

生きている系のエントロピー I

Entropy of the Living Systems I

新潟歯学部 村 田 浩
琉球大学教育学部 江 尻 有 郷

Hiroshi MURATA : The Nippon Dental University, Hamaura-cho 1-8
Niigata 951-8580, JAPAN

Arisato EJIRI : University of the Ryukyus, Nishihara-cho-aza-senbaru 1
Okinawa 903-0129, JAPAN

(1998年11月27日 受理)

§1 はじめに

この世界のどのような変化でも必ずエントロピーが発生し、閉じた系では変化が止まるまでエントロピーが増大し続ける。これがエントロピー増大の法則と呼ばれる熱力学の第二法則であって、熱は高温から低温の方向にしか自然には流れない、という事実から導かれる法則である。歴史的には、生命活動のような複雑な変化ではこの法則は成り立たない、生命はエントロピーを減少させることができる等と言われていたこともあったのであるが、いかに複雑な変化でも、熱が自然に逆に流れるという事実が見出されない限りエントロピーは必ず増大しているのである。このように、熱力学は総合的で全体的な性格を持っているので、現代の分析的な物理学がまた破産することがあっても、この第二法則は生き残るであろうと言われている。

しかしながら、系のエントロピーが増大するのはその系が閉じている場合であって、生体系も地球も、現在では宇宙も開いた系であることが分かっている。ヒトが昨日の今ごろと今現在がほとんど同じ状態でいられるのはヒトの系が開放系になっているからである。

生物は周囲の環境のエントロピーを著しく増大させることによって、自らをエントロピーの低い状態に保っているのである。

§2 増加するエントロピー

エントロピーという物質の状態によって決まる量を次のように導入する。まず、生体系のようにほぼ一定温度 T に保たれている系に熱量 Q が流れ込んできたとき、その系のエントロピー S が ΔS だけ増加したとすると、

$$\Delta S \geq \frac{Q}{T} \quad (1)$$

と表される¹⁾。

特殊な場合として、生体内（一定温度 T ）で1モルの気体が体積 V_1 から V_2 に変化したときには、

$$\Delta S \geq R \log \frac{V_2}{V_1} \quad (2)$$

となる²⁾。

また、化学反応のため分子が変化した場合は

$$\Delta S \geq R \log \frac{W_2}{W_1} \quad (3)$$

と表される²⁾。ただし、 W は熱力学的重率（ミクロ状態の数）とよばれる量である。

§3 エントロピー論的化学反应式

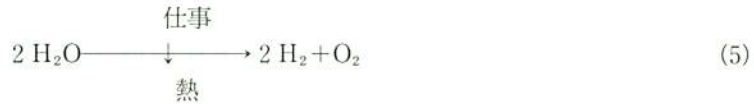
化学反応はエントロピーが増大する方向に進行する。たとえば、水素の燃焼反応は



と書かれる。 q は発熱量である。この反応で物質にだけ着目して、2モルの水素ガスと1モルの酸素ガスが反応して2モルの水が生産されるとだけ考えると、明らかにエントロピーは減少している。ところが、発熱量 q が大きく、多量のエントロピーが発生するので、全体としてはエントロピーが増大し、反応は自然に進行する。このように、簡単な反応でも、反応物より分子論的に複雑な物が生産される場合には反応に関わる物質にだけ着目すると、エントロピーが減少しているように見える場合もある。

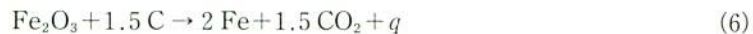
水素の燃焼反応(4)の逆の反応、水の分解反応はエントロピーが減少するので自然には

起こらない。この反応を起こすには、電気エネルギーなどの仕事を加え、これを廃熱にして、全体のエントロピーを増大させてやる必要がある。エントロピー論的反応式は

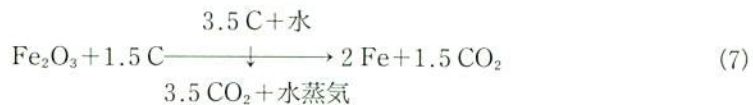


と書かれる³⁾。ここで、縦方向の仕事のエントロピーは勿論 0 でその一部 (式(4)の q に等しい量) は水の分解のために使われ、残りが熱エントロピーに変わる。即ち、反応式(5)の横方向は生産を、縦方向は低エントロピー資源の消費を示している。

次に、この生産と消費の関係を示すもう一つの例として鉄の生産を考えてみよう。鉄の原料資源は赤鉄鉱で、それにコークスを加え高炉に入れ銑鉄を得る。その生産を表わす反応式は



となるのだが、これは発熱反応ではあるがエントロピーが減少する変化なので³⁾、これだけでは反応は進行しない。エントロピーを吸収する縦方向の過程も考えなければならない。実際には、鉄 1 t を生産するのに、鉄鉱石 865 kg, 鉄屑 326 kg, 石灰石 133 kg, コークス 359 kg, 電力 180 kWh, 重油 28 ℓ, コークス炉ガス 2 m³, 淡水 140 t を必要とする。エントロピー論的反応式は



となるが、式(5)と同様に横方向は生産を、縦方向は消費を表わしている³⁾。生産のための低エントロピー資源 C よりエントロピーを吸収するために消費される資源の方が多いのは、原料資源のエントロピーが大きいためである。鉄を生産するためにもっとエントロピーの小さい原料資源があればそちらの方が良質な資源である、ということになる。

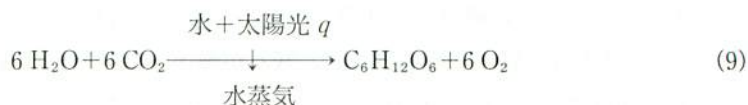
§ 4 光合成のエントロピー収支

生態系のエネルギーの源は光合成である。緑色植物が炭酸ガスと水を原料として、光合成によって太陽光のエネルギーを炭水化物の化学的エネルギーとして固定する。ここから、その植物を、草食動物が食べ、それを肉食動物が食べ、さらに、それらの排泄物および遺体を昆虫や微生物が分解し、また植物に戻るといった生物循環が形成される。光合成の反応式は



となる。ここで、 ε は太陽光のエネルギーで、熱エネルギーとして使われるのではないのでそのエントロピーは0である。式(8)は、もちろん、エントロピーが減少する反応なので自然には進行しない。太陽光のエネルギー ε だけでは光合成は出来ないのである。

光合成のエントロピー論的反応式は



となる³⁾。ここで、縦方向はこの反応を強制的に進行させるために、余分に必要な光エネルギー q の熱化によるエントロピーの増大と、それを冷やすための水の蒸散である。この“冷却水”は勝木⁴⁾、槌田等⁵⁾によれば、約137モルである。これに光合成の効率も考慮すると、1トンの生成物を得るのに約250トンの水が必要なが分かる。実際には、300~400倍の水と、 ε の約50倍の光エネルギーが必要である⁵⁾。エネルギーだけに着目すれば“光”合成であるが、物の方から見れば、“水”合成なのである。

§5 ヒトのエントロピー廃棄機構

生物は食物を摂取し、その栄養分を分解し活動のためのエネルギーを得ている。その際には発熱による熱エントロピーと、分子の分解による物エントロピーが発生する。それらの量はどの程度であり、また、生物はどのようにしてエントロピーを廃棄しているのかをヒトを例にして考えてみよう。

ヒトの代謝量については文献によって多少のばらつきがあるが、一応、標準的な成人男子を取ると、表1⁶⁾、2⁷⁾のようである。

糖質	400g	1600kcal
脂質	75g	675kcal
蛋白質	100g	400kcal

表1 食物の必要摂取量

水の摂取量		水の排出量	
食物中の水分	1,200ml	尿	1,500ml
飲用水	1,000ml	不感蒸発	900ml
代謝水	300ml	糞その他	100ml
合計	2,500ml		2,500ml

表2 成人の水分出納

表2の注：不感蒸発水には汗は含まれない。代謝水は体内で栄養素が代謝(酸化分解)を受けて生ずる水。

まず、表1の栄養素の摂取によって発生する熱エントロピーは、体温を 37°C (310 K) とすると、全体で 36 kJ/K となる。分解による物エントロピーの増加は、たとえば、 400 g の糖質で $1.3\text{ kJ/K}^{\text{位}}$ と小さいので、ヒトが発生させるエントロピーは全体で、約 40 kJ/K としてよいであろう。エントロピーの排出量として物エントロピーが小さいのは、ヒトの系への物の出納を見ても分かる。エントロピーを単純に“汚れ”と解釈すると、食物より排泄物の方が“汚い”ので、物エントロピーが多量に排出されるようだが、もちろん、そうではない。最も多量に排出される尿を見ても、それは摂取したスープや食物に含まれていた状態の水よりもはるかにエントロピーが小さい。また、糞にしても水分や栄養分を抜いて濃縮してあるので、摂取した食物よりエントロピーが大きいは言えない。このように動物はその排泄過程である種の濃縮を行うので、食物よりも排泄物の方が“きれい”な場合が多い。

ヒトが物の排泄行為によってエントロピーを捨てられないとすると、残るのは熱エントロピーの放出である。これは水の蒸発、熱伝導そして熱放射である。表2によって水による放熱を考えてみよう。これには汗として出る水の量は入っていない。汗の量は高温期とか労働時には 3 l にも達するそうであるが、これを冷たい飲料水で補うことによって、発生した熱とエントロピーをしたたる汗とともに体外に排泄する。いずれにしても、せいぜい、これは発熱の増加分を排出するだけと考えられるので汗の分は除外してよいであろう。表2で最も多量に排出される尿であるが、これも摂取された食物やお茶などの飲料水は暖かいので、差し引きでは放熱されたことにはならない。糞その他も同様である。

残りは水の蒸発である。水の標準状態での蒸発熱 44 kJ/mol を採用すると 900 g の水が体表面温度 (306 K) で蒸発すると放出されるエントロピーは 7.2 kJ/K となる。これは全発生エントロピー約 40 kJ/K の 20% 以下の値である。したがって、ヒトの系から排出されるエントロピーの大部分は熱伝導と熱放射によるものと思われる。これは、身につけている衣服に大きく依存するので、直接計算することは困難であるが、たとえば、衣服を着けない裸の状態でかなり暖かい (25°C 以上の) 部屋にいても、伝導と放射によって失われる熱エネルギーは摂取量を越えてしまうことから、間違った推量ではないと思われる。

以上でヒトの系のエントロピーの発生と排出について考えてきたのだが、次には生態系全体を取り上げてみたい。

参考文献

- 1) 村田浩：熱機関のエントロピー表示について、日歯大紀要 26 (1997), pp 17-23

- 2) たとえば, 村田浩: 13 熱力学 (医歯系の物理学), (東京教学社, 1987), pp 165-179
- 3) 槌田敦: 熱学外論 (朝倉書店, 1992)
- 4) 勝木渥: エントロピー的視点からみた生物と地球(試論)(エントロピー), (朝倉書店, 1985) pp 77-102
- 5) 槌田敦・室田武: 水・生物・人間とエントロピー理論 (エントロピー読本II), (日本評論社, 1985) pp 44-51
- 6) たとえば, 中山昭雄: 新版生理学入門 (朝倉書店, 1987), p 170
- 7) 後藤英夫: 栄養生化学 6 (原色栄養学図鑑), (建白社, 1983), p 108