

## 話題 75 地球の循環とは何か

大串和紀

### 要旨

地球は137億年前に熱い火の塊として誕生した。地球が徐々に冷えてくるのに合わせて、地球の環境をより安定した平衡状態に保てるよう、大気ができ、海ができ、38億年前に生命が誕生した。地球の歴史は「分化」の歴史である。

一方、地球上で生じる自然現象や、太陽からのエネルギーを受け取って営まれる全ての営みもエントロピーの法則から逃れられることはなく、地球上のエントロピーを増大させている。しかし、現在、地球が未だエントロピーの蓄積により壊滅的な影響を受けていないのは、地球の「分化」により生じた「循環」の仕組みによりエントロピーを地球の圏外に放出できるからで、具体的には、生命の営みを通じて物質を循環させ、物エントロピーを熱エントロピーに変換し、大気の循環や水循環と相まってこれを宇宙空間に放出しているからである。

人間が持続的に地球上で存続していくためには、地球の生命と物質の循環を基本としたシステムの中に、その行動の範囲を納めなければならない。具体的には、大気圏、地圏、水圏、生物圏のそれぞれの存在と相互関係を崩さないよう行動することが必要である。

### 目次

1. はじめに
2. 地球の成り立ちと地球のシステム
3. 地球の循環とは
4. 主な循環の例
5. 地球環境問題の発生
6. 人類社会を持続的なものとするために
7. おわりに

### キーワード

分化、進化、地球システム、地球の駆動力（太陽エネルギーと地球内部の熱）、平衡状態、エントロピー、生物多様性、水循環、大気の循環、生命の循環、大気圏、地圏、水圏、生物圏、人間圏、循環システム、

## 1. はじめに

Seneca21St の管理者中道宏は、話題 3 でホーキング博士の次のような質疑を引用している。

宇宙学者ホーキング博士の東京講演における質疑：石原慎太郎『たとえ、地球が明日滅びるとも』（産経新聞 日本よ 2007.6.4）

質問 この宇宙全体に地球のような文明を持った星が幾つほどあるのだろうか。

回答 200 万ほど。

質問 ならば、なぜ我々は実際にそうした星からの来訪者としての宇宙人や宇宙船を見ることがないのか。

回答 **地球のような高度の文明を造り出した星は、そのせいで循環が狂ってしまい極めて不安定な状況をきたし、宇宙全体の時間からすればほとんど瞬間の速度で自滅するからだ。**

質問 瞬間に近い時間とは、地球時間にしてどれほどのものか。

回答 まあ、100 年ほどか

ホーキング博士の指摘する“地球の循環の狂い”とはどういうことなのだろうか、地球の歴史とエントロピーの観点から「地球の循環」について考えてみた。

## 2. 地球の成り立ちと地球のシステム

地球は 46 億年前に誕生したといわれている。最初は熱い火の塊で、それがだんだん冷えて大気ができ、海ができ、38 億年前に生命が誕生した。その後生命は分化と進化を続け、現在に至っている。

このような地球の歴史について、地球惑星物理学者の松井孝典氏は「我関わる、ゆえに我あり…地球システム論と文明…」(集英社新書 2012 年 2 月)<sup>1)</sup>の中で、次のように述べている。

### 〈地球はシステムである〉

- ・システムは性質の異なる複数の要素から構成され、その構成要素は結合した全体がシステムである。
- ・システムの特徴は、構成要素が互いに関係性を持って相互作用を及ぼしていることで、関係性は「駆動力」、すなわちエネルギーによって、物質やエネルギーが流れることで生まれる。
- ・地球システムの構成要素は、プラズマ圏、大気圏、海、海洋地殻、大陸地殻、上部マントル、下部マントル、外核、内核、それに地球の表層に存在している生物圏。
- ・地球の駆動力は、太陽からの放射エネルギーと、地球内部にある熱。
- ・この二つの駆動力によって、物質圏の間で物質やエネルギーの出入りが起こり、それを通じて物質圏同士の関係性が生まれる。

### 〈地球の歴史は「分化」の歴史である〉

- ・地球の歴史は、一言でいえば、「分化」の歴史。「分化」とは、均質な状態から異質なものがそれぞれに分かれていくこと。
- ・地球は生まれたとき、どろどろに溶けた状態。冷却に伴って、溶けて均質に入り混じっていた状態が変化し、「分化」が始まった。
- ・地球が長い年月をかけて徐々に冷えてくるにしたがい、地殻、マントル、核という内部構造が形成されていき、地球の表面で大気が生まれ、生物が誕生し、大気の成分に酸素が増え、という分化の道をたどってきた。
- ・地球上に生物が誕生したのもこの分化の産物で、分化の結果生じたいろいろな“もの＝物質圏”は、それぞれがお互いに影響を与えあいながら、それが新たな分化を生み出してきた。
- ・そして、「地球を構成する要素間で複雑な相互作用が働き、その相互作用によって動的な平衡状態が保たれている」。

なお、「分化」ということに関し、遺伝子・分子生物学者で「生命誌」という概念を提唱している生命誌研究館館長の中村桂子氏は、**現在地球上に生息しているすべての生き物は、元をたどれば 38 億年前に誕生した一つの先祖細胞から分化・進化したもので、ヒトもそれらの生きものの中の一つに過ぎない**という。<sup>2)</sup>

地球が徐々に冷えてくるのに合わせて、地球の環境をより安定した平衡状態に保てるよう、生き物も、また長い年月をかけて分化・進化してきたといえるだろう。

### 3. 地球の循環とは

物理学者の槌田敦氏は、「エントロピーとエコロジー…「生命」と「生き方」を問う科学…」（ダイヤモンド社 1986年）<sup>3)</sup>の中で、以下のように述べている。

#### 〈エントロピーとは〉

- ・エントロピーとは、分かりやすく言えば、「汚れ」、「汚れの量」。
- ・「エントロピー増大の法則」とは、「汚れ増大の法則」。
- ・この世界の現象はすべて、物の拡散、熱の拡散、発熱現象の組み合わせで、それぞれの現象において、エントロピー（汚れ＝利用価値のないもの）が増大する。
- ・エントロピーには熱の形をとるもの（熱エントロピー）と物の形をとるもの（物エントロピー）があり、エントロピーは増大する。

#### 〈地球上のエントロピー〉

- ・地球上で生じる自然現象や、太陽からのエネルギーを受け取って営まれる生命の営みも、この法則から逃れられることはなく、これらの現象や活動を通じて地球上のエントロピーを増大させている。つまり、地球上に多くの汚れが“熱”や“物”の形で放出されている。
- ・しかし、現在、地球が未だエントロピーの蓄積により壊滅的な影響を受けていないのは、地球にエントロピーを地球の圏外に放出する仕組みが存在するから。
- ・エントロピーを捨てる方法は、二通りしかない。物にエントロピーをくっつけて捨てるか、熱にくっつけて捨てるか。
- ・空気は、熱すると膨張し軽くなるという性質がある。その結果、空気の対流、つまり大気循環が発生する。空気は地表から熱を奪って、上昇し、上空で宇宙へ向けて放熱し、今度は冷たくなって重くなるから地表へ逆戻りする。そしてまた地表の熱を奪い上昇する。このようなメカニズムを通じて地球上に生じた熱エントロピーは最終的に地球から宇宙へ捨てられている。
- ・一方、地球には重力があるから、廃物（物エントロピー）を地球の外へ放り出すことができない。このため物のエントロピー（「汚れ」）は溜まりつづけることになる
- ・ここで登場するのが、生命の営みによる循環である。
- ・植物は太陽エネルギーと土からの養分（無機物）により有機物を生産し、成長する（当然、その過程で光合成を行い、熱を対外へ排出する）。動物は植物を餌として摂取し、自らの体を成長させるとともに、体外へ熱を放出する。動物の排泄物、植物や動物の死骸は、微生物により分解され、最終的には土の中に養分として戻るが、分解の過程で熱が発生し、これが大気の中に放出される。つまり、人工的なものが加わらない状態では、生き物に係わるすべての廃棄物は最終的に熱に変換され、その熱は大気の循環を利用して宇宙空間に捨てられることによって地球環境が保たれている。

### 〈地球環境を保つために不可欠な生命と物質の循環〉

- ・地球上に生命の存在が保証されるのは、地球上に水循環と生物循環があるから。
- ・生物循環は地球上のいろいろな活動で発生する余分な物エントロピーを分解し、熱エントロピーに転換する。
- ・この熱エントロピーは水循環が引き受け、地球上のいろいろな活動で発生する余分の熱エントロピーを宇宙へ捨てている。
- ・主としてこの二つの循環の存在が、地球上の豊かな活動を持続させている。

### 〈循環に必要な生物多様性〉

- ・生物は、単独の種類だけでは生存できない。生物は必ず資源（他の生き物やその廃物等）を取り入れ、廃物と廃熱を捨てることによって生存しているが、単独の種類だけでは、資源が枯渇するか、もしくは廃物または廃熱の汚染を招き、滅びてしまう
- ・この場合、生物循環ということが大切。A という生物の廃物は、B という生物の資源であって、その B の廃物が C の資源となるように循環することによって、A、B、C..... という生物種は共生できる。
- ・ところで、この生物循環も活動、変化だから、もちろんエントロピーを発生する。そのエントロピーは、廃熱または廃物(水蒸気)の形で地表に捨てられる。

このように、地球上での様々な活動から生じるエントロピーを地球外（宇宙）へ放出するために、種々の形をとるエントロピーを最終的に熱に変え、更に宇宙に近いところまで運ぶ仕組みとして生まれたのが「循環」という仕組みであるという。

この「循環」を主として担うのが生き物で、生き物はその誕生から死までの活動の中で、様々な「物質」を体内に取り組み、また、他の生物に提供している。そして多様な生物の相互に関わりを持った作用により「物質」が循環し、エントロピーを熱の形に変え、大気や水の循環とも相まって地球上のエントロピーを地球外へ放出し、地球の営みを安定化させる仕組みを構築している。

地球は冷却と分化の過程で、物質圏の間で物質やエネルギーの出入をうまく行わせ、エントロピーを増大させない仕組みを作り上げてきたのだといえよう。

元々一つの起源から発生した生命が 38 億年の時間をかけ現在の生物多様性を生み出した理由も、この原理を理解することで納得できるだろう。

## 4. 主な循環の例

### 〈水循環〉

- 地球上の氷が解け水になり、水は蒸発して水蒸気になる。水蒸気は大気中で冷やされ、水（雨）や氷（雪）となって地表へ降り注ぐ。
- この過程で、水に溶け込んだいろいろな物質を水と共に循環させている。
- 水は、生きものを養う。
- また、水循環を通じて地表の熱エントロピーを大気圏外（宇宙）へ運び、放熱する。

### 〈大気の循環〉

- 太陽光によって温まった空気は膨張し、軽くなり、上昇する。
- 一方、上空の空気は大気圏外（宇宙）へ熱を放出し冷たくなって地表へ向かって下降する。
- 地球上では緯度により太陽から受け取る熱量が異なり、これが大気の循環にも影響を与える。
- さらに、地球自体が回転していることにより、大気の流れに力を及ぼす。
- この結果、大気に大きな流れ＝循環を生じさせる。
- 大気の循環は水循環にも影響を及ぼし、地球上の環境にも大きな影響を与え、気候の変化、気象の変化は大気の循環によりもたらされる。
- 気候の変化は様々な生物を産み出し、生命や物質の循環にも影響を与える

### 〈生命の循環〉

- 太陽の光と地球上の栄養分（物質）によって生命が育まれる。
- 植物が育ち、それを食料として動物が育つ。動物の糞や死骸は微生物が分解して、物質にまで分解する。そして、その分解された物質が再び植物の栄養分として利用されるという大きな循環を形成している。
- また、食物連鎖によるエントロピーの受け渡しを通じて、エントロピーを宇宙へ放出するシステムにも関与している。
- 生物の循環は、光合成による二酸化炭素の吸収と酸素の放出を通じて、大気の組成安定にも役立つ。
- この循環には、異なる環境に対応してすべての生命体が関わっており、そのために生物多様性が形成された。

## 5. 地球環境問題の発生

### 〈人間圏の誕生とその影響〉

松井孝典氏<sup>1)</sup>によれば、

- ・ 人類は約 700 万年前、狩猟採取（食物連鎖）を基本とする生物圏の一員として誕生したが、約 1 万年前、農耕牧畜を発明することで、太陽からの放射エネルギーと地球内部にある熱が駆動力である地球システムの物質・エネルギーの流れに直接関わって生きるようになり、生物圏の中に新たに人間圏というものを生じさせた。
- ・ さらに、産業革命以後、人類が化石燃料を使用することで、地球システムの駆動力を超えて、自らエネルギーを自由にコントロールできるようになった（人類が駆動力を手に入れた）ことから、人間圏が大きく広がり始め地球規模の文明を築くようになった。
- ・ そして人間圏が生物圏から独立した存在と認識できるように、その活動が及ぼす影響が大きくなり、その結果、これまでに地球が長い年月をかけて形造ってきたバランスを崩してしまうようになり、その一つが資源・エネルギー問題、もう一つが地球環境問題として表れている。

### 〈現在の地球環境問題（エントロピーの観点から）〉

これをエントロピーの観点からみてみよう。

- ・ 地球人口の増加とそれに伴う人間の活動により地球のエントロピー（「汚れ」）が増大し、もはや自然の循環機能だけではそのエントロピーを地球外に排出することが不可能になった。
- ・ 産業革命以降の工業化の進展は、様々な地下資源を掘り起こし人間の活動に役立つ様々な製品を生み出したが、一方で、自然界の微生物等が処理できない様々な廃棄物を人工的に作り出し増加させた。
- ・ また、石油文明は地下に眠っていた炭素を CO<sub>2</sub> という形で大気中にばら撒き、エントロピーを増大させた。（既存の循環システムでは処理できない量）
- ・ 微生物等の生態サイクルが処理できる廃棄物の量であれば、地球のエントロピーを一定に保つことができる。しかし、処理できない廃棄物や、処理できてもその能力を超える廃棄物の量であれば、地球にエントロピーが蓄積され、地球は汚れによって汚染されることになる。

地球誕生以来、地球の環境は大きく変化している。現在の「汚れ」も、長い年月を経れば、あるいは地球自身の力によって浄化することが可能になるかもしれない。しかし、そのためにはそれを担う生物の進化等に莫大な時間が必要となろう。



地球環境問題を引き起こした産業革命から今日までの時間は、地球の歴史から見れば一瞬のことであり、地球自体に（短期間で）エントロピーを軽減する仕組み作りを求めることは期待できない。

#### 〈地球環境問題の態様〉

地球環境問題の態様は話題 1 に示してある通りだが、もはや地球自体の安定が保てなくなっている。このままの状態が続けば、大気圏、地圏、水圏、生物圏は大きなダメージを受けることになるだろう。そして最も大きなダメージを受けるものが人類を含む生物圏であることは論を待たない。

## 6. 人類社会を持続的なものとするために

### 〈人間が、種として存続していくために〉

人間が持続的に地球上で存続していくためには、地球の生命と物質の循環を基本としたシステムの中に、その行動の範囲を納めなければならない。

具体的には、大気圏、地圏、水圏、生物圏のそれぞれの存在と相互関係を崩さないように行動する。

例えば、地圏に存在する化石エネルギー等には頼らない、生物多様性を保全する、生命の物質の循環の場である開土面、開水面を減少させない等である。

また、これまでに地球上に存在しなかった物質を、人間が新たに地球環境に放出しないことも重要である。

### 〈農業のあり方とエントロピー〉

一つは、できるだけエントロピーを発生させない農法を採用すること。

二つ目は、この地球上で発生し増加したエントロピーを小さくするために、生命の循環サイクルの輪を大きくすること。

#### ・余分なエントロピーを発生させない農業

経済優先の世の中では非常に対応が困難なことであるが、農業機械に使用する燃料を減らす、化学肥料や農薬の使用量を減らすことなどが、具体的な対応となろう。

常にそのようなことを意識して農業を営むということが大切。

#### ・生命の循環サイクルの輪を太くすること

土壌の持つ栄養分と太陽エネルギーを十二分に活用して生産量を増加させる。また、収穫残さや家畜の糞尿等の有機物はできるだけ農地に還元することが大切。

当然、不必要な農薬の使用等は避けるとともに、生物多様性の確保の観点から、農村地域で多くの生き物が生息できるよう配慮することが求められる。

以上のような認識のもと、人間の英知を集めて、人類の行動規範＝社会活動のルールをつくっていかなければならない。

## 7. おわりに

本稿では、地球の環境と平衡状態を保つために、いかに地球が持つ循環の仕組みを保全していくことが大切かを、エントロピーの概念を用いてまとめてみた。

Seneca21St の主題は「物質と生命の循環」である。

これは、とりもなおさず、地球上に住む我々人類の永続性を願ってのことである。

地球は誕生以来、長い年月をかけて、自らの平衡状態を保つために「物質と生命の循環」の仕組みを構築してきた。地球の一構成員に過ぎない人間が、この地球の仕組みを壊してしまうことは、即、人類の滅亡につながるであろう。

ホーキング博士もこれを恐れていたに違いない。

本稿を執筆中の 2015 年 12 月 12 日、パリで開かれていた第 21 回国連気候変動枠組み条約締約国会議（COP21）で 2020 年以降の地球温暖化防止の新たな枠組みとなる「パリ協定」が採択された。

その主な内容は、次の通りである。

- ①世界 196 カ国・地域、すべての国が 2020 年以降の温室効果ガスの削減目標を申告し、目標値を 5 年ごとに（削減量を増やす方向で）見直す
- ②今世紀後半に温室効果ガス的人為的排出と吸収の均衡（実質排出ゼロ）を達成し、森林・土壌・海洋が自然に吸収できる量にまで、排出量を 2050～2100 年の間に減らしていく
- ③地球の気温上昇を 2℃より「かなり低く」抑え、地球の気温上昇を産業革命前比で 1.5℃未満に抑えるための取り組みを推進する。（現在は同 0.9～1℃）
- ④途上国の地球温暖化対策に対して先進国が 2020 年まで年間 1000 億ドルを支援し、それ以降も資金支援を約束する

これは、先進国も途上国も含めたすべての国・地域が削減努力をすることをうたった歴史的な合意で、オバマ米大統領も、協定は「完璧ではない」ものの「意欲的」で「歴史的」と評価し、「自分たちにはこの惑星しかない。それを救うための絶好の機会だった」と意義を強調したそうである。<sup>4)</sup>

人類は、初めて、自らの置かれている危機的な状況を理解し、個々の利害得失を乗り越えて共同して対処する必要性を認識できたようだ。

ホーキング博士の予言を的中させるようなことがあってはならない。

(引用文献)

- 1) : 松井孝典 「我関わる、ゆえに我あり…地球システム論と文明…」(集英社新書 2012年2月)
- 2) : 中村桂子 「生命を基本に置く社会—農のもつ力への期待—」(農業農村工学会誌 第77巻10号 2009年)
- 3) : 槌田敦 「エントロピーとエコロジー…「生命」と「生き方」を問う科学…」(ダイヤモンド社 1986年)
- 4) : NEWS JAPAN 「COP21、パリ協定を採択 温暖化対策で世界合意」  
(<http://www.bbc.com/japanese/35086174> 2016.1.12 参照)

(平成28年1月12日)