

生命と環境のための熱力学

後 藤 信 行

Thermodynamics for life and surroundings

Nobuyuki GOTO

要 旨

地球は物質的には閉じた系であるがエネルギー的には開放系であり、太陽から地球に入射した太陽エネルギーは、自らのエントロピーを増大させることにより、地球に物質循環を引き起こし、エントロピーの大きな熱エネルギーとなって冷たい宇宙空間に散逸していく。生命を育む環境としての地球に熱力学を適用し、人間の活動が地球のエントロピー排出の機構に及ぼす影響について熱力学的な観点から考察する。

キーワード：環境、生命、エントロピー、非線形

環境とは何か

生命は環境から切り離されて生き続けることはできない。生命は環境のなかで呼吸をし、環境から生きるためのエネルギーを食物として摂取しているのであり、環境との相互作用が断ち切られたとき死を迎えざるを得ない。

人間の場合も、生命体として、環境との間でエネルギーや物質のやりとりをしているが、それだけでは人間らしく生きていくことはできない。人間は自然環境と相互作用しているだけでなく、様々な社会環境と情報のやりとりをしている。現在の過熱した受験競争が子供と家庭環境や教育環境との間の相互作用に歪をもたらし、それによって生じる登校拒否やいじめの問題もいわば環境問題であるが、ここでは物理的な相互作用のみについて考えてみよう。環境とは、生命が生きるために相互作用をする周囲の物質的およびエネルギー的空間であるといえる。

生命個体が生きていくためには環境との相互作用が不可欠であるが、その相互作用が正常に行われなるときがある。その原因が生命個体にある場合が個体の病気であるが、環境のほうに起因する場合もある。環境がそれまでと大きく変化すれば、正常な

生命も環境に適応できなくなり、生命体として機能できなくなる。つまり、環境は安定していなければならない。かつての恐竜の絶滅の原因としては隕石説が有力であるが、巨大隕石の衝突による気候の激変に恐竜が適応できなかった結果と考えられている。

環境との相互作用において、生命が環境から食料として受け取るエネルギーや物質の価値は、生命が排泄物として環境に放出するエネルギーや物質の価値より高い。エネルギーや物質は保存量であり、即ち、エネルギーや物質は消滅してなくなることはないので、生命が生きるために消費しているのは、エネルギーや物質そのものではなく、それらの持つ価値といえる。ここでの価値は熱力学的に定量的に定義された価値でなければならないが、生命は生きるために環境から物質やエネルギーとともに、その熱力学的価値を取り入れ、それを消滅させて生きているのである。生命にとっての環境とは相互作用を通して生命に熱力学的価値を供給している場ということになる。

環境から供給された価値を消費しているのは生命だけではない。都会には水、電力、地方の特産物など、周囲からさまざまな物質やエネルギーが送りこまれる。一方、生活廃水、廃熱、ゴミなどが郊外に運び出される。都会に入ってくるエネルギーや物質と出て行くエネルギーや物質を比べると、一般に、前者は後者より価値が高い。つまり、環境から取入れられた物質やエネルギーが再び環境に放出される時、その価値が失われているのである。都会も周囲から送り込まれた価値を消費することにより、都会としての機能を維持していることになる。

原料から製品を創り出す工場は経済的価値を生みだしているが、経済的な価値は必ずしも熱力学的価値と一致しない。経済的な価値を生産する工場も熱力学的な価値は消費している。製品は原料より熱力学的価値も一般に大きいので、工場は価値を生み出しているかのように思える。しかし、工場に入ってくる全てのエネルギーや物質と出て行くそれらとを比較すれば、全体としては出て行くものの価値が小さくなっている。

例えば製鉄所について考えると、熱力学的価値の低い鉄鉱石から熱力学的価値の高い純粋な鉄を作り出しているが、製鉄所に入出入りするの鉄鉱石と鉄だけでなく、価値の高いコークスや電力や水を外部からとり入れ、そして価値の低い工業廃棄物や廃熱を外部に放出しなければならず、全体では製鉄所に入ってくるものの価値の和は出て行くものの価値の和より大きい。原料から製品を作る工場も創り出した価値以上の価値を環境からとり入れ、それを消費しているので、全体としては工場も環境の熱力学的価値を消費していることになる。

工場で製品を生産するには、原料や機械を動かすためのエネルギーのほかに人間の労働も必要である。しかし、労働は特に人件費の高い作今では経済的な価値は大きい

が、人の仕事をエネルギーに換算すれば、他のエネルギーに比べ僅かであるので、その熱力学的価値は無視できる。

熱力学的価値とエントロピー

猫にとっては小判より鯉節のほうが価値があるように、通常の意味での価値には価値判断がはいる、状況によっても異なる。また、物価や為替レートに見られるように、経済的な価値も常に変動する。しかし、物質やエネルギーの熱力学的価値は、不偏的に定義された物理量でなければならない。

錆びた鉄と錆びていない鉄では、その経済的な価値は一般に後者が大きい。熱力学的価値を比較するには、物質の量もエネルギーの量も同じ状態で比較する必要がある。酸素の入った箱に鉄をいれて放置すると、鉄と酸素が反応し酸化鉄となる。この反応は発熱反応であり、熱エネルギーを放出するので、箱の温度は少し上がる。しかし、酸化鉄を少し暖めても、もとの鉄と酸素に戻ることはない。つまり、この変化は不可逆変化である。反応の前後で箱の状態を比較すると、箱の中の物質の量もエネルギーの量も同じであるが、何か失われている。

物質やエネルギーの熱力学的価値は、それらの不可逆変化によつて減少するように定義する。つまり、エネルギーまたは物質がAの状態からBの状態へは自発的に変化するが、逆にBからAへはそのままでは移れないとき、Aの状態はBの状態より熱力学的価値が大きいとする。また、AからBへの変化もBからAへの変化も自発におきるなら、AとBの状態の熱力学的価値は等しいことになる。つまり、熱力学的価値を定量的に表わす量としては、状態変化の方向性を規定する物理量でなければならないことがわかる。

エントロピーは、クラウジウスによつて導入された物理量であり、系をマイクロにみたとき、系の乱雑さや不規則性を表わす状態量である。通常、系の中の物質を構成している粒子は原子または分子であるが、系の内部エネルギーが等しければ、構成粒子の配列状態や運動状態が規則正しいほど系のエントロピーは小さいということになる。

熱力学第2法則によれば、孤立系では変化の前後で系のエントロピーはつねに増加する。エントロピーは変化の方向を規定する物理量であるので、熱力学的価値をエントロピーにより定義することができる。つまり、熱力学的価値の高い物質やエネルギーとはエントロピーの小さい物質やエネルギーであるといえる。

生命や都会はエントロピーの小さい物質やエネルギーを環境から取入れ、エントロピーの大きな物質やエネルギーを環境に放出していることになる。つまり、生命や都

会は環境の熱力学的価値を消費して活動しているが、これをエントロピーを用いて言い換えれば、生命や都会は活動することによつて、その内部でエントロピーを生成し、それを環境に放出することにより、内部のエントロピーの増加を防いでいるのである。

工場で作られた製品は流通機構を経て消費者の手元に渡る。これは工場で経済的価値が生産され、さらに流通機構によつて製品に経済的価値が付加され、それを消費者が消費しているのである。つまり、工場も流通機構も経済的価値を生産している。しかし、エントロピーは全ての段階で生成されていて、工場も流通機構も消費者も全てが熱力学的価値を消費していることになる。

生命と負のエントロピー

シュレーディンガーはその著書のなかで生命は負のエントロピーを食べて生きてると述べている¹⁾。この負のエントロピーこそが、生命が生きるために環境から取入れられている熱力学的な価値にほかならない。生命はエントロピーの小さい物質やエネルギーを取り入れ、エントロピーの大きな物質やエネルギーを放出しているので、差し引き負のエントロピーを取り入れていることになる。つまり、シュレーディンガーの表現は、生命が正のエントロピーを生成し、それを環境に放出していることを言い換えたのにすぎないのである。

エントロピーはもともと正の量として定義されているので、負のエントロピーという表現は、シュレーディンガーの意に反して、一部の哲学者に誤解と混乱を招いたようである。例えば、フランスの哲学者ロジェ・カイヨワはその著書「反対称」のなかの「日本の読者への序文」で、「熱力学の法則と生物の進化の法則、カルノーとダーウィンのあいだには矛盾が存在する。」と述べている²⁾。しかし、負のエントロピーを消費するのは生命のみの特性ではなく、都会も工場も活動するもの全てが負のエントロピーを環境から取り入れ、それを消費しているのであり、生命活動も都会や工場の活動と同じく熱力学の枠を超えるものではない。

原子物理学者のシュレーディンガーは、生命が原子の単なる集合体ではなく、生命現象が、個々の原子や分子の内部運動と本質的に異なり、多体的効果であることを強調するために負のエントロピーという表現を用いたものと思われる。原子の中の電子は原子核のまわりを運動し続けているが、その力学的エネルギーはいかなる価値も失うことはない。つまり、原子や分子が1個だけ孤立していても、その中の電子は量子力学によって規定される固有状態に止まり、エネルギー準位間の遷位が起こらなければ永久に一定の運動を続けることが可能である。

巨視的な運動のうち、エントロピーを生成しない運動は、摩擦のない理想化された

純粋な力学的運動と、巨視的な量子効果と呼ばれる超伝導や超流動であるが、それ以外の巨視的な運動は必ずエネルギーを散逸しエントロピーを生成する。もし、エントロピーを消滅させる生き物や装置が実在すれば、それらは熱力学的価値を生み出すことになるので極めて有用である。マックスウェルのデモンや第2種の永久機関はエントロピーを消滅させることができるが、これらが存在しないということが熱力学第2法則なのである。

電子が原子のなかで永久運動をし、惑星が太陽の周りを半永久的に公転しているのに対して、我々を構成している細胞は孤立しては生き延びることはできない。細胞は新陳代謝のエネルギーの流れのなかで生きているのであり、我々の体内か、あるいは人工的に培養された状況でなければ生き長らえることはできない。細胞にとって我々自身が環境であり、我々も地球という環境のなかでしか生きることができない。

地球全体を考えると、エントロピーの小さい可視光線を太陽から受け取り、エントロピーの大きな赤外線を宇宙に放出している。地球も太陽と宇宙という環境から負のエントロピーを貰い、それを消費して活動を続けているのである。さらに、太陽や恒星も負のエントロピーを消費することによって誕生し、活動している。生命であれ非生命であれ、活動とは、熱力学的価値、即ち、負のエントロピーを消費することであり、その負のエントロピーを環境が系に補給しているのである。

物質やエネルギーが、生命や都会に流れ込み、エントロピーを増大させて流れ出しているのであるが、入ってくる流れと出ていく流れのうち、どちらか一方が断ち切られても、生命は死に、都会はその機能が麻痺してしまう。生命も都会も活動するものは全て、内部で生じたエントロピーを、物質やエネルギーの流れに乗せて、まわりの環境に運び出しているのである。

物質的に、かつ、エネルギー的に閉じた系では、エントロピーを外部に運び出せないでエントロピーは増大するのみで減少することはない。閉じた系では、系の内部でエントロピーが生成され、系のエントロピーは大きくなり、やがてエントロピーが最大の状態である熱平衡状態に達すると、系にはそれ以上巨視的な変化は起こらない。しかし、開放系においては、系は環境との物質的かつエネルギー的な相互作用をすることにより、環境とエントロピーの受け渡しをするため、熱平衡に達しなくてもエントロピーを一定に保つことができるのである。つまり、解放系では非平衡状態を維持できる。

能率と効率

いかなるサイクル、即ち、いかなる熱機関もただ一つの熱源から熱をとり、それを

全て仕事に変えることはできない。つまり、第2種の永久機関は存在しない。これはトムソンの原理であり、低温から高温に向かっては熱は流れないというクラウジウスの原理と等価であり、いずれも熱力学第2法則の異なる表現である。トムソンの原理に反するような熱機関を作るためにはエントロピーを持ったエネルギーである熱をエントロピーを持たないエネルギーであるところの仕事に変えなければならず、そのためにはエントロピーを消滅させなければならないからである。

しかし、高熱源と低熱源が存在すると、その間にサイクルを働かせることにより、仕事とりだせる。理想的なサイクルであるカルノーサイクルではサイクルによるエントロピーの生成はなく、高熱源から貰った熱のもつエントロピーを、低熱源に熱とともに捨てている。即ち、高熱源から貰った熱のうちの一部は低熱源にエントロピーを捨てるために使われ、残りの熱を仕事に変えているのである。高熱源から熱とともに入ってくるエントロピーは高熱源の温度が高いほど小さく、低熱源に捨てるエントロピーは低熱源の温度が低いほど大きい。カルノーサイクルは高熱源から入ったエントロピーを凝縮して低熱源に捨てていることになる。その凝縮する度合いが大きいほど、即ち、高熱源と低熱源の温度差が大きいほど、低熱源に捨てる熱は少なくて済むので、効率も温度差が大きいほど大きくなる。

有限の速さで変化する一般のサイクルは不可逆過程を含み、サイクルの内部で生成されるエントロピーも低熱源に捨てなくてはならない。そのため、熱源の温度は同じでも不可逆サイクルではエントロピーを捨てるために必要な熱量もおおきくなる。不可逆サイクルではその分、取り出せる仕事は少なくなり、効率が低下することになる。

二つの熱源の温度が決まっていれば、その間に働くサイクルで一番効率のよいサイクルはカルノーサイクルのような可逆サイクルであるが、可逆サイクルは準静的過程からなるので、仕事を取りだすのに無限の時間がかかる。即ち、能率が悪いサイクルである。しかし、能率を上げようとする、非静的サイクル、即ち、不可逆サイクルとなり、エントロピーを生成するので、今度は効率が悪くなる。効率と能率は相補的である。

サイクルでは熱エネルギーの流れの中から仕事というエントロピーを持たないエネルギー、つまり価値のあるエネルギーを抽出しているのが、工場では物質とエネルギーの流れの中から製品というエントロピーの小さな物質を抽出している。つまり、工場も一つのサイクルとみなすことができる。

近代的なオートメーション工場は生産の時間的な効率、即ち、能率はよいが、エネルギー効率は前近代的な家内手工業に劣ると思われる。つまり、生産の能率を上げようすると、エントロピーの生成が大きくなり、効率が悪くなり、従って工場廃棄物を増やし、環境汚染を進行させることになる。

物質循環とエネルギー散逸

生命や都会や工場や、その他の地球上のもろもろの動的な構造がその内部で生成したエントロピーを環境に放出しているため、地球もエントロピーを地球の外に捨てなければ地球のエントロピーは増大してしまい、地球は熱平衡になり、地球上の動的な構造も消滅してしまう。

地球と宇宙空間の間での物質の出入りは隕石しかないため、地球は物質的には閉じた系と考えることができる。しかし、エネルギー的には開放系であり、地球は波長の短い光である可視光線を太陽から受取り、波長の長い光である赤外線を宇宙空間に放出している。

地球が太陽から受け取る可視光線のエントロピーと宇宙に放出する赤外線のエントロピーを比較してみよう。量子論によれば、光は波であるとともにエネルギーの粒でもある。光の粒子、即ち、光子は、その1個の持つエネルギーが光の振動数に比例している³⁾。地球は大粒のエネルギーである可視光線を太陽から受取っているが、そのエネルギーは、地球を循環するうちに、エントロピーの大きな小粒のエネルギーに変り、赤外線となって宇宙空間に放出される。つまり、シュレッダーを通じた機密書類がその情報を失うように、太陽から入射したエネルギーは地球を通過する過程で小粒のエネルギーに砕かれてエントロピーの大きな赤外線となって宇宙空間へと捨てられているのである。

地球にとっての環境は太陽と宇宙空間であり、地球はエントロピー放出の機構として太陽エネルギーの流れを利用しているのであるが、太陽から地球を経由して宇宙へと向かうエネルギーの流れは地球に物質の循環を引き起こす。物質循環のうち、自然環境としての地球にとって重要な役割を演じているのは炭素循環と水循環である。

地上に入射した可視光線は、植物の光合成により、水と空気中の炭酸ガスから、炭水化物を作りだす。炭酸ガスを構成していた炭素原子は炭水化物として固定されるが可視光線のエネルギーも炭水化物の化学的エネルギーとして植物自身に固定される。植物は炭酸ガスと水と太陽光線から炭水化物を生産するいわば炭水化物工場であるが、この場合の工場廃棄物にあたるのは植物からの水の蒸散によつて廃棄される熱である。

昆虫や草食動物は植物を食べることにより、植物が生産した炭水化物を摂取する。その一部を呼吸によって体内で酸化させ、炭水化物の化学結合のエネルギーを散逸させることにより生物は活動している。つまり、生物は炭水化物を取入れ、炭素を炭酸ガスとして大気に還元させ、熱と排泄物を環境に放出する。摂取した炭水化物のうち使用されなかった分は生物の体内に蓄積される。

植物を食べて成長した昆虫は小鳥などによって捕食される。さらにその小鳥は蛇や

猛禽類に補食される。また、草食動物は肉食動物によつて捕食される。つまり、植物が生産した炭水化物は食物連鎖のなかで消費されることにより、その中の炭素は炭酸ガスとして、また固定されていた太陽エネルギーは熱として環境に放出される。環境に残った生物の排泄物や死体も腐食連鎖のなかで微生物により、炭酸ガスと水と熱に分解される。

結局、光合成によつて炭水化物として固定された炭素は食物連鎖や腐食連鎖を巡り大気中に炭酸ガスとして還元され、太陽のエネルギーは散逸して熱エネルギーになってしまう。この場合、炭素の循環の各段階において、いつもエントロピーは生成されている。

地球に入射し、地表に達した残りの太陽光線も地表を暖めることにより、熱に変化する。これらの熱は生物圏に生じた熱と一緒に水循環によつて上空に運ばれる。水は気化熱を奪い上空にのぼり、そこで冷却され、熱を放出し、雨滴となって地上に落下する。

水も炭素も循環し、地球で生じたエントロピーは熱のエントロピーとして宇宙空間に放出されるので、地球は一定の状態を保つことができるのである。しかし、地球が宇宙に放出することができるエントロピーは熱としてのエントロピーのみであり、熱のエントロピーに換えることのできないエントロピーは地球上に蓄積されることになる。

人間はこれまで1千万種類もの化合物を合成してきた。そのなかで、特に最近合成された物質のほとんどは自然界に存在しない物質である。さらに地下深くに存在していた重金属が地表に取り出されてきた。これらの物質は生命にとって有害なものもあれば無害なものもある。しかし、無害の物質も、それらが廃棄物として環境に捨てられたとき、それが分解しなければ、物質が拡散することによつて生じたエントロピーを廃棄する機構は地球には備っていない。

非線形力学系としての地球

流体の入った箱の底を高熱源に接触させ、上部を低熱源に接触させると、高熱源から流体を経由して低熱源へと熱が上向きに流れる。高熱源と低熱源の温度差を適当な値に保つと流体は対流し、流体中に渦のパターンが生じる。この場合、流体は高熱源と低熱源によつて非平衡の状態に保たれている。

もし、流体の箱と熱的に接触している二つの熱源を両方とも流体の箱から熱的に切り離すと、流体の箱は孤立系となり、系のエントロピーは増大し、渦のパターンも消失し、流体は熱平衡に達する。二つの熱源のうち片方のみを切り離した場合も系はも

う一方の熱源と熱平衡になり、やはり系に生じた渦のパターンは消失する。つまり、系の中に対流による渦のパターンを維持するためには、系にエネルギーの流れが存在することが不可欠である。エネルギーの流れが系内に生じるエントロピーをいわば洗い流すため、系は非平衡の状態を維持しているのである。

生命も非平衡な環境と相互作用することにより、自らの非平衡性をたもっているのである。その環境の非平衡性もその環境を取り巻くさらに広い環境の非平衡性によって維持されているのである。結局、太陽と宇宙空間の非平衡性により生命の非平衡性が保たれていることになる。非平衡性は負のエントロピーや熱力学的価値と同義語である。

生命個体やその環境としての生態系や地球全体は、上述の高熱源と低熱源に接した流体のモデルによって表わすこともできる。流体の箱に接している高熱源と低熱源の温度差が小さいときは、熱は流体中を熱伝導によつて流れる。温度差を大きくすると、流体は対流し、流体中に渦のパターンが生じる。さらに温度差を大きくすると、渦のパターンは不安定となり、流体はカオスとよばれる乱流状態へと移る。高熱源と低熱源の温度差を連続的に変えた場合、液体の様相が不連続に変化するのはこの系が非線形な系だからである。

生命や環境や地球も非平衡でかつ非線形の系である。大気や海水などの地球上の流体も熱せられたり冷やされたり、さらに地球の自転によるコリオリの力を受け、さまざまな流れのパターンを形成し、それが地球の気象を支配する。生態系においても、さまざまな種が補食関係や共生関係を保ちながら生息しているので、ある種の固体数が変動すると、他の種の固体数の変動を引き起こし、それが元の種の固体数の変動にフィードバックすることになる。粘性流体の運動を表す Navier-Stokes の方程式⁴⁾も、生態系の固体数の変動を表す Lotka-Volterra 方程式⁵⁾も、いずれも非線形の方程式である。

地球は全体としてみても部分的にみても非線形な系であるが、非線形方程式は分岐とカオスによつて特徴づけられる。非線形の系では、あるパラメータを連続的に変えたとき、それまで安定であったパターンが不安定になり、新しいパターンが現れるという分岐が起る。また、非線形方程式では、系の振舞が初期条件に強く依存し、僅かな初期条件の違いが時間とともに拡大され、系の振舞は全く予測つかなくなる。これがカオスである。

地球の気象や生態系が非線形であるため、分岐やカオスが部分的には地球のいたるところでみられる。海への過剰な栄養素の流出は赤潮を発生させ、農薬の使用は生態系に激変をもたらす。森林の伐採は地球の砂漠化を進行させる。さらにエルニーニョによる洪水や渇水などの異常気象も非線形の効果である。

地球のエントロピー増大の結果、あるいは人間が環境に手を加え、そのパラメーターをいじる結果、これまで安定であった相が不安定になり、地球の様相はカタストロフィー的に変化し、それまでとは全く違ったものとなるかもしれない。例えば、現在の化石燃料の使用によって、大気中の炭酸ガス濃度が増加をしているが、それは地球気候に予測できない分岐をもたらすかもしれないのである。地球環境が激変したとき、いまの地球環境に適合するように進化した人類は新しい地球環境のもとで生き延びることができるという保証はない。

参考文献

- 1) シュレーディンガー：「生命とは何か」岩波新書
- 2) ロジェ・カイヨワ：「反対称」思索社
- 3) 朝永振一郎：「量子力学Ⅰ」みすず書房
- 4) ベルジェ、ポモウ、ビダル「カオスの中の秩序」産業図書
- 5) 甘利俊一 他編「生命・生物科学の数理」岩波講座 応用数学第4巻

(1995年1月31日受理)