


 解説

環境物理学と熱物理

加納 誠

(受取日：2007年2月13日，受理日：2007年3月12日)

Introduction to Environmental Physics and Thermo-Physics

Makoto Kano

(Received February 13, 2007; Accepted March 12, 2007)

On the environmental problem, the challenge from the viewpoint of environmental physics is outlined. For the beginning, it is described the approach which explains on the concept of environmental physics and the historical process for finding the solution of environmental problems from the global environment. In the current, in order to understand the environment from the physics, the thermo-physical viewpoint is finally outlined, and it is explained that the approach from the thermo-physics is indispensable.

1. 始めに

約46億年前に誕生した地球に人類が登場したのは、地球の年齢からするとごく最近の出来事である。其の人類による“輝かしい”技術知の発展の歴史は、我々に限りない利便性と希望を与え続けるものと考えられていたが、今日、我々及び後の世代は資源の枯渇、環境破壊を初めとする人類の存亡に関わる問題とも対面しなければならない。

持続的発展が可能な社会に移行するための方策の一つとして、公平な資源の分配、更に未来世代との分配にも公平さが必要となる。スウェーデンのNPO ナチュラル・ステップでは、持続可能な社会における「四つのシステム条件」と称する原則をまとめた。

- ① 地殻から掘り出した物質の濃度を生物圏の中で増やし続けない。
- ② 人工的に製造した物質の濃度を生物圏の中で増やし続けない。
- ③ 生物圏の循環と多様性を守る。
- ④ 効率的な資源利用と公平な資源配分を行う。

再生可能資源とは地球上で循環可能な資源を指す。風力や小規模水力など生態系の物質循環を崩さずに得られるエネルギー

ギーや、植物や微生物が生産する物質等はこれにあたる。清浄な大気や水も再生可能資源である。近代において、これらの資源の使い方には配慮がされなかった。これらの資源を使う際、生態系の回復能力以内で使っていれば何ら問題は生じない。

枯渇する化石燃料依存から、再生可能な資源を使って営まれる社会をイメージすることはなかなか難しい。これらの問題に対する科学者の基本的アプローチとして、環境、特に生態系で起こる多数の出来事（一種の複雑系）に対する、近代科学の手法である機械論的要素還元主義からの脱却と環境物理学的視点の必要性が考えられている。

2. 近代科学と機械論的自然観

すでに17世紀近代科学の出発点において、ボイルは、物体のあらゆる特性と傾向はそれを構成する微小粒子の純粹に機械論的な運動と配列によって説明されると説いている。ここで問題となるのは、このような考え方が（古代ギリシャにおけるように）自然の説明原理としてだけ働いているうちは有効でありうるが、技術として、とりわけ生物学的な応用に利用されるときには、機械論特有の狭さによって破綻するということである。

それは容易に、生命体をも個々の分子や原子の要素にバラバラに分解して操作すればよい、という考えに移行する。これは時計仕掛の機械論そのものである。確かに、いくつかの原子や分子（という文字）の機械的な結合から成り立っている遺伝子（という文）が、対応するタンパク質を機械的に作るという機能（情報）をもつことは事実である。しかし実はそれだけでは生命活動の本質を、したがってまた環境問題の本質を理解することは不可能と考える。

3. 環境物理学への前提

これをもう少し詳しく知るには、「エネルギーの保存則」と共に、もう一つの自然の根本原理である「エントロピーの増大則」を用いる必要がある。これは直感的には、例えば「覆水盆に返らず」ということわざで表されるような、日ごろ私たちが絶えず実感する不可逆的な過程を貫く法則である。物理学の言葉を用いて表現すれば、自然界の中の現実のあらゆる閉じた（外界との相互作用のないままに放置された）マクロな系は、その系のもつエントロピーという量が絶えず増大する方向に自然に変化し、減少する方向への変化は自然には決して起こらないということになる。

生物体の場合は、放っておけば生物体の死を意味するエントロピー最大の状態に絶えず近づいてゆくということになる。この傾向をくい止めるためには、周囲にエントロピーを絶えず棄ててゆかねばならず、シュレーディンガーが「環境から秩序を吸い取る」と言ったのはこのことである。

ここで普通よく言われる物質代謝の観点だけで考えれば、要素還元主義的な機械論でこと足り、本質を見落とすことになる点に特に注意する必要がある。エントロピー増大則により、完全に閉じた系自体がすでに死を意味しており、生物が生きていくためには体内で絶えず発生するエントロピーを廃棄できる物理的な空間（環境）を必然的な背景として持つ必要がある。ただし、エントロピーとはエネルギーや物質の属性としてしか存在しないものであって、エントロピーだけを取り出すということではできない。そこで生物は、環境との間で物質やエネルギーの交換をしながら、それに伴って自己の内部で発生するエントロピーを絶えず環境に廃棄しているのである。従って環境とはまず第一義的にはエントロピーを廃棄できる機構をもった物質的空間であり、生物はこの環境によって文字通り「生かされている」存在となる。たとえ生物が「有用な」物質に囲まれていたとしても、その生物の発生するエントロピーを廃棄することができなければ、その「環境」は生物を殺すことになるのである。

では現実の私たちの地球上の生命体にとって一番外側の開いた環境とは何であろうか。それは地球大気であって、それは低エントロピーの太陽光エネルギー（高温）を吸収すると同時に、高エントロピーの輻射熱（低温）を宇宙に放射して

いる。そのため地球上（大気層も含めて）で発生したエントロピーを宇宙空間に絶えず棄てることができ（エネルギー収支はトータルでゼロである）、こうして地球はエネルギー的に開いた系になっている。さらに地球は物質的には基本的に閉じた系であるから、地球上のあらゆる物質（むしろ汚染物質も含めて）を作っている原子や分子は地球上で循環する以外ない。そこで生命にとっての地球環境は、各レベルで各種の物質が循環しながらそれぞれにエントロピーを廃棄できるような極めて多様で重層的な機構をもつことになる。個々の具体例、例えば大気や水の循環、生体内で生じている各種の生化学反応のサイクル、食物連鎖などの生態系、さらには人間の生産活動における物質やエネルギーの循環といったものに対するエントロピー的考察がなされようとしている。

いずれにしても生命活動や生産活動は、そのエントロピー廃棄機構としての環境を伴って初めて、安定に維持されるものであって、形式的な要素還元論では、この本質を十分にとらえることはできない。こうして生命活動も生産活動も、その環境との深い関わりを通じて最終的には地球全体と関わりをもつことになる。¹⁻⁶⁾

4. 環境物理学の方法論

環境物理学の方法論とは、要素還元主義的な方法論から脱却し、「地球環境」という「散逸系」「複雑系」を取り扱うために熱学的考察（エネルギー・エクセルギー・エントロピー等）に基礎をおく新しい方法論といっても良い。日本物理学会において「環境物理」の分野が設立⁷⁾される際の趣意書⁸⁾によると「環境問題への取り組み・物理学の役割として」次の2項目が掲げられている。

- ① 測定技術（定量化）・諸現象の解明
 - ② 様々な分野が連携の上で「共通言語」の提供
- ①は「問題の定量化」ということ、②は「共通言語」という表現をしているが「問題解決を探るための方法論」と言えるであろう。⁹⁾

5. 環境物理分野のキーワード

日本物理学会のホームページに記載されている様に環境物理分野のキーワードは次の七つに分類されている。⁹⁾

- ① 総論（方法論・熱学的考察・その他）
- ② 地球システム・物質循環・生命系
- ③ エネルギー・資源・エコマテリアル
- ④ 廃棄物・環境汚染・放射線・電磁波
- ⑤ 環境技術・環境政策・環境評価
- ⑥ 環境教育・環境史
- ⑦ その他

6. 環境物理学に関する二つの典型的な見方

同学会の環境グループによって「環境物理学に関する二つの見方」が次のように分類されている。

見解1

“Physics for Environment” 「応用物理学的な側面」

環境を対象とする取り組みは、それぞれ確固たる体系として確立している既成の学問が、それぞれの確固とした立脚点から、相互協力的に総合的になされるべきであって、それから離れた独自の環境への取り組みは、断片的・対症療法的なものにならざるをえず、得られた結論に関しても、取り組み主体の学問的力の蓄積・成長という面からも、結局は不毛のものとなるから、特に大学学部段階では個別科学の体系をきちんと学ぶことが必要であり、その蓄積の上に大学院段階で自分の立脚する学問の立場から環境問題に取り組むのが effective でもあり、有意義である。

見解2

“Physics of Environment” 「基礎物理学的な側面」

環境学はある基本概念を基軸として組み上げられる独自の科学的学問体系でありうる。そして、それは縦割りに分化している現在の自然諸科学を横断的に貫くという意味では総合科学的である。

原田によると物理学と環境問題との関連は、見解1 (Physics for Environment) 「応用物理学的側面」であるが、この立場だけでは環境問題の「複雑性」を捉えきれないと指摘する。¹⁰⁾ なぜなら、見解2 (Physics of Environment) 「基礎物理学的側面」の中心は熱力学であり、熱力学は物理学の全ての分野を横断的につなぐという性格を持っているだけでなく、他の領域、特に経済学との関連をつけるキーワード「エネルギー」及び「エントロピー」という概念もあるからである。また、プリゴジンを中心とするBrussels学派は、熱力学を平衡系から非平衡系へ拡張し、散逸構造という新たな秩序概念を開拓した。¹¹⁾

環境物理学においては、植田敦によって「開放系の熱学」にもとづく「開放定常系」モデル¹²⁾や、白鳥紀一と中山正敏によって「開かれた能動定常系」¹³⁾モデルという地球の動的



Fig.1 Three types of the thermodynamic system.

な熱機構に着目した「地球系 (アースシステム)」が1980年代から提唱されている。⁶⁾ Fig.1 に三つのタイプの熱力学モデルについて示す。¹⁴⁾

7. 大気・水循環と生態系を巡る物質循環

生態系を巡る物質循環では、関係する物質が循環利用されるために、環境中に汚染を蓄積することがない。生態系の中で例えば、植物あるいは動物の一方がなければ循環は成り立たない。この生態系は植物と動物の絶妙のバランスの上に成立している (Fig.2)。

環境問題とは、人為的な原因、現状では主に工業生産を中心とした人間社会の仕組みに起因して、大気・水循環等が阻害され、生態系を含む物質循環が滞り、あるいは工業起源の物質によって環境が汚染され、その結果として人間の生存環境が悪化することとも言える。

8. 工業生産による環境への汚染の蓄積

工業製品は長期的に見れば、殆どが廃物として環境に捨て

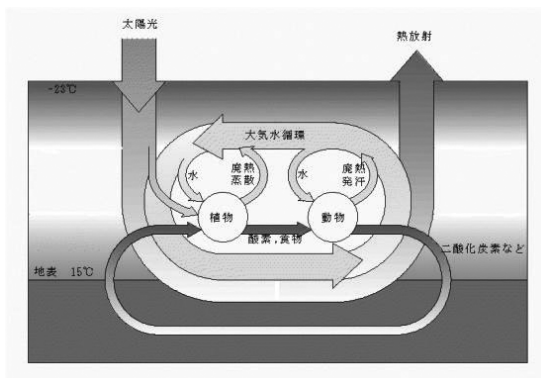


Fig.2 Materials circulation of the earth.¹⁵⁾

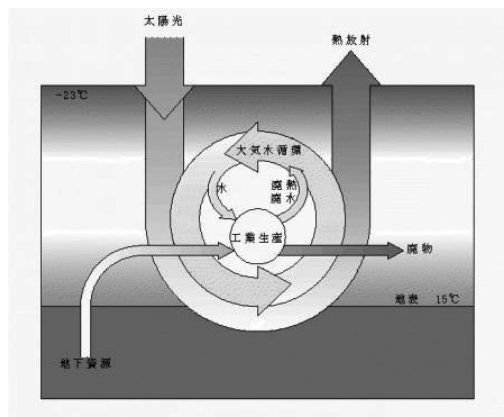


Fig.3 Accumulation of the industrial wastes on the earth.

去られる (Fig.3)。工業生産の本質部分は化石燃料エネルギーを利用して、地下資源から生態系の物質循環では処理できない廃物を一方的に生産する過程とも言える。工業生産システムが環境に汚染を蓄積すること、また工業生産システムが永続できないことは必然的に発生する。ゼロ・エミッション、完全リサイクル社会は、エネルギー保存則、エントロピー増大則に反する目論見と見ることも可能である。¹⁵⁾

9. 分子の赤外線吸収による地球の温暖化

地球の温暖化の主要な要因は人間の産業活動で排出される大量の二酸化炭素 (CO₂) であると一般的に見られている。もちろん、二酸化炭素以外にも地球の温暖化を起こす多くの物質 (水蒸気、メタン、フロン、オゾン、亜酸化窒素などの温室効果ガス) がある。

地球の大気的主要な成分は、質量比で言えば、窒素分子 (75.53 %)、酸素分子 (23.13 %)、アルゴン (1.28 %)、二酸化炭素 (0.045 %) であるが、これらは太陽からの主要な可視光線を易々と通過させる。しかし、太陽光線で直接的、間接的に加熱されて、地表面の平均温度が約 15℃ (絶対温度で 288 度) になっている地球から放射される主要な輻射は赤外線である。この赤外線は、水蒸気や二酸化炭素などによって吸収される。

ガス塊による赤外線の吸収とは、素過程として一つの光子がガス分子と相互作用をして吸収され、再放出される過程である。以下の 10, 11 節では、その素過程について概説する。

10. 電気双極子モーメントをもった温室効果ガス

分子が赤外線 (電磁波) を吸収 (放射) するには、分子が電気双極子モーメントとして働くこと、さらにその加速度的な時間的変化が必要である。大気中の大きな成分である窒素分子、酸素分子、アルゴンは電気双極子モーメントをもたないので、赤外線吸収にはなんら関わりをもたない。

電気双極子モーメントは、外から電磁波が来るとき、それを吸収して加速度運動することを意味する。窒素分子、酸素分子、アルゴンなどは電気双極子モーメントを持たないので赤外線は吸収できない。また二酸化炭素や水蒸気でも対称的に振動するモードでは赤外線吸収は起こらない。逆対称の伸縮振動や変角振動は電気双極子モーメントが加速度的に変化するので赤外線吸収が起こる。

11. 二酸化炭素による赤外線吸収

透明な窓ガラスは、少し厚くても可視光線を易々通過 (伝播) させるので、窓の外の景色を見る事ができる。これに対して紙の場合はたとえ薄くとも向こうを見る事ができない。この両者を比較すると、窓ガラスには単位面積あたりの原子、分子数は非常に多いが、紙はそれが少ない。ガラスの場合は

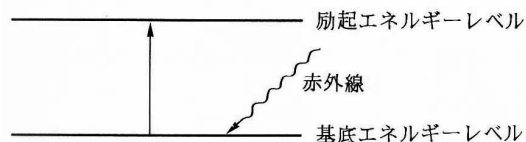


Fig.4 The excitation of vibrational energy by infrared rays.

可視光線とこれらの原子、分子との相互作用が殆どなく素通りする。紙の場合、可視光線と紙の分子の間には強い相互作用がある。

二酸化炭素には、Fig.4 に示すように振動のエネルギーレベルが赤外線領域にあるので、安定な基底状態にある分子に赤外線の光が当たると、それが二酸化炭素の励起状態である振動状態にジャンプして赤外線を吸収する。¹⁶⁾

12. 地球のエネルギーバランス

地球の平均気温は、太陽からの電磁放射として入射するエネルギーフラックスのバランスで決まる。いま、地球が一様な表面温度をもつ球であるとする簡単なモデルで温度を見積もってみよう。

宇宙空間にある半径 R_E の球を考え、その表面温度は一様で T とする。系のエネルギー貯蔵量 U の時間変化は、入射エネルギーフラックスと放射エネルギーフラックスの差で決まる。入射エネルギーフラックスは、入射エネルギーフラックス密度 S と太陽放射に垂直な系の断面積 πR_E^2 の積として決まり、放射は系の全表面積からの熱放射と考えればよい。したがって、系のエネルギー貯蔵量の時間変化率について次式が成り立つ。

$$\frac{dU}{dt} = \pi R_E^2 \alpha_s S - 4\pi R_E^2 \varepsilon \sigma T^4$$

ここで、 α_s は太陽放射に対する系の平均的吸收率、 ε は系の放射率、 α はシュテファン・ボルツマン定数である。一般に、 α_s と ε は系の温度に依存する。

系の熱容量を C とすると、エネルギー貯蔵量の変化 dU は、系の温度変化 dT を用いて $dU = CdT$ と表せ、上式は次のように書ける。

$$C \frac{dU}{dt} = \pi R_E^2 \alpha_s S - 4\pi R_E^2 \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

系へのエネルギーの出入りはつり合っている場合は、温度変化は生じず、定常状態となる。このとき $dT/dt = 0$ であるから、上式から次のように平衡温度 T_E が求まる。

$$T_E = \left(\frac{1}{4} \frac{\alpha_s}{\varepsilon} \frac{S}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (2)$$

Table 1 Values of Albedo on the surface of the earth.¹⁷⁾

地表の状態など	アルベドの値
砂 漠	0.25 ~ 0.4
海 面	0.1 以下
森 林	0.1 ~ 0.2
中層雲・下層雲	0.4 ~ 0.7
新 雪	0.4 ~ 0.8

平衡温度は系の半径（大きさ）に依存しない。上の議論からわかるように、括弧の中の第1の因子1/4は形が球であることの結果であり、第2の因子は系の熱放射・吸収に関する特性で決まる量である。

式(1)に戻って、系へのエネルギーの出入りがつり合っていない場合には温度変化が生じるが、系の熱容量Cで温度変化の速さが決まることがわかる。地球を考える場合、系の熱容量Cとしては大気や海洋を含む表層の物質の熱容量を用いることになる。

13. アルベド

惑星などの表面で反射・散乱される太陽放射の入射フラックスに対する割合はアルベドとよばれる（反射・散乱される放射自体をアルベドという場合もある）。地球表面を考えると、アルベドの値は、海面と陸地、森林と砂漠、雲など、表面の状態に依存する。Table 1に、さまざまな表面の状態や雲などに対するアルベドの値の目安を示す。

地球の平均的なアルベドの値をAとすると $\alpha_s = 1 - A$ と表され、式(2)は次のように書ける。

$$T_E = \left(\frac{1}{4} \frac{1-A}{\epsilon} \frac{S}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (3)$$

Aの値は0.30程度で、 $\epsilon = 1$ として、式(3)に基づいて平衡温度を計算すると255 K、すなわち-18℃程度となる。実際の地球表面付近の平均温度は15℃程度で、これより高い。このように、エネルギー収支から平衡温度を評価する考え方は、他の惑星や宇宙船などに対しても適用できる。

現実には、地球の熱放射は単純な黒体放射ではない。一般に、ある系の電磁放射を全波長域で積分したエネルギーフラックスの総量と同じエネルギーフラックスを放射する黒体の温度を有効温度とよぶ。上で求めた温度は、宇宙空間から見た地球の有効温度に相当する。

温室効果がない場合には地表付近の温度は氷点以下になるが、実際には温室効果によって温度が氷点を上まわっている。液相の水の存在は、生命の存在を可能にする環境条件としてきわめて重要である。地球では、太陽からの距離で決まる太陽放射のエネルギーフラックス密度と、温室効果気体を保持

するに足る重力などによって、この条件が満たされている。隣接する軌道を持つ金星や火星では、公転軌道半径や重力の条件から、液相の水が存在していない。

14. 太陽と地球の位置関係の変化

地球の公転軌道および自転軸は、月や他の惑星などからの重力の影響（摂動）を受けてわずかずつ変化する。このような変化は永年変化とよばれる。ミランコビッチは、こうした永年変化による地球への太陽エネルギー入射フラックスの変化に基づいて、氷期-間氷期のサイクルを説明した（ミランコビッチ・サイクル）。

地球の公転や自転などの運動は、古典力学で極めて精度よく計算できる。しかし、地球と太陽の位置関係が与えられ、入射エネルギーフラックスの変化が把握できたとしても、それによる気候への影響とその大きさを評価することは難しい問題である。これは、後にふれる気候システムの複雑さと非線形性による。気候システムにおいては、小さな摂動が大きな変化を生む可能性がある。¹⁷⁾

15. 開かれた能動定常系

地球環境の保全ということにはさまざまな局面があるが、共通して大切な点は定常状態を維持することである。

まず、力が釣りあってすべてのものが静止しているような系も定常といえる。このような静力学的な平衡にある系は、内部に何も運動がないので生きることとは無縁である。定常は静止とは限らない。運動していてもそれが周期的であれば、定常といえる。地球の自転が昼夜を、公転が四季をもたらしている。これらの運動がほぼ周期的であることが、われわれの生命のリズムの支えとなっている。

この流れの中からくりを設けることによって、有用な活動を取出していることは、注目に値する。

断熱的な容器に入れられた気体は、時間が経ては熱平衡状態に達する。これも、定常状態の一種である。しかし、ここではそれ以上変化は起こらないのだから、いわば熱的な死の状態である。一般に、環境とエネルギーや物質のやりとりをしない孤立系では、熱的死以外に定常状態はない。孤立系では生命は理解できないのは自明であろう。19世紀には、宇宙全体が熱平衡に向かって変化していくので、やがてはあらゆるものが死に絶えるのではないかと悲観されていた。その後宇宙の様な膨張が発見され、いまではそのような心配は“とりあえず?”なくなった。すなわち、宇宙は一樣ではなく、太陽のような高温の星と、低温の宇宙空間からできている。この両者の存在が、地球上の生命の生産のより所である。

環境・生命・生産の諸問題に深く関わる定常系は、環境との間にエネルギーや物質のやり取りがあるという意味で、環境に対して開かれた系である。物質のやり取りだけに着目し

て、それが無い場合を閉鎖系、ある場合を開放系と呼ぶのが慣習である。しかし、ここでの問題に即していえば、何かのやり取りがあるか否かが問題なので、両者をひっくるめて「開かれた系」と呼ぶことにする。

開かれた系でも、生命や生産を維持しているとは限らない。大ざっぱにいえば、月は地球と同じ程度の密度のエネルギーを太陽から受け、宇宙空間に捨てている。その様子はほぼ周期的で、定常である。しかし、月には生命も生産もなく、エネルギーは空しく流れ、エントロピーも空しく増加するだけである。これに対して、地球では生命が生まれ、生産が営まれている。同じ高温と低温の熱源があっても、熱伝導で熱が空しく流れる場合もあれば、シリンダー-ピストン系などの熱機関を置くことによって、動力が取り出される場合もある。地球、生命、熱機関のように、何かを作りだしたり、維持したりするという積極的な機能を持っている定常系こそが、われわれの関心のある系である。このような系を「開かれた能動定常系」と呼ぼう。これはかつて植田敦が「開放定常系」と呼んだものと同じであるが、^{5,12)} これまでの慣習的な呼び方と区別し、系の特徴をはっきりさせるために本書では「開かれた」という言葉を使うことにする。

植田に始まる重要な視点として、開かれた能動定常系が定常であるためには、それが引き受けた廃熱や廃棄物を適切に処理する機構が必要である。^{5,12)} すなわち、環境もまた開かれた能動定常系でなければならない。こうして、細胞-生物個体-生態系-局所環境-地球-太陽系-宇宙という連鎖に一番はっきり現れているように、開かれた能動定常系は次々に入れ子構造をとっている。外側の系ほど大きく、また時間的な変化の尺度もゆっくりとしている。種は個体よりも長く続き、一つの個体の中では細胞が次々に入れ替わっている。これは一般的にいえることで、定常といっても未来永劫変化しないというのではなく、ある時間尺度の範囲でほぼ一定という意味である。いわゆる環境問題とは、人類という開かれた能動定常系が、地球というより大きな開かれた能動定常系の中に、人間的な時間尺度で定常に存在することが危うくなった、ということである。

地表のエントロピー-廃棄の機構としては熱放射もあるが、水の蒸発が重要である。実際、地表の廃熱の約50%が水の蒸発によっている。水の循環がなければ、地表の平均気温は10℃上昇するという計算がある。この蒸発が起きるのは、地表の平均温度が氷点(0℃)よりも十分に高く、蒸気圧が高いからである。一方、水蒸気は平均大気より軽いので上に昇るが、上空の温度は氷点以下なので、上昇した水蒸気は高空で凝結して氷や水になり、雪や雨として地上に戻ってくる。その過程で水は浄化される。このように、消費した水が循環して、きれいになって再び地上の環境に提供されることにより、生態系は定常であり得るのである。水が循環するのは、

地上の放熱と地球の重力によっている。月のように重力が弱いと、水蒸気は宇宙空間に飛び散ってしまい、月表は水の無い、生命を維持できない環境になってしまった。

このように、開かれた能動系としての地球のわれわれにとっての意義は、太陽と宇宙空間の二つの環境に接して、重力の下での大気-水循環という構造によって、地表の環境を維持・更新し続けていることにある。現在の地表の環境は、複雑な要因のきわどいバランスの上に成り立っている。条件が変われば、いずれは別の定常状態に落ち着くのであるが、それが現在と飛び離れたものではないと即断できることではない。人類の生存は許されないかもしれない。¹³⁾

16. 開かれた能動定常系の特徴：物質循環

これらの系を概観すると、次のような点が共通の特徴として浮かび上がってくる。

- エネルギーや物質のある部分について、低エントロピー化が起こっている。
- これを補償するそれ以上の高エントロピー化が起こる部分があり、そのエントロピーは廃熱や廃棄物の形で外に捨てられる。
- 系とエネルギーや物質のやり取りをする環境は1種類ではなく、低エントロピーの(高温の)ものと、高エントロピーの(低温の)ものとの、少なくとも2種類のものがある。
- cの二つの環境は当然熱平衡にはない、これらが熱平衡に近づこうとする過程の途中にある種のからくりを挿入することによって、系は低エントロピーの部分を作り出し、定常を保っている。
- dのからくりは、時間的・空間的な構造によって担われている。
- 系の構造はやがては劣化する。劣化した構造を更新する必要がある。
- 系が定常であるためには、安定でなければならない。外界の変動に関しては、これは負のフィードバック機構によって保障される。

17. 部分的低エントロピー化

これは、能動系の定義のようなものである。熱機関では動力、光合成ではグルコースというように、利用価値の高い低エントロピーのエネルギーや物質を生産することが能動系の目標である。高炉など物質分離のための系もこれに当てはまる。一見生産物がよくみえない生態系や地球の場合にも、生物個体の維持・更新、地表環境の維持・水循環などで、ある部分のエントロピーの減少は必ず起きている (Fig.5)。

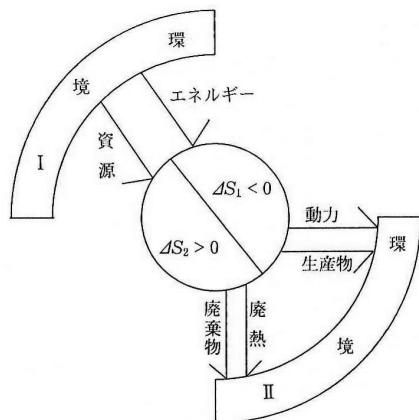


Fig.5 Schema of the open active system under the condition of constant energy flow.¹³⁾

18. エントロピー廃棄

ある部分のエントロピーが減少するならば、他の部分のエントロピーは同じ大きさかそれ以上に増加しなければならない。系が定常であれば系内のエントロピーの総量は変化しない。したがって、増加したエントロピーは必ず系の外へ捨てなければならない。これは、すべての定常系に当てはまる。エントロピーを捨てるには、熱エネルギーか廃棄物の形を取らなければならない。熱機関では低温環境への廃熱、光合成では酸素の発生と放熱、生物では放熱と排泄、生態系を含む地球では宇宙空間への放熱がこれに当る。

エネルギー源でもなく、構造材料でもない水が、ここで極めて重要な役割を果たしていることを強調してきた。それは物質としての水の特徴に由来している。まず、水は常温で液体である。その分子が電気分極を持っているために、化学的に極めて有能な溶媒である。多くの物質を溶かし込み、重力や圧力差などの力だけではなく、温度差や密度差に応じて容易に移動して、いろいろな物質を運ぶことができる。すなわち、物質の配置に関するエントロピーの処理を行う。

その一方、沸点が比較的低く、常温の蒸気圧が高いために容易に蒸発し、そのときに気化熱として大量の熱を奪い取る。また、水の分子は酸素や窒素分子よりも軽いが、地球から宇宙へ飛び出してしまうには重すぎる。これらのことが、地表の放熱・水自体の純化の過程である大気中の水循環を実現している。上に述べた溶媒としての水の働きも、純粋な(エントロピーの小さい)水が大量に継続的に供給されることによって、保障されているのである。地表に液体の純粋な水が豊富に存在していることが、生命や人間活動を支えている。

19. 複数の環境

開かれた能動定常系には、エントロピーの廃棄を受け取る環境が不可欠である。一方、廃棄を担うエネルギーや物質を供給する環境がなければ、系は枯渇してしまう。こうして、開かれた能動定常系は、少なくとも2種類の環境と接していなければならない。前節の例でいえば、熱機関では高温と低温の熱溜、光合成では太陽光と大気・水、生物では栄養物・水・大気、生態系では太陽光と水・大気、地球では太陽光と宇宙空間というようになっている。ただ1種類の環境、たとえばある温度の環境と接しているだけでは、系は結局はその環境と熱平衡になってしまう外ない。これでは、熱的な死であって能動定常系にはなれない。

20. 非平衡の環境間に置かれたからくり

複数の環境は、互いに異なるのであるから当然熱平衡にはなく、熱平衡に近づこうとする。エントロピーの増大則によって定められる向きに、エネルギーや物質の流れが起こる。しかしそれを放置しておいたのでは、変化はただ空しく起こるのみである。

これらの環境の間にある種のからくりを置くことによって初めて、低エントロピーの動力や物質を能動的に生産できるのである。シリンダー-ピストン系のように機構と作業物質を置かなければ、動力は取り出せない。光合成には特有の分子や酵素の集団が必要である。生物個体や生態系も、固有の構造を持っている。大気・水・重力があって初めて、地球は月とは違う表面環境を維持できる。

21. 系の時間的・空間的構造、物質循環

開かれた能動定常系は、時間的・空間的に構造を持っている。熱機関では、シリンダーとピストンがあって高温と低温の熱溜に時間的な順序をもって接触し、気体の体積が変動する。光合成でも、さまざまな分子と酵素が空間的に近いところに配置され、水と二酸化炭素の分子やエネルギーが時間を追って移動していく。生態系でも、植物・動物の個体は空間的にある集団を構成し、食物連鎖はある順序に従って進行する。地球の大気や水も、重力によってある範囲に閉じ込められて循環運動をしている。

このように、系は決して空間的に一様ではなく、構造を持っている。それは、さまざまな物質やエネルギーを時間・空間のある領域に閉じ込めて、必要な変化を起こさせるためである。さらにより一般的には、系が非平衡にある複数の環境と接触していることに由来するといえよう。高温の環境と低温の環境を切り放してその間に割り込み、系を通してエネルギーや物質が流れるようにしなければ、能動系は存在できない。異なる環境に接している入口と出口は空間的・時間的に

分かれていかななくてはならない。

系に構造があるために、その中をエネルギーや物質が移動する必要が生ずる。しかし、系が少し大きくなると物質の移動がネックになり、それを解決するために物質を継続的に輸送する構造が新たに必要になる。前節で述べた生物個体における循環系や地球上の水循環がその例である。このことは、大きな系は物質が循環しなければ開かれた能動定常系として存在できないことを示唆する。実際、地球全体を考えれば物質の全量はほとんど一定なのだから、循環しなければ定常でありえないのは自明である。人間にとっては、地殻表面のごく浅い部分を除いて地球内部は接触できず、環境とはいえないが、物質循環の基本的な重要性には変わりがない。これに対してエネルギーの方は、太陽-地球-宇宙空間の例からもわかるように、大きな系でも輸送は必ずしもネックにはならない。¹³⁾

22. 最後に

これまで述べてきたように、資源-環境問題の基本的な構造の理解のために、熱物理学は重要な役割を担っている。開かれた能動定常系とその中での物質循環という概念は、熱物理学によって提供されたものである。しかし、定性的な説明を越えて定量的な理解に進もうとすると、少なくとも現在の熱物理学には限界があると言える。

以上、「環境物理学と熱物理」の視点から、斯界の優れた文献やテキストを基にレビュー的に引用させて頂いた。紙面の制約から詳細を論じるには至らなかったが、より深い議論については参考文献を当たって頂きたい。環境科学関連の文献は数限りなく出され、多方面からの取り組みが紹介されているが、今更ながらその環境物理学的視点及び熱物理学的視点に立つことの難しさと、その文献の少なさに驚かされる。

その意味でも参考文献に挙げさせて頂いた各位に深甚なる謝意を表わすと共に、本稿での引用に対する全ての責任は本著者にあることを明らかにしておく。

文 献

- 1) 栗屋かよ子, 四日市大学環境情報論集, 第3巻1号 (1999).
- 2) E. シュレーディングー, 生命とは何か-物理的にみた生細胞-, 岡 小天, 鎮目恭夫 訳, 岩波書店 (1951).
- 3) エコマテリアル研究会監修, エコマテリアル学-基礎と応用, 日科技連 (2002).
- 4) M. Kano and K. Morita, *Trans. MRS Japan* **24**[3], 295 (1999).

- 5) 勝木 渥, 環境の基礎理論, 海鳴社 (1999).
- 6) 冠木英克, 東京理科大学理学研究科理数教育専攻修士論文 (2006).
- 7) 加納 誠, 日本物理学会誌 **56**[3], 210 (2001)
- 8) 日本物理学会ホームページ
<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jps/index.html>
- 9) 日本物理学会 領域13 環境物理分野, E. P. グループ通信, No.6 (2002).
- 10) 原田和男, 暮らしき作陽大学・作陽短期大学研究紀要, 第35巻2号 (2002).
- 11) G. ニコリス, I. プリゴジヌ, 散逸構造, 小島陽之助, 相沢洋二 訳, 岩波書店 (1980).
- 12) 槌田 敦, 熱学外論, 朝倉書店 (1992).
- 13) 白鳥紀一, 中山正敏, 環境理解のための熱物理学, 朝倉書店 (1995).
- 14) B. Skinner, S. Porter, and D. Botkin, "The Blue Planet", second edition, John Wiley & Sons, Inc. (1999).
- 15) 近藤邦明
<http://env01.cool.ne.jp/ss02/ss024/kondoh.htm>
- 16) 林 弘文, 勝又昭治, 徐 伯瑜, 平松 淳, 地球環境の物理学, 共立出版 (2000).
- 17) 中川和道, 蛭名邦禎, 伊藤真之, 環境物理学, 裳華房 (2004).

要 旨

環境問題について、環境物理学的視点からの取り組みについて概説をする。その取り扱いの歴史的経過の概略と、地球環境を物理学的に捉える考え方を始めに述べる。最終的に熱物理学的観点からの捉え方を概説し、現時点では環境を物理学から捉えるには熱物理からのアプローチが不可欠であることを説明する。



加納 誠 Makoto Kano
山口東京理科大学基礎工学部電子・情報工学科, Tokyo University of Science, Yamaguchi, TEL. 0836-88-4536, FAX. 0836-88-3400, e-Mail: mkano@ed.yamatus.ac.jp
研究テーマ: 電子物性, エコマテリアル研究, 環境物理
趣味: テニス, 登山, ゴルフ, 松蔭研究