

はじめに

この冊子は、大学1年次に開講されている物理学講義において、教育効果を高めるために、担当教員が工夫している教材や実験を紹介したものである。内容には、

- (1) 教壇で教員が演じて見せる「演示実験」
- (2) 授業中に学生が机上で行う簡単な「机上実験」

が含まれる。また、工夫のヒントになるような話題や失敗談などもコラムとして加えた。

果たしてこのような試みで、本当に教育効果を高めることができるのであろうか？と思われる方もいるかもしれない。授業時間の一部を割くのであるから、それ以上の効果が無ければ、むしろマイナスになる。そこで、短時間で明解な結果を得るために、十分な準備と手際の良さが必要になる。また、授業内容の理解に貢献しなければ、単なる「科学ショー」で終わってしまう。法則を理解し、具体的な問題に適用して計算できるレベルに到達しなければ、「大学の物理」とは言えないだろう。

さらに、対象とする学生集団の予備知識や興味動向も考慮して、効果的な教材の利用を考える必要がある。とりわけ、物理に関心の無い学生たちに「疑問を誘起し、原因を考察させ、仮説を立てさせ、実験で検証させる」のは容易ではない。これまでの黒板を使った授業では、この点において限界があった。しかし学生たちは、いったん疑問を持てば、思考のスイッチが入るようである。十分な思考力をもっていることもあり、スイッチさえ入れればあとの計算は容易にできるようだ。

一方、センスが良く物理的な見方ができる学生集団は、実際に体験させなくとも頭の中で一般化できるので、数式を用いて具体的な問題を解いた方が知識の定着に効果的である。その場合でも、わずかな時間を使って計算結果に対応した「演示実験」を教員が行って見せることは、物理法則や理論の検証という意義があると思われる。

ここで紹介した「実験教材」は完成したものではなく、今後とも学生たちの反応を見ながら、導入法も含めて改良していく予定である。新たな試みの提案や、改良についての御意見を歓迎する。また、この冊子の内容に動画を加えてウェブサイト¹で公開しているので、御参照いただきたい。

本冊子の制作にあたり、器具製作へのご助言をいただいた清水利文氏（全学教育物理学実験室）をはじめ、多くの方々のご協力を賜った。また、本年度の物理学講義実験研究会の活動は、平成22年度名古屋大学教育奨励費（課題名「演示実験・講義実験にかかわる講義向け物理実験教材の開発研究」）の助成を受けて実施された。この場をお借りして、ご関係の皆さまに御礼申し上げます。

物理学講義実験研究会 代表 三浦裕一

¹ URL: <http://www.cshe.nagoya-u.ac.jp/physdemo/>

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あがりやすくな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とり入れるには、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つにまとめました。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、23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。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、名大での授業のニーズに合うよう、平成20年度に名大物理小部会でまとめられた「物理学講義キーワード」から主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、学内での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中で、特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 13		
1. オハジキを用いた弾性衝突	【運動量保存、剛体の運動】	14
2. 弾まないボールの位置エネルギーの行方	【エネルギー保存、摩擦*】	16
3. 斜面を用いた慣性モーメントの理解 ^s	【剛体の運動、慣性モーメント】	18
4. 斜面を用いた回転エネルギーの理解	【剛体の運動】	21
5. オハジキを用いた連星モデル	【2体問題、重心】	22
6. バネの振動を用いた免振機構の理解	【単振動、共振現象*】	24
7. 実体振り子を用いた慣性モーメントの理解	【単振動、慣性モーメント】	26
8. メトロノームによる同期現象	【同期*、引き込み*】	28
9. 物理シミュレータStepによる2重振り子の運動	【2重振り子*、カオス*】	31
第2章 電磁気学 33		
10. ガウス加速器 ^s	【ポテンシャル、運動量保存】	34
11. 静電場の可視化	【電荷、電気力線】	37
12. 電流が磁場から受ける力：アルミホイールを用いた可視化	【磁場中の電流にはたらく力】	39
13. 単極モーター	【磁場中の電流にはたらく力】	41
14. 単極ローラー	【磁場中の電流にはたらく力】	43
15. 渦電流ブレーキ ^s	【電磁誘導、渦電流*】	45
16. 銅板パターンを用いた渦電流の理解	【電磁誘導、渦電流*】	48
17. 発電機とモーターの互換性	【モーター*】	50
18. 極座標の立体模型	【座標（極座標）】	51
19. ガウスの法則の立体模型	【電場、ガウスの法則】	52
20. ビオ・サバールの法則の立体模型	【ビオ・サバールの法則】	53
21. 光速の測定	【光速*】	54

第3章 熱力学	57
22. ブラウン運動のシミュレーション	【ブラウン運動*、拡散現象*】 58
23. 水飲み鳥	【熱機関*】 60

第3部 講義実験を始めるために

講義実験器具の準備	67
講義実験に関する参考文献	68

注1) 題目について「^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。

注2) キーワードについて「*」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感的理解のようすを把握する (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ています。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。

1. 意図を設計に反映させる

注) 括弧内は、「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)

2. 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、一通りにしか解釈できない
- ごまかしなく、直截的に現象が提示される
- 実験が高い確率で成功する

3. 実施が容易な設計にする

- 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、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ただけでは、何も習得することができない」ということは、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きました¹。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。

1. 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

¹ 例えば、"Namely, students will fail to learn from an event when exposed to it only once." (Majerch, 2008, p.13) など。

2. 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

3. 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すると、結果の解釈を一方向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に見てもらい、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がありますか？この実験は、「羽根を本の上に載せて手を離すと、羽根と本が同時に落下する」という、シンプルな実験です。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一つの型になっています。

一見した所、これはもっともらしい説明のように聞こえますが、実は見落としている点があります。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ます。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たのです。この事実は、本を手で重力加速度より大きな加速度で引き下げると、羽根がさらに加速して本とともに落ちることから確かめることができます。もし羽根が自由落下するならば、急速に落下する本について行けず、遅れるはずですが。

この講義実験は、著名な講義実験の本にも紹介されている有名な実験ですが、実は誤った説明を与えていることがわかっています。しかし、それに気づかずに授業で使ってしまう教員もいるようです（私もそのうちの一人でした）。新しい講義実験を授業に導入する際には、授業の前に一度同僚にその講義実験を見せてコメントをもらうことが大切であると痛感しました。（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る。

【キーワード】

運動量保存、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。

【用意するもの】

材料	個数	備考
プラスチック・レール	1本	1 m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	

【実験時間】

5分

【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、運動量はほぼ全て受け渡される。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持てるかどうか不安になった。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、学生自ら確認実験をさせた。

ところが、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」、とその場をしのぎ先に進んだ。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、お察しの通り「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、質点に近づくだらう」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依然持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 で飛び出した。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。心配した摩擦であるが、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。この実験では、確実に直線的に衝突させるため、レールを用意する点に工夫がある。プラスチック・レールとオハジキは教養教育院の物理学実験準備室に用意してあるので、御利用いただきたい。(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。

【用意するもの】

材料	個数	備考
弾むボール・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	球の直径は 10 mm が適当。
ピンポン球	1個	球の直径は 10 mm が適当。

【実験時間】 3分

【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)：弾むボールは元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には入らない。
- (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。ピンポン球は元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、お手玉の中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、エア・バッグと火星着陸

停止と激突は「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は、身近な例である。先日、マンション8階から地面に20m転落した幼児にかかる衝撃力を教えてくれ、とテレビ局から質問され困った。停止は加速度運動だから、停止距離が必要だ。いくらに設定したら現実的か。また、人体の構造も必要になる。

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分かる。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、最悪の数値を「見出し」につけて報道されてしまった。

最悪とは？停止距離を10cmと設定してみた。背中からコンクリートに当たると、その程度かな、と思ったが自信がない。衝撃力は3トンを越える。手をつくだけでも何倍も衝撃は小さくなる。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使った。経費節減のためだそうだが、驚きである。6輪の探査車の着陸のときで、15m以上もはずんだそう。40Gまで耐える設計だが、じっさいには、2G程度ですんだそう。こういう発想は、なかなか浮かばない。(三浦)

3. 斜面を用いた慣性モーメントの理解



慣性モーメントの異なる2つの物体を坂道で転がして、速度の違いを観察する。

【キーワード】 剛体の運動（回転運動）、慣性モーメント

【目的】

質量、回転半径、形状の異なる物体を斜面で転がし、その速度を比較して、慣性モーメントの概念を理解させる。

【用意するもの】

材料	個数	備考
斜面として使う板	1枚	縦150cm、横50cmあれば十分。移動式の机が講義室にあれば、それを代用できる。A4サイズの大きさは必要。
ガラス球	2個	ビー玉で可。直径が異なるもの2種。
金属球	1個	ガラス球の1つと直径をそろえたもの。市販の鉄球やベアリング玉などで可。
球殻状の物体	1個	ピンポン球で可。
円柱状の物体	4個	密度が一樣な円柱が望ましい。直径が同じで密度が異なるもの2種。密度が同じで、直径が異なるもの2種。乾電池でも可。
パイプ状の物体	1個	物理実験準備室で借り入れ可（図1参照）。
糸巻き状の物体	1個	パイプ状の物体と、質量・直径をそろえたもの。物理実験準備室で借り入れ可（図1参照）。
定規	1本	15cmあれば十分。物体を同時にスタートさせるために使用。

【実験時間】

30分

【実験準備】

物体を同時にスタートさせられるよう、事前に練習をしておく（【注意点・備考】も参照）。



図1. 同じ直径、同じ重さの「糸巻き」と「パイプ」

【実験手順】

(概要)：用意した物体を2つずつ斜面で転がす。その際、どちらの物体が速く転がるかを学生に予想させる(予想の理由も聞く)。考察を通じて、物体の転がる速度が、物体のどのような性質に依存し、また依存しないのかを、定性的に理解させる。次に、運動方程式を解くことで、物体の転がる速度が慣性モーメントにどのように依存するのかを、定量的に理解させる。また、慣性モーメントが物体のどのような性質に依存するのかを、定量的に理解させる。最後に、それまでの実験結果と理論的な知識を用いて論理的に実験結果を予想させ、学生の理解を確認する。

- (1) 同じ直径のガラス球と金属球を転がして、その速度を比較する。(結果)：同じ速度で転がる。これより、密度が一樣な球の転がる速度は質量に依らないことを考察させる。
- (2) 同じ直径の円柱を転がして、その速度を比較する。(結果)：同じ速度で転がる。これより、密度が一樣な円柱の転がる速度は質量に依らないことを考察させる。(1)の結果と合わせて、物体の形状によらず、密度が一樣な物体の転がる速度は質量に依らないことを考察させる。
- (3) 異なる直径の2つのガラス球を転がして、その速度を比較する。(結果)：同じ速度で転がる。これより、球の転がる速度は直径に依らないことを考察させる。
- (4) 異なる直径の2つの円柱を転がして、その速度を比較する。(結果)：同じ速度で転がる。これより、円柱の転がる速度は直径に依らないことを考察させる。(3)と合わせて、物体の形状によらず、密度が一樣な物体の転がる速度は直径に依らないことを考察させる。
- (5) 球状、球殻状、円柱状、パイプ状の物体をそれぞれ2つずつ転がして、それぞれの速度を比較する。(結果)：それぞれの物体の転がる速度の関係は、 $v_{球} > v_{円柱} > v_{球殻} > v_{パイプ}$ となる。この結果を元に、速く転がる物体が持つ性質を考察させる。
- (6) 【教員による説明】(後述)を行う。また、理論と実験が整合していることを確認する。
- (7) 同じ直径・重さのパイプと糸巻きを転がして、その速度を比較する。(結果)：糸巻きの方が速く転がる。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、正しい予想ができるはずである。

【教員による説明】

剛体が斜面を転がる時の加速度を計算する(図2)。

$$\ddot{x} = \frac{g \sin \alpha}{1 + (I/Ma^2)} \quad (1)$$

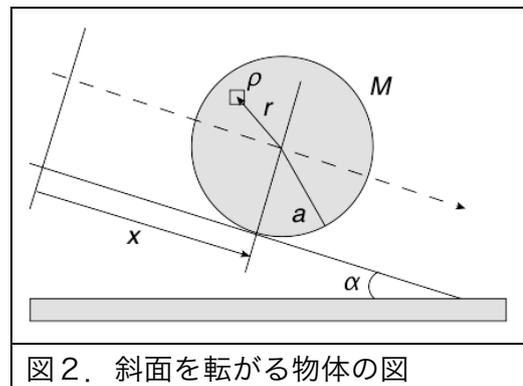


図2. 斜面を転がる物体の図

表1. 物体の形状ごとの慣性モーメント

形状	慣性モーメント
球	$(2/5)Ma^2$
球殻	$(2/3)Ma^2$
円柱	$(1/2)Ma^2$
パイプ	Ma^2

$$I = \int \rho r^2 dV \quad (2)$$

式(2)から、それぞれの物体について慣性モーメントを具体的に計算すると、 I が Ma^2 に依存することがわかる(表1)。よって、式(1)から、表で挙げた形状の物体については、斜면을転がるときの加速度は、その物体の質量と半径には依存しない。 I の Ma^2 の係数は物体によって異なり、その係数の大きさの序列が、物体の転がる速度の序列に関係している。係数の大きさは、物体の質量分布で決まる。定性的には、回転軸の外側に質量が分布しているほど、慣性モーメントは大きくなる。

【注意点・備考】

- ・ 乾電池は密度が一様な円柱ではないが、A4 サイズ程度の斜面では、物体の転がる速度の差は充分無視できる。しかし、ある程度長い斜面では、乾電池の密度が一様でない効果が見えてくる。授業において、学生から「物体が転がる速度の差が見えにくいので斜面を長くしたい」という、もっともな提案があったことがある。そのため、できる限り長い斜面と一様な金属円柱(真鍮など)を用いることが望ましい。
- ・ 物体を同時にスタートさせるには練習が必要である。この実験では、15cmの定規で2つの物体を斜面上に止めてから、スタートさせる方法を採用した。この方法では、定規を上方向や横方向に移動させてスタートさせると、物体をわずかに弾いてしまうことがある。そのため、定規を物体の進行方向、つまり斜面下方向に向けて素早く移動させてスタートさせるようにする。実は、この方法は学生から出された提案である。この実験では「学生が自ら工夫して提案する姿勢」を養う効果もあると感じた。
- ・ 表1の慣性モーメントの計算は、学生のレポート問題として課すこともできる。

【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年。
 [2] 鈴木順三、大島隆義、大澤幸治「理工学の基礎—力学—」培風館、2005年。

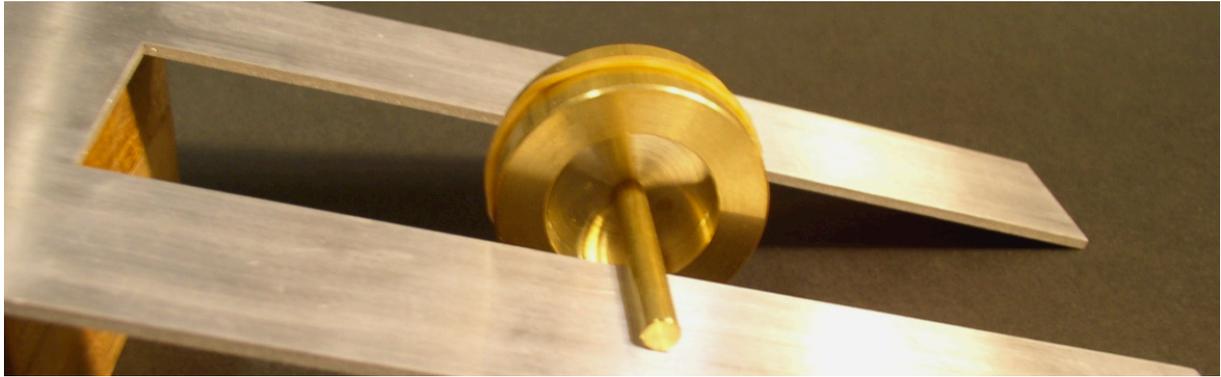
【関連トピック】

「回転ドアと慣性モーメント」

重い回転ドアを回転させるには苦勞するが、ドアがいったん回りだすと、なかなか止まらない。この性質が死亡事故につながることもある。この「回しにくさ・止めにくさ」を決めているのは「慣性モーメント」である。ドアが同じ重さだとしても、回転する直径が大きいほど、慣性モーメントは大きくなる。

実際に死亡事故が起きた回転ドアでは、以前から大人の骨折事故が何件も起きていたにもかかわらず、悲劇を防げなかった。きちんと対策すれば十分に防げた事故だったのに、国は安全規格を定めていなかった。再現実験から、子どもの頭が挟まれた瞬間、870 kgWの力を受けるという結果が得られた。実際に頭蓋骨が耐えられる力は、大人が200 kgW、子供が100 kgWとのことである。その後、事故を教訓としてJIS規格が作られた。

4. 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降りる軸つき円盤は、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持つことを、直感的に理解させる。

【用意するもの】

材料	個数	備考
コの字状の板	1組	斜面として使う。物理実験準備室で借り入れ可能。
軸の付いた円盤	1個	物理実験準備室で借り入れ可能。
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、円盤の中央に張り、円盤が真っ直ぐ進むようにする。

【実験時間】

5分

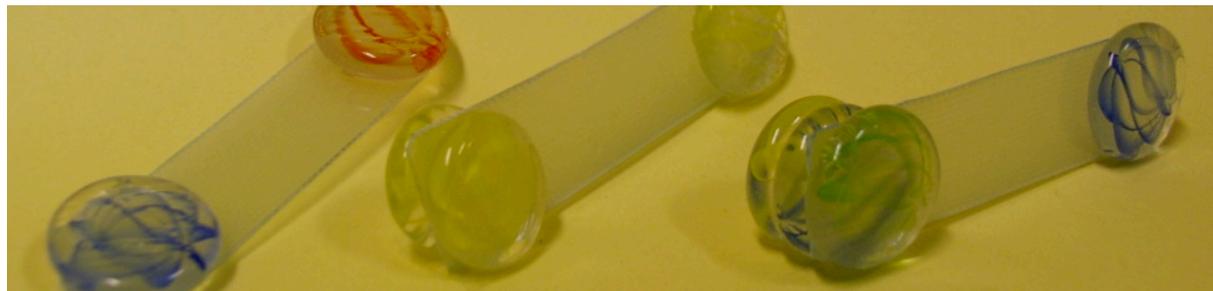
【実験手順】

軸のついた円盤を斜面で転がす。(結果)：斜面では、円盤は軸で回転しながらゆっくりと降りるが、床に円盤が接地した瞬間に急激に速度を上げる。

【教員による説明】

円盤を斜面で転がすと、物体のもつ位置エネルギーが回転エネルギーに変換される。床に円盤が接地した瞬間に、回転エネルギーは並進の運動エネルギーに変換される。そのため、円盤は速さを急激に上げる。

5. オハジキを用いた連星モデル



連結されたオハジキをはじいて、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、および換算質量について理解させる。

【用意するもの】

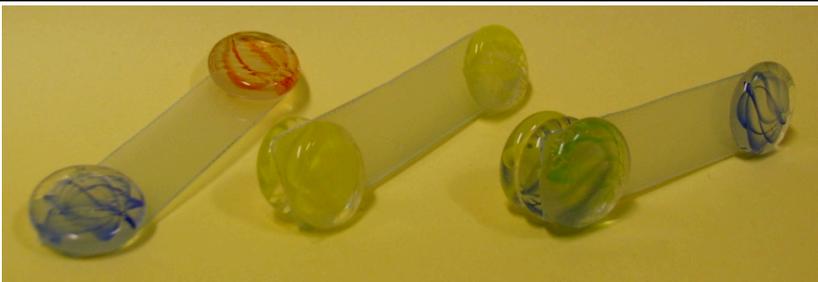
材料	個数	備考	
オハジキ	9個		
薄板	3枚		
接着剤	1個		

図1. 左から、質量比が1対1、2対1、3対1の「連星モデル」

【実験時間】

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。

【実験準備】

- ・ 弾き方には少々コツが要るので、事前に練習をしておく。
- ・ 市販品の材料を用いて「連星モデル」を自作する。図1のようにオハジキを薄板に接着する。

【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。(結果)：回転中心は重い方に近いことがわかる。
- (2) (1)の結果を元に、「二つの質点の重心を回転中心として良さそうだ」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釣り合っており、先ほどの推論が正しいことが分かる。

【注意点・備考】

この実験の後に、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、実際に研究している人しか知らない現象がある。地面の「干満」、すなわち「地球潮汐」現象である。海の干満は、皆知っているのにどうした訳だろう。筆者自身も「地球潮汐」を測定している人から聞くまでは、全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、認識されていないか、その原因を考えることは意味がある。「見れども、見えず」で力学法則も長い間、認識されなかった歴史があるからだ。第一に、変位の基準が無いこと。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。次に、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。

地面の上下はどれくらいだろう？東京天文台の研究者に伺ったところ、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であり、それから地球全体の変形を計算して求める。

GPSを使えば簡単に測定できるのでは？と考えるかもしれない。これは研究されているそうだが、簡単ではないそうだ。まず、GPS衛星の軌道も、月と太陽の重力の影響を受ける。更に、地球が変形すると重力分布も変わり軌道が変わる。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。全くあきれほどたいへんな作業だ。

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。太陽から遠いにも関わらず、地球より高温とのことだ。(三浦)

6. バネの振動を用いた免振機構の理解



バネにボールを取り付けて、共振させる。

【キーワード】

単振動、共振現象*

【目的】

単振動の固有振動数や共振現象を理解させる。

【用意するもの】

材料	個数	備考
バネ	1つ	弱い（バネ定数の小さい）もの。
ボール	1個	固有周期が1秒程度になるように合わせる。

【実験時間】

5分

【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、揺れの大きさが分からないのではないかと。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持たせてから、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（図1）、理解を深める。

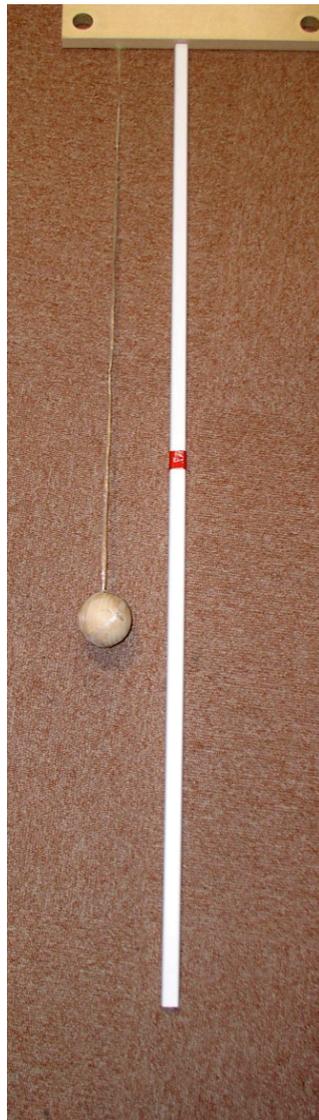
【注意点・備考】

バネの振動で記述される共振現象は様々な分野で現れるので、「法則」の普遍性を理解させるのにも良い例である。



図1. ガイドウェイ・バス大曾根駅の免震構造の例。上の台と柱の間に見える黒い板が免振バネ。

7. 実体振り子を用いた慣性モーメントの理解



単振り子と実体振り子の周期を比較する。

【キーワード】

単振動、慣性モーメント

【目的】

一様な棒を例に挙げ、実体振り子の周期を理解させる。

【用意するもの】

材料	個数	備考
ボール	1 個	
ヒモ	1 本	ボールとヒモで単振り子を作る。
棒	1 本	密度が一様なもの。実体振り子を作るために使用。

【準備時間および実験時間】

10 分

【実験準備】

単振り子のヒモの長さを、棒の端から重心までの長さ（棒の半分の長さ）と同じになるように調整しておく。

【実験手順】 【教員による説明】

- (1) 単振り子と実体振り子を同時に振り、周期を比較する。(結果)：実体振り子の周期が長いことがわかる。ここで、学生に実体振り子の有効な長さが、棒の端から重心までの距離よりも長い理由を考えさせる。
- (2) 実体振り子の慣性モーメントを求め、実体振り子の周期を計算させる。そして、棒の端から重心までの距離の $4/3$ 倍の単振り子の周期と等しいことを理解させる。
- (3) 単振り子のヒモの長さを、実体振り子の有効な長さ（棒の端から重心までの距離の $4/3$ 倍）と同じになるように調整する。実体振り子と単振り子を同時に振り、周期が等しいことを確認する。この結果から、質量が回転半径の二乗で慣性モーメントに寄与することを理解させる。

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」には各種あるが、1mも急激に落ちるフォーク・ボールが有名である。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、はさむ指の血行障害を起こして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。第一、直球の軌道から急激に落ちるではないか。

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分かる。時速140kmのボールでも、捕手まで飛行すると重力で1mも落ちるのである。落下距離は時間の二乗である。しかも、打者に接近しながら落ちるので、打者からは落差が拡大されて見える。この二つの効果で「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、打たれなければ良いのであるが。

そうすると、直球の軌道の方が「異常」ということになる。スナップで回転をかけ、約95cm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、打者を惑わしているそうだ。(三浦)

8. 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、ホテ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（引き込み現象）」を観察する。

【用意するもの】

材料	個数	備考
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、小型の方が良い。
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つ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。

【実験時間】

10分



図 1-1. 動かし始めたころのメトロノームの動き

図 1-2. 少し時間がたった後のメトロノームの動き

【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良い環境であることを事前に確認しておく。
- ・ 全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する方向に合わせる。
- (3) 全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 1-1)、やがて同期して振動する(図 1-2)。
- (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いい。

【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、ホテルの集団発光などの例を挙げて、同期現象にはどのようなものがあるかを説明する。
- (2) メトロノーム同士が、板を通じて互いにそろうように力を及ぼし合うことを説明する。以下、メトロノームの針の上側が右側へ振れることを「メトロノームが右へ振れる」と呼ぶことにする。
 - (ア) まず、水平方向には外力が働いていないことに注意する。従って、系全体(メトロノーム+板)の水平方向の運動量は保存し、系全体の重心の位置は机に対して動かない。
 - (イ) 次に、メトロノームの振れと重心について確認する。メトロノームを「本体」と「可

動部分」に分けて考える。可動部分が静止しているとき、その重心は支点よりも下側にある。従って、メトロノームが右へ振れているとき、メトロノーム全体の重心は本体に対して左へ動いている。メトロノームと板は互いに滑らないので、メトロノームが右へ振れているとき、メトロノーム全体の重心は板に対して左へ動いていることになる。

- (ウ) (ア)、(イ)より、あるメトロノームが右へ振れると、板はこのメトロノームから右向きの力を受ける。
- (エ) 一方、板が右向きの加速度をもって動くとき、板に固定された座標系では、左向きに慣性力がはたらく。これにより、メトロノームの重心は左向きの力を受ける。すなわち、メトロノームを右に振らせる力がはたらく。
- (オ) 以上をまとめると、あるメトロノームが右に振れるとき、それは他のメトロノームを右に振らせるように力を及ぼすことになる。左に振れる時も同様。

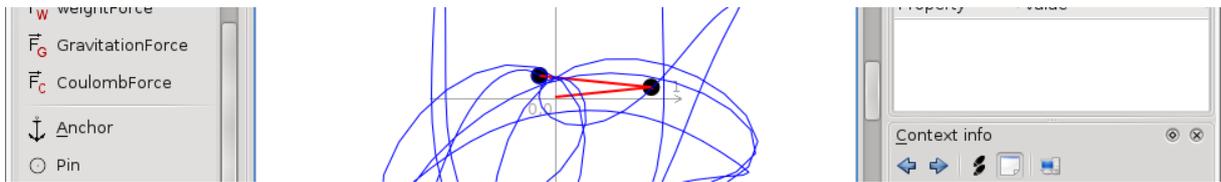
【注意点・備考】

- ・ 振り子時計の発明者でもあるホイヘンスが、隣り合う振り子時計の同期を 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, 2002, vol.70, 992. 同著者による解説が次のサイトにある：
<http://salt.uaa.alaska.edu/dept/metro.html>
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。
- [2] 蔵本由紀、河村 洋史「同期現象の数理一位相記述によるアプローチ」培風館（2010）

9. 物理シミュレータ Step による 2 重振り子の運動



物理シミュレータ Step を用いて 2 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】 2 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、2 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。

【用意するもの】

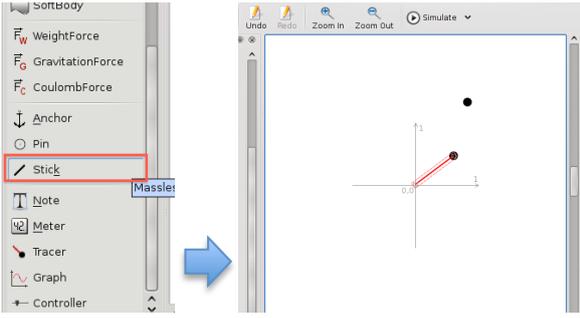
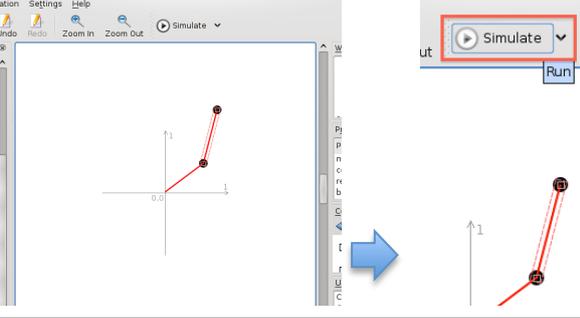
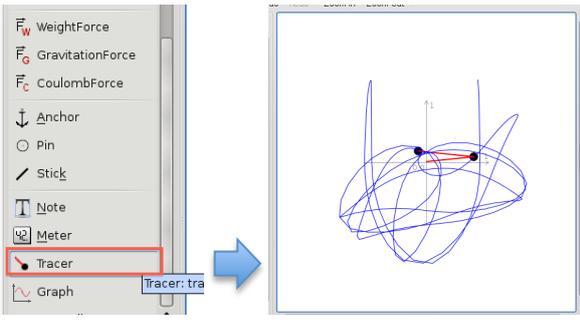
材料	個数	備考
KNOPPIX/Math/2010 DVD	1 枚	最も手軽に Step の環境を構築できる。参考文献[1]から DVD イメージをダウンロードすることも可能。
PC	1 台	KNOPPIX/Math/2010 が起動できることが条件。

【実験時間】 20 分

【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。途中でとまどってしまうと、学生の注意が散漫になりやすい。

【実験手順】

<p>(1) Step の左側に並んでいるパーツのうち、WeightForce 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。</p>	
<p>(2) Step の左側のパーツのうち 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。</p>	

<p>(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。</p> <p>(4) 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。</p>	
<p>(5) 同様の作業により、もう1つの棒を作成し、2重振り子を完成させる。</p> <p>(6) 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。</p>	
<p>(7) 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。</p> <p>(8) 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。</p>	

【注意点・備考】

- ここでは仮定として、2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、鉛直下方に重力がはたいているとした。
- 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」という様々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] KNOPPIX/Math Project,
<http://www.knoppix-math.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>

第2章 電磁気学

10. ガウス加速器



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、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破れているように見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という意味と、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。

【用意するもの】

材料	個数	備考
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	
非対称な斜面を持つレール	1本	ここでは、自作したものを使用。

【実験時間】 20分

【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。次に、右からもう一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。次に、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) 「どのように鉄球・磁石球の数や配置を変えれば、発射される鉄球の速度を上げること

- (4) ができるか」ということについて、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。
- (5) 非対称な斜面を持つレールの上に、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の配置

【教員による説明】

- (1) 実験手順(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、真ん中に残された3つの球は少し動いてしまう。
- (2) 実験手順(1)では、エネルギー・運動量が保存されているように見えるが、実験手順(2)では、それらが一見保存しないように見える。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。
- (3) 実験手順(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、実験手順(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。
- 実験手順(2)では、実験手順(1)と比べて十分遅い速度で鉄球を入射した方が、印象が高まる。
- 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。
- 安全性に特に問題はないが、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止める。

【参考文献】

- [1] David Kagan, "Energy and Momentum in the Gauss Accelerator," The PHYSICS TEACHER, January 2004, Volume 42, Issue 1, pp. 24-26.
- [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の測定」

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のが分かる。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。

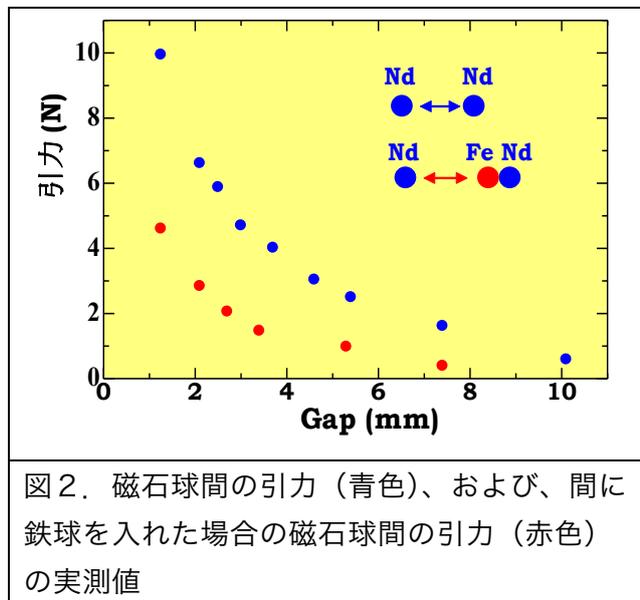


図2. 磁石球間の引力（青色）、および、間に鉄球を入れた場合の磁石球間の引力（赤色）の実測値

Column

エネルギーの概念の理解と講義実験

学生や一般社会人が物理を初めて習うとき、もっとも困惑させられるのが「エネルギー」の概念でしょう。これは日常用語のエネルギーと物理用語のエネルギーが異なって感じるということだけでなく、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、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もてないことにもよると思われます。たとえばガウス加速器の演示実験はポテンシャルエネルギーから運動エネルギーへの転換の模式化ですが、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います。

ポテンシャルエネルギーのように、日常的には見たり感じたりしがたいものでも、講義実験で印象的にデモンストレーションしてやることにより、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、学生の中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言えるでしょう。（千代）

11. 静電場の可視化



液体中の粉末を観察することで、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、同符号同士、および異符号同士の2つの点電荷の周りの電気力線の形状を理解する。

【用意するもの】

材料	個数	備考
ネジ	2個	今回は、直径6mm程度の皿頭のネジを使用した。画びょうでも可。
針状の微粉末	適量	今回は、ジオラマの土用素材を使用した。
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。
クリップ	1個	油や粉末を一様にならすために使用。

【実験時間】 5分

【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すのに適当であることを確かめる。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、サラダ油の中に置く。
- (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。

【教員による説明】

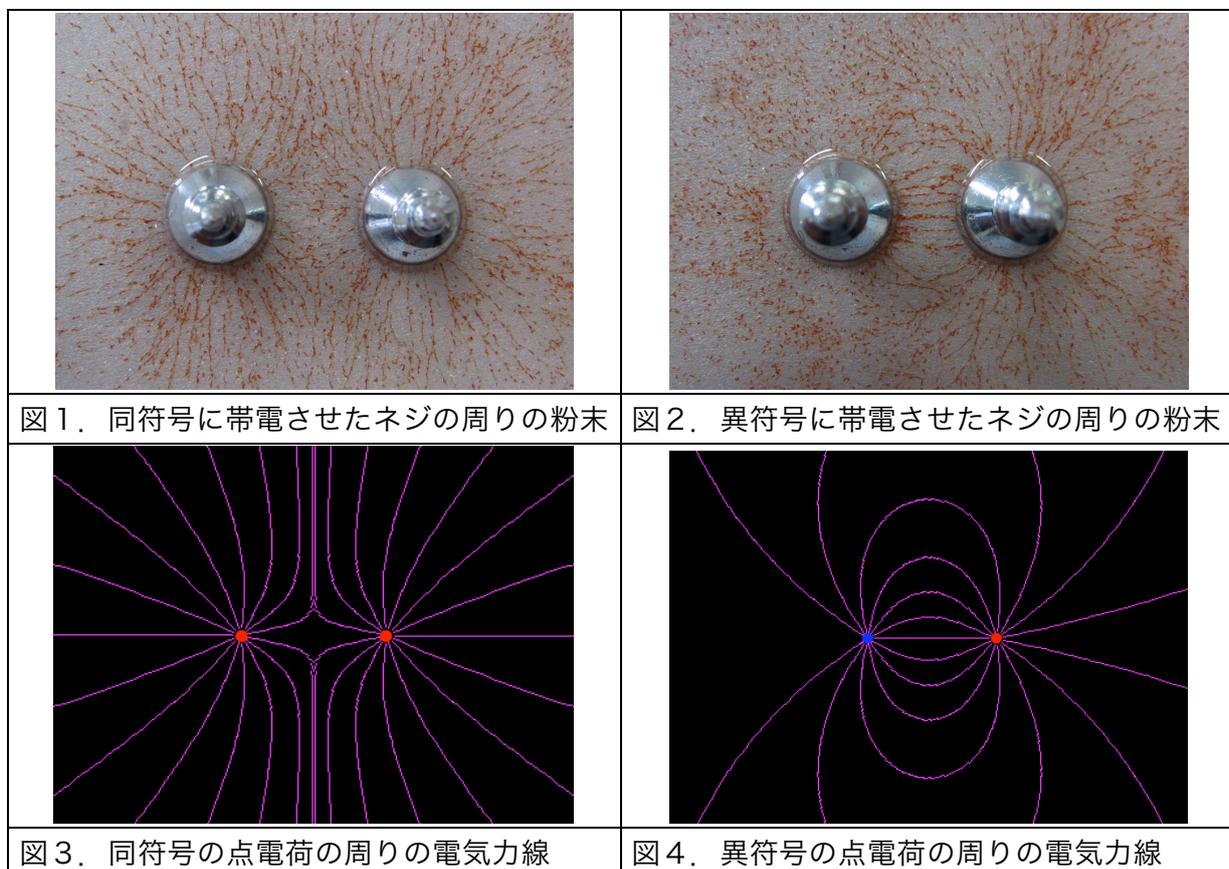
- ・ 物理シミュレータ（例えば、[2]など）を用いて、同符号同士、および異符号同士の2つの点電荷が作る電気力線を描画して、実験結果と比較する（図3、図4）。
- ・ 電気力線の方向に微粉末が並ぶ理由は次の通り：絶縁体の微粉末は誘電分極によって双極子となる。双極子となった微粉末は電場によって回転し、互いの異極同士がつながる。その結果、微粉末は電気力線の方向に並ぶ。
- ・ 大きさをもつ双極子の性質上、一つの微粉末が2つ以上の微粉末につながることもある。その場合、実際は電気力線が枝分かれしないことを説明し、学生に誤解を与えないようにする。

【注意点・備考】

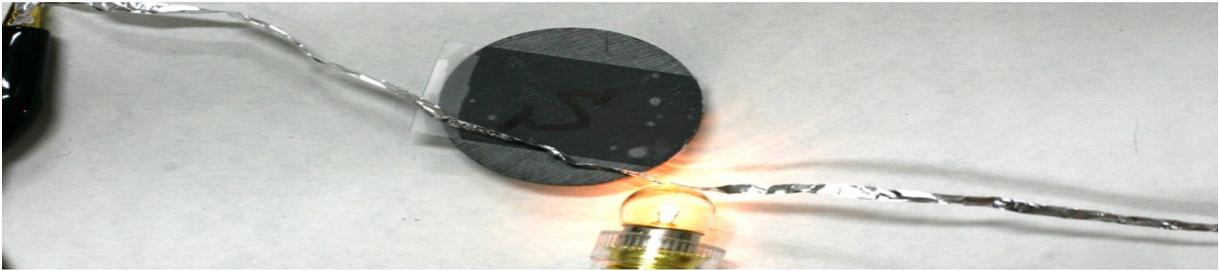
帯電した電荷の絶対値が同程度にならない場合は、シミュレータでもそれに合わせて描画する。

【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年。
 [2] 鈴木徹夫「Virtual Physics」電気力線、
<http://www.asahi-net.or.jp/~zn6t-szk/physics/eForce10.html>



12. 電流が磁場から受ける力：アルミホイルを用いた可視化



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。

【用意するもの】

材料	個数	備考
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、発電機をつないで回路を形成する。
磁石	1 個	フェライト磁石で可。ここでは、円筒型の平たい磁石で、机の上に置いた時に上向きが N または S 極になるものを用いた。
豆電球(ソケットに入れる)	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	ここでは防災用品として市販されている携帯電話充電用のものを用いた。これ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。電池でも代用可。
テスター	1 個	電流の向きを調べるために使う。

【実験時間】 15 分

【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、アルミホイルがよじれないようにする。
- ・ 方位磁針を用いて、磁石の極性を確認しておく。

【実験手順】

電流が磁場から受ける力について説明しておく。

- (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く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) 発電機のハンドルを回し、アルミホイルの動きを学生に観察させる。
- (6) 同様の実験を、条件を変えて繰り返す：
 - ・ 発電機を継ぎ変えることで、電流の向きを変える
 - ・ 磁石の向きを変える
 - ・ 発電機を回す速さを変える
 - ・ 装置全体の向き、あるいは、アルミホイルの向きを90度変える

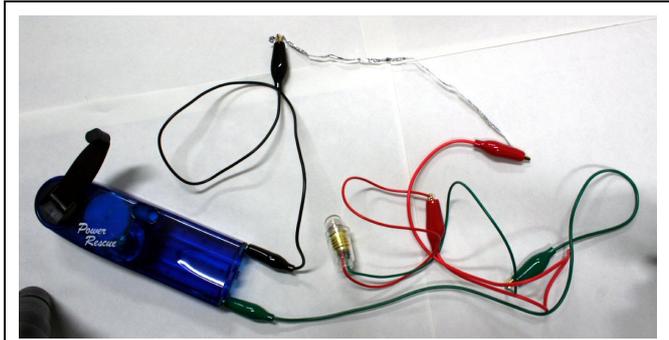


図1. 回路の概略(磁石を除く)。左の青いものが手回し発電機。

【教員による説明】

実験を行う前に、電流 \vec{I} の長さ L の部分が磁場 \vec{B} から受ける力 \vec{F} が、

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

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しておく。

【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。
- ・ この実験の動画が次のサイトにある：

<http://www.r.phys.nagoya-u.ac.jp/~tkonishi/edu/2005/em2/2005-04-25/lxB-force.html>

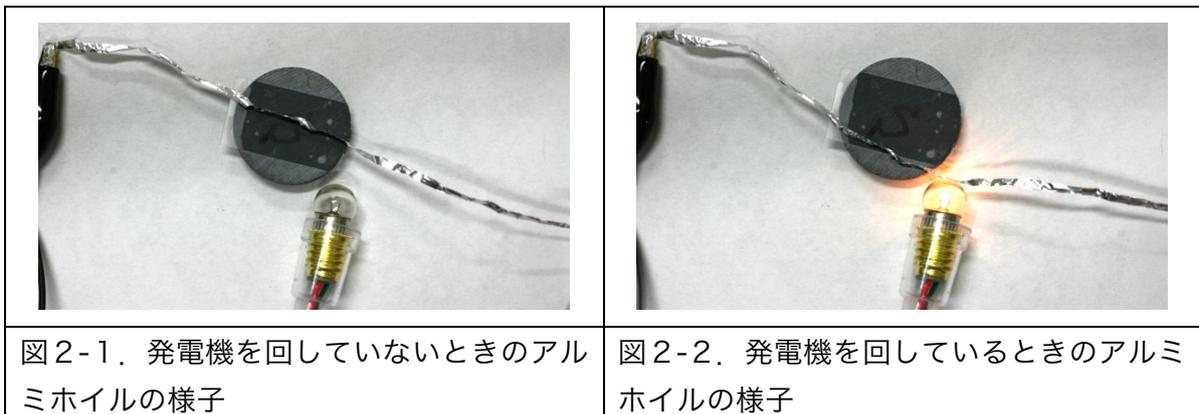
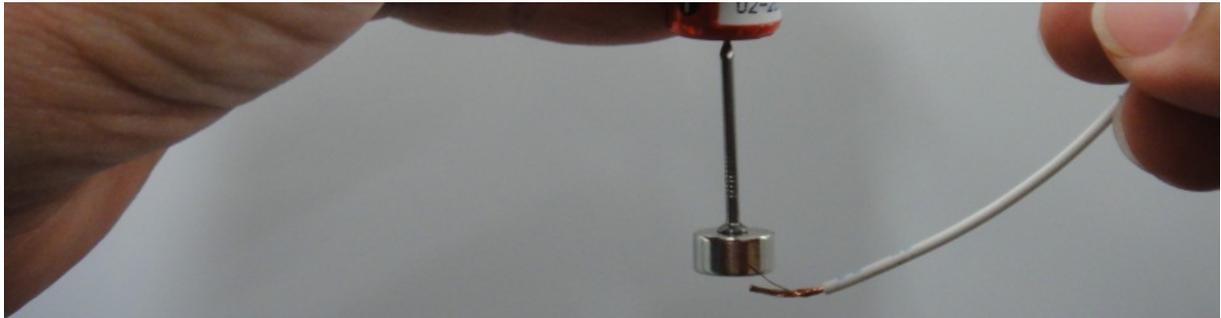


図2-1. 発電機を回していないときのアルミホイルの様子

図2-2. 発電機を回しているときのアルミホイルの様子

13. 単極モーター

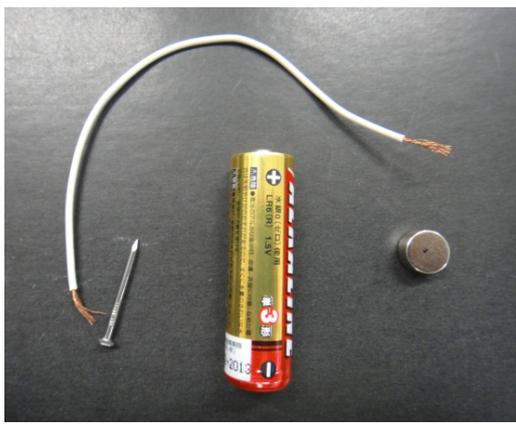


電池と釘とネオジウム磁石で、最も簡単と言われるモーターを作る。

【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。

【用意するもの】

材料	個数	備考	
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	
ネオジウム磁石	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	ネオジウム磁石と電池の端子を接続する	

【実験時間】 5分

【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) 釘の先と電池の一極をくっつける。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氣的に接触させる。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はたらく。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はたらかない。また、磁石上面を流れる電流には力がはたらくが、その反作用として磁場（磁石）に逆向きの力がはたらくため、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はたら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 $100\text{m}\Omega$ 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。特にニッカド電池・ニッケル水素電池($10\text{-}20\text{m}\Omega$)は、アルカリ電池($100\text{-}200\text{m}\Omega$)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）。

【参考文献】

- [1] C. Chiaverina, "The simplest motor?" Phys. Teach. 42, 553 (2004).
- [2] H. K. Wong, "Motional Mechanisms of Homopolar Motors & Rollers," Phys. Teach. 47, pp.465-463 (2009).

【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・ハイブリッドカーなども含む）で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、レポート課題にしても面白い。

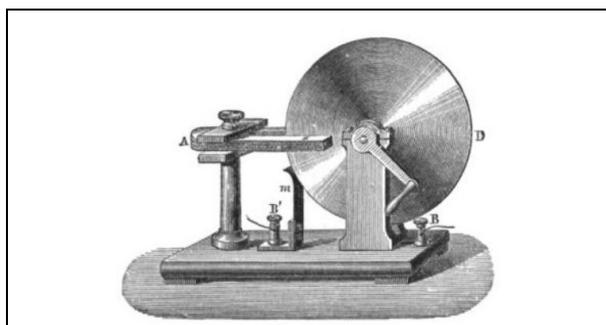


図2. 単極発電機（ファラデーの円盤）

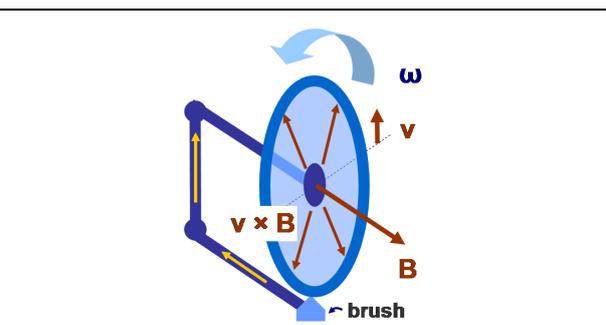


図3. 単極発電機の原理

14. 単極ローラー



ネオジム磁石と銅板を使って、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。

【用意するもの】

材料	個数	備考
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	

【実験時間】 5分

【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でおく。
- (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。

【教員による説明】

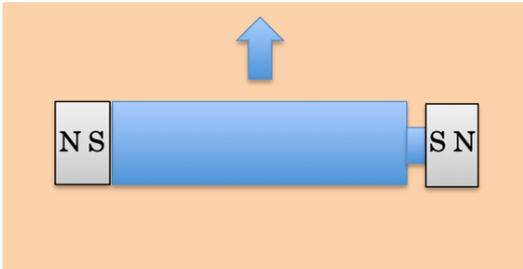
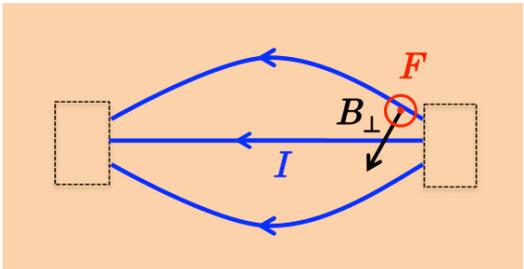
図2のような図を用いて、電流、磁場、電流に加わる力の向きを説明する。銅板を流れる電流は広がって流れている。図2で示した銅板上のある点を考えると、その点の磁場は電流の向きに垂直な成分 (B_{\perp}) をもつ。この磁場により、電流は紙面に垂直手前方向に力を受ける。この力の反作用として、磁場（磁石）は紙面に垂直奥方向に力を受ける。もう一方の磁場（磁石）も、同様の理由で紙面に垂直奥方向に力を受ける。これらの力による回転軸方向の力のモーメントを考えると、乾電池は紙面上方向に自走する。

【注意点・備考】

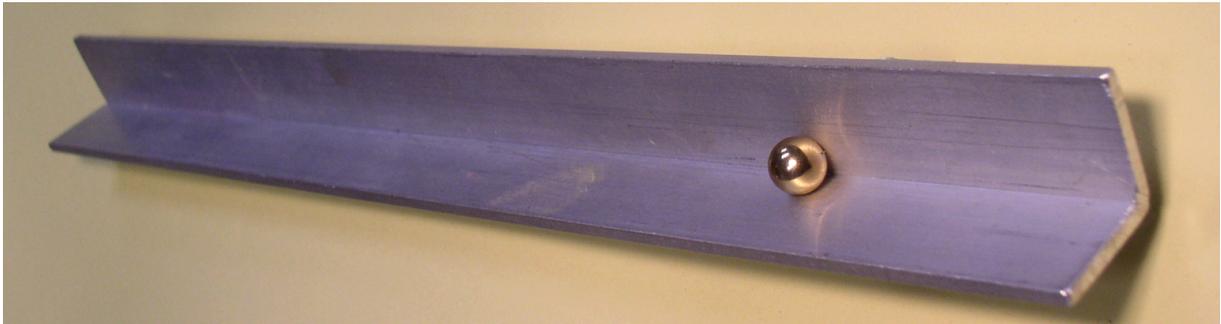
- ・ 乾電池は磁石を取り付けたまま銅板の上に放置すると、放電して高温になる。乾電池が破裂する危険性があるので、実験後は直ちに銅板から取り外すこと。
- ・ 単極モーターの「単極」とは、電流の流れるときに電極の向きが同一であること、すなわち回路が直流回路であることを表す。
- ・ ネオジム磁石の磁力は非常に強力なため、キャッシュカードやプリペイドカードなどに近づけると利用できなくなるので注意する。

【参考文献】

- [1] N. Sugimoto and H. Kawada, "The homopolar motor and its evolution," Phys. Teach. 44, 313 (2006).
 [2] H. K. Wong, "Motional Mechanisms of Homopolar Motors & Rollers," Phys. Teach. 47, pp.465-463 (2009).

	
<p>図1. 乾電池、磁石、と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。</p>	<p>図2. 図1の場合の、電流、磁場、電流に加わる力の向き。</p>

15. 渦電流ブレーキ



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。また、ジュール発熱により力学的エネルギーが損失することを理解させる。

【用意するもの】

材料	個数	備考
ネオジム磁石球	1 個	直径 10mm。
金属球	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。
アクリル・パイプ	1 本	1.0mm 厚、外径 20mm、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	0.5mm 厚、外径 22mm、長さ 30cm。ここでは自作。
柔らかい布	1 枚	雑巾、ハンカチで可。衝撃を和らげるために使用する。

【実験時間】

20 分

【実験準備】

- ・ アングルやパイプを購入し、適切な長さに切りそろえておく。
- ・ スリット入り銅パイプを自作しておく。

【実験手順】

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、アルミが磁石につかないことを確認する。
- (2) [磁石球と金属球の比較] ほぼ垂直に立てたアルミ L 型アングルの内側に沿わせて、磁石球、および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。(教員による説明)：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) [アルミ L 型アングルとプラスチック定規の比較] 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て、磁石球を落下させる。(結果)：プラスチック定規よりもアルミ L 型アングルに沿わせた方がゆるやかに落下する。(教員による説明)：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) [アルミ L 型アングルの内側と外側の比較] ほぼ垂直に立てたアングルの内側、および外側に沿わせて、磁石球を落下させる。(結果)：外側よりも内側に沿わせた方が、ゆるやかに落下する。(教員による説明)：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する。
- (6) [磁石球と金属球の比較] 垂直に立てた薄肉銅パイプの中央部に、磁石球、および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。(教員による説明)：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。
- (7) [薄肉銅パイプと厚肉銅パイプの比較] 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方がゆるやかに落下する。(教員による説明)：薄肉銅パイプよりも厚肉銅パイプの方が、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。
- (8) [ステンレス・パイプと薄肉銅パイプの比較] 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方がゆるやかに落下する。(教員による説明)：銅よりもステンレスの方が、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分かる。
- (9) 電磁誘導の法則によると、磁石球を落下させたときに、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。
- (10) [銅パイプとスリット入り銅パイプの比較] 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、同じ厚みにも関わらず、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。(教員による説明)：パイプの中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】

- ・ この実験は、電磁誘導についてすでに学んだ学生向けの実験である。
- ・ 学生が机上で実験する場合は、磁石球や金属球の落下地点に柔らかい布などを敷くと、跳ねて転がないので便利である。逆に、教員が教壇で演示する場合には、何も敷かずに球が着地するときに音を出した方が、講義室後方の学生でも落下速度の違いを理解しやすい。
- ・ ネオジム磁石の磁力は強力であるため、磁気カードに近づけないように注意する。
- ・ 実験教材を学生5人あたり一組程度用意して、グループで実験をさせてもよい。
- ・ 純粋な銅と合金であるステンレスの電気抵抗の大きさを、平均自由行程の長さから比較して考察させてもよい。

【関連トピックス】

渦電流の効果は、非接触型のブレーキに使用できる。日本では、初期の新幹線「ゼロ系」のブレーキとして、車軸に取り付けた金属円板に磁場を加えた。ドイツの鉄道では、円板ではなくレールに磁場を加える方式で、渦電流でレールを発熱させた。更に、新幹線ではモーターで発電した電流を抵抗体に流し、ジュール発熱させた。これらの方法は、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、在来線、新幹線共に、モーターで発電した電流を架線に戻し回収している（回生ブレーキ）。

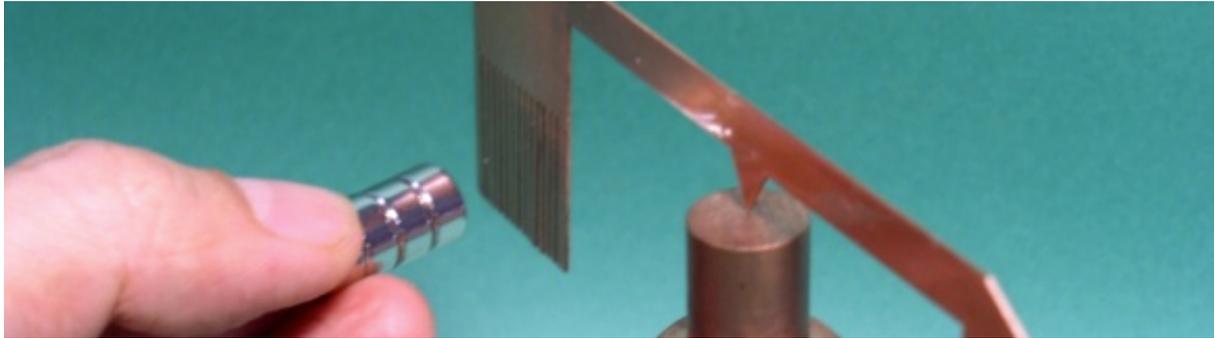


図1. 左から薄肉ステンレス・パイプ、厚肉銅パイプ、アルミL型アングル。



図2. 左は、スリット入り銅パイプ（細い銅板を互いに絶縁してパイプ状に並べた筒）。右は、薄肉銅パイプ（スリット入り銅パイプと同じ銅板を丸めたパイプ）。

16. 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。

【用意するもの】

材料	個数	備考
銅板ヤジロベー	1つ	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つ	図1参照。
ネオジウム磁石	4つ	円盤型のもの。

【実験時間】 15分

<p>図1. 銅板のヤジロベーとヤジロベーの支柱。</p>	<p>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。</p>	<p>図3. 縦に切られた銅板。電流は丸く一周できない。</p>	<p>図4. ハンダづけした丸いパターンの銅板。途中の切れ目をハンダでつなげてあるため、電流は丸く一周できる。</p>

【実験手順】

- (1) 図2のパターンの銅板ヤジロベエを支柱の上に載せる。パターンが刻まれていない方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方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エを支柱の上に載せ、パターンが刻まれている方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エを支柱の上に載せ、パターンが刻まれている方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。

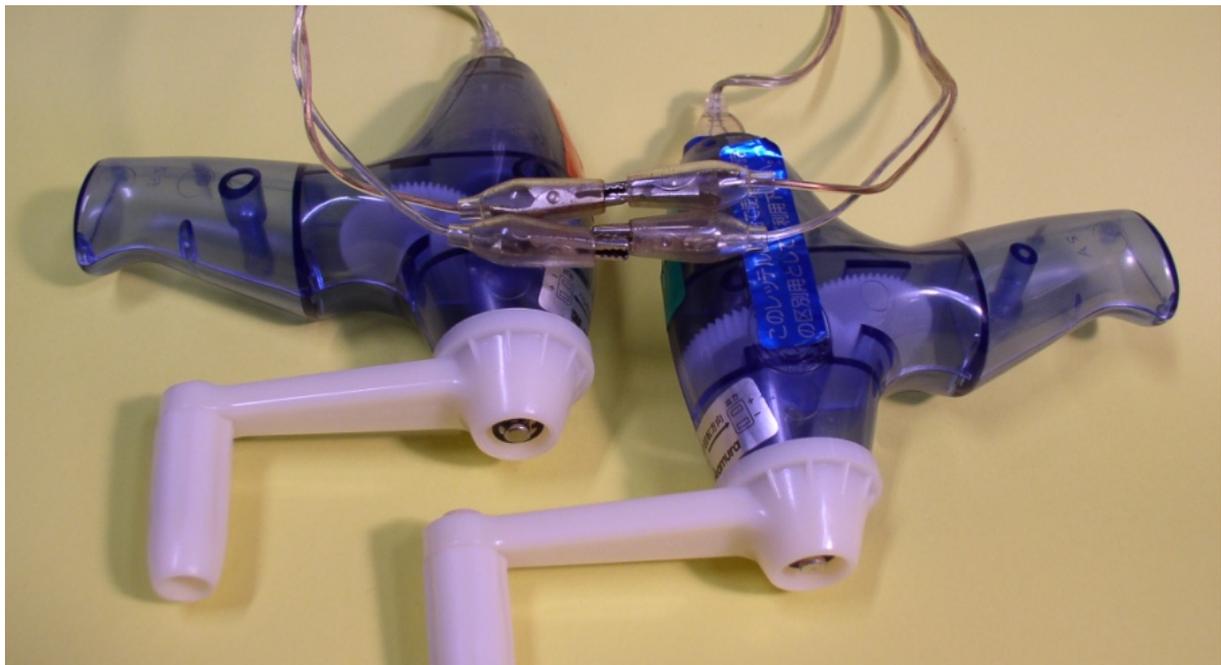
【教員による説明】

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】

- ・ ヤジロベエと支柱は物理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では、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。

17. 発電機とモーターの互換性



手回し発電機を2つ連結して、発電する。

【キーワード】 モーター*、発電機*

【目的】 発電の方法と、駆動モーターと発電機の互換性を理解させる。

【用意するもの】

材料	個数	備考
手回し発電機	2台	

【実験時間】 5分

【実験手順】 【教員による説明】

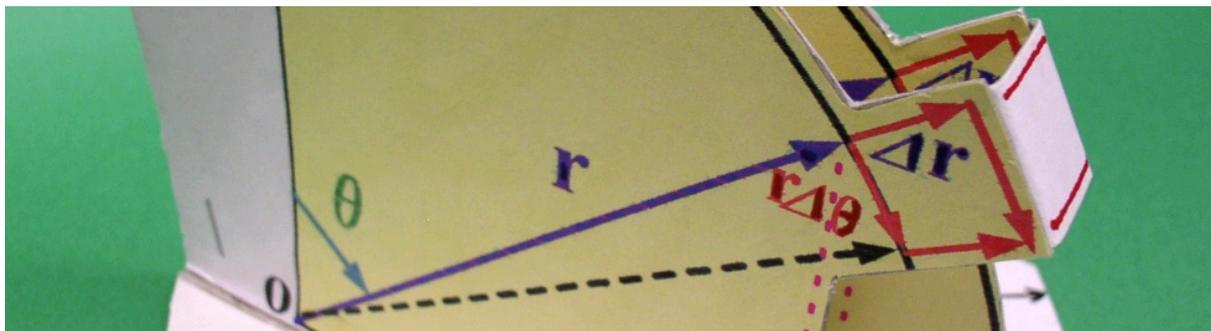
手回し発電機を二つ連結し、一方を回すと他方が回することを示す。これより、モーターと発電機に互換性があることがわかる。さらに、発電機とモーターの回転数を比較することにより、効率が100パーセントでないこともわかる。

【関連トピック】

「省エネルギーの方法」

列車やハイブリッド・カーでは、減速時に駆動モーターを発電機として使い、運動エネルギーを回収している。

18. 極座標の立体模型



立体模型を回転させながら、極座標で定義された角度を確認する。

【キーワード】 座標（極座標）

【目的】 極座標の微小変位と微小体積を見て、 r, θ, ϕ 方向の微分と積分を理解する。

【用意するもの】

材料	個数	備考
自作した立体模型	1つ	学生の受講人数に合わせて、1～3個の模型を製作する。ここでは、一辺が10～15 cm程度の模型を製作した。

【実験手順】 模型を箱などに入れて回覧し、学生に微小変位の大きさを確認させる。

【教員による説明】

- (1) 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。
- (2) 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。

【注意点・備考】

- ・ 回覧する前に、あらかじめ黒板に極座標の図を書いて説明しておく。
- ・ 板書では、特に極座標の奥行き方向 ϕ 成分が理解されにくい。
- ・ 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。また、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、二枚貼り合わせるとよい。

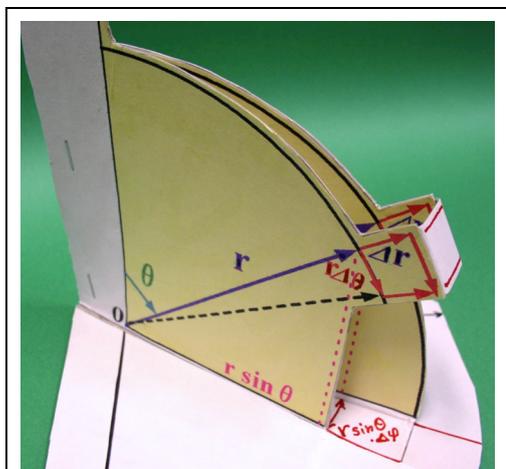


図1. 極座標の立体模型

19. ガウスの法則の立体模型



立体模型を使って、電場の積分が楽になる方法を考えさせる。

【キーワード】 電場、ガウスの法則

【目的】 直線上や平面上に一様に帯電した電荷による電場を理解する。

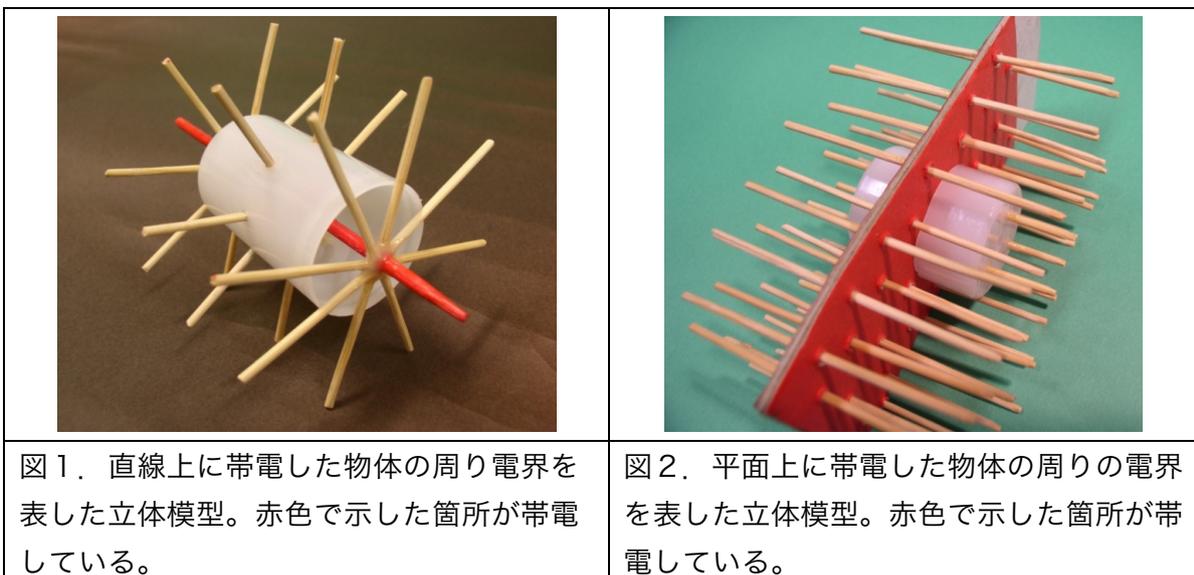
【用意するもの】

材料	個数	備考
自作した立体模型	1つ	学生の受講人数に合わせて、1～3個の模型を製作する。

【実験手順】 模型を箱などに入れて回覧し、学生に磁場の方向を確認させる。

【教員による説明】

図1の模型では、電気力線は囲った円筒の側面を貫くことを説明する。図2の模型では、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。



20. ビオ・サバールの法則の立体模型



実物のネジを使った立体模型を用いて、磁場の方向をわかりやすく提示する。

【キーワード】 ベクトル演算（ベクトル積）、ビオ・サバールの法則

【目的】 黒板の図では分かり難い極座標における微小変位・体積要素や、円形電流による磁場ベクトルの方向を理解させる。

【用意するもの】

材料	個数	備考
自作した立体模型	1つ	学生の受講人数に合わせて、1～3個の模型を製作する

【実験手順】 模型を箱などに入れて回覧し、学生に磁場の方向を確認させる。

【教員による説明】

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、磁場方向を確認させる。

【注意点・備考】

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。

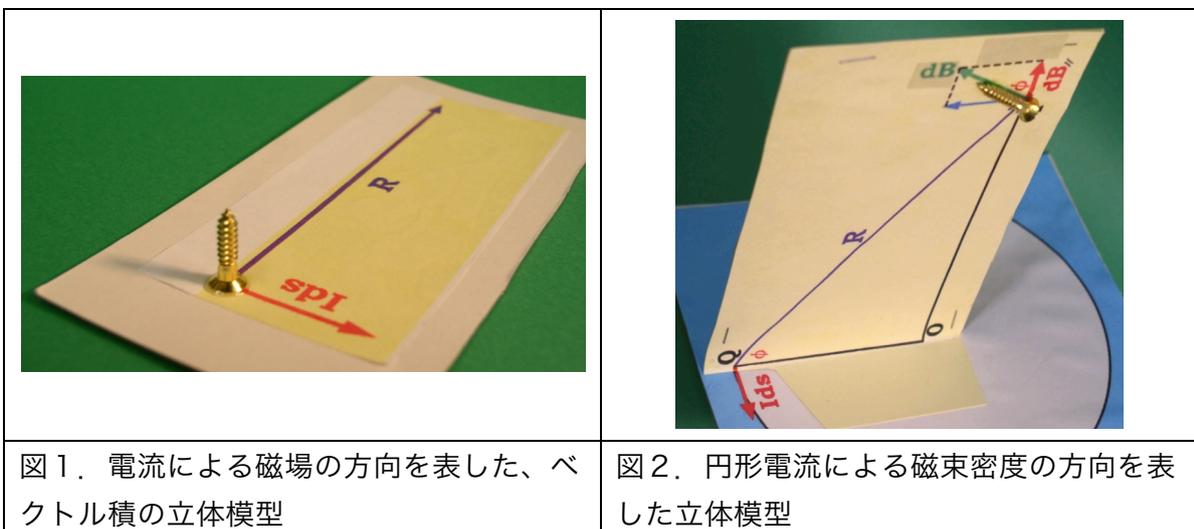
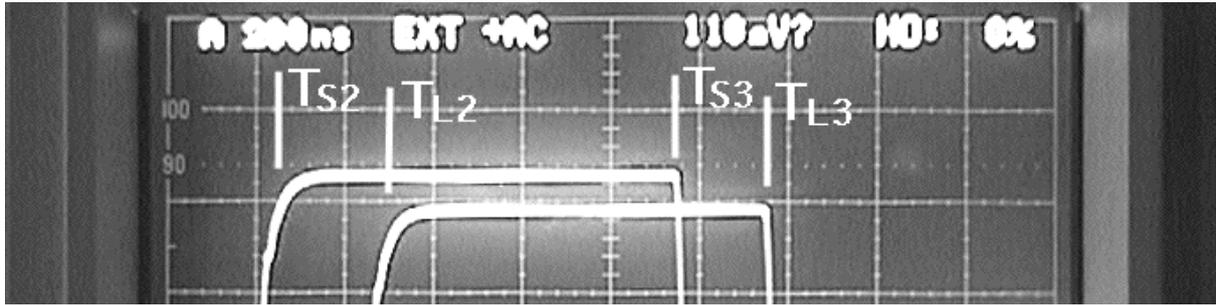


図1. 電流による磁場の方向を表した、ベクトル積の立体模型

図2. 円形電流による磁束密度の方向を表した立体模型

21. 光速の測定



光ファイバーを使って、光速を測定する。

【キーワード】 光速*

【目的】 長さの異なる光ファイバーの中を通る光の時間差を測定し、光速を求める。

【用意するもの】

材料	個数	備考
プラスチック光ファイバー	3本	3種類の長さのファイバーを用意する。ここでは、CDの光読み取り伝送システムを使用
5V電源	1つ	パルス光の送信、受信回路とそれを作動させるために使用
2現象オシロスコープ	1つ	40MHz以上のもの

【実験時間】 10分

【実験準備】 装置の配線をチェックし、事前に作動することを確認しておく。

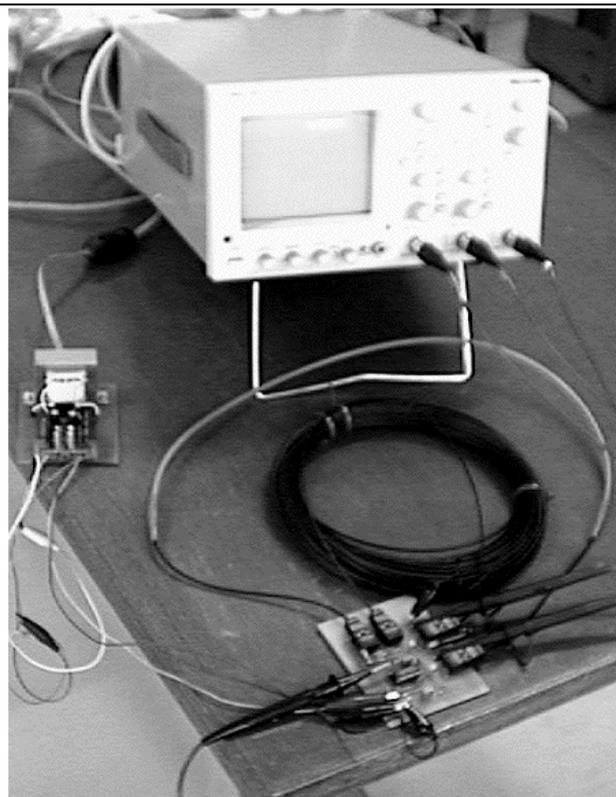
【実験手順】

(1)
プラスチック光ファイバーを透過してきた光を観察する。透過距離が長い方の光は弱く、透過距離が短い方の光は強いことを確認する。右図では、左のファイバーの方が長い。



(2)

5V 電源をパルス光の送信・受信回路につなぎ、時間差を測定する。そのため、右図のように配線をする。短いプラスチック光ファイバーを基準にして、長い光ファイバーの中を通過する時間差を2現象オシロスコープで観測させる。

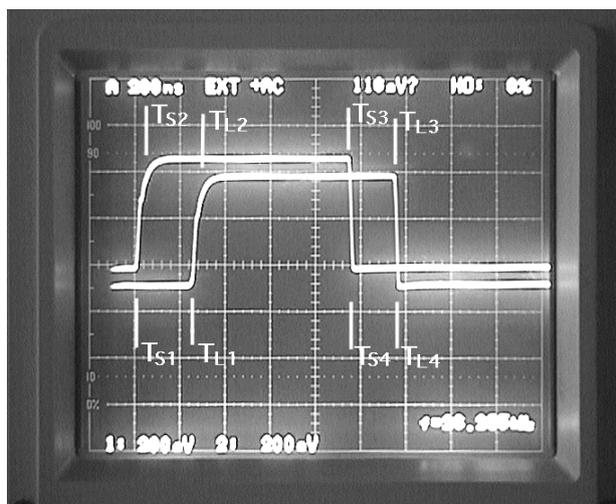


(3)

オシロスコープで、2つの回路の行路差に対応して光パルスの受けた時間差を見ることができる。時間差に相当する横軸の単位が重要である。

(4)

速度の定義には、波の場合いくつか考えられるが、一番解りやすい速度の定義式：光の速度 = 光ファイバーの長さの差 / その時間差、から光の速度を求める。



【教員による説明】

得られる光の速度は真空中のものでなく、プラスチックファイバー中の光の速度である。屈折率と光速の関係を学生に説明し、文献値の 30 万 km/sec は得られないことを示す。実際、測定で得られる値は約 20 万 km/sec である。

【注意点・備考】

屈折率と光速の関係をを用いて、レンズで光が屈折する原理を理解させることもできる。

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二乗で増える。一方、浮力は体積、つまり半径の三乗で増えるので、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。

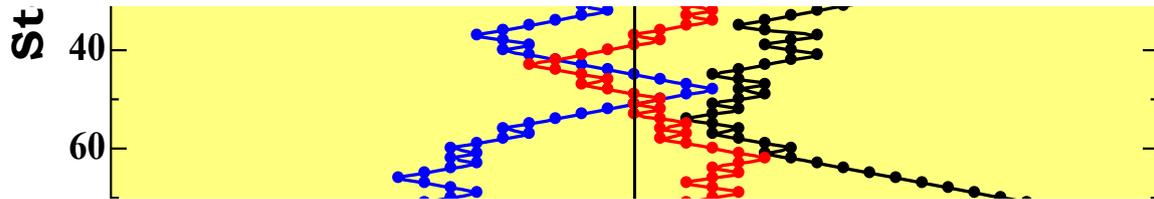
1972年に米国で体積135万立方メートル（直径138m）という巨大気球で高度51.8kmが達成された。そのまま大きくすれば更に上昇できるが、もっと賢い方法はないだろうか？気球のフィルムを薄くできれば自重が減るので小型でも高く登れるだろう。そこで宇宙機構（JAXA）は3.4ミクロン厚の極薄ポリエチレンで、6.5万立方メートル（直径50m）という、米国よりは小型の気球を作り、高度53kmの新記録を樹立した（2002年5月）。薄くて触るのが怖いような巨大な気球である。

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、更に上昇できることが分かる。

次に、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トンの重量で水圧が最大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 3 章 熱力学

22. ブラウン運動のシミュレーション



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*、熱運動*、拡散現象*

【目的】 ブラウン粒子を駆動させる分子の熱運動の存在や、流体中の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。

【用意するもの】

材料	個数	備考
方眼紙	1枚	方眼紙を用意できないときは、普通のレポート用紙でも可。
コイン	1個	確率50%の結果が出るものであれば可。例えば、サイコロ、六角の鉛筆など。学生自身の持ち物を使用させる。

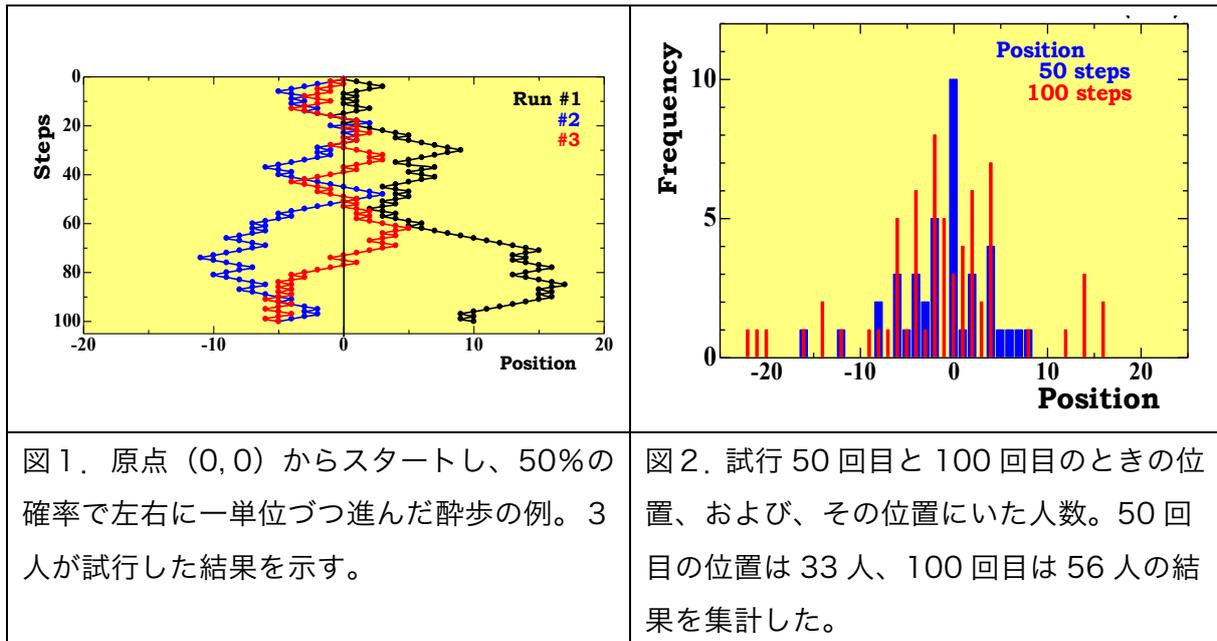
【実験時間】 授業中に百回試行するとして、10分程度。

【実験手順】 以下の手順を、学生に実施させる。

- (1) 方眼紙に図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、右に一単位だけ進む((1,1)に移動する)。コインが裏の場合には、左に一単位だけ進む((-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。

【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。左右に移動する確率が50%で



あることに惹かれ、学生は「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。各人の結果を元に、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) 集計した結果を元に、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 (時間の経過につれて)、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。

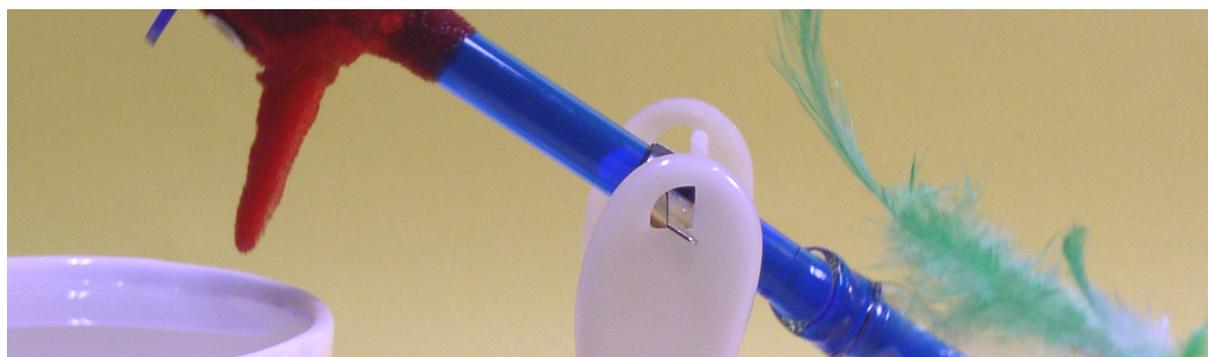
$$C(r) \sim (Dt)^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4Dt}\right]$$

この式から、時間が進むにつれ、粒子は拡散して広がることがわかる。

【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。

【関連トピックス】 「花粉」、「金属の電気抵抗の温度変化」「気体の圧力変化」など。

23. 水飲み鳥



玩具の動作から、熱機関の動作原理を理解する。

【キーワード】 熱機関*

【目的】 熱機関の動作原理、つまり、熱の移動と機械的仕事の関係を理解させる。

【用意するもの】

材料	個数	備考
水飲み鳥	2体	市販品のもの
サーモカメラ	1台	1本の乾湿計、または2本のガラス寒暖計でも可
白熱電球	1つ	

【実験時間】 10分

【実験準備】

実験の5分前に一方の鳥の頭を水で濡らし、蒸発によって頭部と胴体部の間に一定の温度差を生じさせておく。また、乾湿計の一方を水で濡らし、湿度に応じた温度差を生じさせておく。他方の鳥は渴いたまま、胴体部分にだけ白熱電球を当てて、少しだけ加熱しておく。

【実験手順】 【教員による説明】

- (1) コップの水を置いて、水飲み鳥を動作させる。液体の流動を観察させ、液体が頭部に上がる機構を考察させる。
- (2) コップの水を取り去って、水飲み鳥を動作させる。水飲み鳥の頭部が濡れていれば、動作することを述べる。
- (3) 水飲み鳥の濡れた部分の温度と気温では、どちらが高いかを考えさせる。

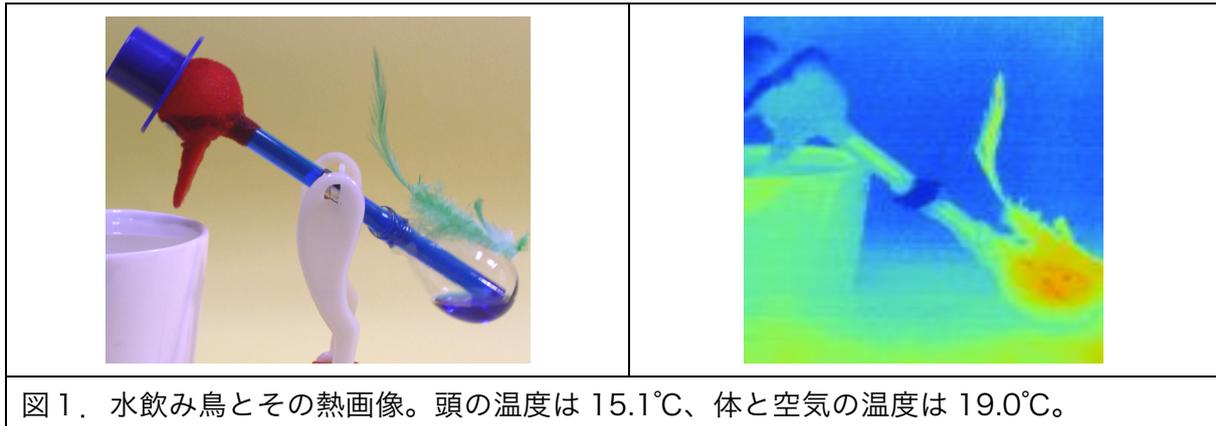


図1. 水飲み鳥とその熱画像。頭の温度は 15.1℃、体と空気の温度は 19.0℃。

- (4) 水飲み鳥の濡れた部分の温度が、気温よりも低いことを、サーモカメラを用いて確認する（図1）。
- (5) 白熱電球を用いて、水飲み鳥の胴体部分を加熱する（図2）。水飲み鳥の頭部が濡れていなくとも、胴体部分を加熱すれば、動作することを示す。
- (6) 一連の実験の結果から考えて、鳥が動作するための条件を考えさせる。次に、「動作するためには、頭部の温度が胴体部より、相対的に低温になることが必要」という結論を述べる。
- (7) 水飲み鳥は一見、永久機関のように見えるが、エネルギー保存則と矛盾しない理由を考えさせる。

【注意点・備考】

- ・ 電球で水飲み鳥を加熱する場合には、鳥の胴体部分にだけ白熱電球の光を当て、加熱する。このとき、加熱し過ぎないように注意する。室温プラス 10℃以内、または、最高でも 30℃以内が適当である。また、100 W 電球は危険なので避けること。有害で蒸気圧の高い流体が使用されているため、その圧力が上がりすぎるとガラスが破裂する危険がある。
- ・ 太陽熱を利用して鳥を加熱する場合は、胴体部分を黒色の紙などで覆い、さらに鏡で集



図2. 白熱電球による胴体の加熱



図3. 日光による胴体の加熱

光する加熱の効率が高くなる。しかし、ガラスの破裂を避けるため、鳥全体の温度を上げ過ぎないように、十分に注意すること。夏の直射日光ではガラスが破裂する危険があるので、避けること。

- ・ 水飲み鳥の頭と胴体と温度差は、頭部を湿らせた場合では4～5度、胴体を加熱させた場合では10度もあれば充分である。
- ・ 水飲み鳥の胴体を加熱させた場合では、鳥の頭部が乾いているために、水飲み鳥の胴体を湿らせた場合よりも頭が軽くなる。そこで、器具の支点を下方に移動させ、鳥のバランスを調整すること。また、鳥の頭部が下がり過ぎて、逆立ちしてしまうこともある。空コップなどを前に置いて、頭のストッパーにすると良い。
- ・ サーモカメラが無い場合は、乾湿計、または2本のガラス寒暖計を用意し、一方の寒暖計の液溜部分を水にぬれた小さな布で覆い、気温より低下することを確認する(図4)。
- ・ 室温が低い場合や、湿度が高いときには水の蒸発が少ないため、頭と胴体の温度差が小さくなり、鳥の動作は遅くなる(図4)。

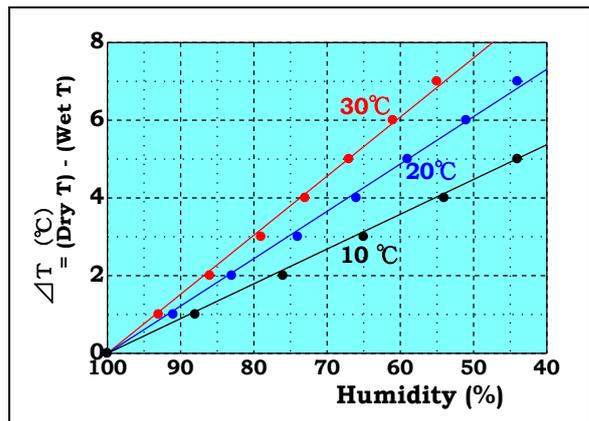


図4. 湿度と ΔT (乾球温度 - 湿球温度)の関係 (理科年表より)

【関連トピックス】 「エアコンの室外機」

玩具の「水飲み鳥」だけでなく、ガソリン・エンジンや蒸気機関も温度差により機械的仕事をしている。その逆の機構で、機械的仕事により温度差を作れば、冷暖房に利用できる。図5はヒート・ポンプ型エアコンの室外機である。熱画像から、暖房運転では外気より熱を吸収するため気温より低温になっている。冷房運転では、逆に室外機は気温よりも高温になり、大気に熱を捨てていることが分かる。

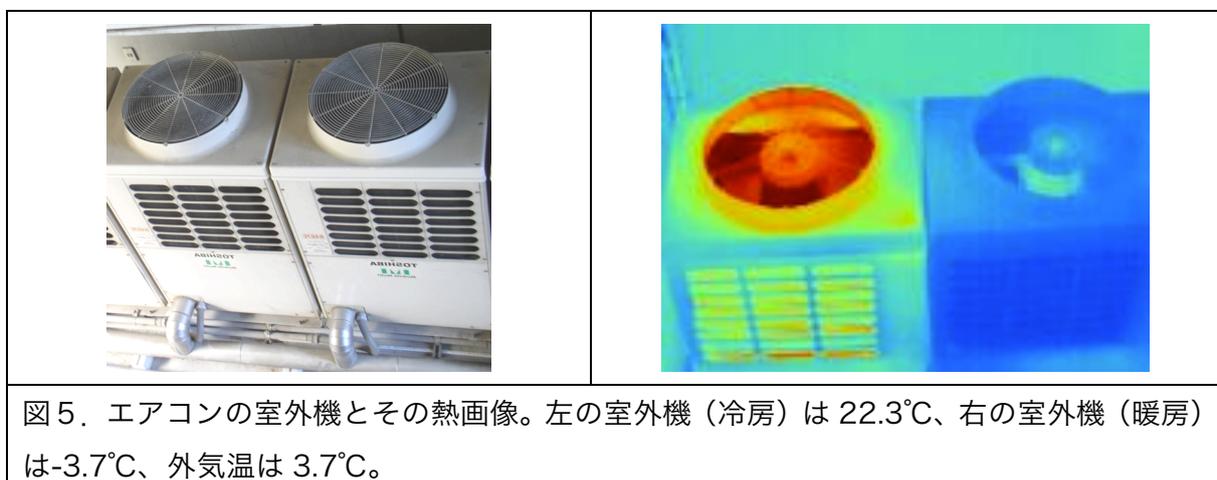


図5. エアコンの室外機とその熱画像。左の室外機(冷房)は22.3°C、右の室外機(暖房)は-3.7°C、外気温は3.7°C。

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、なかなか分かりにくい。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の情報に従って作られた紐状のアミノ酸配列のままでは、機能が無い。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」にまかされているようだ。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。細胞の中で日常的に行われている現象だが、再現する計算はたいへんとのことだ。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)

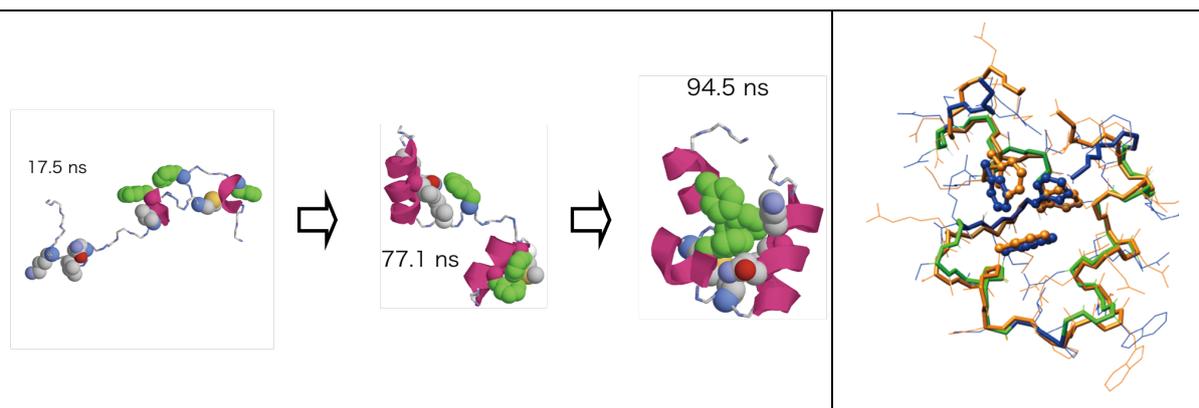


図1. 蛋白質 MUCAREM2 において天然類似の立体構造が形成される過程で出現した構造のスナップショット (大学院理学研究科 岡本祐幸教授 提供) (T. Yoda, Y. Sugita & Y. Okamoto, Biophys. J. 99, 1637, 2010 より) 左からエネルギーが 約-29000, -31000, -32500 kCal/mol である。最終的な構造に向けて、次第にエネルギーが低下していく様子が分かる。最終的に図2のようになる。

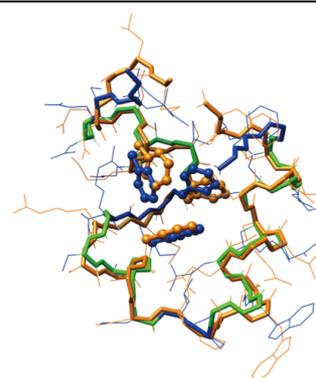


図2. 計算から求められた蛋白質の構造と自然の構造の比較(緑+青色；X線回折で決められた自然の構造。黄色；シミュレーションの結果、自然構造とほぼ一致している。

第3部 講義実験を始めるために

講義実験器具の準備

○本冊子で掲載した講義実験器具の貸出は以下の部局で行っています。

- ・ 物理学実験準備室
【TEL】 052-789-7238 (内線 7238)

○オリジナルの講義実験器具の製作に関しては、全学技術センターに相談できます。

全学技術センターの web ページはこちらです。

<http://www.tech.nagoya-u.ac.jp/>

ホームページ上で器具の製作を依頼することもできますが、まずは電話で相談されることをお勧めします。講義実験のアイデアを持ち込めば、器具の設計・支払い方法などについて親身に相談に乗ってもらえます。

理学研究科教員の方は、こちらへ：

- ・ 全学技術センター 教育・研究技術支援室 装置開発技術系
【TEL】 052-789-2809 (内線 2809)

工学研究科教員の方は、こちらへ：

- ・ 全学技術センター 工学系技術支援室 装置開発技術系
【TEL】 052-789-3851 (内線 3851)

講義実験に関する参考文献

注) ここでは、主要な参考文献のみを挙げています。

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ー演示実験・生徒実験集ー』学術図書出版社（2007年）
- [4] 愛知・岐阜・三重物理サークル『いきいき物理わくわく実験（改訂版）1・2』日本評論社（1999年）
- [5] 板倉聖宣『仮説実験授業ー授業書くばねと力>によるその具現化ー』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ー講義と融合した学生実験の企画と導入法ー講義用演示実験の系統的整理とモジュール化」『名古屋高等研究』第10号(2010) pp.39-58.

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>

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://physicslearning.colorado.edu/PiraHome/index.htm>
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/Pira.asp>
および、米国の各大学にある講義実験サイトのリンク集「Global Web Spider」, <http://physicslearning.colorado.edu/QuerySp.html>
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>
- [3] マサチューセッツ工科大学での物理学講義実験 (電磁気学) , Walter Lewin, *Electricity and Magnetism*, Massachusetts Institute of Technology, Open Course Ware, Physics, <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Physics/8-02Electricity-and-MagnetismSpring2002/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： メールの場合は、info@cshe.nagoya-u.ac.jp
 学内便の場合は、高等教育研究センター宛

編集

物理学講義実験研究会

執筆者（所属）【執筆分担】

三浦 裕一	（名古屋大学理学研究科 准教授）【第2部 1～7,10,15～20,22,23】
小西 哲郎	（名古屋大学理学研究科 准教授）【第2部 8,12】
中村 泰之	（名古屋大学情報科学研究科 准教授）【第2部 9】
千代 勝実	（名古屋大学教養教育院 専任講師）【第2部 10,13】
齋藤 芳子	（名古屋大学高等教育研究センター 助教）【第1部】
安田 淳一郎	（名城大学学長室, 助教）【第1部、第2部 11,14、第3部、校正】
森 昌弘	（愛知工業大学, 教授）【第2部 21】

物理学講義実験研究会

三浦裕一（理学研究科、代表）、小西哲郎（理学研究科）、中村泰之（情報科学研究科）、千代勝実（教養教育院）、夏目達也（高等教育研究センター）、近田政博（同）、中井俊樹（同）、齋藤芳子（同）、安田淳一郎（名城大学学長室、プロジェクト・マネージャー）、森昌弘（愛知工業大学）

物理学講義実験ハンドブック 第2版

2011年3月31日 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
