

エネルギー概念・換算*1

1. 日常のエネルギー

日頃あらゆる場面で接している物事をエネルギーという視点から整理しておくことは重要である。イメージや直観、感覚は非常に重要であるが、力、仕事、エネルギー、熱、温度、エネルギー変換効率などの概念や単位系を明確に理解しておかないと、正しい比較が困難になる。

1.1 日常のエネルギー

室温 $28^{\circ}C (T = 300K)$ のエネルギーは、 $k_B T = 0.0258eV = 2.5 \times 1.6 \times 10^{21} J = 4 \times 10^{-21} J$ である。($1eV = 1.6 \times 10^{-19} J$ を用いた。また、 $1GJ$ (ギガ・ジュール) = $10^9 J = 10$ 億 J である。 $1PJ = 10^{15} J$ 。) 熱エネルギー換算では、「石炭 $3t$ =石油 2000ℓ =天然ガス 1.5ℓ =MoxFule34 ペレット」とい等価性があり、この単位で表示すれば、「米 $10kg \rightarrow 0.136GJ$ 、電力 $1kWh \rightarrow 0.0036GJ$ 、原油 $1kl \rightarrow 8.2GJ$ 」となる。

成人の摂取必要カロリーは概ね $2000 \sim 2500 Kcal$. ($1cal = 4.2J$ より $8000KJ \sim 10000KJ$ 程度。) 人は平均で $96.85W \sim 121.1W$ 程度のエネルギー消費を行っている。*2 ちなみに、日本は 1 人当たり 1 日石油 5ℓ のエネルギー消費をしており、人間は食事から得るエネルギーの 40 倍のエネルギーを使っている。一方、砂を食ったり再生したりする興味深い生物ナマコのエネルギー消費は非常に小さい、筋肉は体重の 5 パーセントしかない。

さらに、典型的な自然現象のエネルギースケール*3 は次のようである。

1. 海の波のエネルギー (表面波): $10kW/m \rightarrow 3.6 \times 10^7 J/m$ (日本周辺の平均波力エネルギー密度)
2. 津波のエネルギー: $1.0 \times 10^5 J/m^2$
3. 台風のエネルギー: $1.4 \times 10^{17} J = 1.4 \times 10^8 GJ$ (大型台風 $1.8 \times 10^{20} J$)
4. 雷のエネルギー: $1.5 \times 10^9 J = 1.5GJ$ (一回の平均)
5. 地震のエネルギー: $2.0 \times 10^9 J = 2.0GJ$ (マグニチュード $M=3$ の場合、 M が 1 上がると 30 倍になる)
6. 太陽エネルギー: $174PJ = 1.74 \times 10^{17} J = 1.74 \times 10^8 GJ$ 1 秒あたりに太陽から地

*1 電磁気学の講義に関連して。現在作成中の原稿である。環境問題、日常問題、生体内の問題を考えるときにも有用かもしれない。

*2 ワット W は $1s$ 間に消費するエネルギーをジュール単位で表現したものである。 $1day = 24 \times 3600s = 86400s$ からわかる。これは寝ているときも含めての平均。

*3 $1J = 1W \times 1s$

球に届くエネルギーの総量

太陽エネルギーについては、シュテファン・ボルツマンの法則 ($E = \sigma T^4$) を用いた。太陽半径 ($7 \times 10^8 m$)、太陽表面温度 ($1.5 \times 10^{11} m$)、太陽地球間距離 ($5770^\circ K$) から計算すれば、温室効果がない場合地球表面温度は約 $-20^\circ C$ にしかならないこともわかる。また、雷については、雷雲と地上間で一億電子ボルト ($10^8 eV$) のエネルギーが蓄えられている。原子力エネルギーとの比較に言及しておく。 $E = mc^2$ というアインシュタインの質量とエネルギーの等価性を示す式から、石油とウランのエネルギー変換効率を計算できる。それぞれどのくらいの質量がエネルギーに変わるのか。最近の研究では科学反応 (石油燃料) のエネルギー変換率: 0.00000001 パーセント つまり、石油を 100t 燃焼して、ようやくそのうちの 1g が熱や光のエネルギーに変わるという結果である。これに対して、核エネルギーの場合は核分裂反応 (ウラン 235) のエネルギー変換率: 0.09 パーセント と言われている。多くの質量がエネルギーに変わっているということは、すなわち、そこから得られるエネルギーがそれだけ大きいということになる。

1.2 地球上の電気磁気エネルギー

電磁気のコンデンサーまたはコイルのところで、電場の強さ E とエネルギー U_E 、磁場の強さ H とエネルギー U_H の概念を学んだ。磁束密度 $B = \mu_0 H$ 。地球上の (日本付近での) 電場の強さ ($\sim 130 V/m$, 約 1m で 100V の電位差) と磁場の強さ ($\sim 0.2 \sim 0.6 G$, 日本付近は $0.3 G$) を用いて、電場・磁場のエネルギーを計算してみよう。電場のエネルギー密度は、

$$U_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 (130 V/m)^2 \quad (1)$$

$$\sim 10^{-7} J/m^3 \quad (2)$$

磁場のエネルギー密度は、

$$U_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2 = \frac{1}{2} \frac{10^7}{4\pi} (3 \times 10^{-4} T)^2 \quad (3)$$

$$\sim 10^{-1} J/m^3 \quad (4)$$

となり、約 6 桁磁場の方が大きいことがわかる。ここで、 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$, $\mu_0 = 4\pi/10^7$ および、 $1 A/m = 4\pi/1000 Oe$, $1 Oe = 1000/4\pi A/m$ (磁場の強さ単位)。雷の時以外地球電場をあまり問題にしないが、方位磁針などをはじめ地磁気や地球磁場に関する現象は様々な場面で出あうことが比較的多い。

1.3 生体のエネルギー

まず膜輸送には物質の輸送にエネルギーを必要としない受動輸送と物質の輸送にエネルギー

ギーを必要とする能動輸送がある。膜には Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- などのイオンを通す穴 (イオンチャンネル) がある。チャンネルは選択性がありナトリウムチャンネルは Na^+ だけを通す。チャンネルにはゲート (門) の構造がありゲートが開くとイオンが流れ、閉じるとイオンの流れが止まる。ゲートの開閉は「特定の分子が受容体に結合してゲートを開ける」リガンド作動性チャンネルと「膜内外の膜電位によって制御している」電位作動性チャンネルがある。 受動的にイオンを透過させるイオンチャンネルの開閉エネルギーは $4 \times 10^{-21} J$ 程度であり、開閉に必要な力は $1 pN$ 程度のオーダーである。また、生体膜の膜電位に逆うプロトン移動のエネルギーは $= 5 - 10 kcal/mol (= 0.2 - 0.4 eV)$ である。ジュールに換算すれば、約 $10^{-20} J$ 。

2. 電力・エネルギーに関するアンケートクイズ

工学部 2 年生^{*4} の電磁気学の講義の初めに、「事前アンケート」で次の問を出し回答してもらった。「(4-1) スイッチを入れるとすぐに電灯が点くのはどうしてか?」「(4-2) 電磁波はまっすぐ進む、本当かうそか? できれば理由も答えよ」その結果は次のようなものであった。(解答者約 90 人、数字は同様な回答数を表す。)

(4-1)「電流・電気が流れるから 22、電子(電流・電気)は速いから・光の速さだから 22、つながるから 21、入った電子に先の電子が押し出されるから 5、常に電気が流れているから 3、抵抗が少ないから・電気をよく通すから 3、電圧差があるから 2、電子が動くから 2、電流が運ばれるから 1、電圧がかかるから 1、電気エネルギーが光エネルギーに変わるから 1、電導率が大きいから 1、電子とガスの原子がぶつかって発光するから 1、電気が伝わっていく 1」

(4-2) うそ 71 (以下は理由) 「波だから 17、(空白)7、何かの影響を受ければ曲がる 6、円状に進む 4、振動しながら進んでいる 3、電場により変わる 3、障害物にぶつかれば 2、波は曲げられる 2、横波だから 2、磁石の周りの砂鉄は曲線になるから 2、波は振動するから 2、磁力で曲がる 2、~~~ な感じで進行するから 2、力が加わり絶え間なく変化しているから 1、遮ることができる 1、磁力の一つだから 1、回折しそう 1、波動になるから 1、磁界の影響を受ける 1、波があるから 1、正弦波のように思う 1、波だからぶれる 1、多くの電荷がさまざまな方向に動いているから 1、重力で曲がる 1、地球の磁場の影響を受ける 1、雷はくねくねしてるから 1、空間は歪むらしいし、光だって曲がるし 1、屈折させられるし、曲がりそう 1、同じ電気(プラス、マイナス同士)を持つ物質とは反発するから 1、信じたくなかった 1」

^{*4} 偏差値 50 位の国立大学工学部なので、一般市民の感覚に近いかもしれない。

本当 21 (以下は理由)「光もまっすぐ進むから 3、波だから 2、そう聞いたことがある
2、TV で見た 2、障害物・干渉が無ければ 2、でも曲げようと思えば可能 1、うねっている
が進行方向はまっすぐ 1、トンネルでは伝わらないから 1、縦波だから 1、横波だから 1、
大きく見ればまっすぐ 1、(空白)1、物質中も突き抜けるから 1、そう思っている 1、磁界と
電界が相互に影響し直進 1」

両方 1 (以下は理由) 「横波だが、進行方向は曲がらない 1」

次のクイズも考えて回答してください (p129)

1. クイズ 1: $1kW$ の電気ストーブをつけるのと、全て合わせて $1kW$ になるテレビ、ステレオ、冷蔵庫、照明をつけるのとどちらが暖房効率はおおきいか。
2. クイズ 2: 閉め切った部屋で冷蔵庫のドアを開けっ放しにしたら、部屋の温度はどうなるか。
3. クイズ 3: 雷が突起物に落ちやすいのはどうしてか。雷が落ちるくらいの電位差があれば、電球はつく。頭と足の間の電位差は?
4. クイズ 4: 電車に窓がなかったら携帯電話はどうなるか

3. 送電問題

先のアンケートにもあった電子や電流の流れる速さに関して考察しておこう。

3.1 電子の速さと電流の速さ

電流は原子核の束縛から解放され、一方向に動き出した自由電子の流れであり、電子の進む向きと逆向きに流れるものと定義されている。その電気の流れる速さは光や電波の速さと同様同じ $3 \times 10^{10} cm/s$ (秒速約 30 万 km) で、一見、人間の感覚からすれば電子が一瞬に移動するかのようと思う。本当であろうか? 実際には、電子の流れは通常 $0.1cm/s$ (秒速 1mm) 以下である。^{*5} これを説明するために良く用いられるのが、銅線を管、電子をパチンコ玉に見立てた、「両端が開いている管にパチンコ玉をいっぱい詰めた状態」である。この状態で、管の一方の端から新たにパチンコ玉を 1 個を押し込むと、その瞬間に管の他の端からパチンコ玉が 1 個出る。これが銅線の中を電気が超高速で伝わる理由である。電気の場合は乾電池などの電源から電子が銅線に押し込まれると、近くの原子の電子が追い出され、追い出された跡がプラスの電気を帯びるので、電源からの電子がそこに入り込む。一方、原子から追い出された電子は近くの原子の電子を追い出してそこに入り込む。これが繰り返されて、銅線の他の端から電子が追い出されて、プラスを帯びたところ

^{*5} もっと速くするには電圧をかけて加速させる。電子顕微鏡などでは数万から数百万ボルトの電圧で電子を加速させている。

るを目掛けて電子が出て電気が流れる。逆に考えると、電気は有限の速度しか持つことが出来ない理由にもなる。

3.2 交流送電と直流送電の特徴と違い

施設や住宅に供給する電力は汎用性が重視され、交流送電が主流となっている。交流送電の最大の利点は、変圧が可能であること。発電所から供給される電圧は数十万ボルトという高い電圧で送電され、都心部に近づくにつれて降圧させ、例えば住宅内には 200V から 100V の電圧が供給される。交流送電では変圧器によって電圧を自在に調整できるため、必要な場所ごとに電圧を調整でき、設備コストを最小にすることが可能である。これに対して、直流電源を降圧させるには、直流を交流に変換し交流を変圧器で降圧する。その変換（あるいは逆変換）の時にコンバータが必要になり、コストもかかり、変換時のロスもあり効率が悪い。^{*6}

しかし、効率的には交流送電が良いが、環境問題なども考慮しないといけない。例えば、変圧器や高圧電線周辺の目に見えない電磁場が人体、特に成長段階の子供へどのような影響を及ぼす可能性があるのかを、厳しく評価しなければいけない。その際には「1.3 生体のエネルギー」におけるイオンチャネルの開閉のエネルギースケールが重要になる。

4. 環境問題

感覚的、情緒的に環境問題を考えることも重要だが、基本的な物性や科学を踏まえてとらえることも重要である。例えば、必要以上に騒ぎすぎる「地球温暖化」、「CO₂ 削減問題」、「CO₂ 地中閉じ込め問題」など。

4.1 エネルギーの共鳴吸収

H₂O と CO₂ の基礎データとしてのエネルギー吸収がある。共鳴により固有振動数に対応した振動数の光をよく吸収するという性質で、逆にこのような性質を利用して物質の特定も行われる。例えば、水は 2.4GHz 付近に液体状態の水分子の回転に付随した固有の振動数があり、この振動数に共鳴する 2.4GHz の周波数を持ったマイクロ波のエネルギーを強く吸収する。^{*7} 水分子は 2.4GHz 以外にも分子間の振動に対応するいくつかの固有振動を持っていし、水以外の他の物質の分子もその分子に特有のいくつかの固有振動を持っている。従って、その振動数に共鳴する周波数を持った電磁波

^{*6} 国内において直流電源で特に有名なものに、電気鉄道の電源がある。直流電源は常にプラス方向とマイナス方向が一定であり、マイナス方向側の電路に接続された金属体は電食作用にさらされる。電源においては、プラス側では防食作用があり、マイナス側が腐食しやすくなる。電気鉄道などで、枕木程度では大地とレールが完全に絶縁できないため、付近に迷走電流を流出させ、並走して埋設している金属製の水道管や電配管を腐食させてしまうという問題も発生する。

^{*7} この原理を利用した加熱調理器具が電子レンジである。

を加えて、電磁波のエネルギーを共鳴吸収させることにより、その分子だけを選択的に加熱することも可能である。例えば、 CO_2 は波長 $15\mu m$ 付近の赤外線を吸収する特性があるが、これは変角振動モードによるもので、気体分子特有の回転振動モードによる吸収は $4.5\mu m$ ($\nu = 0.66GHz$) 近辺にある。分子構造などに関係する赤外線の単位 cm^{-1} (カイザー) で表せば、 $2350cm^{-1}$ 近辺にあたる。(これらは、 $\lambda = c/\nu$, 光速 $c = 1.0 \times 10^{10} cm/s$, ($1\mu m = 10^{-4}cm$, $1GHz = 10^6 Hz$, $Hz = 1/s$ などを使えば換算は容易。例えば、 $\lambda = 1\mu m \rightarrow 10^4 cm^{-1}$.)

4.2 人体との関係

以前より、自分の身近な物理・数理といえ、戸田盛和の「おもちゃの科学」や武者利光偏の「ゆらぎの科学」は有名であるが、人体に直接関わる事柄についての物理も様々存在する。これが医歯薬系や医用工学などということになるであろう。

<http://www.t-net.ne.jp/kondoy/lecture/>

一般に物理学では、光の性質、音の性質、などを真空中や物質内部での特徴を学ぶが、医歯薬系や医療系との関連では、「視ること」「聴くこと」や生理機能まで考慮しないといけないことになる。いわゆる「五感」についていえば、「味覚」「嗅覚」「触覚」などに関してできる能内のアトラクターなどを考えて環境問題をとらえることが自然なことかもしれない。

参考文献

- [1] 勝木渥「物理学に基づく環境の基礎理論」(海鳴社 1999)
- [2] 勝木渥「環境物理学の基本的視点と諸動向・諸問題」日本物理学会誌 66, 145-147(2011)
- [3] 槌田敦「資源物理学入門」(NHK 出版 1982)
- [4] 岡野大祐「解明 カミナリの科学」(オーム社 2009)
- [5] 広瀬立成「図解雑学地球環境の物理学」(ナツメ社 2007)
- [6] 赤野松太郎, 他「医歯系の物理学」(東京教学社 1987)
- [7] 林昌樹, 勝浦一雄「ライフサイエンスの物理学」(愛智出版 2007)
- [8] Sternheim, Kane「ライフサイエンス物理学」(広川書店 2000)
- [9] 日本物理学会編「生体とエネルギーの物理学」(裳華房 2000)
- [10] 二宮 洸三「気象予報の物理学」(オーム社 1998)
- [11] 伊藤 慎一郎「知りたいサイエンス 流れの法則を科学する」(技術評論社 2009)
- [12] 村瀬雅俊「電磁波の生体への影響：ホルモン作用仮説の提唱」物性研究 82(1),

146-189(2004)

- [13] 本川達雄「ゾウの時間ネズミの時間」(中央公論社 1992)
- [14] 本川達雄「世界平和はナマコとともに」(阪急コミュニケーションズ 2009)
- [15] 山内薫「現代化学への入門 4 分子構造の決定」(岩波書店 2001)