

エントロピーの流れから見る環境問題と情報処理

大阪大学名誉教授 長谷川 晃

はじめに

地球が誕生してから46億年、つまり、10の9乗年、人間が地上に出現してからほぼ500万年つまり地球誕生から見ればまだ千分の1の期間、そして人間が多量にエネルギーを消費し始めてからほぼ百年。この期間は地球誕生を一年に例えるとわずか1秒間にしか相当しない。この短い時間に人類は地球の温度を数度上昇されているということは、まさに爆発的な効果と言える。物理学ではこのような非可逆性の現象（つまり元に戻らない現象）をエントロピーの増大という。エントロピーとは広義に定義すると不確実性のことをいう。つまり、閉じた系の中の諸現象の不確実さは常に増大する。その結果、全ての事象が同じ確率で起こるようになる（等分配法則）。実際物理学では時間の進む方向をエントロピーの増大する方向と定義する。つまり、閉じた系でのエントロピーの増大は避けられない物理現象である。しかし、開放系では外界とのエントロピー交換をすることで、系内でのエントロピーの増大を防ぐことができる。実際、生命体は外界とのエントロピー交換、つまり、体内で増加したエントロピーを体外に放出し、エントロピーの小さい物質（呼吸で得られる酸素や、食事で摂取されるタンパク質など）を摂取することで体内の秩序、すなわち、生命を保っている。シュレーディンガーはこの事実を「人間はnegentropy（負のエントロピー）を食べて生きている」と言っている。エントロピーは正の量だから負にはならないが、外界に比べてエントロピーが低い状態、つまり、外界より秩序の整った状態をnegentropy状態と呼んでいて、生命体は外界よりその分子構造の秩序がはるかに良いためにこれをnegentropyを持っていると表現しているのだ。このことは開放系では外部とのエントロピーのやりとりで、系内の秩序を維持したり、エントロピーを減少させたりすることができることを示している。

幸い、地球は宇宙から見ると開放系である。結果、地球上のエントロピーの増大は、これを防ぐことができる。地球上には色々な生命体が存在するため、地球もnegentropyを持っていると言える。そして、地球が宇宙より秩序のいい状態を維持し得るためには人間と同様地球もnegentropyを食べ続けなければならない。つまり、地球も宇宙から秩序を得て、地球上で生じた無秩序を宇宙に放出することで地上の秩序を維持することができるし、また人類生存の為にはそうしなければならない。これは何によって可能なのか？今回はこうした問題を定量的に

論じてみたい。

続いてこの稿ではエントロピー増大の法則を情報処理に利用することで熱効率の優れた情報処理方法について述べる。生体の情報処理の熱効率が極めて優れていること、また、量子コンピューターの熱効率の優れている理由なども説明する。

1. エントロピーの流れ

エントロピーとは元々熱力学で導入された概念でエネルギーを消費して仕事をさせた場合に全てのエネルギーが仕事に使われ得るのではなく、必ずその一部が熱に変わり、その結果、仕事をすれば内部の熱量 Q (Joule) が時間と共に増加するという事実を表したものである。これを式で表すと、

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q}{kT} \right) \geq 0. \quad (1)$$

となる。ここに S は単位を持たないエントロピー、 T はその系の温度、 k ($=1.38 \times 10^{-23}$ J/degree) はボルツマン定数を表す。この不等号は熱化されたエネルギー Q が時間と共に増加することを表しており、エネルギーを使って仕事をすると、その一部が必ず摩擦などによって熱化することを示している。熱とは分子のランダムな動きを表す、言い換えれば、不確実な運動のエネルギーである。つまりエントロピーとは不確実な運動のエネルギー、エントロピー増大の法則とは、不確実さの増大に他ならない。このことからボルツマンは後にエントロピーを分子のエネルギー分布関数（確率密度関数）、 $f(E, x, t)$ の対数の期待値 $\langle \ln f \rangle$ で表すことを提案した。

$$S = - \langle \ln f(E, x, t) \rangle = - \int f(E, x, t) \ln f(E, x, t) dE \quad (2)$$

ここに x は分子の位置、 E はそのエネルギーを表す。例えば、熱平衡状態では分布関数（確率密度関数）はボルツマン分布をするので、 f は分子の密度、 n 、とすると

$$f(E) = \frac{n}{kT} e^{-E/kT} \quad (3)$$

で与えられる。この分布関数は逆に、全エネルギーを一

定とした場合に(2)式のエントロピーを最大にする分布関数である。この分布関数を用いると(2)式は

$$S=n \quad (4)$$

となる。つまり熱平衡状態でのエントロピーは分子の密度に他ならない。これは、熱平衡状態での熱量 Q は nkT で与えられるからで(1)式の定義と一致する。単位体積あたりの分子の状態は分子が一個しかない場合に比べ2個ある場合では不確かさが増える。これはサイコロを一回振った時と2回振った時での目の出方の不確かさに違いがあることに似ている。情報理論では情報量をエントロピーで定義し、例えば、サイコロを振った場合の情報量は、振る回数 N とサイコロの目の出る確率 p (1/6)を使って

$$S=-\langle N \ln p \rangle \quad (5)$$

としているのはこのことから来ている。

2. 太陽光は地上にネグントロピーを供給している

生命体はシュレディンガーの言うごとくネグントロピーを食べて生きている。逆に言えば、生命体は体内で増加したエントロピーを周囲に撒き散らして生命を維持している。これは具体的にはどう言う意味だろうか？言葉で言えば秩序を摂取して無秩序を排出して生きていると言うことになる。熱平衡状態では1。で示した通り、エントロピーは対象としている粒子の集合体の粒子密度に他ならない。例えばタンパク質のように秩序ある高分子の集合体のエントロピーは分子量の小さい水や、炭酸ガス分子の集合体のエントロピーより単位体積あたりの分子の数が小さいため同じ体積で比較するとエントロピーは小さいと言うことになる。言い換えれば、例えばタンパク質はそれを構成している個別の水素や炭素がバラバラに存在する場合に比べて秩序が良いと言うことになる。シュレディンガーの言うネグントロピーとは具体的にはタンパク質を意味していると言える。別の言い方をすれば、分子量の大きな分子の集合体(たんぱく質など)は分子量の小さい分子の集合体(水や炭酸ガスなど)より熱平衡状態でのエントロピーが小さいということになる。この話は後に太陽光のエントロピーと地球からの黒体放射のエントロピーの違いの説明でより詳しく述べる。

近年、人間は食物の摂取だけではなく、多量のエネルギーを消費して生きている。エネルギーの消費もエントロピーの増加につながる。それは石油を燃やして炭酸ガスと水に分解すると単位あたりの分子の数が増え、1。で説明した通りエントロピーの増加を招くからだ。

幸い、宇宙から見ると地球は開放系であり、宇宙とのエントロピーのやりとりで地上でのエントロピーの増大

を防ぐことができている。それはどう言うことか、説明しよう。

太陽は地上に日中毎秒莫大な量のエネルギーつまり電力を供給し、地球はその電力を全て夜間に宇宙に放出して地上の温度を一定に保っている。つまり地球全体としてのエネルギーのやり取りは差し引きゼロである(それではないと地球の平均温度は上下する)。それではエントロピーのやりとりはどうだろうか？つまり地球と宇宙とのエントロピーの収支を見てみよう。

このためにまず(1)式のエントロピーの流れを見ていただこう。太陽からの電力供給と地球からの電力放出量は同じとすると(1)式の分子の $\partial Q/\partial t$ の出入りは同じと言うことになる。しかし、地球にエネルギーを供給している太陽表面の絶対温度 T はほぼ6千度、これに対して地上の絶対温度は300度、この結果、(1)式から地球が宇宙に放出するエントロピーは、地球が太陽から得ているエントロピーよりはるかに大きいことになる。つまり熱力学的には、地球はトータルとして宇宙から電力を得てはいないが、莫大なネグントロピーを得ていることになる。同様の事実を統計力学的に説明しよう。

太陽光が地球にもたらす光子の数 n はそのエネルギー E とプランクの定数と光子の周波数の積 $h\omega$ の比、 $n=E/h\omega$ で与えられる。太陽光の光子は近紫外線あたりに中心周波数を持つ。一方地球から宇宙に放出される黒体放射の中心周波数は遠赤外線にある。この結果太陽からの電力供給と地球からの電力放出は同じでも、両者の光子の数の大きな違いがあり、結果として、(4)式から地球から放出される光子のエントロピーは太陽から入ってくるエントロピーより遥かに大きくなり全体として地球は太陽から莫大な量のネグントロピーの供給を受けていることがわかる。実際太陽光の中心スペクトルの波長と地球からの黒体放射の中心スペクトルの波長、約 $15\mu\text{m}$ との比はほぼ1/20で両者の表面温度比になっている。こうして地球へのエントロピーの出入りは熱力学的(Q/kT)にも統計力学的 $\langle -N \ln p \rangle$ にも結果は同じであり、地球は太陽から莫大なネグントロピーを得ていることになっていることが証明される

3. 生体のエントロピーと情報処理の熱効率

最近筆者は米国物理学会誌、Physics Today (2021年2月号)に下記のレターを投稿し、発表された。この内容を転記すると、

Paul Davies article in Phys. Today (Aug. 2020) addresses importance of possible contribution of physicist/information scientist to biological system. As I mentioned in my earlier letter to Phys. Today in response to the article by Simon Sponberg's article (Physics Today, September 2017, page 34) a human brain has energy efficiency of some six orders of magnitude better than a supercomputer. The article by Davies addresses again the importance of information theory in biological

systems. As pointed out by Schrödinger, biological system eats negentropy (not much energy) from food creating a system that has entropy tremendously less than physical or thermodynamical systems. Let me quantify this statement here. As shown by Shannon, the entropy in information theory is related to thermodynamical system through $k_B N \ln p$, where $k_B (=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/deg})$ is the Boltzmann constant and p is the probability of the state and N is the number degree of freedom. Note that if one uses the information carried by individual molecule in one molecular weight, the Avogadro constant, 6×10^{23} balances with the Boltzmann constant and leads to order unity in the coefficient, $k_B N$. The Maxwell demon idea quoted in the article by Davies thus gives quantitative justification of equivalence of thermodynamical entropy and information entropy. The fact that a biological system has huge negentropy can be explained simply by the difference of N . If a DNA acts as one unit of degree of freedom, as it should, the entropy of a human body is about 12 order of magnitude smaller than that of a system having free molecules under the same temperature in equilibrium, since the molecular weight of a DNA is approximately a trillion times of say a water molecule. That is to say, a human cells are well-ordered than a thermodynamically equilibrium system by a huge factor (10^{12}). This factor of one trillion allows human system to work with thermal efficiency by a huge factor better than a supercomputer as is demonstrated in energy efficiency of about six orders of magnitude difference in the chess game between a person and supercomputer. Note further that a human brain has a weight of some a million times less than a super computer, thus efficiency per weight of human brain can be one trillion times better and agrees with the amount of negentropy of human cell system. Since the molecular weight of human DNA is not much different from those in other living cells, similar argument applies to most living systems. Most other animals do not play chess but the amount of information processed gained in visual and other sensory systems of other animals can be of similar magnitude of human brain. To extend further these arguments, I would say that the life is a process of maintaining the huge negentropy system within. Cell division (reconstruction of a cell) and action of autophagy in a cell are just some examples of built-in system to keep the negentropy of a cell. Similarly disease and death arise in the gradual and sudden increase of entropy within, or loss of negentropy.

このレターで言いたかったこと人間のDNAと水の分子の重さの比は 10^{12} ほどあるので単位体積あたりの分子の数の比もほぼこれと同じくらいある為、DNAは水に比べ12桁ほどエントロピーが少ないことになり、これがシュレ

ディンガーの言う生体のネグエントロピーを表している。つまり、(4)式からDNAの集合体のエントロピーは水の分子のそれに比べ12桁ほど小さいことを意味し、結果、その分エントロピーが少ない、つまり秩序が良いことを示している。これはDNAは長く繋がった核酸と、核酸そのものが持つ分子構造が秩序正しく整った分子構造を持つ為、自由に動き回る水の分子の集合より秩序が良いことを示している。

最近、スーパーコンピューターがチェスゲーム、続いて碁でも人間に打ち勝ったことが紙面を賑わしたことがある。確かにスパコンの情報処理能力は素晴らしいものがあるが、当学の柳田敏雄教授は熱効率の上ではスパコンは人間には全く敵わないことを指摘された。実際、スパコンの電力使用量は発電所1基分に当たる30万キロワットほどもあるが、人間の電力消費量は身体全体でせいぜい60ワット、脳だけで見るさらに小さい。この指摘は筆者の興味を沸き立たせ、その理由について考えさせられることとなった。

スパコンの使用する電力のほとんどは装置の冷却に使われている。このことは半導体を用いた演算は人間の脳に比べエントロピーの増大率つまりエネルギーの熱化(熱効率)が6桁ほど大きいことを表している。この違いはどこから来ているのだろうか？

私は情報処理の方法に(5)式の状態数 N の変化を伴うものとその確率 p の変化を伴うものの2種類があると考え。前者の場合、情報処理数は熱力学的エントロピーの増加に比例する。一方後者の場合には情報処理に伴う熱力学的エントロピーの増加は対数的にしか効かないことになる。具体例で言えば、前者はサイコロを振る回数に比例して熱が発生するが、後者の場合には目の数の変化を伴う情報処理でこの場合の熱の発生量は対数的にしか効かない。脳の情報処理の詳細はまだ不明の様だが、情報処理の結果DNAの数そのものが変化するとは考えにくい。したがって脳の情報処理にはDNAあるいはこれを構成する高分子タンパク質の化学的变化を利用していると考えられるので(5)式の p の変化を利用していると思われる。これに対し、半導体を使った演算では励起された電子の数の変化を使ってデジタル演算を行なっている、この結果、熱力学的エントロピーはデジタル演算回数に比例して増大する。この違いが人間の脳とスパコンの情報処理に関わる熱効率の大きな違いを生んでいると考えられる。これが上記の米国物理学会誌へのレターの要旨である。

以上の考察は生体の情報処理の熱効率の良さを示しているだけではなく、熱効率の優れた情報処理の方法をも示唆してくれている。例えば、情報通信への応用ではデジタル通信より、多値通信の方が熱効率が良いことを示している。同様に電子の数の変化に依存するトランジスターを使った情報処理より、電子の位相の変化を利用する量子コンピューターの方が熱効率が優れていることも示される。近年情報量を大幅に上昇させることができ

た長距離光通信が光パルスのオンオフではなく、光の位相に情報を載せることでその目的を達成したのも上記の理由で説明できる。つまり光子の数の変化ではなく、そのコヒーレンス性を利用することで熱効率の良い情報処理ができるのだ。コヒーレントな光波は位相の揃った単一周波数光である。これはその確率密度 p が常に 1 であることを意味し、結果、そのエントロピーは強度にかかわらず常にゼロであることに注意したい。

結言

環境問題はエネルギーの過剰な消費そのものが引き起こすものではなく、人間が地上に発生するエントロピーの急増がその原因と見るべきである。プラスチックなどのゴミの増大、エネルギー消費に伴う炭酸ガスなどのエネルギーのゴミの増大、生活ゴミなど、すべてエントロピーの増大という立場で考えるべきである。閉じた系でのエントロピーの増大は避けられない物理法則だが、幸い、開放系では外部とのエントロピーのやり取りを巧みに利用することで内部のエントロピーの増大を防ぐことができる。幸い、地球は宇宙から見ると開放系であり、宇宙とのエントロピーのやり取りが可能であり、結果、地上でのエントロピーの増加を防ぐことができる。

例えば、人間の使うエネルギーをすべて太陽光で賄うようにすれば、エネルギー消費で増加したエネルギーのゴミ（熱）は夜間に地球からの黒体放射で宇宙に出て行ってくれるので地上でのエントロピーの増大を伴わない。再生可能なエネルギーとは正にこうしたエントロピー増大を伴わないエネルギーのことを言うべきである。プラスチックゴミも太陽光エネルギーを利用して処理（水と

炭素に分解）すれば、エントロピー増大を防ぐことができる。化学的エネルギーも石油ではなく太陽光で作った水素を用いると同様にエントロピーの増大を伴わない。太陽光が地上に毎秒運び込むエネルギー（電力）は人間が必要とする総電力を十分補ってくれるだけではなく、人間の生み出す全てのゴミを処理するだけの電力を持っており、その上、その電力を使用することで生じるエントロピーの増加（エネルギーのゴミ）は地球からの黒体放射で宇宙に出ていってくれるので、太陽光を利用して人間の必要とする電力を統べ賄い、さらに人間が生み出すあらゆるゴミの処理を行っても地上でのゴミの蓄積は起こらない。つまり、環境問題は太陽光を全てのエネルギー源とすることによって解決できるものだ。

続いて、エントロピーの法則の情報処理への応用を考えた場合、ここでもエントロピーの増大は避けられない法則だが、情報処理を光子の数ではなく、確率密度の変化（具体的には位相の変化）を利用して行えば、エントロピーの増大は対数関数的にしか発生しないため、熱力学的により優れた処理方法であることがわかる。具体的には生体の情報処理や量子コンピューターの情報処理がこれに相当する。また、電子の数の変化を伴うデジタル演算より、その位相を使う量子演算の方が、或いは光パルスを使うデジタル通信より、光の位相を使う位相通信の方がエントロピーの増大を伴い難い、つまり熱効率の優れた情報処理法だということが言える。このことを可能にするにはコヒーレンスを持つ媒体を必要とすることは言うまでもない。

（通信 昭和32年卒 34年修士）