

Introducing Systematicity-Centered Physics Education at the First-Year Undergraduate Level from Learners' Perspectives: Focusing on the Introduction of Energy/Work and Potential/Conservative Force

学習者の視点に立ち、かつ体系性を重視した

初年級物理学の導入について

—エネルギー・仕事とポテンシャル・保存力の導入を中心に—

綿引 隆文

学習者の視点に立ち、かつ体系性を重視した初年級 物理学の導入について

—エネルギー・仕事とポテンシャル・保存力の導入を中心に—

自然科学系 物理学教育部門 綿引 隆文

はじめに

2019年の4月に東京都市大学に着任し、1年の物理学(1)(2)とリメディアル物理学を担当することになった。着任前は40年以上、高校の物理教師を務めていたので、大学の教師としては新米である。しかし、新入生も3月までは高校3年であり、その段階で、生徒がどういう所で誤概念を持ちやすいか、実態とそれを克服する双方向の授業展開については、40年という年の功¹⁾で経験と研究¹⁾をささやかながら積んできた。高校3年生が大学生になったとたんに、物理の基本概念をすべてクリアしているということはある得ないであろう。2018年に担当した高校3年生が、2019年、大学生になって自分の前にいると思えば、高校における自分の実践と大学の授業は不連続にはなっていないであろう。そのような気持ちで教壇にたった。教科書はハリデイ他の著作であり、わかりやすく丁寧な記述ということで定評がある。

自分が大学生の頃、実際に使った力学の教科書として、原島鮮氏や山内恭彦氏の教科書を思い浮かべる。特に山内氏の「一般力学」は、力学が美しい体系のもとにあることを整然と静かに述べていて、体系的で論理的に一貫した記述に惹かれていた私には魅力的であったが、それでは現実のリアルな現象にその体系をどう適用していくか、実際の演習における立式や計算力の養成となると、その本だけではカバーできない面を持っていたように思う。しかし、ハリデイは読者にとって興味深い例(柔道の背負いの技の極意、飛び板飛び込みの空中姿勢、客車2台を口にくわえたロープで引いたときの実話の例題など、驚くほど豊富)をふんだんに盛り込みながら、読者の興味を引き出しつつ、現象(問題)を解く力、計算力も同時に養成していく。説明は

簡潔、明快というより、むしろ饒舌と思えるくらい丁寧である。

しかし、筆者はこの書を読んでいてある種の違和感を感じるところもいくつかあった。学習者の立場に立ったとき、あるいは体系的記述、論理性から見たとき、新米の私が僭越ではあるが、教科書の記述はむしろこうした方がより良いのではないか、と思える事例にもいくつか遭遇した。その事例は、大きく分けて、慣性と質量、エネルギー、剛体の力学の3分野にまたがるが、紙数の制約があり、今回はエネルギー分野の導入に絞ることにした。もちろん、浅学非才の筆者のこと、誤解や独り合点も多いかと思う。教科書における導入と筆者が展開した導入を学生の感想や評価も参考にしながら振り返り、大学初年級の物理学の単元の導入について、あるべき姿を考えてみたい。

1 エネルギーと仕事の導入について

エネルギーや仕事の導入について、まず、ハリデイの教科書における導入の要点を述べ、筆者が感じる問題点を述べたい。

■ ハリデイの教科書の要旨

エネルギーという用語は非常に幅広く使われており、明確な定義は難しい。専門的に言うと、ひとつまたは複数の物体の状態（様子）を表すスカラー量である。本章では、エネルギーの一形態である運動エネルギーに焦点を絞って議論する。

運動エネルギーは運動状態を表すエネルギーで、物体が速く運動するほど、運動エネルギーも大きい。物体が静止しているとき、運動エネルギーはゼロ

である。次のように定義する。 $K = \frac{1}{2}mv^2$

仕事は、力が作用している物体へ（または物体から）移動するエネルギーのことである。（下線：筆者）

ここで、 x 軸方向をすべる質量 m の物体に一定の力 F_x を加え続けるとき運動方程式から一定の加速度 a_x を生じ、当然 $F_x = ma_x$ が成り立つ。等加速度運動だから $v^2 - v_0^2 = 2ax$

ここから $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = F_x d$ を得、右边を一般化し、 $W = \vec{F} \cdot \vec{d}$

とし、さらに $\frac{1}{2}mv^2 = K_f$ $\frac{1}{2}mv_0^2 = K_i$ とおけば

$$\Delta K = K_f - K_i = W \quad \text{となる。}$$

つまり、運動エネルギーの変化＝移動したエネルギー なの仕事の表式は $W = \vec{F} \cdot \vec{d}$ となる。

ここから仕事－運動エネルギーの定理を論じている。

■ 筆者の考え

エネルギーについては、エネルギーの定義は難しいということで明確な定義を避けているが、そのエネルギーという用語を使い「仕事とは物体へ移動するエネルギー」としている。熱も移動するエネルギーなので、これを定義とするのは不正確であろう。後でエネルギーや仕事の説明が十分になされようと、この導入に関しては、エネルギーや仕事の基本について初学者は十分なイメージが持てず、不安を覚えさせないか、懸念を抱かせた。

■ 筆者の導入

筆者が中学時代、仕事を $W = Fd$ として学んだとき、なぜ力×進んだ距離で仕事を定義するのか、その根拠は何だろう？と、疑問に思ったことを覚えている。その疑問が解けたのは、物理の教員になって、物理を歴史を通して見直した時である。つまり、仕事の原理の発見が、(力×進んだ距離) で表される物理量に重要な地位を与えたということである。

筆者の今年度の授業の要旨を述べる。

「紀元前 2000 年前のピラミッド建設で、最大 100m もの高さに 2.5 t もの石を持ち上げることがなぜできたのだろう。現在の学説では斜面を利用したらしいと考えられてい

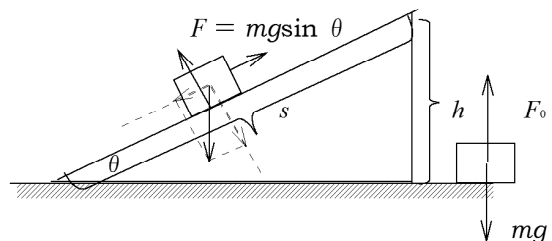


図 1

る。このとき、なめらかな斜面に沿って物体を持ち上げる時は、物体を、直接真上に持ち上げた場合と比較すると、力が小さくてすむ。

例えば図 1 のように、なめらかな斜面にそってつり合いを保ちながら物体を動かす場合を考えよう。このとき要する力の大きさ F は、 $F = mgsin \theta$ である。一方、動かす距離は斜面の長さを s として、力×距離 = $mgsin \theta$ 、

ここで $ssin \theta$ は斜面の高さ h になるから力×距離 = mgh となり、直接持ち上げる場合と等しくなる。

古代から用いられていた道具、動滑車、輪軸、てこなどにおいても同様に、道具を使うと、力が小さくて済む分、距離は長くなっている。そして、力×距離においては得も損もしていない。人力では、動かす距離が長くなっても、力で楽することが必要だったので、いろいろな道具が工夫された。

物体に力を及ぼし、ある距離動かすとき、力×動いた距離の量が非常に重要な量であることは古代から知られていた²⁾。この力×距離を力がした仕事と改めて定義しよう。」このように導入した。

筆者としては、まず、仕事を力×距離と定義する必然性を生徒に感じさせたかった。学習者が、単なる定義としてやみくもに受け入れさせられるより、その必然性を納得すれば安心感をもってその先に進んでいけると思う。エネルギーの定義を、筆者は、多くの教科書にあるように「仕事をする能力」とした。ハリデイは明確な定義は難しい、と述べている。確かに、熱の場合、取り入れた熱をすべて仕事に変える熱機関は存在しないわけだから、単に仕事をする能力としたのでは、不十分なことは確かである。

しかし、筆者は、学習の進行段階や学習者の発達段階に応じて、定義に 100% の厳密性を要求しなくとも良いと考える。例えば、力学段階であれば、エネルギーを従前の「仕事をする能力」で表して、差し支えないと判断する。運動エネルギーも、他者に対してなし得る仕事量として公式を導き、さらに、「仕事－運動エネルギーの定理」を導出した。ハリデイは「仕事によってエネルギーが増減する。仕事はエネルギーの流れである。」を強調している。その概念を大切にしつつ、筆者のように展開することは可能ではないか。

2 ポテンシャルエネルギーや保存力の導入について

■ハリデイの扱い

・ポテンシャルエネルギー

系の配置に関するエネルギーである。互いに力を及ぼしあう物体で構成されている系の配置が変化すれば、ポテンシャルエネルギーも変化する。

・重力ポテンシャルエネルギー

1996 年、新記録を出した Andrey の重量挙げを例にとり、バーベルと地球

の距離を引き離すときに彼の力がした仕事は、バーベルと地球の相対的な配置を変え、バーベル-地球系のポテンシャルエネルギーが変化した。

・仕事とポテンシャルエネルギー

トマトを投げ上げると、上昇するにつれ、重力の負の仕事が運動エネルギーの減少になる（仕事-運動エネルギーの定理）。このとき、エネルギーは、重力によってトマト-地球系のポテンシャルエネルギーに移動したと考えることによって話が完結する。

上昇においても、下降においても、重力ポテンシャルエネルギーの変化 ΔU は、重力がトマトに対してした仕事の符号を逆にしたものであると定義する。すなわち、 $\Delta U = -W$

以上の説明は、物理をすでに学んでいる者であればイメージすることができるが、初学者の場合を考えるとどうか、と思った。

トマトの投げ上げの話は、後で扱う力学的エネルギー保存を半ば前提にしている論理展開であり、論理の一貫性から気になった。

・保存力の説明

ハリデイは保存力の説明を三つあげている。

そのうちの二つ（粒子が閉じた経路を1周するとき、保存力が粒子に対してする正味の仕事は0…①、2点間を粒子が移動するとき保存力がする仕事はその経路に依らないこと…②）が同値の関係であることは多くの教科書で取り上げられている。ハリデイではその説明の前に、次のように定義する。

「系の配置が変化するとき、力は粒子状の物体に仕事 W_1 をして、その物体の運動エネルギーと系の他の形態のエネルギーの間にエネルギー移動を引き起こす。系の配置が逆転するときその過程で力は W_2 の仕事をする。このとき、 $W_1 = -W_2$ という関係が成立すれば、他の形態のエネルギーはポテンシャルエネルギーであり、働いている力を保存力と呼ぶ。」と定義している。

保存力のこの定義は、①や②を別な言葉で言い換えているものであることはわかるが、同時にポテンシャルエネルギーの定義も組み入れており、初学者にとっては分かりにくいのではないかと感じた。保存力の学問的な定義は①または②であり、運動エネルギーなどの文言は必要ない。ポテンシャルエネルギーの定義もイメージしにくいのではないか。学問的にも曖昧さがある。筆者が今年度、展開した内容の要旨を紹介したい。

■筆者の導入

$\Delta U = -W$ を定義とするのではなく、物理的意味がイメージしやすいポテンシャルエネルギーと保存力の導入を考え、それに基づいて $\Delta U = -W$ が定義ではなく自然に導出できるようにし、その後で具体例を盛り込んだ。

(1) ポテンシャルエネルギーの導入の工夫

まず、ポテンシャルエネルギーの用語としての概略的な意味を紹介した。

それは、物体の配置で決まる、仕事ができる潜在能力である。

標高 1500m 近い黒部湖の水は、標高が数mの霞ヶ浦の水に比べ、重力がする仕事において高い潜在能力（ポテンシャル）がある。それを使って大規模な水力発電が可能になる。復習と導入をかねて

「地上から h の高さにある質量 m の物体は、地上に物体が移動するまでに、重力が mgh の仕事をする潜在能力がある。 mgh の重力ポテンシャルエネルギーを持つ。」

(2) 保存力の導入

保存力とはどのような力なのか、重力を例にとり、明確にイメージできることをねらった。

問 太郎君が斜面を滑り降りて a 点から b 点まで移動するとき、重力がする仕事を求め m 、 h 、 g で表せ。次に、太郎君が a 点から c 点まで飛び降りて、水平に c 点から b 点まで水平に移動するとき、重力がする仕事を求めよ。

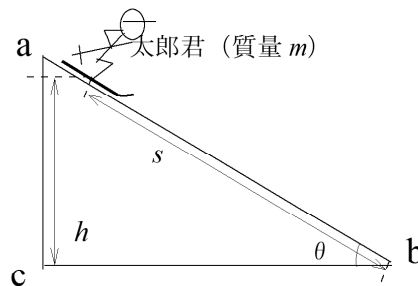


図 2

2つの道筋で、重力がする仕事は mgh になり、始点と終点で決まり途中の道筋に依らないことを示した。すなわち、基準点に対して、ある位置にある物体点に達するまでに重力ができる仕事が一義的に決められるので、その位置（配置）における位置エネルギー（ポテンシャルエネルギー）を確定できるのだ、という論理で説明した。保存力の定義を次のようにとった。

図 3 のように、ある 1 点から他の 1 点に至るまでに物体にする仕事が、一般に途中の道筋によらず、2 点の位置だけで決まるような場合、この力を保存力とい

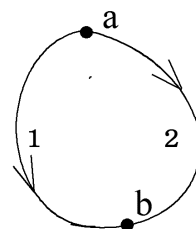


図 3

う。重力やばねの弾性力は保存力である。次の問いを考えさせる。

問 図3において、粒子が1の経路をたどり a 点から b 点まで移動し、その後、2の経路をたどって b 点から a 点まで戻るとき保存力がする仕事は0である。これを証明せよ。

問 図3において、一定の大きさ f の動摩擦力が働くとして、1の経路の長さを s 、2の経路の長さを s' とする。摩擦力が保存力ではないことを説明せよ。

(3) ポテンシャルエネルギーの求め方

図4の o 点に対する a 点のポテンシャルエネルギーは、a 点から o 点まで物体が移動したとき、保存力がいくらの仕事をする能力があるかを考えればよいだろう（つまり、 $U_a = W_{ao}$ ）。同様に b 点の o 点に対するポテンシャルエネルギーは、b 点から o 点まで物体が移動したとき、保存力がいくらの仕事をすることができるかを考える（ $U_b = W_{bo}$ ）。

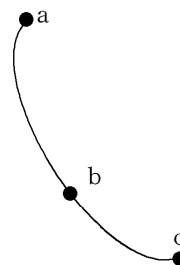


図4

問 a 点から b 点まで物体が移動する間に保存力が

する仕事を W_{ab} とする。 $U_b - U_a = \Delta U = -W_{ab}$ を示せ。

解) 始点と終点で決まる保存力の定義により、 $W_{ab} = W_{aob}$

$$\text{ところで } W_{aob} = W_{ao} + W_{ob} \quad \text{つまり } W_{ab} = W_{ao} + W_{ob} \quad \text{①}$$

o から b に向かうときの仕事は、b から o に向かう場合と逆向きになるので $W_{ob} = -W_{bo}$ ここで $U_a = W_{ao}$ $U_b = W_{bo}$ だから

$$\text{①式は } W_{ab} = W_{ao} - W_{bo} = U_a - U_b$$

$$U_b - U_a = \Delta U = -W_{ab} \quad \text{が導けた。}$$

つまり、ポテンシャルエネルギーを、基準の位置関係にくるまでに、いくらの仕事が可能かという方針で導入し、 $\Delta U = -W$ を導いた。次に、抽象的な印象があるこの式を具体例を通して実感させた。

問いかけ： h_1 の高さの a 点から h_2 の高さの b 点まで物体が落下するとき保

$$\text{存力がする仕事はいくらか? } W = mg(h_1 - h_2)$$

$$\text{ポテンシャルエネルギーの変化は? } \Delta U = U_b - U_a = mg(h_2 - h_1)$$

$\Delta U = -W$ の意味を、次のような言葉で表現する。

「保存力が仕事を行っただけ、ポテンシャルエネルギーは減少する。」または、「保存力に逆らって物体を移動させると、その仕事分だけ、ポテンシャルエネルギーが増加する。」

次に、具体的な数値で、 $\Delta U = -W$ の意味を実感してもらった。

「位置エネルギーが 300J の地点から 100J の地点に物体が降りてきた。このとき、重力がする仕事は (300J - 100J) で、ポテンシャルの変化 ΔU は

$$\Delta U = (\text{後の } U) - (\text{前の } U) = 100\text{J} - 300\text{J}$$

つまり、重力が 200J の仕事をしただけ、ポテンシャルは 200J だけ減少する。(逆に重力に逆らって 200J の仕事をする、ポテンシャルは 200J 増加) ハリディが重視する「系に着目する視点」を持ちながら、以上述べた説明をすることは可能と思われる。

3 教科書の導入と筆者の導入の方法に対する生徒の感想

授業では、まず教科書のポテンシャルと保存力に関する導入部分 (p.123 ~ 126) を約 10 分くらい読んでもらい、その後、筆者が自作プリントを基本に、演示等をまじえてこれまで述べたプロセスに基づいて授業を行った。その後で、次の (1) と (2) についての教科書と先生の説明について、リメクラスにおいてアンケート用紙を配ってそれぞれ (ア よくわかる イ 大体わかる ウ わかりにくい) から選択してもらった。

(1) 仕事とポテンシャルエネルギーの関係、 $\Delta U = -W$ の説明

(2) 保存力と非保存力の説明

アの回答に 5 点 イに 3 点 ウに 1 点を与え、その平均を算出した。

平均値 (37 名の回答) を示す。

(1) 教科書 2.2 先生の説明 3.6 (2) 教科書 2.4 先生の説明 3.5

正規のクラスの学生はアンケート用紙の準備が間に合わなかったため、自由記述で感想だけを書いてもらった。リメクラスでは、アンケート用紙の余白に感想を書いてもらった。

代表的感想を以下に示す。(リメ) の印がないものは正規のクラスの生徒によるものである。

・テキストでは $\Delta U = -W$ の意味がよくわからなかった。先生の説明で証明してくれたのでごくよくわかりました。また、具体的な例をまじえながらの説明でわかりやすい。

- ・テキストの、ポテンシャルエネルギーは配置によるエネルギーという説明はイメージがよくつかめなかった。
- ・教科書：「他の形態のエネルギー」がよくわからない。(リメ)
- ・教科書：「 $\Delta U = -W$ 」がよくわからない。(リメ)
- ・定義だった $\Delta U = -W$ が今までの力学の知識から導けること自体が理解に大きく影響しました。ポテンシャルエネルギーと仕事の関係を式で証明したことで、イメージから理論的に理解することができました。
- ・先生の説明 $\Delta U = -W$ の意味は「保存力が仕事を行った分だけ、ポテンシャルエネルギーが減少する」は絶対忘れない。公式の意味が理解できると計算しやすくなります。
- ・講義によってポテンシャルエネルギーがよく理解できた。教科書の説明より授業の方がわかりやすい。(リメ)
- ・先生の説明と例がとてもわかりやすかった。(リメ)
- ・教科書では、ポテンシャルエネルギーをうまくイメージできなかったが、先生の説明で理解できて良かった。

一人を除く圧倒的多数が、筆者の導入の方がわかりやすい、という感想であった。年の功で、教科書のこの論法はわかりづらいだろう、と予想したところは、大抵学生が同様な感想を寄せている。筆者の理解力が学生と同じ程度だからなのかもしれないが、学生の理解の難所を前もって察知できるというのは長所でもある。この長所？を今後とも生かしていきたい。浅学は自ら認めるところであり、先生方のご高評をいただければ幸いです。

最後に、初年級物理学の導入についての筆者の意見をまとめると、

1. イメージしやすい具体例から入る。演示をまじえるとさらに良い。
2. 定義は唐突にならないように1とリンクさせるとわかりやすくする。
3. 定義した後の展開は論理を透徹させ曖昧さを排する。その後で具体的な事例で定着をはかる(学んだ概念を学生の日常の事例に適用させたり、再発見させることは概念理解上重要である。実践報告として綿引隆文；物理教育 Vol.48 - 1 (2000) p.71-73)

注

- 1) 例えば、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」茨城大学大学院理工学研究科 博士論文(2006)
- 2) 例えばヘロン(I. アシモフ著『科学技術人名事典』共立出版(1971)

