

空気調和 衛生工学

空気調和・衛生工学会

SHASE

*The Society of Heating,
Air-Conditioning and
Sanitary Engineers of Japan*

<http://www.shasej.org>

10

2015
Vol.89 no.10

特集

九州支部創設50周年を迎えて



講座

エクセルギーの読み方・考え方

近年、空調の温度設定を夏はクールビズ28℃、冬はウォームビズ20℃としてエネルギー消費量の削減を図ったり、高効率熱源機器の普及を進めるなどして、省エネルギーに対する意識が高まってきている。

ところで、“エネルギーを消費する”とはどういうことであろうか。エネルギーはなくなってしまうものなのか。私たちは、エネルギーは使えばなくなるということを実感している。例えば、再生可能エネルギーである太陽エネルギーを利用して、温水として蓄えたり、電気に変えて蓄えても、それを使えば温水は最終的に周囲と同じ温度の水になり、発電した電力は消費されてしまう。

このように使えばなくなってしまうエネルギーを表す概念を“エクセルギー”という。言い換えれば、全エネルギーを、我々が利用できるエネルギーと利用できないエネルギーに分け、利用できるエネルギーを“エクセルギー”と呼ぶことになる。一方で、利用できないエネルギーは廃熱性を表す“エントロピー”の概念となる。

本講座では、“エクセルギーの読み方・考え方”と題して、その基礎から建築設備にかかわる応用まで、わかりやすく解説をいただく。建築設備技術者・研究者が“エクセルギー”を理解することで、今後の技術開発・研究の道しるべとなることを期待している。

桑原亮一 学会誌委員会熱源・設備原論小委員会

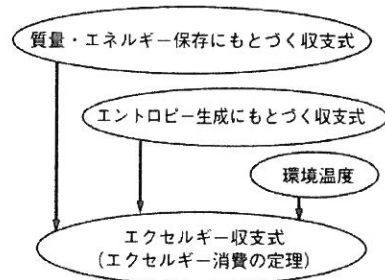


図-10 エクセルギー消費の定理

あったことを意味する。しかし、それは、落下前のおもりが持っていた“拡がり散りを引き起こす能力”よりは小さい。

以上の説明で2回用いた“拡がり散りを引き起こす能力”が実のところ“エクセルギー”概念である。落下前のおもりが持っていたエクセルギーを X_w 、絶対温度 T の温水が持つエクセルギーを X_h と表すことにすれば、 X_w と X_h の差は、おもりの落下で消滅した“拡がり散りを引き起こす能力”を表すことになる。これを“エクセルギー消費” X_c という。以上の関係を式で表現すれば、

$$X_w - X_c = X_h \quad \dots\dots(9)$$

式(9)を“エクセルギー収支式”と呼ぶ。エクセルギー消費 X_c が零になるような自然現象は起き得ない。

エクセルギー消費 X_c は“拡がり散り”が起きることと等価であり、エントロピー生成を S_g と表せば、両者は比例する。比例定数は、議論の対象とする“系”(図-1の場合にはタンク内の水)にとっての環境温度(タンク周囲空間の絶対温度 T_0)であり、 $X_c = S_g \cdot T_0$ と表現できる。

エクセルギー収支式は、図-10 に示すように、エネルギー収支式・エントロピー収支式と環境温度を組み合わせることで導くことができ、“エクセルギー消費”の項が必然的に現われる。

X_h を具体的にどのようにして求めるか、ひいては、 X_c をどのようにして求めるかなどについては、次回以降に述べていく。ここでは、第1回の締めくくりとして、計算結果の一例だけを示しておこう。

水量 500 ml のペットボトル大のタンクがあって、プロペラが入っているとす。このタンクやおもりの周囲温度(環境温度)は 20°C ($=293\text{ K}$) である。プロペラにロープを介してつながれた 700 kg のおもりを 24.4 m 落下させる。そうすると、水温は 20°C から 100°C まで上昇する。この場合、 X_w は 167.4 kJ、 X_h は 19.4 kJ となり、エクセルギー消費 X_c は 148 kJ となる。投入エクセルギー X_w の約 88% が消費された結果、 100°C の温水が得られたのである。

おわりに

熱力学の一般的な教科書を見ると、エントロピー概念の定義として式(8)が $S=Q/T$ と表現されて、いきなり現れる。この式がなぜこのような形になるかについて、初学者にもわかるような説明がなされている例は皆無といえるが、エントロピー概念が難解だといわれる理由はここにあるのだと思う。

エントロピー概念の導入は、上述のように式(8)に至るプロセスを辿るのが初学者にとって良いと思う。熱力学に慣れている人にとっても理解をさらに深めていくのには、式(8)に至るプロセスを改めて踏まえておくのが重要だろう。少なくとも筆者はそうであった。

エクセルギー計算のさまざまな応用事例は、次回以降、順次紹介していくが、次回の掲載よりも前に…と思われる読者は文献1)2)を参照して下されば幸いである。さまざまな自然現象をエクセルギー概念によって記述することの長所は、ひと言で表せば、照明・暖冷房などにおけるパッシブ型・アクティブ型技術のあるべき姿が浮き彫りになることだ。

適正なエクセルギー消費によって成り立つ建築環境システムを見出していくことは、原発震災を経た(というよりは本来の在るべき復興への長い道程の中にある)私たちに特に重要だと思う。その基礎となる考え方を定着するには熱力学が不可欠だと改めて考えている。

参考文献

- 1) 宿谷昌則編著：エクセルギーと環境の理論—流れ・循環のデザインとは何か(改訂版)、井上書院、2010
- 2) Shukuya, M., Exergy - Theory and Applications in the Built Environment, Springer - Verlag London, 2013
- 3) 板倉聖宜：原子論の歴史、仮説社、2004
- 4) 山本義隆：熱学思想の史的展開 3—熱とエントロピー、ちくま学芸文庫、2009, p.167
- 5) 宿谷昌則：エントロピー概念の導出にかんする省察、日本建築学会大会学術講演梗概集、2011, pp.345-346 (2015/7/27 原稿受理)



宿谷昌則 しゅくやまさのり
昭和28年生まれ/出身地 東京/最終学歴 早稲田大学大学院建築環境学専攻/学位 工学博士/その他 空気調和・衛生工学会論文賞(1991)、日本建築学会論文賞(2001)、日本建築学会教育賞(教育業績)(2012)

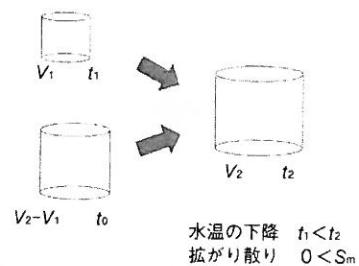


図-5 水温 t_1 で体積 V_1 の水と温度 t_0 で体積 $(V_2 - V_1)$ の水の混合

$$t_2 = \frac{V_1}{V_2} t_1 + \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right) t_0 \quad \dots\dots(3)$$

式(3)は、水温 t_2 が体積 V_1 と体積 V_2 の比に応じた t_1 と t_0 の重み平均値となり、 $t_0 < t_2 < t_1$ となることを示す。

湯と水の混合という現象も、プロペラと水の間で生じる摩擦の現象と同様に、拡がり散りにほかならず、その結果は図-4と同じなのだから、エントロピー S_2 のほうがエントロピー S_1 より大きいことは間違いない。

図-5における湯と水の混合で生じるエントロピーを S_m と表そう。そうすると、 S_1 と S_2 、 S_m の関係は、次のように表せる。

$$S_1 + S_m = S_2 \quad \dots\dots(4)$$

式(4)は、エントロピーが可算性の概念であることを示している。

2.3 拡がり散り度 ζ と絶対温度 T

以上の考察で、ある自然現象が起きるとき、その現象の前後でエネルギーという量は保存され、その一方で、エントロピーという量が生成される(増える)ことが確かめられた。次に、絶対温度の概念を、エネルギー概念が仕事と熱の関係から導き出されたのと同様な道筋で、エントロピーと熱の関係から導き出してみよう。

仕事はまったく拡がり散ってはいないエネルギー、熱はその温度に応じて多かれ少なかれ拡がり散っているエネルギーである。そこで、エントロピーという量を、その一方の端をエネルギーがまったく拡がり散っていない状態に対応させ、他方の端をエネルギーが最も拡がり散った状態に対応させる。

おもりの重さ(質量)と落下距離を一定にしておいて、すなわち仕事 W と熱 Q は一定として、タンクの水量 V を変えたとすると、図-6に示すように、おもりの落下で得られる水温は変わる。落下後の水温 t と落下前の水温 t_0 の差 $(t - t_0)$ は、水量 V が小さければ大きくなり、水量 V が大きくなれば小さくなる。その極限は、 $V \rightarrow 0$ で $(t - t_0) \rightarrow \infty$ 、 $V \rightarrow \infty$ で $(t - t_0) \rightarrow 0$ である。

最も基本的な場合として、タンクが十分に大きくて、おもりの重さを増しても水温 t が上昇しない場合を考える。

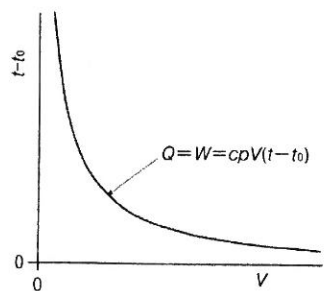


図-6 タンク水量 V と温度上昇 $t_2 - t_1$ の関係

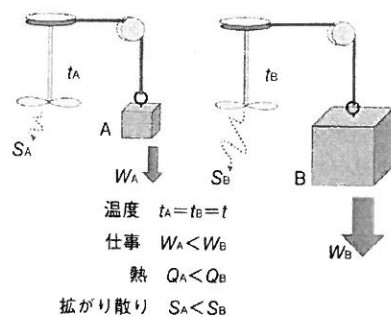


図-7 おもりの仕事と熱・エントロピーの関係

タンク内部のプロペラが回っても水温が上昇しない大きなタンク A と B があり、図-7に示すように、それぞれのプロペラはおもり A と B につなげられており、これらおもりの落下によってプロペラを回転させることを考える。おもり B の重さがおもり A の2倍だとすると、B のする仕事 W_B がもたらす熱は A の2倍であり、またそれに伴うエントロピー S_B はやはり、A のする仕事 W_A がもたらすエントロピー S_A の2倍となる。これは、2.2節に述べたとおり、エントロピーが可算性の概念だからである。

したがって、式(1)に示した熱と仕事の比例関係と同様に、エントロピーは熱と比例関係にあるので、次式が成り立つ。

$$\frac{W_B}{W_A} = \frac{kW_B}{kW_A} = \frac{Q_B}{Q_A} = \frac{S_B}{S_A} \quad \dots\dots(5)$$

すなわち

$$\frac{S_A}{Q_A} = \frac{S_B}{Q_B} = \zeta \quad \dots\dots(6)$$

式(6)の関係を図示すれば、図-8のとおりである。図-8を参照して、 ζ は、エントロピー S を熱 Q の一次関数と見た場合の傾きであることがわかる。 ζ は、単位の熱当たり拡がり散りの程度を表すので、“拡がり散り度(Dispersality)”と呼ぶ²⁾。

傾き ζ の大小は、プロペラを浸したタンク内の水温の高低によって決まる。水温が低ければ ζ の値は大きく、すなわち直線の傾きが大きくなり、その逆に水温が高ければ ζ の値は小さく、すなわち直線の傾きが小さくなる。これ

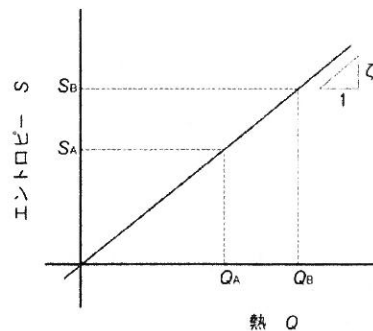


図-8 熱とエントロピーの比例関係

は、プロペラ周囲の水温が低ければ低いほどおもりの落下によって生じるエントロピー(拡がり散り)が大きくなることを意味する。

そこで、 $\zeta \rightarrow \infty$ 、すなわち図-8で傾きが 90° の場合に対してゼロが対応し、 $\zeta \rightarrow 0$ 、すなわち傾きが 0° に対して ∞ が対応するような温度目盛を考えてみよう。これは、仕事の熱への変様によって生じるエントロピーが最大となるような温度を絶対的な零度とする温度目盛を考えることを意味する。

この零度を基準とした温度目盛を“絶対温度”と呼んで T と表すことにすれば、式(6)の ζ は、 T の逆数に等しいと表現できる。

$$\zeta = \frac{1}{T} \quad \dots\dots(7)$$

絶対温度 T が低くなっていくと ζ は大きくなり、その逆に T が高くなっていき、 ∞ になったとすると、 ζ はゼロになる。この関係は図-9に示すとおりである。 $\zeta = 0$ は“拡がり散り”がまったくないことを意味する。

仕事は、おもりを構成する原子・分子群の上から下への指向性ある移動によってもたらされる。したがって、仕事そのものには拡がり散りはない。そのことをあえて絶対温度に対応させれば ∞ ということになる。仕事は絶対温度 ∞ の熱と等価だといえる³⁾。

絶対温度 T は、拡がり散りという現象にだけ対応して決まるので、物質の種類によらない普遍的な温度尺度といえることができる。

以上のようにして導き出された絶対温度 T は、熱の流れに応じて作業物質の圧縮・膨張を無限にゆっくり繰り返すことで最大仕事を生み出す理想機関(カルノーサイクル)の性質から定められる熱力学温度と完全に一致する²⁾。

熱力学温度を構成することが可能であることに、カルノーの論文を見て最初に気づいたのは、単位の名称となつて名が残っているトムソン(ケルビン卿)である。

摂氏温度 t と絶対温度 T の関係は、理想気体を作業物質として働くカルノーサイクルにおけるエネルギー収支式と

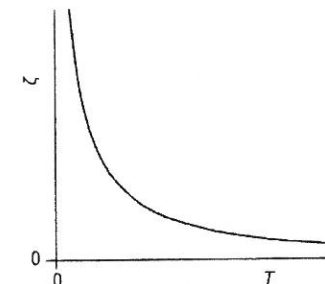


図-9 絶対温度 T と拡がり散り度 ζ の関係

理想気体の状態方程式とを関係付けることで導き出される²⁾。その結果は、よく知られているように、 $T = t + 273.15$ である。

式(6)と式(7)の関係は、添え字 A と B を省略して改めて一般化して次のように書くことができる。

$$S = \zeta Q = \left(\frac{1}{T}\right) Q \quad \dots\dots(8)$$

式(8)は、エントロピー S と拡がり散り度 ζ 、絶対温度 T 、熱 Q の基本的な関係を示す。

2.4 外延量と内包量

量は一般に“外延量”と“内包量”とに分類できる。本稿で議論してきた仕事・熱・エネルギーとエントロピーはいずれも外延量である。これに対して、二つの外延量⑦と⑧があるとして、一方の外延量⑦に対する他方の外延量⑧の比として表現されるような量、例えば式(1)の k や式(8)の ζ や T などは内包量である²⁵⁾。

外延量は足し算や引き算が可能で可算量であり、内包量は掛け算と割り算に関係して決まる量である。外延量の最も基本的な例は、長さや面積・時間といった量である。内包量の代表例は温度である。

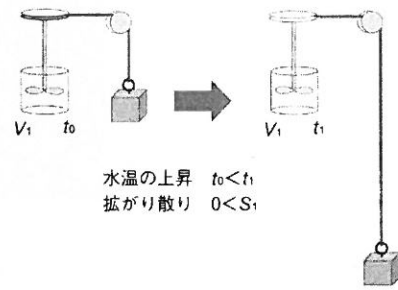
式(3)は、実のところ、温度が外延量ではなくて内包量であることを示している。

このような外延量と内包量の性質を踏まえて、式(8)を改めて眺めてみると、エントロピー(外延量)は拡がり散り度(内包量)と熱(外延量)の積として表されていることがわかる²⁵⁾。

3. エクセルギー消費の定理

タンクの大きさが有限な場合(図-1)に話を戻そう。おもりが落下した結果、水温が絶対温度 T_0 から絶対温度 T になったとしよう。この水を放置すれば、水温は遅かれ早かれ T_0 になってしまう。これは絶対温度 T になっていた水が絶対温度 T_0 になるまでにエネルギーについて“拡がり散り”を起こしたことを意味する。

いい換えると、絶対温度 T の温水には、その“環境”の絶対温度 T_0 に対応した“拡がり散りを引き起こす能力”が

図-1 おもりの落下と水温の上昇(体積 V_1 の場合)

原子・分子は、物質を構成する粒子として実在するモノなのか、それとも物理現象を説明するのに都合のよい仮想上のモノなのか。これらを巡っては、ギリシャ文明が繁栄した3000年前の昔から19世紀末に至るまでの長い間繰り返して議論されてきた。しかし、20世紀の初め頃に至って、熱放射エネルギーのスペクトル分布に関するプランクらの研究、花粉大の微粒子が水面上で見せるランダムな運動の性質に関するアインシュタイン・ペランらによる研究を通じて、原子や分子は実在することが明らかになった³⁾。

そこで、原子・分子の実在を基本として、身近な熱現象を改めて考えてみる。例えば、日射があたっている壁に手を触れると“熱さ(あるいは温かさ)”を感じる。これは、壁の温度が手のひらや指よりも高く、温度の高いほうから低いほうへと“熱が流れる”からだ。

温度の高い壁表面付近を構成する原子・分子は振動が激しく、壁より温度の低い手のほうは構成する分子群の振動がそれほど激しくはない。振動が激しい原子・分子群と、振動が激しくはない原子・分子群とが互いに触れ合えば、振動は激しいほうから激しくないほうへと“拡がり散り”ながら伝わっていく。これが“熱”現象の本質であり、その体感を、私たちは“熱さ”や“冷たさ”という言葉で表現する。

“拡がり散り”は、原子・分子群の振動ばかりでなく、原子・分子群そのものに現れることもある。水の蒸発はその典型である。私たちの手首と肘の間の皮膚を水で濡らす。こうしておいて、腕を振ると“冷たさ”を感じる。これは、多数の水分子が周囲の空間に拡がり散っていく現象による。水分子群のうち動きの激しいものは容易に振り切られ拡がり散っていき、動きが弱めの分子群が残ると、その結果として水温が下がり、ひいては腕の皮膚表面のすぐ下にある真皮を構成する分子群が振動の激しさを失うことになる。これが“冷たさ”の感覚を引き起こす原因である。

2. “拡がり散り”の定量化

以上のような“拡がり散り”の現象が起きる前後で保存されるのがエネルギー、生成されるのがエントロピーである。これらの概念は、仕事・熱の関係を省察することで導

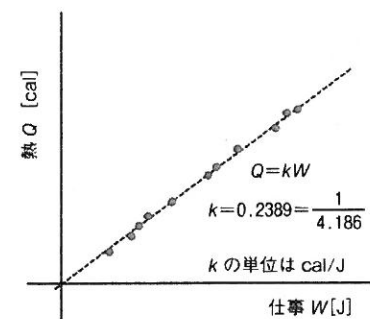


図-2 熱と仕事の関係

き出される。

具体例で考えるために、図-1に示すように、水の入ったタンクにプロペラが入っており、プロペラ軸がロープを介しておもりにつながっている装置を想定する。タンク内の水の体積は V_1 、水温は初めに t_0 であったとする。また、タンク周囲空間の温度は t_0 で一定だとする。

おもりを落とすと、プロペラが回転し、その際にプロペラを構成する原子・分子群が水分子群と激しくぶつかり合うので、もともと方向が互いに乱雑であった水分子群の運動がさらに乱雑でまた激しくなる。これを、私たちは水温の上昇として体感する。水温の t_0 から t_1 への上昇は、おもりを構成する原子・分子群の指向性ある(落下)運動が水分子群の乱雑な運動へと変化した結果、もたらされるのである。前者の作用を“仕事”と呼び、後者は1章で述べたように“熱”と表現する。

2.1 仕事から熱への拡がり散りとエネルギー保存

仕事と熱はどのような関係にあるのか、あるいは両者は関係し合わないのか。このような疑問を解き明かそうとしてラムフォードやマイヤー・ヘルムホルツ・コールディング・ジュールといった人々が、19世紀初め頃から半ばにかけて、さまざまな実験的・理論的な考察を行った。これらの人々の中で仕事と熱の関係を定量化するのに最も成功したのはジュールだった。

ジュールの行った実験の一端を述べれば、次のとおりである。図-1に示した実験を、おもりの質量をさまざまに変更したり、落下距離をさまざまに変更したり、またタンクの大きさをさまざまに変更したりして、仕事と熱の間どのような関係が現れるかを確かめる。その結果は要するに、図-2に示すように、仕事と熱が完全に比例する関係にあることであった。

仕事の大きさより大きな熱が生じることはないし、その逆に小さな熱が生じることもない。仕事が2倍になれば熱も2倍に、仕事が1/2になれば熱も1/2になる。このことを式として表現しよう。仕事を W 、熱を Q と書き、前者の単位を J 、後者の単位を cal で表すことにすれば、式

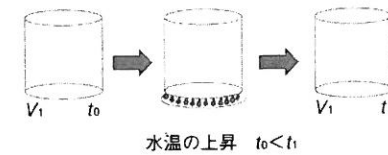


図-3 加熱による水温の上昇

(1)が成り立つ。

$$Q = kW, \quad k = 0.2389 = \frac{1}{4.186} \quad \dots\dots(1)$$

熱と仕事定数 k を介して完全に比例するのであれば、両者を異なる単位で表現しなくてもよいので、現在の国際単位系(SI)では、両者ともに単位 J (ジュール)で表すことになっている。

水温の t_0 から t_1 への上昇は、図-3に示すように、仕事ではなく加熱によっても行える。いい換えると、温度 t_0 から温度 t_1 への水の状態変化は、仕事と熱のどちらでも達成可能である。仕事・熱の概念は、物体の状態に変化をもたらす作用を意味するので、物体の状態そのものを表すにはもう一つ別の概念があったほうがよい。そこで、それを“エネルギー”と呼ぶようになったのだといえる。

おもりを落下させれば、その“位置エネルギー”が減り(状態変化)、結果として“仕事”が行われ(作用)、おもりにつながれたプロペラが回転して、物体(図-1では水)に“熱”が加われば(作用)、その物体内部に保有される“内部エネルギー(熱エネルギー)”は増す(状態変化)。減ったエネルギーの量と増したエネルギーの量とは一致する。これが“エネルギー保存則”である。エネルギー保存則を表す基本となっているのは、式(1)に示した仕事と熱の関係なのである。

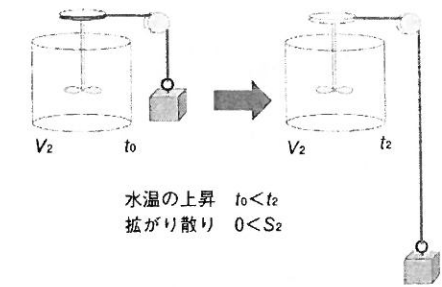
式(1)中に現れる4.186という数値は“熱の仕事当量”と呼ばれる。これを単位換算のための単なる係数と思っている人の数は少なくないが、その内容は実のところエネルギー保存則そのものを表している。このことを改めて認識し直しておきたい。

2.2 エントロピーの可算性

仕事のすべてが熱へと変換することは独りでに起きるが、その逆、熱のすべてが仕事へと変換し続けることは独りでには起き得ない。

プロペラと水の摩擦で拡がり散った(水分子群の乱雑な運動となった)エネルギーが、独りでに凝り集まって指向性ある原子・分子群の運動に転換されることはない。この“拡がり散り”の大きさを表すのが“エントロピー”の概念である。仕事から熱への変換や、温度が高い熱から低い熱への変換の前後で、エントロピーは必ず生成される。これを“エントロピー生成則”という。

ここまでの議論で扱ってきた仕事・熱・エネルギーはい

図-4 おもりの落下と水温の上昇(体積 V_2 の場合)

ずれも可算性の概念であるが、エントロピーも同様に可算性の概念である。そのことを確認するとともにエントロピーの性質を吟味していくことにしよう。

改めて図-1を参照する。おもりを落とすと、その仕事によってタンク内のプロペラが回り、プロペラと水の間に摩擦が生じた結果として、水温が t_0 から t_1 になる。この仕事から熱への現象で生じたエントロピー(拡がり散りの量)を S_1 と表そう。

次に、図-4に示すように、体積 V_1 より大きい体積 V_2 のタンクに、図-1の場合と同様に、初めに温度 t_0 の水が入っている。タンクの周囲空間の温度は t_0 でやはり一定である。図-1の場合とまったく同じおもりを同じ高さだけ落として、タンク内のプロペラを回す。その結果、水温は t_1 になったとする。水温 t_1 は水温 t_0 よりも低い。なぜなら、おもりのする仕事は図-1と図-4とではまったく同じであり、図-4のタンク体積 V_2 は、図-1のタンク体積 V_1 よりも大きいからである。

図-4の場合における仕事から熱への現象で生じるエントロピー(拡がり散りの量)を S_2 と表そう。

図-1の場合と図-4の場合について、エントロピーに注目して改めて比べてみると、 S_1 より S_2 のほうが大きいことがわかる…とはいわれても、スッキリとは納得できないかもしれないので、次に図-5を考えてみよう。

図-5は、図-1の場合に得た温度 t_1 で体積 V_1 の水を、温度 t_0 で体積 $(V_2 - V_1)$ の水と混合することを示す。結果として得られるのは、温度 t_2 で体積 V_2 の水である。これは図-4の結果と同じである。

この関係を、エネルギー保存則に基づいて表してみよう。仕事 W と熱 Q の単位には、2.1節に述べたように、同じ単位が使える。そこで、熱にも仕事と同じ単位 J を使うことにして、次式が導ける。

$$W = Q = c\rho V_1(t_1 - t_0) = c\rho V_2(t_2 - t_0) \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 c は水の比熱(=4.186 kJ/(kg·K))、 ρ は水の密度である(=1000 kg/m³)である。

式(2)を整理して、温度 t_0 、 t_1 、 t_2 の関係を導くと、次式が得られる。

講座“エクセルギーの読み方・考え方”

第1回 エネルギー・エントロピーそしてエクセルギー〔第89巻第10号(平成27年10月号)〕

東京都市大学 宿谷 昌則

第2回 エクセルギー概念の展開〔第89巻第11号(平成27年11月号)〕

東京都市大学 宿谷 昌則

第3回 光からの熱への流れ〔第90巻第1号(平成28年1月号)〕

東京都市大学 宿谷 昌則

第4回 湿潤と乾燥〔第90巻第2号(平成28年2月号)〕

東京都市大学 宿谷 昌則

第5回 人の身体と環境〔第90巻第3号(平成28年3月号)〕

東京都市大学 宿谷 昌則

第6回 動的平衡と環境技術〔第90巻第4号(平成28年4月号)〕

東京都市大学 宿谷 昌則

〔タイトルおよび執筆者は、変更になる場合があります。〕

エクセルギーの読み方・考え方

(1) エネルギー・エントロピーそしてエクセルギー

宿谷 昌則 東京都市大学 正会員

キーワード：熱(Heat)、仕事(Work)、エネルギー(Energy)、エントロピー(Entropy)、拡がり散り度(Dispersality)、絶対温度(Absolute temperature)

エクセルギー概念は、資源性とは何か、消費とは何かを定量的に示してくれる。本連載の第1回では、仕事と熱の関係が“拡がり散り”と呼ぶべき自然現象によって生じることを確認した上で、熱とエントロピーの関係を導き出すプロセスを説明し、エクセルギー計算に必要となる“拡がり散り度”“絶対温度”の概念を説明した。また、エクセルギー収支式の基本を紹介した。

はじめに

建築内部の空間を、そこに在る人が仕事をしたり・くつろいだり・運動したりといったそれぞれの目的に合うよう、どのような設えとするか。この問いへの答えは、時代背景に応じてさまざまであったといえる。答えに至る道筋は一般に、建築外皮をどのように設えるかに始まり、次いで建築外皮の構成に応じて機械・電気の仕事掛けをどのように設え備えるかが続く。前者と後者とがまとまった一つの確たる答えとなるには確かな科学と技術とが必要だ。

科学技術という言葉が現れてすでに久しい。この言葉には科学の発展の結果として可能になった技術といった響きがあるが、熱力学の発展史を調べてみると、試行錯誤の上に経験的に成り立っていた技術が、少なからず新しい科学を生み出す元になっていたことがわかる。

その意味で、現代の暖冷房・換気の技術は、科学技術として発展してきた側面を持つ一方で、今日までのさまざまな試行錯誤を経て形成されてきた技術だからこそのもう一つの側面、つまり関連する科学を改めて発展させる元としての側面を持っている。

今回から始まる本連載の主題たる“エクセルギー”概念は、この四半世紀ほどの間に新たに発展してきた科学概念の一つで、以上述べた二つの側面の後者に属する。

エクセルギーは“エネルギー問題”とは何の問題であるかの基本を曖昧さなしに表し、“エネルギー消費”の“消費”とは何であるかを厳密に定量化して表す。

エクセルギーは熱力学概念の一つで、エネルギーとエントロピーに加えて、議論の対象とする系(システム)にとっての環境温度を組み合わせることで導かれる。

内部エネルギー・エンタルピー・エントロピー・自由エネルギーといった熱力学概念には対象とする系の温度・圧力だけが関係し、系にとっての環境の温度・圧力は関係しない。これに対して、エクセルギーでは環境の温度・圧力も関係するところが大きな特徴である。この特徴が“エネルギー問題”で議論の対象となるはずの“資源性”“消費”を定量化することになる。

エネルギーとエントロピーは、熱力学の基礎が築かれた19世紀中頃に、当時の自然哲学者(科学者)たちによって確立された概念である。

“エネルギー”という言葉は、今日では専門家ばかりでなく非専門家もよく耳にし、またよく口にするようになったが、エントロピーのほうは、エネルギーのように使われてきていない。エントロピーはエネルギーに比べて“難解”だと、多くの科学者・技術者に信じられてきたからである。エクセルギー概念には、エントロピー概念が含まれるために、やはり難解と思われがちである。

筆者もエントロピー概念は難解だと決めつけていたことがあった。しかし、エネルギー概念とともにエントロピー概念を導き出すための思考過程を改めて丁寧に追ってみると、(やさしいとは断言できないとしても)必ずしも難解ではないことが明らかとなる。その結果として、実は、エントロピー概念が明確になるばかりでなく、エネルギー概念とは何であるかも明確になり、ひいてはエクセルギー概念がなぜ必要なのかも明らかになる。

本連載では以上のことから、熱力学の基礎から説き起こして、エクセルギー概念が導き出される道筋をできる限り丁寧に辿るとともに、その伝熱学への融合と展開、ひいては建築環境や暖房・冷房システムがいかに記述・理解し得るかを解説し、読者の参考に供したい¹⁾²⁾。

1. 巨視的な自然現象に見られる“拡がり散り”

今こうして原稿を書いている筆者の身体、手に持っているペン、目の前にある原稿用紙・パソコンなどはすべて原子・分子で構成されている。とはいっても、原子・分子は私たちの目に直接見えるわけではないので、それが本当かどうかを一応は疑ってみる必要がある。