

# 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 －

三 浦 裕 一

---

### <要 旨>

科学教育の主な目的は、確固とした根拠に基づいた合理的な思考方法を身に付けることにある。その重要性において、理系・文系の違いはないと考えられる。実際の科学教育には授業時間や予算など、多くの制約があるものの、工夫次第で教育効果を上げることが可能である。そのためには、先ず、教員と学生間に存在するカルチャー・ギャップを克服しなければならないと感じている。つまり、学生側に科学的な「概念」を構築できなければ、教員と意思疎通が充分にできず、授業が空振りすることにもなりかねない。多くの教員は、自分の学生時代を思い出しながら授業をしているが、その教員たちは、すでに学生時代から科学的な概念を容易に把握していた人たちである。そのため、なぜ学生が理解できないのか、理由がわからないことになる。「確かに教えた筈なのに…」と嘆く教員は多い。そこで、このようなギャップを克服するため、非物理系の学生に「物理的な概念」を構築するよう、これまで試みてきた物理教育の改善の試みを具体例を挙げて紹介する。また、学生を不利にせず、教育効果を評価する方法も考察する。

---

## 1. はじめに

「学部学生に対する科学教育」は単なる教養教育を越えて重要になってきたと考えられる。近年、エネルギー問題を含む地球温暖化の対策や、生命倫理などについて、国民に判断が求められる機会が多くなっており、問題の解決には一般市民の協力が欠かせない。一時のムードや一方的な宣伝に惑わされずに、問題を合理的に解決するためには、一般社会の科学的常識の向上が必要である。

特に、人間の都合では変えられない「自然法則」と、社会的な約束事である「法律、安全基準」などの規則との区別を、しっかり認識させなければならない。例えば、シート・ベルトの着用についても、「社会的な約束事」としての道路交通法の問題ではなく、「力学法則の問題」だと理解しなければならない。たとえ警官が見ていなくとも、力学法則は厳然と成立する。そこに執行猶予はなく、事故ともなれば容赦ない罰が待っている。定量的に自分で計算できれば、ベルトを着用しない危険性が納得できるだろう。

このように、国民の「科学的常識」が向上すれば、合理的な安全基準が定められ、理解されてしっかり守られることになる。

もちろん、非物理系（文系、化学・生物系も含む）と物理系（工学系も含む）の学生に対する物理教育の目標と方法は異なる。非物理系の学生には、複雑な計算問題は必要ない。「科学遊び」的な演示も導入としては良いが、そこから法則の理解に進めることが重要である。非物理系の物理教育は初歩的で、レベルが低くても良い、ということにはならない。基本法則をしっかりと理解した上で、他分野や社会的問題との関連性を、しっかり認識させる必要がある。そういう意味で、むしろ非物理系の学生に対する物理教育の方が難しいのではないか。担当する教員側としては、科学を深く理解した上で、多くの現象や事例の論理関係を整理して伝えなくてはならない。その範囲の広さを考えると、教科書を書くことすら困難である。しかし、彼らが再び物理教育を受ける機会が無いとすれば、担当する教員の責任は重大である。

科学教育、物理教育の改善については、これまで各教員の個人的な努力にまかされており、実践的な事例のまとめは、まだ不十分である。近年の高校教育課程の影響により、理学部でも高校で物理未履修の「生命科学、化学系」の学生に対する物理教育に困難を抱えており、その原因の分析と「改善の試み」を始めている。本論では主に「力学」の授業を取り上げて考察する。これまでの試みから、「大学レベルの物理教育」は予備知識がない学生に対しても、工夫次第で十分に可能と考えている。

課題は、教員と学生の間にある「カルチャー・ギャップ」の克服である。基本法則をいくら繰り返し教えても、うまく伝わらないのはなぜなのか、とても不思議であった。そのうち、一部の学生には言葉の元になっている「概念（物理量の概念）」がほとんどないことが分かってきた。速度と加速度、慣性質量と重力質量などの概念がつかめないと、計算しても実際の現象との関係がわからないことになる。そこで、学生に概念を実感させるこ

とから始めた。こういう傾向は、多くの非物理系学生に共通していると思われるので、以下の教育改善の「試み」の事例と学生の反応は、広く参考になると思われる。

まず、我々が身近で体験する事象が、どんな物理法則が元になっているか、考えさせることから始めることにした。例えば、「仕事」や「運動量」という用語は日常では異なった意味で使われているので、かえって紛らわしい。また、「加速する」と言うと、車のアクセルを踏んで、直線で加速することだけが頭に浮かぶようだ。等速でも、カーブを曲がれば「加速度運動」であると認識しないと、先に進めない。ここで教員側がうっかり「カーブを曲がるのが円運動の一部である」という説明を省略してしまうことがある。この辺が「ギャップ」であり、つまずきの元になるので注意が必要である。

さらに、講義中に、想定された状況から結果を論理的に導く「思考実験（仮想的な実験）」や、教壇で実演する「演示実験」を積極的に行い、感覚的に概念をつかむ助けとした。また、A4 サイズのスペースで行える小型の実験教材を授業中に回覧し、学生自らの手で実験させ、結果を確認させた。

講義中の「演示実験」については、これまで各教員が個人的に取り組んできたが、本年度に総長裁量経費からの助成を受け、系統的に教材開発を行うことになった。現在、数人の教員が協力して開発を進めている<sup>1)</sup>。そして、試作して効果的なものは量産し、多くの教員が自由に使えるようにストックする予定である。

注意する点は、あくまでも演示実験は授業の理解を深めることが目的であり、単なる「見せ物」に終わってはいけないことである。いかにして学生に考えさせるか、あるいは、考えるきっかけにできるか、がポイントになる。「見栄えのする実験」でなくともよいが、現象の本質に迫るためには、相当のアイデアが必要である。ちょうど黒板に図を書く感覚でスムーズに演示実験を導入し、速やかに終えて計算にもどり、その結果を演示実験で確認する、という流れが理想である。時間がかかり授業の妨げになるようでは、本末転倒である。よって、単純明解に見えるように、良く考慮された実験が望ましい。

本論では、理学部の非物理系1年生を対象とした半年の授業「物理学基礎Ⅰ」において、行ってきた演示実験の内容、導入方法、学生の反応、及び教育効果を述べる。いろいろと工夫した結果、高校で物理が未履修であ

っても、高校物理の範囲を越えた「剛体の回転、角運動量や慣性モーメント」の理解まで、半年で到達できた。

また、講義内容の理解を助けるため、名古屋大学高等教育研究センターの助成で「写真集」も作り学生に配布した<sup>2)</sup>。「式」はいっさい無く、学生からは「物理のイメージが変わった」との感想が寄せられた。

授業の最後にアンケート調査を行い、それぞれの実験や実例について、参考になったかどうか、4段階（3点から0点）で学生に評価させた。本論の評価の数字は、全員が最高点をつけた場合を100%としている。

## 2. 法則の存在は自明なのか

そもそも、「法則」は存在して当然なのか、この基本から考えさせるべきである。法則が認識されたいきさつ、あるいは、長く気付かれなかった理由を知ることは、現代の我々にとっても大いに教訓になる。「見れども、見えず」の状況が、千年以上も続いていた。その時代における人間の常識や思い込みとは、恐ろしいものである。古代文明では国家の基幹産業である「農業」に必要な「暦」を作るため、天体観測を行っていた。これが、法則を認識するきっかけであった、という点には、ぜひ触れておきたい。

「法則」の条件を明確にしておく必要がある。世の中には根拠の明確でない奇妙な「法則」も横行している。その「法則」は、過去の事実を一方的に解釈するが、未来を予測できない。詐欺にあわないためにも、法則の普遍性をしっかり教える必要がある。真理が一部含まれている「経験則」もあるが、その適用限界を認識させるべきである。

## 3. 速さと速度、加速度の理解

基本的な、力、速度、加速度などの説明には、初めから微分、積分を使えば容易である。高校2年程度の数学である。なぜか高校では微積を使わず、幾何学的に教えているため分かり難い。ここで問題なのは、「式」の計算はできるのに、式と「現実の現象」が頭の中で結びつかない学生がいることだ。そこで、まず、速度と加速度の違いを認識させる事例を挙げた。

設問 3-1 F1 マシンと、ジェット戦闘機が、イタリアの滑走路で競争した。どちらが勝ったか？あえて競争距離を言わずに質問する。

全員がジェット機と答えるが、これは質問の仕方が悪いため。

設問 3-2 距離が 600m では F1 が勝った。その理由を述べよ。

答え このように質問すれば、学生は初めてスタートダッシュの鋭さ、つまり加速度の大きさがポイントだと気がつく。

競争距離が短いと、加速度の大きさが勝敗を決める。普段、「速い」という場合、最高速度が速いのか、加速度が大きいのか、曖昧な点が日常との「ギャップ」と言える。上の例では混同していると、うっかり間違ふ。この例は「物の見方」を学ぶ点で、教育的である。この例に対する評価は 66% で、中程度であった。

次に、運動方向を横から縦に変え、「高層ビルのエレベーター」で思考実験した。運動の方向が変わっただけで、別の現象と誤解する学生がいるのも「ギャップ」と言える。

設問 3-3 エレベーター内に「体重計」を持ち込み、出発から到着まで、その上に乗った状況を考える。体重計の読みは、それぞれの段階でどうなるか？

答え 体重の増減が観測される。現実のエレベーターは、乗り心地を考慮して、この体重の増減は 10% 以内に抑えているようだ。

設問 3-4 もしエレベーターの加速度が  $2g$  ( $g$  は重力加速度) で加速、減速をしたら、中の人間はどうなるか？

答え とても無事では済まない。この設問で重力加速度と加速度が理解できているか、確認できる。初めに床に叩きつけられ (体重が 3 倍に増)、最後に天井へ落下! (落上?) する。

設問 3-5 エレベーターの紐が切れたら、乗っている人はどうなるか？

答え 最もユニークな答えは「天井に頭が当たる」であった。自分だけは落ちないという楽観主義か、乱気流に巻き込まれた旅客機で、天井に当たり負傷したニュースが記憶にあったのかも知れない。そこで、二つのボールを並べて落とし、一方から他方がどう見えるか、と質問すると、正解に気がつく。つまり、無重力になる。

こうして、速度と加速度、力との関係を把握させた。そして、なぜ加速度の単位が「メートル毎秒二乗」と、時間が分母に二つ入っているのか、時間に対する「二次微分」から理解させた。物理量の「単位」は重要なので、機会あるごとに強調する必要がある。

横方向の加速で受ける慣性力は、乗り物で実感できるのでよく理解されている。しかし、縦方向の大きな加速度は、宇宙飛行士でもなければ体験できず、あまり認識されていない。そこで、縦方向に加速すれば、重力に加えて慣性力も働くことを明確に示すため、縦・横両方向の実例を挙げる必要がある。この思考実験の評価は68%と、まずまずであった。

#### 4. エネルギー問題と仕事、運動量の理解

エネルギーの保存則は、学生は常識として理解している。しかし、「仕事」は、日常使われている意味と異なるため紛らわしく、違和感があるようだ。有名な例であるが、重い荷物を大汗かいて支えていても、物理的な「仕事」はゼロである。そうすると、「バケツを持って立っていなさい」という古典的な「罰」は物理的には意味がないことになる。しかし、実際はつらい罰だ。その理由を考えさせる。

次に、海の干満をエネルギー保存の観点から議論する。「ポンプで行うとしたら大変な電力が必要だ。何が仕事をしているのか?」。学生は皆、原因が月や太陽の重力であることは知っている。しかし、それだけでは不十分である。次のように問題提起して考えさせる。

設問 4-1 月や太陽の重力が「仕事」をして、干満を起こすのに使われたエネルギーの分だけ、どこかで減っていないか? はずだ。

どこが減って、その結果何が起きているのか?

設問 4-2 同じ原因により月は常に同じ面を地球に向けている。月の裏側を目で見た人はいない(アポロの宇宙飛行士は除く)。

月の自転と公転速度が完全に一致しているためだが、あまりにも偶然過ぎるのではないか、その原因を述べよ。

答え 海の干満に使われた分だけ、月や地球の自転や公転のエネルギーが失われている。しかし、月が地球に落ちてきたり、地球が太陽に落ち込む心配は当分無いので御安心を、という結論であ

る。これまで正解できた学生はいない。

「潮干狩り」とエネルギー保存の関係を思いつく学生はほとんどいないので、意外性がある教育的な実例となる。このように、エネルギーの「出どころ」が見えにくいと、永久機関のように誤解する学生もいるので、注意が必要だ。潮汐力は自転に対して摩擦として作用する。よって月の自転にブレーキがかかり、自転周期が公転周期と一致してしまったのである。ちょっと待て、月には海水は無いではないか。

設問 4-3 海水が無いのに、潮汐力で月の自転が減速するのはなぜか？

答え 月が剛体ならば、確かに減速しない。しかし、月が潮汐力でわずかに変形して、自転エネルギーの一部が熱として失われたため、自転が減速して公転周期と一致した。

設問 4-4 ならば、我が地球はどうなのか？ 名古屋の地面も弾性変形して、毎日2回、海のように上下しているのか？

答え その通り。しかし、比較する基準がないので誰も気がつかない。

実際に、海の干潮を利用した大規模な発電所がフランスに存在する。普段目にしていないスケールの巨大な海の干満や、月の自転と関連づけて、エネルギー保存則の理解が深めようと試みた。しかし、評価は55%。クリーン・エネルギーなので関心が高いだろうと期待したのだが、残念であった。

エネルギーの概念は比較的簡単理解しやすい。しかし、「運動量」となるとわかりにくい。何となく「勢いのようなものか」、と社会的な認知度はかなり低い。運動エネルギーと混同されることも多い。しかし、「気体の圧力」の起源でもある。そもそも、「圧力」が動的な衝突が起源になっていることは、ほとんど知られていない。顔に「ポコポコ」と酸素や窒素の分子が当たっているのだが、数が多すぎて区別ができず「ジワー」と静的に押されている、と感じているだけのことである。ましてや、酸素や窒素の分子が、秒速100メートルを超える猛スピードで自分の頬に当たっているなどとは、信じられないことである。よく無事なものだと、感心する。一方、「理想気体」を知っている学生は多い。そこで、運動量保存則から、理想気体の状態方程式を求めると、関連が分かって理解しやすい。

設問 4-5 理想気体は何が「理想的」なのか？

答え 分子の大きさと相互作用を無視している。何割かは正答できた。しっかり教えている高校もあるようだ。

このように、良く知られている「圧力」を、気体分子の弾性衝突による運動量変化から導くことにより、認知度の低い「運動量」の理解を深めた。しかし、評価は52%に留まった。内容は理解されていたようであるが、学生の興味の方向性には、ギャップを感じてしまった。

## 5. 円運動、遠心力の理解

等速円運動を考える際に、まずカーブの曲がり具合の定量化から考えさせる。「きつい」とか「緩い」では計算しようがない。カーブの内接円を考え、その半径で曲率を定義する。これにより、カーブを曲がるのが、円運動の一部であると認識させる。センスのある学生なら、言わなくとも自分で一般化できるが、しっかり指摘しないと認識できない学生もいるようだ。次に、緩いカーブも速度によっては、非常にきつくなることを示し、遠心力の認識を深めた。

まず、ボールに紐を結び、半径を変えて回し、円運動を演示しながら、計算を進める。ハンマー投げは良い例となる。我々にもハンマーは片手で持てる。しかし、回転が始まると、ワイヤーの張力は400kg重にもなる。世界的な選手がなぜ体重100kgを越える大男なのか、理由がよくわかる。皆、「我々には世界記録は、ちょっと無理だな」と納得して、先に進む。カーブにおける実際の列車脱線事故の写真を紹介しながら、事故原因を定量的に考察した。

設問 5-1 カーブのきつさ（曲率）をどのように定量化したら良いか？

答え 内接円の半径が、良い指標になるだろう。次に、予想させる。

設問 5-2 それでは、現実の各種のカーブの曲率半径はどれほどか、一般道路、高速道路、在来線の線路、及び新幹線の線路の曲率半径を感覚で述べよ。

答え 大幅に外れる。どうしても、半径は実際より小さめに感じられる。このように、学生に「感覚と現実」のズレを自覚させるこ



とも、重要である。

(意外な数値の提示) 東海道新幹線の最小の曲率半径が 2500m と紹介すると、その大きさに学生は驚く。一見すると、曲がっていることすらわからない程に「緩い」。しかし、このカーブがとても「きつい」ため、曲がるために JR が技術的に苦勞していることを話すと、学生はさらに驚く。

(理由の考察) 具体的に、曲率半径と速度から遠心力を計算する。ここで、時速を秒速への換算や、角速度への変換方法を理解させる。

(自分で計算し納得) 遠心力の計算結果から、新幹線にとっては「きついカーブ」であることが納得できた。そして、計算した遠心力の大きさ、いわゆる「横 g」が、乗客には無視できないことを理解した。

(解決方法の考察) その「横 g」を緩和するため、線路を内側に傾かせている。自転車で曲がるときに経験しているので理解できる。しかし、非常に時にカーブで停車することに備え、JR は線路の傾きに制限を設けている。

設問 5-3 その線路をさらに高速で曲がるためには、どうしたら良いか？

答え 台車の上の客室だけ、更に傾ければ良い、ということで「振り子型新幹線、N700 系」を紹介した。

設問 5-4 客室をどれだけ傾ければ、遠心力とつり合うのか？

答え 重力の斜面方向の分力から計算させた。

斜面に関連して、スキー場の「30度の壁」についても議論した。三角定規の中で 30 度は最も小さい角度である。それにも関わらず、30 度の斜面を無事に滑降できる名人は少ない。三角定規では緩い斜面に見えるのに、ゲレンデでは 60 度程度の「壁」に感じられるのは不思議だ、と話を進める。斜面方向の重力の分力は、三辺の比から容易に分かる。摩擦がないとして、30 度の斜面で 10 秒後の速度を計算させると、驚くべき速度になった。このことから、速度を制御しながら滑降するには、「冬季国体」の滑降選手のレベルの技術が必要なことが分かった。

設問 5-5 「振り子式電車」に乗ってカーブを曲がるとき、車両の内外の様子はどう見えるか？

答え 自分は水平のままと感じられ、お茶の水面も水平に見えるのに、窓外の景色だけが左右に傾いて見える。不思議な感覚である。これまで漫然と乗っていた学生も、次の機会には認識するだろう。

さらに、限界速度を超えた悲劇の例として、「JR 福知山線事故」を例に挙げた。ショッキングな実例を挙げると、リアルに感じられるようだ。このカーブにおける通常の制限速度のときの遠心力と、事故時の遠心力を計算し、その異常な値を確認して円運動の理解を深めた。この事故の力学的解析の学生からの評価は、77%と高かった。

他にも事故も取り上げて事故原因を力学的に解説したところ、「そういうことだったのか、具体的で分かりやすかった」との感想が寄せられた。

## 6. 2体問題と重心、換算質量の理解

これは、高校物理の範囲を越えた「大学の物理」と言える。二個の質点がペアを組んで運動するとき、変数を相対座標で表すと、二つの方程式が、一個だけの方程式になってしまう。つまり、2体問題が一体問題に変換できる。合計の質量や、重心は日常生活でもなじみがあり、わかり易い。しかし、変数を変換して出てくる「換算質量」の概念は抽象的である。直接に測れる量ではないので、直観的に理解しにくいようだ。また、重心は、「静的」な吊り合いの中心であることは、皆理解できている。しかし、互いに手をつないで回転するような「動的」な場合となると、本当に重心が中心になるのか、確信が持てないようだ。

そこで、図1の「連星モデル」を作って配布した。オハジキを薄板に接着したもので、製作費は限りなくゼロに近い。机の上で自分の指で弾いて回転させ、その回転中心を見定める。弾き方に少々コツが要るが、特に「3対1」の連星は分かり易い。この実験から、「重い星」に近い方に回転中心があることがわかり、「二つの星の重心が回転中心らしい」と見当をつけてから計算に入る。すると、重心の両側の遠心力がつり合っており、この推論が正しいことがわかる。

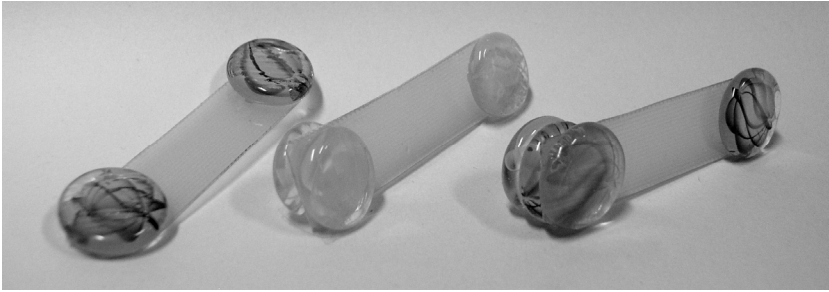


図1 「連星」のモデル、左から、質量比が1対1、2対1、3対1  
指で弾いて回転させ、回転の中心を見つける

設問 6-1 望遠鏡で観測したら、ある星が揺れて見えた。原因を述べよ。  
答え 見えない「連星」を伴っていることがわかる。

連星は宇宙で一般に見られるもので、天文学では重要である。宇宙では一方の明るい星だけが観測できる場合が多く、見えている恒星の「揺れ」から、ペアを組んでいる星の質量と軌道が計算できる。最近ではその「恒星の揺れの測定精度」が著しく向上し、その恒星に惑星があるかどうか、わかるようになってきたことを紹介した。また、携帯電話の「マナー・モード」は、「連星」と全く同じ原理で電話を揺らしていることも指摘した。このように、身近な例や最新の研究を紹介して、二体問題の重要性を理解させた。連星は「話」として紹介したのみで、「連星の実験」の評価は次の機会に行う予定である。

## 7. 回転エネルギー、角運動量、慣性モーメントの理解

「力のモーメント」は、テコや天秤の原理として古くから知られてきた。しかし、動き出して回転運動が始まると、直線運動よりも理解され難いようである。特に「回し難さ、止め難さ」の概念である「慣性モーメント」の社会的な認知度はゼロに近く、それが人身事故につながった。

慣性モーメントが大きい「はずみ車」を付けると回転速度の変動が平均化され、滑らかに回る。昔は足踏み式のミシンや、ゼンマイ式玩具に使われていて、原理が分かりやすかった。しかし今日、目にする機会は少ない。慣性モーメントの認識不足が「回転ドア」の安易な改造につながり、死亡

事故が起きた。また、大型トラックから脱輪したタイヤが百メートル以上も倒れずに「走行」し、歩行者に当たって死亡事故も起きた。これも、タイヤの持つ大きな「慣性モーメントと回転エネルギー」、「角運動量の保存」が原因である。回転運動は「大学の物理」であり、その危険性を理解する上でも、概念をしっかり把握させたい。この例の評価は、69%と高かった。

以下のように、ステップをきちんと踏めば、皆、無理なく理解できるようだ。二つの物を比較して実験し、その結果から推論を進める。その際注意する点は、比較するポイントを強調するため、他の条件を同じにそろえて、学生の思考を混乱させないように配慮することである。また、すべての教材は、A4サイズの箱(Desk Tray)の中で実験できるように小型とし、多数のセットを用意した。これを授業中に学生に回覧し、机の上で自ら「測定」させる。測定機は「自分の目」、つまり、一見して分かるように工夫してある。10分以内に終えたいので、十分な数の教材セットを用意する。

まず、図2のように、同じ直径だが、重さの異なる円柱を用意する。

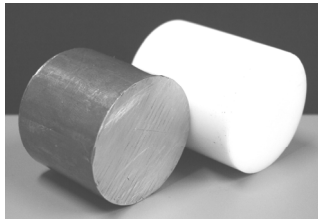


図2 同じ直径の銅と、テフロン(白)の円柱

設問 7-1 直径が同じだが、重さの異なる二つの円柱を同じ斜面で転がすと、その転がり下る速度はどうなるか？

答え 白いテフロンの密度は銅の1/4と、たいへん軽い。「重い方が速いと答えると、ガリレオに笑われる。「重さ」に関係無く、同じ速度で斜面を下りることがわかる。



図3 大・小の球、及び同じ直径、同じ重さの「糸巻き」と「パイプ」

設問 7-2 図 3 に示す大、小の球を、同じ斜面で転がす。速度に差が出るか？

答え 球の直径は異なるが、材質は同じ（ガラス）で密度は等しい。密度が等しくても、両者の重さは異なる。しかし、設問 7-1 の結果から、重さは転がり速度に関係がなさそうだ。しかし、今度は直径が異なる。直径の違いが影響するならば、転がり速度に差が出るかも知れない。  
そこで、転がすと…大・小の球は同じ速度で下ることがわかる。

設問 1 の結果と合わせて考えれば、転がり速度は、形が同じならば、重さと直径には依らない、と結論された。

設問 7-3 これが、本テーマの主役である。直径、重さ、材質（真鍮）は同じだが、形状が異なる物を比較する。3 図に示すように、一方は「パイプ」で、他方は薄い円盤のついた「糸巻き型」である。転がる速度に差が出るか？

答え 設問 7-1、7-2 の結果から、今度も差が出ないだろう、と予想される。そこで、同時にスタートした両者が、斜面を転がり下る様子を図 4 に示す。

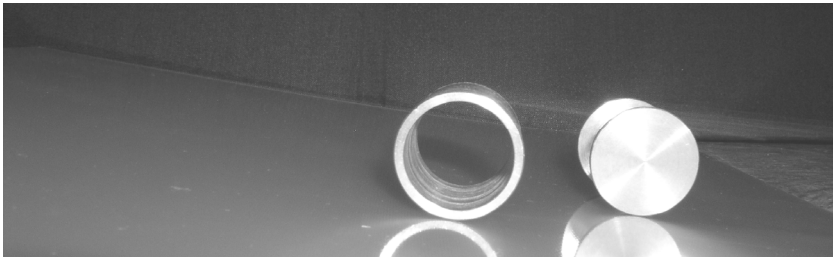


図 4 斜面を転がり下る「糸巻き」と「パイプ」；糸巻きの方が速い

結果は、図 4 に示すように「糸巻き」の方が速い。一見してわかる差が出るように、サイズと形状を工夫している。この結果を各自で確認させた後、その理由を探求する。

設問 7-1、7-2 と何が違うのか、を考えさせる。「糸巻き型の形が、何か怪しい。同じ質量でも、中心部に質量が集中していると、速いのではない

か」という点に気がつくことが、この課題のゴールである。そこから、慣性モーメントの計算に入り、直径の異なる球や円柱は、同じ速さで転がり下ることも確認させた。

このようにして「慣性モーメント」や「回転エネルギー」の概念を掴んだ後、スケールを巨大にして、地球の自転や公転の「回転エネルギー」を計算させ、認識を深めた。また、地球の自転の軸が安定していることや、公転軌道が安定していることを、角運動量の保存から理解させた。

この実験の評価は、67%と中程度であった。

## 8. バネの振動と免振機構の理解

バネの振動で記述される現象は多様な分野で現れるので、「法則」の普遍性を理解するには、良い例となる。

設問 8-1 地震計は、地面の揺れを測るものだが、地面に置いて一緒に揺れたら、揺れがわからないではないか。さて、どうするか？

答え これには、学生たちも頭をひねる。聞かれて初めて「確かに、一緒に揺れては困る、動かない基準が必要だ」と気がつく。

問題意識を持たせた上で、バネに重りをつるし、上下に振って見せる。このとき、固有周期が1秒程度だと分かりやすい。次に、バネの上端を速く振り、バネに吊るした重りが、動かないことを見せる。これで、地震計の原理が分かったようだ。このように、固有周期が異なる振動は、バネを通過しないことが確認された。この実験の評価は62%と、中程度であった。

設問 8-2 地震の被害も同じ原理で防ぐことができるか？方法を考えよ。

答え ビルなどの重量物をバネで支えることは、無理に思える。しかし、実例を図5に示す。通常はビルの基礎に設置され見ることができないが、これは珍しく露出しており、いつでも見られる。

これで地震対策はできた、もう安心、と言いたいところだが、最近、周期5秒以上の「長周期地震」なるものの危険性が分かってきた。「ビルを建設した後から言わないでくれ」と悲鳴が上がりそうな状況である。



図5 ガイドウェイ・バス大曾根駅の免振構造（名古屋市大曾根、筆者撮影）  
上の台と柱の間に見える黒い板が免振バネ。脱落防止の枠が囲んでいる。

なぜ、深刻なのか実験で示した。指を固有周期で微小に揺らし、バネに吊るした重りの振幅を大きく成長させる。重りの振幅は、指の振幅の十倍、百倍と成長する。これが、共振現象である。関東平野は周期5秒、我が名古屋の濃尾平野は周期4秒の地震に共振し振動を増幅するそうだ。これまで、免振構造は周期1秒程度の地震を想定していた。これでは、かえって長周期地震を増幅し、被害を増大させかねない。高層ビルや大型の橋も、固有周期が5秒に近い。そこで、あわてて高層ビルに油の摩擦を利用したダンパーを取り付けている。このダンパーは、ビルの揺れのエネルギーを摩擦熱に変換して、揺れを抑える働きがある。このダンパーは、もともと自動車の乗り心地を良くする部品である。つまり、地震の際に「ビルの乗り心地（住み心地?）」を良くしようという対策である。

このように、バネの方程式が広い範囲で成り立っていることを紹介し、法則の一般性を理解させようとした。しかし、長周期地震に対する関心は低いようで評価は56%にとどまり、「バネの共振」よりも低かった。学生の防災意識に期待したのだが、残念である。

## 9. 「乱雑さ」の定量化と、自然現象への影響 －エントロピーと自由エネルギー－

日常的に出会う自然現象はマクロなスケールであり、統計力学<sup>3)</sup>で説明されることが多いのだが、なかなか基礎課程の物理教育では触れる余裕がない。しかし、次のように直観的に示す方法を考えた。この実験は試作段階であり、まだ授業に導入していない。

物理系学生が対象の場合、最も単純な例として一次元のスピン系を扱うのが定跡であるが、非物理系には違和感があるだろう。そこで、

設問 9-1 自分の部屋が片付いているか、散らかっているか、どのように数値化したら良いか？

答え これは難問である。きれいに掃除するのに要する時間で決める？ これは、個人差がありすぎて、無理だろう。

正解は、部屋の床を 30cm 程度の升目（メッシュ）に区切って、それぞれの升目に本やら、靴下が落ちているか否か数える（物理学では格子気体モデルと呼ぶ）。これは、「場合の数」の計算になる。同じ散らばり方でも、靴下の色が異なると、「より乱雑」に見える。これは、「気のせい」ではなく計算上も正しい。ちなみに、電子は互いに区別できないので、同じ色の靴下に相当する。この方法で「乱雑さ」を定量化できそうだ、ということで、先に進む。

「乱雑さ」にはエネルギーに相当する効果があることを、直観的に示すことを試みる。まず、初め図6のように、台の隅に集合していたオハジキは、台を揺らすと散らばる（図7）。台が水平なので、オハジキは集合しても、散らばっても、重力による位置エネルギーは同じである。やがて、いくら揺さぶっても、偶然には初期状態に戻りそうにないことに気がつく。



図 6 初期状態、隅に集合したオハジキ



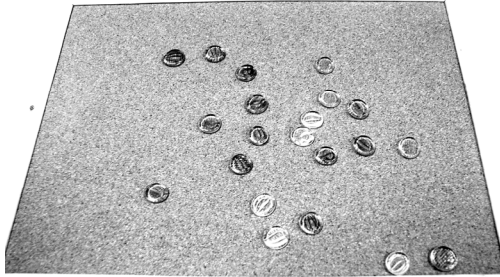


図7 台を揺さぶると、当然、散らばる

設問 9-2 エネルギーは図6も図7も同じなのに、揺らしてもなぜ初めの状態に戻らないのか？何か両者に違いがあるのか？

答え 違いは、「乱雑さ」である。

設問 9-3 初期の集合した状態に戻すには、どうしたら良いか？

答え 学生アルバイトを雇って、拾い集めさせる。または、図8のように、台を傾けて、台の隅に集合させる。いずれの方法でも、費用、すなわちエネルギーが要ることが分かる。



図8 オハジキを元の位置に集合させるためには、台を傾ける必要がある

よって、集合した初期状態の図6は、図7に比べ、台を傾斜させる分だけ、エネルギーが高い状態だったことになる。つまり、「乱雑さ」を減らすには、エネルギーが要ることがわかった。全く同じ原理で、冷蔵庫には電気が要り、我々が生きていくためには（生命体の秩序を保つには）エネルギー（食料）が必要なことが、示された。このように、自然界は、「乱雑さ」を含めたエネルギー（自由エネルギーと呼ぶ）が低い方へと変化する。水

蒸気が凝縮して水滴になり、凍結して氷に変化するのも、その現れである。一般の人々には「自然はエネルギーの低い方へ変化する」と誤解されているようだ。「乱雑さ」、即ちエントロピーは、難しい概念であるが、エネルギーとの関係を可視化して説明したことになる。

## 10. 学生を不利にしない「教育効果」の評価方法の考察

教育効果を上げる試みを定量的に評価する必要がある。それには、教育に特有の難しい問題が伴う。例えば、「新薬」の効果を判定するには、患者を二つのグループに分け、一方に「新薬」を、他方に「偽薬」を与え、効果の差から有効性を評価する。しかし、「偽薬」をもらった患者は、最善の治療を受けていないことになる。同様に、これを科学教育に適用しては、学生は迷惑だろう。「偽薬」グループの学生は、ベストの教育を受ける機会を失うことになる。また、単に「分かり易かったか？」とアンケートで聞いても、「何と比較して」という基準が分からない。

そこで、「偽薬」グループを作らずに教育効果を評価する方法として、理解の進み方の「ステップの段差測定」が考えられる。あらかじめ、設問や、教員の演示実験、講義中の学生実験などを組み合わせて、ステップを踏んで理解を進めるよう計画しておく。そして、教員の話についていけなくなったステップ、つまり、高過ぎて登れないステップがあれば、申告してもらおう。各ステップの段差が適当なとき、教育効果が最大となる。省略しても良いステップも分かる。しかし、実際の授業では必要なステップが欠けていたため、途中で登れなくなる（脱落する）ことが多いようだ。教員にとっては、わかり切った話なので、飛ばしても気がつかないのである。

重要だが軽視されがちなステップの例として、三次元の「極座標」を用いた微分、積分がある。中心対称の問題を扱う上で不可欠であるが、座標の取り方が慣れないとわかりにくいようだ。式を黒板に書いても、「暗記もの」になってしまう。この段階でつまずいてしまえば、先に進めない。そこで、9図の簡単な立体模型を作って回覧したところ、学生はいろいろな角度から眺めてイメージをつかむことができたようで、好評であった。

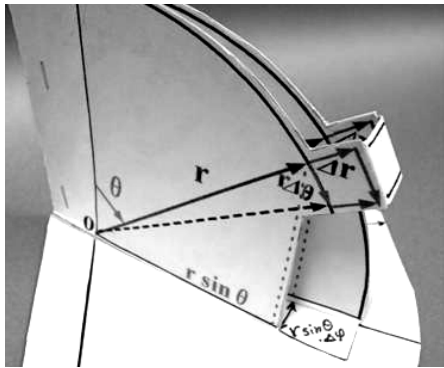


図9 極座標の立体模型

また、論理を進めるためのステップというよりは、問題意識を持たせることが目的のステップも必要である。例えば、「エネルギー保存則」の授業で、「弾性ゴム球」と「非弾性球（弾まない球）」を回覧して各自で落下実験させ、球の位置エネルギーのゆくえをレポートさせた。弾性ゴム球は机で反射して元の位置の近くまで上昇し、位置エネルギーが回復する。しかし、「非弾性球」は机の上でピタリと止まってしまう。つまり、エネルギーがいきなり消えてしまったように見える。

この実験への反響は大きく、77%の評価を得た。皆、原因を真剣に考えたようであるが、奇妙な回答が多く、笑いなくして読めない。具体的な計算に入る前に、この実験を行うと、学生の問題意識が全く違って来るようだ。

もっとも、細かくステップを踏むことに向かない教育課題もある。また、十分な準備や、教員の手際の良さも必要となる。

次に、「実例」ごとの教育効果を比較する方法もある。つまり、複数の実例から、物理法則の理解に迫る。そして、どの例が自分に「ピンときたか」を学生に問う。

例えば、「作用・反作用」の理解のため、「ロケットの反動推進」と「軽四輪とダンブの正面衝突」の実例を挙げて計算した。しかし学生の評価は、「ロケット推進」の評価が56%に対し、「ダンブと衝突」は70%と高く、大差がついた。これは非物理系の学生集団の興味動向によるものと考えられ、理工工学系のクラスでは二つの例は同等か、逆転した評価が期待され

るだろう。

このように、万人向けの決定版の実例はないと言える。そこで、「傾向によりグループ分けした複数の実例」を用意しておき、学生の反応を見ながら提示することが必要と思われる。速度、加速度など、教育課題ごとに実例を挙げて説明するが、同じ学生が好感を持つ実例は、教育課題を越えて同じ傾向の実例になることがわかってきた。例えば、理工学的・技術的な「ハードな実例」を好む学生と、より一般的・日常的な「ソフトな実例」を受け入れやすい学生に分かれるようだ。現在、学生アンケートから、教育課題ごとの好評を得た実例の相関を、分析しているところである。

担当の教員が実例を持ち寄って、効果的な事例集をまとめておくと、後の担当者の良い参考になると思われる。要は、学生たちの問題意識をつかみ、それとの関連を明確に提示することが、教育効果を高めるポイントになると考えられる。現象を見たとき、すぐ一般化して、「法則、式」との関係が頭に浮かぶのは、センスのある学生である。しかし、全ての学生にそれを期待するのは無理があり、適切な実例を挙げて導く必要がある。

そして、教育効果を評価するために、たとえ一部の学生に対しても「損」をさせてはいけない。評価が間接的になったとしても、より良い授業を追及する中で評価する方法を、確立する必要があると思われる。

## 謝辞

本論文は、名古屋大学総長裁量経費「教育研究改革・改善プロジェクト」の援助を一部受けており、特に有益な議論をしていただいた、森昌弘（情報科学研究科）、千代勝美（教養教育院）、清水利文（教養教育院）、安田淳一郎（高等教育研究センター）の各氏に感謝いたします。

## 注

- 1) 名古屋大学総長裁量経費、2010、「教育研究改革・改善プロジェクト」講義実験ハンドブック（作成中）。
- 2) 三浦裕一、2008、『理系基礎科目 物理学基礎』（教材集）、名古屋大学高等教育研究センター発行。
- 3) たとえば、久保亮五編、1998、『熱学・統計力学』、菅華房。