

理科の教育 10

理 科 教 育 の 本 質 を 追 究 す る

【特集】

理科の見方・考え方 — エネルギー —

「量的・关系的」などの視点から見える「エネルギー」を科学する楽しさ

「見方・考え方」を働かせる「エネルギー」の学習

「見方・考え方」を働かせた「エネルギー」を柱とする領域の授業

編集 一般社団法人日本理科教育学会



「量的・関係的」などの視点から見える「エネルギー」を科学する楽しさ

エネルギーに関する教育と研究

長谷川 修司

1. はじめに

私は理学部物理学科に所属し、物性物理学の教育と研究を行っている。特に、表面物理学という看板を掲げており、半導体や超伝導体などの物質の表面や、それらをナノメートルサイズに小さくしたときの構造と電気・磁気・光学的性質を調べている。理学部という所属の関係上、物理学としての基礎的な興味・観点から研究を進めているが、それにある意味反して、研究費の申請書や論文のイントロには必ずお決まりのフレーズを書く。つまり、私の研究は、将来の省エネ・高速デバイスや高感度センサーの基礎として役に立ち、人類の持続的発展に寄与するだろう、と。そんな大風呂敷を広げるのは私だけでなく、ほとんどの研究者が使う常套句なので、なんの良心の呵責も感じることなくバラ色の夢を語って自分の研究を正当化している。もちろん、2014年のノーベル物理学賞になった赤崎、天野、中村教授たちの青色発光ダイオードの研究を見れば、特定の結晶や物質の地道な研究が大きな社会的インパクトをもたらすという例もあり、上述の大風呂敷もあながちホラではないと思っている。

たしかに地球温暖化の議論のなかで起きた2011年の東日本大震災をきっかけに、エネルギー・環境問題、人類社会の持続的発展といったことについて人々の意識が高まったのは事実であろう。また、太陽光発電だけでなく、燃料電池、人工光合成、バイオマスなど、様々な「新エネルギー」と、LEDやスピンドバイスなど省エネの研究に多くの研究費が投入されているのも事実である。

一方、原因や様相の違いはあれ、このような社

会の雰囲気は、実は1970年代の石油ショックのときにも高まったという歴史を思い起こす人は意外と少ないようだ。私が学部学生だった1980年前後には、もうすぐ石油は枯渇するので、これからのエネルギー源は原子力だと叫ばれて、大学での原子力関係の講義はいつも超満員だったのを覚えている。光化学スモッグの原因となった化石燃料からの脱却というフレーズも一定の説得力をもって受け入れられていたのを覚えている。

研究費が税金で賄われているのを考えれば、いい意味でも悪い意味でも最先端の科学技術の研究動向が社会の雰囲気に左右されるのは仕方ないことだが、一方で、初等中等教育ではもっと慣性が大きく、社会の雰囲気によってブレることのない方針が貫かれているはずだと信じている。その時々的事象や流行に無関心でいてはいけないとは言え、社会の雰囲気に左右されない部分、自然の摂理を客観的に学ぶ態度や論理的な思考の展開を涵養するといった基礎的な部分をしっかりと次世代に教え込むことが、高校までの教育では何よりも重要であろう。

私は、前回の学習指導要領の大幅改訂のときから、中学校理科の教科書の物理分野の編集に関わっている。時代の流れを取り入れた「生もの」の部分と、ガリレオやニュートンの昔から変わらない「干もの」の部分の織り交ぜながら、教科書をいかに魅力的にするか、中学生にいかに理科に興味をもってもらうか、長時間の議論を重ねて教科書が出来上がっていくのを目の当たりにしている。本特集で取り上げられているエネルギーに関する話題は、時代に即した教育内容とはどのようなものか考え直すのに格好なトピックスである。エネルギーは日常語としても広く使われているが、物

理でいうエネルギーの意味を定量的な概念を基に学ぶことは、まさに上述の「干もの」の核心であり、その理解の上に立って「生もの」である現代のエネルギー問題を考えることは、大変教育的である。ある意味、理科や数学の教育の意義が高まっている現代だからこそ、教育内容と教え方を見直す好機と言える。

2. エネルギー保存則と省エネ

エネルギーに関して、中学校理科で学ぶもっとも重要な概念は「エネルギー保存則」であろう。ジェットコースターを例にして、位置エネルギーと運動エネルギーの総和がいつも一定であり、高いところに登ればスピードが落ち、低いところに来ればスピードが速くなるという日常体験を、エネルギーの保存則という概念に一般化して定量的に理解することが物理の醍醐味である。自由落下や振り子の運動もその例としてよく教科書に出てくる。

そのあと教科書では、エネルギーには、位置エネルギーと運動エネルギーという力学的エネルギーだけでなく、電気エネルギー、熱エネルギー、光、音、化学エネルギーなどいろいろな種類があって、さらに利用の目的に応じて一方のエネルギーから他方のエネルギーに変換できるということを学ぶ。高い山の上から水を落として発電タービンを回し、位置エネルギーを電気エネルギーに変換する水力発電、太陽からの光エネルギーを吸収して植物が光合成でデンプンを作って化学エネルギーに変換して蓄え、それを人間が食べて体を動かして運動エネルギーに変換されていくとか、様々なエネルギー変換の例を学ぶ。

教科書に書かれているこのような内容はもちろん正しいのだが、一方で私が老婆心ながら心配していることがある。「エネルギーを消費する」とは日常的にもよく使う言葉だが、エネルギーを消費してなくなってしまったら、エネルギー保存則に反しているのではないかと生徒たちが疑問をもつのではないのか、という心配である。エネルギーの総和は常に一定で、増えもしなければ減りもしない、というエネルギー保存則と、エネルギ

ーは使えばなくなるという日常体験との食い違いを、生徒たちは頭の中でどう折り合いを付けているのだろうか、と私は気にしているのである。「エネルギーを消費する」ということはどういうことなのか、よく考えるとエネルギー保存則に反しているわけではないことが分かるのだが、どれだけの先生や生徒がそこまで深く考えているのかは分からない。

エネルギーには、使いやすい形のエネルギーと使いにくい形のエネルギーがあることをよく教えるべきだ。上述の水力発電や電気ストーブなどを思い出せば、位置エネルギーや電気エネルギーは使いやすいエネルギーである一方、いったん熱エネルギーや音エネルギーになってしまうと、それを集めて他のエネルギーに変換するのは難しいので、それらは使いにくいエネルギーと言える。もちろん、熱エネルギーでお湯を沸かして発電タービンを回せば電気エネルギーに変換できるが、そのような特殊な場合を除けば、ストーブからの熱や摩擦熱などを回収して他のエネルギーに変換して有効活用するのは一般には難しい。街中の騒音を利用して発電することは不可能ではないだろうが、難しい。

自動車が、ガソリンの化学エネルギーを運動エネルギーに変換するとき、エンジンで熱や音も同時に発生してしまうし、タイヤが摩擦力で逆らって回転するときにも摩擦熱に変換されている。熱や音になって逃げてしまうエネルギーがあるので、「エネルギーを消費する」とエネルギーがなくなってしまうという表現につながる。「エネルギーを消費する」とは、電気エネルギーや化学エネルギーなど使いやすい形のエネルギーから、熱や音エネルギーなど回収して再利用するのが難しい形のエネルギーに変換することであり、しかも、その変換のときに逃げていってしまうエネルギーもすべて合わせれば、ちゃんとエネルギー保存則は成り立っているのである。理科で習う法則は日常生活とはかけはなれた「理想郷」での話ではないということを生徒たちにしっかり教えてほしい。もちろん、エントロピーの概念をもちだすと、理科嫌いの生徒を増やすだけなので、やめたほうが

いいと思うが、少なくともエネルギー変換の効率を丁寧に説明して、そこで起こるエネルギーの損失や変換によるエネルギーの「質の変化」を理解することは重要だと思う。

エネルギーの総量は保存していて減りもしなければ増えもしない、ということを上述のような正しい意味で理解すると、「省エネ」の意味も一段深い形で理解できるだろう。

同じ明るさをとるためには、電球よりLEDのほうが省エネだと言われるが、どういう意味だろうか。たしかに、LEDを使うと電気代が安くすむが、エネルギー保存則から考えてみると、電球では、光のほかに大量の熱も生み出してしまい、同じ光の量を生み出すのにLEDよりも大量の電気エネルギーが必要だという意味なのである。光を生み出すという目的が効率よく達成されている、という意味でLEDの方が省エネだと言っているだけである。別の言い方をすれば、電流の担い手である電子のエネルギーが光のエネルギーに変換される効率が高いか低いかという違いだが、効率が低いとは、目的としない他の種類のエネルギー（多くの場合は熱エネルギー）として逃げていってしまうエネルギーが多いという意味である。省エネとは、目的とは違った種類のエネルギーになって逃げてしまうエネルギーの量を減らすということなのである。一定の量の光を生み出したり、一定量の仕事をするには、決まった量のエネルギーが必要だが、省エネとは、それに必要なエネルギーの量が少なくて済むということではない。

エネルギーの保存則は、一見すると日常体験に反しているようにみえるが、上述のような考察を生徒と一緒に考えてみると、物理の深い理解と論理展開の面白さが生徒に伝わるのではないかと思う。

3. 最先端の研究—省エネパソコン—

パソコンを長時間使っていると本体が熱くなっているのに気付く。これは、電子回路を流れる電流によって生み出される「ジュール熱」である。省エネの研究としては、同じ機能をパソコンにさせるとき、発生するジュール熱をなるべく少なく

する方法なりデバイスを開発するというのが目標になる。ジュール熱は、パソコンの機能発現にはまったく寄与していないので、目的以外の無駄なエネルギーとして発生しているだけで、これを少なくすることが省エネになる。

ジュール熱はなぜ発生するのか。金属や半導体の中の電子が電圧によって引っ張られて一定方向に流れて電流になるとき、その物質の中の原子や不純物、欠陥によって電子が散乱されてエネルギーを失う（非弾性散乱）。その失われた電子のエネルギーが熱となって出てくるのがジュール熱である。印加した電圧を V 、そのとき流れる電流を I とすると、1秒間に発生するジュール熱は、その積 $V \cdot I$ である。だから、電圧をかけなければ電子は一定方向に流れない、つまり電流がゼロなので、ジュール熱も発生しない。

しかし、電圧をかけなければ物質の中の電子は止まっているのかということそうではない。電子は非常に速いスピード（フェルミ速度という）で物質内を動き回って右往左往しているのである。ただ、その運動の向きがバラバラなので、全体として電流は流れない。電圧をかけると、そのバラバラの動きの速度のうち、電圧方向の速度成分がわずかに増えるので、全体として一定方向に電子が移動することになる（その速度をドリフト速度という）。これが電流として観測されるのである。ドリフト速度はフェルミ速度より何桁も遅い。

電圧をかけないときに、電子がフェルミ速度という速い速度で動き回っているのにジュール熱が発生せず、電圧をかけて一定方向にドリフト速度で動かしたときにだけジュール熱が発生するのはなぜだろうか。電圧をかけないときには、電子は非弾性散乱を起こしてエネルギーを失うことができないのである。つまり、電圧をかけないときにはエネルギーが変化しない弾性散乱だけ起こっている。なぜなら、その電子より低いエネルギーの状態はすべて他の電子によって占有されていて空席がないので、フェルミ速度で動き回っている電子は、エネルギーが下がらないのである。一方、電圧をかけると、電子は加速して過剰な運動エネルギーをもつようになるが、欠陥などに散乱され

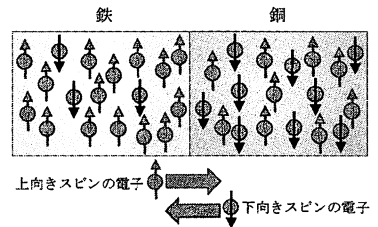
て非弾性散乱を起こして、その過剰な運動エネルギー分を熱として放出し、自分は元のエネルギー状態に戻ることができる。このように、電圧で電子を無理やり一定方向に引っ張って加速させると、非弾性散乱が可能となり、それゆえにエネルギーを損失し、それがジュール熱として出てくるのである。

ジュール熱を発生させずに電子を一定方向に流すことは可能だろうか。

実は、電圧を印加すること以外に電子を一定方向に流す方法がある。電子がたくさん集まって濃度の高い場所と、濃度が低い場所があれば、電子は自動的に濃度の高い場所から濃度の低い場所に流れる。これを拡散流という。水中に垂らしたインクが、次第に広がって薄まっていく現象を想像してみよう。しかも、ホースのような管の中に入っている水的一端にインクを入れると、水が流れていなくともインクの粒子が他端に向かって流れて広がっていくのが想像できるだろう。電子の場合にも、濃度の高い場所から低い場所に電子が流れて広がっていく。これは、上述のドリフト流のように、速度成分の違いで動いているのではなく、濃度の違いで電子流が特定方向に流れるのである。これは、電圧で引っ張って加速しているわけではないので過剰なエネルギーをもたず、したがって非弾性散乱でジュール熱を発生することもない。この原理を利用すれば、エネルギーを使わずに電子の流れを生み出すことができる。

このような電子の流れはどうやったら作れるのだろうか。ここ10年ほどの研究で、電子に備わっている「スピン」という性質を利用して、このような電子流を作り出せるようになった。スピンとは、磁石のような性質で、一個一個の電子は極微の磁石と考えていい。だからN極が特定方向を向いた電子を「上向きスピン」をもつ電子、その反対向きの磁石をもつ電子を「下向きスピン」をもつ電子と呼ぶことにすると、物質中の電子はこの2種類しかない。金や銅など磁石ではない物質の中には「上向きスピン」と「下向きスピン」の電子が50%ずつ同数入っているが、鉄やコバルトなどの磁石になる物質には、「上向きスピン」の

電子が圧倒的に多く、例えば80%入っているが、「下向きスピン」の電子は20%しか存在しな



い。そこで銅と鉄を接触させるとどうなるか。鉄では「上向きスピン」の電子の濃度が高いので、鉄から銅に「上向きスピン」の電子が「溢れ出てくる」(拡散)。同時に「下向きスピン」の電子は、鉄では濃度が低いので、逆に銅から鉄に拡散していく(図参照)。このように、それぞれの向きのスピン電子の濃度の違いを利用すると、拡散する電子流を作り出せる。そのとき、上述の理由でジュール熱は発生しない。ここで、鉄から銅に流れる「上向きスピン」の電子流と、逆向きに銅から鉄に流れる「下向きスピン」の電子流の量はまったく同じなのでトータルとして電流はゼロになっている。今、鉄と銅の間には電圧をかけていないので当たり前である。しかし、何らかの方法で「上向きスピン」の電子流にだけ「信号」を載せると、エネルギーを消費することなく、その信号は鉄の側から銅の側に伝わっていくことになる。

このようなアイデアを利用した電子デバイスを作ろうとする分野が「スピントロニクス」という分野であり、省エネ研究の花形として今、世界中で盛んに研究されている。エネルギーを消費することなく、スピンの反対向きの電子流が反対向きに流れるので、それに何かの信号を載せて電子デバイスとして利用しようと考えられている。エネルギー消費ゼロの夢のようなデバイスができるかもしれない。それを使えば、パソコンは熱くなることもないし、バッテリーの保持時間が劇的に伸びる。私の研究室でも、物質の表面付近でこのような特定の向きのスピンをもつ電子の流れを効率的に作るにはどんな物質を使ったらいいのか、特定のスピンの電子流をどうやって測るのか、などの研究に明け暮れている。トポロジカル物質と言われる物質が、この目的によさそうだと分かってきた。

はせがわ しゅうじ (東京大学大学院理学系研究科教授)