

## 身近なエネルギーから巨大エネルギーまで

山口大学名誉教授

溝田 忠人

**はじめに** 宇部市温暖化対策ネットワークのお手伝いを初めて、まだ3年程ですが、この間色々な所で「環境とエネルギー」に関してお話をする機会を設けていただいた。何度も話をし、意見や感想を聞きながら、特に「エネルギー」の難しさを感じて来ました。科学の基礎として誰もが知らなければならない「エネルギー」が、社会の中では数えきれないほど多様な姿で現れる。古くからそうであったために、エネルギーに関連する単位1つをとっても多様で、実際に現在も色々な形で使われる。

ここでは、エネルギー、特に省エネルギーに関して知っておくべき項目を挙げて解説をし、エネルギーの手引きのようなものを書いておけば役にたつのではないかと考えました。面倒な計算もありますが、ざっと項目を読んで何が書いてあるか見て、興味がある所からじっくり読んで下さい。エネルギーに関する物理現象を理解し、単位について正確な知識を得る手助けにしていだければ幸いです。



2011年総会後の会員の活動報告  
代表世話人を務めるPVNYを紹介

### 1. 逃げる熱を抑えよう 家庭における節電の切り札「熱伝導率」

厚さ  $l$  [m] の壁を通り抜ける熱:  $Q$  [J]

$$Q = \frac{k \cdot S \cdot \Delta T \cdot t}{l} \quad (1)$$

$$\frac{Q \cdot l}{S \cdot \Delta T \cdot t} = k$$

$k$ : 熱伝導率 [ $\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ]、温度差 [K]:  $\Delta T = T_2 - T_1$ 、 $t$ : 時間秒 [s]、面積 [ $\text{m}^2$ ]:  $S$

表1 物質の熱伝導率 (理科年表より)

物質	$k/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$k$ の比
空気	0.0241	1
木材	0.14-0.18	5.8-7.5
ガラス	0.55-0.75	23-31
コンクリート	1.00	41
アルミニウム	240	10,000

**例題1** :  $1\text{m}^2$ 、厚さ3mmのガラス窓があり、冬に室内は $20^\circ\text{C}$ 、外は $5^\circ\text{C}$ でした。この窓から逃げる熱はどのくらい？

**解答** : 式(1)の両辺を時間  $t$  で割って、

$$\frac{Q}{t} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta T}{l} \quad (2)$$

$Q/t$  は、時間当たりのガラス窓を通過する熱量をあらわす。数値を入れると、

$$\frac{Q}{t} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta T}{l} = \frac{0.6 \times 1 \times (20 - 5)}{0.003} = 3,000 \text{ Js}^{-1} = 3\text{kW} \quad (3)$$

ここに、ガラスの熱伝導率は表1のように、幅があるので、 $0.6\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ とした。何と、3kWの冷房を行うのと同じ！

**例題2** : 例第1では暖房費がかかりすぎるので、省エネのため、このガラス窓にプチプチ (エアキャップシート) を貼って、厚さ5mmの空気の層を作ってみた。この場合の逃げる熱はどのくらいになるでしょう。

**解答** : 式(3)と同様に、空気の層だけの熱伝導を求めてみます。

$$\frac{Q}{t} = \frac{k \cdot S \cdot \Delta T}{l} = \frac{0.0241 \times 1 \times (20 - 5)}{0.005} = 72.3 \text{ Js}^{-1} = 73\text{W} \quad (4)$$

何と、 $72.3/3,000=0.0241$ 、すなわち逃げる熱は2.4%に減ってしまった。これなら足温器並みの熱です。

## 2. 空気の対流

幅5mm、長さ1mの隙間から、30cm/s、温度差15°Cのすきま風、空気の流入速度  $0.005 \times 1 \times 0.3 = 0.0015 \text{ m}^3/\text{s}$  なので、1秒間に流入する空気の実数  $n$  は、理想気体の状態方程式により、

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{101,325 \times 0.0015}{8.314 \times 298} = 0.06134 \text{ mol} \quad (5)$$

空気の定圧熱容量は、理科年表から、

$$C_p = 29 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \quad (6)$$

この空気の運ぶエネルギー (5°C→20°C) は、 $29 \times 0.06134 \times 15 = 26.68 \text{ J/s} = 27 \text{ W}$

結構小さいように感じますが、学校などの建物 (ビル) には沢山のドアがあります。冬の風の強いときは、ドアを開けっ放しにすると大変寒いので、そのエネルギーはどのくらいか計算してみましょう。

**例題3** : ある建物のドアは、 $2 \text{ m}^2$  開きます。

冬には内部は18°C、外は5°Cとします。観察によると、人が出入りする時、人間の習性として、1人が入ると必ずドアを閉めてくれるのですが、数人連続して通過すると最後の人は殆ど閉めてくれません。風速  $4 \text{ m s}^{-1}$  の風がこのドアから流入したとすると、何 kW のエアコンをで「冷房」したことになるでしょう。

**解答**: このドアから毎秒流入する空気の量は、式(5)から、

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{101,325 \times 2 \times 4}{8.314 \times 278} = 350.7 \text{ mol}$$

形式 RAS-S40W2			
日立ルームエアコン セパレート形室内ユニット			
種類	冷房・暖房兼用	エネルギー	冷房 5.10
冷房能力	4.0 kW	消費効率	暖房 5.41
暖房標準能力	5.0 kW		冷暖房平均 5.26
暖房低温能力	7.1 kW	運転電流	冷房 4.1 A
電源	単相 200 V		暖房 4.8 A
	50/60 Hz	質量	13 kg
消費電力	冷房 0.785 kW	製造年	2007
	暖房標準 0.925 kW	組合せ室外形式	RAC-S40W2
	暖房低温 2.590 kW		RAC-S40W2A
別売アレルオフフィルター形式	SP-VCF11	日立アプライアンス	
25.05.2009 10:03			

図1 12帖用のエアコンの定格能力

式(6)の熱容量を用いて、 $29 \times 350.7 \times (18-5) = 132,213.9 \text{ J s}^{-1} = 132 \text{ kW}$  とんでもなく巨大な値です!

エアコンの能力 (図1) と比べてみましょう。冬のドアの締め忘れはやめましょう! 安全な回転ドアや2重ドアを使いましょう。

## 3. 熱放射

### 3.1 シュテファン-ボルツマンの放射法則

西日の射していた石垣の傍を夜になって通るとき石垣からくる熱気を感じます。時間が経っても石垣が周囲より暖かいので人は放射熱を敏感に感じるのです。温度  $T$  (単位K:ケルビン) の物体 (正式には黒体) の放射エネルギー  $S$  は、

$$S = \alpha T^4 \quad (7)$$

$$\alpha = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

$\alpha$  : ステファン・ボルツマン定数。

これを使うと、窓の表面温度 20°C、屋外 5°C とすると、窓から外に放射されるエネルギーは、15°Cの温度差があると、 $1 \text{ m}^2$  あたりで 100W の損失 …… マアこれは それほどでもない! ?

### 3.2 太陽からの放射

**直射日光** :  $1.37\text{kWm}^{-2}$  ・ ・ 地球の位置で  $1\text{m}^2$  の面積に太陽から届く放射エネルギー ・ ・ ・ ・ ・ **これは大きい!**  
 空気などで吸収されるので、地表では約  $1\text{kWm}^{-2}$  と考えればよいでしょう。

太陽光 (熱) は、部屋の中に入れると大きな熱源になります。夏は外で遮蔽 (緑のカーテンやすだれ) するべきです。室内のカーテンやブラインドは効果が小さい。冬は、逆に中に取り入れる工夫が有効。

### 4. 冬に窓ガラスにつく水滴、「結露」のエネルギー

水蒸気、すなわちガス状の水分子は、ガスとして飛び回るために大きなエネルギーを持っています。これが、水滴 (液体) に変わると、運動エネルギーが熱エネルギーとして放出されます。これを水蒸気の凝縮熱といい、水1分子当たり、同じ温度なら一定の大きさのエネルギーです。

**25°Cにおける水蒸気の凝縮熱  $\Delta H_c = -44\text{kJmol}^{-1}$**

凝縮熱は、ガス分子から放出される (出て行く) ので、負で表します。逆に水が蒸発するために必要な蒸発熱は水分子が受けとるので正で表します。冬に結露している所は大きな熱を奪っています!

#### 4.1 人も熱機関、寝ている人は何ワット?

人は一晩で1リットル (1,000g) の水蒸気を出すそうです、その量は :  $1000/18=55.55\text{mol}$  (1molの水は18g) です。これが全て窓で結露すると、そこで発生する凝縮熱 :  $-44 \times 55.55 = -2444.2\text{kJ}$  (マイナスは発熱=熱が出て行く)。毎秒当りの熱の移動量がワットなので、寝ている7時間の秒数で割って、

$$\frac{-2,444.2}{7 \times 60 \times 60} = -0.09699\text{kJ s}^{-1} = -0.1\text{kW} \quad (8)$$

これは人間が呼吸で水蒸気を蒸発させるエネルギーでもあります : **約 100W !**

#### 4.2 食事から計算すると人は何ワット?

人は1日約2,000kcalを食べ物として摂取します。現在エネルギーの単位はJ (ジュール) を使いますので  $1\text{cal}=4.184\text{J}$  の換算が必要です。人は、24時間で食物を熱に変えて生きているのです。

$$2,000[\text{kcal}] \times 4.184[\text{J/cal}] = 8,368[\text{kJ}]$$

$$\frac{8,368[\text{kJ}]}{(24 \times 60 \times 60)[\text{s}]} = 0.09685[\text{kJ/s}] = 0.09685\text{kW} \approx 0.1\text{kW} \quad (9)$$

これも **100W** です。前の結果と比較すると、人間は、寝ているときは、殆ど呼吸と皮膚から蒸発させる水蒸気によって熱を放出しています!

## 5. 電気と水の節約

### 5.1 世帯数 (我が家1軒ではないのです! 環境を考えるとさは何倍にして考えるべきかが大切)

世帯数: 我が家: 1 宇部市: 77,000 山口県: 564,000 日本: 49,000,000

### 5.2 家庭用電気料金 (中国電力)

2009年2月 昼間 28.89円/kWh 夜間(23時~8時) 9.62円/kWh

### 5.3 水道料金 (宇部市) 口径13mm の水道管のある普通の家庭

基本料金  $20\text{m}^3$  まで2ヶ月につき 2,373円

従量料金  $20\text{--}40\text{m}^3$  176.40円/ $\text{m}^3$   $40\text{--}200\text{m}^3$  212.10円/ $\text{m}^3$

実際の水道使用量 2009年1—2月 **41 $\text{m}^3$**

$2,373 + (41 - 20) \times 176.40 = 6077.4\text{円}$   
  
 ↑ 基本料金      ↑ 20 $\text{m}^3$ 以上の料金

実際の水道料 **6,113** (消費税等が含まれて)  
 + 下水料金 **6,163**  
 合計 **12,276円**

## 5.4 我が家に降る雨

宇部市の我が家に降る雨は年間 1.647m (2000年のデータ) 建物面積=屋根の水平面積 93m<sup>2</sup>  
従って我が家が受けとる雨水、すなわち年間受水量は

$$\text{我が家: } 1.647 \times 93 = 153.171 \text{m}^3 = 0.153 \times 10^3 \text{m}^3$$

$$\text{宇部市の全屋根では: } 1.179 \times 10^7 \text{m}^3 = 11,794 \times 10^3 \text{m}^3 \quad \text{厚東川ダム23,042} \times 10^3 \text{m}^3 \text{の約半分!}$$

「私の父は市の水道局に勤めています。市民が雨水の利用で節水すると、水道局の収入が減って失業するかもしれません、ですから節水は良くないことです。」こういうクレームがあったとします。節水は良くないことでしょうか?このような関係は、お医者さんと健康体操;電力会社と節電;JTと禁煙;健康診断と放射線障害;輸出競争力の強化と円高;生徒の制服の廃止と制服メーカー;などなど無数にあるでしょう。皆さんの興味のある問題を設定して、議論してみましょう。

ヒント、持続可能な経済を地域で循環する経済と考えることが重要です。同時に持続可能なエネルギーと環境が必要です。社会の仕組みは、必ずしも持続可能性を追求していません。ある意味、行き当たりばったりでした。しかし今後は、それは難しい、少なくとも1000年先を見通した政治が必要です。

## 5.5 残り湯の利用

40°C 250リットルの風呂の湯の利用。家の部屋にパイプで循環させ放熱して、朝までに20°Cにする。湯の持っているエネルギーは、

$$Q = 4.18 [\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}] \times (40-20) [\text{K}] \times 250 [\text{kg}] = 20,900 \text{kJ} \quad (10)$$

12時から7時まで7時間循環させる

$$20,900 [\text{kJ}] / (3,600 \times 7) [\text{s}] = 0.829 \text{kW} \quad \text{残り湯の利用は800Wの電熱器を7時間つけるのと同じ!}$$

深夜電力でお湯を沸かし、昼間も湯を使うシステムでは、一般に炭酸ガス・ヒートポンプを用いて高温の湯を作っています。ヒートポンプは空気の温度を利用して効率よく湯を沸かすので、冷却された空気が排出されます。このお湯をつくる場合に、風呂の残り湯の熱をヒートポンプの熱源に使うと、我が家の例で計算すると、約40%の電気が節約できます。これは良い方法だと思って特許を調べたら、ある大手メーカーが同じ考えで風呂の残り湯を使って給湯器の省エネをする技術の特許を既に取得していました(残念!)。しかし、何処のメーカーもこの技術を使った装置を実用化していません。メーカーに理由を尋ねたところ、「もともと深夜電力は、余った電力を使ってもらうことが必要なのだから、更に40%も節電されると電力会社が困る。」ということ、変な話です??

## 5.6 電気のエネルギーに関する単位

電力の単位 W(ワット) = J · s<sup>-1</sup> (またはJ/s) 1,000倍してkW:キロワット

電気量または電気エネルギー Wh:ワット・アワー = 1Wで1時間使う電気量=3,600J

1,000倍してkWh:キロワット・アワー=1kWで1時間使う電気量=1kWh=3,600kJ=3.6MJ (メガジュール)

## 6. 巨大なエネルギーをJ (ジュール) 単位に統一してみると比較できる

日本の総発電量 1年間に約1兆kWh (1兆キロワットアワー)

$$1 \text{兆kWh} = 1,000,000,000,000 \text{kWh} = 10^{12} \text{kWh}$$

$$= 1 \times 10^{15} \text{Wh} = 1 \times 10^{12} \times 60 \times 60 = 3,600 \times 10^{12} \text{kJ} = 3.6 \times 10^{15} \text{J} = 3.6 \text{EJ} \quad (\text{エクサジュール})$$

### 6.1 大きな量と接頭辞

現在、科学技術で使う単位系はSI単位系です。SI単位系では、3桁区切りの数字に接頭辞をつけて表します。

10:da 10<sup>2</sup>:h 10<sup>3</sup>:k 10<sup>6</sup>:M 10<sup>9</sup>:G 10<sup>12</sup>:T 10<sup>15</sup>:P 10<sup>18</sup>:E 10<sup>21</sup>:Z 10<sup>24</sup>:Y  
デカ ヘクト キロ メガ ギガ テラ ペタ エクサ ゼタ ヨタ

3桁以下は小文字で書き、6桁以上は大文字で書かなければなりません。

## 6.2 地震のエネルギー

### 6.2.1 地震のエネルギーの大きさ：マグニチュード(magnitude) $M$

$$E = 10^{(4.8+1.5M)} \quad \text{または} \quad \log_{10} E = 4.8 + 1.5M \quad (11)$$

元々、震源から100km離れた地震計の針の触れの大きさ $M$ と地震のエネルギー $E$ との関係から求められました。地震計や理論の進歩などで、マグニチュードにも色々なタイプがあり、特に大きな地震の場合には $M$ に差があることもあります。詳しくは理科年表をご覧ください。

### 6.2.2 1995年兵庫県南部地震（阪神淡路大震災） $M=7$ （マグニチュード7）

$$\begin{aligned} E &= 10^{(4.8+1.5 \times 7)} = 10^{15.7} = 10^{15} \times 10^{0.7} = 1.99 \times 10^{15} \quad (12) \\ &= 2 \times 10^{15} \text{J} = 2\text{PJ} \quad (2\text{ペタジュール}) \end{aligned}$$

$M$ が2増えると1,000倍のエネルギー、 $M$ が1増えると33倍のエネルギー

### 6.2.3 2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災） $M=9$

$$E = 2 \times 10^{18} \text{J} = 2\text{EJ} \quad (2\text{エクサジュール})$$

## 6.3 台風のエネルギー

$$\text{平均的台風のエネルギー} = 10^{18} \text{J} = 1\text{EJ} \quad (1\text{エクサジュール}) \quad \text{意外と大きい!}$$

## 6.4 1メガトンの水爆

$$\begin{aligned} 1\text{Mt} \quad (1\text{メガトン}) \quad \text{の TNT 火薬に相当} &= 1.8 \times 10^{15} \text{J} = 1.8\text{PJ} \quad (1.8\text{ペタジュール}) \\ 1\text{t} \quad \text{の TNT 火薬} &= 1.8 \times 10^9 \text{J} = 1.8\text{GJ} \quad (1.8\text{ギガジュール}) \end{aligned}$$

## 6.5 隕石の衝突

直径1km、平均密度8g/cm<sup>3</sup>の球形の隕石が、秒速20,000m/sで衝突すると！この隕石の運動エネルギーは、

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 8,000 \times \frac{4}{3}\pi \times 500^3 \times 20,000^2 = 8.37 \times 10^{20} \text{J} \quad (12) \quad M=10.7$$

これが、衝突して止まるので地球を破壊するエネルギーになる **地震で言えば  $M10-11 \dots$  とんでもない!**  
6500 万年前恐竜絶滅の原因となったメキシコのユカタン半島に落ちた小惑星（隕石）M11,  $E=2 \times 10^{21} \text{J}=2\text{ZJ}$ （2ゼタジュール）と推定、高さ500mの津波がアメリカ大陸を横断、生物の90%以上が絶滅。巨大恐竜が絶滅したおかげで、哺乳類が天下を取った！人間も出現することが出来た！？

## 6.6 氷床の崩壊

グリーンランドまたは南極の氷床、厚さ2km、幅1km、長さ100kmが、海に落ちる氷床崩壊のエネルギー  
その質量は  $m = \rho V = 1,000 [\text{kg}/\text{m}^3] \times 2,000 [\text{m}] \times 1,000 [\text{m}] \times 100,000 [\text{m}]$   
重力加速度  $g = 9.8 \text{m}/\text{s}^2$  として、

$$\Delta E = mgh = 1,000 \times 2,000 \times 1,000 \times 100,000 \times 9.8 \times 1,000 = 1.96 \times 10^{18} \text{J} \quad (12)$$

**地震にすれば  $M9$  クラス.....! おまけに海面上昇も!**

## 6.7 太陽のエネルギー

太陽内部の核融合反応によるエネルギーの放射

地球に到達する太陽光のエネルギー（太陽定数）： $1.37 \text{kJs}^{-1}\text{m}^{-2}$ （または  $1.37 \text{kW}/\text{m}^2$ ）

地球が太陽から1日に受けるエネルギー  $11 \times 10^{21} \text{J} = 11\text{ZJ}$ （11ゼタジュール）

1時間程度で人類の使うエネルギー1年分と同じくらい！

———何と偉大！ 量は十分です。どうやって利用するかが将来の課題

## 7. 太陽エネルギーの利用

太陽光発電、太陽熱発電、風力、水力、波力、潮汐力（一部月の影響）、バイオマスエネルギー・・・再生可能化石燃料（過去の太陽光が貯蔵されたエネルギー）・・・・・・再生不可能、CO<sub>2</sub>の増加

「日月火水木金土」は昔の人の大切な対象を曜日の名前と惑星等の名前にしたのでしょう。これが全て発電に関係するのも面白いことです。小学生のクイズに使えます。

日：太陽光、太陽熱発電；月：潮汐力発電；火：火力発電；水：水力発電；木：バイオマス発電；金：原子力発電、各種金属（Li, Ni, Mn, など）電池；土：地熱発電

ただし、昔の人は目に見えなかったので、大切な「空気」を入れていません。重要な「空気」または「気」を加えるべきです。これも、発電に使えます、**空気**：風力発電

## 8. 太陽エネルギーに寄らないエネルギー

原子力・・・・・・再生不可能、放射性物質の増加                      核反応エネルギー

地熱・・・・・・ほぼ再生可能                      地球生成とその後の運動の熱+地球内部の放射性元素の崩壊熱

## 9. 最後に、「省エネルギー」は最も重要なエネルギー確保の方法

効率の改善が科学技術の最も重要なテーマです。2012年度、原発が殆ど止まっても、電力需給が正常に確保できるのは、省エネルギーの貢献が大きいのです。

**おわりに**    単位に関しては、良くテレビや新聞でも間違える kWh と Wh の混同；道路表示で間違っ：山口まで 30Km（本当は km、接頭辞 k は小文字）；以前航空機のパイロットは「到着地宇部の気温は 30°C」を英語で“・・・thirty degree centigrade”と「°C」を「ディグリー・センチグレイド」と言っていましたが、これは間違いで“degree Celcius”「ディグリー・セルシウス」またはこれを略して「ディグリー・シー」が正しく、最近では正しく言われているようです。Celcius はこの温度目盛を作った人の名前です。

放射線の被曝線量率 0.23 μSv/h を /h をつけないで書いたりします。Sv（シーヴェルト）は放射線のエネルギー量なので、電気の kWh に相当します。kW に相当するのが /h をつけたもので、1 時間当たりの放射線被曝線量率です。年間の被曝線量限界が 1 mSv なら、1 年 365 日 24 時間で割って、 $1 / (365 \times 24) = 0.000114 \text{ mSv} / \text{h} = 0.114 \mu \text{ Sv} / \text{h}$  が居住地の線量率の限界です。

人は、矛盾した行動をとります。新聞の全面に、あるカリスマ経営者の写真が、多くの女子従業員と共に写っていました。その後、校区の祭りで、幼稚園児の踊りを見る若いお母さん方を後ろから眺めていました。この2つのことで考えさせられたのは、そこにいた、合わせて数百人の女性の髪の色が 90%以上同じ茶色だったことです。そう年齢の行っていない女性の多くが、何の理由か同じ髪色。似合うかどうかと言うことではないようです。このために、水中生物が脱色剤や染料の犠牲に成る、長い髪の洗髪と乾燥で多くのエネルギーを使う。こういう側面は、全く考慮外のようなのです。そして、だれもおかしいと異議を唱えないのです。環境問題の原点はこのような所に本質があるように思います。地球上に生きるということ、そろそろ真剣に考えなければなりません。

## 参考にした本など

国立天文台編「理科年表」平成 20 年版、丸善株式会社、1,890 円（「理科年表」は便利なデータ集です。）  
インターネット辞書：Wikipedia 「マグニチュードの大小の比較」                      参照日：9/23, 2011