

The Simple Lecture Experiments Conducted in Face-to-Face Class

---

対面授業で実施した簡易な講義実験について

---

綿引 隆文

# 対面授業で実施した簡易な講義実験について

自然科学系 物理学教育部門 綿引 隆文

## 1. はじめに

高校教員として物理を担当していたとき、問題と組み合わせた講義実験を頻繁に実施した。概念的に予想が割れる問題を示し、三つくらいの選択肢の中から各人が答えを予想し、挙手等で予想を示してもらう。意見交換、可能なら討論を行い、その後、実際の実験を示す。多数の予想が外れるので、生徒の方から驚きの声上がることもあった。予想と異なる結果は生徒の問題意識を高め、その理由を知ろうという意識が授業に加わって、この方式の実験は生徒からの評判も良かった<sup>1)</sup>。

コロナ禍に見舞われてから本学では90分授業となった。シラバスの進度に遅れないようにすることはなかなか大変で、対面授業になった21年度の後期後半、冒頭に導入として実験を行い時間を費やした場合、その後の時間配分に不安があった。したがって、21年度は、一通り講義内容が終った後の「振りかえり」、または、授業の途中、「新たな問題提起」として、講義実験を行うことが多かった。

「振り返り」の意味を持たせた実験では、授業で扱った後にも関わらず予想外に不正解が多かった。つまり、講義実験による振り返りによって、大切な所がいかに習得されていないかが明らかになった。その原因については各実験ごとに考えていきたい。

本稿では、今年度後期後半、対面授業になってから実施した機械工学科の物理学及び演習(2)の講義実験から、いくつかを紹介したい。高校教員時代から実施してきたものが大半で、すべて教育的効果が高かったと思われるものである。2019年度からは、本学での授業で実施しており、教育的効果を

十分認めることができる。

今回、実験後の分析のために、毎時間、Zoomに入ってその機能を利用すれば良かったと思う。しかし、対面授業になってからの本学の新たな決まりによって、対面学生に対しては共通のIDを通してZoomをスケジュールすることはできず、当日の授業ごとの設定になり敬遠してしまったことは悔やまれる。

そのようなわけで分析は十分でなく、「実施しての覚え書き」の範疇に入る程度である。しかし、次年度以降の授業改善の資料になると思われたので、備忘録の意味を持たせて今年度の実施を振り返りたい。

## 2. 運動量保存の実験

運動量保存の法則のところでは、系の運動量に着目し、運動量保存則が成り立つ条件について説明をしている。授業の振りかえりで実施した実験を次に示す。この実験<sup>2)</sup>は、授業時間の中では実施できず、その後の演習の時間の一部を使って実施した。高校で指導していたときも、運動量保存の成立条件の説明後に実施することが多かったが、生徒の反応が良かった実験である。

質問 図のように台車 A とレンガをのせた台車 B に輪ゴムをかけ、手で左右に引いて静止させておき、同時に放した。A と B の間には吸着板（あるいは粘着両面テープ）があり、衝突後合体する。合体後の運動はどうか。



図1<sup>3)</sup>

- ① 右に動く
- ② 左に動く
- ③ 静止する

結果は次の通りであった。（正解は③）

- ① 1    ② 30    ③ 5（40名出席）

12月7日実施

この実験は、高校の進学校で説明後に実施した場合も不正解がかなりの多数を占めていた。運動量保存が成り立つ条件を説明した後の実験で、次のような感想があった（1990年代から2000年代の水戸一高、那珂高校、土浦一高）。

「運動量保存の法則や、成立する条件については理解したつもりでいた。しかし、実験の予想では、それとは結びつかなかった。感覚で答えてしまった。」「運動量保存に気づかなかった」「質量の大きな方が勢い（運動量）があると思った」この分野に限らず、学生は、たとえ説明を受け頭の中で理解したと思っても、具体的な現象にその概念をなかなか適用できない傾向があることは、さまざまな場面で経験している<sup>4)</sup>。

しかも、今回、録画を見ると、時間の関係でこの実験を授業時間の中で実施できずに演習の時間にやっており、しかも途中でいきなり実験の説明をしているので、前の授業でやった運動量保存の内容と結びつけにくかった、と思われる。つまり、導入実験のような予備知識なしで直感や感覚で答えざるを得ない状況に近かったことが考えられる。大きな反省事項である。

今後は、実験の時に、「手を放してから合体するまでは、系に働く正味の外力はどうなっているだろうか。」とか「運動量保存をキーワードにして考えてみよう。」などのヒントを出して予想させることも考えられる。

今回、多くの学生が予想を間違えていた。ここで、実験後に、改めて運動量保存則の成立条件を、実験の過程と関連づけながらいねいに解説することで、一層、学習効果が高められるだろう。予想を間違えたことがかえって、実験後の的確な解説によって、学生の理解レベルを高く引き上げることを可能にするのではないか、と思われるのである。

### 3. 非弾性衝突と力学的エネルギー保存<sup>5)</sup>

「完全非弾性衝突における力学的エネルギー保存」の実験は、「運動量」の最初の授業（12月7日）の次の授業（12月10日）の冒頭で実施した。12月10日の内容は主に一次元の弾性衝突であり、一方、この実験内容は完全非弾性衝突で、それは12月7日に説明しているが、復習を兼ねて、実験の直前に、次のような補足を行った。

物体Aに質量が等しい物体Bが衝突し一体になる場合を取り上げ、運動量

保存によって、A、Bの速さは $1/2$ になる。そしてそのことによって、運動エネルギーの和を計算すると $1/2$ になり、力学的エネルギーは失われている、これらのことを図と式を板書して解説した。

それに続いて次のような質問をした。

質問<sup>5)</sup> 図のように、質量の同じ粘土球でできた長さの等しい振り子がO点からつるされている。いま、一つの振り子をもとの高さから $h$ の高さに振り上げ、糸が張った状態で静かに放す。おもりは最下点で、もう一つのおもりと衝突して一体になった。おもりが達する高さは、もとの高さから測ってどのぐらいか。

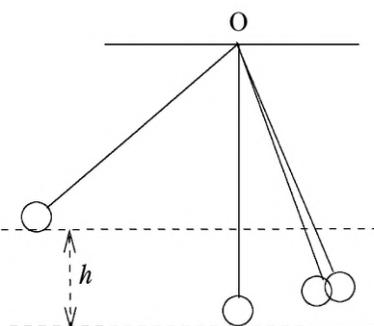


図2

- ①  $h$
- ②  $h/2$
- ③  $h/4$

結果は次の通りである。(正解は③)

- ① 0名 ② 32名 ③ 5名 (40名出席) (12月10日実施)

実験前に内容を復習しているにもかかわらず、この回答結果には正直、失望したが、まず、そのように考えた理由をwebクラスに提出させた。共通する多数の意見として「質量が2倍になるので高さは $1/2$ になると思った。」「最初の位置エネルギーが $mgh$ であり、質量が $2m$ になるので、 $(2m)g(h/2)$ より半分である。」

「運動量保存則から考えると衝突後の物体の速さは衝突前の $1/2$ となる。ここで、衝突後の物体について、運動エネルギーは速さが $1/2$ であるから、 $(1/2)^2$ より $1/4$ となるから……」のように、運動量保存から考えたケースは極めて少ない。

高校でも不正解が多数を占め、多くが力学的エネルギー保存から考えてい

るのは、前述の本学生の考えと同じであるが、さらに、不正解が多かった原因として次の事が考えられる。

- ・録画をみて初めて気づいたことだが、実験の直前に、「今日の授業は、力学的エネルギーが保存される場合、弾性衝突について調べてみたいがその時（「その前」と言ったつもりだった）に次の実験を準備した。」と発言している。これは、実に誤解されやすい発言だった、と猛省させられた。これから始まる実験が、あたかも弾性衝突の一環であると誤解されかねない発言になってしまったからである。この発言が耳に残って、力学的エネルギー保存から考えてしまった可能性が大いにある。
- ・実験前に前回の復習の一環として前述の説明をしているが、これから行う実験との関連性には全く触れていない。つまり、学生はこの話を「ひとつ」として聞き、説明は実験予想に役立たなかった可能性がある。さらに、実験前の説明を聞き内容を理解しても、実験の予想のとき、その説明をもとに物理的に考えることができず、単なる感覚で答えてしまった可能性もある。学んだ内容を、生徒が実際の現象に容易には結びつけて考えられないことを、他の分野でも多く見てきた<sup>4)</sup>。

さらに、そもそも説明を聴いていない学生の存在もあるので、不正解の原因として何が大きな割合を占めるのか調査方法をよく考える必要がある。

#### 4. トルクにおける腕の長さについて

次に紹介するのはトルク（力のモーメント）の単元で行った演示実験である。授業の最初にまず、導入として天秤の簡単な例を取り上げた。

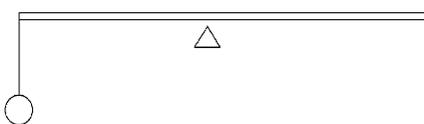


図3(右に2個のおもりをつける)



図4(右に3個のおもりをつける)

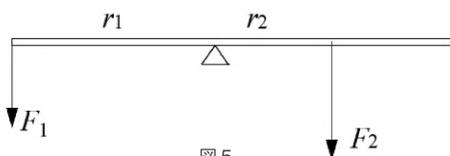


図5

図3、4のように軽い棒を使ったてんびんで、つりあわせるには右側のどこにおもりをつけたら良いかを聞く。次に一般化し、図5のような条件で釣り合っている場合、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $F_1$ 、 $F_2$  の間の関係をノートに書かせた。

図3、4のようなてんびんのつりあいは小学校でも取り扱われており、高校では図5のように一般化するだけでなく、うでの長さが、単に回転の軸から力の作用点までの距離ではなく、軸から作用線までの距離（軸から作用線に下ろした垂線の長さ）であることも学習している。

トルクの本論に入る前に、学生のこの辺りの把握状況を調べるために次のような問と実験を用意した。

問 ダンボールを切り抜きO点でつりし、点 $P_1$ 、点 $P_2$ に、同じおもりをつるしたところ釣り合った。 $P_1$ と同一鉛直線上にある点 $Q$ に、このおもりを付け替えるとどうなるか。

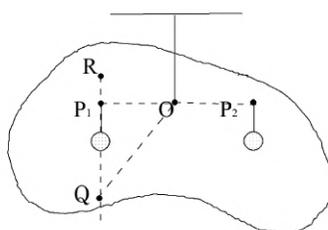


図6

- ① 時計回りに回転する。
- ② 反時計回りに回転する。
- ③ つりあったままである。

結果を示す。(12月21日実施)(正解は③)

- ① 時計回り 2    ② 反時計回り 23    ③ つりあい 12 (出席40名)

6割が「反時計まわり」を選んでいる。この実験を学習前の高校生を対象に行ったとき、「反時計まわり」を選んだ理由として「OQの長さが $OP_1$ より長いから」が多かった。おそらくそのような意識があるのだろう。3割程度の正解者は、トルクにおける腕の長さを既に理解していた可能性がある。

授業では、実際に点Qと点Rにおもりを付け替え、つりあったままであることを確認し、その上で、トルク(力のモーメント)における腕の長さとは何だろう、と問い、さらに、 $P_1$ 、Q、Rにおもりをつるしたとき、何が共通になっているだろうか、と問いかけた。それは力の作用線であり、軸からその

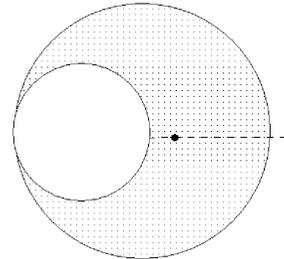
作用線への距離こそ腕の長さではないか、と強調してトルクに対する本格的な定義へ移った。

## 5. 質量中心について

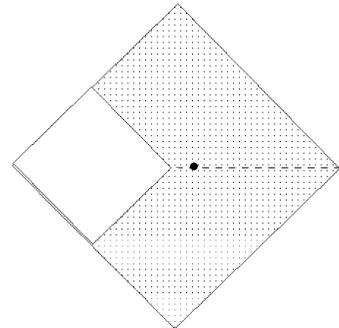
質量中心に関連する内容として二つ実験を演示した。これらは、理論的な説明の後の、確認、検証の目的に実施した。

### (1) 重心を支える

この教科書<sup>6)</sup>では触れられていないが、質量中心が重心としての意味を示す演示で、重心のまわりの重力によるモーメントがつりあう(和が0になる)性質、その点をつるしたり支えたりしたときにつりあう性質を示した。教科書には、図7(a)のように、円板から半径が1/2の円板をくりぬいた板の重心を求める方法が例題にある。(円形にするのは自分には難しいので)発砲スチロール板で、図bのように、正方形の板から辺の長さが1/2の正方形を切りとったものを用意し、板を水平にして、理論的に求められた重心の位置に鉛筆をあてて、つりあうことを示した。



(a)



(b)

図7

### (2) 質量中心の動き<sup>7)</sup>

質点系において、質量中心に着目すると、正味の外力が0の場合は、質量中心の速度は一定である。特に、最初に質量中心が静止していれば、その後も静止し続ける。

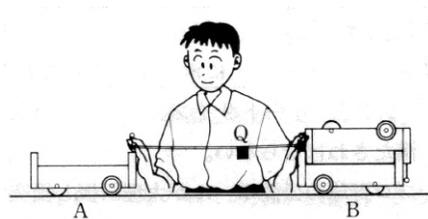


図8<sup>8)</sup>

図のように、台車AとBにゴムひもをつけ、台車Bにはもう1台をのせて質量を2倍にする。AとBに両手をかけていっぱい広げ、両台車の各質量中心間の距離を、質量の逆比である

2:1に内分した点Qに目印をつけておく。同時に両手を放し、A、Bが内側に向かって動いていくとき、Qはびたりと静止したままである。

「AとBとゴムひもからなる系に対して、手を放した後、摩擦が無視できれば正味の外力は0になる。質量中心は速度を変えないので、手を放す直前、質量中心が静止していればその後も質量中心は静止し続ける。」と説明した。

## 6. 慣性モーメントを実感する

剛体の回転の運動方程式  $\tau = I \alpha$  において、同一の  $\alpha$  (角加速度) を生じさせるのに  $I$  (慣性モーメント) が大きいほど、要する  $\tau$  (トルク) は大きくなる。つまり、慣性モーメントの大きな剛体ほど回転の角速度を変えにくい、つまり、回転に関する慣性が大きい、と言える。慣性モーメントの大小を実感してもらうために簡単な教具を作成した。

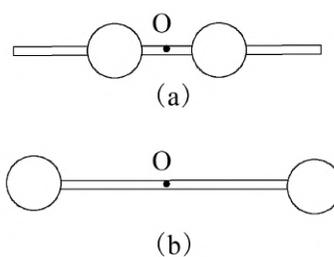


図9

割り箸に質量の同じ粘土球二つを箸の midpoint の近くにつけた場合 (a) と両端につけた場合 (b) において、 midpoint の点Oを通る軸のまわりに回転させたとき、後者の方が回しにくいことがはっきりと実感できる。もともと本学の西村太樹先生が、金属製の本格的なものを自作されて使われていたものを、筆者が見よう見まねで、あり合わせのものを利用して安直に作ったものである。教室の最前列の端にいる学生から順に回して行って、一人ずつ回しにくさの違いを実感してもらった。

## 7. おわりに

2021年度後期は後半から久しぶりに対面授業となり、そこで行った講義実験の主なものを紹介させていただいた。講義実験を振り返りに位置づける場合、問の予想を経て実験の演示後の教師側の展開は極めて重要だと改めて思った。予想が外れる学生が多かった場合、そこをフォローして、わかりや

すく、かつ、本質的な理解につながるような説明が特に必要であろう。

また、前に学んでいるのにもかかわらず、予想が外れる学生が続出した場合、筆者など落胆しがちであるが、何が主な原因になっているかを客観的に知ることは、「本質的で、かつ力がつき、しかもわかりやすい授業」に近づくための大きなヒントになるだろう。今回は、初めて録画によって自分の説明の至らなかつたところに気がついた。Zoom の投票機能やチャットなどは大いに活用できる。今回の経験を次年度以降の授業改善に是非役立てていきたいと考えている。

## 引用文献、及び注

- 1) 綿引隆文；「物理学の基本概念の形成及び発展を重視した高校物理教育の展開に関する研究」（茨城大学理工学研究科、博士学位論文、2006）  
122-130. で、予想 - 意見 - 実験のスタイルに対する多数の生徒の意見を掲載している。
- 2) 愛知・岐阜物理サークル；いきいき物理わくわく実験（新生出版、1988）85. をもとにしている。
- 3) 図は、筆者が執筆を担当した高等学校物理教科書の図を一部修正して転載した。  
（大槻他；物理 I B（実教出版、1994）86.）
- 4) 前掲論文 1) 114-117. 質量概念について、同様な感想が多数見られる。
- 5) 前掲書 2) 86-87 をもとにしている。
- 6) D. ハリディ他；物理学の基礎 1 力学（倍風館、2002）
- 7) 増子寛編著；手軽にできる実験集（1）（コロナ社、1989）44-45.
- 8) 図は、筆者が執筆を担当した高等学校物理教科書指導資料の図を一部修正して転載した。  
（大槻他；物理 I B 指導資料（実教出版、1994）81.

