

# 運動エネルギー獲得プロセスについての誤解と授業戦略

— エネルギー学習における multiple representation —

物理科 勝田 仁之

## 抄録

本論文は、著者が物理基礎のエネルギー単元において採用した、multiple representation を活用した授業戦略を報告するものである。まず背景として、運動エネルギー獲得プロセスに関する生徒と教師によく見られる「運動エネルギーが変化すると、必ず仕事をされている」という誤解を指摘する。さらに、それを克服するための物理教育研究からの知見として、「系の特定」「熱力学第一法則の枠組みでのエネルギーの授業展開」「multiple representation を利用した授業戦略」の3つを紹介する。実際の授業における活用例として、吹き矢、および自由落下を例にとり、それぞれの運動エネルギー獲得プロセスを説明する。

## 1. 運動エネルギー獲得プロセスについての誤解と、克服に向けた物理教育研究の知見

本章では、物体が運動エネルギーを獲得するプロセスについての、強固な誤解を指摘する。さらに、その克服に向けた物理教育研究の知見を紹介する。

1.1 節では運動エネルギー獲得プロセスについての誤解を、実際の著者の授業例を通して指摘する。1.2 節では、その克服に向けた物理教育研究からの知見として、「系を特定する」「熱力学第一法則の枠組みでのエネルギーの授業展開」「multiple representation を利用した授業戦略」の3つを紹介する。

### 1.1. 運動エネルギー獲得プロセスについての誤解

高校物理基礎、あるいは大学初年度の力学の標準的な課程では、Newton の運動方程式を变形することで、仕事と運動エネルギーの関係を導出する。その結果、次の方程式を得る。

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \int_{x_1}^{x_2} F dx$$

なお、上式は1次元の運動の場合である。右辺の積分は、仕事  $W$  の定義である。高校課程では通常、力  $F$  が一定の場合を扱うので、

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F dx = F \Delta x$$

として表される。いずれにせよ、「物体がされた仕事  $W$  の分だけ、運動エネルギー  $\frac{1}{2}mv^2$  が変化する」ということを表している。中学理科の力学的エネルギーの単元でも、方程式では表さないものの、同様の内容は学習する。

ところが、この解釈について、多くの生徒に見られる強固な誤解がある。それは、「**物体の運動エネルギーが変化すると、必ず仕事をされている**」というものである。著者の高2物理基礎の授業課題を通して、その誤解の深刻さを見てみよう。

エネルギー単元の1時間目に扱った授業課題を、図1に示す。止まっていた人が走り出して、運動エネルギーを獲得したとき、この運動エネルギーはどこからきたのか？というものである。非常に単純な問題ではあるが、生徒の回答はどのクラスでも次の2つに分かれる。

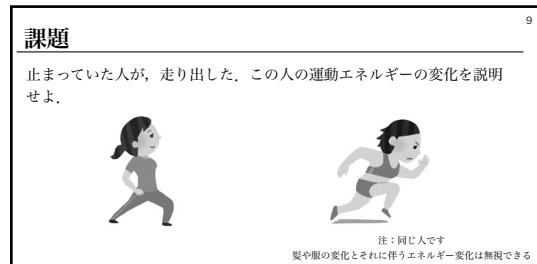


図1 運動エネルギーの獲得プロセスについての授業課題（著者の授業スライドより引用）

① 地面から仕事をされることで運動エネルギーを得た

② 体内のエネルギーを変換することで運動エネルギーを得た

明らかに、①の考えは不自然である。もしも地面からエネルギーを得ながら走れるのだとすれば、走ると疲れたり、速く走るためにトレーニングをすることの説明がつかない。明らかに不自然であるにもかかわらず、どのクラスでもおよそ半数の生徒が、①の考えに基づいた回答をした。

①の回答をした生徒たちは、先述した「物体の運動エネルギーが変化すると、必ず仕事をされている」という誤解を抱えている。運動エネルギー獲得プロセスを仕事に求めれば、人に水平方向の力を及ぼすことができるのは接触物体である地面だけなのだから、「地面が仕事をした」と回答するしかない。授業中、生徒にどうしてそのように考えたのかを説明させると、実際に前文のように回答する。

とはいえ、物理基礎を履修している高校生、つまり初学者であれば、はじめ①の考えに基づいた回答をしたとしても、他の生徒が②の考えを説明するのを聞いて、①の考えが不自然であることにすぐに気がつく。「ごはんを食べて蓄えたエネルギー」や、「筋肉のエネルギー」という考えの方が、「地面から仕事をされる」という考え方よりも遥かに合理的であることを納得してくれる。標準的な教科書や授業展開では、このようなことを考える機会がないだけで、決して受け容れがたい考え方ではないからだ。

一方で、誤解を抱えているのが教師だと、状況はだいぶ異なる。教師は初学者ではないので、現象に説明を与えるための他知識が豊富であり、なおかつ自分の誤った思い込みを認めがらない傾向にあるからだ。あえて参考文献は挙げずに、“著者の交流の範囲内”としておくが、現職の高校・大学教員でも「階段を上るとき、階段から仕事をされている」「ジャンプするとき、床から仕事をされている」というような、誤った主張をされたことは数えきれない。

そして、初学者である生徒たちと異なり、教員が相手だと「仕事ではなく内部エネルギーを変換しているのだ」という説明に納得してくれないことが多い。大抵の場合、著者が議論した相手の教員は、エネルギーで考えて決着がつかないので、より根本的な力学法則であるNewtonの運動方程式に基づいたモデルで説明することを試みる。例えば図1の状況であれば、水平方向にはたらく力は、地面からの摩擦力のみである。そして、冒頭に

示した  $\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = F\Delta x$  の関係は運動方程式から導かれる。それらの事実から、やはり地面仕事をしたのだと主張する。

そこで著者は、水平方向の力は静止摩擦力であり、作用点は動いていないのだから  $\Delta x = 0$ 、つまり仕事  $W$  もゼロではないか、と反論する。作用点が動かなければ、力積や運動量を与えることはできても、仕事はゼロである。するとたいてい相手は、「ミクロには変形している」という、的外れのモデルを持ち出してくる。力が有限で、変形が微小なのだから、その積である仕事がある値になるはずがないのだが。そのあとは大抵、水掛け論になる。

このよくある誤解の根本は何かというと、 $\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = F\Delta x$  の関係が単一の質点系の運動方程式から導かれる、ということを忘れている（もしくは知らない）ことにある。一方で、現実世界の人間や物体は、内部に構造を持ち、質点ではない。水平面を運動する力学台車ならともかく、内部エネルギーを変換して走る人間を、質点モデルで解析することはできない。そもそものモデルが不適切なのである。

## 1.2. エネルギーに関する誤解を克服するための物理教育研究の知見

物理教育研究の世界では、エネルギーの概念は初学者にとって、教師が想像するよりも遙かに抽象的で難解なものであると指摘されてきた。そして、多くの学習者が抱える誤解や困難を克服するための、教材や授業戦略も開発されている。例えば、Lindsey, Heron, Shaffer[1] は 2011 年に、系を特定することに関連した、エネルギー理解の困難を指摘している。多くの学生が、現象をエネルギーの観点から捉える際、系を正しく特定できないことによる困難を抱えていることが明らかにされた。特に、重力ポテンシャルが絡む問題になると、その困難は顕著になる。Chabay, Sherwood は 2019 年に、エネルギー自体やエネルギーに関する関係式の呼称が複数あることによる混乱、系の選択に関する困難、単一質点系と内部構造を持つ系の混同など、エネルギーの学習に関する典型的な問題を、整理してまとめた。これは、米国物理教員協会 (AAPT) が発行する *American Journal of Physics* における、エネルギー特集号の中のひとつの論文である。

これらの知見からまず、授業では常に、「いま、系は何か？」ということを明示する必要があると分かる。系の特定それ自体が学生にとって困難であるのに加え、教師が暗黙知として、同一の現象に対して文脈ごとに系を変えることも多い。初学者への十分な配慮が必要である。

また、物理の学習全体において、*multiple representation*[3] (数式, 図, 表, グラフ, 写真...など, 様々なものを組み合わせた多様な表現) が初学者の理解には非常に有効であることが、兼ねてから知られている。もちろんエネルギーについても例外ではなく、Heuvelen と Zou は 2001 年に、仕事とエネルギーの学習における *multiple representation* を利用した教授方略とその効果を詳しく報告している。結果は劇的な向上をもたらせた。特に、エネルギーの学習においては、bar chart や図示によって系外とのエネルギーのやり取り、系内でのエネルギー変換のプロセスを表現することが、学習に有効であるとされている。授業において、これらを利用しない手はないだろう。

さらに、Knight はその著書 “*Five Easy Lessons*”[5] の中で、*multiple representation* を活用した授業方略を、具体的に提案している。さらにその授業方略の中で、「はじめから (力学的エネルギーではなく) 熱力学第一法則の枠組みで授業を展開すること」「エネルギーの

*transfer* と *transform* を区別すること」を述べている。この Knight の教訓は、まさに前節で紹介した運動エネルギー獲得プロセスに関する誤解の、本質そのものである。人間が止まっている状態から走り出すときの運動エネルギーは、仕事という外部からの *transfer* ではなく、内部エネルギーを *transform* することで獲得しているのである。

国内では、右近[6]が2019年に、国内で伝統的に教えられてきた仕事とエネルギーの内容を、批判的に再検討している。その中でもやはり、系の選択の重要性や、エネルギー獲得プロセスに関する誤解が指摘されている。加えて、伝統的な教科書や授業が、必ずしもそれらの知見に基づいた構成になっていないことを、問題視している。

著者はこれらの知見に基づいて、前節で紹介したような典型的な誤解を生徒が乗り越え、エネルギーの概念を正しく構築できるような物理基礎の授業を目指し、設計している。その具体的な方略を、具体的な授業例とともに、次章で紹介する。

## 2. *multiple representation* を利用した授業戦略と実践例

本章では、著者が設計した *multiple representation* を利用したエネルギーの授業方略を、具体的な授業例とともに紹介する。2.1 節では、著者が授業で採用した *multiple representation* である「エネルギーの流れの図」と「bar chart」がどのようなものなのかを、1時間目の授業課題とともに紹介する。2.2 節では、「吹き矢」を題材とした運動エネルギー獲得プロセス、2.3 節では「自由落下」における運動エネルギー獲得プロセスを、エネルギーの流れの図と bar chart によって表現して示す。特に自由落下については、地球を系の中に設定するかどうかで、重力の効果を外力による仕事と扱うか、ポテンシャルとして扱うかが分かれる。よって、その両方の場合を紹介する。この違いも、*multiple representation* の利用によって、整理されて理解しやすくなると著者は考えている。

### 2.1. *multiple representation* の実際 — エネルギーの流れの図と、bar chart

著者の授業で強調する、伝統的な教授法と特に異なることは、「系を明確に特定する」「はじめから熱力学第一法則の枠組みでエネルギーをとらえる」「エネルギーの *transfer* と *transform* を区別する」ことである。これらの内容を *multiple representation* として、「エネルギーの流れの図」「bar chart」の活用によって実現した。

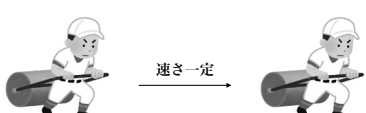
エネルギーの流れの図と、bar chart がどのようなものか、著者の授業では1時間目の授業課題を通して生徒に提示している。その課題のひとつを、図2に示す。野球部員が、ローラーを一定の速さで引いて、地面をならしている。このとき、ローラーの運動エネルギーは一定である。一方で、ローラーには明らかに、野球部員から仕事の形態でエネルギーが移動し続けている。

つまり、ローラーからは、野球部員からの仕事と同量のエネルギーが常に散逸しているこ

11

**課題**

野球部員が、ローラーを一定の速さで引いて、地面をならしている。



(1) ローラーのエネルギー変化について説明せよ。

(2) 野球部員のエネルギー変化について説明せよ。

(3) エネルギーが保存していると考えためには、系は何とすべきか？

図2 熱力学第一法則の枠組みでエネルギーの流れを考えるための授業課題（著者の授業スライドより引用）

となる。今の状況において、それは熱の形態でしかありえない。ローラー自体の温度も上昇しているであろうが、主に地面への熱散逸と捉えて差し支えないだろう。

この現象は、熱力学第一法則の枠組みで考えなければ、エネルギーの保存について説明がつかない。系を、野球部員・ローラー・地面までまとめて設定しなければ、エネルギーは保存しない。（もちろん、力学的エネルギーは保存していない。）このことを、「エネルギーの流れの図」として図3に、bar chartとして図4に示す。

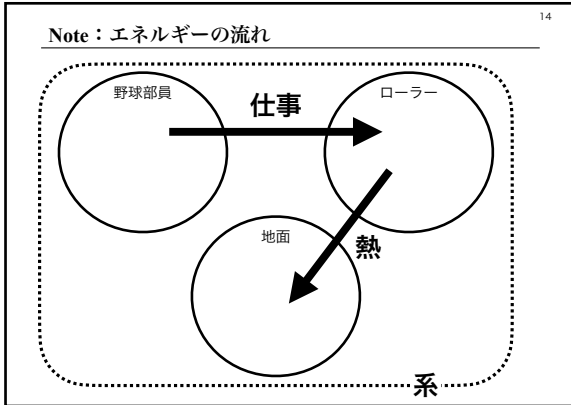


図3 エネルギーの流れの図：どの物体からどの物体にエネルギーが移動しているかを記入し、系を波線で囲う。この図では、エネルギーの移動が系内で完結しており外界とのやりとりがないので、系のエネルギーは保存する。

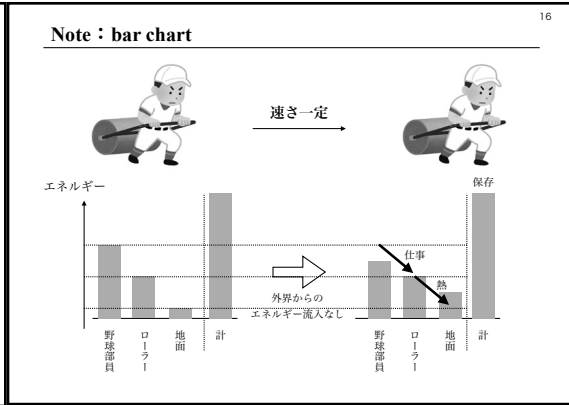


図4 bar chart：ある現象の前後で、系内の各エネルギーの変化を図示する。系外とのエネルギーのやりとりがある場合は、中央の右向き大きな矢印に書き込む。この図では、系外とのやりとりがないので、各種のエネルギーの量は変化しても、系内の合計は一定である。なお、この課題において各物体の持つエネルギーの絶対量は便宜的に表現しているだけで、変化だけに注目するためのものである。

図3のエネルギーの流れの図は、どの物体からどの物体へエネルギーが移動しているかを明示するものである。系と外界は、波線で区別する。系と外界との間にエネルギーの移動がなければ、系の全エネルギーは保存する。

図4のbar chartでは、現象の前後における系内の各エネルギー変化、および系内の合計を示している。2つのbar chartの間の大きな矢印の上下には、系外とのエネルギーのやり取りを記入する。図4の例の場合は系外からのエネルギーの流入がない場合であるが、一般には仕事や熱の形態で、外界とのエネルギーのやりとりがある。

エネルギーの単位におけるすべての授業を通じて、問題ごとの複雑さとは関係なく、すべての現象・課題についてこの表現方法を一貫して採用した。また、生徒にも、授業課題・実験レポート課題の中で、これらの表現方法を利用することを求めた。1時間目では著者から生徒へ方法を示した。その後の授業展開では、系内のエネルギーの種類や、何を系とするかは、著者から提示することもあれば、生徒に考えさせることもあった。また、この方法は運動量や質量といった保存則を考える際も、一貫して採用している。（著者の物理基礎の授業では、エネルギーの前に運動量を扱っている。）

## 2.2. 授業実践例①：吹き矢における運動エネルギー獲得プロセス

4時間目の授業で実施した、仕事と運動エネルギーの関係を考えるための2つの課題を図5に示す。ストローとマッチで吹き矢を作り、飛距離（水平方向）を考えるものである。飛び出したマッチは水平投射、ストロー内でマッチが息から受ける力は一定であるとみなす。飛距離は発射速度に比例することを確認してから、課題に取り組ませる。

<p><b>課題1</b></p> <p>ストローとマッチ棒で吹き矢を作る。 一定の勢いで息を吹き続ければ、一定の力をマッチに及ぼすことができる。また、水平投射にすれば、飛距離はマッチの発射速度に比例する。</p> <p>ストローを2本用意し、マッチAはストローの根元に設置し、マッチBはストローの真ん中に設置する。同時に吹いて発射すると、マッチAの飛距離はマッチBの何倍になるか？</p> <div style="text-align: center;"> </div>	<p><b>課題2</b></p> <p>マッチを2本つないで、質量を2倍にしたマッチをCとする。 マッチAとマッチCをどちらも根元に設置し、同時に吹いて発射すると、マッチAの飛距離はマッチCの何倍になるか？</p> <div style="text-align: center;"> </div>
--	---

図5 仕事と運動エネルギーを考えるための、2つの授業課題。ストローとマッチでできた吹き矢を作り、飛距離を比べる。課題1（左）においてマッチAとBを比べると、両者には同じだけの力がはたらくが、力がはたらく距離はAの方が2倍長い。課題2（右）においてマッチAとCを比べると、両者には同じだけの力が同じ距離に渡ってはたらくが、質量はCの方が2倍大きい。（著者の授業スライドより引用）

まず、エネルギーの流れを図示してみよう。今、マッチだけを系とすると、マッチは外力である息の力によって仕事をされ、その分だけ運動Eが増える。よって、エネルギーの流れの図は、図6のようになる。

課題1（図5左）では、同じ質量のマッチAとBの飛距離を比較する。息を吹き込む

<p><b>Note：エネルギーの流れ</b></p> <div style="text-align: center;"> </div>	<p><b>bar chart</b></p> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 20px;"> <div style="text-align: center;"> <p>運動E ↑</p> <p>ゼロ マッチA</p> </div> <div style="margin: 0 10px;"> <p>仕事 <math>F \times x</math></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>運動E ↑</p> <p><math>F \times x</math></p> <p><math>\frac{1}{2} m v_A^2</math></p> <p>マッチA</p> </div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>運動E ↑</p> <p>ゼロ マッチB</p> </div> <div style="margin: 0 10px;"> <p>仕事 <math>F \times \frac{x}{2}</math></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>運動E ↑</p> <p><math>F \times \frac{x}{2}</math></p> <p><math>\frac{1}{2} m v_B^2</math></p> <p>マッチB</p> </div> </div> </div>
--	---

図6 マッチの吹き矢におけるエネルギーの流れの図。系をマッチのみに設定し、外力である息の力による仕事のみで、運動Eを獲得する。

図7 マッチAとBのbar chart。AはBに比べて力を受ける距離が2倍長いので、仕事も2倍になり、獲得する運動エネルギーも2倍になる。

前、マッチAはストローの根本、マッチBはストローの中央にそれぞれ設置されているので、力のはたらく距離はAの方がBに比べて2倍長い。このことを、bar chartに表して、マッチAとBとで比較すると、違いが鮮明になる。bar chartを、図7に示す。

図7を見て明らかなように、マッチAの方が仕事として外界から得られるエネルギーはBに比べて2倍大きい。ストローの長さを  $x$ 、マッチの質量を  $m$ 、マッチA,Bの発射速度をそれぞれ  $v_A, v_B$  とすれば、仕事と運動エネルギーの関係は、それぞれ次のようになる。

$$(A) F \times x = \frac{1}{2} m v_A^2$$

$$(B) F \times \frac{x}{2} = \frac{1}{2} m v_B^2$$

つまり、発射速度の関係は

$$v_A = \sqrt{2} v_B$$

となるので、飛距離もマッチAの方が、マッチBよりも $\sqrt{2}$ 倍長いことになる。

著者の授業においては、実際にストローとマッチで吹き矢を作成し、演示実験で結果を検証する。2本の吹き矢を演示実験台上のスタンドに固定して、2本同時に息を吹き込むことによってマッチを発射する。着地点となる実験台上には、粘着テープを敷いておき、マッチが着地点から動かないようにしておく。飛距離はものさしで測定する。実際に実験してみると、Aの飛距離はBのおよそ1.4倍となり、先の計算結果を再現できる。

一方で、この課題に対する生徒の予想は様々である。「力が同じなので飛距離も同じ」、「Aの方が距離が2倍だから飛距離も2倍になる」など、「仕事」「運動エネルギー」といったキーワードが出てこない予想もたくさん見受けられる。仕事と運動エネルギーを直前の授業で学習済みであり、なおかつエネルギーの流れの図は共有した上で課題に取り組みさせているのだが、この時点では知識として活用する段階に至っていない生徒は多い。また、Aの方が仕事、そして獲得される運動エネルギーが2倍になるところまでは到達できても、そこから飛距離にまで考えの及ばない生徒も多い。

典型的な幾つかの意見を拾って発表させた後に、班ごとに予想について議論させる。その時点では、大半の生徒は飛距離が $\sqrt{2}$ 倍になるという結論に達することはできる。実際に実験して納得もする。しかしながら、実験後に著者から bar chart を示した説明を与えて初めて、腑に落ちる生徒は非常に多い。教員からすれば先に挙げた3行の式で簡単に計算できる課題ではあるものの、その解釈に必要な概念は抽象的で掴みにくく、またパラメータも多いので初学者には困難であるのだ。*multiple representation* の活用により、同一の現象に対して様々な側面からの解釈を与えることは、先行研究[1-6]で指摘されているように、確かに効果的であることが実感できる。

課題2(図5右)についても考えてみよう。この課題では、マッチA,Cとも、同じだけの力を同じ距離にわたって受ける。よって、同じだけの仕事をされて、同じだけの運動エネルギーを獲得する。ただし、マッチCは2本のマッチを束ねているので、質量はAよりも2倍大きい。このことを、bar chart で表すと、図8のようになる。

マッチAとCは同じだけの運動エネルギーを獲得するとはいえ、質量はCの方がAよりも2倍大きい。つまり、マッチA,Cの発射速度をそれぞれ  $v_A, v_C$  とすれば、仕事と運動エネルギーの関係は、それぞれ次のようになる。

$$(A) F \times x = \frac{1}{2} m v_A^2$$

$$(C) F \times x = \frac{1}{2} \times 2m \times v_C^2$$

つまり、発射速度の関係は

$$v_A = \sqrt{2}v_C$$

となるので、飛距離もマッチ Aの方が、  
マッチ Cよりも $\sqrt{2}$ 倍長いことになる。

授業中の演示実験では、マッチ Aと Cの飛距離を比較するのではなく、マッチ Bとマッチ Cを同時に発射する。課題1の結果から、 $v_B = v_C$ となるので、マッチ B、Cは同じ地点に着地する。演示実験でも、きちんと同じ位置に着地した。

課題2に対する生徒たちの予想は、「どちらも同じ飛距離」「マッチ Aの方が、

マッチ Cよりも $\sqrt{2}$ 倍長い」「マッチ Aの方が、マッチ Cよりも2倍長い」に分かれる。

同じ飛距離と（誤った）予想をする生徒の考えを聞くと、課題1の時に比べて仕事やエネルギーという言葉を活用する生徒は増えた。課題1のように、「力が同じだから」「距離が同じだから」という考えに基づいた生徒は少なく、「同じだけの仕事をされるから」ということには気付いている様子だった。しかし、運動エネルギーが質量に比例することまでは、考えが至っていない。2倍長いという予想の生徒は、ただ単に質量の比だけを考えていた。

なお、課題1でも2でも、仕事や運動エネルギーの関係をいわずに、Newtonの運動方程式を直接得ることによっても、もちろん正しい結果が得られる。実際、それを試みる生徒は、どのクラスでも数人はいた。しかしながら、特に課題1においては、Newtonの運動方程式を解くことで結論までたどり着くことは容易ではない。時間に関する情報が課題では与えられていないからだ。計算の途中で諦める、あるいは苦勞して正解に辿り着いた生徒は、より一層エネルギーの考え方が有益であることを実感するだろう。

### 2.3. 授業実践例②：自由落下における運動エネルギー獲得プロセス

前節では吹き矢の課題を通して、仕事と運動エネルギーの関係を、*multiple representation*の活用によって示した。本節では、位置エネルギーの考え方においても、*multiple representation*が有効であることを示す。著者の4時間目の授業では、「地面に置かれたボールを手で持ち上げ、手を離すと自由落下して運動エネルギーを獲得する」という現象を、系をボールのみとした場合、ボールと地球とした場合とを比較することで、位置エネルギーの考え方を導入する。（図9）前者では、ボールの自由落下に伴う運動エネルギーは、重力（=外力）による仕事として獲得される。一方後者の場合、重力は内力であるので、系内で位置エネルギーを運動エネルギーに変換することで、ボールの運動エネルギーが獲得される。それぞれの場合において、エネルギーの流れの図と bar chart を見てみよう。

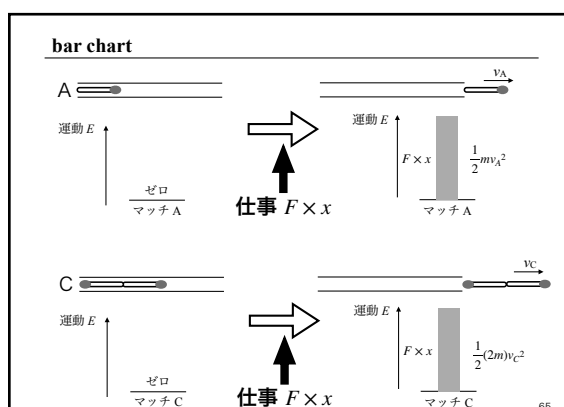


図8 マッチ A と C の bar chart。A と C は同じだけの力を同じ距離にわたって受けるので、仕事も獲得する運動エネルギーも同じになる。ただし、質量は C の方が大きいので、発射速度は A の方が大きくなる。



### 2.3.1. 地球を系外とし、重力を外力とみなす場合

先述したように、ボールのみを系とした場合、持ち上げる手からの力も、地球からの重力も、どちらも外力である。これらの外力の仕事によって、系のエネルギーは変化する。ボールを持ち上げている最中は、手の力による正の仕事と、重力による負の仕事がキャンセルするので、ボールの運動エネルギーはゼロのままである。手を離して自由落下をしている最中は、重力による正の仕事により運動エネルギーを獲得する。このことを、エネルギーの流れの図と bar chart で表すと、図 10 のようになる。


### 2.3.2. 地球を系内とし、重力を内力とみなす場合

89

#### 重力下の運動に対する2つの見方

もっと単純な現象を考えよう。地面に置かれた質量  $m$  [kg] のボールを、高さ  $h$  [m] のところまで手で持ち上げる。手を離すと球は地球からの重力を受けてどんどん加速、つまり球は運動エネルギーを獲得していく。

この現象は、「系」を何にするかで見方が変わる。



**これまでやってきたもの：系=ボールのみ**  
 → 系は外界(手 & 重力)から仕事をされて、エネルギーが変化する

**今回新たに扱うもの：系=ボールと地球**  
 → 系は外部(手)からされた仕事のみでエネルギーを獲得。重力は系の内部(地球)からの力なので、系のエネルギーを変化させない。

図9 ボールの自由落下において、系をボールのみとした場合と、ボールと地球とした場合での、運動エネルギー獲得プロセスの違い。(著者の授業スライドより引用)

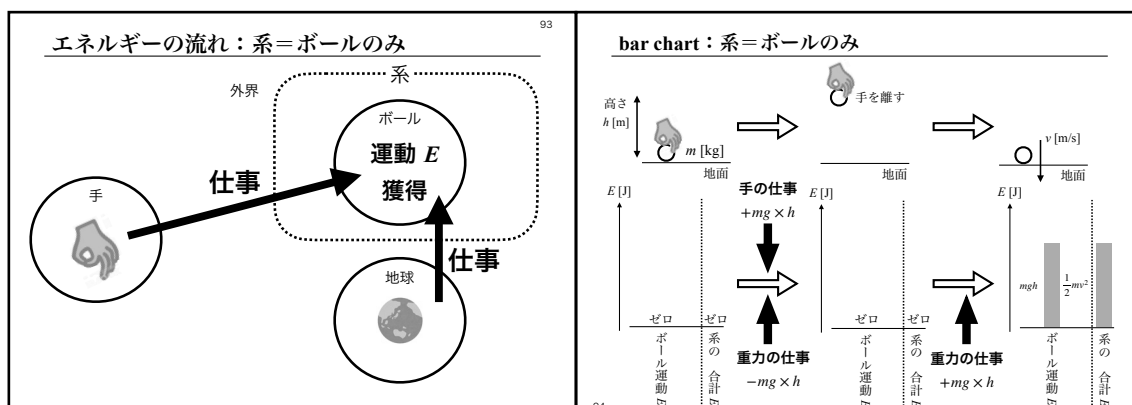


図 10 系をボールのみとしたときの、エネルギーの流れの図(左)と bar chart (右)。手で持ち上げる力も、地球からの重力も外力であり、系のエネルギーを変化させる。その仕事によってボールは運動エネルギーを獲得する。ボールを持ち上げている最中は、手の力による正の仕事と、重力による負の仕事がキャンセルするので、ボールの運動エネルギーはゼロのままである。手を離して自由落下をしている最中は、重力による正の仕事により運動エネルギーを獲得する。

今度は、系をボールと地球に設定して、系がボールのみの場合との違いを見ていこう。地球が系に含まれているので、ボールと地球が及ぼし合う重力は、内力である。内力は、系のエネルギーを増減させない。

一方で、手でボールを持ち上げる力は外力なので、その仕事は系のエネルギーを増加させる。一方、手で持ち上げても、ボールの運動エネルギーは変化していない。つまり、系内で何か別の種類のエネルギーが獲得されたことになる。これこそが、重力による位置エネルギー(ポテンシャル)である。手を離して自由落下をしている最中は、外界とのエネルギーのやりとりがないので、系のエネルギーは保存する。ボールの運動エネルギーは、

系内に蓄えられた重力による位置エネルギーを変換することで獲得される。このことを、エネルギーの流れの図と bar chart で表すと、図 11 のようになる。

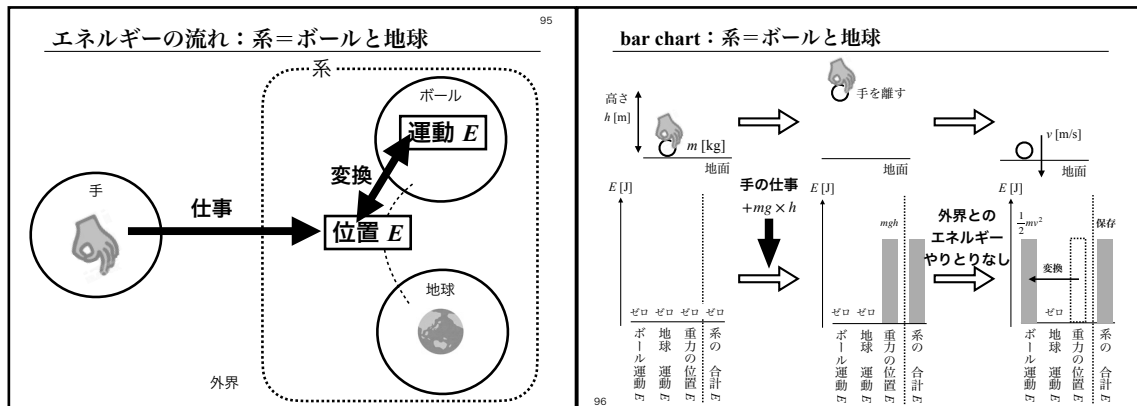


図 11 系をボールと地球としたときの、エネルギーの流れの図（左）と bar chart（右）。手で持ち上げる力のみが外力であり、その仕事として移動したエネルギーは、系内に位置エネルギーとして蓄えられる。重力は内力なので系のエネルギーを増減させない。手を離して自由落下をしている最中は、外界とのエネルギーのやりとりがないので、系のエネルギーは保存する。自由落下の際のボールの運動エネルギーは、重力の位置エネルギーを変換することで獲得される。

図 10 と図 11 を比較して明らかなように、位置エネルギーの考え方は、「系」の設定と切り離して考えることはできない。右近は文献[6]の中で、複数の質点からなる系を特徴付けるものは、それぞれの質点の運動と、各質点の配置であり、前者が運動エネルギー、後者が位置エネルギーであると説明している。位置エネルギーが配置で決まるエネルギーであるというのは、物理学の基本的な考え方のひとつである。図 10 のように単一の質点からなる系の場合、そもそも系内に「配置」という概念は存在せず、位置エネルギーは定義できない。著者の授業でも、このことは強調している（図 12）。

一方で、この事実は、多くの高校生、大学生、そして少なからぬ教員に、理解されていない。例えば国内では、高校物理基礎の検定教科書すべてにおいて、重力の位置エネルギーの単元において、地球を系に含めるかどうかについて全く触れられていない。それどころか、「ボールの持つ位置エネルギー」という表現が採用されており、あたかも単一の質点が位置エネルギーを持っているかのような表現になっている。

このことに関連した、生徒によく見られる誤りとして、ボールの運動エネルギーを求めるときに、重力の仕事と、重力による位置エネルギーの両方をダブルカウントしてしまうということが挙げられる。また、2つの惑星が及ぼし合う万有引力や、2つの電荷が静電気力を及ぼし合う際に、位置エネルギーはどちらの物体が持っているのか悩んでしまった

113

参考：粒子が集まった系（多粒子系）のエネルギー

複数の粒子からなる系を考えよう。  
この系を特徴づけるものはなんだろうか？

ひとつはもちろん、それぞれの粒子が、どのように運動しているかである。もうひとつは、粒子同士の配置関係であろう。

ただし、後者は粒子が1つだけだったら、「配置」という概念すらない。

前者は運動エネルギー、後者は位置エネルギーに対応する。位置エネルギーとは、系内の配置で決まるエネルギーである。

図 12 質点が集まった系を特徴付けるのは、各質点の運動に加え、質点の配置がある。配置で決まるエネルギーこそが位置エネルギーであり、単一の質点系には位置エネルギーは定義されない。（著者の授業スライドより引用）

り、どちらの物体も位置エネルギーを持つと考えてダブルカウントしてしまうことが挙げられる。

物理を教えたことがあれば、誰でもこのような生徒の誤り、あるいは質問に触れたことがあるだろう。さすがに教員は、この誤りは犯さないとはいえ、位置エネルギーについて系の選択と関連させた理解がない場合、「ダブルカウントはしないんだよ」と、理由の説明できない天下りの対応しかできない。生徒はモヤモヤとしたまま、問題を解くために教えられた方法を守るが、長年教え続けていると、そのモヤモヤは感じなくなる傾向にある。それどころか、モヤモヤさせずに、「よくある間違いはこうだけど、そうじゃないんだよ」と初めからパターンマッチングを促すような授業戦略を取るようになる。物理学、物理教育の目指すところとは程遠い。

位置エネルギーと系の設定をめぐる生徒の困難と、教科書や授業の状況は、海外でも同様な状況である [1-5, 7]。そして、それを克服するための教材の開発も進んでいる。国内においても、学会報告や論文の形では、同様な問題を指摘したものが近年は見られるようになってきた [6-12]。しかしながら、それらの研究結果が例えば検定教科書や、学習指導要領のレベルに反映されるまでの道のりは、まだまだ遠い。教科書に関しては、出版社が発行する以上は売れないものを作るわけにはいかず、どの教科書を買うかを選ぶのは生徒ではなく教員であるというジレンマもある。確かな理解を持った少数の教員の努力によって、草の根的な啓蒙にとどまっている現状が、なんとももどかしい。

### 3. おわりに

*multiple representation* の活用により、同一の現象に対して様々な側面からの解釈を与えることは、先行研究 [2-6] で指摘されているように、確かに効果的であることが実感できる。正直なところ、著者も前年度の授業で bar chart を初めて活用するまでは、その効果には懐疑的であった。しかしながら、bar chart を利用して説明を与えたときの、生徒への伝わり方は、それまでと明らかに異なった。そして、繰り返し授業で使っているうちに、生徒自身が課題の予想や版での議論に、自らエネルギーの流れの図や bar chart を活用するようになる。教員の経験や思い込みだけによらずに、物理教育研究の結果に基づいた授業を展開する必要性を、改めて思い知らされた。

最後になるが、明らかに教科書とは異なる授業の流れや、*multiple representation* の利用などにも文句を言わず、いつも率直に向き合ってくれた筑波大学附属高校の生徒たちに、心からの感謝を申し上げる。君たちと物理を楽しむ日々は、物理法則に反して、系の内部からエネルギーが湧き出てくる。

※本論文やエネルギーの授業に関する、著者への連絡先はこちら。

katsuda.phys.edu@gmail.com

### 参考文献

- [1] B. A. Lindsey, P. R. Heron and P. S. Shaffer, “*Student understanding of energy: Difficulties related to systems*,” *American Journal of Physics*, **80** (2), 154 (2012).
- [2] R. Chabay and B. Sherwood, “*A unified, contemporary approach to teaching energy in introductory physics*,” *American Journal of Physics*, **87**, 504 (2019).
- [3] S.E. Ainsworth, “*DeFT: A conceptual framework for learning with multiple representations*,” *Learning and Instruction*, **16**, 183 (2006).

- [4] A.V. Heuvelen and X. Zou, “*Multiple representations of work-energy processes,*” *American Journals of Physics*, **69**, 184 (2001).
- [5] R. D. Knight, “*Five Easy Lessons: Strategies for Successful Physics Teaching,*” Addison Wesley (2002).
- [6] 右近修治, 「仕事とエネルギー」概念の再検討, 理科教室 2019 年 11 月号, 81, 本の泉社 (2019).
- [7] J. W. Jewett, “*Energy and the Confused Student IV: A Global Approach to Energy,*” *The Physics Teacher*, **46**, 210 (2008).
- [8] 鈴木亨, 「蜘蛛の糸」と PSEUDOWORK, 物理教育通信, **166**, 109 (2016).
- [9] 西尾信一, 教科書に紛れ込んだ pseudowork, 物理教育通信, **167**, 36 (2017).
- [10] 西尾信一, 「仕事とエネルギー」の指導～動摩擦力のする仕事を扱うのはやめましょう, 物理教育通信, **169**, 58 (2017).
- [11] 右近修治, 「仕事とエネルギー」概念の検討 — 「糸」選択の重要性 —, 物理教育通信, **179**, 6 (2020).
- [12] 西尾信一, 仕事とエネルギーの指導についての提案, 物理教育通信, **179**, 15 (2020).