

# 運動エネルギーと運動量との概念分化の試み —ニュートンのゆりかごを使った授業—

竹谷 尚人

千葉大学大学院人文社会科学部博士後期課程

運動エネルギーと運動量は別の物理量である。しかし、この2つの物理量はしばしば混同されてしまう。現行の学習指導要領・検定教科書は、力学の扱いが十分とはいえず、運動エネルギーと運動量を教えるための授業開発を進めることは重要だと考える。

そこで筆者は、1960年代に登場した「ニュートンのゆりかご」を再活用し、生徒に運動エネルギー・運動量を理解させることを試みた。

「ニュートンのゆりかご」には、複数の金属球がぶら下げられている。端の金属球を持ち上げ、残りの球へ衝突させるという実験を条件を変えて行い、その結果を生徒に予想・検討させることで、最終的には運動エネルギーと運動量とを理解させることを目指した。

実験授業の結果から、生徒はエネルギーの保存についてはおおむね理解しており、それを根拠として結果を予想し討論しているという様子が見られた。しかし、運動量を考慮せず実験結果を予想している場面も見られ、両方の完全な概念分化へは課題も挙がった。

**キーワード:** 「ニュートンのゆりかご」、運動エネルギー、運動量、エネルギー概念、物理基礎、振り子の運動

## 1. はじめに

筆者は工業高校の教員であり、例年、熱、熱エネルギーに関するいくつかの授業を担当しているが、熱概念を生徒たちに持たせることに苦慮している。

ただ、エネルギーを扱うことの難しさは現場レベルでは以前より言われていることである。

民間教育団体である科学教育協議会では、1960年代にエネルギー教育に関する議論が盛んにおこなわれていた。

特に林(1969)は、1958年学習指導要領の問題点を挙げ、「一つ一つの自然現象を個々バラバラに見るのではなく、原子論とエネルギーの側面から自然を統一してとらえるようにする」ために、「義務教育課程を終えるまでに、原子論とエネルギーの転化と保存の初歩的な理解がもてるようにする」ことを提起した<sup>1</sup>とあるように、学習指導要領の諸問題に抗する現場実践のあり方を述べた<sup>1</sup>。

しかし、八田(2018)が理科教室<sup>2</sup>(科学教育協議会編集雑誌)において「とはいうものの、林氏の論文から約半世紀が経過した現在でも、エネルギーをどう教えるか明確にできている実践は多くない」と主張しているよ

うに、現在までに、エネルギー概念構築のための道筋を示したとまでいえる実践が見当たらないのが実情ではないかと筆者も考える。

エネルギー概念はいくつかの学問分野にまたがる非常に広い概念であり、エネルギーを教えるときの中身、すなわちエネルギーの教育内容を確定させるのが難しい。

特に、エネルギー教育の入口と柱、すなわちエネルギー概念を構築するときに何から取り上げ、何を統一した概念として置くのかというのは、問題である。

林(1969)は、1958年学習指導要領においてはエネルギーが扱われていないこと、1968年学習指導要領においては中学校第3学年まで「エネルギー」という言葉を出すことを禁止していることを問題点として挙げているが、現行の学習指導要領(2008年学習指導要領)では、「エネルギー」は内容構成の1つの柱となっており<sup>3</sup>、電気、熱、力学を通して、中学校第3学年までにエネルギーを扱うという構成になっている。

現行の学習指導要領を概観すると、小学校第3学年から中学校第3学年まで毎年「電気」が置かれており、中学校第2学年で、電気が形態を変えるということをきっかけに、一応エネルギーとは「仕事の源」であるということ扱い、中学校第3学年において、力学的エネルギーが扱われるときに、「エネルギーとは仕事をする能力」であることが扱われる。

学習指導要領・検定教科書レベルでは、約半世紀の間、中学校3年生で初めて“力学に基づいた”エネルギー

Hisato TAKEYA : Attempts of concept differentiation of the kinetic energy and momentum –Classwork using the cradle of Newton–  
Graduate School of Humanities and Social Sciences, Chiba University

一を扱うということについては変わっていない。エネルギーは力学の進展過程で固まった概念であるということを見れば、力学を後回しとする立場は取るべきではないだろう。この点においては学習指導要領・検定教科書の立場は問題があると言っている。

筆者は、冒頭でも述べた通り、熱に関する授業を担当しているが、以前より熱を含むエネルギー概念を構築するための授業プランをまとめたことを考えている。エネルギープランの全体構想については、まだまだ検討が必要であるが、少なくとも「運動」を抜きにしてはエネルギー概念の構築は難しいのではないかと考えている。

そこで筆者は、エネルギー概念構築の手がかりを得るべく、運動エネルギーと運動量との概念分化について検討した。

工業高校の生徒たちを対象として、「ニュートンのゆりかご」を用いた授業を行い、生徒たちに運動エネルギーや運動量について考えさせたり、気がつかせたりすることによって、生徒たちの運動エネルギー・運動量概念の獲得を目指した。

以下に「ニュートンのゆりかご」の教材としての有効性、授業の様子、考察を記す。

## 2. ニュートンのゆりかご

この章では、「ニュートンのゆりかご」の仕組みや構造を確認し、運動エネルギーと運動量を扱ううえで、本教材が有効であることを確認する。

### 2.1. ニュートンのゆりかごの概要

はじめに、今回の授業で用いたニュートンのゆりかごを図1に示す。



図1 ニュートンのゆりかご

今回使用した「ニュートンのゆりかご」は、図1のように5個の金属球がつり下げられている<sup>4</sup>。糸を張った状態で金属球を持ち上げれば、残りの金属球に衝突し、反対側に持ち上げた数と同じ分だけ、金属球が跳ね上がる。

持ち上げた分の金属球と、衝突し跳ね上がる金属球は常に同じになるというのが、「ニュートンのゆりかご」の

動作の基本である。

ここで確認しておくが、そもそも、ニュートンのゆりかごは、物理学者アイザック・ニュートン<sup>5</sup>が作り出したものではなく、ニュートン以後、数々の研究者によって類似の振り子運動装置が作られたようであり<sup>6</sup>、今回、図1で示したような形に落ち着いたのは、1960年だといわれている<sup>7</sup>。

「ニュートンのゆりかご」はインテリアや建築物としても用いられることもあるが、動作原理に力学的エネルギーの保存、運動量の保存、弾性衝突が含まれており、動作を予想し、実験して確かめるという過程で、生徒が今挙げた物理法則を理解することができるのではないかと考えるのもと、授業実践を進めた。

次節に動作原理・物理法則を確認しておく。

### 2.2. 2個の金属球の衝突

本節では、「ニュートンのゆりかご」において金属球と金属球とを衝突させた時に力学的エネルギーが保存される原理を確認しておく。

実際授業で用いた「ニュートンのゆりかご」は金属球が5個であったが、まず2個の金属球に限って検討する。

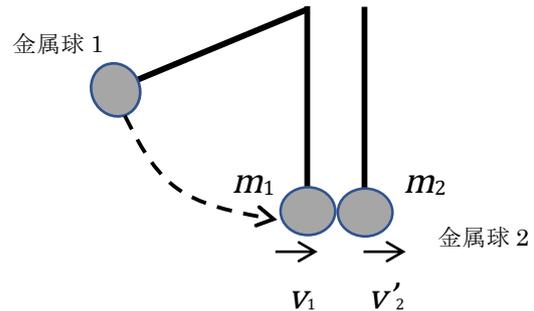


図2 2個の金属球

2個の金属球の質量をそれぞれ  $m_1$ 、 $m_2$ 、持ち上げる高さをそれぞれ  $h_1$ 、 $h_2$  重力加速度を  $g$ 、衝突前の金属球1の最下点の速度を  $v_1$ 、衝突後の金属球2が跳ね上がる時の初速度を  $v'_2$  とする。

このとき、金属球1の位置エネルギー  $E_{p1}$  は

$$E_{p1} = m_1 g h_1 \text{ となる。}$$

ここで、金属球や糸にかかる摩擦が無視できると仮定すると、金属球1の最下点の運動エネルギー  $E_{k1}$  は、

$$E_{k1} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \text{ となる。}$$

最下点で運動エネルギー最大となった金属球1は、同じく最下点にある金属球2へ衝突するが、金属球同士の接触面積が点であること、金属球の剛性が極めて高いこと、金属球がピアノ線で作られており各部の摩擦が非常に小さいことから、この衝突が完全弾性衝突と考える。

そうすると以下の2つのことがわかる。

(1) 2つの金属球の速度が完全に交換される

ここで運動量についても考えると、運動量  $p$  は質量  $m$  と速度  $v$  との積であり、 $p = mv$  とあらわされる。

運動量の保存により、 $m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v'_1 + m_2v'_2$  も成り立つ ( $v$  は衝突前の速度、 $v'$  は衝突後の速度である)。

この金属球同士の衝突は完全弾性衝突を仮定したため、反発係数  $e=1$ 、すなわち衝突前と衝突後の金属球 1、2 の相対速度は同じになる。よって、 $v'_1 - v'_2 = -(v_1 - v_2)$  が成立する。

衝突前の金属球 2 は静止しているのであるから、金属球 2 の衝突前の速度  $v_2$  は 0 である。

よって運動量保存の法則の式、相対速度の式は、

$$m_1v_1 = m_1v'_1 + m_2v'_2$$

$$v'_1 - v'_2 = -v_1$$

となる。この2つの式を連立させて解くと、 $v'_1 = 0$  かつ  $v_1 = v'_2$  が求まる。これは金属球 1 は衝突後静止し、金属球 2 は衝突後、金属球 1 が衝突した速度で運動を始めることを意味している。

(2) 金属球同士がエネルギー変換を繰り返す

2つの金属球を衝突させるとき金属球 1 を手で持ち上げることになるが、金属球 1 の位置エネルギー  $Ep_1$  は再下点に達したときに (摩擦の影響がないとすると) すべて運動エネルギー  $Ek_1$  に変換される。よって  $Ep_1 = Ek_1$  が成り立つ。

金属球 1、2 が衝突するとき、それぞれの運動エネルギーは、エネルギー保存の法則により、 $\frac{1}{2}m_1v_1^2 +$

$$\frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_1v'_1{}^2 + \frac{1}{2}m_2v'_2{}^2$$

となるが、(1) により  $v'_1 = 0$  が求まっており、また衝突前の金属球 2 の速度  $v_2$  は 0 であることから、運動エネルギーの式は、 $Ek_1 = Ek_2 =$

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 = \frac{1}{2}m_2v_2$$

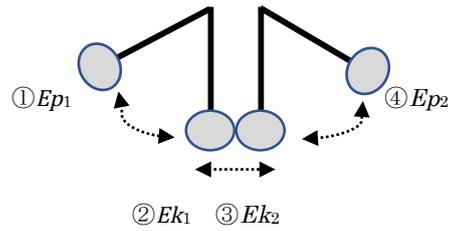
これは金属球 1 の運動エネルギー  $Ek_1$  は、すべて金属球 2 の運動エネルギー  $Ek_2$  へ変換されることを示している。

金属球 2 の運動エネルギー  $Ek_2$  は金属球が跳ね上がることによって、その運動エネルギーをすべて位置エネルギー  $Ep_2$  へ変える。

ここまでのエネルギー変換を整理すると図3のようになる。

①から④のエネルギーが、①→②→③→④→③→②→①…といった形で順番に繰り返し変換される。

これが、金属球が衝突と振り子運動続ける「ニュートンのゆりかご」の動作原理である。



- ①金属球 1 の位置エネルギー  $Ep_1$
- ②金属球 1 の運動エネルギー  $Ek_1$
- ③金属球 2 の運動エネルギー  $Ek_2$
- ④金属球 2 の位置エネルギー  $Ep_2$

図3 金属球の衝突によるエネルギー変換

なお、今回用いた「ニュートンのゆりかご」は金属球が5個ぶら下げられているが、金属球は剛体であるため、金属球 2 から金属球 4 の間を完全弾性衝突により、運動エネルギーが外部に散逸することなく極めて短時間に金属球 2 から金属球 4 へ伝播するため、図4のように一番外側の金属球 5 だけが跳ね上がるのである。

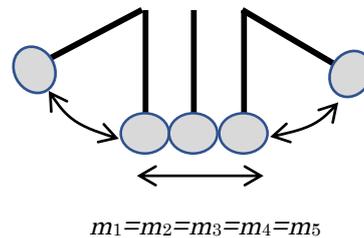


図4 ニュートンのゆりかご (金属球 5 個)

2.3. 摩擦によるエネルギー散逸の影響

本節で一つ確認しておきたいのが、摩擦によるエネルギー散逸が、金属球の振り子運動にどの程度影響を与えているのかについてである。

先ほど、「ニュートンのゆりかご」における金属球の運動は摩擦が無視できることが前提となると述べたが、実際には摩擦にエネルギー散逸がする影響は多少ある。ここでその影響についてもう少し述べておく。

実際に金属球を衝突させると、金属球が振り子運動を繰り返し、カチカチと音を立てるのであるが、カチカチと音がしていること自体、振動が空気に伝わっている証拠である。

また金属球が振り子運動をしていると、「ニュートンのゆりかご」自体がその影響で多少振動するが、それは金属球の運動エネルギーが剛体 (筐体) に伝播してしまっているためである。

このように実際は金属球の力学的エネルギーは外部に

散逸しており、筆者が試しに4個の金属球を持ち上げて動作させたところ、およそ30往復もすれば、振り子運動は相当減衰してしまい、最初に持ち上げた金属球の高さの半分程度までしか持ち上がらなくなってしまった。

しかしながら、今回の授業においては、授業者である筆者が金属球を持ち上げて離れたため、摩擦やエネルギー散逸の影響なるべく少なくなるように注意しながら実験を行い、かつ生徒らには反対側に何個の球が跳ね上がるかについてのみ注目させており、それについて生徒らは1回の衝突で結果を判断していた。

つまり可能な限り摩擦やエネルギーの散逸を防ぎ、かつ金属球の運動が1、2往復で生徒らが結果を判断し、実験を終えることができたため、実験の間は力学的エネルギー保存の法則がほぼ成り立っているとみなしてよい状況であった。よって今回の授業内の実験では、摩擦等によるエネルギーの散逸は問題とならないと判断できる。

#### 2.4. 金属球が3個以上の場合における衝突

今回の授業で用いたニュートンのゆりかごは金属球が5個あるが、基本的な動作原理は2.2節において述べたものと変わらない。すべての金属球の質量は同じであり、かつ金属球同士の運動エネルギーの伝搬について、完全弾性衝突が仮定されれば、金属球が2個の時と同じように衝突と振り子運動を続ける。

金属球を2個以上同時に持ち上げて手を離れた場合でも、基本原理は同じである。

2個同時に持ち上げた場合は、位置エネルギーは金属球1と金属球2の分之和  $E_{p1} + E_{p2}$  となり、金属球の質量はすべて同じであることから、位置エネルギーは金属球1個の時に比べて2倍となる。よって衝突し反対側に跳ね上がる金属球も2個跳ね上がることになる。

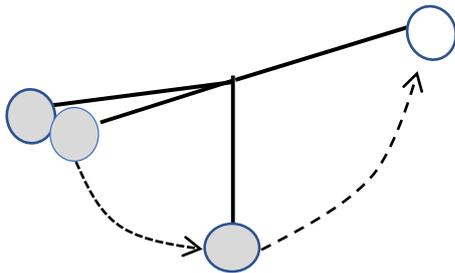


図5 持ち上げた高さよりも金属球が高く跳ね上がるモデル図（実際には起こらない）

ただ、力学的エネルギー保存の法則だけでは説明できないことが一つあり、例えば金属球2個を持ち上げて落下させて、金属球と金属球とを衝突させた場合、反対側の金属球1つだけが大きく跳ね上がるということがなぜ起きないのかについてである。

結論からいえば、図5のようなことは起こらない。こ

れについては、力学的エネルギー保存だけでは説明できず、完全弾性衝突における運動量の保存についても考える必要がある。

例えば、図6のように持ち上げる金属球の質量が大きい場合を考える。持ち上げた金属球の質量が  $M$ 、最下点にある金属球の質量を  $m$  とし、仮に大きい金属球と小さい金属球に2倍の質量差 ( $M=2m$ ) があるとする。

運動量  $p$  は保存するので  $Mv_1 = Mv'_1 + mv'_2$  となり、代入して解くと、大きい金属球の速度  $v'_1$  は  $\frac{1}{3}v_1$  となり、

小さい金属球の速度  $v'_2$  は  $\frac{4}{3}v_1$  となる。

また、運動エネルギーと位置エネルギーとが完全に交換された場合、小さい金属球  $m$  の跳ね上がる高さ  $h_2$  は、大きい金属球を持ち上げた高さ  $h_1$  の  $\frac{4}{3}$  倍高く跳ね上がる。

同時に大きい金属球も持ち上げた高さの  $\frac{1}{3}$  倍跳ね上がり、

$h'_1 = \frac{1}{3}h_1$  となる。

生徒らも図6のような場面についてはイメージできるようであり、例えばボーリング（球技）において、投げた球がそんなに速くなくても、ボーリングのピンが勢いよく跳ね飛ばされる様子は当然のこととして理解しているようである。

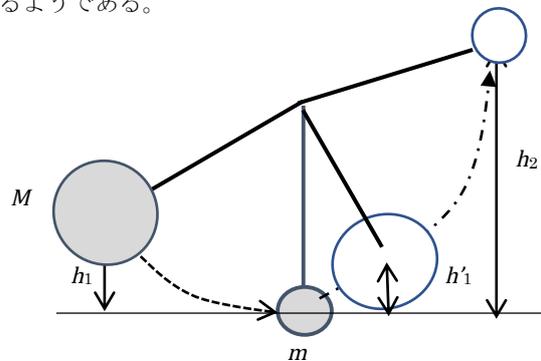


図6 持ち上げる金属球の質量のほうが大きい場合

「ニュートンのゆりかご」においても、金属球を持ち上げて落下させ、反対側の球が跳ね上がる時、運動量保存の法則が成り立っている。

仮に金属球が3個で、そのうちの2個を持ち上げた場合について運動量の保存を考えると、

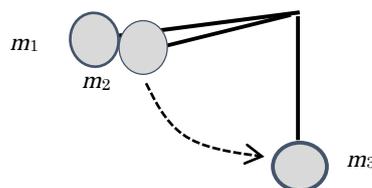


図7 3個の金属球の運動量の保存

図7において、金属球1と2が同時に落下し、金属球3に衝突するとき、金属球1と2が同時に金属球3に衝突しているように見えるが、「ニュートンのゆりかご」における金属球の衝突は完全弾性衝突とみなすことができ、金属内部を伝わる振動の速度は極めて速い。

物質同士の衝突においてエネルギー交換が行われるとき弾性変形し、その後元の形に戻るという過程を経るが、金属球3個あり、2個を持ち上げて衝突させた場合、まず衝突する部分が弾性変形するので、金属球2と金属球3が弾性変形を起こし、金属球2と3の形が戻ろうとする。

よって衝突する瞬間において図8の①、すなわち金属球2と金属球3との運動エネルギーの交換がまず行われる。

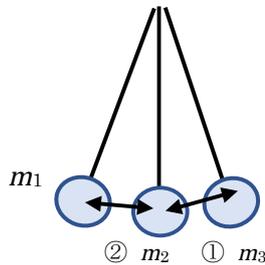


図8 3個の金属球が衝突する瞬間における運動エネルギー交換の順序

図8の①においては、先ほど述べた通り金属球2と3の運動エネルギーが交換され、金属球2の速度  $v_2$  は瞬時に0となる。

そこへ金属球1が衝突し、図8の②、すなわち金属球1と2の運動エネルギーの交換がなされ、再び金属球2は速度  $v'_2$  を得て、代わりに金属球1は静止する。

以上まとめると、金属球1と2を同時に落下させると、人間の目には2個の金属球が一瞬にして金属球3に衝突したように見えるが、金属球が衝突する瞬間においては、まず金属球2と3の衝突があり、次に金属球1と2の衝突があるので、2回の運動エネルギーの交換を経て、金属球2と3が跳ね上がる。

その時の金属球2と金属球3の速度  $v_2$  と  $v_3$  は運動量保存の法則  $m_2 v_2 = m_3 v'_3$  が成り立ち、 $m_2 = m_3$  であることから、 $v_2 = v'_3$  が成り立つ。同様に、 $v_1 = v'_2$  も成立するため、結果的に金属球を2個持ち上げて衝突させれば、反対側に2個の金属球が跳ね上がる、跳ね上がる高さは持ち上げた高さと同じになるのである。

## 2.5. 小括

本章ではこれまで「ニュートンのゆりかご」の動作原理を確認した。「ニュートンのゆりかご」において金属球を持ち上げて衝突させるとき、持ち上げた金属球と同じ

数、同じ高さまで金属球が跳ね上がるが、その動作原理は、力学的エネルギー保存および完全弾性衝突における運動量保存の法則によって説明されるということも確認できた。

今回用意した「ニュートンのゆりかご」は金属球が5個ぶら下げてある。よって、金属球を1個、2個持ち上げて離す場合と、金属球を3個、4個持ち上げて離す場合において、前節で述べた通りの運動量の保存についての理解がないと、生徒の実験結果の予想が揺らぐことが考えられる。

生徒らが力学的エネルギー保存の法則だけでなく、運動量保存の概念も理解した上で「ニュートンのゆりかご」を見ることができると注目すべきだと考える。

次章に、このニュートンのゆりかごを用いた授業について記す。

## 3. 実験授業について

本章では、「ニュートンのゆりかご」を用い、金属球を個持ち上げた場合、2個持ち上げた場合、3個持ち上げた場合、4個持ち上げた場合、そして真ん中の金属球を固定し、片端の金属球を1つ持ち上げた場合の計5通りの実験を行い、生徒たちに結果を予想してもらったときの様子およびその授業の分析結果を記す。

### 3.1. 実験授業の概要

実験授業は東京都立杉並工業高校の理工環境科2年生のクラスで2017年1月に50分2コマ連続の授業内で実施した。生徒は25人で内訳は男子23人女子2人である。

なお、実験授業を行ったクラスは筆者が非常勤講師として担当していたクラスであり、本実験授業は学校設定科目「環境化学工学」内で行った。授業者は筆者自身である。

「環境化学工学」の授業では、扱う内容に物質収支があり、本実験授業の前に運動エネルギーと位置エネルギーについては一応触れている。また、このクラスでは全員が物理基礎を履修しているため、検定教科書レベルで、力学的エネルギーに触れている。

授業は1回の実験ごとに1枚のプリントを配布し、実験結果の予想をし、クラス内の討論を経て、実験によって結果を確認するという方式をとった。

### 3.2. 金属球1つを持ち上げた実験

以下に配布した授業プリントを示す。なお、実験授業においては、プリントはA4サイズで配布したが、本稿においては紙面の都合上、図の一部を省いたり、本稿の様式に合うように編集したりして示す。

※授業プリント1ページ

(問題)

ここに金属球 5 つがそれぞれ糸につるされた装置があります。この装置の一番左の球 1 つを  $90^\circ$  分だけ持ち上げて離すと、どのようになるでしょうか。

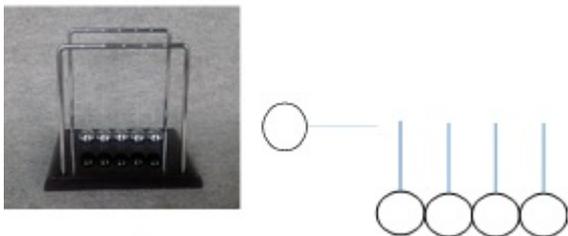


図 9 授業プリント 1 ページの図

(解答)

- ① 衝突するが、反対側の球は持ち上がらない。  
(球が止まってしまう)
- ② 衝突した後、反対側の球 1 つが持ち上がる。
- ③ 衝突した後、反対側の球 2 つが持ち上がる。
- ④ 衝突した後、反対側の球 3 つが持ち上がる。
- ⑤ 衝突した後、反対側の球 4 つが持ち上がる。

(あなたの答え)

(その理由)

(みんなの考え)

(正解)

授業開始後、ニュートンのゆりかごを示し、実験を行う旨を生徒たちに話した後、授業プリントを配布し、筆者が読んだ後、生徒たちに結果を予想してもらった。

正解と思われる番号で手を挙げてもらったところ、結果は以下の通りになった。

- |            |   |
|------------|---|
| ① 持ち上がらない  | 0 |
| ② 1 つ持ち上がる | 9 |
| ③ 2 つ持ち上がる | 0 |
| ④ 3 つ持ち上がる | 0 |
| ⑤ 4 つ持ち上がる | 0 |

この時の授業出席者は遅刻者や欠席者がいたので 20 人であったので、約半数は手を挙げなかった。参加しない生徒を出さないよう、全員が何らかの回答をするように促すべきだったと反省している。

授業後にはプリントを回収しており、そのプリントをみると、②以外を解答している生徒はいなかった。

教室全体の様子から判断すると、②1 つ持ち上がる以

外の答えはありえないのではないかとというのが生徒たちの考えの大勢であった。何人かの生徒に意見を言ってもらったのであるが、全員が②であるので、生徒間で討論らしい討論にはならなかったので、生徒に意見を言ってもらう時間を打ち切り、実験を行った。

実験を行い、正解が②ということがわかって、生徒たちの目立った反応はなく、②で当たり前という様子であった。

### 3.3. 金属球 2 つを持ち上げた実験

※授業プリント 2 ページ

(問題 2)

ここに金属球 5 つがそれぞれ糸につるされた装置があります。この装置の左側の球 2 つを  $90^\circ$  分だけ持ち上げて離すと、どのようになるでしょうか。

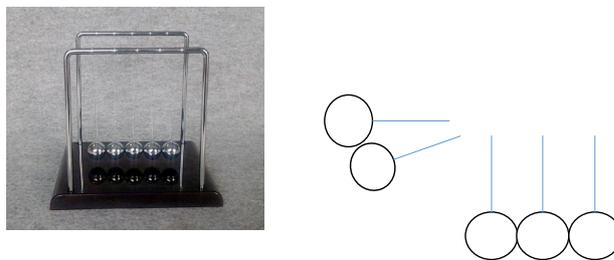


図 10 授業プリント 2 ページの図

(解答)

- ① 衝突するが、反対側の球は持ち上がらない。  
(球が止まってしまう)
- ② 衝突した後、反対側の球 1 つが持ち上がる。
- ③ 衝突した後、反対側の球 2 つが持ち上がる。
- ④ 衝突した後、反対側の球 3 つが持ち上がる。
- ⑤ 衝突した後、反対側の球 4 つが持ち上がる。

(あなたの答え)

(その理由)

(みんなの考え)

(正解)

授業プリント 2 ページは授業プリント 1 ページに続いて、今度は金属球を 2 個持ち上げて離した場合の結果を考えるものである。金属球 1 個の時に比べて、生徒らの活発な発言があった。解答は以下の通りである。

- |            |   |
|------------|---|
| ① 持ち上がらない  | 0 |
| ② 1 つ持ち上がる | 1 |

- ③ 2つ持ち上がる 14
- ④ 3つ持ち上がる 0
- ⑤ 4つ持ち上がる 0

先ほどの金属球1個持ち上げた実験の時に比べて生徒の発言が活発になり、「おもりが実は磁石なのでは」、「磁石のN極同士で反発するから持ち上がる」、「おもりが3つ持ち上がる」といった発言が見られた。

授業者である筆者は②と解答した1人の生徒にどうして②を選んだのかを質問したが、その生徒は恥ずかしかった様子で、「特に」と答えた。また、④に手を挙げなかったが、「おもりが3つ持ち上がる」と発言した生徒については、「おもりが3つ持ち上がる」と発言してすぐに、「やっぱり上がらない」と発言した。

金属球1個の時の実験の結果を知って、生徒たちはこの装置がどのような挙動を示すのかは、おおよそ掴んでいるものと考えられる。ただ恐らく生徒の中には「間違えたくない」という思いがあり、③を選んだ生徒が圧倒的に多かったことから、③が正解だと悟り、②や④と解答したり、③以外の意見を述べたりした生徒らは委縮してしまったと考えられる。とにかくクラス内は③で当たり前だろうという雰囲気が漂っていた。

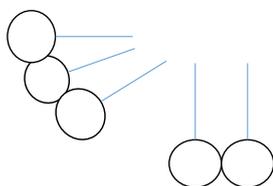
授業者である筆者が実験を行い、正解が③であることを確かめた。

### 3.4. 金属球3つを持ち上げた実験

※授業プリント3ページ

(問題3)

ここに金属球5つがそれぞれ糸につるされた装置があります。この装置の左側の球3つを90°分だけ持ち上げて離すと、どのようになるのでしょうか。



(解答)

- ① 衝突するが、反対側の球は持ち上がらない。  
(球が止まってしまう)
- ② 衝突した後、反対側の球1つが持ち上がる。
- ③ 衝突した後、反対側の球2つが持ち上がる。

図11 授業プリント3ページの図

(解答)

- ④ 衝突した後、反対側の球3つが持ち上がる。
- ⑤ 衝突した後、反対側の球4つが持ち上がる。

(あなたの答え)

(その理由)

(みんなの考え)

(正解)

授業プリント3ページは授業プリント2ページに続いて、今度は金属球を3個持ち上げて離した場合の結果を考えるものである。この実験においても、やはり生徒らの活発な発言があった。解答は以下の通りである。

- ① 持ち上がらない 1
- ② 1つ持ち上がる 2
- ③ 2つ持ち上がる 8
- ④ 3つ持ち上がる 4
- ⑤ 4つ持ち上がる 0

金属球が1個の時、2個の時とは違い、生徒の解答は割れた。生徒の一人が「3つのうち1つ止まる」と発言したが、これは持ち上げた金属球のうち1つが止まって、残りの2つが元々止まっている2つの金属球と衝突してその2つが持ち上がるという意味で発言したようであった。よって解答としては③の「衝突した後、反対側の球2つが持ち上がる」の意味であると判断できるので、この生徒の解答は③に含めることとした。

今回の「ニュートンのゆりかご」にぶら下げられている金属球は全部で5個である。そのうち3個を持ち上げたら、静止している球は2個である。静止している球は2個しかないのだから、2個しか持ち上がらないと考える生徒がやはり多いようである。

しかし実験をしてみると確かに金属球3個が持ち上がる。このページの実験では、生徒らの解答と実験結果にずれが生じた。生徒の多くは3個持ち上がるとは考えていなかったのに、答えは④の「衝突した後、反対側の球3つが持ち上がる」であった。

これは前章でも述べた通り、生徒の間に完全弾性衝突における運動量の保存が十分根付いていないからであると考えられる。

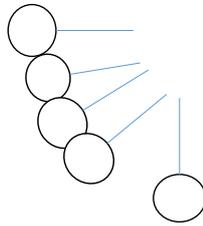
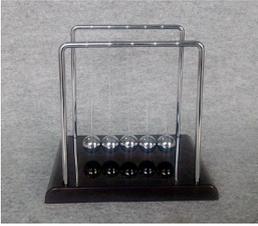
### 3.5. 金属球4つを持ち上げた実験

※授業プリント4ページ

(問題4)

ここに金属球5つがそれぞれ糸につるされた装置があ

ります。この装置の左側の球4つを90°分だけ持ち上げて離すと、どのようになるでしょうか。



(解答)

図12 授業プリント4ページの図

(解答)

- ① 衝突するが、反対側の球は持ち上がらない。  
(球が止まってしまう)
- ② 衝突した後、反対側の球1つが持ち上がる。
- ③ 衝突した後、反対側の球2つが持ち上がる。
- ④ 衝突した後、反対側の球3つが持ち上がる。
- ⑤ 衝突した後、反対側の球4つが持ち上がる。

(あなたの答え)

(その理由)

(みんなの考え)

(正解)

授業プリント4ページは、金属球を4個持ち上げて離したときの結果を考えるものである。授業プリント3ページが終わってから、すぐに生徒たちに配布し、結果を考えてもらった。生徒たちの解答は以下の通りである。

- ① 持ち上がらない 0
- ② 1つ持ち上がる 0
- ③ 2つ持ち上がる 0
- ④ 3つ持ち上がる 0
- ⑤ 4つ持ち上がる 12

金属球3個の時に比べて、無回答の生徒たちが増えてしまったが、解答した生徒たちは全員⑤の「4つ持ち上がる」であった。

これは明らかに前ページの金属球を3個跳ね上がる実験の実験結果を受けてであろう。元々の金属球が何個であっても、金属球を持ち上げて離した数だけ反対側にも金属球が跳ね上がるということを生徒たちが理解した結果であると言える。

無回答の生徒が数人増えた原因としては、答えが⑤で

決まり切っているからという雰囲気がクラスを支配したことが考えられる。

本実験で実験が4回目であり、今までの3回の実験では、すべて持ち上げた金属球の数だけ反対側の金属球が跳ね上がっていることから、生徒たちが実験結果を予測できるようになった、すなわち法則性を見出したといってもよいだろう。

ただ、その法則性を支えている原理である、運動量の保存、特に完全弾性衝突における運動量の保存の理解した上での解答かといえば、そうではないと考えられる。

金属球が3個の時の実験結果から、生徒らの考え方が変わったことは間違いのないだろう。最下点の金属球の数に関わらず跳ね上がる金属球の数は、持ち上げた金属球の数であることまでは生徒の考えが到達した。

ただそこに、運動量の法則のいう基本原則の上に考えさせることまで生徒らを到達させることまでは行かなかったことは今後の課題としたい。

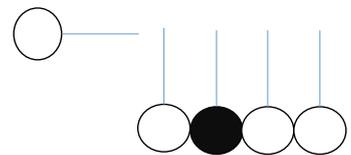
最後に、授業者である筆者が実験をし、4つ持ち上がることを生徒らと確認した。

### 3.6. 真ん中の金属球を固定し、片端の金属球を1つ持ち上げた場合

※授業プリント5ページ

(問題5)

ここに金属球5つがそれぞれ糸につるされた装置があります。真ん中の球をつかんで固定したまま、この装置の一番左の球1つを90°分だけ持ち上げて離すと、どのようになるでしょうか。



(解答)

図13 授業プリント5ページの図

(解答)

- ① 衝突するが、反対側の球は持ち上がらない。  
(球が止まってしまう)
- ② 衝突した後、反対側の球1つが持ち上がる。
- ③ 衝突した後、反対側の球2つが持ち上がる。
- ④ 衝突した後、反対側の球3つが持ち上がる。
- ⑤ 衝突した後、反対側の球4つが持ち上がる。

(あなたの答え)

(その理由)

(みんなの考え)

(正解)

休憩をはさんで、授業プリント 5 ページを配布した。授業プリント 5 ページでは、真ん中の金属球を手で押さえて、左側の金属球を1つ持ち上げて離すと、どのような結果になるのかを考えてもらった。生徒たちの解答は以下の通りである。

- ① 持ち上がらない 7
- ② 1つ持ち上がる 2
- ③ 2つ持ち上がる 0
- ④ 3つ持ち上がる 0
- ⑤ 4つ持ち上がる 0

休憩をはさんだことと、同様の実験が続いたので、手を挙げる生徒が半数に減ってしまったが、解答した生徒の多くは①の「持ち上がらない」に手を挙げた。

その理由として生徒らからは「力が真ん中で止まっちゃう」、「振動を抑える」という発言があった。

一方、②の「1つ持ち上がる」と解答した生徒の一人は「振動は変わらないで伝わる」と発言した。

①、②のいずれの解答をした生徒も、「振動」という単語が挙がった。生徒らは、金属球が衝突するとそれが振動になり、その振動が反対側の金属球に伝わるということまでは到達している。その上で、真ん中を抑えると「その振動は止まる」と考える生徒が多数となったようである。

実験に際しては、生徒らの中からもっとも腕の力の強いと思われる生徒を募り、その生徒に真ん中の球を抑えてもらい実験をした。

結果は反対側の金属球が1個上がった。正解は②の「衝突した後、反対側の球1つが持ち上がる。」である。実験をした瞬間、生徒から「1個上がった」という発言も見られた。生徒らにとっては意外な結果であったようである。

### 3.7. 解説プリントの配布と生徒たちの感想

5つの実験が終わった後、解説プリントを配布し、感想を書いてもらった。

※授業プリント 6 ページ

(解説とまとめ)

問題 1 から 5 に登場した装置は「ニュートンのゆりか

ご」という装置です。ただ、力学で有名なアイザック・ニュートンが実際に作ったものではなく、諸説ありますが、1967年にある俳優さんが作ったと言われています。ニュートンは作ったのではなく、ニュートンの名前が使われたのです。

さて、この装置の原理は基本的にはエネルギー保存の法則で説明できます。球を1つ持ち上げたとき、球1つ分の位置エネルギーが装置に加えられたわけですから、手を離せば落下し、運動エネルギーに変換されます。

そして衝突後、運動エネルギーが再び位置エネルギーに変換されるわけですから、1個分の球が再び持ち上がったというわけです。位置エネルギー、運動エネルギー、位置エネルギーと変換され、エネルギーの量は変わらないわけですから、持ち上げた高さと同じ位置まで持ち上がったというわけです。

これは球が2つ以上の場合でも同じです。3つなら位置エネルギー3倍、4つなら位置エネルギーが4倍となり、それぞれ3つ、4つの球が持ち上がります。

エネルギーの伝達は金属内部を通ります。金属は分子同士が非常に強固に結合しています。問題 5 のように、球を抑えていたとしても、金属内部を原子が振動することでエネルギーが伝わりますので、問題 5 と問題 1 が同じ結果（球が1つ持ち上がる）となったわけです。

さてでは、なぜ持ち上げた球と同じ球の数だけ反対側に持ち上がったのでしょうか。例えば仮に球を2つ持ち上げて、反対側の球1個が2倍の高さ持ち上がったとすれば、エネルギー保存の法則には矛盾しません。しかしながら例に挙げたようなことは起こりません。それは、エネルギーの伝搬と運動量保存の法則によります。

金属球は結合が強く、エネルギーをすぐに伝えます。仮に2つの球を持ち上げて衝突させても、1個目の球に衝突した瞬間、反対側の1つの球に瞬時に伝わります。そして、質量  $m$  と速度  $v$  の積を運動量といいます。この運動量もエネルギーと同じように保存します。球はすべて同じ質量なので、速度も同じになり、その結果持ち上がる球の数も同じになるというわけです。

授業プリント 6 ページは、授業プリント 1 ページから続いた「ニュートンのゆりかご」を用いた実験のまとめである。エネルギー保存の法則と金属内部の振動の伝搬については、実験によって生徒らはおおよそ理解したと考えられるため、この解説は確認としては役に立ったと考えられるが、後半部分の運動量保存の法則、すなわち運動量の概念については、解説を聞いても理解できないようであった。

例えば金属球をテープで止めて、反対側から金属球を落下させるなど質量  $m$ 、すなわち金属球がバラバラでない条件で実験をすることも授業プリントに盛り込むべき

であったと考えられる。

感想を見てみると「この実験を知っていた」、「何となく見たことがある」と書いている生徒がいた。しかし、全問正解の生徒はいなかったことを考えると、何となく見たことがあっても、完全衝突における運動量の法則といった力学の基本法則、原理・原則に基づいてこの装置の原理をしっかりと理解しているところまでは至っていないようである。感想の中にも「勘で答えてしまった」というものもあったことから、運動、エネルギーを一応知っていたとしても、運動量の概念が十分ではないために、科学的概念に基づいて実験結果を予想しているという生徒は見られなかったことは残念であり、運動量についてさらに踏み込んだ授業を開発し、今回の授業に続けることが今後の課題となろう。

#### 4. おわりに

これまで「ニュートンのゆりかご」を用いた授業について述べてきたが、授業内の生徒らの様子について、わかりにくい部分があったとすればまずお詫びしたい。

授業全体を振り返ると、金属球が1個の場合、2個の場合においては、エネルギーの基本法則、すなわちエネルギー保存の法則により、金属球1個を持ち上げただけで、金属球が2個跳ね上がるということはない、すなわち金属球を持ち上げた数だけ、反対側の金属球が跳ね上がるのは当たり前だと生徒たちは考えていた。

これは永久機関不能の原理がすでに生徒らに根付いていて、装置に入力された以上のエネルギーが出力されることはないということが生徒らには当たり前となっていることの表れだろう。

しかし、金属球が3個になると生徒らの解答は割れた。これは、生徒はエネルギー保存の法則を一応知っていても、系全体、すなわち全部で金属球が5個あるから金属球3個持ち上げても、反対側に3個跳ね上がるということまで想像できなかつたものと考えられる。

生徒にとって持ち上げる金属球と、最下点に残っている金属球は、全体で一つの系とは考えられず、別々に考えているのであろう。そこに完全弾性衝突における運動量保存と金属内の振動の伝播の理解があれば、生徒が実験結果を予想できた可能性もあるが、今回の実験では生徒の概念をそこまで到達させるには至らなかった。

ただ、金属球4個持ち上げたときの実験によって、生徒らは系全体、すなわち「ニュートンのゆりかご」全体の球の数から跳ね上がる金属球の数を予想し、正解に到達したことを考えると、今回の授業を通して系全体、すなわち「ニュートンのゆりかご」全体で力学的エネルギーが保存しているということについては、生徒らが理解したとっていいだろう。

しかしながら、そこに運動量保存の概念を導入して、エネルギー保存の法則とあわせて考えているというところまでは到達しなかったようである。

筆者は現場の教員として、工業や理科教育に携わっているが、運動量概念については生徒たちが苦手としている雰囲気を感じ取っており、生徒は検定教科書等で一応学習しているが、今回の実験のような場面でその知識を活用して考えるというところまで至っていないようであり、そのことが課題となったことは非常に残念である。

先ほど述べたように運動量の概念も含めて理解できるように今回の実験を再考し、授業プランの開発を進めたいと考える。

また最後に行った真ん中の金属球を抑える実験においては、生徒らは「振動」という言葉を使って意見を出し合ったことから、衝突によって運動エネルギーは振動に変わることは理解しているようである。しかし、振動の伝播の理解については課題を残しているようである。

筆者は原子・分子レベルでエネルギーについて、中等教育段階の生徒たちに考えさせること・理解してもらうことを最終的には目指している。今回のような実験がミクロの視点で考えられるためには、どのような授業プランの構築が必要かについては、再度検討し追って報告したい。

<sup>1</sup> 林淳一 (1969)「エネルギーをめぐる諸問題」理科教室、1969年7月号、pp.6-11

<sup>2</sup> 八田敦史 (2018)「主張 エネルギー概念をつかって自然科学を見渡そう」理科教室、2018年1月号、p.36

<sup>3</sup> 文部科学省 (2008)『中学校学習指導要領解説理科編』、p.14

<sup>4</sup> 現在市販されている「ニュートンのゆりかご」は金属球が5個のものが多いが、筆者は金属球が3個のものから9個のものまでであることを確認している。

<sup>5</sup> アイザック・ニュートン (1642-1727) イングランドの数学者、物理学者、天文学者。

<sup>6</sup> 参考までに記しておく、2つの物体の衝突に関する原理は、アイザック・ニュートンよりも前にエドム・マリオットによって明らかにされている。

<sup>7</sup> 1967年にイングランド人のサイモン・プレブルが、複数の金属球がすりさげられている置物を「ニュートンのゆりかご」と名付けて販売したのが始まりだといわれているが、筆者の調査ではその記録は見当たらなかった。

#### 謝辞

実験授業の場を与えていただいた東京都立杉並工業高等学校、そして筆者の実験授業に対して熱心に取り組んでくれた理工環境科の生徒にこの場を借りて感謝申し上げたい。