

私の独り言 問題はエネルギーよりネグントロピー、入り口より出口

大阪大学名誉教授

長谷川 晃

要旨：生命現象とエントロピーの関係に興味を持ったシュレディンガーは「生物はネグントロピーを食べて生きている」と言っている。私はこのことは、生体の維持にはエネルギーの取り込みよりも、エントロピーの排出が大事だということに繋がると考えている。実際開いた系では系内で増加したエントロピーは系外へ排出でき、結果エントロピーの増大を防ぐことが出来る。例えば、食べなくともしばらくは生きられるが、(エネルギーのない)水を飲まない生きていけないのはエントロピー(代謝物質)の排出が生命維持に欠かせないことを示している。今回はこの考えを生命体や地球環境に適用し、必要なのは入り口となるエネルギーの入手問題ではなく、出口となるエントロピーの廃棄問題であるという議論を展開したい。地球上の生命の維持にはエネルギーの確保でなく、エネルギーを使うことによって地球上に発生したエントロピー(熱、炭酸ガスや核廃棄物などのゴミ)を廃棄できるかどうかが基本的な問題である。この観点に立てば、再生可能エネルギーは善玉エネルギーという考えも入り口だけに注目した考えで不適切であるということになる。

はじめに

20世紀に入り、人類が多量のエネルギーを消費するようになった結果、これが環境汚染を引き起こし、今や我々の生命をすら脅かす結果を招いている。人類が使用するエネルギー源には、普通再生可能エネルギーと枯渇性エネルギーがあるとされている。再生可能エネルギーの定義は曖昧だが、太陽光・風力・水力・潮力・バイオマス・地熱などを用いるエネルギー源を意味し、人間が利用する以上の早さで自然界が補填してくれる種類のエネルギーを指す。一方、枯渇性エネルギーは石油・石炭・天然ガスなどの化石燃料やウランなどの地下資源を利用して作られるエネルギーを意味する。これらの定義は元々枯渇するエネルギー

と枯渇しないエネルギーとで区別されたものだが、近年、再生可能エネルギーは環境汚染を伴わないエネルギー、枯渇性エネルギーは環境汚染を伴うエネルギーとして見直され、一般に前者は善玉、後者は悪玉エネルギーと考えられている。しかし、少し考えてみると再生可能エネルギーを使うには、これらを利用可能な化学的エネルギーや電気エネルギーに変換する段階で枯渇性資源を消費する。また一方、自己増殖炉で作られるエネルギーは燃料を自己増殖するため再生可能エネルギーと考えられるが、莫大な核廃棄物を生み出す。このため再生可能エネルギー＝クリーンエネルギーという考えは間違っていることが分かる。こうした間違っ了解釈が生まれるのは、エネルギー問題をエネルギー資源という入り口の立場で議論しているからである。生命の維持にはエントロピーの廃棄が不可欠であるごとく、エネルギー問題もエネルギー使用によって発生するエントロピーの廃棄、つまり、出口での議論をベースとしなければならない。

エネルギー源として化石燃料を用いると、発生した炭酸ガスは海洋を汚染し(酸性化し)海洋生物の生態に悪い影響を与える他、大気中の炭酸ガス濃度の増加は地球からの赤外線放射を抑え、地球温暖化現象を引き起こす。つまり化石燃料は、炭酸ガスという化学的エントロピーと温暖化という熱的エントロピーを地上に蓄積する。また原子力エネルギーを使用すると、原発事故による放射性物質の拡散の危険性だけでなく、蓄積される核廃棄物による生態系への影響が大きな問題になる。こうした問題は地球上の広義のエントロピーの増大と蓄積と言う見方で考えることが出来る。炭酸ガスの増大は化学的エントロピーの増大、核廃棄物の増大は核的エントロピーの増大として説明できる。熱力学のエントロピーの増大法則は避けることが出来ない基本法則であるため、環境汚染の増大は基本的に避けられないものだろうか？ 私は以前「エン

「トロピーの法則と生命現象」(テクノネット 2010 年 7 月号)で生命体を例にとり、開放系(外界とのエントロピーの交換が可能な系)ではエントロピーを外部に放出することで内部のエントロピーの増大を抑えることが出来る話をした。実際太陽系の中での地球は宇宙との関係で開放系である為、太陽からエントロピーの少ないエネルギー(ネグントロピー)を得て、地球上で増大したエントロピーを赤外線ですべて宇宙に放出することで地球上のエントロピーの増大を防いでいる。こうして見ると、エネルギーを使用して発生するエントロピーが地球外に放出可能なものか、そうでないものが基本的に重要なファクターであることが分かる。つまり、エネルギー問題をエネルギー源という入り口で見ると、エネルギーを使用して発生するエントロピーの廃棄、即ちゴミの廃棄という出口に目を向ける必要がある。

今回は、生命体の健康問題と地球環境問題を開放系でのエントロピーの法則という立場で考え直してみたい。

1. ネグントロピーの物理的意味

統計力学ではある系のエントロピー S は系の内部の複雑さの数、或は系が持つ選択肢の数、 P の対数で表され、

$$S = k \ln P \quad (1)$$

で与えられる。ここに k はボルツマン定数 ($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/deg}$) である。 P は必ず 1 より大きいから S は正の値しか取らない。したがってネグントロピーなどはあり得ないと思われる読者も多からうから、まずネグントロピーなるものを少し考えてみよう。ネグントロピーという言葉を導入したシュレディンガー (Schrödinger, E: (1944) "What is Life-the Physical Aspect of the Living.", Cambridge University Press) やブリルアン (L. Brillouin (1962) "Science and Information Theory" Academic Press) はこれを自由エネルギーの別名として考えていて、ある系がネグントロピーを持つということはその系が機械的或は電気的な仕事をする能力を持つ系のことと定義している。仕事とは力と力を加えたモノが動いた距離の積で定義されるので、要はネグントロピーとはものを動かすことができる可能性のことと言ってよからう。この定義に従うと、考えている系が熱平衡状態(エントロピー

最大の状態)でなければネグントロピーを持つことになる。従ってネグントロピーは(1)で計算される系のエントロピーとその系が熱平衡状態に達した時のエントロピーの差として定義しなければならない。その系が仕事ができる可能性を持っているということは、それが熱平衡状態に至っていないわけだからその系のエントロピーは熱平衡状態のエントロピーより小さい。そのため、ネグントロピーは正となり、この量が大きいほどより大きな仕事ができる可能性が高くなる。

次にネグントロピーを取り込むことによりその系のエントロピーを下げる具体例を考えよう。よく知られている例はエアコンや冷蔵庫である。これらの装置は周りの温度より低い温度を持つから、その温度差を使うと仕事をする事ができるポテンシャルを持ち、ネグントロピーを持つことになる。こうした装置がネグントロピーを持つのは、電気のエネルギーなどを使うことにより熱交換器を動かした結果達成されるわけだから、電気というネグントロピーの助けを借りて系のエントロピーを下げたことになる。しかしこの結果、電気のエネルギーは熱化し、そのエントロピーは増大する。電気と冷蔵庫の系全体のエントロピーは当然増大する。従って冷却を可能にする為には系全体で増大したエントロピーを廃棄してやらなければならない。この為には冷蔵庫の裏の廃熱盤に障害物を置いてはいけない。エアコンの室外のファンの前にモノを置いてはいけない。つまり、いずれの場合にもエントロピーの排出を行うことにより、系のネグントロピーの維持が可能になっている。

もう一つの例として S. チュウのノーベル賞 (1997 年) につなげたレーザー冷却を考えてみよう。チュウはレーザーを使って原子の熱運動を下げ、これを冷却することに成功した。単一波長を持つコヒーレントなレーザー光を原子に当てて、原子と運動量を交換することで原子の熱運動を低減したわけである。この例でもレーザーのネグントロピーを利用したと考えることができる。しかし、冷蔵庫の例と同じく、レーザー冷却を可能にする為には原子を冷却してエントロピーの増加した光波を原子から逃がしてやらなければならない。

これらの例から分かる通り、ネグントロピーを使って系のエントロピーを低減する為には、増加したエン

トロピーの排出が不可欠である。つまり、ネグントロピーの導入という入り口の議論より、エントロピーの排出という出口の議論の方が重要であることが分かる。

2. 室内という開放系でのエントロピー

地球環境問題を分かりやすくする為に、地球規模ではなく、もっと小さな規模で考えてみよう。具体例として閉め切った部屋の中にいる一人の人間を考えよう。必要な食料や水、それに暖房用の石油ストーブと燃料の軽油が準備されているとする。人間は生きていく為に呼吸をし、常に部屋の中の酸素を取り込んで炭酸ガスとして吐き出す。食料を補給して体を動かすエネルギーと代謝で失われる細胞を再構築する為のたんぱく質を取り込む。寒くなると石油ストーブに火をつけて暖を取るが、同時に室内の炭酸ガスの濃度は増える。また、排泄物が部屋に溜まる。部屋の大きさが十分でないと、この人間は酸素欠乏で死ぬ。食料がなくなるより先に死に至る。実際人間は食べなくてもしばらくは生きていけるが呼吸を止めると数分で死ぬ。それは酸素が欠乏すると脳細胞が死ぬからだ。酸素自身はエネルギーを供給しないから、脳細胞の死は酸素によるネグントロピーの供給が途絶えたことにより脳細胞中のエントロピーが増大したことが原因だと見ることが出来る。この例は生命の維持にはエネルギーの取り込みより、エントロピーの代謝の方が重要であることを示唆している。

酸素は人体にネグントロピーを供給し、体内で増大したエントロピーは炭酸ガスと熱として排出されるとみなすことが出来る。前述の通り、ネグントロピーとは考えているシステムのエントロピーより小さいエントロピーを持つ媒体と定義できる。生体の代謝とは物理的にはこうしたエントロピーのサイクル、則ちネグントロピーを摂取して体内で増大したエントロピーを排出することを意味していると考えられる。生命の維持には酸素の他に水が必要である。呼吸が出来ると次の段階では食料より水を必要とする。水はエネルギーを持たないから、エネルギー源ではなく、ネグントロピーを運ぶ媒質とみなせる。水は体内で発生した細胞の死骸などの老廃物を対外に運び出してくれる。ここでもエントロピーサイクルがエネルギーより重要であることが分かる。実際最近の研究では生き物の寿命を

決めるのは体の大きさではなく、体の大きさに対する摂取エネルギーの大きさであるという結果が報告されている (Scientific American, p.80, September 2012)。これはエントロピーの代謝が寿命に関わっていることを示唆している。

次に酸欠を防ぐ為に部屋の中に植物を植えることを考えよう。植物は炭酸ガスを吸収して酸素を出してくれる。排泄物中の窒素も固定してくれる。また人間に食物を与えてくれる。そうすると人間は閉じた部屋の中で生きていけるだろうか。残念ながらそうはいかない。植物が窒素を固定し、炭酸ガスから細胞を光合成するには光のエネルギーを必要とするからだ。このため手持ちの石油を使って発電し、LEDを動かして光を発生して植物に当てることとしよう。これで問題が全て解決するかと言えばそうはいかない。室内の熱的エネルギーすなわち熱力学的エントロピーが増大し、温度が上がり、細胞の増殖機能が破壊され人間も植物も死ぬ。つまり閉じた部屋の中では、そこで発生するエントロピーを逃がしてやらねば、いくらエネルギーが十分にあっても生体は存在できない。生命の維持には増大したエントロピーを逃がしてやることの出来る開放系が必要となる。

3. 生体という開放系のエントロピー

生体が脳や体を動かすにはエネルギーを必要とし、その源である食物を摂取しなければならない。しかし、シュレディンガーが言う通り、生体は莫大な量の秩序(ネグントロピー)を細胞や脳に蓄えている。この秩序の維持にはネグントロピーの摂取を必要とする。たんぱく質などがこの役目をする。このため、バランスの取れた食事をしなければならないと言われる。しかしこれは生命の維持の為の入り口側の議論である。それでは、こうした入り口の議論だけで生命の維持は可能だろうか? 先述の議論と同様、出口の重要さを考えないと生命の維持は出来ない。

例えば、生命の維持には呼吸が欠かせない。これは普通、酸素の取り込みという入り口側の議論で論じられる。しかし私は、呼吸の重要な要素は炭酸ガスの排出、つまりエントロピーの排出であると考え。呼吸で酸素を取り込むと体内では

$$\text{グルコース (C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) + 6 \text{ O}_2 + 38 \text{ ADP} + 38 \text{ P}_i \rightarrow 6$$

$\text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} + 38 \text{ATP} + \text{熱}$ の反応が起こる。ADPとATPはそれぞれアデノシン二リン酸、アデノシン三リン酸を表す。ATPは分解酵素の働きによってリン酸基が外され、一つのリン酸基が外れるごとに1モル当たり8kcalのエネルギーを放出し、これが筋の収縮や脳内の電気信号の発生に使われる。このため、酸素は生命の維持に不可欠と思われているが、別の見方をすると、上記の反応が持続可能であるためには発生した炭酸ガスを取り除いてやらねばならないことに気づく。この役目を担うのが、吐く息である。座禅では吸う息より、吐く呼吸に集中するようと言われる。息を吸った時の酸素はネグントロピーを体内に提供し、吐く息の炭酸ガスは体内のエントロピーの排出の役目をする。生命の維持には炭酸ガスの排出が不可欠なのだ。(注：化学的に炭酸ガスが酸素よりエントロピーが大きいとは簡単には言えない。化学反応を考えると酸素と炭素が結合して炭酸ガスを発生する反応はいわゆる発熱反応である。発生した炭酸ガスは発生した熱によって熱運動のエネルギーを持って出てくる。その結果、炭酸ガスはエントロピーの増大を担っていることが分かる。このことは核反応についても同様であるが、これに加え、核廃棄物は通常放射性を持つため、それ自体多量のエントロピーを発生し続ける。)

次に生命の維持に不可欠な水の役目を考えてみよう。食べ物はしばらくなくても生きていけるが、水がないと生きられない。水はそれ自体エネルギーを持たないから入り口として生命維持に関わっているわけではない。水は汗として蒸発して体内の熱的エントロピーの排出を助け体温を一定に保つ働きをし、同時に体内に蓄積した老廃物としてのエントロピーを汗や尿で体外に排出する役目をする。したがって水の役目も出口の議論で話がつく。ここでも生命体の維持にとり、エントロピーの排出がエネルギーの吸収より大事であることが分かる。

生物の病と死はエントロピーの蓄積が原因と考えることが出来る。例えばアルツハイマー病はアミロイドベータというゴミが脳内に沈着することで脳の中の神経伝達物質のアセチルコリンが不足して起こる。脳血栓は血液のゴミである血栓が血流を阻害して起こる。また、癌は無秩序の細胞が無制限に増えることで起こる。

今話題の山中教授の生んだiPS細胞(induced

pluripotent stem cell)は、皮膚の細胞から4つの遺伝子を使って元の幹細胞を作り出したものだが、これは時間を逆転させることに相当するとも言われている。つまりエントロピーを減少させたことに相当するわけで、これを可能にしているのはその過程で大きなネグントロピーを注入しているからに他ならないと私は考えている。しかしエントロピーの増大法則から考えると、いくらネグントロピーを注入しても、注入するエントロピーがゼロでない限り何らかのエントロピーの蓄積、つまり不確かさの増大がもたらされ、これが作られた幹細胞に癌などを発生させる危険性を生むはずである。

閉じた系の中ではエントロピーが加速的(指数関数的)に増大する場合がある。磁場で閉じ込められたプラズマが突然不安定を起こし、乱流状態になって異常拡散を起こす場合がそうだ。理論的には乱れ、則ち、エントロピーの増大速度が乱れそのものの大きさに比例する場合にこうした不安定が発生する。生体の癌の発症も似た現象である。癌細胞が突然、指数関数的に増大する時に癌と診断されるが、癌細胞が体内に存在するだけでは癌とは言われない。こうして見ると、癌の発症は何らかの理由で癌細胞を体外に排出できなくなったことが原因と考えられる。つまり、本来生命体は外部とのエントロピーのやり取りで成り立っている開放系であるのに、何らかの理由でこのやり取りが停止して、閉じた系になってしまったことで起こるのではないか。開放系では乱れが指数関数的に発達することは起こりにくい。ただ、乱れが指数関数的に増大する場合でも、乱れた状態が自己組織化してある秩序を持つようになる場合がある。こうしたことが起こると閉じた系でも乱れが指数関数的に大きくなることはない。木星の大気は大変な乱流状態であるが、その乱流が自己組織化していて東西方向に縞模様を作り、これが大きな台風を緯度方向に動くのを防いでいる。同じようなことが癌細胞に関して適用されるとは考えにくい。しかし、体を出来るだけ開放系に保ち、増大しそうな癌細胞などのエントロピーを常に体外に排出することを心がければ、癌細胞が指数関数的に増大することはない。

これらの議論から生命の維持にはエントロピーの排出が不可欠であることが改めて理解される。

4. 地球という開放系のエントロピー

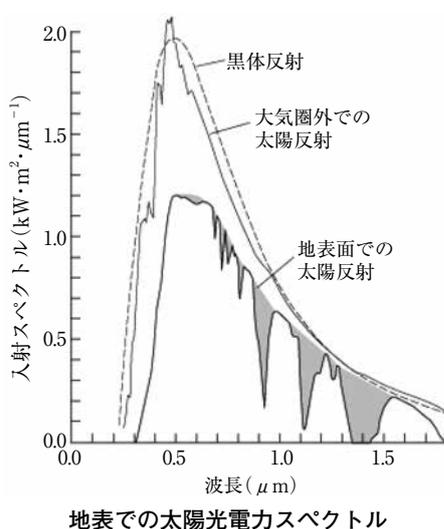
我々の住む地球は幸いにして前記の2例と同様、宇宙に対して開放系である。従って地上でのエントロピーの増加はネグエントロピー源をネグエントロピーを吸収することで防ぐことが出来る。また防がないと生命の維持は出来ない。地上で発生する熱的エントロピーは幸い地球の黒体放射（輻射）で夜間に宇宙に放出される。単位面積当たりの黒体放射電力は黒体放射のステファン・ボルツマンの法則

$$P = a T^4$$

で与えられる。黒体放射電力は温度の4乗に比例する為、温度が1%上がると4%増加する。地熱と太陽からの熱がなければ地球は急速に冷え、宇宙の温度の4°Kになる。地球の温度を生命体にとり丁度良い温度範囲にとどめてくれているのは太陽光のもたらす電力で、これも太陽表面の温度、ほぼ6000°Kの黒体放射による。承知のごとく地球の温度を丁度良い温度に保っているのは太陽光のもたらす電力と地球からの黒体放射のバランス、それに大気による保温効果によっている。黒体放射の電力スペクトルはプランクの法則に従って放射源の温度によって決まり、ある波長でピークを持つ。太陽光の場合の黒体放射光のピークは約0.5μm、則ち可視光線の波長の短い側にある。しかし大気によるレイリー散乱が波長の4乗に逆比例して大きくなるので、地上に到着する太陽光のスペクトルは少し赤側にシフトしたところにピークを持つ。

下記 URL 参照

<http://home.kanto-gakuin.ac.jp/~nmaeda/escipk/index.php?>



一方、地球から宇宙への黒体放射の電力スペクトルは地上の温度が太陽面より低い為、ほぼ波長10μm付近の赤外線領域にピークを持つ。地球の温度が太陽からの電力インプットと地表からの黒体放射による電力アウトプットのバランスでほぼ一定に保たれているとすると、地上での熱的エントロピーの放出量 $d/dt [Q/T (地上)]$ 、は太陽光の熱的エントロピー入力 $d/dt [Q/T (太陽)]$ に比べ、遥かに大きくなる事が分かる。これは太陽光が地球に大きなネグエントロピーを運んできていることを示している。また地上で発生した大きな熱的エントロピーは宇宙に放出され、地上におけるエントロピーの蓄積を防いでくれている。マクロに見ると、太陽光のこうした大きなネグエントロピーの注入が地上の生命活動を可能にしてくれていると見ることが出来る。太陽から来る光のエネルギーのエントロピーが地球から放出されるものより小さいことは別の方法でも説明できる。熱平衡の光の持つエントロピーは光子の数の対数で表される。光子の密度はその光のエネルギー密度 W と1個の光子のエネルギー $h\omega$ の比 $W/h\omega$ で与えられるから、同じエネルギー密度の電磁波では周波数が大きい（小さい）ほどエントロピーは少ない（大きい）。地球が宇宙に放出する赤外線のエネルギーは波長ほぼ10μm、一方太陽から受け取る紫外線の波長はほぼ0.5μmであるため、周波数にすると1/20となるので、地球は大変大きなネグエントロピーを太陽から得ていることになる。このネグエントロピーが地上の生命現象を可能にしているのである。

化石燃料を使う場合にも、発生した熱は黒体放射で地球外に放出されるが、炭酸ガスが地球からの黒体放射の赤外線を反射吸収するため、地球の温度が上昇する。炭酸ガスは地球の呼吸（エントロピー代謝）を阻害する。化石燃料は枯渇型エネルギー源だから問題なのではなく、地球からのエントロピー放出を阻害するから問題なのだ。ここでも出口が入り口より大事であることが分かる。

核エネルギーにしても同様、核廃棄物として地上に蓄積するエントロピーは地球外に放出できない。生命体の寿命がエントロピーの蓄積で決まると同様、地球の寿命(生命体が生きていける環境)もエントロピーの蓄積で決まる。

結言

開放系では増大するエントロピーを外部に放出することによって内部のエントロピーの増大を防ぎ、内部の秩序を保つことができる。これは生命体でも地球でも同じである。この考えを生命体に適用すると、何を食べるかよりも体内で発生するエントロピーを如何にうまく排出するかが重要であることが分かる。つまり入り口より出口が大事なのだ。泥棒ですら逃げ口のないところには侵入しない。健康維持にはエントロピーの効率よい排出が基本である。地球が生命体に適した環境を維持するには、地球外へのエントロピーの排出が欠かせない。太陽エネルギーは地球上のエントロピーを増加させないが、化石燃料や核燃料はエントロピーを増大させ、地球を不健康にし、いずれは死の惑星にしてしまう。エネルギー源として最も重視しなければならないのは、それがエントロピーの増大をもたらさない種類のものでなければならない。これには今のところ、太陽エネルギー以外には考えられない。太

陽エネルギーが重要なのは再生可能エネルギーだからでなく、地上のエントロピーを増やさないからである。エネルギー問題も生命も出口の議論で考える必要がある。

最後に、この論文を用意するにあたり何度か興味ある議論をさせていただいた井村裕夫元京大総長に、心からの謝辞を呈したい。

本論文の校正段階で生命機能研究科の吉森保教授が、細胞内で増大したエントロピーを体外に排出する機能をもつオートファジーの研究をしておられることを知った。医学会でも出口の重要性に気づいておられる先生がいらっしゃることに喜びを感じる次第である。

人間、入り口である「食の喜び」は持っているが、出口に対しては今まで関心が薄かったのは自然の手落ちであったのだろうか。

(通信 昭和 32 年卒 34 年修士)