and Momentum in the Gauss Accelerator,” *The Physics Teach*er, January, **42** (1) , 24-26, 2004.
[2] 物理チャレンジ 2006 実験問題 2
http://www.phys-challenge.jp/img/pdf/jikken-q2006-2.pdf

関連トピック

静止させた磁石球間の引力（青色）、および、間に鉄球を入れた場合の静止させた磁石球間の引力（赤色）を図 2 に示す。図より、鉄球を磁石の間に入れることで、磁石球間の引力が弱くなることがわかる。なお、レールの上を転がる磁石球間の引力の値は、静止させた磁石球間の引力の値とは異なると思われる。また、2mm 以下に接近すると引力が急激に増大するので、測定は困難であった。

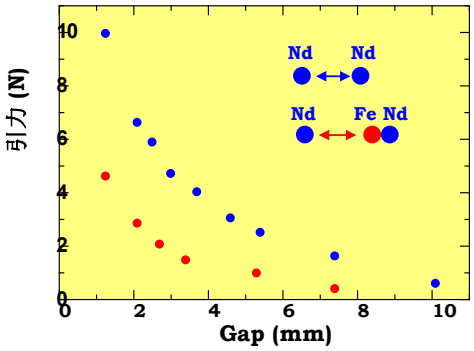


図 2.
磁石球間の引力（青色）および間に鉄球を入れた場合の磁石球間の引力（赤色）の実測値。

Column

エネルギーの概念と講義実験

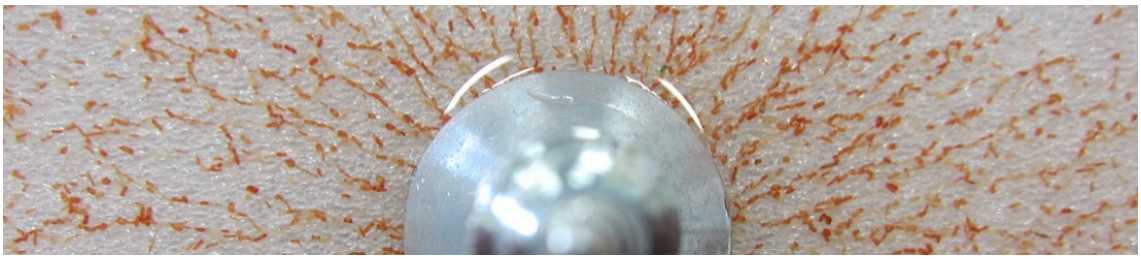
学生や一般社会人が物理を初めて習うときに最も困惑させられるのが、エネルギーの概念だと思われる。日常用語としてのエネルギーと物理用語としてのエネルギーとで概念が異なっているのだから、当然といえば当然である。さらに、目に見える運動エネルギーと目に見えないポテンシャルエネルギーの関係が理解しづらいという面もあるだろう。数式や机上の理屈ではわかるものの、現実世界で対応づけて体感的に理解する機会がなかなか持てないからだ。

そんなとき、講義実験ならば印象的なデモンストレーションを見せることができる。たとえばポテンシャルエネルギーから運動エネルギーへの転換を模式的に示すガウス加速器の演示実験。文字通りポテンシャルという「静」と、それが運動に転化した際の「動」のギャップの大きさに、学生だけでなく教員も驚くことだろうと思う。

講義実験を活用することで、単なる数字や数式であった概念が生き生きとした経験に変わって、学生のなかでうまく消化できれば、それこそが物理講義の醍醐味だといえるだろう。（千代）

18 静電場の可視化

液体中の粉末を観察し、点電荷の周りの電気力線の形状を理解する。



キーワード	電荷、電気力線、電場
目的	液体中で帯電したネジの周りの粉末を観察することで、同符号どうし、および異符号どうしの２つの点電荷の周りの電気力線の形状を理解する。
実験時間	５分
用意するもの	● ネジ……２個 例えば、直径 6mm 程度の皿頭のネジ。画びょうでも可。 ● サラダ油……適量 粉末を浮かばせる液体。 ● クリップ……１つ 粉末をならすために使用。 ● 針状の微粉末……適量 たとえば、ジオラマの土用素材。 ● ポリスチレン容器……１個 絶縁体の容器であれば可。 ● 圧電素子……１個 静電気を起こすために使用。ライターから取り出す。
実験準備	事前実験をして、選択した針状の微粉末が電気力線を明快に表せることを確かめておく。また、使用する粉末の適切な分量を調べておく。
実験手順	① ポリスチレン容器の上に、サラダ油を均一になるように敷く。 ② サラダ油に針状の粉末を入れ、均一になるように先を伸ばしたクリップを使ってならす。 ③ ２つのネジを適当な距離だけ離して、サラダ油のなかに置く。 ④ 圧電素子を用いて、２つのネジを帯電させる。結果：図１のように同符号の電荷が作る電気力線の形状が現れる。 ⑤ 一方のネジに指をあてながら、もう一方のネジを圧電素子で帯電させる。結果：図２のように異符号の電荷が作る電気力線の形状が現れる。

図１.
同符号に帯電させたネジの周りの粉末。

図２.
異符号に帯電させたネジの周りの粉末。

教員による説明

物理シミュレータ（たとえば[2]など）を用いて、同符号同士、および異符号同士の２つの点電荷が作る電気力線を描画し、実験結果と比較する（図３、図４）。

電気力線の方向に微粉末が並ぶ理由は次の通り。絶縁体の微粉末は誘電分極によって双極子となる。双極子となった微粉末は電場によって回転し、互いの異極同士がつながる。その結果、微粉末は電気力線の方向に並ぶ。

大きさをもつ双極子の性質上、１つの微粉末が２つ以上の微粉末につながることがある。その場合、実際は電気力線が枝分かれしないことを説明し、学生に誤解を与えないようにする。

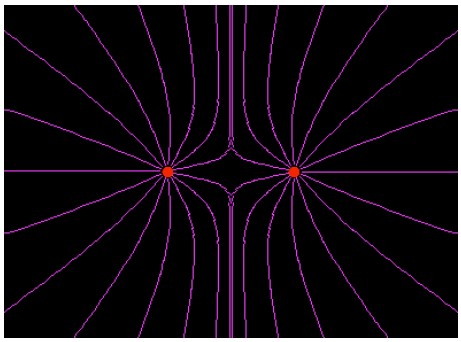


図３.
同符号の点電荷の周りの電気力線。

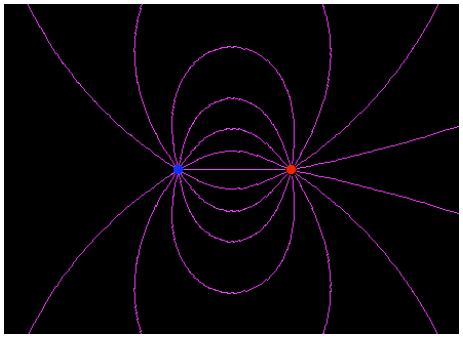


図４.
異符号の点電荷の周りの電気力線。

注意点・備考

帯電した電荷の絶対値が同程度にならない場合は、シミュレータでもそれに合わせて描画する。

参考文献

[1] 川勝博「川勝先生の物理授業（下巻）電磁気・原子物理編」海鳴社，2008.
[2] 鈴木徹夫「電気力線」『Virtual Physics』，
http://www.asahi-net.or.jp/~zn6t-szk/physics/eForce10.html

19 アルミホイルを用いた電磁力の可視化

軽くて動きやすいアルミホイルを使って、電流が磁場から力を受けることを示す。

キーワード	磁場中の電流に働く力
目的	電流が磁場から力を受けることを観察させる。また、その力の向きが磁場や電流の向きによってどのように変わるかを理解させる。
実験時間	15 分
用意するもの	● 方位磁針……1 個 磁石の極性を確認するために使う。 ● アルミホイル……適量 家庭用のもので可。 ● みのむしクリップ……3 個 アルミホイル、豆電球、発電機をつなぐ。 ● 磁石……1 個 フェライト磁石で可。円筒型の平たい磁石で、机の上に置いた時に上面が N 極または S 極になるもの。 ● 豆電球とソケット……1 個 電流が流れていることを確認するために使う。 ● 手回し発電機……1 個 防災用品として市販されている携帯電話充電用のもの。
実験準備	アルミホイルを長さ 10cm 程度、幅数 mm 程度に細く切る。このときアルミホイルがねじれないように注意する。また方位磁針を用いて、磁石の極性を確認しておく。
実験手順	① 発電機の両端にテスターを継ぎ、起電力の向きを確認する。 ② 発電機、豆電球、アルミホイルをみのむしクリップで直列に結んで回路を作る（図 1）。 ③ アルミホイルの下に磁石を入れる（図 2）。 ④ 発電機のハンドルを回したときにアルミホイルが動く方向を、学生に予想させる。

⑤ 実際に発電機を回し、アルミホイルの動きを観察する。予想と合っていたかどうかを確かめ、外れていたら、なぜ外れたかを考察する。

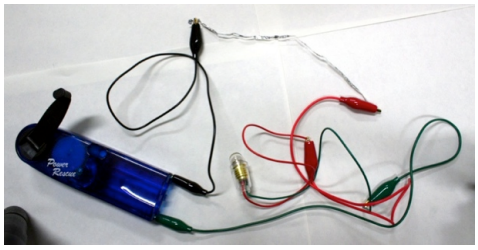


図 1.
回路の概略（磁石を除く）。左の青いものが手回し発電機。

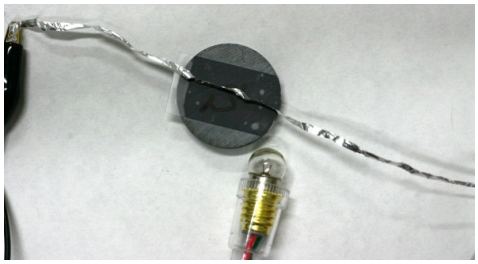
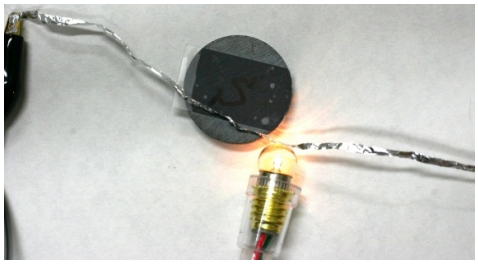


図 2.
a） 発電機を回していないときのアルミホイルの様子。



b） 発電機を回しているときのアルミホイルの様子。

教員による説明 実験を行う前に、電流 $\vec{I}$ で長さ L の部分が磁場 $\vec{B}$ から受ける力 $\vec{F}$ は

$$\vec{F} = L\ \vec{I} \times \vec{B}$$

で表されることを説明する。電流、磁場、力それぞれの向きについて復習する。

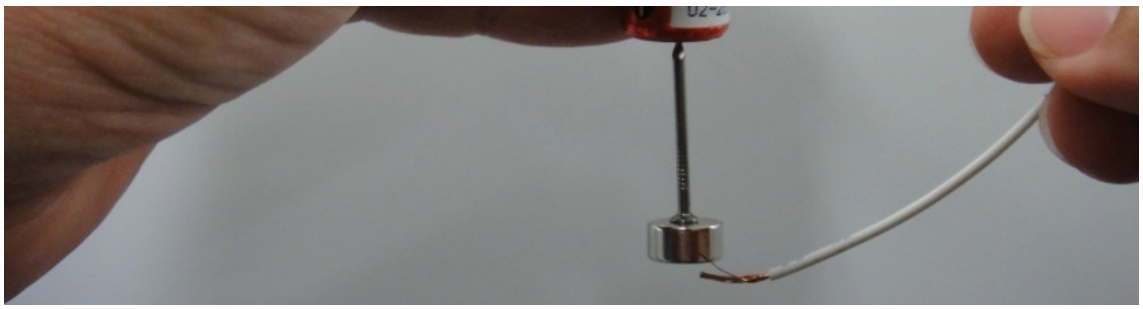
注意点・備考 動く部分を軽くするためにアルミホイルを用いた。銅線では重いために動きが見えにくいが、アルミホイルを用いると容易に動きを観察することができる。

この実験の動画が次のサイトにある：
http://youtu.be/6nUVeiZjkrQ

手回し発電機はハンドルを回す向きによらずに同じ向きに電圧が発生するので注意。他の手回し発電機、あるいは電池でも代用可。ただし、手回し発電機のほうが、受講者に「体を動かした」という実感を与えるので、印象に強く残るだろう。

20 単極モーター

電池と釘とネオジム磁石で、最も簡単といわれるモーターを作る。



キーワード	磁場中の電流に働く力
目的	可視化しにくい「磁場中の電流に働く力」を、動きのある装置で印象づけるとともに、その動作原理を理解させる。
実験時間	5 分
用意するもの	● 単三電池……1 個 ● 釘……1 本 ネジでも可。片側が平面で、片側がとがっているもの。ネジの方が回転する様子を見やすい。 ● ネオジム磁石……1 個 直径 5mm 程度の円筒形のもので、軸方向に磁化されていること。 ● 導線……1 本 ネオジム磁石と電池の端子を接続する。

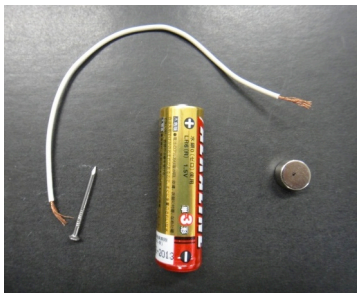


図 1.
左から、導線、釘、単三電池、およびネオジム磁石。

実験準備	釘と電池の接触状態によってモーターが回転しないことがあるので、実験前にリハーサルをして回転することを確認しておく。
実験手順	① 釘の頭部と磁石をくっつける。 ② 釘の先と電池の(−)極をくっつける。磁力が強力なため、点接触でもくっつく。 ③ 電池の(+)極とネオジム磁石の側面を導線で電気的に接触させる。すると、ネオジム磁石が非常に高速で回転する。

④ ネオジム磁石が回転する理由を、学生に考えさせる。実験器具は学生に回覧させても、1セットずつ渡してもよい。

教員による説明

磁場中の電流には力が働く。磁石の内部には磁場がないため、磁石内部を流れる電流には力が働かない。また、磁石上面を流れる電流には力が働くが、その反作用として磁場（磁石）に逆向きの力が働くため、結局これらの力は内力となり磁石の回転には寄与しない。実際は、磁石に接触させている導線を流れる電流に働く力の反作用の力が磁石を回転させる。

注意点・備考

実験装置自体の抵抗が 100mΩ 程度であり電流が比較的多い（数アンペア）ため、長時間回転させ続けると加熱する恐れがある。とくにニッカド電池・ニッケル水素電池（10-20mΩ）は、アルカリ電池（100-200mΩ）に比べて内部抵抗が低く爆発の危険があるため使用しない。

単極発電機の動作原理は、単極モーターの動作原理の裏返しになっている。すなわち、軸方向に磁場をかけた円盤を回転させると、円盤の中心と縁の間に電流が流れる（図２・図３）。

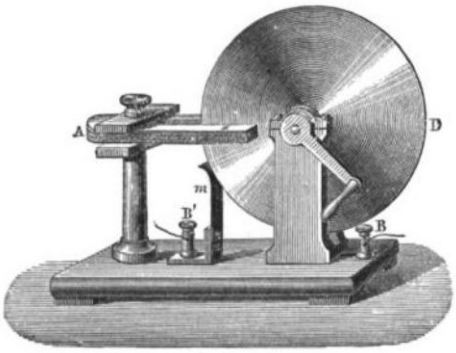


図２.
単極発電機（ファラデーの円盤）[3]

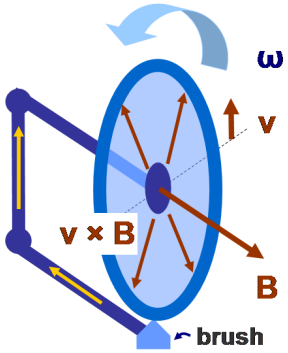


図３.
単極発電機の原理[4]

参考文献

[1] C. Chiaverina, “The simplest motor?” *The Physics Teacher*, **42**, p.553, 2004.
[2] H. K. Wong, “Motional Mechanisms of Homopolar Motors & Rollers,” *The Physics Teacher*, **47**, pp.465-463, 2009.
[3] Faraday’s law of induction (Feb. 10, 2017, 4:24 UTC). In Wikipedia: The Free Encyclopedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday's_law_of_induction
[4] Faraday paradox (Feb. 19, 2017, 15:33 UTC). In Wikipedia: The Free Encyclopedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_paradox

関連トピック

模型用のモーターを除くと、身の回りの電化製品(電車やハイブリッドカーなども含む)において使用されているモーターは誘導モーターである。誘導モーターと単極モーターとの動作原理の比較をレポートとして課すのもよい。

21 単極ローラー１

ネオジム磁石と銅板を使い、乾電池を自走させる。

キーワード	磁場中の電流に働く力
目的	磁場中の電流に働く力の向きを理解させる。
実験時間	５分
用意するもの	● ネオジム磁石……２つ 直径 1.5cm 程度の円筒形のもので、円筒の縦軸方向に磁化されていること。単三乾電池の直径よりも大きく、同程度の大きさ。 ● 銅板……１枚 100×200mm 程度。アルミホイルでも可。抵抗が小さく、磁石につかない素材であればよい。 ● 単三乾電池……１つ
実験準備	実験をする机が水平に設置されており、磁石につかないことを確認しておく。
実験手順	① 乾電池の両極に、ネオジム磁石の極がともに内向き（または外向き）になるように取り付ける。この時点では、取り付けた向きを学生に言わない。 ② 銅板の上に磁石を取り付けた乾電池を置く。すると、乾電池は自走する（図１）。 ③ 机が傾いていないことを示すため、今度は逆向きに自走させる。 ④ 乾電池が自走するためには、磁石の極をどちら向きに取り付けなくてはならないか、と学生に質問する。 ⑤ 考える時間を与えた上で、学生たちに挙手で意見を聞く。 ⑥ 教員から解答を説明する。 ⑦ 実験器具を学生に回覧させ、確認させる。

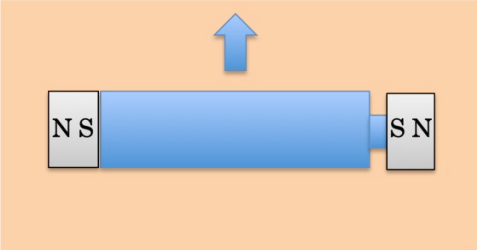


図１.
乾電池、磁石、銅板を机面に垂直な方向から眺めた図。図示した磁極の場合、紙面上方向にローラーは進む。

教員による説明　電池の正極の突起から丸磁石を通じて下の銅板に、動径方向に電流が流れている。つまり、図２において、円板の役目を丸磁石が、円板の中央の電極を電池の突起が、円板下の brush 及び電線の役目を銅板が、それぞれ果たしている。

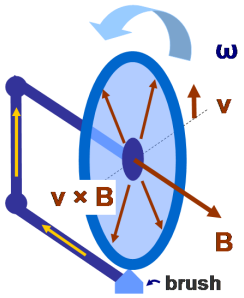


図２.
単極モーターの原理[2]。

注意点・備考　一見すると単極モーターに見えず、転がる理由を学生に考えさせる点が教育的である。

乾電池は磁石を取り付けたまま銅板の上に放置すると、放電して高温になる。乾電池が破裂する危険性があるので、実験後は直ちに銅板から取り外すこと。

単極モーターの「単極」とは、電流の流れるときに電極の向きが同一であること、すなわち回路が直流回路であることを表す。

ネオジム磁石の磁力は非常に強力なため、キャッシュカードやプリペイドカードなどに近づけると利用できなくなるので注意する。

参考文献

[1] N. Sugimoto and H. Kawada, “The homopolar motor and its evolution,” *The Physics Teacher*, **44**, p.313, 2006.
[2] Faraday paradox (Feb. 19, 2017, 15:33 UTC). In Wikipedia: The Free Encyclopedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_paradox

22 単極ローラー２

銅板レールの上で単極ローラーを自走させる。

キーワード	磁場中の電流に働く力
目的	単極ローラーの駆動力について考察することで、ローレンツ力を理解させる。
実験時間	10 分
用意するもの	● ネオジム磁石……２つ 直径 1.5cm 程度の円筒形のもので、円筒方向に磁化されていること。単三乾電池の直径よりも大きく、同程度の大きさ。 ● 銅板……２本 1 mm 厚でレール状のもの（図１） ● 単三乾電池……１つ ● レール短絡用の電線……１本
実験準備	実験をする机が水平に設置されており、磁石につかないことを確認しておく。
実験手順	① 電池の両端に、ネオジム磁石の極がともに内向き（または外向き）になるように取り付ける。 ② 銅板に流れる電流の経路と磁力線の方向を調べ、ローレンツ力の方向を考察させる（図２）。 ③ ネオジム磁石に流れる電流の方向と、磁場方向からローレンツ力の方向を考察させる（図３）。 ④ 単極ローラー（磁石を取り付けた電池）を銅板レール上に載せ、回転するための条件を考察させる。

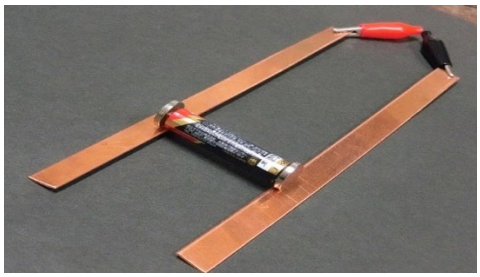


図１.
銅板レール上の単極ローラー。
レールを短絡すると駆動力が生じ、ローラーが転がる。

⑤ 銅板レールを電気的に短絡し、単極ローラーの回転を確認する（図１）。
⑥ 電流の方向と磁場の方向をそれぞれ反転させ、回転方向を確認させる。

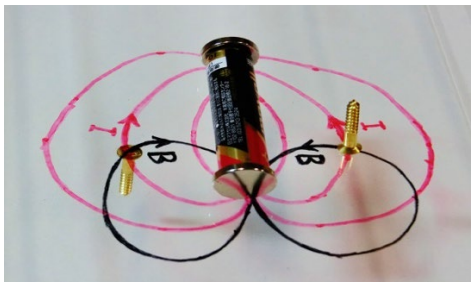


図 2.
銅板に流れる電流経路（赤）と、電池の端にあるネオジム磁石による磁力線（黒）の図示。
ローレンツ力の方向をネジ（金色）で示している。

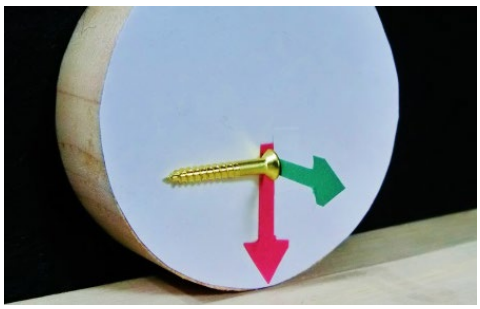


図 3.
ネオジム磁石の電流（赤）と磁場（緑）方向。
電流は真下の銅板に向けて動径方向に流れ、ローレンツ力（金色ネジ方向）により回転が駆動される。

教員による説明

① 銅板の電流経路は赤色のように広がっている。磁石との接触点を結ぶ直線電流になっている、との誤解が多いので注意する。乗っている金属平面の電気抵抗が大きいほど、電流経路の広がりは大きくなる。
② 銅板レールの上では、図２の駆動力はほとんど消え、図３の駆動力は残る。磁場は磁石から離れると急速に減衰するので、図３の駆動力のほうが大きいことを指摘する。

注意点・備考

乾電池と両端のネオジム磁石の中心を正確に一致させないと転がらないので注意する。駆動力が小さいため、銅板レールは正確に水平にする必要がある。

この実験では電池を短絡するため、大電流が流れて電池が発熱する恐れがある。安全のため、実験は短時間で済ませること。

23 渦電流ブレーキ［S］

アルミＬ型アングルに沿わせると、磁石球はゆるやかに落下する。

キーワード	電磁誘導、渦電流*、ジュール発熱*
目的	コイルだけではなく、板やパイプでも、磁場が変動すれば電磁誘導によって電流が流れうることを定性的・定量的に理解させる。
実験時間	30 分
用意するもの	● ネオジム磁石球、金属球……各１個 直径 10mm ● アルミＬ型アングル……１本 3.0mm 厚、一辺 25mm、長さ 30cm。 ● プラスチック定規……１本 2.9mm 厚、長さ 30cm。 ● 薄肉ステンレスパイプ……１本 0.5mm 厚、外径 20mm、長さ 30cm。 ● 薄肉銅パイプ……１本 0.5mm 厚、外径 22mm、長さ 30cm。 ● 厚肉銅パイプ……１本 1.0mm 厚、外径 22mm、長さ 30cm。 ● スリット入り銅パイプ……１本 要製作。0.5mm 厚、外径 22mm、長さ 30cm。 ● 布……１枚 ハンカチなど。衝撃を和らげるために使用。

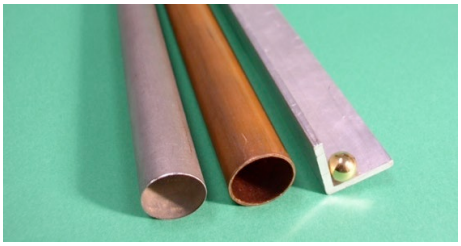


図１.
左から薄肉ステンレスパイプ、厚肉銅パイプ、アルミＬ型アングル。

実験手順・教員による説明

それぞれの実験をする前に、学生に実験結果を予想させる。

① アルミＬ型アングルに磁石球を近づけ、磁石につかないことを確認する。

② ほぼ垂直に立てたアルミＬ型アングルの内側に沿わせ、磁石球と金属球をそれぞれ落下させる。結果：磁石球は金属球よりも、ゆるやかに落下する。教員の説明：アルミは磁石につかないにもかかわらず、落下させる物体の磁力が、落下速度に影響することを述べる。

③ ほぼ垂直に立てたアルミＬ型アングル、およびプラスチック定規に沿わせ、磁石球を落下させる。結果：定規よりもアングルに沿わせたほうがゆるやかに落下する。教員の説明：アングルが導体であることが、落下速度に影響することを述べる。

④ ほぼ垂直に立てたアルミＬ型アングルの内側、および外側に沿わせ、磁石球を落下させる。結果：外側よりも内側を沿わせたほうが、ゆるやかに落下する。教員の説明：磁石と接し、磁場変化を感じる金属板の面積が、落下速度に影響することを述べる。

⑤ 銅パイプに磁石球を近づけ、銅が磁石につかないことを確認したのち、垂直に立てた薄肉銅パイプの中央部に、磁石球と金属球をそれぞれ落下させる。結果：磁石球は金属球よりも、ゆるやかに落下する。教員の説明：銅は磁石につかないにもかかわらず、落下させる物体の磁力が、落下速度に影響することを述べる。

⑥ 垂直に立てた薄肉銅パイプと厚肉銅パイプの中央部に、磁石球を落下させる。結果：薄肉銅パイプよりも厚肉銅パイプのほうがゆるやかに落下する。教員の説明：薄肉銅パイプよりも厚肉銅パイプのほうが、電気抵抗が小さいことを説明する。そして、パイプの電気抵抗、およびパイプを流れる電流が、物体の落下速度に影響することを説明する。

⑦ 垂直に立てた薄肉ステンレスパイプと薄肉銅パイプの中央部に、磁石球を落下させる。結果：薄肉ステンレスパイプよりも薄肉銅パイプのほうがゆるやかに落下する。教員の説明：銅よりもステンレスのほうが、電気抵抗が大きいことを説明する。これより、パイプの材質による電気抵抗の差が、落下速度に影響することがわかる。

⑧ 電磁誘導の法則によると、磁石球を落下させたとき、パイプの中をどちら向きに電流が流れるかを考えさせる。誘導電流の向きが磁石球に及ぼす力の向きが、運動を妨げる方向であることを確認させる。そして、実験⑦・⑧の結果から、電気抵抗の大きさとジュール発熱の大きさの関係について説明する。

⑨ 垂直に立てた銅パイプとスリット入り銅パイプの中央部に、磁石球を落下させる。結果：同じ材質、同じ厚みにもかかわらず、スリット入り銅パイプよりも銅パイプの方がゆるやかに落下する。教員の説明：パイプのなかを流れる電流の向きが確認されたことを述べる。

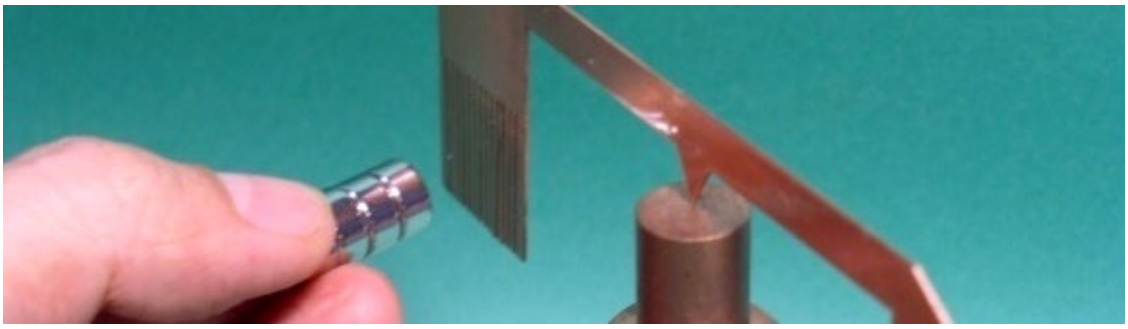
注意点・備考

学生が机上で実験する場合、磁石球などの落下地点に布を敷くと、跳ねて転がらないので便利。逆に、教員が教壇で演示する場合、何も敷かずに球が着地するときに音を出したほうが、講義室後方の学生でも落下速度の違いを理解しやすい。

渦電流の効果は非接触型のブレーキに使用できる。初期の新幹線のブレーキでは、車軸に取り付けた金属円板に磁場を加えた。しかしこの方法では、エネルギーを熱として捨ててしまう。そこで現在は省エネのため、モーターで発電した電流を架線に戻して回収している。

24 銅板パターンを用いた渦電流の理解

様々なパターンの刻まれた銅板ヤジロベーに、磁石を近づけて上下に揺らす。



キーワード	電磁誘導、渦電流*
目的	電磁誘導で生じる渦電流の効果を理解させる。
実験時間	15 分
用意するもの	● 銅板ヤジロベー……1 式 図 1 ～図 4 参照。銅版の片方の腕には、各種のパターンが刻まれている。 ● ヤジロベーの支柱……1 個 図 1 参照。 ● ネオジム磁石……4 個 円盤型のもの。

図 1.
銅板のヤジロベーとヤジロベーの支柱。

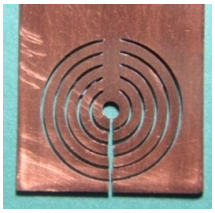


図 2.
丸いパターンを刻んだ銅板。
円は途中で切れているため、電流は丸く一周できない。

図 3.
縦に切られた銅板。電流は丸く一周できない。

図 4.
ハンダ付けした丸いパターンの銅板。
切れ目をハンダでつなげているため、電流は丸く一周できる。

実験準備　なし

実験手順

① 図 2 のパターンの銅板ヤジロベーを支柱の上に載せる。パターンが刻まれていないほうの銅板に磁石を近づけて、上下に振動させる。結果：磁石に合わせて、銅板は揺れる。

② 丸いパターンが刻まれているほうの銅板に磁石を近づけて、上下に振動させる。結果：銅板はあまり揺れない。

③ 図 3 のパターンの銅板ヤジロベーを支柱の上に載せ、パターンが刻まれているほうの銅板に磁石を近づけて、上下に振動させる。結果：銅板はあまり揺れない。

④ 図 4 のパターンの銅板ヤジロベーを支柱の上に載せ、パターンが刻まれているほうの銅板に磁石を近づけて、上下に振動させる。結果：銅板はパターンが刻まれていない平板と同じように揺れる。

教員による説明　電磁誘導による渦電流が流れやすいほど、エネルギーの損失が大きく、ブレーキ効果が大きいことを理解させる。図 2 と図 3 のパターンでは、渦電流が一周できないため、電流が小さいので揺れは小さい。しかし図 2 とよく似た図 4 では、平板と同様に渦電流が一周できるため、平板と同様の大きな摩擦力が生じ、大きく揺れる。

注意点・備考　ヤジロベーと支柱は名古屋大学の物理学実験準備室で借りることができる。

わざわざ「丸いパターン」を切ったのは、平板にも丸く渦電流が流れていることを強調するためである。コイルを使った電磁誘導の実験において電流が丸く流れることは自明であるが、平板ではイメージしにくい。

25 立体模型を用いた法則の理解

立体模型を用いて、座標系や法則を直感的に理解する。

キーワード	座標（極座標）、電場、ガウスの法則、ベクトル積、ビオ・サバールの法則
目的	立体模型によって、座標系や法則を理解させる。
実験時間	なし（模型などを箱に入れて、学生に回覧させる）
用意するもの	● 自作した立体模型……1～３個 学生の受講人数に合わせて１～３個の模型を製作する。 ● 極座標の立体模型

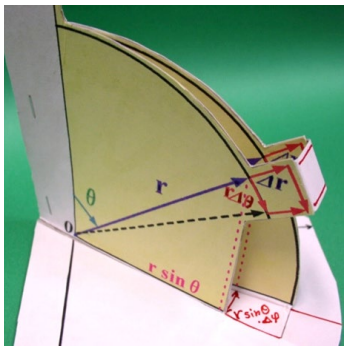


図 1.
厚紙で自作した極座標の立体模型。

● ガウスの法則の立体模型

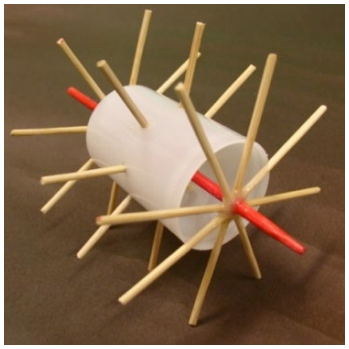


図 2.
直線上に帯電した物体の周り電界を表した立体模型。
赤色で示した箇所が帯電している。

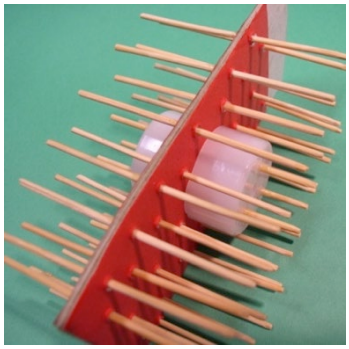


図 3.
平面上に帯電した物体の周りの電界を表した立体模型。
赤色で示した箇所が帯電している。

● ビオ・サバールの法則の立体模型

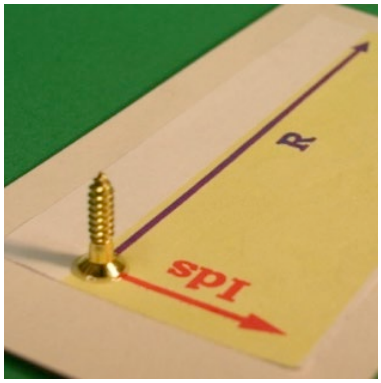


図 4.
電流による磁場の方向を表した、
ベクトル積の立体模型。

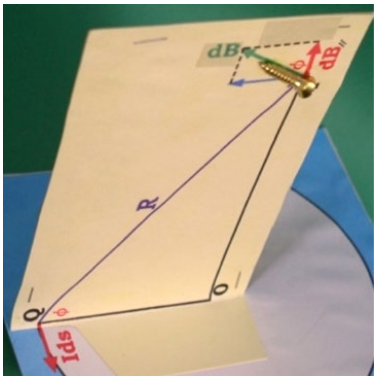


図 5.
円形電流による磁束密度の方向を
表した立体模型。

教員による説明

● 極座標

θ と ϕ の積分範囲が異なることを示しながら、円弧から突き出た微小体積が積分要素に対応していることを述べる。また極座標における微分表記と微小変位の関係を理解させる。つまり、微分表記では、ちょうど微小変位が分母になっていることを説明する。

● ガウスの法則

(1) 直線に帯電した場合（図 1）電気力線は囲った円筒の側面を貫くことを説明する。設問「点電荷の場合と比較して、電気力線の広がりかたは大きいか？」解答「広がり方は小さい。よって点電荷に比べて電場の減衰は小さく、遠くまで及ぶ。」

(2) 平面に帯電した場合（図 2）電気力線は囲った円筒の上面と底面を貫くことを説明する。設問「電気力線が平行であることから何が言えるか？」解答「平行であるから電気力線の密度は一定。よって電場は平面からの距離に依らず、減衰しない。」

● ビオ・サバールの法則

電流が作り出す磁束密度を積分すると、磁場の水平成分の寄与が相殺し、磁場の垂直成分の寄与だけが残る。このとき、ベクトル積の模型を円形電流の模型に当てて磁場方向を確認させる。図の三角が作る平面の上に、磁束密度ベクトル B が乗っていることに注意する。

注意点・備考

極座標の立体模型を回覧させる前に、黒板に極座標の図を書いて説明する。板書では、とくに極座標奥行き方向の ϕ 成分が理解されにくいので、立体模型が有効になる。

ボール紙に貼り付けると、糊によっては乾いて収縮し、反りかえることがあるので注意する。紙質が悪いとすぐに傷む。ケント紙は丈夫だが少し薄いので、2 枚貼り合わせるとよい。

26 赤外線カメラを用いた内部エネルギーの観察

衝突で失われたエネルギーが内部エネルギーになることを観察する。

キーワード	内部エネルギー*、赤外線カメラ*
目的	物質を落下させ地面に衝突させると必ずしも弾性衝突をするわけではない。失われたエネルギーの行き先を理解する。
実験時間	20 分
用意するもの（1グループ分）	● 鉄球……1個 直径 50mm（図 1）。名古屋大学の物理学実験準備室で借り入れ可。 ● 赤外線カメラ……1式 たとえば、FLIR One と iPad mini。名古屋大学の物理学実験準備室で借り入れ可。 ● プラスチック板、もしくはゴム版（図 1）……1枚 300mm × 300mm × 10mm 程度。

図 1.
鉄球とプラスチックの板。

実験準備	赤外線カメラに充電が必要な場合は、充電を忘れないようにする。（注意点・備考も参照）。

実験手順・教員による説明

鉄球を 1.5m ほどの高さからプラスチックの板に落とす。落とす前と後で、とくに鉄球が当たったところの温度が変わることを、赤外線カメラで観察する。事前説明としては、非弾性衝突でエネルギーが失われることを説明し、失われたエネルギーの行き先について、あらかじめ学生に考えさせる。また、赤外線カメラが熱に敏感なカメラであることを説明する。お湯と水の入ったカップの映像を見せるなどの説明を行うとよい。

【実験手順】

① プラスチックの板の赤外線画像を観察する。

② プラスチックの板の上に、鉄球を 1.5mほどの高さから落とし、プラスチックの板の当たった部分の温度が上がっていることを確認する（図２）。

③ （教員による説明）鉄球がもとの高さまで跳ね返ってこないこと、およびエネルギーの減少があったことを説明する。その減少分のエネルギーがプラスチックの板の内部エネルギーとなり、熱として観測されていることを説明する。

④ 異なる高さから落とし、温度の上がり方が異なることを観察する。

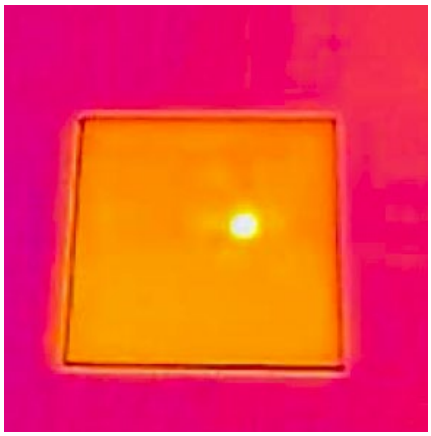


図２.
鉄球が衝突後のプラスチックの板の赤外線画像。
衝突したところが、温度が上がり赤外線で明るくなる。

注意点・備考

アスファルトやセメントの上でも実験は可能であるが、アスファルトやセメントを傷つけるので、プラスチックやゴムの板を準備すること。

赤外線カメラによっては、自動で階調補正をする機能がある。その場合は、視野の端に明るい物体を入れて撮影すると、実験の前後の比較がしやすい。

27 トロイダルコイルで理解するアンペールの法則

アンペールの法則をトロイダルコイルに適用し、法則の理解を促す。

キーワード	アンペールの法則、無限に長いソレノイド*、磁気的相互作用*
目的	内部にのみ磁場が存在するトロイダルコイルの性質を利用して、アンペールの法則を理解させる。
実験時間	30 分（議論を含む）
用意するもの	● 大型トロイダルコイル……コイルの直径 6 cm、全体の外形は 22 cm、１個 巻線の間から内部も観察できること。 ● ネオジウム磁石……直径 5mm、２個 ● 細長い鉄板……幅 5mm、長さ 4cm、１枚 ● 振り子スタンド……高さ 20cm 程度、１台 ● 磁石を釣りさげるための糸……長さ 20cm 程度の糸（非磁性）、１本

図 1.
トロイダルコイルとスタンドから吊り下げた磁石振り子。

実験準備	トロイダルコイルを水平に設置する。

実験手順・教員による説明

① まず、受講生に「均一な磁場から磁石は並進的な力を受けるか？」を尋ねてから、実験を行う。トロイド内部にはトロイド内を一周する方向に均一な磁場が生じるが、磁石を内部に入れて一定の電流を加えると、磁石は磁場方向に並進しない。磁石は常に S 極と N 極のペアのため、磁場から受ける並進力が相殺されることを説明する。

② 次に「均一な磁場から磁石は回転する力を受けるか？」を尋ねる。実験を行うと、磁石は電流 ON の瞬間に激しく「ねじれ振動」を始め、その後、磁場に対して一定の角度で静止する。磁石は双極子のため、並進力ではなくトルク（回転力）から磁場が検知できる一方、電場は荷電粒子の並進的な力で検知でき、また、電気双極子の回転力からも電場が検知できることを説明する。

③ 続いての問いは「トロイドの外部に磁場が存在するか？」である。実験すると、このトロイダルコイルは巻きが粗く、巻き線の直径もばらついているため、コイルの至近距離では振り子の動きから僅かな磁場の漏れが検知される。しかしコイルから離すと磁場ゼロを確認できる。

④ 磁石は S 極-N 極を切り離すことができず、単極子ではありえないことを述べた後、トロイダルコイルを用いて「磁場中の単極子が受ける並進力」に相当する現象を観察する方法を考えさせる。磁石に鉄板を付着すると長い双極子となるので、その N 極をトロイド内部に入れる。トロイド外部にある S 極は磁場ゼロなので力を受けず、N 極は単極子のように磁場方向に引かれる。

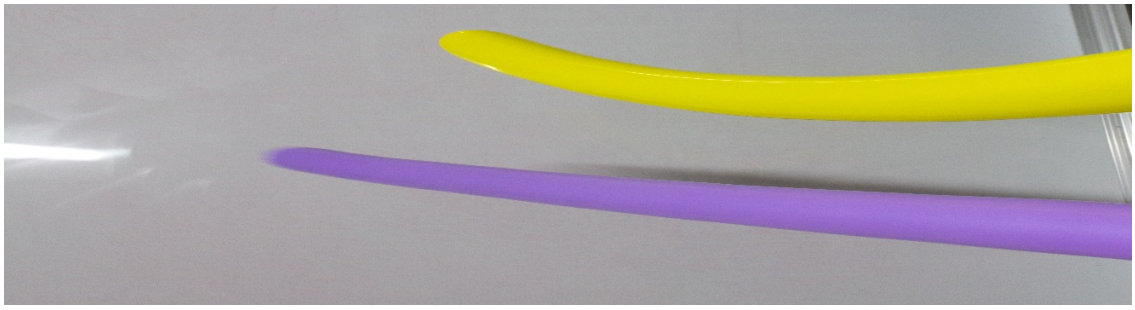
⑤ 最後に「磁場勾配の中で磁石は並進的な力を受けるか？」を尋ねる。トロイダルコイルは外周に比べて内周の巻き数密度が大きいため、トロイド内の磁場は均一ではなく、トロイドの回転軸（穴の中心）に近いほど大きくなり、磁石はトロイドの穴側に引き寄せられる。磁場に勾配がある場合は、S 極と N 極の受ける力が相殺されないことを説明する。

注意点・備考

コイルの巻きの直径（トロイドの回転断面の直径）を小さくし、トロイドの外形（回転半径）を大きくすれば内部の磁場勾配は減少する。また、空芯ではなく透磁率 μ の大きな鉄芯とすれば、磁場の外部への漏れが減少し、無限に長いソレノイドと見なすことができる。

28 風船によるクーロン力の体験と電荷の理解

ペンシルバルーンを用いてクーロン力を体感し、電荷が正負２種類であることを知る。



キーワード	静電気、クーロン力、電荷
目的	その１：クーロン力が実在することを体で感じること。 その２：(これはやや難しいが)電荷が正負２種類であることを推察すること。 電磁気学で最初に学ぶのは多くの場合クーロン力であるが、これを数式ではなく文字通り体で経験してもらうことで、受講者に電磁気学に対する関心と実感を持ってもらうことがこの実習の大きな目的である。また、クーロンの法則では電荷が正負の２種類であること、電荷間の力について、同符号どうしでは斥力、異符号どうしでは引力であることを既知とすることが多いが、これも実験からわかる事実であることを理解してもらう事がもう一つの目的である。
実験時間	45 分程度
用意するもの	以下は受講者グループ１つに対して必要な１セット。各自が体験する時間を十分とれるよう、グループ人数は少なめに。 ● 風船（ペンシルバルーン)、細長い形状で装飾用に使われるもの ● 風船を膨らませるポンプ ● 綿布（未使用雑巾など)、ポリエチレン手袋、マイクロファイバー布巾など
実験準備	風船をこする素材によって風船に帯電する電荷の符号が変わることを事前に確認しておく。
実験手順・教員による説明	以下の手順を受講者に実施させる。 ● 第１部：クーロン力の体験 ① ペンシルバルーンを２本膨らませて、乾いた綿布でこする。 ② 上記２本のペンシルバルーンを両手に１本ずつ持ち、近づけてみる。(このとき、バルーンを顔に近づけないように注意すること。) バルーン同士が反発する力を手に感じることができる。また、反発力によりバルーンが変形するのを見ることもできる。 ● 第２部：電荷の種類 ③ ペンシルバルーンを２本膨らませ、それぞれを別のもの（綿布、ポリエチレ

ン手袋、マイクロファイバー布巾など）でこすってみる。

④ こすられたバルーンを近づけてみて、それらが反発しあうか引き合うかを記録する。

⑤ 上記③④を様々な組み合わせで行い、結果を表にまとめる。例えば反発力は×、引力は〇、のように書く。

⑥ 上記⑤で書いた表の縦横を並べなおすことで、表の結果が大きなブロックにまとめられるかどうか検討する。

こすったもの	綿布	マイクロファイバー布巾	ポリ手袋	チャック付きビニール袋
綿布		×	○	○
マイクロファイバー布巾	×		○	○
ポリ手袋	○	○		×
チャック付きビニール袋	○	○	×	

表 1.
結果の例。この表は、4 つの異なる素材でこすった風船が、2 グループに分かれること、赤枠は同種電荷同士が斥力であること、黄枠は異種電荷同士が引力であることを示唆している。

注意点・備考

同種の実験は通常の風船でも可能だが、ペンシルバルーンは大型なので、クーロン力が大きくまた動きも派手でわかりやすい。

バルーンを膨らませるためには市販のポンプを用いること。

稀にバルーンが破裂することがあるので、顔に近づけないよう注意を呼び掛けること。また、バルーンが劣化していると破裂しやすいので、事前に教員が抜き取り検査して膨らませてチェックしておくこと。もしも破裂するものがあれば、別の製品のバルーンを買うことも検討する。筆者個人は「鈴木ラテックス」社のペンシルバルーンを使うたびに新規購入している。

第 2 部では、風船をこする素材を変えることで風船に帯電する電荷の符号が変化することを使っている。

〇(引力)と×(斥力)の星取表を大きく 2x2 のブロックにまとめることができれば、この結果から電荷が 2 種類であることが示唆される。また、2x2 のパターンが、対角ブロックが斥力、非対角ブロックが引力であることから、同種電荷は斥力、異種電荷は引力であることを見てとることができる。

第 2 部の星取表のパターンを事前に予想してもらうこと。具体的な〇×は不要だが、電荷が 2 種であることを仮定したうえで、「同種は斥力、異種は引力」の場合と「同種は引力、異種は斥力」の場合とで 2x2 の星取表のパターンがどうなるかを書いてもらうとよい。

29 リバーシ盤で強磁性体の人力シミュレーション

向きがバラバラだった磁石がそろっていく様子をリバーシ(オセロ)盤上に再現する。

キーワード	*強磁性体、*磁区、*統計力学
目的	向きがランダムだった磁石たちが相互作用することで向きが揃って磁区が形成されていく様子を、サイコロで選ばれたリバーシ(オセロ)チップについて周囲の状況によって白黒いずれかに決めるという、いわば人力シミュレーションによって体験させることで、受講者に印象付ける。
実験時間	盤面の大きさを 6x6 として 30 分程度
用意するもの	以下は 1 セットに必要なもの。受講者 2 名程度で 1 セット。 ● リバーシ(オセロ)盤… 1 つ 100 円均一ショップにあるような小さいもので可。 ● サイコロ… 1 つまたは 2 つ 可能ならば 14 個。 2 種類のサイコロをそれぞれ 7 個ならばなおよい。 ● 紙皿… 1 枚 サイコロを振る場所として使用する。
実験手順	以下の手順を受講者（ 2 名程度で 1 組）に実施させる。 ① 準備として、初期配置を次のように設定する：6x6=36 枚のチップをとり、白 18 枚、黒 18 枚として、盤中央の 6x6 の部分にランダムに並べる（並べ方はお任せ)。初期配置の白黒のパターンを記録する。 ② 以下(ア)〜(ウ)を繰り返すことでチップの配置を時間発展させる： (ア) サイコロをよく振って紙皿に振り出す。サイコロが 1 個のときは 2 回振って、 1 回目を「行」、 2 回目を「列」とする。サイコロが 2 個のときは、一方を「行」、もう一方を「列」とする（この場合はサイコロの色や大きさを変えるなど区別できるようにする)。 (イ) (ア)で出た目で定まる座標（行、列）の位置にあるチップに着目し、隣り合う 8 枚(着目したチップが壁際にあるときは 5 枚、角にある場合は 3 枚)について、白と黒の数を数える。着目したチップの色を、隣り合うチップのうち多いほうの色（黒か白か）にする（多数決ルール)。このとき、隣り合うチップが黒白同数ならば変えない。 (ウ) チップを裏返した時は、それまでにサイコロを振った回数と、その時の黒白それぞれの枚数の総数を記録する。

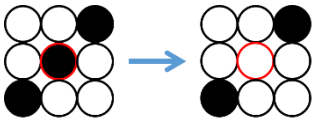
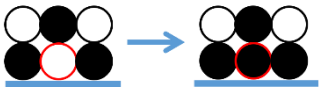


図 1.
上）時間発展の例（その 1）。中央の黒いチップに隣接する 8 個のチップのうち、白が 6、黒が 2 と、白が多いので、中央を白にする。



下）時間発展の例（その 2、壁際の場合）。中央（壁際）の白いチップに隣接する 5 個のチップのうち、白が 2、黒が 3 と、黒が多いので、中央を黒にする。

③ グラフの横軸にサイコロを振った回数、縦軸に白の枚数をとって、時間変化の様子をグラフにまとめる。最終的な盤面の白黒のパターンを記録し、初期配置と比較する。

図 2.
初期配置(左)と最終配置(右)の例。ランダムだったパターンから、白がまとまった領域と黒がまとまった領域の区分けが出現する。この場合、この状態からは変化しない。

教員による説明

① 磁石の性質、常磁性と強磁性について解説する。磁石は原子 1 つ 1 つが磁石の性質を持ち、多数の原子が磁石の向きを揃えることで全体として磁石の性質を示す。釘のように磁石を近づけると磁石に引きつけられるものは、外からの磁場によって原子が向きを揃えるが、永久磁石が外場なしで磁石の性質を示すのは、原子が互いに同じ向きを向くように相互作用しているためである。ここではチップを原子に、白黒を原子の向きに見立てている。

② 始めに「周囲と揃うように」というルールを設定するだけで、あとは自律的に同じ色の領域が広がっていく（磁区が形成される）ことを解説する。

注意点・備考

実行するうちに、サイコロの結果にかかわらず盤面が変化しない状況が現れる。どのような場合にそうなるか、受講者に規則を発見してもらうとよい。

時間発展規則を修正して、白黒同数ならサイコロを 1 個振り、偶数なら白、奇数なら黒、としても可。

８面体のサイコロを用いて、盤面を 8x8 で実行することもできる。ただし、時間発展の終盤になると進行が遅くなることに注意（ドメインの境界でしか変化が起きないため）。

ここでは簡単のために多いほうの色に揃える多数決ルールをとっており、絶対零度に相当するといえる。有限温度でのシミュレーションをするには、サイコロをもう 1 回振って、事前に計算しておいた反転確率 x6 以下であれば反転させればよい。

Column

「粉ふるい」は光もふるい分ける？

レースのカーテンのように細かい網目状のものを通して見る太陽光は、虹色の十文字となることが知られている。カーテンが回折格子の役割を果たして、分光しているのだ。ちなみに我が家のレースカーテンだと、糸の間隔は約0.2mm である。

それでは料理用の「粉ふるい」（図１）ではどのように見えるだろう？ これも我が家の「そば粉の粉ふるい」の場合だが、網目は約 0.6mm。カーテンに比べると網目がだいぶ粗い。

この「そば粉のふるい」から 60cm の距離で太陽光（点光源）を観察してみたところ、きれいに分光して虹色の十文字が見えた（図２）。干渉縞の周期は約1mm である。

網目が粗くても回折格子になることは意外に思えるが、計算によると妥当であることがわかる。十文字の交差点最近傍に見えているのは二次回折波である。

（三浦）

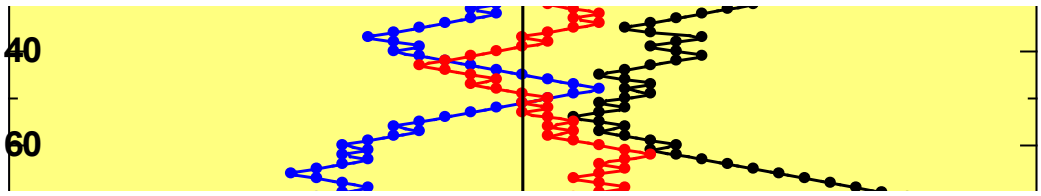
図 1.
粉ふるいの網目。

図 2.
粉ふるいによる太陽光の分光。

第 3 章　熱・波動・流体

30 ブラウン運動のシミュレーション

コインの表裏により、離散化された１次元のランダムウォークを体験する。



キーワード	ブラウン運動*、拡散現象*、熱運動*、確率過程*
目的	ブラウン粒子を駆動する分子の熱運動の存在や、拡散現象との関係を通じて、ブラウン運動の起源を理解させる。
実験時間	100 回試行するとして、15 分程度
用意するもの	● コイン……ひとり１個 確率 50％の結果が出るもの（サイコロ、六角の鉛筆など）なら可。 ● グラフ用紙……ひとり１個
実験手順	以下の手順を、学生に実施させる。 ① グラフ用紙に図１で示したような座標を書き込む。 ② コインを投げ上げる。原点（0,0）からスタートし、コインが表の場合には、右に１単位だけ進む（座標（1,1）に移動する）。コインが裏の場合には、左に１単位だけ進む（座標（-1,1）に移動する）。 ③ 試行ごとに位置を記録しながら、これを 100 回繰り返す。 ④ 試行 50 回目と 100 回目のときの位置を書き出しておく。また、試行の確率が 50％であることを確認するため、表と裏が出た回数も記録しておく。試行の回数が増えるにつれ、50％に近づくことが確認できる。

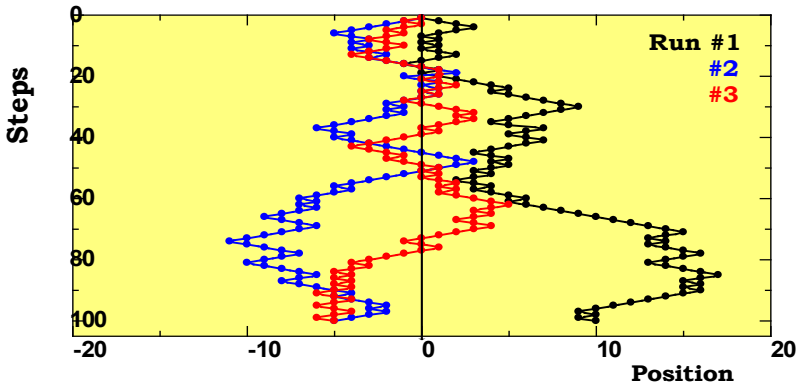


図 1.
原点（0,0）からスタートし、50％の確率で左右に１単位ずつ進んだ酔歩の例。
３人が試行した結果。

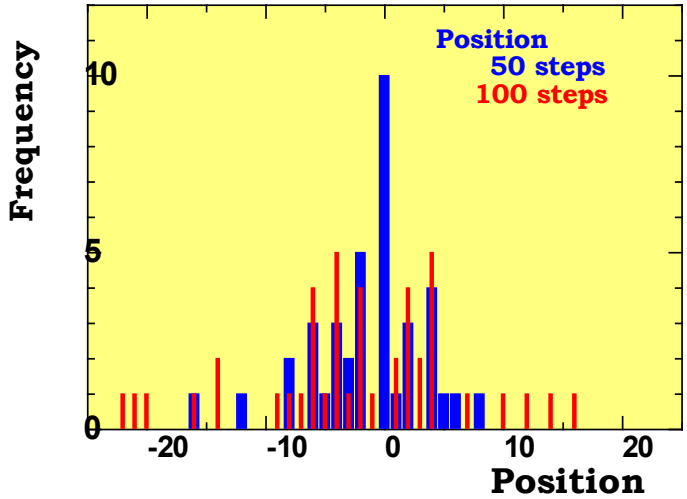


図 2.
青色は 50 回目の位置集計（N=33）、赤色は 100 回目の位置集計（N=56）の結果。
次第に原点のピークが低下し、左右に裾を引いていくことがわかる。実験に参加する人数が多いほど滑らかな曲線になる。

教員による説明

① 実験前に、「50%の確率で左右に移動すると、試行回数が進むにつれて位置が原点の周囲に留まるか、それとも次第に離れるか」と質問する。学生は左右に移動する確率が 50%であることに気をとられ、「原点の周囲に留まる」と判断することが多い。

② 実験後、受講者全員の結果を集計する。各人の結果をもとに、実際には位置が中央部から離れる者もいることを示す（図 1）。また、各人で結果が異なることを述べる。

③ 集計した結果をもとに、統計的な全体像について説明する（図 2）。すなわち、以下のことを説明する。試行 50 回目と 100 回目の位置、および、その位置にいた人数を比較する。最初は全員が原点に集中していたが、試行を重ねるにつれて、中央部にいる人数が減少し、裾野が広がっていく傾向がある。人数が多いほど、滑らかなガウス分布に近づく。

④ 図 2 の理論式を紹介する。時刻ゼロで中央に溶質を置き、t 秒後に中央から r の地点の濃度を拡散方程式から求める。1 次元の場合、時間を t、拡散係数を D とすると、原点からの距離を r における濃度 $C(r)$ は次式で書くことができる。この式から、時間が進むにつれて粒子分布の分散が増大することがわかる。

$$C(r) \sim (Dt)^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4Dt}\right]$$

注意点・備考

この実験の説明中に、ある学生から「実際の拡散は、濃度勾配によって広がるのではないか」、つまり「左右へ移動する確率が異なるのではないか」という指摘が出たことがあった。このような指摘に対しては、「溶質分子が希薄で、それが溶媒分子の熱運動で突き動かされる効果のみ考えたモデルに対応する」と説明することができる。

31 熱機関としての水飲み鳥の理解

玩具の動作から、温度差で駆動する熱機関を理解する。

キーワード	熱機関*
目的	熱機関の動作原理である温度差と機械的仕事の関係を理解する。
実験時間	10 分
用意するもの	● 水飲み鳥と水を入れたコップ（図 1 参照）……1 式 ● サーモグラフィまたは放射温度計……1 台 ● 湿度計および温度計……各 1 台 ● 日よけ……1 枚
実験準備	事前に部屋の温度と湿度を測っておく。
実験手順	① 内部の液体の動きを観察し、水飲み鳥の動作原理を考察させる（図 1）。 ② 熱画像から、頭部と胴体部の温度差を確認する（図 2）。約 4°Cの温度差があることがわかる。 ③ 部屋の湿度との関係から、温度差が生じる原因を考察させる。それをもとに、湿度が 100%のときに濡れた頭部と胴体部に温度差が生じるか否かを考察させる。 ④ 温度差が動作に必要なことを理解した後、水がない場合に水飲み鳥が動作する条件を考察させる。 ⑤ 水がない条件で、日光だけで水飲み鳥を動作させる（図 3）。 ⑥ 実用されている熱機関の例を挙げ、それぞれの機関で温度差を生じさせている方法を理解させる。

図１.
水飲み鳥。
内部の液体の動きを観察し、動作原理を理解させる。頭部が水で濡れていることが動作に必要であることがわかる。

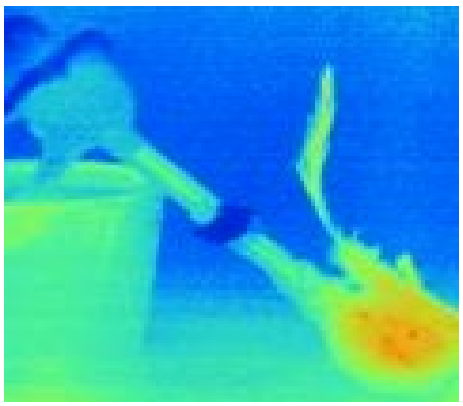


図２.
水飲み鳥の温度分布（熱画像）。

図３.
水飲まない鳥。
水がなく頭部が乾いている状態では動作しない。しかし日光が胴体部にだけ当たるように日除けを設置すると、頭部と胴体部に温度差が生じるため、鳥は動作する。

教員による説明

① 水の温度と飽和蒸気圧の関係を考察させ、常に水面で蒸発と凝縮がつり合っていることを確認させる。
② 機械的仕事と温度差の関係を理解させる。効率が 100％にならないことに注意する。
③ 動作原理がわかれば、水が必要ないことがわかる。その具体策を提案させる。
④ 日常、自然には湿度が 100％にならない理由を考察させ、水循環に対する太陽エネルギーの寄与を考察させる。
⑤ 逆の過程により、機械的仕事により温度差が生じることを理解させる。ヒートポンプが実例である。

注意点・備考

室温に放置した濡れタオルの温度を放射温度計で測定し、温度が室温より低いことを確認する。これが水飲み鳥の動作原理を考察するヒントになる。

日光を鳥に当てる場合、あまり高温になると内部の圧力が高まり危険である。頭部と胴体部の温度差が 4°C程度になるように配慮する。

32 複屈折を利用した偏光の理解

方解石と偏光板を用いて偏光と屈折率の関係を理解する。

キーワード	偏光*、複屈折*
目的	方解石は偏光方向により屈折率が異なるため、像が二重に見える。そこで、直線偏光した光では像が１つしか見えないことを理解させる。
実験時間	10 分
用意するもの	● 方解石……１個（図１） ● 周期表……１枚 二重像が見やすい対象物であれば可。
実験準備	なし
実験手順・教員による説明	① ２枚の偏光板の角度を変えて透過光を観察し、直交した偏光板を光が透過できないことを確認する。 ② １枚の偏光板を通して液晶パネルを観察する。教員による説明：液晶パネルは、偏光を応用していることを指摘する。 ③ 手順①において、偏光板を直交させると光が透過できないことを確認した後、２枚の間に新たな偏光板を挿入する。３枚の偏光板を光が透過できるか否かを予想させる。また透過する場合、その条件を予想させる。教員による説明：３枚目の偏光板を斜めに入れると、傾いた偏光成分の光が生じるため、光が透過する。ただし、一部だけ透過するため暗く見える。 ④ 方解石を通して見ると複屈折により、物が二重に見えることを確認する。 ⑤ 偏光板を通して見ると、二重像がどう見えるか予想させる。結果：偏光板を通して見ると、二重像の一方が消える。 ⑥ 像が１つに見える状況で、偏光板を 90 度回転させると、どのように像が見えるか予想させる。結果：見えていた像が消え、消えていた他方の像が復活して見える。教員による説明：偏光方向によって屈折率が異なるため、二重に見えていたことを指摘する。

⑦ これまでの実験結果をもとに、偏光板を通過した光で像を照明した場合、二重像が見えるか否かを予想させる。結果：直線偏光の光で照明すれば、方解石を透過させても像は１つに見える。このことは、実験結果から論理的に推論できる。

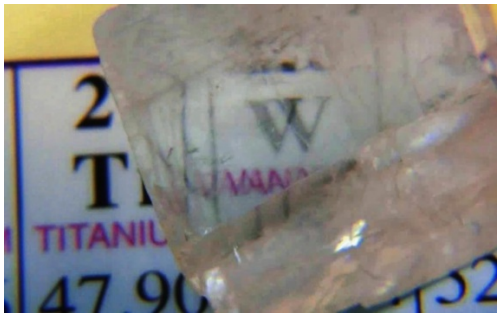


図１.
円偏光の光では周期表のＶが複屈折のため二重になり、Ｗに見える。方解石を回転させると二重の像の位置が変わり、左右から上下に並ぶこともある。

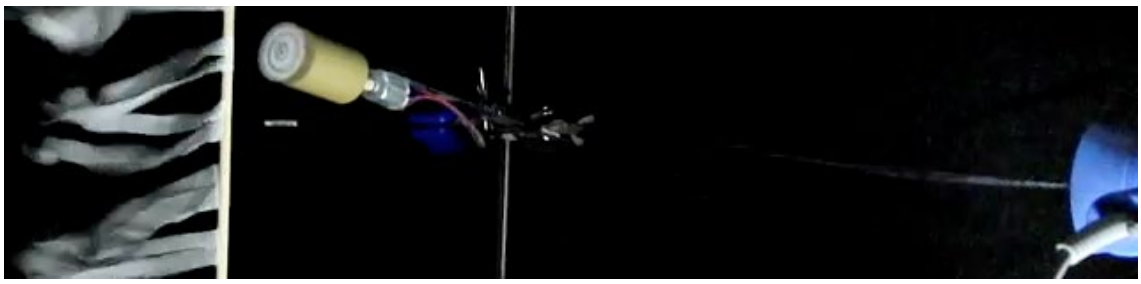
図２.
偏光板を透過した直線偏光の光では、一方の像だけが見える。

注意点・備考　透明度が高く、像が見やすい方解石を選ぶ。

EL パネルでは偏光板の効果が現れないので注意する。

33 マグヌス効果の演示

回転する円柱に働く揚力を理解する。



キーワード	マグヌス効果*、クッタ・ジューコフスキーの定理*
目的	一様流中におかれた回転する円柱に働く揚力を理解させる。
実験時間	5 分程度
用意するもの	● 紙筒……1 本 中心に軸を付けた紙筒。トイレットペーパーやキッチンタオルの芯が利用できる。筒の直径・高さともに、ドライヤーの風の幅よりも十分小さいもの。 ● DC モーター……1 個 紙筒を回転させるモーター。 ● 30cm の金尺……1 本 片端に紙筒を付けた DC モーターを、中央に支点となる軸を通すストローを貼り付ける。軸に取り付ける際には、錘を適当な位置に貼り付けてバランスをとる。 ● 金属棒……1 本 棒が水平になるようにスタンドに固定し、上記の金尺につけたストローに通す支点とする。 ● DC 電源……1 台 回転数の調節を可能にするため、電圧を変えられるものが好ましい。 ● ドライヤー……1 台 風量調節が可能で、できるだけ開口が大きく風の範囲が広いものが好ましい。 ● 吹流し……1 台 ティッシュを帯状に切って端を棒に貼り付けたもの。風の当たっている範囲がわかりやすいようにティッシュを複数つけるとよい。
実験準備	紙筒がドライヤーの風の当たる範囲の中心にくるように並べる。ドライヤーの風が紙筒の可動範囲全体に当たるようにするため、ドライヤーと紙筒の距離は離したほうがよい。ドライヤーはスタンドで固定したほうが安定した実験ができるが、手で持って紙筒を追いかけてもよい。吹き流しは紙筒の上下に風が流れていることが確認できるように配置する。

実験手順・教員による説明

① まず、紙筒を指ではじき、振り子運動をすることを見せる。
② 風を当てずに紙筒を回転させた状態にして指ではじき、①と同様に運動することを見せる。
③ 紙筒を回転させずに風を当てた状態にして指ではじき、①と同様に運動することを見せる（風は厳密には一様流ではなく、上下に広がる拡散流であるが、それに起因する力は紙筒を動かすほどの影響をもたないことが重要）。
④ 風を当てた状態で紙筒を回して紙筒の運動をみせる。
⑤ 風を止めた状態で、回転する紙筒に指を近づけさせ、紙筒の周りに循環する流れができていることを確認させる。
⑥ 回転の方向、回転速度、風速を変えながら実験を行い、揚力の向きが流れに対して垂直であり、大きさは循環と風速の積に比例することを定性的に理解させる。

教員による説明

紙筒の表面付近には、紙筒と同じ方向に回転する流れが生じている。この流れと一様流の重ね合わせは円柱の上下で速度の異なる非対称な流れを作るため、ベルヌーイの定理から循環（回転方向の速度成分を紙筒の周方向に積分したもの）と一様流の速度の積に比例する揚力を導きだすことができる（この揚力は円柱に限らず任意の２次元的な物体について成り立つことが証明されており、クッタ・ジューコフスキーの定理という）。

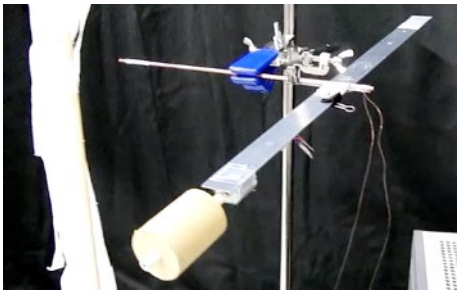


図１.
実験の様子その１。

図２.
実験の様子その２。

注意点・備考

このマグヌス効果は野球の変化球の原理としてよく知られている。これを応用した飛行機（ただし模型）や船（フレットナー船・ローター船）も存在する。このあたりも学生の興味を惹くかもしれない。

Column

遺伝情報から立体的な蛋白質ができる様子

複雑な生命活動と物理法則の関係は、なかなかわかりにくい。しかし、以下に示すように密接な関係がある。そもそも、１次元の DNA の情報から３次元の蛋白質ができるのは不思議である。DNA の情報にしたがって作られた紐状のアミノ酸配列のままでは、機能がない。そこで紐が丸まって立体構造ができるが、その過程は「物理法則」にまかされているそうだ。全体のエネルギーを低下させるように丸まると、最終的な立体構造ができる。細胞のなかで日常的に行われている現象だが、再現する計算は大変とのことだ。最終構造に到達できずに途中で止まってしまい、再現できないこともあるそうで、まさに現在進行形の研究テーマとのことである。（三浦）

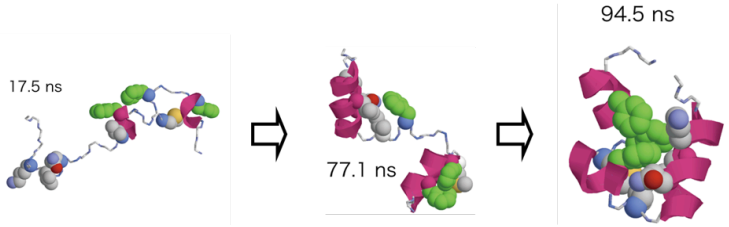


図 1.
蛋白質 MUCAREM2 において天然類似の立体構造が形成される過程で出現した構造のスナップショット（名古屋大学岡本祐幸教授 提供、T. Yoda, Y. Sugita & Y. Okamoto, *Biophys. J.* **99**, 1637, 2010 より）。
左からエネルギーが 約 -29,000, -31,000, -32,500 kCal/mol である。最終的な構造に向けて、次第にエネルギーが低下していく様子がわかる。最終的に図 2 のようになる。

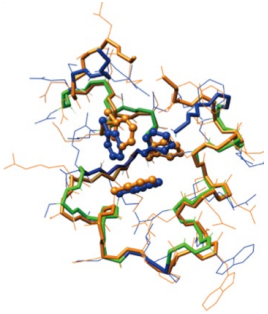
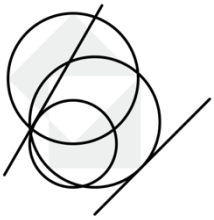


図 2.
計算から求められた蛋白質の構造と自然の構造の比較。緑＋青色：X 線回折で決められた自然の構造。黄色：シミュレーションの結果。自然構造とほぼ一致している。

第３部　講義実験を始めるために



講義実験器具の準備

□ **名古屋大学 教養教育院 物理学実験準備室**
【TEL】052-789-4850（内線 4850, 7238）

本冊子に掲載した講義実験器具の貸出を行っています。
上記以外の器具・装置の貸出しについてもご相談いただけます。

□ **物理学講義実験研究会の web ページ**はこちらです。
http://www.physicsdemo.org/

実験の動画や、実験器具の詳細などをご覧いただけます。
講義実験関連のイベントのお知らせなども掲載しています。

講義実験に関する主要な参考文献

◆和文図書

[1] 服部学順『物理学講義実験』誠文堂新光社（1967 年）

[2] 名古屋大学高等教育研究センター『ティップス先生からの 7 つの提案<教員編>』（2005 年）

[3] 兵頭俊夫監修『見て体験して物理がわかる実験ガイド―演示実験・生徒実験集―』学術図書出版社（2007 年）

[4] 愛知物理サークル他『いきいき物理わくわく実験（改訂版）１・２・３』日本評論社.

[5] 板倉聖宣『仮説実験授業―授業書＜ばねと力＞によるその具現化―』仮説社（1974 年）

◆和文論文

[1] 木下紀正，青野修，房岡秀郎「物理学講義における演示実験」『大学研究』No.12（1993）pp.117-123.

[2] 木下紀正，兵頭俊夫，房岡秀郎，柏村昌平「演示実験モジュールの例」『大学研究』No.17（1996）pp.5-18.

[3] 三浦裕一「科学的概念を構築するための科学教育の試み－講義と融合した学生実験の企画と導入法－講義用演示実験の系統的整理とモジュ-ル化」『名古屋高等研究』第 10 号（2010）pp.39-58.

[4] 安田淳一郎，三浦裕一「科学者の思考・行動様式を念頭においた物理教育における体験型学習の変革」『名古屋高等研究』第 14 号（2014）3 月発行予定.

◆和文 web ページ

[1] 木下紀正，鹿児島大学教育学部（旧），「物理演示実験のページ」，http://www-jc.edu.kagoshima-u.ac.jp/PhysD992/p-demo.htm

◆和英文図書

[1] D.M.Majerich, J.S.Schmuckler and K.Fadigan, *Compendium of Science Demonstration-Related Research from 1928 to 2008*, Xlibris Corporation, United States, 2008.

[2] C.Taylor, *The Art and Science of Lecture Demonstration*, Taylor & Francis, New York, 1988.

[3] R.Ehrlich, *Turning the World Inside Out*, Princeton University Press, New Jersey, 1990.

[4] R.Ehrlich, *Why Toast Lands Jelly-Side Down*, Princeton University Press, New Jersey, 1997.

[5] D.R.Sokoloff and Ronald K. Thornton, *Interactive Lecture Demonstrations, Active Learning in Introductory Physics*, John Wiley & Sons, United States, 2004.
[6] J.C.Sprott, *Physics Demonstrations: A Sourcebook for Teachers of Physics*, The University of Wisconsin Press, Canada, 2006.
[7] E.F.Redish, *Teaching Physics with the Physics Suite*, John Wiley & Sons, United States, 2003.
[8] P.Doherty, D.Rathjen and Exploratorium Teacher Institute, *The Spinning Blackboard & Other Dynamic Experiments on Force and Motion*, John Wiley & Sons, United States, 2010.

◆英文 web ページ

[1] 米国の物理学教育教材協会「Physics Instructional Resource Association」のサイト,
http://physicslearning2.colorado.edu/pira/
特に、PIRA でこれまでに集積された講義実験をまとめた「PIRA Demo Bibliography」,
http://physicslearning.colorado.edu/Bib/
は、利便性が高い。
[2] マサチューセッツ工科大学での物理学講義実験, Walter Lewin, *Physics I: Classical Mechanics*, Massachusetts Institute of Technology, Open Course Ware, Physics,
http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Physics/8-01Physics-IFall1999/CourseHome/index.htm

お知らせ

この冊子をお読みになった感想、改善案、本冊子に含まれていない重要なアイデアなどのコメントをぜひお寄せください。また本冊子をご入用の方もご一報ください。

□ **連絡先**

電子メール：　contact@physicsdemo.org

執筆者【執筆分担】

三浦 裕一	【第 2 部 1〜5, 7〜10, 14, 22, 24, 25, 27, 30〜32】
伊東 正人	【第 2 部 16】
大薮 進喜	【第 2 部 26】
小西 哲郎	【第 2 部 11, 19, 28, 29】
中村 泰之	【第 2 部 12, 13】
千代 勝実	【第 2 部 17, 20】
古澤 彰浩	【第 2 部 15, 33】
齋藤 芳子	【第 1 部, 第 3 部】
安田 淳一郎	【第 1 部, 第 2 部 6, 18, 21, 23, 第 3 部】

物理学講義実験研究会：メンバー氏名（所属）

三浦 裕一	（名古屋大学 教養教育院 非常勤講師）	研究会代表
伊東 正人	（愛知教育大学 理科教育講座 教授）	
大薮 進喜	（徳島大学 教養教育院 准教授）	
小西 哲郎	（中部大学 工学部 教授）	
齋藤 芳子	（名古屋大学 高等教育研究センター 助教）	
千代 勝実	（山形大学 学士課程基盤教育機構 教授）	
中村 泰之	（名古屋大学 大学院情報学研究科 准教授）	
藤田 あき美	（信州大学 学術研究院工学系 講師）	
古澤 彰浩	（藤田医科大学 医学部 准教授）	
森鼻 久美子	（名古屋大学 教養教育院 特任講師）	
安田 淳一郎	（山形大学 学士課程基盤教育機構 准教授）	研究会幹事

物理学講義実験ハンドブック 第 5 版
2020 年 3 月 初刷発行

編集
物理学講義実験研究会

発行
名古屋大学 高等教育研究センター
〒464-8601 名古屋市千種区不老町
E-mail: info@cshe.nagoya-u.ac.jp

印刷・製本
名古屋大学消費生活協同組合 印刷・情報サービス部
〒464-8601 名古屋市千種区不老町
E-mail: insatsu@coop.nagoya-u.ac.jp

物理学講義実験研究会

Verior Interpretatio Naturae

sed omnis verior interpretatio naturae conficitur per instantias, et experimenta idonea et apposita
Francis Bacon, *Novum Organum Aphorisms 50*