

生きている地球

1. 環境問題を見る視点 … 3

- 1-1 地球の現在
- 1-2 環境問題とは何か
- 1-3 豊かな生態系

2. 環境問題の構造 … 9

- 2-1 地球に生命が存在するための必要条件
- 2-2 安定と平衡、定常
- 2-3 閉鎖系と開放系
- 2-4 地球の大気水循環
- 2-5 大気水循環と生態系
- 2-6 工業生産システム
- 2-7 人間社会と環境問題の本質
- 2-8 環境問題と人間
- 2-9 「環境技術」は有効化
- 2-10 環境問題にどう取り組むか

3. 主な環境問題 … 29

- 3-1 栄養循環の直接的な破壊
- 3-2 物エントロピーの蓄積
- 3-3 水循環の破壊がもたらす砂漠化
- 3-4 大気循環への影響

2006/07/20 初版

(最終更新 2012/10/01)

はじめに

現在、行政主導でさまざまな分野で環境問題対策が講じられています。また、民間には独自の立場から環境保護活動を行なっている団体があります。しかし、これらの環境問題対策の多くは環境問題の全体構造を把握していないために誤った方向に向かいつつあります。

さらに企業は収益性の高い「エコロジー関連市場」に新商品を投入することを競い、この意向を受けた企業技術者とこれを補完する研究者は「環境問題とはいったい何なのか」という本質的な問にははじめから関心がなく、もっぱら国の環境関連予算を食い物にするための技術開発に突き進んでいます。

結果として、「環境問題対策」と称して提案される環境技術の多くは環境問題を解決するどころかむしろ悪化させる可能性が高いのです。

こうした袋小路に突き進みつつある環境問題対策を打開するためには、もう一度原点に立ち返って、「環境問題とは何か」という本質的な問いかけを行うことが必要だと考えます。

§ 1. 環境問題を見る視点

1-1 地球の現在

地球誕生と海洋の形成

地球は約 46 億年前に太陽系の第三惑星として誕生しました。当初の地球は、小惑星の衝突によってもたらされた莫大なエネルギーと、地球を包んだ二酸化炭素と水蒸気を主成分とする数百気圧の大気による保温効果によって、全球がマグマオーシャンに覆われていたと考えられています。地球を構成する物質のうち、熔融した重たい鉄が一気に地球の中心部に達して核を形成し、重力分布に従う地球の成層構造（内側から核→マントル→マグマ・オーシャン→原始大気）が形成されました。

地球は大気を通して徐々に熱を宇宙空間に放出して冷却して、やがて水蒸気が凝結して水が液体として地球表面に達するようになりました。こうして約 40 億年前に原始海洋が誕生したと考えられています。

海洋が形成されると、大気中から水蒸気と同時に水に溶け込んだ二酸化炭素も取り除かれ、大気中の二酸化炭素濃度が急激に低下しました。その結果、地球大気の保温効果が小さくなり、さらに急速に地球は冷却していきました。

プレートテクトニクスの開始と生命の誕生

海洋が形成されるのと同時に地球表面の固化が始まり、剛体的なプレートが形成されたと考えられています。プレートテクトニクスの開始です。

遅くとも 40～38 億年前にはプレートが形成され、あるいは大陸地殻がつくられ始めま

した。海中では、39 億年前頃に中央海嶺の熱水噴出孔の周辺で地球最古の生命が誕生しました。

28～27 億年前には、何らかの原因で地球の外核（核は二層構造をしており、中心に金属鉄の内核があり、その外側に液体鉄の外核がある）の対流運動が活発になり、強力な地球磁場が生じました（バンアレン帯の形成）。その結果、地表に到達する有害な宇宙線量が減り、生物の浅海への進出が始まりました。

浅海へ進出した生物の中から、やがて太陽光を利用する光合成生物が誕生しました。今日の高等な植物につながる最初の酸素発生型の光合成生物は、藍色細菌（シアノバクテリア）でした。

光合成生物が誕生するまでの原始海洋は還元的な環境で、海水には鉄イオンが飽和状態に達するほどに増えていました。そこに光合成生物の登場したことで発生する酸素によって鉄イオンが酸化され、固体として海底に堆積することになりました（26～19 億年前）。これが今日の工業文明を支えている縞状鉄鉱層の起源です。

ウィルソンサイクルとプレートテクトニクス

19 億年前に最初の超大陸（全陸地の 80%以上が一カ所に集まってできる異常に大きな大陸）であるヌーナ超大陸が誕生しました。その後、超大陸は分裂と衝突・融合を繰り返し、これまでにロディニア（10 億年前）、ゴンドワナ（5.5 億年前）、そしてパンゲア（3 億年前）が出現し、現在は 2.5 億年ほど先にアジアを中心とする次の超大陸が形成される途上にあります。

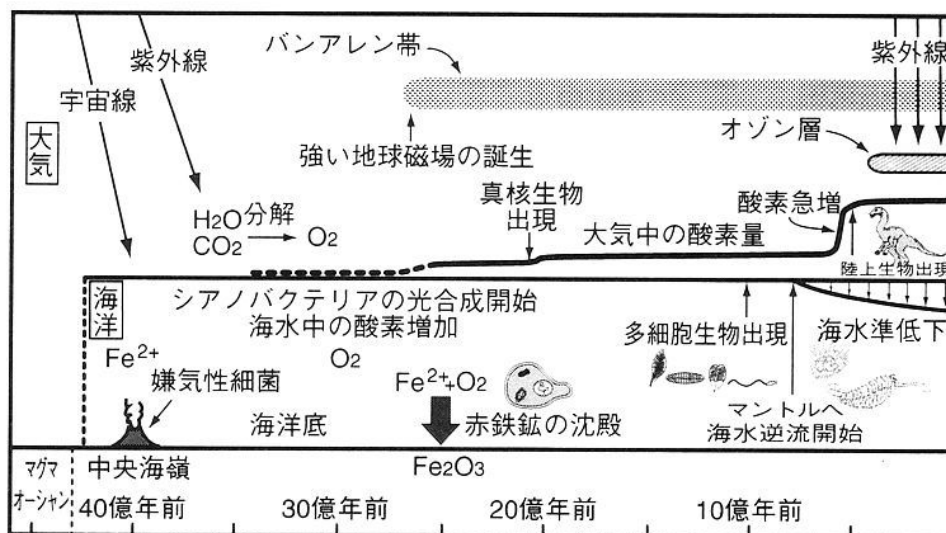


図 1.1 地球生命・表面環境史

熊澤・丸山『プレートテクトニクスと全地球史解説』 p.140

この超大陸が分裂し、衝突・融合を繰り返して次の超大陸を形成する過程をウィルソンサイクルと呼んでいます。その原動力はマンツルの対流（プレートテクトニクス）です。現在は、アジア大陸の下に巨大なマンツルの下降流（スーパーコールドプレート）があり、

アフリカ大陸の下と南太平洋に巨大なマンツルの上昇流（スーパーホットブルーム）があります。スーパーホットブルームからスーパーコールドブルームに向かうマンツルの流れに乗って、地球表面を覆っている巨大プレートがアジアへ向かって移動しているのです。

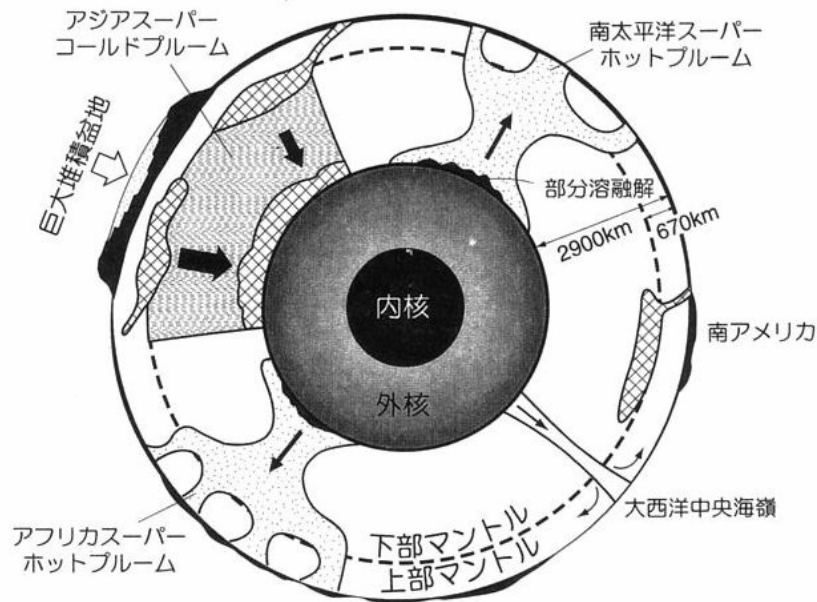


図 1.2 地球の変動原理／現在の地球内部の物質対流

丸山・磯崎『生命と地球の歴史』p.41

このウィルソンサイクルによって、地球内部の熱の地表への放出のパターンやプレートの生成速度などが変化し、それに伴って大陸の数や海水準、気温などの変動が引き起こされます。一般的には、超大陸の形成が始まると寒冷化して氷河が発達します。超大陸の形成末期から分裂初期にかけては海水準が下がり、爆発的な火山活動の影響によって生物の大量絶滅が起きます。

海水のマンツルへの注入

さて、話を元に戻します。

その後も海中では光合成が続きました。そして海水中の鉄イオンを酸化し尽くし、ついに酸素が地球大気に供給され始めました（19 億年前）。

地球史的に見て、地表の温度が最も低い時期は 8～6 億年前です。氷期と呼ばれて、赤道付近まで氷河が覆い尽くしたと考えられています。これは地球が冷え切ってしまったわけではなく、上部マンツルの温度が低くなって流動性が小さくなったために、地球内部の熱が地表へ放出されにくくなったことによるとされています。

7.5 億年ほど前になると、マンツルに海水が注入され始めます。これは中央海嶺で海洋プレートがつくられるときに含水鉱物という形で固定された海水が、上部マンツルの温度が低くなったために脱水分解されずに安定的に地下深くまで運ばれるようになったからだと考えられています。

海水の注入が始まる以前の上部マントルは乾燥した状態で、温度の低下で流動性が小さくなっていたと考えられます。ここに海水が注入されたことで上部マントルの溶融温度が低下し、乾燥した状態に比べて低い温度でも溶融するようになり、流動性も大きくなりました。その結果、マントル対流が活発化し、プレートの生成速度と移動速度が速くなり、幸運にも再び地球内部の熱が地表へうまく供給されるようになりました。

海水のマントルへの注入で海水が減少すると（現在までに注入された海水は深さにして約 600m と推定されています）、陸地面積が急増しました。その結果、地球上で初めての巨大な河川が生まれました。

大河による陸地の浸食が進むと堆積岩が増加し、海水の塩分濃度も上昇しました。また、水を含んだマントルの膨張によって大陸は押し上げられ、さらに大陸面積が増加しました。海水のマントルへの注入は、現在も続いています。

酸素の急増と生物の陸上進出

海水の塩分濃度の急上昇は海棲生物に大きな打撃を与えました。海棲生物のあるものは塩分濃度の低い大河の河口へ、さらには河川の上流へとすみかを移しました。この海水の塩分濃度の上昇が、引き続く生物の陸上への進出を促したと考えられています。

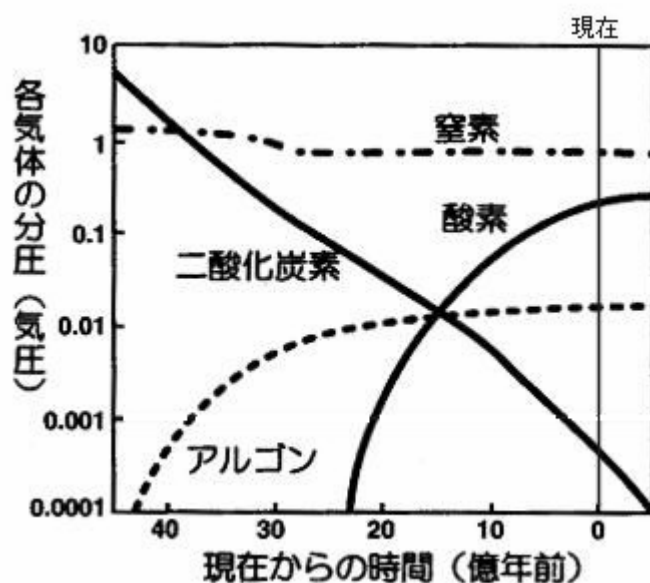


図 1.3 地球大気を構成する主要気体の組成の変化

丸山・磯崎『生命と地球の歴史』p.163

一方、堆積岩の増加は有機物を環境から隔離することになりました。そのために大気中の二酸化炭素濃度は減少し、逆に酸素濃度が急速に増加していきました。大気中の酸素濃度が上昇すると、5～4 億年前には大気上空にオゾン層が形成され、地表に到達する有害な紫外線量が減りました。こうして生物の陸上への進出の条件が整えられたのです。

生物が陸上に進出した後、超大陸パンゲアの形成・分裂のときに特異な火山活動が起きました。これが原因となって起きたのが、地球上に生物が誕生して以来の最大の大量絶滅である P/T 境界線（古生代最後のペルム紀と中生代最初の三畳紀の境界＝2.5 億年前）の

生物大絶滅でした。

次の寒冷期へ

現在の地球は、約 2.5 億年先にアジア大陸を中心に出現する次の超大陸の形成へと向かう途上にあります。地球内部から生態系をはぐくむ地表環境へのエネルギーの供給は穏やかで、安定しているようです。

現在の地球の気候の変化は、相対的に地球外部からの影響（例えば、太陽の活動や地球の天体としての軌道要素の変動に基づくもの）が支配的です。現在の地球は、本質的には氷河期であり、ほぼ 10 万年をサイクルとして寒冷な時期（約 9 万年間）と温暖な時期（約 1 万年間）の周期的な気温変動を繰り返しています。これはミランコビッチサイクルと呼ばれる地球の天体としての軌道要素の変動を反映していると考えられています。

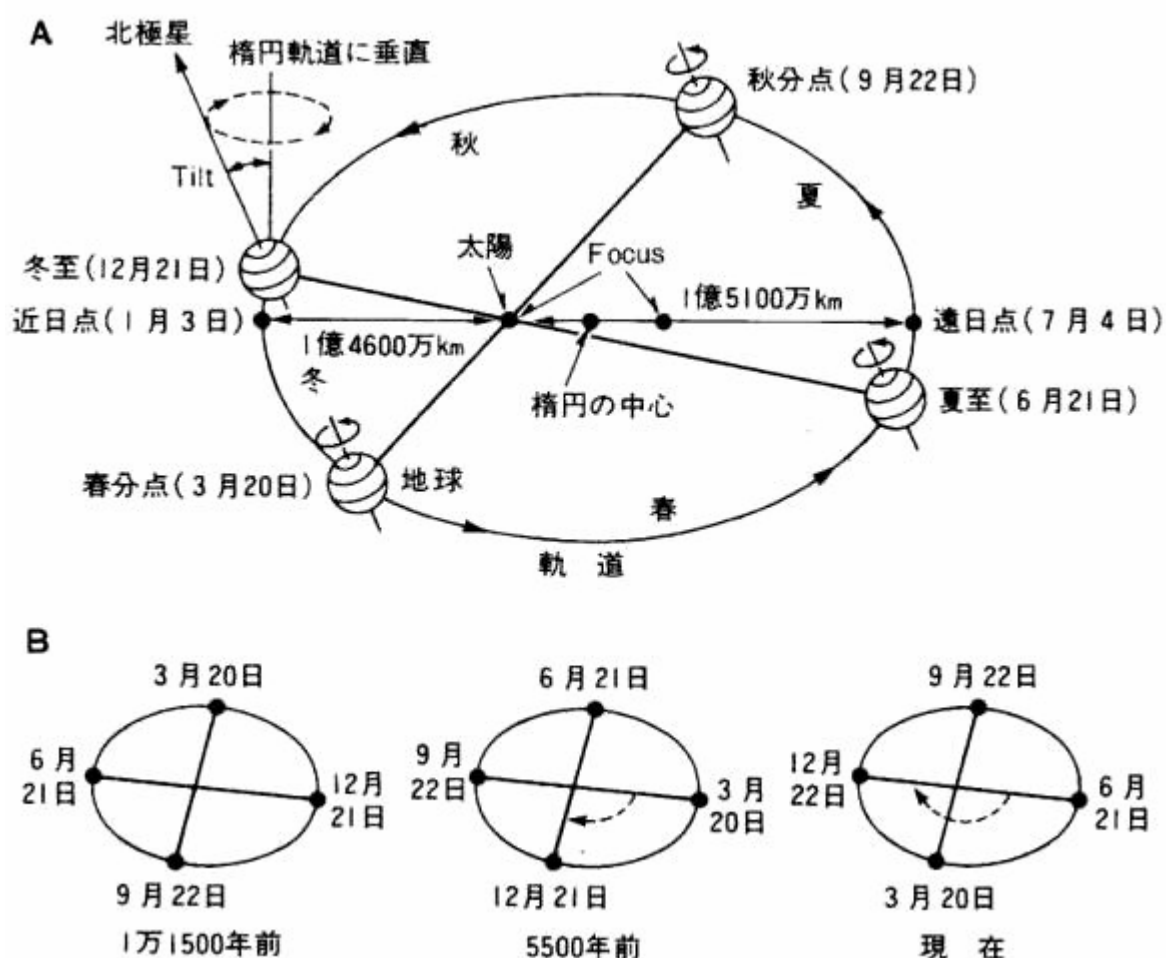


図 1.4 ミランコビッチサイクルの構成要素

根本順吉『超異常気象』（中公新書 1994）p.41

地球の太陽を巡る軌道の扁平率の変動周期は約 10 万年であり、地球の地軸の傾きが 22.1 度から 24.5 度の間を変動する周期は約 4 万年である。更に、春分点の歳差現象（B）の周期が約 2 万年である。

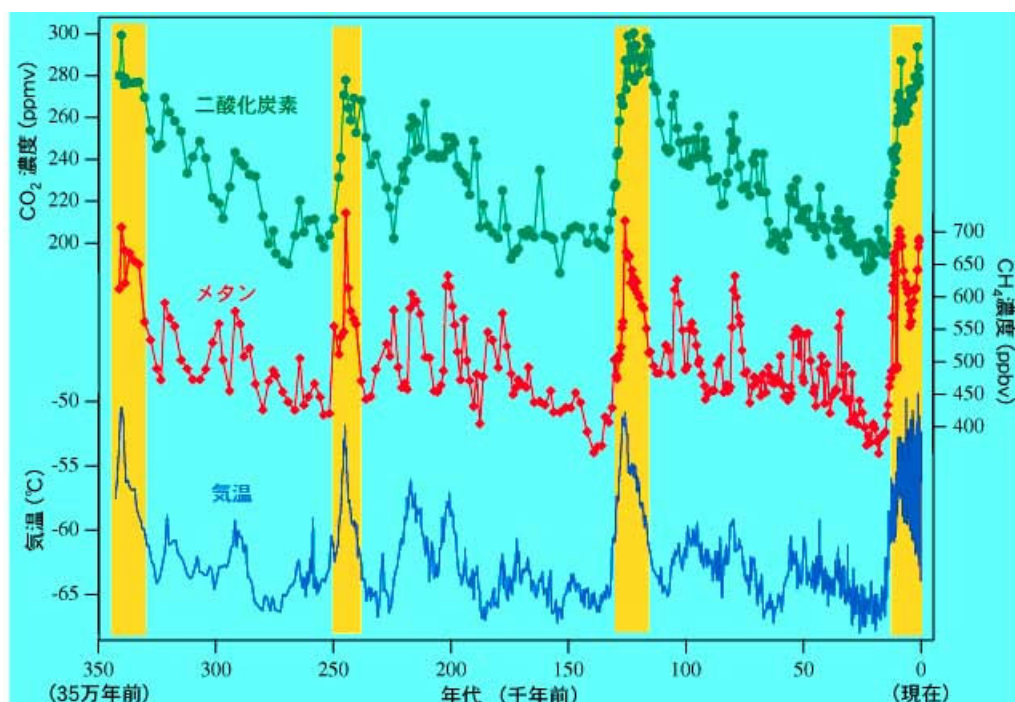


図 1.5 ミランコビッチサイクルに伴う気温変動

(南極ドームふじアイスコア分析)

前の寒冷な時期が終わって、温暖な時期がすでに 1 万年ほど継続しており、そろそろ本来の寒冷な時期に戻るころにさしかかっているというのが、私たちの生きる現在の地球史的な位置です。

1-2 環境問題とは何か

環境とは

現在の生態系の活動の場である地表付近の気候は、太陽放射を主要なエネルギー源とする大気水循環によって大枠が決まっています。その中で営まれる人間活動を含めた生態系の活動と、生態系の器としての地表（陸地と海洋を含む）の性状が気候に影響を与えます。この気候システムを含む地表付近の物質のありようの総体のことを「環境」と考えればよいでしょう。

環境問題とは

現在、私たちが「環境問題」と呼んでいる現象は、環境の中でも特に、①人間活動による影響によって、②生物としての人間の棲息条件が悪化する問題のことを指しています。この二つの条件が揃ったときに初めて「環境問題」となるのです。

人間活動によって引き起こされる変化が、必ずしもすべて環境問題ではありません。また、生物としての人間の棲息環境が悪化しても、それが人間活動の結果でなければ環境問題ではありません。環境問題対策を立案する際に、何が環境問題で何が環境問題ではないかを峻別することは決定的に重要です。

1-3 豊かな生態系

敵対的共生

生態系は、光合成を行う独立栄養型の生物と、他の生物に寄生あるいは捕食する従属栄養型の生物によって構成されています。生態系はこれらが共生することによって成り立っています。

共生という言葉に対して、おとぎ話的な「共に仲良く暮らす」という印象を持つ人がいます。しかし、生態系における共生とは、食物連鎖による栄養循環を基本とする、「食うか食われるか」の共生なのです。より正確には「敵対的共生」（槌田敦『資源物理学入門』pp.171～173）と呼ぶのがふさわしいでしょう。

敵対的な共生関係にある生物種は、あらゆる生存戦略を駆使して自らの種がドミナント（優勢種）になり、繁栄することを唯一絶対の目的にしています。環境に適応して版図を広げた生物は繁栄し、適応できなかった生物は淘汰されてゆきます。

豊かな生態系が繁栄の条件

私たちが環境問題を語るとき、その対策の方向はあくまでも「人間という種が安定的に存続すること」が判断基準になります。極論すれば、他の生物がどうなろうと、それは問題ではないのです。

私たちが環境問題を考える場合に生態系の豊かさを問題にするのは、生態系の食物連鎖の頂点に位置する人間という生物種にとって、有用な（生物）資源を獲得するためには生態系全体を豊かにしておくことが必要だからなのです。無謀な（生物）資源の利用は人間の生存基盤そのものの破壊につながるという理由で、行うべきではないのです。

適応できなければ絶滅

環境保護運動の中には「失われる種がかわいそうだから」という情緒的な動機もあるようですが、それは趣味の問題であって環境問題とは異質のものです。

同様に、例えばレッドデータブックに記載されている絶滅危惧種を人工環境へ囲い込む保護や人工繁殖も、環境問題という視点からは無意味なものです。なぜそれらの種が絶滅に直面することになったのか、その背景にある周辺環境の劣化の生物指標として捉えなければなりません。

環境問題という側面からなすべきことは、絶滅が危惧される種の棲息環境そのものを良好な状態に復元する作業です。

ただし、個体数があまりにも少なくなった種は回復できる可能性は高くありません。これは環境変化に適応できなかった種として淘汰されるのであり、必然的な結果として受け入れなければなりません。棲息環境は放置したまま絶滅危惧種を人工環境に囲い込むことは、剥製を博物館に展示するのと同じ行為でしかありません。

以上、環境問題を考える上での、基本的な視点を幾つか示しました。次節では、もう少し具体的な環境問題の構造を考えることにします。

§2 環境問題の構造

2-1 地球に生命が存在するための必要条件

地球は真空の宇宙空間に浮かぶ星ですから、物質的にはほとんど孤立した系と考えられます（ここでいう地球とは、地球重力に捉えられている大気まで含めた系を指します）。その地球上で数十億年にわたって生命現象が維持されていることは、驚異的なことです。

ここでは、地球上でこのような長期間にわたって生命現象が維持されてきた必要条件を考えることにします。

資源を繰り返し利用する

生命現象に利用できる資源は限られています。地球の生命現象が数十億年にわたって維持されるには、物質の循環利用が不可欠です。

ある生命体の活動の結果生じた廃物が単に廃棄物（汚染）として環境に蓄積されるだけなら、早晚生命現象は終息します。生態系の活動を持続するためには、ある生命体の廃物が別の生命体にとって有用な資源となり、生態系全体としては物質が滞ることなく循環することが不可欠です。

安定したエネルギーの供給がある

地球は太陽光によって安定的にエネルギーを得ています。高等生物を含む生態系が存在する地球の環境を考える場合に、植物の光合成がはたしている役割は決定的に重要です。

廃熱を宇宙空間に捨てる機構がある

ここでエントロピー¹⁾について触れておく必要があります。

エントロピーとは、熱あるいは物質の拡散の度をあらわす量です。自然界のあらゆる変化によって、エントロピーは不可逆的に増加します。孤立系のエントロピーは常に極大に向かって単調に増大してゆき、極大に達するとすべての変化は起こらなくなります。このエントロピーが極大になり、熱的に平衡（変化のない状態）に達した状態を「熱的な死」と呼んでいます。

生態系という絶えず活動する系（常にエントロピーを増大させる系）を含みながら、数十億年にわたってその活動が滞ることなく「定常」的に営まれている地球という特殊な系（エントロピーレベルが極大でなく、しかも増加しない系）をどう解釈するかは、長年にわたって物理学者を悩ませた問題でした。しかし、答えはすごく単純なものでした。地球は物質については孤立系ですが、エネルギーについては入出力が可能（開放系）なのです。増えたエントロピーは熱エネルギーとともに宇宙空間に廃棄されていたのです（槌田エントロピー理論）。

地球は物について孤立系であり、物エントロピーを宇宙空間に捨て去ることはできません。しかし、地球の生態系は物質を循環利用して、すべての活動によって増加したエントロピーを熱エントロピーとして環境中に廃棄しています。この熱エントロピーを地球シス

テムが大気水循環を通して大気の上層から宇宙空間に熱エネルギーとともに捨てているので、生態系は定常性が維持されているのです。

註 1) エントロピーは、最初は熱学において熱エネルギーの質を表すために導入されました。定義は、熱エネルギー量をその絶対温度で割った値です。エントロピーは常に正の値をとります。熱エネルギーが高密度であれば温度は高く（＝エントロピーが小さい、有用性が高い）、拡散して低密度になれば温度は低く（＝エントロピーが大きい、有用性が低い）なります。また、熱は必ず温度の高い方から低い方へ移ってゆきます。つまり、熱学的な現象は常にエントロピーの増大する方向に進むのです。

エントロピーは後に、統計力学において物質の拡散の程度の指標として拡張されました。ボルツマン関係式で熱学エントロピーと矛盾しない対応関係が示されました（詳細については槌田敦著『熱学外論』参照）。つまり、あらゆる物理現象は常にエントロピーの増大する方向に進むのです（エントロピー増大則）。

地表近傍が適温で安定している

地球には多くの生物が棲息していますが、例えば動物は、からだを作っているタンパク質が 50℃程度になると変性してしまい、生きていくことができなくなります。地球上の多くの炭素型の生命体が生きていくためには、あまり高温では都合が悪いのです。また、あまり低温でも生命体に含まれる多量の水分の影響でこれまた都合が悪いことになります。生態系で重要な位置をしめる植物の光合成にとって、あまりに低温では反応が進みません。

地球環境に水という物質が液体と気体という二つの状態で安定して存在できる気温であることも、エントロピーの宇宙空間への廃棄にとっては重要です。

ただし、地球上に単純な生命が発生した当時は地表はもっと高温高压であったと考えられています。その後の天体としての地球の物理的な変化、発生した生命と環境との相互作用によって、安定した現在の地球環境が形作られたのです。

地球が他の太陽系の惑星と大きく違うのは、太陽光からエネルギーを受け取り、生態系を含む諸活動で増大した熱エントロピーを、大気水循環によって宇宙空間に廃棄する「熱機関」として定常的に活動していることです。これが「生きている地球」の本質なのです。

2-2 安定と平衡、定常

生きた系と死の世界

あるものの状態が「安定」としていると言う場合、もう少し良く観察するとその内容は二つに分類することができます。

一つは、例えば構造物のように、どこも動かずに（厳密にはそうはいえないかもしれませんが）変化のない安定です。そしてもう一つは、回っている水車のように、動いてはいるけれども、その動きが時間に対して変化せずに継続する安定です。前者のような状態に

ある安定のことを「平衡」と呼び、後者のような場合を「定常」と呼びます。

平衡系は変化のない安定した状態ですから、死の世界です。これに対して定常系は、絶えず変化していますから生きた系と言うことができます。地球のように、数十億年にわたって生命（生きた系）を含み、全体として安定した系は定常系と考えることができます²⁾。

註 2) 厳密に言えば天体にも寿命があります。また、地球上の生態系と環境は、相互に関連しながら絶えず変化している非定常な世界です。しかし、生物の寿命に比べてその変化は無視できるくらいに小さく、準「定常」と考えて差し支えないでしょう。

定常性を維持する条件

定常系の中では何らかの活動が継続的に行われていますから、活動を維持するための物質とエネルギーの供給が必要です。しかし、それだけでは十分ではなく、系の状態を一定に保つためには活動の結果生じた不要な物質や熱を系外に捨て去る必要があります。例えば、水車を動かすためには水の流れが必要です。ところがもし水が水車のすぐ下手で堰き止められて下流に流れなければ、やがて水車は水没して動かなくなってしまう。

ある系の定常性を維持するためには、系の中の物質があるサイクルを経て元の状態に復すること＝循環すること（例えば、水車が回ること）と、その循環を維持するために系を通過する物質ないしはエネルギーの流れ（例えば、水の流れ）がなくてはなりません。このいずれかの条件が破綻したとき、系の定常性は失われ、何らかの別の安定状態へ向かって遷移することになります。

2-3 閉鎖系と開放系

「閉鎖系」とは、ものの出入りのない系のことで、「孤立系」と言い換えることができます。これに対して「開放系」とは、ものの出入りがある系のことです。

地球が定常的であるためには

地球は、物質についてはほとんど閉鎖系と言ってよいでしょう。しかしエネルギーについては、太陽光から安定したエネルギーの供給を受けて、同時に地球大気の上層から同じだけのエネルギーを宇宙空間に放出しています。地球はエネルギーについては開放系なのです。

地球が定常的であるのは、第一に、エネルギーについて開放系であり、地球を通過する太陽光を起源とするエネルギーの定常的な流れがあることです。そして第二に、地球上の生命現象を含む諸活動において物質を循環的に利用し、地球環境に物質による汚染を蓄積しないことです。

地球はエネルギーについては開放系ですから地球上の生命現象を含む活動による廃熱＝熱エントロピーを地球から放出される熱エネルギーとともに宇宙空間に捨て去ることができますが、廃物＝物エントロピーは宇宙空間に捨て去ることができません。

閉鎖系の中の変化

閉鎖系が同時に定常系であることは不可能ですが、それが必ずしも変化のない熱平衡の死の世界であるとは限りません。なぜなら、系内の資源だけを消費しながら行う変化は存在することが可能だからです。

しかし閉鎖系では、有用なエネルギー（あるいはエネルギーのもとになる資源）を一方的に消費して変化が進行しますから、そのほかの資源をいくら循環的に利用したとしても、有用なエネルギーが枯渇するか、あるいは活動の結果として環境に汚染（エントロピー）が蓄積されることによって、やがて変化は終息します。

閉鎖系の変化は、系の拡散能力によって決まるエントロピー極大の状態に向かって絶えず変化する非定常系なのです。

2-4 地球の大気水循環

熱機関

熱エネルギーから動力を取り出す機関を「熱機関」と呼びます。例えば、代表的なものは蒸気機関です。蒸気機関はピストンの往復運動を繰り返すことによって、熱エネルギーから運動エネルギーを取り出します。蒸気機関はピストンの往復を一周期とする運動を繰り返す「定常系」です。

もう少し具体的に見ると、蒸気機関は高温熱源から熱エネルギーを受け取ることによって蒸気発生器（高温熱溜り）で得た高温高压の水蒸気でピストンを押し、廃熱を復水器（低温熱溜り）を通して冷却水に引き渡すことで再びピストンを元の位置に復元して、ピストンの往復運動を繰り返しています。

高温でエントロピーの少ない熱エネルギーから運動エネルギーを取り出し、低温でエントロピーの高い廃熱を捨てることによって、蒸気機関の定常的な運動は保証されているのです。

大気水循環

地球も全体として一つの熱機関です。地球を暖める熱源は太陽光です。太陽光の一部は直接大気に吸収されますが、残りは地球表面に到達して熱化します。暖められた地球表面は大気を暖めます。こうして太陽光は地球表面付近の平均気温 15°C 程度（絶対温度 288K ）の高温熱溜りに熱エネルギーを供給します。

暖められた空気や水蒸気を含んだ空気は軽くなって上昇するために、大気に対流が発生します。水蒸気を含んだ空気は上層へ移動することによって圧力が低下することで断熱膨張します。そして上空 $6,000\text{m}$ 程度のところで -23°C (250K) の低温熱溜りから熱エネルギーを宇宙空間に捨て去り、熱を失った水蒸気は雲になり、やがて雨となって再び地上に戻ります。

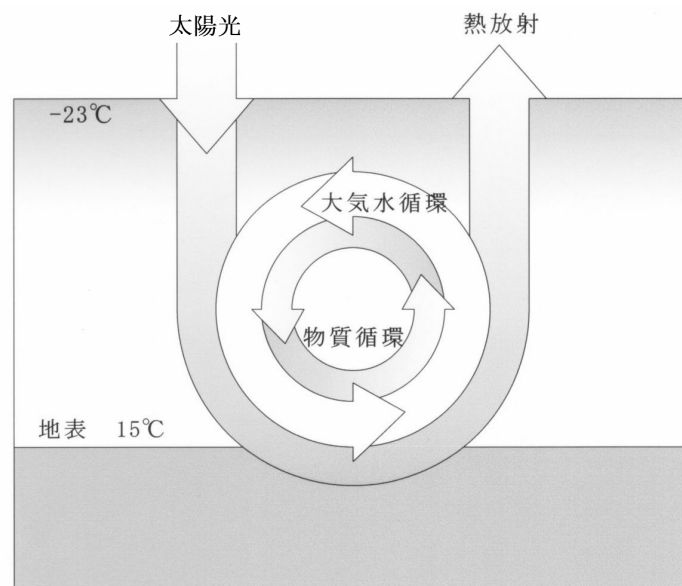


図 1.6 定常系としての地球

エントロピーと地球の定常性

ここでエントロピーについて触れておきます。

太陽光によって供給される熱エネルギー Q は地球表面の高温 ($T_1=288\text{K}$) 熱溜りで受け取られますが、同時に受け取られる熱エントロピー S_1 は、

$$S_1 = Q/T_1$$

で表せます。一方、大気上空の低温 ($T_2=250\text{K}$) 熱溜りから宇宙空間に捨て去られるエントロピー S_2 は、

$$S_2 = Q/T_2$$

です。その結果、地球上の諸活動で発生した熱エントロピーは、差し引きして

$$\Delta S = S_2 - S_1$$

だけ宇宙空間に捨て去られることになります。

従って、地球上の諸活動から発生する熱エントロピーが ΔS とバランスし、しかも地球上に余分な物エントロピーを残さない限り、地球上の諸活動の定常性は維持されるのです。

このように地球は、太陽光から得たエネルギーを大気水循環を通して再び宇宙空間に捨て去ることによって、地球上の諸活動で増加した熱エントロピーを処分する熱機関なのです。その過程で、大気の大気対流によって風が吹き、また水を上空に運び上げて雨を降らせ、

地上に降り注いだ水は標高に応じて位置エネルギーとして太陽光のエネルギーを蓄えます。この大気水循環が定常的に維持されることが、地球上のすべての活動の定常性の前提になります。

地球熱機関のエネルギー収支

地球が太陽放射を受けて駆動されている一種の熱機関であることを述べました。ここではもう少し詳しく地球熱機関のエネルギー収支を見ておくことにします。

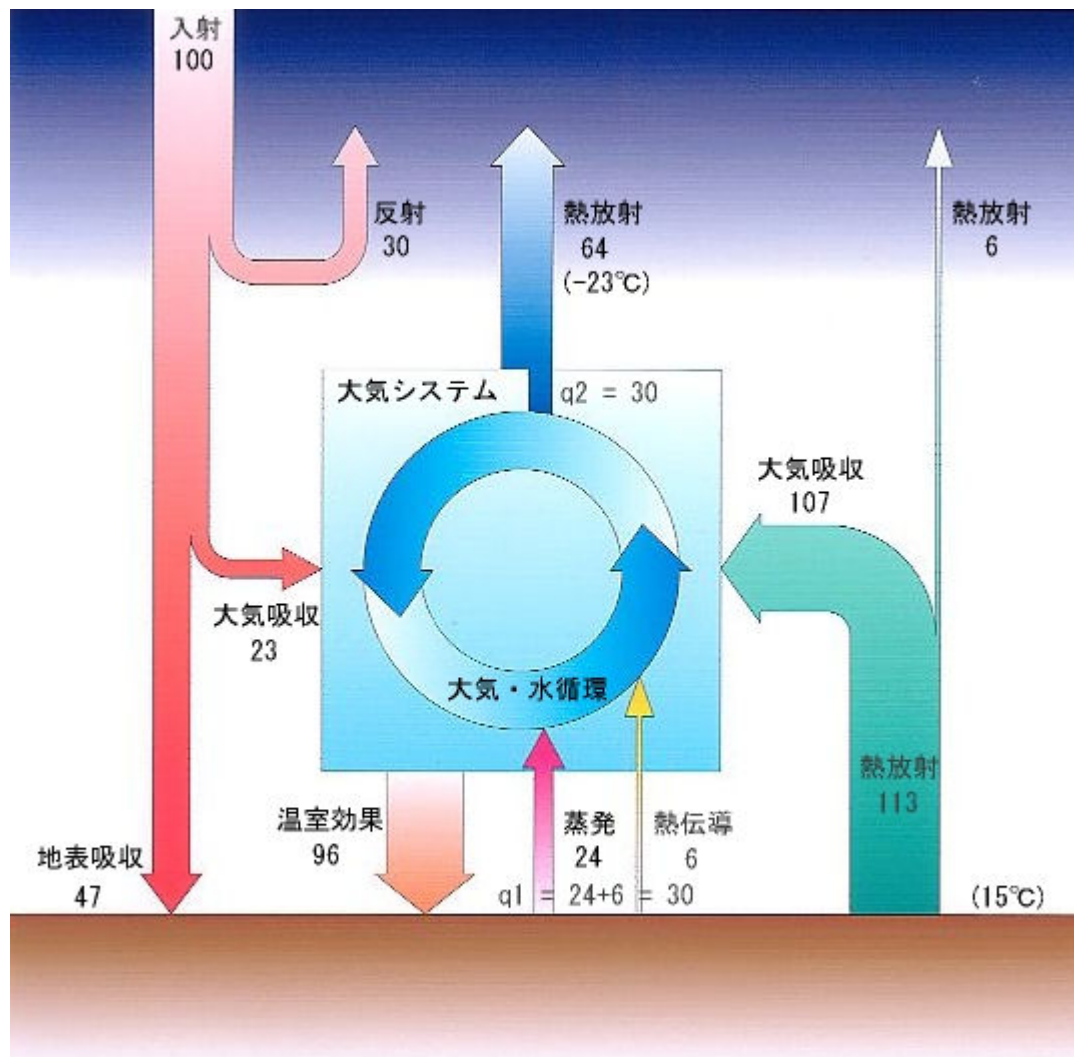


図 1.7 地球熱機関の熱収支

槌田敦著『熱学外論』（朝倉書店）p.127 図 7.2 に基づく

地球の位置で太陽光に垂直な平面の受ける太陽放射強度を太陽定数と呼び、その大きさは $1,366 \text{ W/m}^2$ 程度です。地球表面が受取る平均的なエネルギーは太陽定数の $1/4$ なので 342 W/m^2 になります。上図はこれを 100 とした時のエネルギー収支を示しています。

太陽放射 100 のうち 30 は、地球大気・雲・地球表面で宇宙空間に反射されます。残りの 70 のうち、地球表面に届くまでに 23 が大気に吸収され、残りの 47 が地球表面を直接暖めます。

ステファン=ボルツマンの法則

$$I = \sigma \cdot T^4 (W / m^2), \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}), \quad T(K)$$

を使って 47 のエネルギーを受け取る地球表面の温度を近似的に求めると、

$$T = (I \div \sigma)^{\frac{1}{4}} = \{342 \times (47 \div 100) \div (5.67 \times 10^{-8})\}^{\frac{1}{4}} = 230.7 K = -42.5^{\circ}C$$

になります。地球表面を温めるエネルギーが太陽からの直達放射だけだとすると表面温度は $-42.5^{\circ}C$ になります。これは極寒の世界です。

地球大気は温度に応じてあらゆる方向に赤外線を放射します。大気からの放射の内 96 が地球表面に到達します。これが地球大気の『温室効果』と呼ばれるものです。直接地球表面に到達する太陽放射 47 と温室効果 96 によって、地球表面は合計 143 を受取ることになります。再びステファン=ボルツマンの法則から、

$$T = (I \div \sigma)^{\frac{1}{4}} = \{342 \times (143 \div 100) \div (5.67 \times 10^{-8})\}^{\frac{1}{4}} = 304.8 K = 31.6^{\circ}C$$

になります。これは水の無い灼熱の砂漠の気候です。これは、熱平衡状態であり、その環境に生物が存在することは出来ません。

実際の平均的な地球表面では受け取ったエネルギー 143 の内、6 は地球表面から大気への熱伝導、24 は地球表面からの水の蒸発潜熱、そして 113 が赤外線放射によって放熱されます。地球表面温度はステファン=ボルツマンの法則から、

$$T = (I \div \sigma)^{\frac{1}{4}} = \{342 \times (113 \div 100) \div (5.67 \times 10^{-8})\}^{\frac{1}{4}} = 287.3 K = 14.1^{\circ}C$$

になります。一般に地球の全球平均気温は $15^{\circ}C$ 程度、生物にとって快適な環境になっています。

暖められた大気、あるいは水蒸気を多く含んだ大気は軽いために上昇傾向を持つため、これによって対流が起こります。水蒸気を多く含んだ大気は上昇するにつれて断熱膨張し、やがて露点に達し、水蒸気は再び水に戻り雨となって地表に降り注ぎます。このとき、地表で受取った 24 の潜熱を放出し大気を温めます。

太陽放射の内、反射を除いた有効放射 70 と、地球表面から大気の窓などを通して直接宇宙空間に放射される地球表面放射 6 と対流圏上層の高度 6,000m 付近からの低温赤外線放射 64 が釣り合っていることで地球の温度状態は安定しています。対流圏上層の放射平

平衡温度はステファン=ボルツマンの法則から、

$$T = (I \div \sigma)^{\frac{1}{4}} = \{342 \times (64 \div 100) \div (5.67 \times 10^{-8})\}^{\frac{1}{4}} = 249.3 K = -23.9^{\circ}C$$

になります。

この、地球の大気水循環によって、地球上で行われる活動で増加する熱エントロピー g_s が処分されます。具体的に計算すると以下の通りです。

$$q_1 = q_2 = 342 W/m^2 \times (30/100) = 102.6 W/m^2 = 102.6 J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$$

エントロピー収支

$$q_1/T_1 + g_s = q_2/T_2 \quad \therefore g_s = 102.6 \times (1/(273-23) - 1/(273+15)) = 0.054 J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot deg^{-1}$$

ここで二酸化炭素地球温暖化について少し触れておくことにします。地球放射 113 のうち、既に 107 が大気に捕らえられています（約 95%）。また、大気を構成する気体分子は特定の波長の赤外線だけを吸収します。現在の二酸化炭素の濃度は、既に二酸化炭素による吸収波長帯の赤外線を吸収するのに十分な濃度を有していますので、大気中二酸化炭素濃度がいくら増えようとも大気に捕らえられる地球表面放射の量が著しく増加することはありません。

更に、仮に気温上昇が生じれば、大気水循環が活性化されることになり、蒸発潜熱による放熱量の増加や、雲量の増加による太陽放射に対する反射率の増大が考えられます。これらはいずれも温暖化に対する負のフィードバックになります。

以上の理由から、現在『二酸化炭素地球温暖化脅威説』として騒がれている、人為的に大気に付加された二酸化炭素による『温室効果』によって、地球の気温が生態系に致命的な悪影響を及ぼすほどに上昇することは考えられません。

2-5 大気水循環と生態系

部分定常系

地球全体が一つの熱機関であり、定常系であることを述べました。同じように、地球上で安定的に行われている部分系の活動もそれぞれが定常系です。

地球はエネルギーについては開放系ですが、物質については重力の影響でほとんど閉鎖系です。しかし、地球上で行われる部分定常系の活動は、物質についてもある程度（地球全体としての定常性を阻害しない範囲において）は開放系と考えることができます。

地球上の部分定常系の一般的な活動は、系外（地球環境）から材料資源とエネルギーを摂取して何らかの活動を行い、活動の結果生じた廃物や廃熱を系外に捨て去ることで定常的な活動を続けています。

動物の活動

動物は、地球環境から食物、水、酸素を摂取し、食物から呼吸によって活動のためのエネルギーを得ると同時に、体組織の材料を得ています。その活動の結果、利用できなかった物質と老廃物、廃熱を地球環境に廃棄します。具体的には排泄、発汗、体表からの放熱などです。

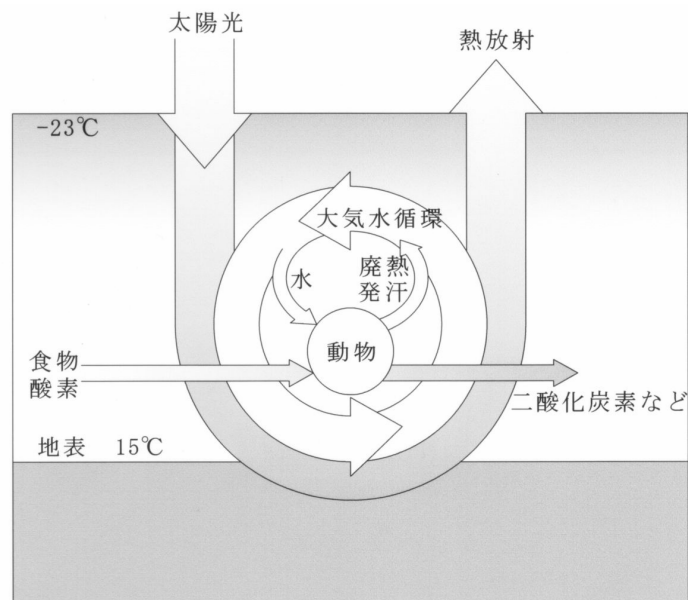


図 1.8 動物の活動

動物の活動は、必要な資源を地球環境から取り込んで、それを分解して地球環境に一方的に捨て去ります。その活動は開放系としての地球の機能には結びついていない「閉鎖型」です。もし地球上の生物が動物だけであれば、資源の枯渇か廃物による汚染（＝エントロピーの極大化）によって活動は終息します。

植物の活動

植物は、地球環境から二酸化炭素と水を取り入れて、光から得るエネルギーを使って光合成で炭水化物を合成します。光合成で得た炭水化物を用いて植物体は成長し、自らを維持しています。そして、光合成あるいは成長活動の結果生じた酸素や廃熱を地球環境に捨て去ります。廃熱は植物の表面から大気への伝導や水の蒸散の潜熱として地球環境に捨てられます。光合成で、 $1/6\text{mol}$ のブドウ糖 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) の生産を行うための材料は、二酸化炭素 (CO_2) 1mol と水 (H_2O) 1mol です。これに太陽光からのエネルギー $q_1 = 111.7\text{kcal}$ を得て、ブドウ糖 $1/6\text{mol}$ が生産されます。しかし、これだけでは反応は進まず、光合成反応で増加したエントロピー（廃熱）を除去するために、さらに 22.9mol もの水の蒸散と、それを行うためのエネルギー $q_2 = 240\text{kcal}$ (25°C 、蒸発熱 10.5kcal/mol の場合) が必要になります。

注目すべきは、ブドウ糖の原料として必要な水が 1mol であるのに対して、廃熱を処理するために 22.9mol もの余分な水が必要だということです。光合成にとって、水循環

が活発であることが大変重要だということがわかります。

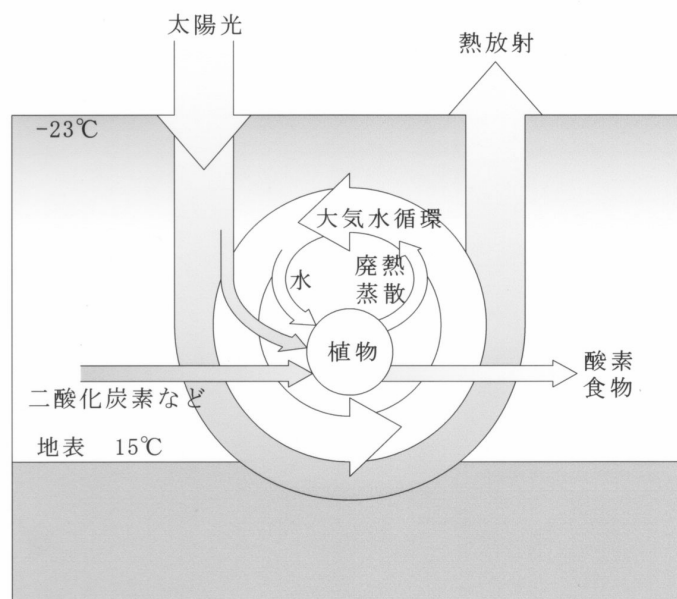
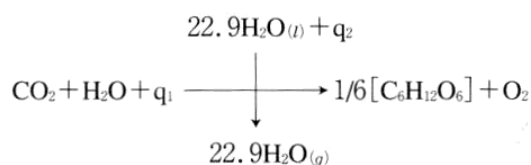


図 1.9 植物の活動

動物との大きな違いは、光合成が地球の外から供給される太陽光のエネルギーを使うことによって、開放系としての地球の機能とつながっている開放型の活動だという点です。しかし、光合成の原料である二酸化炭素については、地球の物質についての閉鎖性に制約された閉鎖型の特徴も持っています。地球上の生物が植物だけであれば、やはり二酸化炭素の枯渇によって活動は終息します。

*以下に、光合成のエントロピー論的反応式を示す。横方向の変化は通常の化学反応式を示し、縦方向には反応を行うためにシステムで消費される物質やエネルギーによるエントロピーの増大を示す。



(*l*)は液体の水、(*g*)は水蒸気を表わす。 $q_1=111.7\text{kcal}$ 、 $q_2=240.0\text{kcal}$ 。

光合成反応の具体的なエントロピー収支を以下に示す(25℃、1気圧)。

反応前		反応後	
CO ₂	67.2	1/6[C ₆ H ₁₂ O ₆]	8.5
23.9H ₂ O _(l)	399.1	O ₂	49.0
(q ₁ + q ₂)/T ₁	70.3	22.9H ₂ O _(g)	1032.8
合計	536.6		1090.3

T₁は太陽光の温度 (T₁=5000K)、単位は cal/deg。

(槌田敦『熱学外論』p.99 をもとに作成)

生態系という巧妙なシステム

これまで見てきたように、地球上の生物の構成が動物だけ、あるいは植物だけであれば、その活動は閉鎖型になり、非定常な状態を経て平衡状態＝活動の停止に至ります。地球が定常系であるのは、動物と植物によって構成された「生態系」があるからです。

生態系の第一生産者である植物は地球環境の二酸化炭素と水を摂取して、太陽光から得たエネルギーを使って炭水化物を合成します。植物からは廃物である酸素、水（水蒸気）、廃熱が地球環境に捨て去られます。水と廃熱は地球の大気水循環の流れに乗って熱エントロピーを宇宙空間に処分し、また水が供給されます。

植物によって供給される炭水化物は草食性の動物の餌になり、草食性の動物は肉食性の動物の餌になります。動物の多段階の食物連鎖の過程で有機物は徐々に分解が進み、最終的には微生物による分解に至ります。

動物や微生物は分解の各段階で植物から供給された酸素を使って呼吸することで活動のエネルギーを得ます。そして最終的に二酸化炭素と無機物、それに廃熱が地球環境に廃棄されます。廃熱は大気水循環に乗って宇宙空間に処分され、二酸化炭素と無機物は再び植物によって利用されます。

生態系とは、その中に含まれる部分系の活動によって生じる物エントロピーを、熱エントロピーと有用な資源に分解するシステムだと言えるかもしれません。

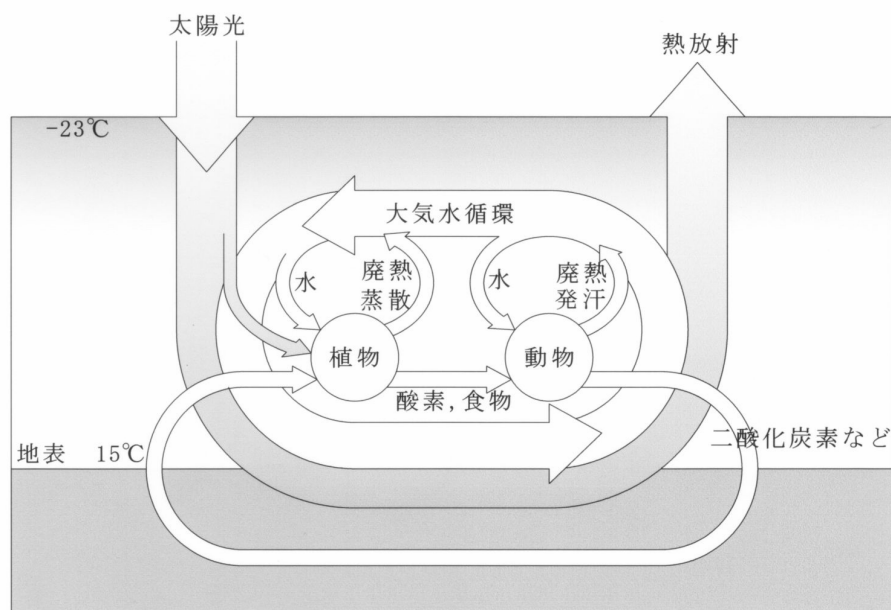


図 1.10 生態系の活動

2-6 工業生産システム

廃棄が操業を保証

安定的に操業を続けている工業生産システムも、定常系と考えることができます。工業生産は、地球環境から原料資源とエネルギー資源（主に石油）を取り入れ、製品を作り出

します。その過程で、原料資源に含まれる不純物などの廃物と廃熱を地球環境に廃棄します。

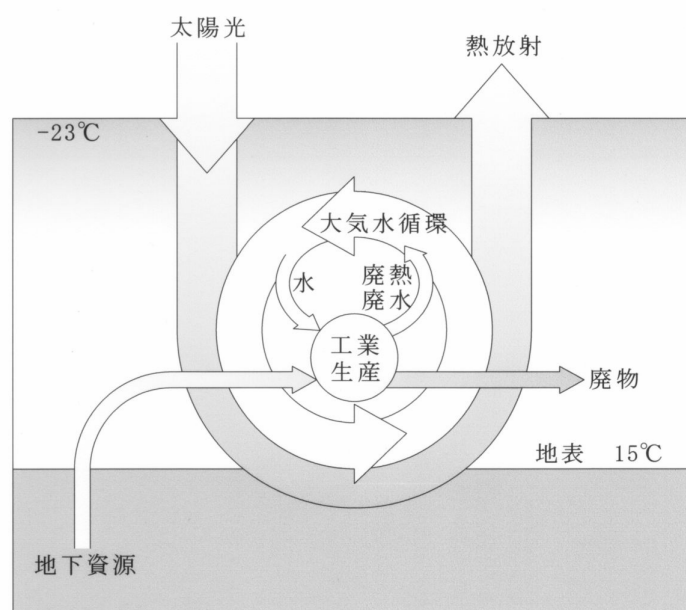


図 1.11 工業生産システム

工業生産システムは、不純物を含む原料資源（高エントロピー）を加工して純度の高い製品（低エントロピー）を作ります。しかし、あらゆる活動はエントロピーを発生させますから（エントロピー増大則）、工業生産システムから出力される製品と廃物や廃熱のエントロピーの総量は、取り込まれた資源よりも必ず多くなります。

エントロピーは物あるいは熱に付随する物理量ですから、原料資源から加工工程で取り除いたエントロピーに加えて、生産過程で新たに生じたエントロピーをも、廃物あるいは廃熱としてシステムの外（地球環境）に廃棄しなければなりません。つまり、廃物と廃熱を地球環境に廃棄することこそが工業生産システムの定常的な操業を保証しているのです。「廃棄物ゼロの工場」は理論的にあり得ません。

やがて終息する閉鎖型のシステム

工業生産に利用する原料資源とエネルギー資源は有限の地下資源です。工業生産システムからの廃熱は地球の大気水循環で宇宙空間に廃棄できますが、廃物の多くは再利用されことなく地球環境に拡散することになります（リサイクルについては後に触れます）。さらに、工業製品自体がやがては劣化してすべて廃物になります。工業生産システムとは、地下資源を再利用できない廃物に変えて地球環境に拡散するシステムなのです。

このように、工業生産システムは地球環境の有用な資源を一方的に消費し、それを廃物と廃熱にして地球環境に捨てる閉鎖型のシステムです。有用な資源の枯渇か廃物による地球環境の汚染（＝物エントロピーの蓄積）によって、やがて工業生産システムは定常的な操業ができなくなります。工業生産システムは、生態系の場合のように物エントロピーを熱エントロピーに変換する仕組みや、システムからの廃物を有用な資源に再生する仕組み

を持っていないのです。

工業生産システムは閉鎖型のシステムですから、人間の歴史に比べても短期間でその定常性が失われ、やがて終息することになります。工業生産に基づく「持続可能な人間社会」は幻想にすぎません。

しかし、工業生産システムが持続可能ではないという事実そのものは、それほどたいした問題ではありません。本当の問題はその他にあるのです。

2-7 人間社会と環境問題の本質

複合システムとしての工業化社会

これまで、生態系と工業生産システムについてその特徴を見てきましたが、現在の人間社会は生態系の一部を構成する動物としての人間と工業生産システムから構成される複合システム（以下、便宜的に「工業化社会」と呼ぶことにします）です。

動物も工業生産システムも閉鎖型の特徴を持っていますから、工業化社会はやがて地球の有用資源を食いつぶすか、自ら作り出す汚染によって崩壊することは避けようがありません。工業化社会を前提とする「持続可能な社会」を構想しても、それははじめから無理な目標であり、徒労でしかありません。

環境問題の本質

本来人間は、生態系の一員として地球の定常性を損なうことなく暮らしていました。従って、人間社会が工業生産システムを失ったとしても、地球の定常性に基づく生態系が正常に機能する限り、人間は工業化社会を超越した新たな社会システムを作れるので心配する必要はありません。

問題は、生態系も工業化社会も同じ地球環境という共通の場で活動しているということです。工業化社会はすでにいろいろな場面で、生態系の物質循環の定常性に大きな悪影響を与え始めています。環境問題の本質とは、工業化社会が生態系を有毒物質の拡散で汚染し、生態系の物質循環を破壊していることです。

このまま工業化社会が肥大化を続け、その破局的な終焉を迎えたとき、後に残された地球環境と生態系は徹底的に汚染され、傷ついている可能性が高いと考えられること、そのことが問題なのです。

環境問題の諸相

環境問題をもう少し具体的に見ておくことにします。

工業化社会は、もともと地球の生態系になかった地下資源を掘り出し、あるいは生産過程で合成した「毒物」を地球環境に撒き散らし、生態系の物質循環を狂わせ始めています。これは工業化社会による物エントロピーの増加と環境への蓄積だと考えられます。

次に、工業化社会は、かつて地球上に存在したことの無い、途方もなく強力な分解者です。工業化社会は、生態系によって地球環境に蓄積された有用な生物資源を、生態系の再生能力を超えた速さで分解して、生態系の物質循環のバランスを不安定にしています。そ

れは例えば熱帯雨林の喪失であり、過灌漑された農地の疲弊による砂漠化などです。

さらに、工業的なエネルギーの集中的な大量消費による大気水循環の攪乱、都市化をはじめとする地球表面状態の改変、大規模な地表水の流路変更など、工業化社会が生態系の定常性を阻害する要因となっている例は枚挙にいとまがありません。

2-8 環境問題と工業技術の限界

科学信仰

これまで、地球の姿や生態系、工業化社会について述べてきました。そこから導き出された結論は、使えばなくなるものを一方的に消費していけばいずれその活動は止まらざるを得ないということ、そしてその後には廃物による汚染が残るという、あたりまえの結果です。

そんなあたりまえのことがなかなか理解されないのは、産業革命以来、工業技術が実現してきた数々の実績に目を奪われて、環境問題についても「いずれ科学技術が解決してくれる」という、裏づけのない漠然とした期待、「科学信仰」がこの社会にあるからでしょう。また、科学技術があまりにも細分化して、個別分野の技術開発に埋没した結果、全体像を見失っている現在の科学技術の危機的な状況もあります。

環境問題の本質とは、工業化社会という閉鎖型のシステムが資源を一方的に消費して地球環境に物エントロピーを増加させ、地球の定常性を破壊しているということです。「閉鎖系のすべての活動はエントロピーを単調に増加させる」という熱学の法則は、環境問題を工業技術で解決することができないことを示しています。

どんなに高度な工業技術をもってしても、エントロピーを減らすことは絶対にできません。これは「やってみなければわからない」問題ではなく、すでに結論の出ている問題なのです。私たちはまず、この「事実」を受け入れることから環境問題に対処する方法を考えなければなりません。

人間の存在が原因なのではない

現在の環境問題の原因は、肥大化した工業生産システムの存在にあります。そして、環境問題は工業技術では解決することができません。ですから、対処の方法はほとんど自明です。

第一に、原因である工業生産システムを段階的に縮小していくことです。

そして、これまで工業生産システムによって傷つき、失われた、地球の定常性を保証している最も基本的で重要な仕組みである大気水循環と生態系の物質循環を回復し、さらに豊かなものにしていくことです。

ここで重要なことは、工業化社会という人間社会の特殊なシステムが環境問題の原因ではあっても、それは人間の存在そのものが原因ではないということです。生態系の一員として人間が積極的にかかわりを持つことによって、生態系の物質循環はさらに豊かになる可能性をもっているのです。

生態系を豊かにする中で、それに見合った豊かさを獲得すること——このことが唯一、

持続的な人間社会を保証することにつながります。

2-9 「環境技術」は有効か

現在、環境問題の存在はすでに広く認知されています。環境問題を改善するためにいろいろな動きがあるのも事実です。ここでは、現在行われている環境問題への取り組み、そのための技術（以下、「環境技術」と呼ぶことにします）について少し考えてみます。

対症療法の「環境技術」

現在行われようとしている環境対策には、例えば地球温暖化対策として、二酸化炭素の排出量を削減する目的で導入されている石油代替エネルギー（発電）技術や、二酸化炭素回収技術というようなエネルギー関連技術があります。また、有限の鉱物資源を循環利用しようとするリサイクル技術もあります。

これらは基本的な工業的生産構造はそのままにして、さらに工業的な環境技術を導入することで問題の解決を図ろうとする対症療法です。現在考えられている環境技術のほとんどすべてがこのタイプの工業的な技術によるものです。

環境問題は工業技術では克服できない

すでに見てきたように、工業生産システムは閉鎖型のシステムです。たとえそれが環境技術であろうと、この基本的な特徴は変わりません。環境問題の「解決」のために環境技術という工業生産システムを導入しても、それが新たな資源消費を生み、環境にエントロピーを付加することになることは変わりません。工業生産システム全体で見れば、既存のシステムに新たに環境技術を実現するためのシステムが加わることによってさらに資源消費を増やし、結果として廃熱と廃物の増加を加速することになります。

工業生産システムの持つ基本的な特徴に起因する環境問題を工業技術によって克服しようとする試みは明らかに論理矛盾であり、本質的な問題解決にはつながりません。それは冷静に考えればしごくあたりまえの結論です。

以下、もう少し具体的に検討することにします。

2-9-1 工業的リサイクル

「環境技術」の中で、有用資源の物質循環を実現しようとする試みに工業的なリサイクルがあります。この工業的なリサイクルを生態系の物質循環を比較してみると、そこには致命的な欠陥があることがわかります。

廃物を原料とするが

工業的なリサイクルは、それ自身が一つの工業生産システムです。通常の工業生産システムとの違いは、一度工業生産システムを通過して、製品として社会に流通した後の廃物を原料資源として使用する点だけです。

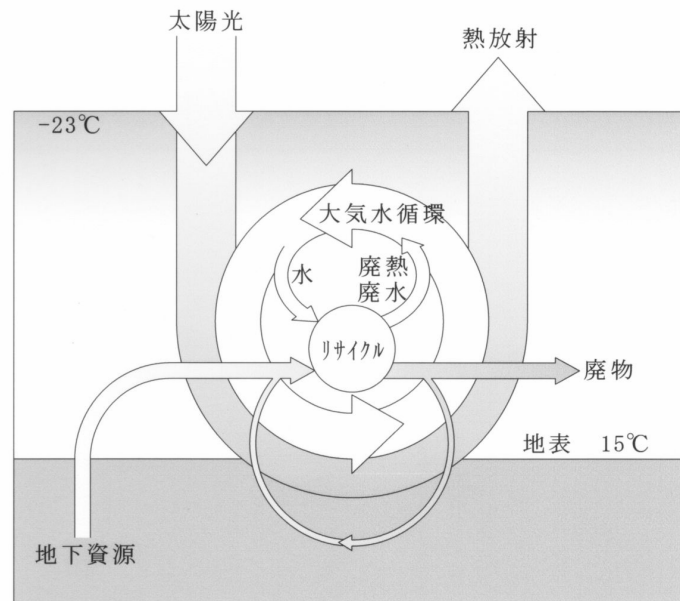


図 1.12 工業的リサイクル

廃物は一般的にエントロピーが高く、また近年の高度な工業生産システムで製造された製品は材質が極めて多種であり複合材料も多く、しかも微細な構造をもっています。そのために廃物を再資源化する工程は非常に手間の掛かる複雑なものになります。それは再資源化の工程で新たに投入するエネルギー（資源）や追加資源が多くなることを意味しています。

例えばプラスチックには、外見上からは判断できませんが多種類の樹脂が混入しており、大量のエネルギーや追加資源を投入して苦労して再資源化した樹脂原料は低品質の製品に再生されるだけです。

また、再資源化できるものは廃物の一部分であり、残りは再び廃物になります。この再度廃物になったものは非常にエントロピーが高く、環境中に物エントロピーとして拡散して環境を汚染していくことになります。

さらに、再生資源から作った製品の多くは高コストで、財政補助を受けなければ市場競争力がありません。これは工業生産過程として考えた場合、リサイクル製品製造工程の方が通常の工業生産工程よりも多くのエネルギーと追加資源を消費し、それだけ大量のエントロピー（汚染）が発生していることを示唆しています。

環境問題改善のためという名目で、国や自治体が高価なリサイクル製品を購入することは馬鹿げたことなのです。

エントロピーの拡大システム

一般的に、エントロピーの高い廃物から有用資源を回収する過程と、原料資源から同じ有用資源を製造する過程を比べると、前者の方がより多くのエネルギー（資源）を消費し、より多くのエントロピーを排出すると考えられます。つまり、工業的リサイクルとは大量のエネルギー（資源）と追加資源を浪費してエントロピー（特に物エントロピー）を拡大

するシステムなのであって、地球上に物エントロピーを残さない生態系の物質循環とはまったく違うものなのです。

経済的に見て、エネルギー資源を消費してでも廃物からの再資源化をしたほうが良いのは、エネルギー資源が原料資源に対して圧倒的に余っている場合です。この場合、原料資源の「希少性」からその価格が高騰していれば、相対的に非常に安価なエネルギー資源を大量投入して廃物から有用資源を回収することに経済的な意味が生じます（再生資源のほうが安価になる）。しかし、現段階では回収資源の価格は例外なく高く、経済的に見ても工業的リサイクルの必然性は全くありません。

エネルギー資源を大量に「消費」する工業的なりサイクルが、通常の工業生産システムと同様に、エネルギー資源が枯渇することで定常的な活動を維持できなくなることは明らかです。

工業的なりサイクルは生態系の物質循環とはまったく別もので、あくまでも工業生産システムの一つであり、閉鎖型の活動なのです。むしろ廃物を扱うために通常の工業生産システム以上に汚染を作り出すと考えられます。

何が有効で何が無謀か

ここで留意すべきなのは、かつて廃品回収業として成立していたリサイクル、例えば屑鉄、銅、アルミなどの回収業のことです。これらの廃物は単純に溶解することによって再利用が可能で、原料資源から新たに製品を作るよりも投入エネルギー（資源）も発生するエントロピーも明らかに少なく、有効なりサイクルだったと言えます。このようなリサイクルは経済的に見ても価値があり、近年政策的に行われている無理なりサイクルとは一線を画すものです。

問題なのは、現在、行政主導で政策的に行われている、環境問題の本質を見失った無謀なりサイクルです。それらは例外なく、高コストで低品質の再生製品しか作れないために市場競争力がなく、廃物は溜まる一方です。需要がないのに大量の石油を投入して収集したあげく、野積みになれ放置された古紙の山は、目的は環境問題を改善することだという視点の忘れた今日のリサイクルを象徴的に示しています³⁾。

註 3) 最近では少し事情が変わって、発展途上国の古紙をはじめとするリサイクル資源に対する需要拡大によって、国内のリサイクル資源のストックは減少傾向にあるようです。しかし、これは本質的な問題解決ではなく、形を変えた新しい公害輸出だと考えられます。

2-9-2 自然エネルギーの工業的利用

京都議定書の不確実な前提

2005 年 2 月に京都議定書が発効しましたが、その前提となる環境問題に対する科学的な認識には多くの問題点が含まれています。

議定書で各国に排出量削減が義務付けられた二酸化炭素は、もともと生態系に存在しなかった工業起源の廃物（強い毒性を持つ重金属化合物や化学物質、核廃物など）とは異な

り、問題の少ない物質です。二酸化炭素は生態系を取り巻く地球環境にもともと存在する物質であり、生態系の第一生産者である植物にとって有用な資源で、生態系の物質循環を阻害するものではありません。むしろ二酸化炭素の大気中の濃度の上昇は光合成を活発にするものです。

議定書が問題視している二酸化炭素の温室効果が気候に与える影響も、その科学的妥当性ははなはだ疑問の多いところです。

環境問題という視点からは、問題なのは二酸化炭素の排出量の増加そのものではありません。石油をはじめとする炭化水素燃料の燃焼量が工業生産システムの規模を反映していると考えられることと、その燃焼熱が地域的に偏在していることで地球の大気水循環が攪乱されて異常気象の原因になるのではないかとということです。

自然エネルギーは工業製品

ところで、京都議定書の批准～発効を追い風に、石油をはじめとする炭化水素燃料の燃焼量を減らして「温暖化を防止する」という目的で自然エネルギーの利用が注目されています。先に触れた工業的なリサイクルが「物質循環の実現」を目指した技術であるのに対して、こちらは工業的なエネルギーを太陽光を起源とするエネルギー（太陽放射や風力など）によってまかない、工業生産システムを「開放型にする」試みだと考えられます。

現在進められようとしている主要な自然エネルギーの利用法は、太陽光発電と風力発電でしょう。しかしながら、太陽光を起源とする自然エネルギーの工業的な利用は、自然エネルギーを利用するための施設自体が既存の工業生産システムに依存しているという致命的な欠陥を持っています。これらの発電施設はエネルギー資源（主に石油）と原料資源を使って製造される工業製品ですから、自然エネルギー利用システムはそもそも開放型のシステムにはなり得ません。もくろみは最初から破綻しているのです。

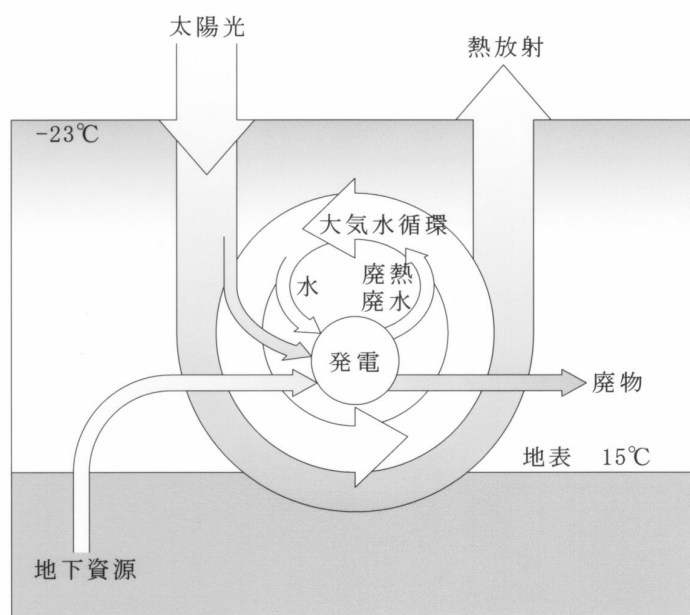


図 1.13 自然エネルギー発電

土地と資源を浪費する巨大設備

問題はそれだけではありません。自然エネルギーを利用するためには巨大な設備の建設が必要です。

例えば太陽光発電は、太陽光の一部を半導体を使って直接電気として取り出す装置です。実験室段階では太陽光エネルギーの 20%程度を電気に変換することができるとされていますが、実際に屋外に設置された場合の太陽光発電の実効変換効率は 1%のオーダーがせいぜいだと言われています。このことは 1980 年代の太陽熱発電⁴⁾ の失敗からの重要な教訓だったはずですが、愚かにも同じ過ちが繰り返されようとしています。

註 4) 太陽熱発電とは、太陽光を集めてこれを熱源として蒸気タービンを回して発電する装置のこと。旧サンシャイン計画で、香川県仁尾町において NEDO によって行われた実証試験の結果、その稼働率はタワー集光方式で年間 14 日、曲面集光方式で年間 6 日だった。定格出力に対する実効効率はタワー集光方式で $14/365=1/26$ 、曲面集光方式で $6/365=1/61$ ということになります。

太陽光発電によって単位電力量を得るために投入される石油エネルギー量は、既存の火力発電に比べて少なくとも 3 倍程度と言われています（室田武『新版 原子力の経済学』pp153-154）。燃料として石油を消費する火力発電よりも燃料として石油を一切使用しない太陽光発電の方が多くの石油を消費するのはなぜなのでしょう。

太陽光発電は、発電量が太陽光を受ける面積に比例する「土地集約」的なシステムです。日本のエネルギー消費量は国土のすべての平地が太陽光から受け取るエネルギーの 4%程度（『地球環境・読本』p.70）と言っていますが、もし太陽光発電でエネルギー消費量のすべてをまかなおうとすれば、実効効率を高めに見積もって 4%と仮定しても、実に日本のすべての平地を太陽光発電パネルで覆い尽くさなければなりません。過酷な気象条件に耐えて、しかもこれほど大規模な発電施設を作るためにはいったいどれほどの資源を投入することになるのか。

発電量に対する設備の巨大さは、致命的な欠陥です。この巨大な設備を作るために太陽光発電では莫大な石油が消費されるのです。

自然エネルギーの工業的利用は環境問題を悪化させる

一般に、自然エネルギーはエネルギー密度が低いために、既存の発電設備に比べて単位発電量当たりの発電施設が圧倒的に大きくなります。石油火力をはじめとする工業的な発電設備では、設備を大きくするとスケールメリットから単位発電量当たりの設備は小さくなると考えられます。しかし、自然エネルギーを利用する場合は「土地集約」的な装置なのでスケールメリットが働かず、逆に発電設備が大きくなると巨大な構造を支えるために単位発電量当たりの投入資材が大きくなるのです。さらに、自然エネルギーという常に変動するエネルギーを利用するためには巨大なエネルギー溜めも不可欠となります。

現実の自然エネルギー利用システムは、エネルギー（資源）と原料資源を浪費するシステムでしかありません。これは更なる工業生産システムの規模拡大なしには実現できませ

んから、全体として工業起源の廃熱と廃物をさらに増加させる（＝環境問題を悪化させる）ことになるのです。

以上、現在の環境技術が目指している「資源の循環（リサイクル）」と「開放型のエネルギー供給システム」について検討してきました。いずれもその理論的な破綻は明らかであり、これ以上の検討は必要ないでしょう。

2-10 環境問題にどう取り組むか

基本的な方向

ここで、私たちはどう環境問題に対処していけばよいのか、その基本的な方向について考えてみます。

すでに見てきたように、環境問題とは閉鎖型の工業生産システムの本質的な特性によって、生態系の物質循環が汚染され、傷つけられていることです。環境問題は工業的な技術によっては解決できない問題であることがわかりました。

生態系の一部を構成する人間社会が持続可能であるためには、基本的には人間社会は生態系の物質循環の枠内で資源を獲得し、また廃物は生態系で無理なく、そして有効に処理されるように廃棄することが必要です。さらに、人間社会が持続的に豊かであるためには、生態系の定常性を維持しつつ、生態系全体が豊かになるように人間社会が働きかけていくことが必要です。

当面の課題

それでは、現在の危機的な状況を克服して、持続可能な人間社会に到達するためには何をなすべきでしょうか。

まず、生物としての人間の生存に必要な工業製品の製造を中止して、工業生産システムの絶対的な規模を縮小することです。同時に、その廃物が生態系の物質循環の中で処理できず、環境に深刻な汚染をもたらす工業生産システムを廃止し、人間社会の物質循環を生態系の物質循環に無理なくつなげていくことが必要です。

公共事業では、生態系の物質循環を回復し、さらに豊かにするための基盤整備を行うことが必要です。例えば、都市機能を優先して行われてきた収奪的な利水システムや都市下水道の一部と化した都市河川を見直し、流域生態系との有機的な物質循環の担い手としての本来の水循環を回復することが必要です。

工業化以前の農業は生態系の物質循環の中で営まれる「開放型」の産業でしたが、現代の農業は工業的なエネルギーや物質の大量消費によって支えられています。この工業化された農業＝「閉鎖型の農業」を、本来の生態系の物質循環に依拠した「開放型の農業」に戻していくことも必要です。

特に、人間社会が今後最初に遭遇する最も深刻な問題である世界的な食糧供給の絶対量の不足に備えて、この農業構造の建て直しは当面の焦眉の課題です。

§3 主な環境問題

このセクションでは、現在の社会が抱える主要な環境問題を具体的に示します。

3-1 栄養循環の直接的な破壊

直接的な環境破壊

人間を含む地球生態系において、その豊かさを保証しているのは栄養循環における第一生産者である光合成生物の豊かさです。この光合成生物の生育環境を悪化させることは、生態系を巡る物質循環（栄養循環）の豊かさを破壊する最も直接的で重大な環境破壊です。

森林の回復速度を超えた過剰な伐採、焼畑の拡大、乾燥農法や過放牧がもたらす塩害や砂漠化による農地の破壊、都市化（道路、インフラ建設も含む）による植生の破壊などがこれにあたります。

栄養大循環の破壊

一般に、地球上の物質は重力によって重いものほど低いところに向かう傾向があります。生態系における物質循環もこれに従います。生態系を巡る物質は重力によって徐々に高所から低所へ、そして海洋の深部へと向かいます。

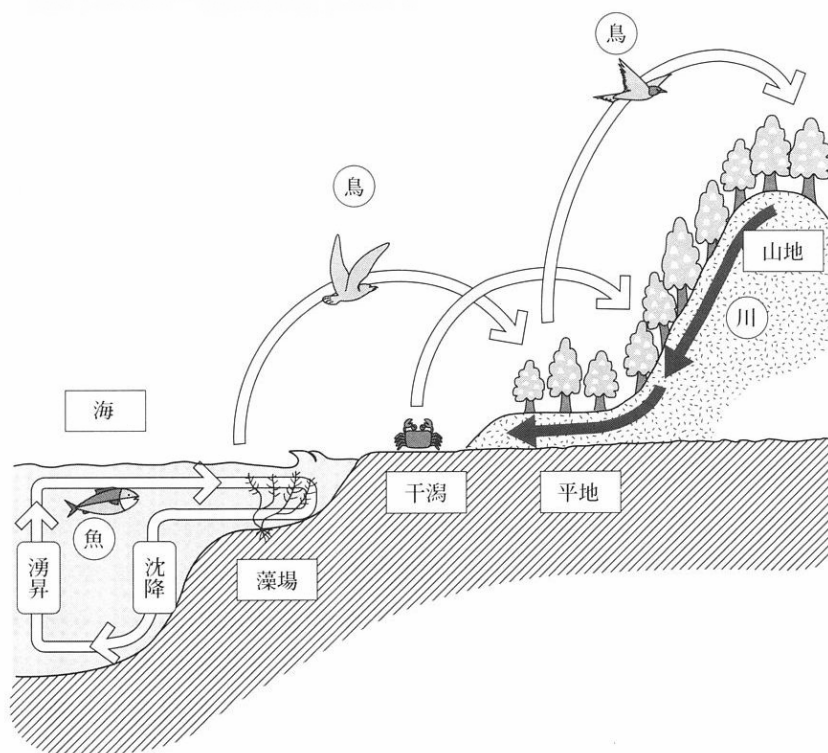


図 1.14 栄養の広域循環 (槌田『新石油文明論』 p.95)

単純に考えれば、陸上生態系を構成している物質は水に洗い流されて、陸地は養分を失って砂漠化するはずですが。植物を起点とする陸上生態系は短命なものになるはずですが、

実際にはそうっていないのは生態系を巡る巧妙な機構があるからです。

海洋では、地球の自転あるいは海水の密度差によって湧昇流が発生します。重力によっていったん海洋の深部に降下した栄養分は、この湧昇流によって再び海洋表層に運び上げられて豊かな海洋生態系ができるのです。この栄養分は魚などの海棲生物を食料とする鳥類によって摂取され、排泄物として再び陸上に還流します。また、遡河性の回遊魚の存在も無視できません。

海洋汚染による海棲生物の棲息環境の悪化、人工海岸線の増加や干潟の激減による鳥類の棲息環境の悪化、遡河性回遊魚の遡上を妨げるダムや堰などの河川構造物の建設や沿岸での大量捕獲——これらの人為による栄養の大循環の破壊は重大な環境問題です。

世界貿易の拡大と農地破壊

ここで、栄養循環における生物としての人間の役割を考えてみます。

雑食性の大型獣である人間は、他の動植物を食べて糞尿を「生産」します。生態系の物質循環から見れば、この糞尿を作り出すことが人間の最も重要な役割です。

本来、人間の糞尿は昆虫などの小動物や微生物によって無機物と廃熱に分解され、再び光合成生物に摂取されることによって陸上生態系を豊かにするものです。ところが現代の人間社会、特に工業化・都市化の進んだ社会では、この栄養循環が徹底的に破壊されています。

産業の「国際分業」によって世界市場が形成され、食料は生産された地域とは異なった地域に長距離かつ大量に移動しています。食糧を大量に輸入する国は相対的に工業化が進んでおり、人間は臨海部の沖積平野の都市に高い人口密度で暮らしています。ここで人間に消費された食料は糞尿とはなるものの、都市の下水道システムを通して陸上生態系の栄養循環から切り離されて海洋に投棄されているのです。

生態系の栄養循環の定常性を維持するためには、これらの糞尿は食糧生産地の農地に還元すべきものです。しかし、現実には生産地から遠く離れた国において、陸上生態系に還元されることすらなく、無為に海洋に投棄されています。

当然の結果として生産地の地力は低下し、これを補うために補給される化学肥料の多投によってさらに土壌は疲弊し、砂漠化が加速されることになります。一方、食料の大量輸入国では、生態系の物質循環を無視した大量の糞尿処理によって海洋が汚染されたり、富栄養化することになります。

生態系の栄養循環において人間の生産する最も重要な生産物である糞尿が、このように無意味に投棄されている現状は技術の貧困と言うよりほかはありません。また、このような事態を放置したままで行われている農業生産物の世界市場における大量取引は、世界中の農地破壊の主たる原因です。

3-2 物エントロピーの蓄積

人間社会の活動、特に工業的な生産活動に起因する「ごみ問題」は地球の物質循環における深刻な問題です。

生態系に存在しなかった汚染の蓄積

すでに述べたように、地球は物質については閉鎖系です。従って、地球の生態系によって熱エントロピーに変換できない物質的な汚染を、生態系の活動の場である地表に蓄積することは重大な環境破壊です。

もともと地球の生態系には存在せず、工業生産によって人工的に合成された膨大な化学物質や、毒性の高い重金属等（第二種特定有害物質／カドミウム、鉛、六価クロム、水銀、全シアン、砒素、セレン、ふっ素、ほう素）、そして原子力発電によって作り出される核廃物などがこれにあたります。

毒性が生態系を傷つける

これらの物質は栄養循環や水循環を通して生態系に取り込まれ、物理化学的な毒性や遺伝的な毒性として発現し、生態系を傷つけています。

また、大気中に排出される粒子状物質や気体廃棄物などが酸性雨（霧）の原因となって森林に影響を及ぼしていることは、従来から指摘されています。さらには、対流圏上層が汚染されることによる大気循環への影響も懸念されます。

3-3 水循環の破壊がもたらす砂漠化

水循環の破壊は、栄養循環の直接的な破壊とも密接に関係しています。

農業による砂漠化

森林を伐採して乾燥農法（乾燥地で灌漑を行わない農法）による大規模農地を作れば、地表が乾燥して水の蒸発量が減少します。大規模な焼畑による農地の確保も同様です。また、乾燥地の灌漑された農地では広範囲で塩害が発生しています。化学肥料の多投による土壌の団粒構造の破壊も農地の保水能力を低下させるもので、少しの雨で養分が洗い流されることになります。

これらの農地はやがて耕作不適地となって放棄され、砂漠となっていきます。いったん砂漠化すると太陽放射に対する地表の反射率が大きくなり、水の蒸発量が減ることとの相乗効果で上空は安定した高圧帯となり、ますます雨が降らなくなります。

都市による砂漠化

都市化の進行に伴って都市部の地表は不透水性になっています。ここでは降雨は地表には浸透せず、大規模下水道を通して短時間で海へ捨て去られます。人口密度の高い都市を養うためには遠隔地に用水ダムが建設され、収奪的に都市に給水が行われることになります。

ダムに大量の水を溜め込めば水質が悪化し、ダム下流の河川流量も減少します。こうしてダム建設地周辺の水循環は破壊され、同時に生態系も破壊されます。

巨大なダムは空気中に大量の水蒸気を供給します。水蒸気を含んで軽くなった空気は上昇気流となり、さらに周辺から水蒸気を含んだ空気を吸い寄せることになります。もしも

周辺に半乾燥地帯があれば、砂漠化の進行を助長することにもつながります。

ダム～連続堤による治水システムは、大量の雨水を速やかに海へ流し去ることを目的としたものです。河川断面積を大きくし、蛇行した河道を直線的に変更して動水勾配を大きくするとともに、河道をコンクリートで被覆することで表面粗度を小さくします。こうした構造物は川と堤内地との水循環・物質循環を遮断するもので、その結果として生態系の栄養循環は貧弱なものになります。

3-4 大気循環への影響

太陽放射に匹敵するエネルギー消費

地球の夜の側をつないだ衛星写真を見たことがある方も多いと思います。そこに浮かんだ光点の密度分布は、人工的なエネルギー消費量の分布を反映していると考えられます。衛星写真の光点の分布に対応して人工的な熱源が地上に分布しているのです。

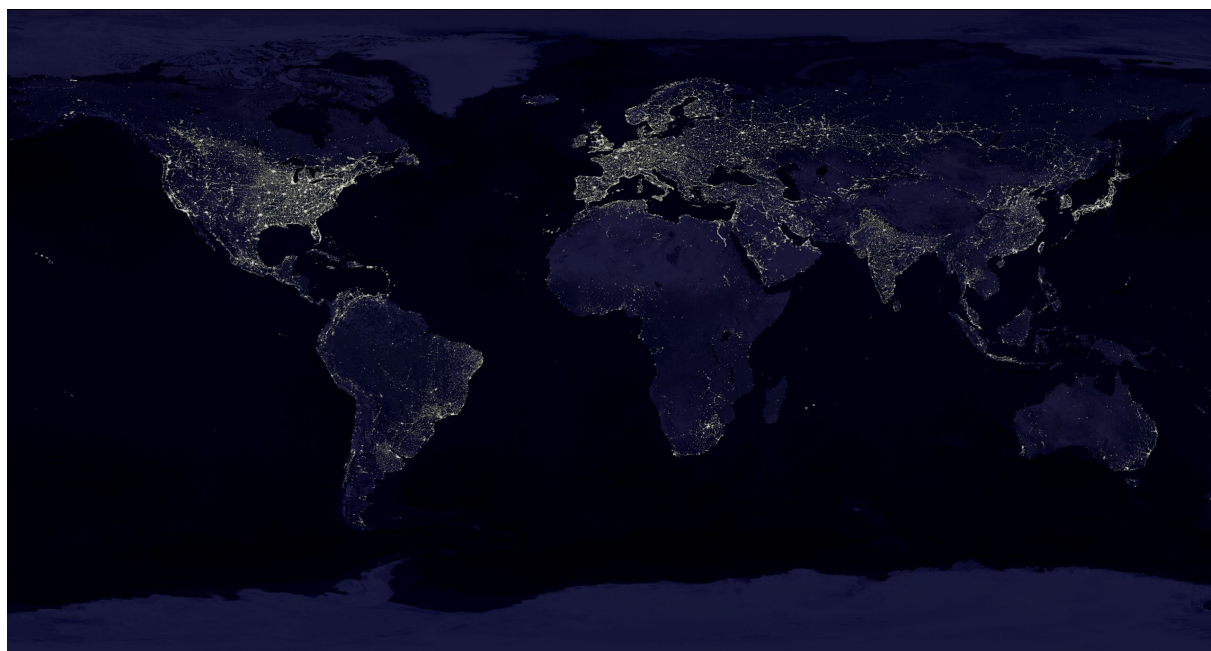


図 1.15 夜の地上を照らす人工光源

今日、先進工業国の大都市では、太陽放射によって地表に供給されるエネルギーに匹敵するほどの人工的なエネルギーが消費されています。人工の熱源による大気への運動エネルギーの供給とその熱源の偏在は、大気循環に何らかの影響を及ぼしている可能性が高いと考えられます。

対流圏上層の大気の汚染

大気汚染も気候のシステムに大きな影響を及ぼすと考えられます。中でも対流圏上層の汚染——炭化水素燃料の燃焼による排気ガスに含まれる液体や固体の微細な粒子状物質、大規模火災による煙や砂漠化の進行に伴う微細な土の飛散など——は深刻な結果をもたら

します。

対流圏上層の大気が汚染されると、可視光線に対する大気の透明度が低下して地表に届く太陽放射が減少しますが、反対に対流圏上層では太陽放射の吸収量が多くなります。その結果、対流圏の気温の垂直分布が変化して、地表と上空の気温差が小さくなります。

対流圏では上空ほど低温であることが大気循環（大気の対流運動）の原因の一つですが、対流圏上層の大気が汚染されるとこの大気循環が弱まることになります。大気循環が弱まることは、地球の気候のシステムに重大な変化を来たすと考えられます。さらに、熱機関としての地球システムの大気水循環による熱エントロピーの廃棄能力が低下すれば、地表付近は熱平衡状態に近づいていきます。

地表の改変による太陽放射に対する反射率の変化や水循環の大規模な改変などとともに、人工熱源の偏在や大気汚染が気圧配置や大気循環に影響を及ぼして気象攪乱の誘因になっている可能性は高いと考えられます。

参考図書

- 1) 丸山茂徳、磯崎行雄：生命と地球の歴史、岩波新書 543（1998）
- 2) 熊澤峰夫、丸山茂徳 編：プルームテクトニクスと全地球史解説、岩波書店（2002）
- 3) 槌田敦：資源物理学入門、NHK ブックス 423（1982）
- 4) 小野周、川宮信郎、玉野井芳郎、槌田敦、室田武編：エントロピー、朝倉書店（1985）
- 5) 槌田敦：熱学外論、朝倉書店（1992）
- 6) 槌田敦：新石油文明論、農文協（2002）
- 7) 別冊宝島 101 号「地球環境・読本」、JICC 出版局（1989）
- 8) 室田武：新版原子力の経済学、日本評論社（1986）