

初学者のための「エントロピー」

山 口 多 恵 子

ENTROPY FOR BEGINNERS

Taeko YAMAGUCHI

はじめに

さまざまな分野で「エントロピー」という言葉が氾濫している。環境問題で使われるエントロピーの考え方には、物理的思考に足場を固めた統一的、全体的にとらえる武器となるものがある。しかし、なかなかエントロピーの概念をとらえるのは難しい。初めてこの言葉に出会う学生に「エントロピー」の基本的な考え方を理解してもらうために、身近な例を挙げて、出来るだけ平易な言葉でまとめた講義用の試案を作成した。

1. エントロピーの基本的な考え方

エントロピーの法則とは、物理学において、自然界の変化・活動を支配している法則の一つである。他の物理学の法則が、すべて保存則であるのに対して、この法則は不可逆過程の法則であり、熱力学の「第2法則」と呼ばれている。

この法則は次のようにさまざまな言葉で表現される。

- ①熱は高温度の物体から、低温度の物体に移動するが、ひとりでの元に戻ることは絶対に起こらない。
- ②仕事が熱に変わる現象が、ひとりでのその熱で、初めの仕事を元に戻すことはあり得ない。
- ③熱源^①から得た熱を全部仕事に変える熱機関は存在しない。
- ④我々が日常見ている現象は不可逆変化である。
- ⑤独立している系^②のエントロピーは、不可逆変化によって常に増大する。

1865年、クラウジウス^③は「熱力学」に関する論文の中で、エントロピーという言葉

葉を初めて使ったと言われている。エントロピーというのは、ギリシャ語で「転化」とか「変化」という意味を持つ「トロフ(τροφ(η))」に、エネルギーという言葉に似せるために「エン」という接頭語をつけて作ったという逸話が残っている。エントロピーという言葉は、なかなか日常語に直すことの出来ない言葉である。これがエントロピーだという実体は、どこにも存在しない。

エントロピーは直接には知覚できないが、熱や物質の変化を観測した時、推論によって認められた、ある状態を表す量である。

まず、熱について考えてみよう。熱は基本的には、温度の高い方から低い方へしか流れない。この逆は決して起こらない。熱は、最終的には全体が一定の温度になるまで流れる。どこかに熱が集中して、温度の高い部分が出来るとい方向には流れない。このような熱の流れがあるとき、熱と同時に「エントロピーが流れた」といい、これを熱エントロピーと呼ぶ。そして、この熱の流れの方向を

「エントロピーの増大する方向である」という。この熱のエントロピーは次のように定義する。

熱量 Q が絶対温度 T の高温度物体から低温度物体（絶対温度 T' ）に伝わる時、
「高温度物体はエントロピーが (Q/T) だけ減り、
低温度物体はエントロピーが (Q/T') だけ増えた」という。

更に、 $T > T'$ だから $(Q/T) < (Q/T')$ といえる。

つまり、高温度物体が失うエントロピーより、低温度物体が得るエントロピーの方が大きいということを意味する。

このように、熱の移動があって初めて、熱エントロピーはその存在を確認することが出来る。また、熱が流れるためには「温度差」が必要である。「熱が流れる」ということは、熱が拡散するともいえる。拡散することが出来る状態のことを、「エントロピーが小さい状態、または低い状態」であるという。全体が平衡状態になってしまえば、もう拡散する事が出来ない。つまり、エントロピーが増大してしまったのである。この時、「エントロピーは大きくなった、あるいは高くなった」ということができる。このように、エントロピー増大の法則は、熱の移動という経験的な事実の他に、物質の拡散という現象の中にも見い出される。

例えば、塩水があるとす。濃い濃度の塩水を真水に注ぎ込むと、塩分は拡散して薄まる。熱の流れと同じように、濃度の高い(濃い)方からだんだんと低い(薄い)方へ拡散していく。このときも、濃い濃度の塩水は、まだ拡散できる状態にあるので、エントロピーが小さい(低い)ということが出来る。更に、塩水が薄まってしまい、もう拡散することができない状態になった時、前述した熱の移動の場合と同じく、エントロピーは大きくなっ

た、あるいは高くなったということが出来る。このように、エントロピーが増加するという事は、熱や物が拡散するという事とおなじである。そして、拡散した物は放置しておいても決して元に戻ることはない。

以上のような温度差、濃度差という量的変化を観測した時のエントロピーの他に、質的な変化を観測した時のエントロピーを考えてみよう。例えばガソリンでエンジンを動かすと熱を出すと同時に窒素酸化物などが、排気ガスや微細な粒子となって周辺にまき散らされる。これは、ガソリンがエンジンを動かすという仕事をした結果、ガソリンという物はなくなってしまったが、熱や他の物の形となってエントロピーを増大させたということができる。つまり、仕事をしてしまったガソリンは熱や物が拡散してしまった状態と同じく元に戻すことは出来ない。このガソリンのように、仕事をする前のエントロピーが小さく、仕事をしてしまった時は大きなエントロピーを出す物質を低エントロピーの物質という。物のエントロピーは、また、それぞれの成分についてその空間容積の大きい方が大きい。一般に固体、液体、気体の順に空間容積が増えるから、エントロピーもこの順に大きくなる。熱のエントロピーと、物のエントロピーは相互に変化する量でもある。例えば、次のような、日常生活の中の「鍋で水を加熱する」現象を考えてみよう。

- (1)まず、水は気化熱をもらって蒸発を始める。
- (2)火の温度は高いが、鍋の中の水の温度は100℃にしかない。
- (3)いくら熱を加えてもそれ以上には水の温度は高くない。
- (4)そのうち鍋の中の水はすっかりなくなってしまう。

この現象をエントロピーを用いて考えてみよう。鍋の中の温度は、いくら熱を加えても温度は変わらないから、熱のエントロピーは増加していない。しかし、水に着目すると、蒸気になるときに、その容積は大きく増加している。容積が増えるということは、物のエントロピーが増加したということである。つまり、熱のエントロピーが水の拡散を引き起こし、水蒸気はその容積を増やし続け、どんどん大気の中に拡散していくわけである。このことは、熱のエントロピーが、物のエントロピーに移ったと見てよい。熱力学的にみると、これは熱のエントロピーと物のエントロピーとの関係をはっきり示した例である。

次に、水蒸気が液体の水になる場合を考えてみよう。これは、前述の現象の逆であるから、一見してエントロピー増大則に反しているように見える。しかし、この時、凝結熱 L が、外界⁽⁴⁾に放出される。外界の温度を T とすれば、このことによる外界のエントロピーは (L/T) だけ増大したことになる。すなわち、水蒸気が凝結することによって、着目した系と外界とを含めた全部の系のエントロピーが増大したといえる。さまざまな変化に応じて、常に外界を含めた全部の系に目を向けると、エントロピーの増大則が成り立つことが理解される。

また、気体を圧縮すると、気体の体積は小さくなる。これは、気体のエントロピーが減少したことを意味している。そのかわり、この圧縮で発熱する。つまり、熱のエントロピーとして外に放出されたのである。物体を加熱すると、物体の温度が上がり、体積が増加する。つまり、熱のエントロピーが物のエントロピーに転化したのである。

2. 生命現象をエントロピーで捉えてみる

生物の成長や、生命の維持という現象は、食物を摂取・吸収してその体の各部分が要求する物質を作り出して、それぞれの細胞へ渡していくことである。つまり、広い範囲に散在していた物質が、特定の狭い位置に集まってくることであり、「物質は拡散する」というエントロピーの増大則に反するように見える。しかし、生命体を閉じた系⁽⁵⁾ではなく、外界と熱や物質をやりとりする開放系⁽⁶⁾と見ればやはり、エントロピーの増大則は成り立つのである。すなわち、生命系は外界からエントロピーの低い状態の物質を摂取して、熱、またはエントロピーの高い状態の物質にかえて、外界に捨てているのである。このことを生体内から見よう。

生命体では、水と炭水化物がそれぞれ低エントロピー源として機能している。水は、生命活動の過程で生じた老廃物や余分の熱を、エントロピーの高い水蒸気に変えて、体外に排出する。また、炭水化物は酸素と発熱反応して、二酸化炭素を生成する。二酸化炭素はエントロピーの高い物質であり、反応するとき発する熱と共に体外に排出される。水が水蒸気へ変化するのは、物理的な状態変化で、周囲から吸熱するが、炭水化物が二酸化炭素へ変化するのは、発熱を伴う化学変化であって、周囲に熱を与える。つまり、体内の酸化発熱反応が水の蒸発を促し、水の気化が更に体内の酸化反応を促すということである。いずれの場合もそれぞれに高エントロピー物質を体外に排出し、しかも互いに、他を補う形で働き合い、生体内の生命現象が微妙なバランスを維持しながら進行するのを支えている。生命活動は毎日、毎日連綿と、その最後の日を迎えるまで、変わりなく続く。生命を含む系ではいつも同じ状態が維持されていて、エントロピー増大則に反するように見える。しかしよく見ると、上で述べているように、生物は外からエントロピーの小さい状態の物質を取り入れて、熱、またはエントロピーの高い状態の物質を捨てている。生命を含む系を全体として見るならば、やはりエントロピーは増加している。その増加したエントロピーを体外に捨てることで、定常状態を保つことが出来るのである。人間の場合、そのエントロピーというのは、尿尿などの排泄物や汗、あるいは二酸化炭素などになって体外に捨てられる。すべての動物も、余分なエントロピーを体外に排出する。このうち、物のエントロピーは微生物の餌食となる。微生物は、有機物としての物のエントロピーを分解して無機化し、空気と土に還元するが、そのとき、微生物は、発熱してそのエントロピー

を熱のエントロピーに変えている。この熱のエントロピーも水に吸収され、水は水蒸気となって上昇する。上昇すると、上空で冷やされ、再び水になる。

3. 環境としての地球・水循環

以上、述べたように生命系は、その外界と熱や物質をやりとりする開放系である。外界を含めて閉じた系を考えれば、エントロピーは増大している。このように、生命系に低エントロピー物質を供給し、生命系からの廃物を受け取る外界、それが「環境」である。生命系の特徴は、このエントロピー廃棄機構を備えていることにある。生物・生命はこのようなエントロピー廃棄の機構を備えているからこそ、維持されているのである。環境があるから、エントロピーの増大則の制約の下でも、生命系のエントロピーが減少できる。つまり、生命系の生存・存続が可能なのである。環境は単なる外界ではない。環境自身が低エントロピー状態を保ち続けることが必要である。生命を含む地球は、宇宙に向かって開かれており、定常開放系と呼ばれている。

これまで述べたように、地球は生命にとって、環境として機能している。その地球のエントロピー廃棄の機構を支えているのは、太陽と水循環である。水は、地表で吸熱して水蒸気となり、上空で宇宙空間に放熱して（エントロピーを捨てて）水に戻り、地表に戻ってくる。この水循環が地球に備わった独特のエントロピー廃棄機構である。その水循環の機構を少し詳しく見てみよう。エントロピー的に見たとき、水は次のような特性をもち、独自の機能を果たしている。

- ①気化熱が大きいので、エントロピー廃棄の効率を上げている。
- ②気化と液化を繰り返すことによって、地表の温度の激変を防いでいる。
- ③地表面で低温熱源として機能する。……液体の水は加熱されると、その一部が気化することによって、温度を一定に保つ。低温熱源としての水は気化によって自らを低温に保つ。降雨等の水循環は、地表における低温熱源の再生機構であり、低エントロピーの環境の再生過程である。
- ④生体の環境としても低温熱源として機能している。……生命系から熱を受け取ったとき水は一部が気化するが、温度は上がらない。即ち、水は温度一定のまま生体から熱を吸収することが出来る。生命系は環境として水を持つことによって、温度を上げずにエントロピーを捨てることが出来るのである。
- ⑤液体が固体(水)よりも密度が大きいので、地表の大量の水が液体で存在することを可能にしている。

この他にも水は、特異な電氣的性質や分子構造をもち、他の物質との化合等に特性を発揮するが、そのような水の性質についてはここでは省略する。

環境は生命系に低エントロピー物質を与え、生命系からエントロピー廃物を受け取る。もし、それだけだったら、環境のエントロピーは増大して、生命系に低エントロピー物質を供給できなくなり、環境としての機能を失う。したがって、環境が機能し続けるためには、自らエントロピー廃棄の機構を持たなければならない。それが宇宙である。地球にとっての環境は、最終的には宇宙空間である。

地球上に生命が生まれて生き続けてきているのは、地球が太陽からちょうど良い距離の所であって、地球自身、ほどよい大きさや質量を持っており、そのうえ大気という衣をまとって、生命体にとってほど良い温度を保っているという「地球の天文学的・地球物理学的特性」と、液体の形でこの地球表面上にあふれている「水の特異な性質」との奇跡的な結びつきのおかげであると考えられる。この地球のような星は、今のところ、他には見あたらない。

4. おわりに

現在、熱力学の分野での「エントロピー」は統計的な扱いが主流であり、数学的な処理が随所に見られ、いわゆる理科嫌いの学生には敬遠されがちである。

地球環境について考えてみようとするその入り口の所で、身近な現象を見る目線で「エントロピー」という概念を捉え、これを足場として「かけがえのない地球」を守るための一歩を進めて欲しい。

<註>

- (1)<熱源>……無限大の熱容量を持つことによって温度を一定に保つ。
- (2)<系>……考察の対象とする部分（考慮する対象のある一部分のこと）
- (3)<クラウジウス>……ドイツの理論物理学者(1822～1888)
- (4)<外界>……系の外の部分（その世界の残りの部分）
- (5)<閉じた系>…外界と熱、仕事は交換できるが、質量は交換できない。
閉鎖系ともいう。
- (6)<開放系>…外界と質量、熱、仕事を交換できる。開いた系ともいう。

<参考文献>

- (1)勝木渥、環境の理論 1995
- (2)槌田敦、藤田祐幸、エントロピー 1985

(1997年6月16日受理)