

## エネルギーの物理化学的諸性質と導入時の問題点

森川 鉄朗\*・下村 博志\*

(平成9年11月14日受理)

### 要 旨

中等科学教育には、エネルギーに関するさまざまな疑問や誤用がみられ、それらの起因もさまざまである。エネルギーという用語がいろいろな物理量に使われて混乱してしまうためであったり、エネルギー保存則の適用に際して系と外界とを区別しないためであったり、エネルギーの次元についての所以を忘れてしまうためであったりする。本稿では、エネルギーに関する物理化学的諸性質を論じることで、これらの誤解をとくことを試みる。さらに、その議論をもとに、中等科学教育におけるエネルギーの導入法を考察する。

### KEY WORDS

system	系	external world	外界
state	状態	state function	状態関数
change	変化	internal energy	内部エネルギー
enthalpy	エンタルピー	conservation	保存
dimension	次元	physical quantity	物理量
extensive	示量性の	calorie	カロリー
joule	ジュール	science education	科学教育

### 1. 序 論

エネルギーのさまざまな相互変換(形態の変化)に着目すると、広範囲にわたる自然現象を、統一的に解明できる。それ故に、エネルギーとそのいろいろな表現は、科学教育ではさけて通れない重要事項となっている。エネルギーに関して、生徒や本学の大学院生(中等教育の教師)から、疑問や誤用を聞くことがある。それらの多くの疑問の原因のひとつは、さまざまな性質をもついろいろな物理量がエネルギーというひとつの用語でよばれることがあるので、混乱してしまうことにある。このたぐいの疑問は、エネルギーとよばれる物理量の三つの性質、状態量と示量性の量と保存量、の区別をはっきりさせれば、解決するものである。そこで、本稿ではまず、物理量の三つの性質について、論じよう。

疑問の生まれるもうひとつの原因は、エネルギーの相互の変換に関連している。日本の中等科学教育では、エネルギーの単位として、熱の単位カロリー cal を長く使ってきたが、SIの本格的な導入にあたって、仕事の単位ジュール J に切り替えられつつある。生徒にとってカロ

---

\* 自然系教育講座

リーは感覚的にわかりやすいが、ジュールは難しいと、中等教育の教師はいう。以下で議論するように、エネルギーの変換は、エネルギーをひとつの次元とみなしうる根拠となるものであり、単位の制定の出発点でもある。エネルギーの次元について論じることで、「カロリーのほうがわかりやすい」は、錯覚にすぎないことを示そう。

エネルギー保存則には、いろいろな言い回し（表現の仕方）が知られていて、それらのどれを科学教育において採用するかは、議論されるべき大事なことがらである。保存則に関する誤解は、この法則が系と外界との両者に関係しているのに、法則の適用に際して両者をはっきりと意識しないことから、うまれているようである。そこで、系のエネルギー変化量を、系内での変化による分と外界から出入する分とに分けて書くことにする。すると、保存則の内容が、すっきりと表現されることがわかる。そのような表式を使うことで、保存則をめぐる誤解をなくことにしよう。

本稿では、以上の議論をもとに、中等科学教育教科書にみられるエネルギーの導入法を考察する。

## 2. エネルギーの物理量としての諸性質について

エネルギーの関与する物理化学的現象（と対象）を調べたい<sup>1)</sup>とする。自然界を、主に調べたい部分（物質の集合体）とそうでない部分とに分ける。前者を系（a system）とよび、後者をその系の外界（the external world または環境 the surroundings）とよぶ。系は、人工物、無機物、生物、いずれでもよい。系と外界との区切は、考察したい問題を解決しやすいよいように選ぶ。電池を系とみなして定温に保つ実験では、熱伝導性の良い器で電池をつくり、それを恒温槽に入れる。このときは、恒温槽（と大気）が外界となる。

ある系を温度計で測定すると、系のエネルギーは一部、失われる。測定により系の温度が変化しては、正しく測定しているとはいえない。そこで、系は測定によりみだされない程度のサイズであると、仮定する必要がある。系のサイズを考える目安の一つはその質量である。ここでは、系の質量は、普通の観測手段であつかえる程度、たとえば天秤で計測できる程度（0.1 $\mu$ g 程度）以上、としておく。この系を、巨視的系または熱力学的系（a macroscopic system or a thermodynamic system）とよぶ。（粒子の大集団である系に対してのみ、温度とか圧力とかを考へる。）後で述べる示強性物理量を用いて、系のサイズに依存しないように法則や関係式を書き下すと、都合がよいことが多い。

エネルギーの保存則を考察するための基本となる系が、孤立系である。孤立系とは、物質とエネルギーとの両者を外界とやりとりしない系をいう。このときのエネルギーのやりとりとは、熱伝導や熱輻射によるものだけではなくて、仕事によるものもふくむ。外界に対して熱の出入がないときは、特に断熱的とよぶ。断熱的な壁で系を外界から隔離する装置が、熱量計である。よく使われる定圧熱量計は、外圧（通常は大気圧で一定）に抗して体積変化があり、これにより仕事をしたり、されたりする。体積変化が生じないような、定積熱量計もある。

系を定めるには、系の内とその境界との、性質と変化を記述する。この記述の内容は、あつかう系ごとに異なる。ここで、系の変化と本質的に無関係な部分を、外界から除いて考えるとよい。そのような例として、熱量計や電池にとっての宇宙や、恒温槽にとっての（電力を供給

する) 発電所などがある。

ある系の性質は、そのときの系の状態量(複数)で記述される。状態量(状態関数)とは、系の(現在の)状態だけで定まる物理量<sup>2)</sup>(とそれから誘導される物理量)をいう。物理量全てが状態量ではないことに、注意すべきである。状態量の例として、気体では、質量  $m$ 、密度  $\rho$ 、物質質量  $n$ 、圧力  $p$ 、体積  $V$ 、温度  $T$ 、さらに、後で議論する内部エネルギー  $U$  などがある。溶液では、気体の場合に加えて、濃度  $c$ (モル濃度)、化学ポテンシャル<sup>3)</sup> $\mu$  などがある。化学反応系では、さらに、化学親和力<sup>4)</sup>  $A$ 、反応進行度<sup>5)</sup> $\xi$ などがくわわる。ここでは、IUPAC<sup>6)</sup>の推奨する記号を使っている。

系の状態が変化するという事は、その系の状態量が変わるということである。そこで、系の状態量(のいくつか)を変数とみなして、どれだけの状態変数で系が定まるか、と問うてみる。系の状態は状態変数によって定まり、状態が定まれば状態変数が定まる、ではぐるぐる回りとなる。状態変数を次々と特定して行って、状態が定まるかどうか調べていく、と考える。どれだけの状態変数が系の状態を定めるのに必要か(独立変数として選べるか)は、系ごとに一つ一つ確かめていくしか方法はない。気体では、たとえば、物質質量を選び、次に圧力、体積、温度の三つのうちの、二つを定めればよい。当面、状態変数は、系全体で(系の部分間に相互作用がなければ)有限個、定まると考えておく。これは平衡系とよばれている。たとえば、系の温度  $T$  は全体で一つ定まるなど。

系の状態を定めるのに必要な最小限の状態変数を特定すれば、残りの状態変数は状態関数と考えてよい。状態関数は、考察している系の問題を解決しやすいように、選ぶ。後で議論する内部エネルギー  $U$  やエンタルピー  $H$  が、状態関数に選ばれることが多い。理想気体では、状態方程式が知られているので、状態関数を決定できる。以上で述べた状態変化で大事な点は、変化の中途や変化の速度には、何ら関与していないことである。酸化還元反応の反応熱を熱量計で測定しようとしたとする。可逆電池として組み立てて、全体を熱量計に入れる。外部抵抗を十分に大きくして、ゆっくりと過程を進行させるのが、可逆変化<sup>7)</sup>であり、両半電池を短絡する過程や両半電池の溶液を混合するような過程が、不可逆変化である。いずれの過程でも、系の状態量の変化量は同じとなるのが、変化の中途には無関係という意味である。ここでの可逆変化は、厳密には無限の時間がかかるのだが、変化の速度は無関係として、処理しているのである。ただし、現実の実験では、それに相当する条件を定めて測定することになる。

熱  $q$  は、系の状態量に選べない物理量の例である。ある物体(系)が摩擦によって、温度  $T_1$  から  $T_2$ (状態1から状態2)に変化したとする。同じ物体が他の物体との接触によっても、温度  $T_1$  から  $T_2$ (状態1から状態2)に変化する。前者の過程は仕事だけによって、後者の過程は熱伝導だけによって、状態1から状態2に変化している。この状態の変化では、一定の熱も一定の仕事も必要としていない。つまり、この場合、熱と仕事のいずれも状態量ではない。系の変化に熱と仕事(さらに、後で述べるような、各種のエネルギー表現を加えてもよい)が関わるときは、それらの総和は、内部エネルギーという状態量になる。ただし、熱や仕事は、状態1から状態2への変化が特別な場合、状態によって決定することもある。後で述べるエンタルピー変化  $\Delta H$  は、仕事が系の体積変化だけで定圧過程での熱を  $q_p$  と書くと、 $\Delta H = q_p$  なので、この場合の熱  $q_p$  は状態によって定まる。

系の状態量は、絶対値の決定は難しいが、ある状態を基準にして測定すればすむ場合がほとんどである。ある基準状態を約束で定めて、標準状態<sup>8)</sup>とよぶ。物質の性質に関して、よく使わ

れる標準状態は、温度 25 °C で、圧力は 101.3 kPa である。そこで、状態量の変化量<sup>9)</sup>を、最後の状態から最初の状態を差し引いて、 $d$  や  $\Delta$  を使ってあらわす。状態を指定しないで、 $\Delta U$  や  $\Delta H$  を議論することもあるので、注意が必要である。

系のもつエネルギーを、系全体の並進運動エネルギーや位置エネルギーなどを除いて考えるとき、内部エネルギー  $U$  という。内部エネルギーの変化量  $\Delta U$  は、熱  $q$  と仕事  $w$  に分けて考えることがある。このときの仕事としてもっとも簡単な場合は、系が実験室の大気中（外界の圧力  $p_e$ ）に置かれていて、体積変化  $p_e \Delta V$  によるものだけのときである。系の物理量の変化の符号は通常、系を中心にして、増加すれば正とし減少すれば負とする約束である。そこで、体積変化による系の最大の仕事は、系の圧力  $p = p_e$  のときで、結局は、 $\Delta U = q - p \Delta V$  となる。ここで、右辺を熱と仕事の和で書いたが、これは熱と仕事がそのまま系に蓄えられている（誤解のひとつ）という意味ではない。この仕事  $-p \Delta V$  を知ることはめんどろである。そこで、大気中での現象の解明には、 $U$  のかわりに、エンタルピー  $H$  を使うことが多い。エンタルピーの定義は、 $H = U + pV$  である。ここでの  $pV$  の次元はエネルギーであるが、仕事という（誤解のひとつ）意味を必ずしもたない。 $U$  が状態量であることは後で議論する。すると、 $p$  と  $V$  は状態量なので、 $H$  は状態量となる。そこで、定圧下での変化量では、 $\Delta H = \Delta U + p \Delta V = q_p$  となる。こうして、 $\Delta H$  は定圧熱量計（外気圧一定）で測定できる熱となり都合がよい。発熱反応では、系から熱が失われるので、 $\Delta H < 0$  となるように負の符号をつけて書く。

物理量の示量性と示強性については、すでに詳細に論じた<sup>9)</sup>ので、ここでは、簡単に要約する。系の物理量が加法的とは、系全体の物理量がその系の部分における物理量の総和に等しいときをいう。この意味で物理量が加法的であるとき、その物理量は示量性といわれる。質量とか体積とか内部エネルギーとかが示量性物理量の代表例であり、その他に、物質量やエントロピー<sup>7)</sup>  $S$  などがある。示量性物理量（スカラー量）の加法性については、間違えやすいので、注意<sup>10)</sup>が必要である。系全体の物理量が、その系の部分における物理量に等しいとき、示強性といわれる。前出の状態量の例では、密度、圧力、温度などが、示強性である。示量性物理量（たとえば、エンタルピー）を状態関数として測定するときは、他の物理量（たとえば、反応進行度）を状態変数に選び、前者を後者あたりで、記述する。そこで、反応のモルエンタルピーは、示強性物理量となる。

状態量と保存量とは、はっきりと区別する必要がある。両者の混同はよくみかける誤解である。系の示量性物理量  $X$  の微小変化量  $dX$  は、系の内部 (internal) において生成や消滅による変化量  $d_i X$  と、系が外部 (external) とやりとりする変化量  $d_e X$  の代数和に等しいはずなので、一般に  $dX = d_i X + d_e X$  と書ける<sup>11)</sup>であろう。保存量とは、状態の変化の際に、生成も消滅もしない示量性物理量をいう。つまり、保存量とは、 $d_i X = 0$  を満たす  $X$  のことである。そこで、孤立系 ( $d_e X = 0$ ) で、 $dX = 0$  となる  $X$  が保存量であると、いいかえられる。したがって、保存量ならば、状態量であるが、これの逆は正しくない。後で述べるように、 $d_i U = 0$ 、つまり、内部エネルギーは保存量である。

系の、質量（原子核反応を除く、物理的・化学的な変化において）、運動量（古典力学的変化において）、内部エネルギー（われわれの経験する変化において）などが保存量であり、エントロピー生成<sup>11)</sup>（われわれの経験する変化において）は保存されない。示量性物理量の保存性と非保存性は、実験をもとに理論的な考察によって確かめられて、広く適用できるときに、法則（あ

るいは原理)とよばれるようになる。質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則などであり、エントロピー生成の非保存性<sup>7)</sup>は熱力学の第二法則のことである。系内の化学物質の物質量は、化学変化が、起らなければ保存されるし、起れば保存されない。このような特殊な場合、物質量の保存則とはいわない。物質の特性を示す示強性物理量、たとえば、モル質量やモルエンタルピー、については無論、保存量とはいわない。また、エネルギーは、系から系に移動する際に消滅することはないのだが、これも保存則とは関係がない。

### 3. エネルギーの次元と測定について

ある物理量の測定とは、同種の物理量である単位と比較して比を求めること<sup>2)</sup>である。つまり、物理量は、 $\text{物理量} = \text{数値} \times \text{単位}$ の一般形<sup>9)</sup>であらわせる。単位と単位の積は新しい単位となるので、二種の物理量の積は、やはり、この一般形となる。いろいろな現象にともなう次の二種の物理量の組み合わせ(積)をみってみる。{力 $\times$ (力の作用点の移動距離)、圧力 $\times$ (体積の変化)、電位 $\times$ (移動する電荷、電気量)、表面張力 $\times$ (面積の変化)、仕事率 $\times$ (経過時間)、モルエンタルピー $\times$ (物質量的変化)、化学ポテンシャル $\times$ (物質量的変化)、化学親和力 $\times$ (反応進行度の変化)、温度 $\times$ (エントロピーの変化)、など}。いずれの積も、示強性物理量と示量性物理量の組み合わせで、その結果は示量性物理量となっている。以下で説明するように、積の一つを基準にすれば、その基準を用いて、残りの積は測定できることがわかる。たとえば、力 $\times$ (力の作用点の移動距離)の系に、温度 $\times$ (エントロピーの変化)の系(現象)をつなげると、後の系の測定は前の系の測定に帰着する(以下のジュール氏の実験)。つまり、上記の{…}の中の全ては、同一の次元<sup>9)</sup>をもつと考えてよい。そこで、これらの積の全てを同一視して、共通の名称として、エネルギー<sup>12,13)</sup>とよぶのである。つまり、エネルギーとは、一つの次元({…}全体の名称)でもあり、また、各積(の名称)をも指し示す。以後、各積をエネルギー表現とよぶことにする。慣習として、電位 $\times$ (移動する電荷)は電気エネルギーと、化学反応にともなうモルエンタルピー変化は化学エネルギーと、温度 $\times$ (エントロピー変化)は熱と、特別な名称でよばれている。電位は電荷あたりのエネルギーであり、表面張力は面積あたりのエネルギーであり、モルエンタルピー変化は物質量あたりのエネルギーであるなどと、各エネルギー表現の前項(示強性物理量)は、後項(示量性物理量)あたりのエネルギーとよばれることもある。さらにまぎらわしく、表面張力を表面エネルギーと、反応にともなうモルエンタルピー変化を反応エネルギーと、よぶこともある。

伝統的なエネルギーの定義では、まず、力 $\times$ (力の作用点の移動距離)を仕事とよぶ。これは、さらに細かくみると、いろいろな場合がある。系(物体)に働く力を、質量と重力加速度の積とみれば、そのときの仕事は位置エネルギーとよばれる、など。おもりの位置エネルギーが、羽根車をまわし水をかきまわすと、熱に変わる。つまり、二つの系(おもりと羽根車、水の入った器)を連結するのである。この1847年に始まる(ジュール氏の実験)は、仕事と熱の単位がそれぞれ定められていたので、熱の仕事当量を定める実験としても知られてきた。現在では、熱化学的  $\text{cal} = 4.184 \text{ J}$  と定義されている<sup>6)</sup>ので、熱の仕事当量を決定する実験としての意義はない。この実験の意義は文献 13 に詳しい。

系(エンジンなど)で燃料を燃やせば、化学エネルギーが熱に変わる。熱によって系(気体

とピストンなど)が、外界の圧力に逆らって体積変化すると、系は外界に力学的な仕事をしたことになる。この力学的な仕事で発電機をまわせば、電気エネルギーに変わる。電気エネルギーは、電気抵抗を使って熱(ジュール熱)に変わる。電気化学的な系(電池など)の放電では、化学エネルギーが電気エネルギーに変換される。電池の充電は、電気エネルギーを化学エネルギーとして蓄積することである。電気エネルギーでモータをまわして、おもりを持ち上げれば、位置のエネルギーへの変換である。このように、{…}の中のエネルギーは、系と系とを接続することで、相互に変換する(エネルギー表現が変わる)ので、エネルギーの等価性などとよばれている。言いかえると、力学的な仕事、熱による仕事、電気による仕事など、いろいろな仕事を考えて、それらは一つの仕事だと考えたのではなくて、一つのエネルギー表現を仕事と定めると、残りのエネルギー表現は、系と系との連結によって、相互に変換されるので、どのエネルギー表現も仕事と考えてもよい、ということである。

上述のエネルギーの相互変換の第一の意義は、エネルギーという物理量を物差しにして、いろいろな自然現象を横断的に見通すこと、にある。エネルギーは出处を問わず(系と系とを連結すれば、エネルギー表現によらず)加算できる(示量性物理量だ)から、系の全エネルギーは、現象に合わせてエネルギー表現を組み合わせ、それらの総和として記述すればよいのである。このことと、以下で述べる保存性(連結された系を一つの系とみなせば、全体としてエネルギーは保存される)とを結合すれば、われわれは極めて有力な関係式を得ることになる。第二の意義は、変換はエネルギーの移動とみなせるので、電気エネルギーを揚水によって位置エネルギーとするように、また、電気エネルギーを化学エネルギーとして電池に充電するように、エネルギーの移動ができて、しかも蓄積できることにある。

ここでエネルギーについて系の連結を、変換とみるだけでは不十分で、{…}の中のどの表現も同一の次元をもつとみることが大事な点である。ある物理量を基準にして、別の物理量と比較してみる。このとき、比の値が数値になれば、比較された物理量は同一の次元<sup>2)</sup>だという。つまり、{…}の中のエネルギー表現どれを基準にしても、残りのエネルギー表現を(系と系の連結の結果、相当する量として)測定できること、これがエネルギーを次元と意識するという意味である。ただし、ここでの測定は、いつも直接的な測定をするわけではない。電池の電気エネルギーでは、示強性物理量である起電力を測定して、それに、反応に関与する電荷数とファラデー定数を掛算すれば、モルあたりのエネルギーが求められるからである。このように、どのエネルギー表現を基準にしても残りが測定できるのだから、基準はわれわれの都合のよいように選べばよいことになる。あるいは、自然法則では、基準(単位)の選び方は決められないともいえる。SIは、 $J = N \cdot m$ にみられるように、力 $\times$ (力の作用点の移動距離)を基準に選んだ。

エネルギーの変換については、二つの注意が必要である。熱機関で熱を仕事に変換するとき、全ての熱が有効な仕事には変わらない。われわれの経験によれば(現実の世界では)、ある現象のエネルギーを利用しようとするときには、必ずその一部は別な表現になる。自然に起こる現象では、エネルギーが変換されると、利用できない熱エネルギーが必ず発生する。化学エネルギーを電気エネルギーに変換する(電池の放電)とき、その変化の過程がたとえ可逆的であっても、化学エネルギーは電気エネルギーに100%変換しない。また、自然に起こるエネルギー変換では、変化に方向性があることにも、注意するべきである。これらは、エントロピーにかかわる問題<sup>7)</sup>である。

#### 4. エネルギーの保存則について

エネルギー利用の歴史からみると、燃料を投入しないで永久に動く機械をつくろうとする試みは、人の長い間の願望<sup>13)</sup>であった。その結果は、完全に独立して永久運動をする装置(第一種永久機関)はつくれない、ということである。このことを含むわれわれの無数の経験を、エネルギー保存則として帰納する。系の内部エネルギーの変化量を  $dU$  とあらわす。この  $dU$  は、系内で生成消滅する  $d_iU$  と、系と外界との間で出入する  $d_eU$  との代数和、 $dU = d_iU + d_eU$  で書けるはず<sup>14)</sup>である。そこで、保存則は、次のような、いろいろな等価な言い回しが可能となる。つまり、(i) を仮定すれば、直ちに (ii) が成立するのがわかる。同様に、(ii) から (iii) が、(iii) から (i) が、成立することがわかる。

- (i)  $d_iU = 0$ , すなわち、系の内部エネルギー  $U$  は保存量である。
- (ii)  $dU = d_eU$ , すなわち、系の内部エネルギーの変化量  $dU$  は、外界から系に出入するエネルギーに等しい。
- (iii)  $d_eU = 0$  のとき、 $dU = 0$ , すなわち、孤立系 ( $d_eU = 0$ ) では、系のどのような変化に対しても(不可逆過程でも)内部エネルギー  $U$  は一定である。

上記の(iii)によって、内部エネルギーが状態量であることがわかる。内部エネルギーは、一定不変(誤解のひとつ)ではなくて、増減する。しかし、系の内部エネルギー生成はないと、

(i)は述べているのである。系の内部エネルギーが、もし増加していれば、それは必ず外界から入ってきているのであり、もし減少しているならば、それは必ず外界に出ていっているのであると、(ii)は述べている。つまり、(ii)は、第一種永久機関は不可能と主張している。教科書にのっているあらわし方では、たとえば、系と外界との間のエネルギーのやりとりを熱と仕事に限るとき、 $\Delta U = q + w$  となる。このとき、式の左辺が系についてであるのに、式の右辺が外界とのやりとりであることが、学習者にはわかりにくいし、誤解のもとになっているようである。さらに、 $q + w$  は変化の過程を示しているのであって、 $q + w$  がそのまま系に蓄積される(誤解のひとつ)のではない、ことはすでに注意した。保存という(われわれの日常の)語感にもっとも合う形式は、(iii)かもしれない。系がいろいろと変化しても、孤立系では内部エネルギーは一定不変に保たれると、述べているからである。

以上の言い回しは、簡単に、エネルギーは保存されると、整理される<sup>14)</sup>こともある。そこで、保存則についての理解があやしくなってきたら、上記の表式にみるように、 $dU$  と  $d_iU$  と  $d_eU$  の三者を区別することで、系と外界をはっきりと意識することが大切になる。

#### 5. 教科書にみるエネルギー導入法の問題点について

保存則は、実験をふくむ広範囲の経験の集約として、確立されるべきものである。経験から帰納された法則を教えるには、やはり、経験を思いおこすのがよい。第一種永久機関をつくろうとした試みは、すべて失敗した。第一種永久機関という言葉こそは使われないが、自動車が走りつづけるには燃料を補給しなければならないというような経験に、生徒は毎日、出会っている。これを出発点にする。このとき、系とその変化を明確に意識することで、保存性が何に

対してかが、はっきりする。保存性は、系の内部エネルギーの  $d_i U$  に対して成立するのであった。等価ないい回し (i-iii) を用いることで、保存則に関係する多くの誤解をさけるのである。

エネルギー表現の相互の変換は、いろいろな現象の見かけは異なる物理量が同一の次元をもつと考えてよい根拠である。エネルギーは抽象的な概念だから教えるにくいと、中等教育の教師の声を聞くことがある。だが、長さは抽象的な概念であつかいにくいとは、いわない。長さは、{机の幅、身長、歩く距離、山の高さ、穴の深さなど}の日常的に経験する物理量に、{地球の周長の4万分の一、光が真空中を1秒の1/299792485の時間に進む行程など}の物理量を加えて、次元とみなしたものである。つまり、どれか一つを基準(単位)に選べば、残りのどれとでも比較できること、つまり測定できる物理量という視点からすれば、長さエネルギーとに違いはない。長さエネルギーにおける上記の違いは、生徒にとって体験の多い少ないにすぎないのである。力のベクトル  $F$  と微小移動距離のベクトル  $dr$  の内積  $F \cdot dr$  として仕事を定義すると、電気エネルギーは仕事とどうして等価か、に答えるのが変換である。まずいろいろな変換を体験すること、このような相互の変換を教えることこそ、自然科学教育で採用すべき内容であろう。エネルギーを定義から出発するのはよくない。

エネルギーの導入に単位から始めるのは、よくみかけるがよくない。身長とか机の幅とかは、単位であるメートル(と物差し)を知ってから、理解するわけではない。計器は感覚の延長であり、その逆ではない。単位を与えてからエネルギーをかんがえるのではなくて、エネルギーに関係する現象を集めて、エネルギーとよぶ次元をつくるのであった。この次元の中から、どれを単位に選んでもよいこと、このことこそ、自然科学教育でなされるべき内容であろう。したがって、エネルギーの教育で大事な点は、まずは相互の変換であって、見かけは異なる現象が、エネルギーという物理量で共通して測定できる(比較できる)こと、にある。単位を導入して測定する、つまり、定量化するのは後のこととするべきである。

エネルギーの単位は、エネルギーという次元の中から取り出した、人の約束で定められる物理量である。SIでは、エネルギーの単位は、 $J = N \cdot m$  と定義される。エネルギーをSIの基本単位に分解すると、 $m^2 \text{ kg s}^{-2}$  である。これらの単位を組み合わせると、前出のいろいろなエネルギー表現となる。たとえば、 $N \times m = (N/m^2) \times m^3 = (N \text{ m})/C \times C = (N/m) \times m^2$  の第一項は力×長さで、第二項は圧力×体積で、第三項は電位×電荷で、第四項は表面張力×面積である。SIは、 $N$  と  $m$  をもとにみれば無論、第一項が最も簡単であるように、組み立てられている。簡単なものから説明するという立場からすれば、エネルギーの導入を力×長さから出発するのだが、以下でさらに、検討してみる。

エネルギー表現はどれをとっても、物理的には等価であった。単位としてどれを選ぶべきかを、検討してみよう。かって、単位 cal (15℃カロリー)は、水(14.5–15.5℃)1gの温度を1℃上げるのに必要な熱、と定められていた。中等教育の多くの教師から、この定義は教えやすい、ジュールではエネルギーの量の感覚をつかませにくい、と聞くことがある。これは熱と温度を混同している議論であって、このとき、感覚で知りえているのは温度で、熱ではない。熱は、確かに、身の周りのありふれている現象にかかわっているし、単位 cal の定義はみかけはやさしい。だが、ほんとうに、熱の単位 cal は感覚的にわかりやすいのだろうか。エネルギー表現を分解して、その示強性物理量を取りだしてみると、力、圧力、電位、仕事率、温度などとなる。これらの中で、人の感覚で感じられる物理量は、力(筋肉の感じ)や温度(皮



膚の感じ)である。熱は温度とエントロピーの積に、仕事は力と距離の積に、分解できることを比べると、カロリーはジュールよりもむしろ難解であると思ってよい。示量性の物理量として、エントロピーと距離を比べれば、距離のほうがまだ、導入しやすいであろう。エントロピーは直接、測定できないが、距離は物差しをあてて測定できるからである。以上の議論を根拠にすれば、エネルギーの単位は、ジュールから導入するのがやさしいことになる。

エネルギーの単位量  $J$  を感覚的につかむには、次のような例題<sup>2)</sup>を工夫したり、人の心臓が一回鼓動するとき消費するエネルギーが  $1 J$  である<sup>14)</sup>などの例をとりあげるのがよい。ニュートンを重力の加速度で割れば、 $N/(9.8 \text{ m s}^{-2}) = 0.102 \text{ kg}$  となる。そこで、地上で  $100 \text{ g}$  のりんごを  $1 \text{ m}$  持ちあげると約  $1 J$  の仕事となる。仕事率の定義は、 $W = J/s$  なので、地上で、 $100 \text{ g}$  のりんごを  $1$  秒間で  $1 \text{ m}$  持ちあげると仕事率は  $1 \text{ W}$  となる。電場による仕事は、 $J/C = V$  なので、電荷  $1 \text{ C}$  を電場に置いて、 $1 \text{ N}$  の力が働くとき、 $1 \text{ m}$  動けば、 $1 J$  の仕事をするから、この電位は  $1 \text{ V}$  である。

## 注 と 文 献

- 1) D. H. Everett, An Introduction to the Study of Chemical Thermodynamics, 2nd ed., Longman, 1971. エベレット著「入門化学熱力学」玉虫伶太、佐藤弦 訳、東京化学同人 (1974)。
- 2) 上越教育大学研究紀要, 16(1), 279 (1996)。
- 3) 化学ポテンシャル (chemical potential) とは、物質量が一種のときでは、状態関数  $G(T, p, n)$  に対して、 $\mu = (\partial G/\partial n)_{T,P}$  をいう。
- 4) 化学反応の親和力 (affinity of reaction) とは、反応に関するギブスエネルギー  $G(T, p, \xi)$  の変化量のことで、反応を進行させる駆動力という意味がある。つまり、 $A = -(\partial G/\partial \xi)_{T,P}$  である。
- 5) 反応進行度 (extent of reaction)  $\xi$  は、次のように定義される。化学量論を満たしている化学反応式において、ある物質の物質量的変化をその物質に付随する化学量論係数 (反応前後で、負と正の符号をつけて) で割算する。物質ごとに得られる値は、物質によらないで、互いに等しい。たとえば、化学量論式  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$  における三種の物質量の微小変化、 $dn(\text{H}_2)$ ,  $dn(\text{O}_2)$ ,  $dn(\text{H}_2\text{O})$  を考えると、 $dn(\text{H}_2)/(-2) = dn(\text{O}_2)/(-1) = dn(\text{H}_2\text{O})/(+2)$  の関係があるので、それを  $d\xi$  と置く。したがって、反応進行度の単位は  $\text{mol}$  となる。上の反応式全体を  $2$  で割り、そのときの反応式に対する反応進行度の変化を  $d\xi'$  とすれば、 $d\xi'/2 = d\xi$  となる。このように、反応進行度は化学量論式に依存する。
- 6) I. Mills et al., Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry, IUPAC, Blackwell Scientific Publications, Oxford (1988); 2nd ed., 1993. 日本化学会標準化専門委員会 監修、朽津耕三 訳「物理化学で用いられる量・単位・記号」講談社 (1991)。
- 7) 可逆過程や不可逆過程、さらにエントロピーやギブスエネルギーの議論には、準備が必要である。エントロピーの測定方法をふくめて、稿を改めて議論する。
- 8) 変化量の記号の使い方には、いろいろな流儀があるので、注意する必要がある。たとえば、反応のエンタルピーを考える。化学反応が、 $\xi(1)$  から  $\xi(2)$  へと進行するときの変化量を

$\Delta\xi = \xi(2) - \xi(1)$  と書いたとする。エンタルピーを状態変数  $T, p, \xi$  の関数とみなす。 $H(T, p, \xi)$  に対して、 $\Delta H$  は普通、 $H(T, p, \xi(2)) - H(T, p, \xi(1))$  をあらわすが、 $T$  と  $p$  共に一定で、 $(\partial H/\partial \xi)_{T,p}$  を  $\Delta H$  とかくことがある。ここで、一定とは変化の前後で、すなわち、状態の (1) と (2) とで同じという意味だが、 $H$  は状態量なので、その途中では違っていてもよい。

- 9) 上越教育大学研究紀要, 17(1), 365 (1997)。
- 10) D. S. Tsoussis, *The Physics Teacher*, 33, 568 (1995). Exercise 2: 質量  $m$  の球体が速さ  $v$  で運動している。その  $v$  を、 $60^\circ$  の角度をなす  $v_1$  と  $v_2$  に分けたとする。これらの  $v_1$  と  $v_2$  に対応する運動エネルギーは、それぞれ、 $E_1 = 4.5 \text{ J}$  と  $E_2 = 4.5 \text{ J}$  とであった。全運動エネルギー  $E$  を求めよ。無論、エネルギーの加法による、 $E = E_1 + E_2 = 9 \text{ J}$  という計算は、間違っている。まず、 $E_1 = (1/2)mv_1^2 = 4.5 \text{ J}$  と  $E_2 = (1/2)mv_2^2 = 4.5 \text{ J}$  と  $v^2 = v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2\cos 60^\circ$  からの値を、 $E = (1/2)mv^2$  に代入して、 $E = 13.5 \text{ J}$  を得る。つまり、二つのスカラー量を加えたいときは、まず、それらが共通のある物理量に依存するか、しないかを調べる。依存するならば、その物理量における関係を調べて、その関係が一次式の場合のみ、代数的に加えてよい。依存しないならば、加法には問題はない。
- 11) 示量性物理量の変化量を系と外界とに分ける表記法は、熱力学ではよく知られている。I. Prigogine, *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, New York (1955) の pp. 7, 9 など、たとえば、 $dS = d_iS + d_eS$ 、とある。この右辺の第1項と第2項はそれぞれ、エントロピー生成 (entropy production) とエントロピー流 (entropy flow) とよばれている。和訳のある文献は、I. Prigogine and R. Defay, *Chemical Thermodynamics*, English translation by D. H. Everett, Longmans Green, London (1954) : プリゴジヌとデフェイ「化学熱力学」妹尾学 訳、みすず書房 (1966)。
- 12) 片山正夫「分子熱力学総論」河出書房 昭和22年10月初版 (p. 17) では、「勢力とは仕事に変じ得る諸量の総称である」という。ここでの「勢力」とはエネルギーのことである。
- 13) W. オストワルト「エネルギー」山根春次訳、岩波文庫 (1938)。
- 14) P. W. Atkins, *Physical Chemistry*, Fourth Ed., W. H. Freeman, New York (1990), p. 30.

## The Physico-Chemical Properties of Energy and Its Introduction to Science Education

Tetsuo MORIKAWA\* and Hiroshi SHIMOMURA\*

### ABSTRACT

A great variety of questions and misuses with relation to both energy and work appears in high school education. Such mistakes are due to confusion between energy and other physical quantities; and science learners often leave behind the distinction between a system and the external world, to which the law of conservation of energy is applied, and forget the origin of the dimension of energy. We try to clear up such misunderstandings by way of discussing the physico-chemical properties of energy and of physical quantities relating to energy. Under the discussion we consider how to introduce the concept of energy at the high school level.

---

\* Division of Science