

仕事・熱・エネルギーをどう指導するか ～エネルギー保存の法則をめぐる高校力学の再検討～

山本 明 利

北里大学理学部

要旨

わが国の物理教育界では近年「仕事とエネルギー」をめぐる議論が盛んである。学習指導要領において、理科の物理分野の柱である「エネルギー概念」の構築上重要なポイントであるが、それを議論する上で土台となる「系」の概念や、「仕事」の定義の問題が、わが国の中学校や高等学校の物理教育では曖昧なまま放置されてきた。そのため、現場では生徒のみならず教える教員側にも混乱が生じているので、整理すべきだという議論である。

本論では、これまでの経過を振り返り、仕事とエネルギーの関係を中学生や高校生にどう学ばせるかについて、考察し提案する。学びの終着点を「エネルギー保存の法則（熱力学第一法則）」と定めて、力学、熱力学の各単元の記述をそろえることで一体感を演出したい。その際、「系」の概念を早めに導入し、仕事や熱が系のエネルギーを増減させる移動量（flow）であることを明確にすべきである。現状、高等学校の物理基礎の教科書はいずれもこれらの要求を満たしておらず、改善が望まれる。

キーワード：仕事、擬仕事（pseudowork）、仕事の原理、系、エネルギー、内部エネルギー、熱、エネルギー保存の法則、熱力学第一法則、物理教育、理科教育法

1 先行研究の振り返り

事の発端は物理教育学会のメーリングリスト上のやりとりからだだったと記憶する。芥川龍之介の著名な短編「蜘蛛の糸」を例に、綱上りをする人の位置エネルギーはどこから供給されるかについて議論が行われていた。その詳細は本論の論旨から外れるのでここでは取り上げないが、議論に終止符を打つべく、鈴木亨が発表した論文¹に“pseudowork”なる概念が紹介されたことが私を含め多くの物理教育関係者の目を引いた。1970～80年代に米国で議論されていたとのことである。鈴木はこれを「偽仕事」と表記したが、本論ではその後の流れを考慮して「擬仕事」と訳すことにする。

その上で、西尾信一²や鈴木亨³が続く論文で整理したように

仕事 (real work) : 物体にはたらく力×作用点の変位 $W_r = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r}$

擬仕事 (pseudowork) : 物体にはたらく力×質量中心の変位 $W_p = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r}_{\text{com}}$

と定義する。 \vec{F} は合力、 $\Delta \vec{r}$ はその作用点の変位、 $\Delta \vec{r}_{\text{com}}$ は質量中心の変位を表す。なお西尾・鈴木は「重心」という表記を用いているが、本論では右近修治^{4,6,8,9}にならって「質量中心 (COM: center of mass)」と呼ぶことにする。

高等学校までの力学では、原則として物体を大きさや構造を持たない「質点」として扱う。物体が1個の質点として扱われる限り、 $\Delta \vec{r} = \Delta \vec{r}_{\text{com}}$ であって、両者の間には何ら差異を生じないのであるが、身近な例に当てはめようとして不用意に拡張適用すると混乱を生じる。

要するに、綱上りをする人や階段上りをする人は、力学的エネルギーを増やしていくが、張力や垂直抗力の作用点は動いていないので W_r は0である。これらの場合、力学的エネルギーの変化と等しい値を示すのは擬仕事 W_p の方であるが、綱や階段がエネルギーを失っているわけではなく、人体の内部で筋肉を使ってエネルギー変換が行われたことは明白なので、 W_p を用いた説明は不自然に感じる。変形する物体 (多質点系) ではこのようなパラドックスが生じる恐れがある。

物理教育にとってもっと深刻なことは、動摩擦を伴う力学現象で摩擦力のする仕事が擬仕事 W_p となることである。このことは西尾信一^{2,5,7}と右近修治⁴が指摘した。粗い面上を滑る物体が摩擦力によって静止し「熱が発生」という表現で、力学でよく扱われる問題が、かなりきわどい位置に置かれているということである。この場合、内部構造を持たず、したがって内部エネルギーもないはずの質点についての力学を、現実の物体に当てはめようとしているところに混乱の原因がある。西尾⁷が指摘するとおり、擬仕事 W_p は物体の並進運動のエネルギー変化だけを説明するもので、系のエネルギー変化をもたらす本来の仕事 W_r とは異なる概念である。西尾⁵は「動摩擦のする仕事を扱うのはやめましょう」とまで提案している。

これらの議論に深入りすることは本論の趣旨からそれるので、詳しい議論は参考文献1～10を参照していただくこととする。特に、右近修治の文献9で議論は尽くされていると思われる。学生向けには文献8の解説がわかりやすい。

重要なことはこれら一連の議論の中で、高等学校における力学・熱力学の教程の再構築が提案されていることである。学習指導要領において、理科の物理分野の柱である「エネルギー概念」の構築上重要なポイントであるので、以下では「では、どうすればいいのか」を具体的に考察していくことにする。その際指導原理とするのは、右近^{6,8,9}が提案する「系」選択の重要性と、文献7で西尾が提案する次の3項目である。

- ①仕事よりもエネルギーを先に扱うこと
- ②力学でも熱力学を意識すること
- ③擬仕事 (pseudowork) を使わないこと

2 「系」概念の導入

「系 (system)」という用語はわが国の中学校・高等学校の物理教育ではまだなじみがない。たとえば、「太陽系」といえば、太陽およびその万有引力の影響を受けて運動する天体や物質の一群をさす。太陽、惑星、小惑星、彗星あるいは微粒子などからなる集団をひとくくりにして、その外側の宇宙と区別して「太陽系」と呼ぶわけである。これと同様に、力学・熱力学で考察の対象とする質点あるいは物体の集まりを「系 (system)」という。質点系、物体系、物理系といった表現も用いられる。系の選び方は任意である。系内の物体はひとつでも複数であってもよい。系外の他の物体はすべてまとめて「環境」と呼ばれる。環境は系に作用して系の状態に影響を及ぼす可能性がある。

上で述べたように「系」という言葉にはなじみが薄いだが、他にしっくりくる訳語も思いつかないことから、本論文でも名称は「系」で通すことにする。

右近^{6,8,9,11}はエネルギー保存の法則（熱力学第1法則）の概念を図1のように整理している。以下ではこれを「右近ダイアグラム」と呼ぶことにする。四角い破線が系の範囲を示す。

右近ダイアグラムは、系内のエネルギーは内力の作用により互いに交換される

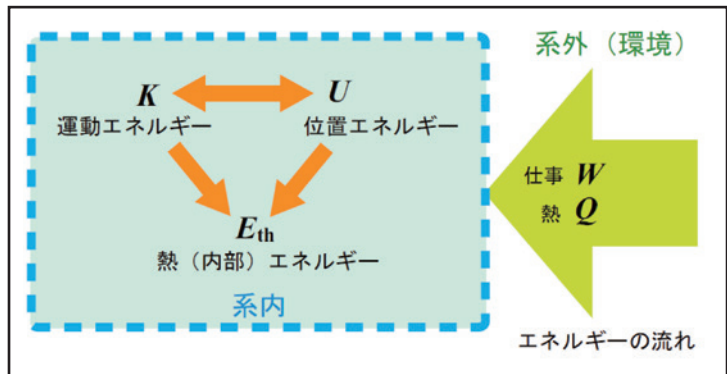


図1 右近ダイアグラム（エネルギー保存の法則）文献11より

ほか、その総量は環境との間で出入りする仕事や熱の分だけ増減することを表現している。環境から系にエネルギーが移動すれば系の総エネルギーは増し、その分だけ環境のエネルギーは減少する。系の取り方によらずこのことが成り立つというのがエネルギー保存の法則である。エネルギーは例外なく保存する。この概念を身につけることこそが学習指導要領・理科のエネルギー分野の到達目標である。

ここでは仕事や熱はエネルギーの移動量 (flow) であるという理解も大切である。系を確定しないと、移動量である仕事や熱と系内のエネルギーを区別することができない。本来、系の確定はエネルギーの保存や仕事とエネルギーの関係を論じる際の前提なのである。

右近ダイアグラムの理解に到達することを目標として「系」概念を導入するタイミングはなるべく早い方がよいと思われる。どの物体（あるいは質点）を考察の対象としているかを明確に意識するために最初に系を宣言するとしたら、力のつりあいや運動の法則を学ぶ単元だろう。

図2のように机上の物体にはたらく力のつりあいを考える際に、「着目する物体にはたら

く力だけを力の合成の対象にすること」「反作用は他の物体にはたらく力だから、作用と反作用はつり合うとはいわない」などの指導はすでに高等学校はもとより、中学校でも行われているところである。これを「机上の物体だけを系内の物体と考え、机や地球は系外の物体（環境）であるとする」と宣言した上で、力の合成は「系内の物体にはたらく外力のみを対象にする」と指導すればよいわけである。ちなみに「外力」とは系外の物体から系内の物体にはたらく力のことである。

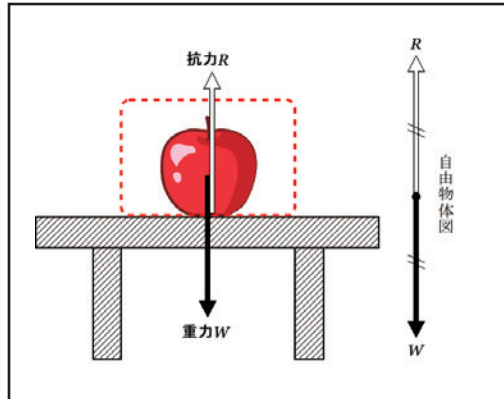


図2 系の範囲を明確にする 文献11より

高等学校の物理基礎では、図3のように力をおよぼし合いながら運動する二物体の運動方程式を立てる際に、個々の物体に分けてそれぞれ力の合成を行った上で、個別に運動方程式を作り、連立方程式として解くことを指導する。これも実は系を用いた考え方に他なら

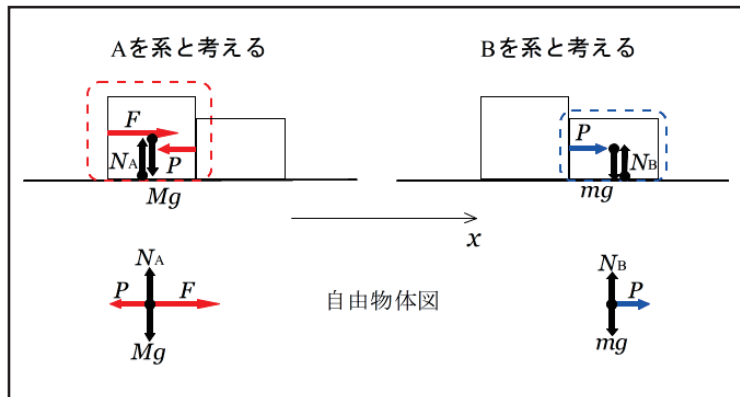


図3 二物体をそれぞれ個別に系と考える 文献11より

ない。図3の場合、物体Aのみを系内と考えて図3左側のように外力をリストアップし、合成して運動方程式を立てる。次に視点を移して図3右側のように物体Bのみを系内と考えて同様の考察を行う。このとき物体Aは系外となり、物体Aが物体Bを押す力Pは外力となる。

一方、同じ問題を図4のようにA・B二物体を一括して含む系で考えることもできる。この場合、両物体が相互に押し合う力Pは内力（系内の物体が相互におよぼし合う力）とみなされ、作用反作用の法則により相殺してしまう。このような考え方も「系」という言葉こそ用いないが、高等学校ではこれまでも指導されてきたことである。つまり、言葉になじみがないとはいえ「系」概念を力学に導入することはそれほど難しいこ

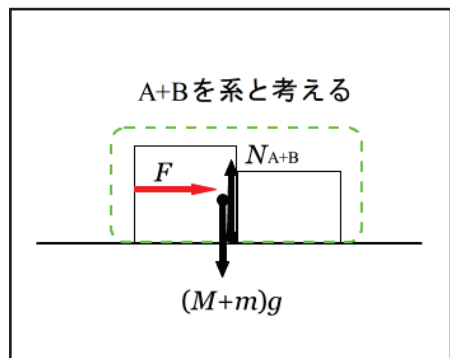


図4 二物体をまとめて系と考える

とではない。

このように、着目する物体の範囲を明確にして、考察の助けとすることだと理解すれば、「系」概念の導入を、中学校や高等学校・物理基礎の早い段階で行うことは可能である。系と環境を明確に区別する習慣を早めに身に付けることは、その後の学習にあたって有意義だろう。

3 エネルギーを仕事より先に位置づける

西尾信一⁷は「仕事よりもエネルギーを先に扱うこと」を提案しているが、現状はどうであろうか。現行の中学校理科の教科書（2021年使用開始）と高等学校・物理基礎の教科書（2022年使用開始）の記述を比較してみたのがそれぞれ表1および表2である。

高等学校・物理基礎の配列は判で押したように全社一致して、仕事の定義から入り、仕事の原理（道具を使っても仕事は得しない）に触れた後、運動方程式を変形する形で「仕事と運動エネルギーの関係」を導き、運動エネルギーを定義した後に重力／弾性力による位置エネルギーを登場させている。式変形というロジックにこだわった結果だと思われる。

これに対し、中学校では式変形にこだわる必要はないはずであるが、多くの教科書がやはり仕事の定義を先行させ、その後位置エネルギー、運動エネルギーという配列をとっている。5社中ただ1社だけ、文献12の教科書がエネルギーの紹介を先に出し、運動エネルギー、位置エネルギーという並びになっている。

文献12ではエネルギー単元の冒頭で、モーターや照明、スピーカーの例を挙げて「このようにさまざまなはたらきができるとき『エネルギーをもっている』と表現する。」とし

文献番号	12	13	14	15	16
教科書番号	理科901	理科902	理科903	理科904	理科905
出版社(略称)	東書	大日本	学図	教出	啓林
エネルギーの定義	さまざまなはたらきができるとき「エネルギーをもっている」と表現する	仕事をする能力のことをエネルギーという	仕事をするができる状態にある物体はエネルギーをもっているという	仕事をするはたらきの大きさのことをエネルギーという	ある物体が別の物体に仕事をする能力をエネルギーという
仕事／エネルギーの配列	エネルギーが先	仕事が先	仕事が先	仕事が先	仕事が先
運動／位置エネルギーの配列	運動が先	位置が先	位置が先	位置が先	位置が先
重力による位置エネルギーのありか	物体	物体	物体	物体	物体

表1 中学校・理科（3学年）の教科書（2021年使用開始）の記述比較

文献番号	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
教科書番号	物基701	物基702	物基703	物基704	物基705	物基706	物基707	物基708	物基709	物基710
出版社(略称)	東書	東書	実教	実教	啓林	啓林	数研	数研	第一	第一
仕事の原理を明示しているか	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
運動／位置エネルギーの配列	運動が先	運動が先	運動が先	運動が先	運動が先	運動が先	運動が先	運動が先	運動が先	運動が先
重力による位置エネルギーのありか	物体	物体	物体	物体	物体	物体	物体	物体	物体	物体
弾性力による位置エネルギーのありか	物体	物体	ばね	物体	ばね	ばね	物体/ばね	物体/ばね	物体	物体
位置／内部エネルギーの記号の区別	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

表2 高等学校・物理基礎の教科書（2022年使用開始）の記述比較

てエネルギーを一般的に位置づけ、さまざまなエネルギーの形態を紹介し、ページを改めて力学的エネルギーの説明に入っている。エネルギーを増減させる量として「仕事」が登場するのはその後の節である。本来的には文献12のこの配列の方が自然で、学習者にとっても受け入れやすいのではないか。他社の記述は高校物理の配列に引きずられてはいないだろうか。

そもそも「エネルギー」の概念は教える側の立場からすれば漠然としていて説明しにくいものである。辞典で「エネルギー」の項を引いてみると、培風館の物理学辞典²⁸では「物理学では物体や系がもっている仕事をする能力の総称」とされ、岩波の理化学辞典第5版²⁹では「閉じた系で普遍的に保存されるという意味で最も基本的な物理量」とあって、その後いろいろな種類のエネルギーを例示することにより全体像をイメージさせようとしている。

エネルギーを一般的に定義することは容易ではないが、最も中心になる概念としてエネルギーがあり、そのエネルギーの移動量として仕事があるという位置づけからすれば、まず「エネルギーとは何か」を概略説明しておいて、その移動量である「仕事」によってエネルギーを見積もることになるのでこれを定義する、という流れが自然であり、学習者にも受け入れられやすいはずだ。高等学校の教科書でも配列にひと工夫欲しいところである。

なお、エネルギーの出入りを論ずるには「系」の確定が必須であるが、現行の中学校、高等学校のすべての教科書にわたって「系」についての明確な記述はない。

4 系と位置エネルギー

表1、表2にも示したように、重力による位置エネルギーについての記述は、中学校、高等学校のすべての教科書において、高いところにある「物体がもつ」エネルギーとしている。しかし、位置エネルギーの定義は本来「系」のとりかたに依存するものであることを右近^{6,8,9,11}は指摘している。

位置エネルギーは系内の複数の物体の位置関係によって定まるエネルギーである。重力による位置エネルギーを例にとると、物体（質点）と相手となる天体（地球）を共に系内のものとしてとらえることが前提で、両者の位置関係（距離）によりエネルギーが定まる。この場合、重力は内力であって、他の力が仕事をしないなら系の力学的エネルギー（運動エネルギー＋位置エネルギー）は保存することになる。

これに対し単一の質点だけを系にとる場合、地球は系外の物体となり、質点は運動エネルギーのみを持ち、位置エネルギーはない。この場合、重力は外力となり、それがした仕事の分だけ系内の質点の運動エネルギーが増加する。いわゆる「仕事と運動エネルギーの関係」である。重力による位置エネルギーと、重力がする仕事をダブルカウントしてしまうような初学者の混乱は、系をしっかりと確定しないまま考察していることに起因する。

重力による位置エネルギーは物体（質点）が持つというよりは、物体と地球を含む系が

持つエネルギーというべきである。位置エネルギーのありかを「場」にゆだねても、系を明示しない限り問題は解決しない。高等学校ではばねの弾性力による位置エネルギー（弾性エネルギー）も扱うが、表2に示すように、弾性力による位置エネルギーをばねに取り付けられた物体が持つと記述している教科書と、ばねに蓄えられるとする教科書が半々である。これも系の境界を曖昧なままにしたための揺れである。位置エネルギーと呼ぶ以上、ばねと物体を含む系のエネルギーと考えるべきであろう。

5 移動量としてとらえたい仕事と熱

「仕事」は「熱」と共にエネルギーの流れ（flow）の一形態で、仕事や熱が系に加えられると、その分だけ系のエネルギーは増加する。これがエネルギー保存則の一般的表現であり、前掲の右近ダイヤグラム（図1）に象徴的に示されている。

熱を持つ、熱がある、熱がたまる等の言い回しは日常語ではよく使うが物理用語としては避けたい表現である。日常語として定着し、教科書にも用いられている「熱エネルギー」という表現も本当は好ましくない。熱はflowであってstockではないからである。物体の構成粒子の乱雑な運動に由来する系内のエネルギーは正しくは「内部エネルギー」というべきである。中学校および高等学校の学習指導要領^{30,31}および理科の学習指導要領解説^{32,33}は「熱エネルギー」という用語を極力避けている。この違いを意識しているものと思われる。

その意味では古典的な物理法則である「熱量保存の法則」は熱素説の時代を引きずった表現である。「熱量」という量がstockのように扱われており、初学者に誤概念を植えつけかねない表現で、まことに教育的でない。高等学校学習指導要領解説³³にもいまだに「熱量の保存」をあつかうと明記されているのですべての教科書にこの記述は残っている。calからJへと単位の統一はなされたものの、質量の単位にはまだgが用いられており、物理基礎の熱学分野に根強く残るこの教材は弊害が大きいのではないかと思われる。本論の主旨から外れるのでこの話題には深入りしないことにするが、一考を要する課題である。

話を戻して、仕事も同様に移動量（flow）であって系内と環境との間でやりとりされるエネルギーの流れをさして用いられる。

右近ダイヤグラム（図1）では、系が一般的に構造のある物体（質点系）である場合を想定して、運動エネルギー K 、位置エネルギー U に加えて内部エネルギー E_{th} を系内のエネルギーとしている。これらのエネルギーは内力の作用によって相互に変換するが、仕事や熱といった環境との交渉がなければ、その総量は保存する。このような系を「孤立系」という。

ただし、位置エネルギーの基準の取り方には任意性があり、内部エネルギーも、厳密には構成粒子の化学結合や原子・原子核の内部構造に由来するエネルギーも含むので「総量」を論ずることは実際には困難である。そこで、

$$\text{孤立系では： } K + U + E_{\text{th}} = \text{一定}$$

と書く代わりに

$$\Delta K + \Delta U + \Delta E_{\text{th}} = 0$$

と変化分の関係式の形で表すのが一般的である。

同様に、環境との間で仕事 W や熱 Q がやりとりされる一般の場合には、系への流入を正として

$$\Delta K + \Delta U + \Delta E_{\text{th}} = W + Q$$

と書けばよい。これがエネルギー保存の法則(熱力学第一法則)の一般的な式表現である。

6 高等学校でどう指導するか(力学編)

さて、ここからが本題の提案である。最終的な到達目標をエネルギー保存の法則(熱力学第一法則)の概念理解にすえて、高等学校の物理基礎の力学・熱力学分野をどのように指導したらよいか、その流れを示そう。

「系」の概念を早めに導入しておくべきことは前述した。できれば中学校のうちから話題にして系と環境を明確に区別する考え方の下地を作っておきたい。遅くとも物理基礎の力の合成の単元で導入しておく。その上で、以下の「仕事とエネルギー」の単元に進むものとする。

最初に最終到達点を示しておく。右近ダイアグラム(図1)に若干手を加えたものが図5である。図5では仕事と熱の流れを分離し、流入の矢印と流出の矢印を分けて描いた。物理現象がエネルギーの流れの中で起こっていることを表現している。合わせて、高等学校レベルでは「負の仕事」などの表現に抵抗を感じる生徒もいるので、流れの方向を明示

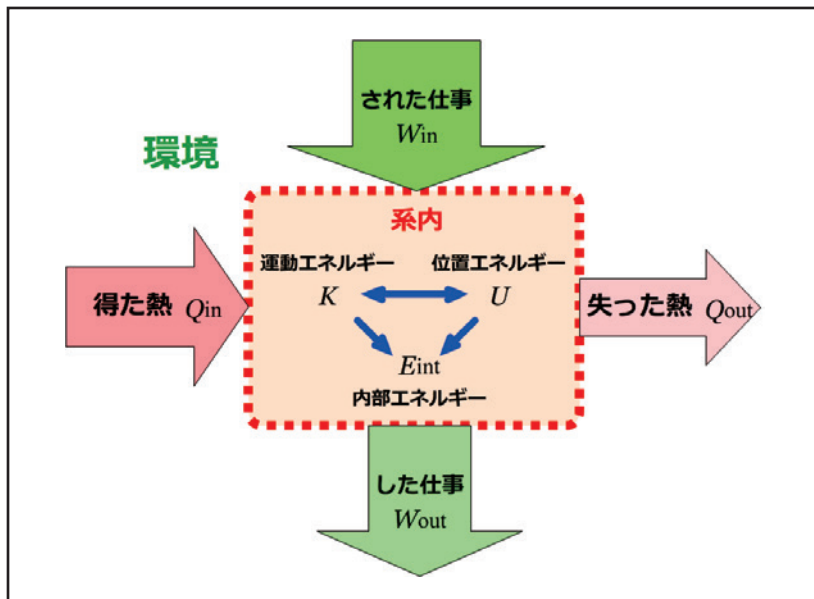


図5 エネルギー保存の法則(熱力学第一法則)

する形をとって理解の助けとした。また、stockとflowを明確に区別するために、「熱エネルギー」の呼称を避けて、「内部エネルギー」に統一した。系内のstockとしては「内部エネルギー」、系外とやりとりされるflowは「熱」と呼ぶ。系へのエネルギーの流入は、仕事や熱以外にも電磁波や物質の移流に伴うものも考えられるが、物理基礎の力学・熱力学単元では仕事と熱にとどめてよいだろう。図5の理解をこの単元の到達目標とする。以下に単元の構築法を提案する。

エネルギーの単元ではまず主役のエネルギーの紹介を前面に出したい。厳密な定義はもともとできないのだから、先の見通しを示す意味で中学校での学習を振り返りながらエネルギーのラインナップを紹介する。図5に登場するエネルギーのみならず、一般のエネルギーの名前も挙げて全体像を示すとよい。運動エネルギーと位置エネルギーを合わせて「力学的エネルギー」と呼ぶこともこの時点で紹介しておくのがよいだろう。

その上でエネルギーを見積もる手段として「仕事」を定義する。中学校でも一応定義済みであるので、それと関連づけながら、力の向きと運動の向きが異なる場合や、力が一定でない場合への概念の拡張を行う。現行の教科書が採用している流れでよいだろう。負の仕事への拡張もこの中で行われる。その際、負の仕事は系から外部にエネルギーが流出することを意味することに触れる。仕事の導入の必要性をエネルギー概念と関連づけて示すことが重要である。

中学校では仕事の定義に続いて「仕事の原理」を丁寧に扱っている。てこや滑車などの道具を用いても仕事は得しないことが具体例を挙げて示されている。高等学校でも表2に示したようにすべての教科書が「仕事の原理」に一応触れているが、側注に出すなど扱い

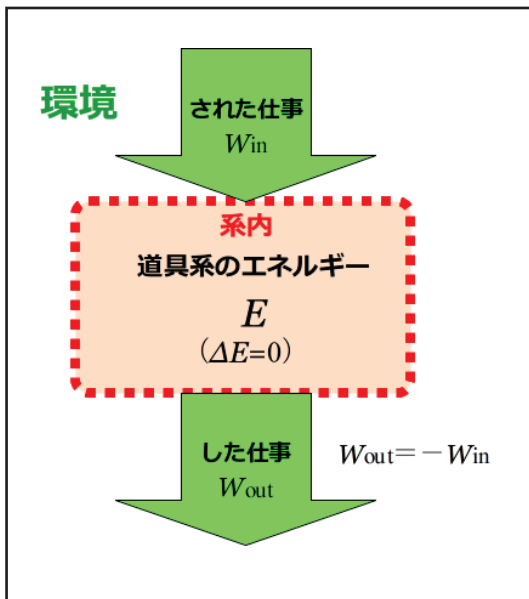


図6 道具系・仕事の原理

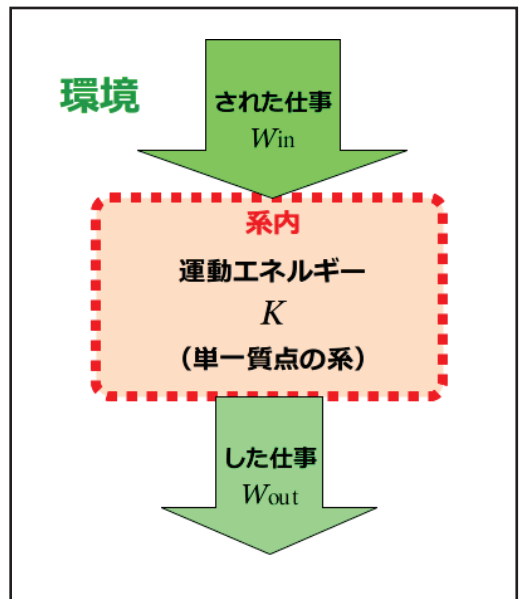


図7 仕事と運動エネルギーの関係

が軽い社もある。道具を「系」として「仕事の原理」を図に表すと図6のように表すことができる。道具系は動作しても系内のエネルギーが変化しないことを前提としていて、道具系に流入する仕事 W_{in} (正) と流出する仕事 W_{out} (負) の絶対値が等しいのである。もちろん $|W_{out}| > W_{in}$ となることはない。中学校の復習かたがた「仕事の原理」はこのように位置づけておきたい。

次に単一質点系を想定して、運動方程式から「仕事と運動エネルギーの関係」を導くだけでは、現行のすべての教科書に取り上げられている。これは図7に相当する。単一質点なので系内のエネルギーは運動エネルギー K のみで位置エネルギーはない。地球は環境であり、重力は外力として扱う。また、質点には構造がないので内部エネルギーは存在しない。

図7は式で書けば

$$\Delta K = W_{in} + W_{out} \quad (W_{out} < 0)$$

であるが、「仕事と運動エネルギーの関係」を用いるときには先に合力を求める場合もあるので、右辺の仕事は1つにまとめてもよい。その場合図7の仕事の矢印の一方は省略できる。仕事の定義から容易に導かれるように、複数の力を合成した合力がする仕事は個別の力がする仕事の代数和に等しい。なお、上式の右辺は仕事の出入りの差額であるから

$$\Delta K = \Delta W$$

と書く方が適切かもしれない。

地球を系内に含む場合、重力は内力となり、保存力であるから重力による位置エネルギーを定義することができる。系内の物体と地球の位置関係が変化するとき、運動エネルギーと位置エネルギーは相互に変換する。しかし、系外からはたらく外力による仕事がなく ($\Delta W = 0$)、系内の内力としての摩擦力等による内部エネルギーへの変換 (いわゆる摩擦熱の発生) がなければ力学的エネルギーは保存する。これを表現したものが図8である。

式で表せば

$$K + U = \text{一定} \quad \text{または} \quad \Delta K + \Delta U = 0$$

である。系を意識すれば従来通りの記述でよい。

なお、ここで系内に含む「地球」とは、あくまで重力 (万有引力) の相手物体としての概念であり、運動天体としての地球や、気象現象・地学現象を伴った実体としての地球を意味するものではないことを注意しておく。

一般に、系外からはたらく外力による仕事がある場合、あるいは系内であっても非保存力が仕事をする場合は図9の表現になる。 E_{int} は「内部エネルギー」である。いわゆる「熱

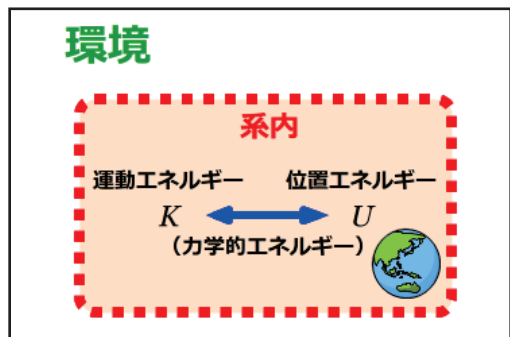


図8 力学的エネルギー保存の法則

エネルギー」という表現を避けるために、 E_{int} の添字を用いた。右近ダイアグラム(図1)に記された E_{th} と同じものである。式で表せば

$$\Delta E + \Delta U + \Delta E_{\text{int}} = \Delta W$$

である。系内では摩擦や物体の変形により力学的エネルギーから内部エネルギーへの変換が起こる。もはや力学的エネルギーは保存せず、系内の全エネルギーは環境との間でやりとりされた仕事の分だけ変化する。制約をとりはらって一般的なエネルギー保存則に一步近づいた形であるが、図9ではまだ熱の流れを考慮していない。この系はいわば「断熱系」である。

いろいろな制約を取り払ったことで、多様な演習問題が作れるようになるが、対象としている系を明確にして、考えている現象が内力による系内のエネルギーの変換によるものか、外力によってなされる仕事を伴うものかを判断することが求められる。第1節で振り返ったような擬仕事 (pseudowork) による混乱もここで入り込んでくるので注意が必要である。

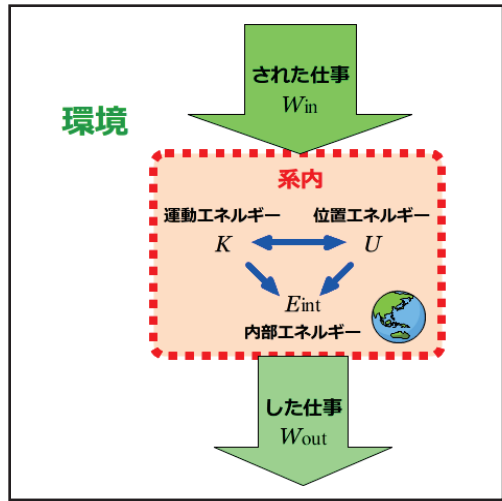


図9 力学的エネルギーが保存しない場合

7 高等学校でどう指導するか (熱力学編)

これまでの高等学校物理では力学と熱力学との間に断絶があった。話題や表記につながりがなく、両者は全く別の単元のように扱われてきた。少なくとも生徒の受け止めはそうだっただろう。

高等学校学習指導要領³¹では物理基礎の配列は、「(1) 物体の運動とエネルギー」の後に、「(2) 様々な物理現象とエネルギーの利用」の中で、先に「(ア) 波」をはさんで

(イ) 熱

㊦ 熱と温度

熱と温度について、原子や分子の熱運動の観点から理解すること。

㊧ 熱の利用

熱に関する実験などを行い、熱の移動及び熱と仕事の変換について理解すること。の順に記述されている。最後の「㊧熱の利用」が熱力学第一法則に対応する部分である。

一方、表2にあげた現行教科書はいずれも波よりも熱を前に出す編集方針をとっている。教科書の記事の配列は必ずしも学習指導要領の通りである必要はない。エネルギーに関するストーリーの一貫性を重視する立場からは好ましい配列だと言える。波動の単元を

間に挟んでは、学習者の頭の中からは力学は追いやられ、せつかく形成されかかったエネルギー保存則の概念がリセットされてしまう。力学的エネルギー保存の法則を学んだ後は一気に熱力学第一法則まで完成したい。

しかし、現行教科書でも熱や内部エネルギーは力学の後に唐突に登場し、その後にとって付けたように熱力学第一法則が示されている。このとき、表2に示した10冊の教科書すべてで、内部エネルギーの記号に U が使われている。 ΔU の形で用いられるにせよ、位置エネルギーを表すのに使ったのと同じ記号が何の断りもなく用いられているのである。これは以前とは関係ない話だからいいでしょうと言わんばかりである。高校生は違和感を感じ戸惑うに違いない。力学とのつながりを大切にし、一連のストーリーとするなら、少なくとも記号は区別した方がよい。このことにも象徴されるように、現行教科書でも力学と熱力学の断絶は解消していない。

エネルギー概念の構築を重視する立場では、熱力学第一法則までを一連の流れとして扱いたい。図9に系のエネルギーを変化させる仕事以外のもう一つの要素として「熱」の流れを加えて、エネルギー保存の法則は完成する。その熱を見積もるために、熱量を定義し単位をエネルギーと共通にすることを学ぶ。物理学史の初期には別物とみなされていた熱をエネルギーと同次元の量として扱うという必然性がある絶対温度や比熱容量などが導入されるのである。

この場面では本筋から外れる熱量保存の法則は、熱素説のはたした歴史上の役割と共に、側注やコラムに出して軽い扱いでよい。むしろ熱量が保存しないケースを丁寧に扱うべきだろう。仕事と熱が系を通じて相互に変換しうることを、摩擦や熱機関（エンジン）、ヒートポンプなどの例をあげて、日常生活と関連づけながら理解させたい。もちろんその過程でも全体としてエネルギーが保存することを強調する。

従来も熱機関の概念を示すために図10のような図表現はよく用いられてきた。熱機関は高熱源から熱 Q_{in} を取り入れ、低熱源に廃熱 Q_{out} を排出しながら、その差額を仕事 W_{out} に変換する装置であると説明する。これを図9から到達目標に至る橋渡しとして扱い、一貫性を演出したい。

図10をさらに一般化したものが図11である。図11はヒートポンプのような系も含んで表現している。熱を仕事に、仕事を熱に相互に変換する熱機関の系である。もちろんここでも全体としてエネルギーが保存することを強調する。このあたりで熱力学第二法則にも触れておくとよい。

なお、学習指導要領³¹では理想気体の状態方程式や熱力学第一法則の理想気体への適用

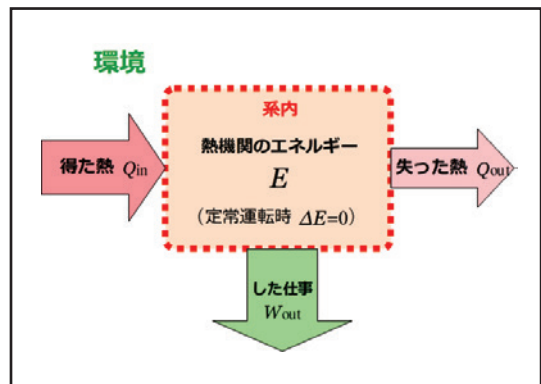


図10 定常運転時のカルノー熱機関

については4単位の物理の方で改めて扱うこととされているので、ここでは熱機関の詳しい仕組みや動作には触れず、日常生活で見かける道具として簡単に触れることになる。

図11と図6を見比べれば、力学的な道具系と熱機関の違いに自然に気づくことができる。熱機関は仕事のアシストをしてくれる道具なのである。図11の熱の流れを電気エネルギーの流れに置きかえて、電動アシスト自転車などの身近な例に結びつけることも容易だろう。

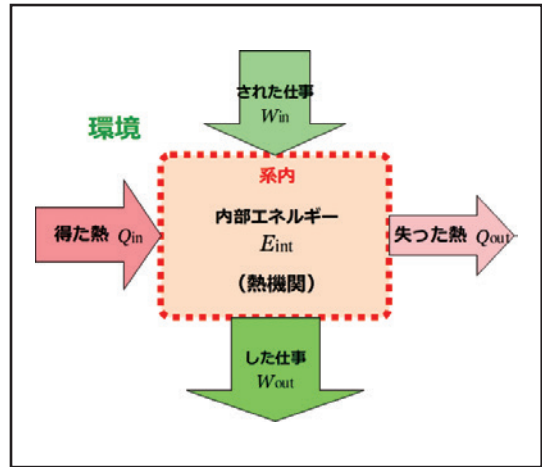


図11 一般的な熱機関の系

かくして一般的なエネルギー保存の法則（熱力学第一法則）の学習は目標に到達する。下に図5を再掲する。式の形で書けば

$$\Delta K + \Delta U + \Delta E_{int} = W_{in} + W_{out} + Q_{in} + Q_{out} \quad (W_{out} < 0, Q_{out} < 0)$$

または

$$\Delta K + \Delta U + \Delta E_{int} = \Delta W + \Delta Q$$

となる。左辺は系内のエネルギーの変化、右辺は環境との間でやりとりされたエネルギーの移動量としての仕事と熱である。物理現象はエネルギーの流れの中で起こる。物理現象によってエネルギーの変換や移流が行われるといってもよい。

仕事や熱などの移流がなければ系内のエネルギーは保存する。環境との間にこれらの移流があれば、その分だけ系のエネルギーは変化する。以上がエネルギー保存の法則（熱力学第一法則）である。

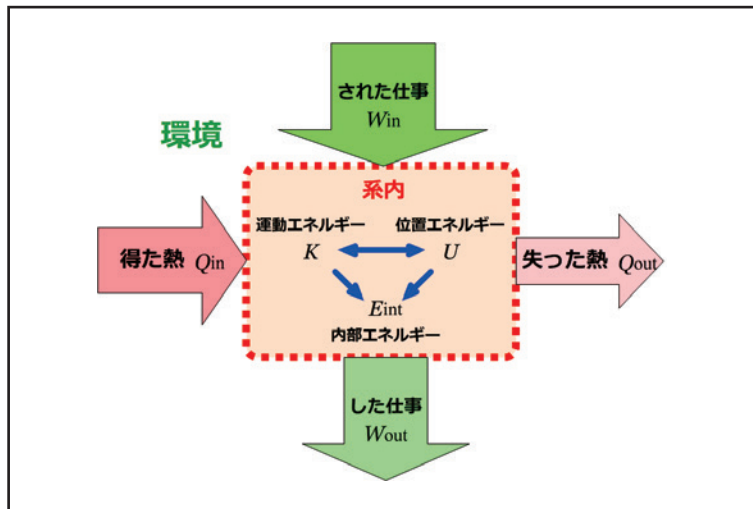


図12 エネルギー保存の法則（熱力学第一法則）【再掲】

8 まとめ

エネルギーの概念は広範囲におよび、漠然としているので、例を挙げながら範囲を拡張しつつ、だんだんに理解させていくしかない。だからこそ、学習の到達目標を示し、長い

旅の展望を与えるためにも、エネルギーと仕事の単元の入口で、エネルギー概念全体を見渡す記述が必要になる。中学校でも学習しているので、その復習も兼ねて概観的な説明を冒頭しておくのがよい。「系」の概念もできるだけ早い機会に導入して習慣づけておくべきである。その上で、系の範囲をはっきりと示しながら、エネルギー保存の法則の範囲を次第に拡張していくという記述にする。そうすれば学習者は今の自分の居場所を意識することができ、学習の道筋を見通すことができるだろう。

なぜここで「仕事」を持ち出すのか、なぜここで「熱」が登場するのか、といった必然性を理解しながら学習が進められるような、力学から熱力学まで一貫したストーリー展開が望まれる。そのためには、物理基礎における単元配列では、力学と熱力学を近づけたい。熱や仕事は移動量であることを強調する意味でも、系内に保有されるエネルギーとしての「熱エネルギー」の呼称は避けて「内部エネルギー」に統一したい。物理量の記号や図表現も力学と熱力学を通して統一し、単元としての一体感を演出したい。以上が本論文の提案である。

高校理科の教科書が分冊になって以来、物理教育においては特に重要な「系統性」が失われてしまっているように思えてならない。加えて平成14年1月の文部科学大臣による「学びのすすめ」アピール³⁴以降、「学習指導要領は最低基準」とされ、「発展的な学習」の内容を盛り込むことが解禁されたため、校種・教科を問わず、教科書は盛り沢山になった。教科書に「発展」のコラム記事が増え、配列された各項目が1本のストーリーにうまくつながらず、細切れの断片化した知識になってしまった感がある。その結果、公式主義ややみくもな丸暗記による学習が横行して、物理をさらに評判の悪い科目におとしめてはいないだろうか。

参考までに、高校理科の教科書が分冊になっていなかった時代の物理教科書の記述を見てみよう。昭和45年出版の『物理B三訂版』（実教出版）²⁷である。50年以上も前に出版されたこの教科書の章立ては、以下の通りであった。

- 第1章 力と運動
- 第2章 変形する物体
- 第3章 熱
- 第4章 波
- 第5章 電磁気
- 第6章 電子と原子
- 第7章 原子核と素粒子

第1章で質点の力学を徹底的に学び、第2章では現実の物質が多数の粒子からなる系であることを学び（流体力学の初歩も学ぶ）、第3章ではそれらの粒子の乱雑な動きを考えて、温度と内部エネルギーを定義していくという一連の流れになっている。その中で「熱」は「2つの物体の間に熱運動の伝達という形で受け渡しされるエネルギー」と移動量であること

を強調して、内部エネルギーとは言葉の上でもはっきり区別して扱われている。その後の記述も全体としてストーリー性が貫かれ、読んでいて面白い本になっている。

今とは教育課程も異なり、高校物理で学ぶ内容も変化しているので、単純な比較の対象にはならないが、物理の系統性を重視して一本筋を通すという編集姿勢は大いに参考になる。

現行の学習指導要領³¹のもとで「物理基礎」と「物理」に分冊を強いられていることが教科書制作を難しくしていることは想像に難くない。教科書著者の方々はさぞかし苦労をし、頭を悩ませておいでのことと思う。しかし「学びのすすめ」アピールを逆手にとれば、配列を工夫し、発展的コラム記事をうまく使って断片化した話をつなげることもできるのではないと思う。物理教育の原点に帰って、あらためて系統性を重視した構成・著述を工夫していただきたいと思う。わくわくする物語のようなストーリー性のある高等学校物理教科書の出版を期待するものである。

本当のところは、各教科書出版社の裁量や、著者の自主性に任せるのではなく、学習指導要領自身が本論で提案したような観点から改善されていくことが最も望ましいのであるが、そちらはまだ時間がかかりそうである。しかし、課題の本質を理解し、現場の授業レベルで改善に取り組んでいる意欲的な教員の実践報告もある。ここでは勝田仁之³⁵の実践を紹介しておく。今後こうした草の根の取り組みが広がることを期待して本論の結びとする。

参考文献

- 1 鈴木亨 (2016) 「『蜘蛛の糸』とPSEUDOWORK」『物理教育通信』 No.166
- 2 西尾信一 (2016) 「教科書に紛れ込んだpseudowork」『物理教育通信』 No.167
- 3 鈴木亨 (2017) 「動摩擦力に抗してする仕事とpseudowork」『物理教育通信』 No.168
- 4 右近修治 (2017) 「摩擦力のする仕事？」『物理教育通信』 No.169
- 5 西尾信一 (2017) 「『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』 No.169
- 6 右近修治 (2020) 「『仕事とエネルギー』概念の検討 - 「系」選択の重要性 -」『物理教育通信』 No.179
- 7 西尾信一 (2020) 「仕事とエネルギーの指導についての提案」『物理教育通信』 No.179
- 8 右近修治 (2019) 「視点「仕事とエネルギー」概念の再検討」『理科教室』 Vol.62, No.11
- 9 右近修治 (2021) 「『エネルギー保存則』どう教えるか」『物理教育通信』 No.186
- 10 西尾信一 (2021) 「内力のする仕事」『物理教育通信』 No.186
- 11 右近修治、岸澤眞一、中村正人、新田英雄、長谷川大和、宮崎幸一、山本明利 (2021) 『SUPER入門力学』β1版、SUPER物理研究会

- 12 東京書籍 (2021) 『新しい科学 3』 (理科901)
- 13 大日本図書 (2021) 『理科の世界 3』 (理科902)
- 14 学校図書 (2021) 『中学校 科学 3』 (理科903)
- 15 教育出版 (2021) 『自然の探究 中学理科 3』 (理科904)
- 16 啓林館 (2021) 『未来へひろがるサイエンス 3』 (理科905)
- 17 東京書籍 (2022) 『物理基礎』 (物基701)
- 18 東京書籍 (2022) 『新編物理基礎』 (物基702)
- 19 実教出版 (2022) 『物理基礎』 (物基703)
- 20 実教出版 (2022) 『高校物理基礎』 (物基704)
- 21 啓林館 (2021) 『高等学校 物理基礎』 (物基705)
- 22 啓林館 (2021) 『高等学校 考える物理基礎』 (物基706)
- 23 数研出版 (2022) 『物理基礎』 (物基707)
- 24 数研出版 (2022) 『新編 物理基礎』 (物基708)
- 25 第一学習社 (2022) 『高等学校 物理基礎』 (物基709)
- 26 第一学習社 (2022) 『高等学校 新物理基礎』 (物基710)
- 27 実教出版 (1970) 『物理B三訂版』 (物理046)
- 28 物理学辞典編集委員会 (1992) 『物理学辞典－縮刷版－』 培風館
- 29 長倉三郎他 (1998) 『岩波 理化学辞典 第5版』 岩波書店
- 30 文部科学省 (2017) 「中学校学習指導要領」平成29年3月
- 31 文部科学省 (2018) 「高等学校学習指導要領」平成30年3月
- 32 文部科学省 (2017) 「中学校学習指導要領解説 理科編」平成29年7月
- 33 文部科学省 (2018) 「高等学校学習指導要領解説 理科編 理数編」平成30年7月
- 34 文部科学省 (2002) 「確かな学力の向上のための2002アピール「学びのすすめ」」平成14年1月 https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/actionplan/03071101/008.pdf
(2022年10月31日最終参照)
- 35 勝田仁之 (2021) 「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 —」『筑波大学附属高等学校研究紀要』第62巻