

私の独り言—エントロピーの法則と生命現象

大阪大学名誉教授

長谷川 晃

要旨

エントロピー増大の法則は物理法則の中でも最も哲学的な法則である。それだけに面白い。エネルギーを使って仕事をすると、エネルギーの質が劣化（熱化）するという半ば経験則として導かれたこの熱力学の第二法則は、永久運動が不可能であることの証明に使われたりすることで実社会に大きなかかわりをもたらした。エントロピーの概念は20世紀に入り情報理論にも用いられ、その法則は「世の中が時間と共により不確実に、またより乱雑になる」という広義の意味に拡張され、何となく人生を暗くする、悲観的な法則として理解されるようになる。しかし、日常生活では美しい花や小鳥や女性たちを生み出す自然現象は、一見エントロピーの法則と矛盾するよう見え、この法則自体が間違っていると云った意見も時折耳にする。ここでは、エントロピーの法則と云う、何となくモヤモヤする法則を生命現象に当てはめるとどうなるかを考え、独り言として一寸皆さんに聞いてもらいたいと思って書いてみた。皆様の知的好奇心をかき立てることであれば幸いである。

1. 緒言

物理学の基本は自然現象の解明とその因果関係を追及することを目的としている。自然現象の解明には粒子間の力関係の解明が必要になる。因果関係の追求には、一個の粒子について言えば、初期に与えられた粒子の位置と運動量をもとにしてそれらの量の時間発展を調べ、また流体などの連続体の場合にはそれが持つ場の量（速度場や圧力場など）の時間空間的發展を調べることになる。

物理学の追求する因果関係に大きな影響を与えたのが19世紀初頭の熱力学において発見された第二法則、エントロピー（熱量と温度の比）増大の法則、である（第一法則はエネルギーの保存則）。この法則を言葉で云えば、エネルギーを用いて仕事をすると、エネルギーそのものは保存されるが、エネルギーの質が劣化し、もとあったエネルギーの一部又は全部が熱のエネル

ギーに変換されと言うものである。この結果、閉ざされた空間内が一様に同じ温度になる。さらに、また、この過程は時間が戻せないと同様に非可逆である。エントロピー増大の法則は、物理学の追及する因果関係に不確実さを持ち込むもので、物理学の目的そのものに大きな影響を与えることになる。その後 Boltzmann (1872) によって展開された統計力学ではエントロピーは系の持つ複雑さ (complexity) の対数で定義され、第二法則は複雑さ、或いは不確実さの増大という形で再認識されるようになった。20世紀に Shannon (1951) によって構築された情報理論では情報の持つエントロピーと熱力学的エントロピーの等価性が示された。この結果、エントロピーの法則は熱力学以外にも実世界の総ての現象にあてはまると考えられるようになる。

一方、因果関係の追求において、20世紀の物理学は2つの大きな発展を成し遂げた。一つは量子力学の創出であり、もう一つは非線形力学の発展である。前者では全ての粒子は波動性を持ち、結果として運動量と位置（或いはエネルギーと時間）が同時に正確には決められず、運動量やエネルギーが、がとびとびの値を持つと云う。また後者では粒子の軌道にカオスが発生することが知られ、さらにまた、連続体では安定な非線形波動であるソリトンの発見と、乱流の振る舞いの解明と自己組織化の発見がある。

これらの20世紀物理学の発展はエントロピーの法則という経験則に多くの知見を与えるようになる。例えば、量子力学の不確定性原理とカオスを組み合わせると、一個の粒子の動きにもエントロピーの増大を見ることが出来る。しかし、その一方でソリトンの発見はそれまでの予測に反し、非線形性が必ずしもエントロピーの増大には寄与しないことを示すことになる。また、2次元乱流や磁場中プラズマで見られる己組織化現象では、ある物理量のエントロピー（熱力学的エントロピーを含む）は、閉じた空間内に於いても、他の物理量のエントロピーの増大があれば選択的に減少し得ることが示された (Hasegawa (1985, 2009))。

一方生命現象は一見それが秩序の増大を示唆することから、エントロピーの法則と矛盾するのではないかという疑問も提出され、エントロピーの法則をきちんと理解することが要求されるようになる。特に神が人間を創造したとする creationist 達はエントロピーの増大法則に真っ向から反対する。このなかで、Schrödinger (1944), Brillouin (1962), さらには Prigogine (1977) らは生命現象は体外の環境とのエントロピーのやり取りで其の秩序を保っていると言うことでエントロピーの法則と生命現象の関係を説明した。

私は非線形現象に見られる自己組織化にしても生命現象にしても、決してエントロピーの法則とは矛盾するものではなく、逆にこうした現象にエントロピーの法則は大きな示唆を与えるものと考えている。特に、開放系でのエントロピーの法則には系の外部と内部との間のエントロピーのやり取りが重要で、結果として内部のエントロピーを減少させることが出来る。ここでは、エントロピーの法則を私なりに紹介し、これを基にして、エントロピーの法則がどのようにして生命現象に当てはめて考えられるかを、いくつかの例を用いて話してみたい。例えば、太陽の恵みはエネルギーの供給ではなく、地球上の生命現象を維持するのに必要なネグエントロピー（この定義は本文で紹介する）の供給であることを紹介する。また、蛋白質の摂取は細胞の再生によって失われる DNA の持つ情報を補うネグエントロピーにつながり、この考えをベースに必要な蛋白質摂取量を求めると、ほぼ妥当な値が得られることを示す。いわゆる健康食品や、「気」の取り込みなど、健康につながる生命現象についてもネグエントロピーの摂取という立場から論じてみたい。

2. 物理学における因果関係とエントロピー増大の法則

因果関係が正確に求められる例として太陽の周りの地球の動きを考えよう。まず簡単のために地球も太陽も質量だけがあり、大きさはゼロと仮定すると、これらの天体の動きは、初期の位置と運動量を与えられると、正確に知ることが出来る。これは、二体問題では系のもつ自由度の数と運動の恒量（全エネルギーと運動量）の数が等しいからである。しかし、ここに月を持ち込み、太陽、地球、月の三体の天体の動きを考えると、自由度の数が運動の恒量の数を上回り、これら天体の動きは正確に求めることが出来なくなる。特に、太陽、木星、土星の組み合わせのように、三対のうち

二つ（または三つ）がほぼ同じ質量の場合にはカオスが発生し、軌道が不安定になる。カオスとは初期の位置や運動量がわずかに違う2つのケースの軌道を時間的に追っかけると、これらの二つの軌道の違いが時間とともに指数関数的に広がってしまう現象を言う。この結果、カオスが発生すると初期のわずかな不確かさが指数関数的に増大し、不確かさの増大を生む。このことは、三個の物体の動きにもエントロピー（後に詳しく定義する）の増大が起こりうることを示している。一方地球と太陽がある大きさを持つ天体であることを考慮すると、2体間に働く引力の影響で、わずかずつではあるが、それらの天体の形に変化が生じ、これがこれらの天体を加熱し、結果として重力場のエネルギーが熱のエネルギーに変換される。これもエントロピー増大の法則の例である。

エントロピーの法則を開放系に適用してみる為に、ゴルフボールを床に落とす場合を考えよう。ゴルフボールは弾性係数が大きいのでよく跳ね返り何度も床と空中を往復するが、仕舞いには床の上に収まり動かなくなる。この場合、はじめにボールが持っていた位置のエネルギー（高さに比例する）は落下とともに運動のエネルギーに変わり、跳ね返って上がって来ると運動のエネルギーが小さくなり再び位置のエネルギーが回復される。しかし床の反射係数が1でないため、ボールのエネルギーは次第に失われ、最終的には床の上に動かなくなる。この場合、ボールが最初に持っていた位置のエネルギーは、ボールや床や、周囲の空気を暖めるエネルギー、即ち、熱のエネルギーに変換される。熱力学で定義されるエントロピーはボール（または床や空気）の得た熱のエネルギー Q とボール（または床や空気）の温度 T の比、 Q/T で定義される。この場合、エントロピー増大の法則は位置のエネルギーが熱のエネルギーに変化したことによるエネルギーの品位の低下という、定性的な意味合いと、同時にボールや床や周囲の空気の Q/T が大きくなるという定量的な意味合いで定義される。エネルギーの品位とは運動、位置、電気などの物理的エネルギーを最上位、化学的エネルギーを中位、熱のエネルギーを最下位としたもので、エネルギーを使って仕事をすると、必ず上位のエネルギーが下位のエネルギーに変換されるというのが、定性的にとらえたエントロピー増大の法則である。今の場合、ボールの位置のエネルギーが最終的には熱のエネルギーに変わり、また、いったん

熱のエネルギーに変わったエネルギーはボールが元持っていた位置のエネルギーには戻せないというのが、エントロピー増大の法則から理解できる。これは、熱のエネルギーが、ボールや床を構成している分子のランダムな動き（熱運動）であるため、いったんランダムになってしまったものは、位置のエネルギーという、ランダムでないエネルギーには戻らないからであり、エントロピーの増大はこの意味で不確かさの増大と見ることが出来る。正に覆水盆に返らずという諺のとおりである。

一方、動かなくなった時のボールの位置を見ると、同じ条件で実験を繰り返しても、同じ位置には戻らない。実験を繰り返すと最後に床上に停止した時のボールの位置はある位置の周りに分布をもったランダムな場所となる。このランダムな位置の対数の値は統計力学でのエントロピーに相当する。ボールの位置がランダムになるのはボールの表面の反発係数が一様でないこと、床に凸凹があること、ボールが回転していることなどがなどがその主な原因だが、ミクロに見たボールや床の分子のランダムな動き（熱運動）もわずかではあるが関わっている。こうして、総ての物事が不確かさを増す方向に進む、ということでエントロピーの増加が理解でき、この結果、物理学での時間の進行方向はエントロピーの増加の方向で定義される。

さてそれではボールを元の位置に戻す、即ち、エントロピーの増加を防ぐことが出来るだろうかを考えてみよう。これは次のような思考実験で可能である。まずボールの元の位置にちょうど毬つきの手の働きをする電動式の板を置き、この板を上下させてボールをたたき、ボールが床から戻ってきたときに失うエネルギーを供給する。そうするとボールは、それが破壊されるまで、何度も床とこの電動式板の間を往復する。その上で、ボールの跳ね返る位置や方向がランダムに変化するのをレーザーで観測し、板の角度を少し変えて調整すると、ボールの位置の不確かさはなくなる。ボールの内部、及び床や空気の熱のエネルギーは増え続け、これらのエントロピーは増大するが、少なくともボールの位置のエントロピーの増加は光センサーと電動式板のおかげで押さえることが出来、ボールは永久に上下運動を繰り返すことができる。しかし、この結果、板を動かすのに使われた電気エネルギーと、センサーに使われた光のエネルギーは熱エネルギーに変わり、それらのエントロピーは増大する。とはいえ、

ボールの位置の不確かさの増大は抑えられる。このことは、周りの助けを借りると（周りのエントロピーを増やすと）ある物体のエントロピーの増大を防ぐことも、或いはエントロピーを低減することも出来ることが分かる。このような場合、板を正確に動かすことにより、ネゲントロピーが注入されたと言う。ネゲントロピーとは、ある系のエントロピーに比べ、其の系の持つエントロピーより低いエントロピー（或はより高い秩序）のことを言い、この例で分かる通り、ネゲントロピーを外部から持ち込むことにより、その系のエントロピーの増加を抑えたり、低減することが出来る。私は生命現象をエントロピーの立場から見ると、正にこのように外界から酸素、食物、光などによってネゲントロピーの注入が行われることによって成り立っている現象だと考えている。

3. エネルギー、仕事、エントロピー

エントロピーの概念を紹介するためにエントロピーを熱力学、統計力学及び情報理論を用いて定量的定義することをおこう。まず、熱力学ではある容器の中の気体の持つエントロピー S はその気体の持つ熱量 Q （単位はジュール）とその絶対温度 T （単位は度）の比

$$S = \frac{Q}{T} \quad (\text{Joule/Degree}) \quad (1)$$

で定義されている。

先のゴルフボールの例で示したとおり、ボールが最初持っていた位置のエネルギーは、ボールを動かすという仕事をし、運動のエネルギーに変換され、何度もこの変換を繰り返す後に元の位置のエネルギーはボール自身、床、空気などの熱のエネルギーに変換される。エントロピーの増大の法則は上記の S なる量が時間的に増加することで理解される。

熱のエネルギーがエントロピーが大きい状態を表すのはそれが分子のランダム動きで出来ているために複雑性が大きいからで、同じ運動のエネルギーを持つ分子でもすべてが同じ方向に動いておれば熱のエネルギーより運動のエネルギーが大きくなり、エネルギーの品位は高くなる。つまり同じ運動のエネルギーを持つ分子の集合でも、それらが同じ方向に動いておれば、より多くの仕事をする事が出来ることになり、エントロピーが低い状態を表す。

分子夫々の持つ運動のエネルギーが同じでもそれらの運動が完全にランダムであれば、熱平衡状態にある

といい、夫々が同じ運動のエネルギーを持っていても分子が同じ方向に動いておれば、ランダムな動きの分のエネルギーが少なくなるため、エントロピーが熱平衡状態のそれに比べ少なくなる。こうした状態をネグントロピーを持っているという (Brillouin,1953)。ネグントロピーは系の持つ仕事をする能力の測度或は秩序の高さを表すと考えていい。

こうして考えると、エントロピーとはランダムな状態を表す指標とも考えられる。このことから Boltzmann により統計力学の考えが導入された。Boltzmann によって定義されたエントロピーは、

$$S = k_B \ln P \quad (2)$$

で書き表される。ここに P は系の持つ複雑さの測度 (complexity) を表し、 k_B はボルツマン定数 ($= 1.36 \times 10^{-23}$ Joule/degree) である。対数を用いるのは、独立した二つの複雑さの測度を持つ系のエントロピーはそれぞれのエントロピーの和で書き表されることが想定されるからである。(ちなみに独立した二つの系全体の持つ複雑さの測度は、条件確率の考えから、夫々の測度の積になるので、対数を取ると和で表されることになる)。それではここで (2) で定義されたエントロピーが熱力学的エントロピー (1) と等価であることを示しておこう。熱平衡状態の気体を考えると、その中の分子は当然ランダムな動きをしている。このため、一個の分子の持つ運動のエネルギー E (Joule) はそれぞれの分子で独立の値を持つ。その結果、エネルギーで見た系全体の複雑さの測度は、分子の数に従って指数関数的に増大すると考えられる。分子一個の持つ運動のエネルギーの平均値は気体の温度を表すから、平均の運動エネルギーを $\langle E \rangle$ と書き、これをボルツマン定数で割って温度の単位 (Degree) で書くと、平均的な分子一個のエネルギー状態は $\exp(\langle E \rangle / k_B T)$ で表されると考えられる。従って N 個の分子の集合では、エネルギー状態の複雑さの測度 P は $\exp(N \langle E \rangle / k_B T)$ で表すことが出来る。 $N \langle E \rangle$ は気体全体の熱量 Q に他ならないから、この P を (2) に用いると S は熱力学のエントロピー (1) と等しくなる。

20 世紀に入って Shanonn (1951) は情報量をエントロピーで定義することを提案した。例えば 0 と 1 で出来ているデジタル信号系列を考えてみよう。全てに信号が 1 (または 0) ばかりで出来ておれば情報量はない。それは、次に出る信号が分かっているからで、予測が完全に可能であれば不確かさが無いので情報量

は 0 とみなされる。一方もし、0 か 1 がまったく同じ確立で出る場合には、状態の取りうる数は 2 となるから、こうしたバイナリー信号一個の持つエントロピーは I は

$$I = \log_b 2 \quad (3)$$

で定義される。 b は対数のベースを表し、bit 単位で書く場合には b としては 2 を使う。 $\log_2 2 = 1$ であるから、0, 1 の信号列 1 つの情報量は 1bit ということになる。もし信号が 1 か 0 の n 個のランダムな数列で書かれているとその情報量は $\log_2 2^n = n \text{bit}$ ということになる。

他の例としてサイコロを考えよう。よく出来たサイコロでは 1 から 6 まで全て同じ確率で出るので、状態数は 6、したがってサイコロを一回振る時の情報量 I は $\log_2 6 = 2.59 \text{bit}$ となる。しかし、もしサイコロに細工がしてあって 1 から 6 までの目が同じ確立で出ない場合にはエントロピーは小さくなる。このような場合を考えると目の出る確率を考慮してエントロピーが定義されねばならない。もし奇数しか出ないサイコロであればエントロピーは $\log_2 3 = 1.58 \text{bit}$ となりエントロピーは下がる。

こうしてサイコロに細工をするとエントロピーは下がる。この場合細工をしてないサイコロのエントロピー 2.59bit との差のエントロピー $2.59 - 1.58 = 1 \text{bit}$ の分のエントロピーは細工をしたために負のエントロピーを外部から持ち込んだと考えれば、これは正に前述のネグントロピーに相当する。ネグントロピーを持ち込むと系のエントロピーを下げる事が出来る事がわかる。このように細工されたサイコロは 1 ビットのネグントロピーを持つということになる。先述の n 個のバイナリー信号の場合にでも、もし 1, 0 の信号の現れる順序が完全に知れている場合にはエントロピーは 0 になる。エントロピー 0 の信号は何の情報も持っていないように聞こえるので、Brillouin はネグントロピーという言葉を用いて確実な情報の価値を大きなネグントロピーで表そうとしたわけである。

4. 太陽の恵みはネグントロピーの供給源

第 2 章でゴルフボールのエントロピーの増加を防ぐ方法を思考実験で示した。この例で分かるとおり、ある系のエントロピーの増加を防ぐには、外界とのエントロピーのやり取りが必要である。この章では生命の誕生や維持に必要なネグントロピーは基本的には太陽

から来ていることを説明しよう。生命の誕生と維持にはまず体を動かすためのエネルギーの摂取が不可欠である。食事と酸素の摂取がこの役割を果たしている。摂取したエネルギーは体を動かすのに使われ、熱のエネルギーに変換され、体内でのエントロピーを増加させるが、熱は体外に放出され、体内にエントロピーが蓄積しないようにしている。さらに、食物と酸素によって摂取されたネグエントロピーは、熱以外に、汗や、排泄物の形でエントロピーとなり体外に排出される。また、生体内のDNAの秩序の維持や、細胞の再生など体内のエントロピーの増大を抑えるための外部からのネグエントロピーの吸収をも必要とする。呼吸を例にとると、酸素を摂取して炭酸ガスと水に変えて排泄しているのは炭酸ガスと水のもつ化学的エントロピーが酸素のそれより大きいからで、呼吸も生命維持のための体外からネグエントロピーの吸収に寄与していると考えることが出来る。したがって酸素の吸収は単に体内のブドウ糖を燃焼するだけの役割を果たすだけではなく、体内のエントロピーの排泄に寄与していると考えらるべきで、このことから、呼吸を整えることが、古来から言われている「気」の取り込み、と考えられていることの意味合いが理解できる。この点に関しては後に再記することにして、次に進める。生体が酸素を吸収して体内のエントロピーの増加を抑えているとすれば、酸素を供給してくれている植物はどうか。植物は炭酸ガスと水を吸収して酸素を出しているの、化学的エントロピーの減少を行っている。それでは植物の生命維持にかかわるネグエントロピー源は何かというと、太陽光である。光合成に必要な太陽光を取り込み酸素を放出するという化学的エントロピーの減少と、

生命維持を同時に行っているのだ。これが可能なのは光、即ち物理的エネルギーが化学的エネルギーより品位が高くエントロピーが少ないからである。勿論この結果、植物は光子のエネルギーを熱化し、エントロピーの増大に貢献している。このようにして地上の植物や動物は全体として地球と云う系のエントロピーを増加させることで、それ等の生命の維持している。特に最近では、人間どもが生活を豊かにする為に生命維持に必要なエネルギーの100倍程度のエネルギーを消費し、地球全体の系のエントロピーを急増させている。それではこうして日々増加するエントロピーを地球はどう処理しているのだろうか。幸い地球は太陽系の中の一惑星であり、それ自体開放系である。為に、外部とのエントロピーのやり取りをすることができ、結果として地球全体のエントロピーの増大を防いでいる。実際、地球から見ると、太陽は莫大な量のネグエントロピーを地球に供給してくれていることが分かる。図1は太陽光のスペクトルを表す。このスペクトルは太陽の表面温度約6000度の黒体放射に相当する。スペクトルに山谷があるのは一部のスペクトルが大気による散乱と吸収によって取り去られているからだ。特に注目すべきことは、影で示す通り、短波長側のエネルギーが数電子ボルトと光合成に必要なスペクトルを含んでいる点である。

それでは、太陽が地球に運んで来てくれるネグエントロピーの大きさを計算してみよう。太陽光のスペクトルは図1に示すとおり、可視光線部分から赤外線に及んでおり、その電力は地上で1平方メートル当たりほぼ1000ワットである。地球全体が受け取る電力はこれに地球の断面、(3.14X 地球の半径 (=6300km) の

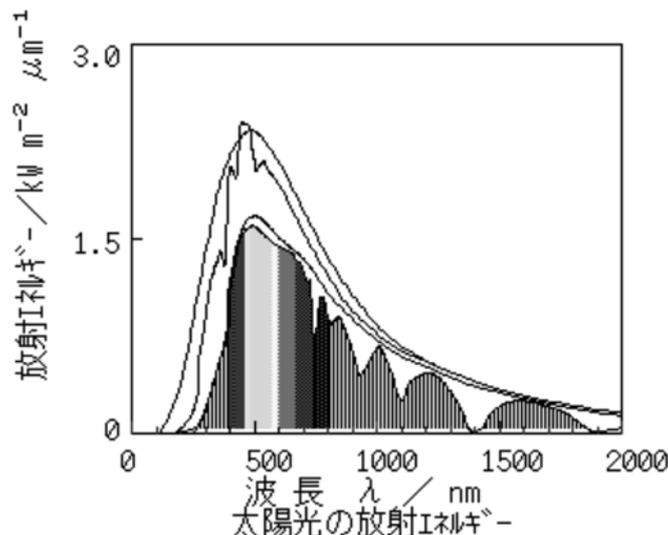


図1 太陽光スペクトル

2乗)、を掛けて求められ、 1.25×10^{17} Watt、即ち地球は太陽から、毎秒 1.25×10^{17} (Joule) のエネルギーを受け取っている。地球はこのエネルギー全部を赤外線形で宇宙に放出している。地球全体ではエネルギーの収支はバランスしていて、結果として地球はその温度を一定に保っているのだ。つまり地球は全体として太陽からエネルギーを受け取っているとはいえないのである。それでは何を受け取っているかといえば、地球上の生命が必要とするネグントロピーである。太陽から来るエントロピーと地球が放出するエントロピーの収支を計算してみよう。

太陽から毎秒やってくるエントロピーは、その定義、 Q/T 、から $1.25 \times 10^{17}/6000$ (Joule/K) (Kは絶対温度) となる。一方地球が宇宙に排出しているエントロピーは地球の温度を絶対温度 300 度として $1.25 \times 10^{17}/300$ (Joule/K) となる。 $1/300$ は $1/6000$ より遥かに大きいので、地球が太陽から受け取るネグントロピーの量は毎秒ほぼ 4.2×10^{14} (Joule/K) となることが分かる。即ち、太陽の恵みとはこれだけ大きいネグントロピーを供給してくれていることで、おかげで人間が食事をしたり、石油を燃やしたりしてエントロピーを排出しても、地球全体でのエントロピーの増加が抑えられているといえる。

それでは近年人間 1 人がどれだけのエントロピーを放出しているかを計算してみよう。食事で摂取するエネルギーを毎日 3000 キロカロリーとすると、 $1 \text{ cal} = 4.2 \text{ Joule}$ の換算を用いて毎秒約 100 Joule となる。これから生きてゆくために必要なネグントロピーの量 (Q/T) は体温を絶対温度でほぼ 300 度とすると、毎秒ほぼ 0.3 Joule/K となることが分かる。一方石油などの消費で使うエネルギーは日本人の場合、このほぼ 100 倍即ち毎秒 10000 Joule といわれている。もし 70 億の世界の人口がこれと同じ大きさのエネルギーを消費すると人類全体が排出するエントロピーの量は毎秒 2.3×10^{11} (Joule/K) という莫大な量となる。それでも幸いにして、太陽がもたらすネグントロピーの量に比べ十分小さい。しかし、現時点での人類全体でのエネルギー使用量は既に地球上に来る太陽の総エネルギーのほぼ 1 万分の一に達しており、この結果発生した炭酸ガスの温室効果による地球温暖化とこれに伴う気候不順は我々の日常に少なからず影響を与えてきている。マクロに見て地球上でのエントロピーの増大は太陽からいただくネグントロピーでは拭い去ることが

出来なくなってきたと考えられる。

5. 生命現象とエントロピー

人間の生命の維持のためには食物と酸素を必要とする。人間はこれらの要素を外部から吸収し、水、炭酸ガス、糞尿などの形でエントロピーを体外に排泄し、生命を保っている。この節では、エントロピーの出入りという立場から、生命現象をとらえてみよう。

食物のうち脂肪と炭水化物は主に体内で酸素と結合して燃やされ、体温の維持や体を動かすことに使われる。4 節で述べたとおりこの結果、毎秒ほぼ 0.3 Joule/K のエントロピーが体外に放出される。食物はこれに相当するネグントロピーを供給してくれている。したがって、体を動かすのに必要なネグントロピーの量は一日 (86400 秒) では約 26000 (Joule/K) となる。

一方蛋白質はアミノ酸に分解され DNA の情報に基づいて必要な蛋白質に作り直され人体各所の細胞の構築に使用される。この結果、蛋白質から摂取されるネグントロピーの計算には情報論の手を借りることにしよう。このため、まず DNA の持つエントロピーを情報理論の方法を用いて計算してみよう。DNA は周知のとおり約 30 億個の AGCT の 4 基の塩基の配列で出来ている。1 本の DNA の持つ最大の情報量 I はビット単位で $I = \log_2(2^2)^{3 \times 10^9} = 6 \times 10^9 \text{ bit}$ となる。これらの塩基は、個人単位ではある秩序を持つ配列をしているので、ここに求めたエントロピーはネグントロピーと解釈すべきである。人体にはほぼ 60 兆個の細胞があり、これらの細胞にはそれぞれの細胞構築に必要な情報を持つ DNA が存在する。従って、人体全体のもつ最大の情報量 (ネグントロピー) は $60 \times 10^{12} \times 6 \times 10^9 \text{ bit}$ となり、ほぼ $3.6 \times 10^{23} \text{ bit}$ という莫大な情報量になる。例えば、1TB (テラバイト) のハードディスクは 1 バイト = 8 ビットを使うと、 $8 \times 10^{12} \text{ bit}$ の情報量を記録できるが、一人の人間の全細胞はこのハードディスクを 400 億個並べたほどの情報量を持っていることになる。しかしこれを熱力学的なエントロピーの単位で書き直す為に、ボルツマン定数 1.36×10^{-23} を掛け、 $\ln 2$ で割ると、 $S=6$ (Joule/K) となり絶対温度 300 度で約 2 キロジュール程度の熱エネルギーに相当する。

それではここで細胞の新陳代謝によって失われるネグントロピーを補う為に必要な蛋白質の量を計算してみよう。人体の細胞の約 20% は毎日入れ替わっているといわれている。死んだ細胞は乱雑な DNA の配列

を持つものと考え、排泄される細胞は約 1 (Joule/K) のエントロピーを体外に排出すると考えられる。

ここで、先ず蛋白質 1g の持つネグントロピーの量を計算してみよう。蛋白質の分子量は $10^4 \sim 10^6$ といわれている。中を取って 10^5 としよう。この場合、1g 中のたんぱく質の数はほぼ $10^5 \times \text{Avogadro 数} (6.3 \times 10^{23})$ 即ち、 6×10^{18} 程度となる。蛋白質 1 分子を分解するのに必要なエネルギーは約 2 電子ボルト ($= 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{Joule}$) と考えられるので、1g の蛋白質を分解するのに必要なエネルギーは 2Joule となる。したがって 1g のたんぱく質が提供してくれるネグントロピーは人体の温度を 300 度として、約 0.06 (Joule/K) となる。人体が一日に必要とする細胞構築のためのネグントロピーの値が 1J/K であることを使うと、必要なたんぱく質の量は約 150g となり、よく言われている蛋白質の必要摂取量にほぼ一致する。ここで注意しておきたいのは、ここで求めた蛋白質 1g のエネルギーはこれを燃やした時に発生するエネルギーではなく、燃やさずにアミノ酸として利用する時のエネルギーである。摂取された蛋白質の一部は体内で燃焼されるので、その場合の蛋白質のもたらすエネルギーは、蛋白質中の水素と炭素全部が酸素と化合して得られるエネルギーを求め、必要があり、上記の約 10 万倍のエネルギーとなる。

また、呼吸で得られる酸素は食物の燃焼だけではなく、蛋白質合成の触媒にも使われているので、酸素も細胞構築のためのネグントロピーの供給に寄与していることを忘れてはならない。

さて、食物をネグントロピーの供給源と考えた場合、摂取するエントロピーは少ないほどネグントロピーの量は多くなる。この意味で体に良いとされる食物を順に並べてみると、海藻、野菜、魚、鳥、動物、また蛋白では植物性蛋白が動物性蛋白より良いといわれている。これは生物が地球上で進化してきた順と一致しており、正にこれらの食物のエントロピーの少ない順になっていることは偶然とは言えないだろう。

エントロピーと健康の関係は他の例にも見られる。

運動は体内の脂肪の燃焼を加速するわけだが、これは体内のエントロピーの排出を加速することも考えることが出来る。

呼吸を整えることは酸素の持つネグントロピーの摂取を調整していると考えられる。気功ではこれを「気」を取り込むと云う。「気」はエネルギーと訳されてい

るが、酸素の持つネグントロピーと考えるほうが正しい解釈であろう。実際、座禅をして三昧に境地におちいると脳波が整い、脳の活動が基底状態に落ち着くといわれているが、これは脳のエントロピーが最低の状態になっていることを意味し、これが気を静めること、或いは呼吸を整えることで可能になるのは酸素の持つネグントロピーの性ではないかと考えられる。

6. 結言

19 世紀に経験的に発見された熱力学の第二法則、エントロピー増大の法則の持つ意味は 20 世紀に入り、量子力学や非線形物理学の発展、さらには情報理論の出現により、より深く理解されるようになった。ここではエントロピーの法則を生命現象に当てはめてることを考えてみた。生命現象は外部から酸素、食物、蛋白質などの摂取を通じたネグントロピーの供給で成り立っている。生命を維持するのに必要な地球規模でのネグントロピーの供給は太陽光から得ていること、細胞の再生で失われる DNA の情報量のエントロピーの増加は摂取される蛋白質のネガエントロピーで補われていることを示した。さらに「気」の取り込み、健康食の摂取などもネグントロピーの摂取に関係していることについても言及した。この独り言は昨年 9 月に行われた近畿リウマチ研究会から受けた招待講演の内容をもとにして作り上げたものである。

<参考文献>

- Boltzmann, L (1872) : see English translation of "Vorlesungen uber Gasthoefforie: 2 Volume-Leipzig 1895/1898 UB:O 5262-6 by Stephen G Brush, University of California Press, Berkeley CA (1964)
- Brillouin, L (1953) "Negaentropy Principle of Information", J. Appl. Phys. 24, 1152-1163, also see "Science and Information Theory", Acad. Press, New York 1962.
- Hasegawa, A. (1985) Advances in Physics vol. 34, pp.1-42, (2009) Prof. Jpn. Acad. Ser. B vol. 85 Academy pp.1-11
- Lilly, D. K (1969) Phys. Fluids, vol. 12, p.240
- Prigogine, I. (1977) "Time, Structure and Fluctuations", Nobel Lecture, 8 December, 1977, Stockholm
- Shannon, C. E. (1951) "A Mathematical Theory of Communication", Bell Syst. Tech. J. Vol. 30, January, pp.50-64,
- Schrödinger, E : (1944) "What is Life-the Physical Aspect of the Living.", Cambridge University Press, Cambridge

(通信 昭和 32 年卒 34 年修士)