

文明の生命システム論からみる地球環境保全

——エネルギー・資源・情報の流入・流出に関する考察——

川 村 邦 男

(受付 2014 年 10 月 29 日)

1. はじめに

環境問題は複合的な問題であり、環境問題の全体像をつかむことが必要である。環境問題における環境はヒト社会に対する環境であり、すなわち文明に対する環境である。これまでに著者は、生命システムを比較することによって文明の特性の一面を明らかにすることを試みてきた。この結果、文明とは生命システム的一种であり、環境問題解決の糸口を与える手がかりが得られることを知った^{1,2)}。細胞型生物と文明とを比較すると、細胞型生物および文明は、情報の増幅、機能と情報とを対応づける仕組み、および、新しい機能をシステムに保存する仕組みを持つ。これらの特徴は、いわば生命システムの情報中枢系であり、細胞型生物と文明には生命システムとしての相似が認められる。情報中枢系を持つことは、細胞型生物と文明を、生態系などの他の生命システムや非生命システムから区別する、明確な質的違いである。さらに、教育機関と研究開発機関は文明という生命システムの情報中枢系の仕組みであり、環境問題に対する教育機関と研究開発機関の重要性を指摘した¹⁾。既報の研究では主に文明の情報中枢系に焦点をあてたが、文明は生命システムであるからエネルギー・物質が流入・流出する非平衡状態で成立する²⁾。さらに、情報も入出するシステムである。すなわち、環境問題に対する指針を得るためには、文明に対してエネルギー・物質・情報の流入・流出に関する特性を明らかにし、それらを細胞型生物と比較考察することが次の課題として必要である。

本論では、細胞型生物と文明のエネルギーと物質さらに情報の流入・流出過程を整理し比較する。さらに、これらのシステムの相似と相異に基づいて、環境問題を考察する。

2. 生命システムの分類と特徴

これまでの研究によって、生命システムを「生物、または、生物を構成要素として含むシステム」として定義した¹⁻⁵⁾。この定義によると、生物は生命システムであるが、生態系・種・文明なども生物を構成要素として含むので、生命システムとみなすことができる。様々

な生命システムの性質には相似と相異が認められる。すでにその詳細について論じた¹⁾。ここまでの考察では、生命の生命らしさを特徴付ける要件を6つにまとめた(表1)^{1,2)}。一方、最近の研究においてこれらの6要件を3要件に集約したところ、システムの生命らしさを考察するには十分に効果的であった⁶⁾。すなわち、複製・増幅する、変異する、情報と機能の対応付けの仕組みを持つ、の3要件は情報中枢系⁶⁾を持つという新しい要件(2)に集約できる。また、システムが環境に生命システムの側から働きかける性質(主体性)は、従来の6要件から演繹できるかどうかを明らかにしなければならない。すなわち現時点では生命システムの性質を評価するためには、下記の通り新たにまとめた3つの要件を用いれば生命システムとしての特徴を簡潔に議論できる。また、流入・流出するエネルギーと物質に加えて、情報の出入りを要件(1)に加えた。既報で提案した要件と本論文での要件の対応関係を表1に示す。

表1. システムが生命であるための要件の対応関係

| 既報に示した要件 | 本研究における要件 |
|----------|-------------------------|
| 代謝 | → エネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組み |
| 複製・増幅 | } → 情報中枢系 |
| 変異 | |
| 対応付け | |
| 一体性・安定性 | → 一体性・安定性 |
| 主体性 | → 主体性(必須要件かどうかを検討) |

要件(1) エネルギー・物質・情報を流入・流出する仕組みを持つ

要件(2) 情報中枢系の仕組みを持つ

要件(3) システムとしての一体性と安定性を持つ

原核生物、真核生物、多細胞生物、および文明は、いずれも情報中枢系を持ち、これらの生命システムの間には相似が認められる。細胞型生物は情報中枢系を持つ生命システムの典型例であり、上記の3要件を満たす。しかし生態系には、生態系という階層に固有の情報中枢系は認められない。ここで、文明系は生態系から発展した生命システムであると考えられるが²⁾、要件(2)を満たす点において生態系と異なる。また文明の発展に応じて文明の情報中枢系は高度化する。この点を含む様々な性質について、文明と細胞型生物との間には相似があることを明らかにした。これらに基づいて環境問題を議論した¹⁾。しかし、要件(1)および要件(3)については簡単に比較を行うにとどめた。本研究では、要件(1)のエネルギーと物質と情報の取り込みの仕組みについて、細胞型生物と文明系を比較分析する。

3. 生命システムのエネルギー・物質・情報の流入・流出

3.1 エネルギー・物質・情報の流入・流出に対する境界の役割

細胞型生物が外界からエネルギー・物質・情報を流入・流出する際には、細胞型生物と外界との境界を介して行う。そこで、第一に境界について考察する。また、細胞型生物と文明においてエネルギー・物質・情報が流入・流出する際の間接関係を図1に、全体の概要を表2に示す。境界は、生命システムの一体性や安定性に寄与する。一方で、境界は特定の種類のエネルギー・物質・情報が流入・流出する際に選別を行う。

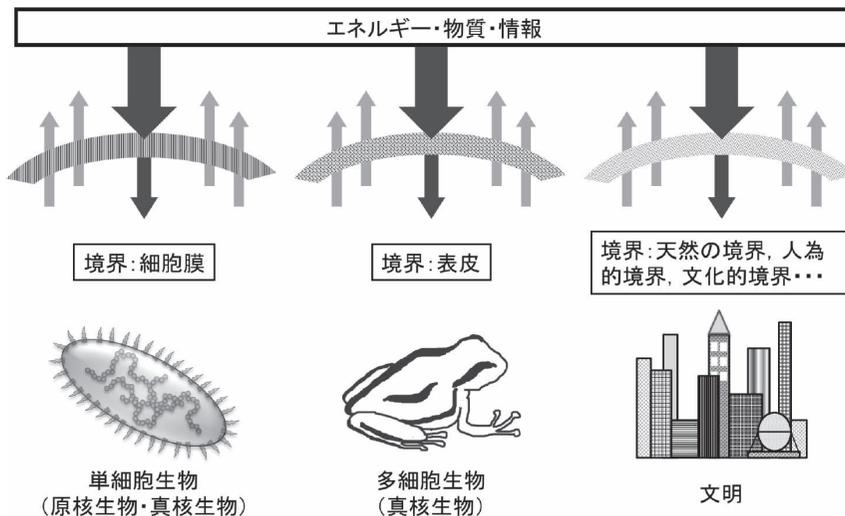


図1. 細胞型生物および文明におけるエネルギー・物質・情報の流入・流出過程と境界

表2. 細胞型生物および文明のエネルギー・物質・情報の流入・流出

| | 細胞型生物 | 文明 |
|----------|------------------------------------|--|
| 境界 | 細胞膜, 表皮 | 国境, 地理的境界, 分化, 言語, 軍隊, 政治, 経済 |
| エネルギーの流入 | 高エネルギー化合物, 光, 熱... | 化石燃料, 水力, 食糧, バイオマス, 原子力, 太陽エネルギー, 地熱... |
| エネルギーの形態 | ATP (アデノシン 5'-三リン酸), 熱, 運動エネルギー... | 熱, 運動エネルギー, 電気, 電磁波... |
| エネルギーの流出 | 低い自由エネルギーを持つ分子, 熱, 放射... | 不要物質, 熱, 放射... |
| 物質流入 | 化学物質, 生物 | 非生物資源, 生物資源 |
| 物質の種類 | タンパク質, 核酸, 脂質, 糖類... | 食糧, 無機材料, 有機材料 |
| 物質流出 | 低い自由エネルギーを持つ分子 | 廃棄物 (再利用, 埋立, 燃焼, 放置...) |
| 情報の受信発信 | 細胞膜, 化学物質, 振る舞い, 音声... | 電気信号, 音声, 電磁波... |

(1) 細胞型生物

生命システムにとっての環境はすなわち外界である。すなわち、細胞型生物にとっての環境は、温度・気圧・電磁波などの物理的環境、海水や大気などの化学的環境、どのような生物に囲まれているかという生態系に関する環境である。細胞型生物において、生命システムと環境とを分ける境界は明確である。原核生物や真核生物の単細胞生物では細胞膜が境界である（図1左および中）。多細胞生物では外皮などが生命システムとしての境界である。エネルギー・物質・情報の流入・流出はこれらの境界が第一に制御する。ここで、外界のどこまでを環境とするかは意外に難しい⁷⁾。例えば、恒温動物の腸管には大腸菌が存在するが、個体の内部に共生する生物を個体の一部として扱うか環境のどちらに帰属させるのが正しいのかは、判断し難い。このように詳しく考えると、細胞型生物においてでさえ、生物と環境との境界は曖昧な部分がある。細胞型生物は境界を通じて外部からエネルギー・物質・情報を流入・流出することは、境界が曖昧であることと矛盾しない。

原核生物では細胞膜が外界からエネルギー・物質・情報を流入・流出する仕組みを担っている。また、多細胞生物ではエネルギー・物質・情報を流入・流出するための器官が備わっている。細胞膜やこれらの器官は、エネルギー・物質・情報の流入・流出を行うための、それぞれの階層における生命システムに固有の仕組みである。

(2) 文明

文明に対する環境は、文明というヒトの上位の階層としての生命システムに対する外界を考えなければならない（図1右）²⁾。文明にとっての環境は細胞型生物と同様に、物理的環境・化学的環境・生態的環境に加えて、他の文明やヒト社会を含む環境である。以前に述べた通り文明は境界を持つが、細胞と比べるとその境界は曖昧である。文明の種類によって、あるいは時代によって、境界の曖昧さは異なる。境界は、文化や言語によるヒトどうしのつながりによって成り立つ境界、人為的な国境や城壁のような境界、および地理的な境界などによって構成される。文明の境界は文明という階層レベルに固有の仕組みである。しかも境界の仕組みや構造は、情報中枢系によって保存され制御される。すなわち、細胞型生物が様々な細胞膜の材料や仕組みをDNA配列情報として保存していることと同様である。文明の境界はエネルギー・物質・情報を流入・流出するために重要な役割を果たす。境界を持つことと、境界に関する情報は情報中枢系によって保存される点で、文明と細胞型生物は相似である。

3.2 文明と生態系との比較

情報中枢系を生態系は持たないものの、生態系には空間的な広がりがある。この点から、生態系には曖昧な境界が存在すると仮説できる。しかしこの境界は、生態系という個体の上

位の階層がもつ固有の仕組みであるとは言い難い。なぜならば、生態系の広がり範囲を決める境界は、情報として生態系内部の固有の仕組みには保存されていないからである。そもそも、生態系はその階層に固有の情報中枢系を持たない。この点で文明と生態系は異なっている。

細胞型生物と文明は、外界からのシステム維持のために必要なエネルギー・物質・情報を導入し排出する。情報の場合には使用済みの物質を排出することとは異なり、その生命システムにとって不要であるから排出するというのではない。その際に、境界はシステムを外界から分け、流入・流出するエネルギー・物質・情報の種類と量を選別する役割を担う（図1）。境界の機能や成り立ちにおいて細胞型生物と文明は相似している。すなわち、細胞型生物と文明系において境界に関する共通点は、境界の構造や機能に関わる情報が、それぞれの情報中枢系に保存され制御されていることにある。文明がヒトが含まれる生態系からスタートしたならば、文明の初期の段階では境界は曖昧であり、文明という情報中枢系を持つ仕組みが発展する過程で、境界も発達し、境界に関する情報はその情報中枢系に組み込まれていったものと位置づけられる。

3.3 生命システムで利用されるエネルギー

(1) 細胞型生物

外部からのエネルギーは化学エネルギーに変換されるとともに、生体分子の合成に消費される。植物が光エネルギーを利用する例は言うまでもなく、生物が利用するエネルギー源は多様である。また、様々なエネルギーの形態に変換されて利用される。これらのエネルギーの利用方法は精巧であり、その内容も情報中枢系によって制御される。

光エネルギーは現在の生態系において最も重要なエネルギー源である。従属栄養生物に必要なエネルギー源は、光合成を行う生物が合成した高エネルギー物質である。ただし、細胞型生物で最終的に利用されるエネルギーはアデノシン 5'-三リン酸（ATP）という高エネルギー物質に変換されて用いられる（図2左）。ATPはあらゆる生物で共通の統一された高エネルギー物質である。例えば光合成を行う生物では、光エネルギーが直接に利用されるのではなく、光エネルギーによってATPが生産され、ATPを介して生体反応の制御と生体分子の合成が行われる。従属栄養生物の場合には、エネルギーを化合物や生物として得るが、これらのエネルギー源もATPを介して利用される。生物は熱エネルギーや電磁波エネルギーの形でエネルギーを利用する場合もあるが、基本的には生物のエネルギーは化学エネルギーである。

一方、熱水噴出孔の生態系では、熱水環境下で合成される高エネルギー化合物をエネルギーとして化学合成細菌が生育し、それを基盤として生態系が構築されている。これらの生物に

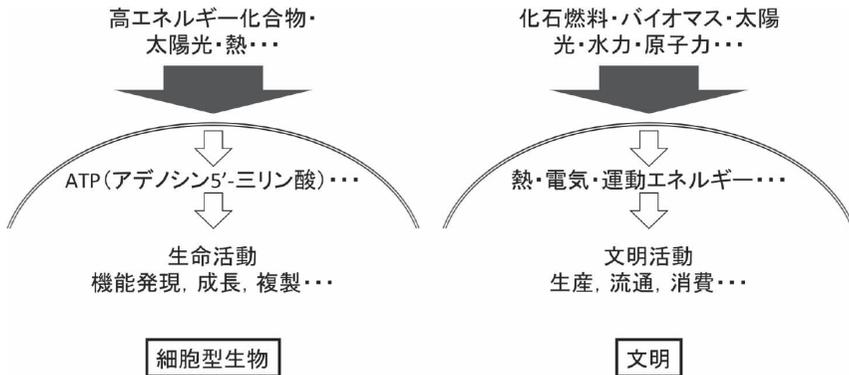


図 2. 細胞型生物および文明におけるエネルギー流入・エネルギー変換およびエネルギーの役割

においてもエネルギーは ATP に変換して利用される。多くの代謝系で ATP は生体内の合成反応そのものに付随する。すなわち細胞型生物においては、生体内では化学エネルギーが ATP を介して使われつつ、同時に必要な生体分子を生産する。このことが ATP を介して化学エネルギーを利用することの大きな利点であると思なすことができる。

エネルギーの主な使い方は代謝であるが、それ以外に多様な使い方があることは言うまでもない。恒温動物では多くのエネルギー源を消費して熱を体内で生産する。これにより、生体活動は変温動物と比べて高度化される。また、動物は運動エネルギーに化学エネルギーを変換し、音を出す生物は音のエネルギーに化学エネルギーを変換し、発光する生物は化学エネルギーを光エネルギーに変える。微生物や植物は、海流や風などの外部のエネルギーを利用する。これらは、様々なエネルギーを消費する例である。

(2) 文明

文明の要素としてのヒトは他の従属栄養生物と同様に他の生物を食べ物として導入し、化学エネルギーの形で利用する。しかし、文明は非文明社会とは比べものにならないほど大量のエネルギーと物質を利用する^{8,9)}。すなわち、文明に系外からもたらされるエネルギーと物質は、要素であるヒトが生物として生きていくために必要なのではなく、文明自身を運転するために利用されるのである。文明発祥から産業革命以降までの文明の高度化に伴って、エネルギーと物質の消費量は大きくなり、とどまることを知らない。エネルギーと物質という視点からも、ヒトは文明を構成する要素の傾向を強く持ち、文明はヒトの上位の階層の生命システムとして機能する。

文明を運転するために必要なエネルギーの種類を考察するために、文明をエネルギーの消費量の観点から 2 種類に分類する。文明 I は農業を基盤とする文明であり、文明 II は産業革命をはたした文明である。文明 I においてはエネルギー生産の多くは農業・牧畜・漁労など

に依存しており、すなわち元々は太陽エネルギーによって生産された生物資源を主なエネルギー源とする。これらの場合も、農業のような効率よい生物資源の生産法が確立されたことによって、生物としてのヒトを維持するだけでなく過剰の生産が得られる。この過剰エネルギーが文明を維持するために消費される。既に述べたとおり、文明というヒトの上位の階層にあるシステムを維持するためのエネルギーが存在することは、文明の特徴である。一方、文明Ⅱにおいては、過剰エネルギーは化石燃料に依存し、文明Ⅰと比べて膨大である。実際、先進国で1人あたりのエネルギーの消費量は開発途上国の1人あたりのエネルギー消費量よりはるかに大きく、過剰なエネルギーを利用する事実は、文明Ⅱはヒトの上位の階層であることを強く反映している^{8,9)}。文明において利用されるエネルギーは、生物としてのヒトを維持するために必要な化学エネルギーだけでなく、文明を維持するための化学エネルギー、重力ポテンシャルエネルギー、熱エネルギー、原子力エネルギー、電磁波エネルギーなどが利用される。この点において、化学反応によってエネルギーとともに物質が合成される細胞型生物と異なる。しかも、これらのエネルギーは、利用しやすいように様々な種類のエネルギーに変換される。例えば化学エネルギー、重力ポテンシャルエネルギー、核エネルギーはそのままでは利用しにくいので、生物資源の生産、電気エネルギー、運動エネルギー、熱などに変換される。特に電気エネルギーの役割は大きい。これは文明Ⅱの特徴である。

3.4 生命システムで利用される物質の流入・流出

(1) 細胞型生物

細胞型生物において化学物質はエネルギー源になり得るとともに、生物の構造や機能の発現に必要な材料として利用される。これらは、エネルギー源から生成したATPを介して合成される。不要になった材料は生物から排出される。生体を構成する機能を持つ様々な材料を大別すると、主にタンパク質、ペプチド、アミノ酸、核酸類、糖類、脂質、ビタミン類などである。熱力学的な視点からみると、これらの材料の多くは水中では安定ではない。すなわち、生体に不可欠な機能を持つ材料の多くは脱水反応によって生成するのであり、水中に長時間存在すればやがて加水分解する。例えば、核酸はリン酸ジエステル結合、タンパク質やペプチドではペプチド結合、多糖類ではグリコシド結合が、それぞれ加水分解する。すなわち生体内で、これらの物質はエネルギーと物質が流入・流出する非平衡過程の中で生成・分解される。

細胞型生物における材料の流入・流出の仕組みは多様である。そして、物質の流入・流出＝導入・排出のためのそれぞれの生命システムに固有の仕組みがある。単細胞生物では細胞膜が境界であり、それを介して材料を流入・流出する。このときの材料は、化合物や生物由来の物である。化学合成細菌は、高エネルギーの化合物を取り入れて生命活動を行う。例えば、

熱水噴出孔付近の生態系などを支える化学合成細菌は、非生態系＝すなわち熱水過程で生成する高エネルギーの有機化合物を導入して生命活動を行う。多細胞生物では、材料の流入・流出は器官によって制御される。上述の通り、生物においては、エネルギーを取り入れることと材料を取り入れることは多くの場合に連動している。すなわちエネルギー源を材料の形で導入する。また、エネルギーに関連する物質が、それ以外の機能をはたすことも例外ではない。

(2) 文明

文明において、生物としてのヒトの構造と働きを発現するためには、他の生物の場合と同じく有機物が必要である。しかし、文明それ自身の構造や機能を発現するためには、生物由来の材料だけでなくおびただしい量の天然及び人工の材料が使われる。文明Ⅰにおいても文明Ⅱにおいても、無機資源が生物資源とともに大量に利用される点は、細胞型生物にはない特徴である。文明Ⅱにおいては、化石資源はエネルギー源であると同時に、文明維持に必要な有機材料を生産することに用いられる。これらの有機材料を消費する種類と量は、第二次世界大戦以降に急速に増加した。従属栄養生物の多くはエネルギーも物質も生物の形で導入するが、文明Ⅱでは簡単な無機化合物からエネルギーを用いて様々な材料を作る。この点において、文明Ⅱは従属栄養生物よりも化学合成細菌や光合成細菌などの独立栄養生物と似ている。

3.5 生命システムで利用される情報の流入・流出

生物システムに流入・流出するカテゴリーとして、エネルギーと物質に加えて情報も大事な要素である。細胞型生物においては、情報の流入・流出は様々な形態を介して行われる。例えば、細胞膜によって化学物質や外界の生物が何であるかを認識する。また、電磁波・熱などの様々な物理的環境を認識する。このような仕組みは、多細胞生物ではより複雑化・高度化している。例えば、感覚器官による認識は情報を得る重要な仕組みである。

一方、文明は文明固有の情報受信と発信の仕組みを持つ。文明Ⅱでは、その手法は非常に多様である。文明においては文明自身が固有の手法で得る情報は、個人が得る情報と比べて量と質の点で圧倒的に豊富であり、文明の進む方向に大きな影響を与える。情報受信と発信は情報中枢系と強力に結びついて、「文明はヒトに対する上位の階層である」＝「ヒトの要素化」に大きく寄与していると考えられる。従って、文明がもつこの特徴は環境問題を考える上ではきわめて重要である。

4. 細胞型生物と文明におけるエネルギーと物質の流入・流出に関する相似と相異

4.1 エネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みと情報中枢系の関係

細胞型生物と文明は、周囲の生物を含む環境との相互作用を土台としてエネルギー・物質・情報を流入・流出する。流入・流出の仕組みは情報中枢系に情報として保存されている。一方で、これらの生命システムの情報中枢系は、エネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みによって維持される。すなわち、要件(1)エネルギー・物質・情報の流入・流出と要件(2)情報中枢系は、これらのシステムが形成する段階において、相互依存する関係にある(図3)。確立された後には、情報中枢系によってエネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みは制御される。従って、生命システムのエネルギー・物質・情報を流入・流出する仕組みは、生命システムの出現過程において極めて重要である。またこれらの2つの要件の関係は、生命の起源の問題における、「DNAが先かタンパク質が先か?」あるいは「情報が先か機能が先か?」という問題と似ており、「タマゴとニワトリの関係」にある^{10,11)}。従って、エネルギー・物質・情報を流入・流出する仕組みの進化あるいは発展は、生命システムの出現と発展を決定づける重要因子である。

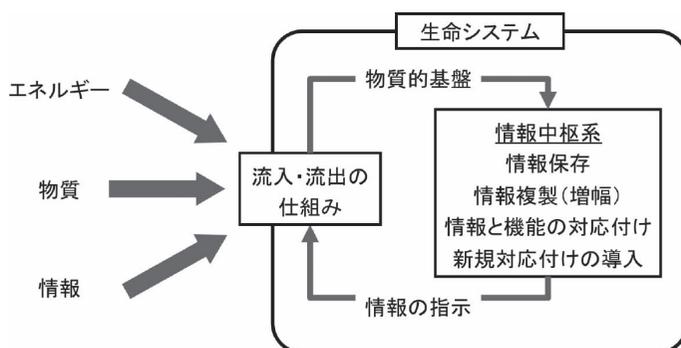


図3. 生命システムにおけるエネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みと情報中枢系との関係

細胞型生物と文明のどちらにおいても、エネルギーと資源が枯渇する危機的過程があった。それらの危機は、新しいエネルギーや物質の利用を可能にする生物進化および文明における発見・発明によって克服された。この事例として、細胞型生物における光合成の獲得と文明におけるアンモニア合成法の獲得を比較しつつ論じた。ここでは、生物進化と文明の発展において、それ以前のシステムでは使用していなかったエネルギーや資源を利用することで、システムが質的に変化してきた事例を以下にまとめる(図4)。これらの事例は、エネルギー

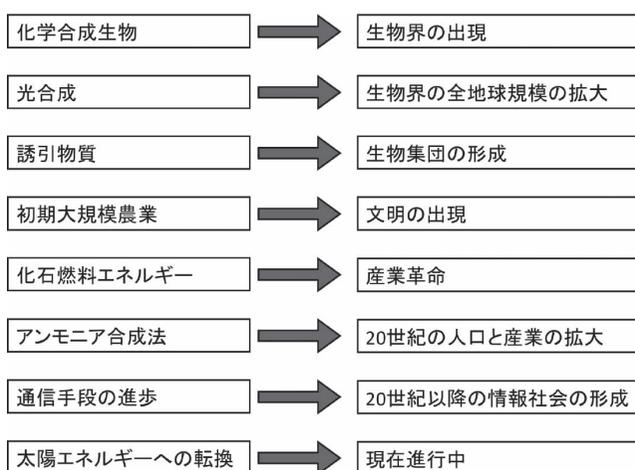


図4. 細胞型生物および文明におけるエネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みが進化・進歩に与える効果

や資源を獲得することは生命システムの発展をもたらすし、エネルギーや資源の枯渇は生命システムの衰退をもたらすことを示す。

(1) 細胞型生物における化学合成と光合成

地球上に最初に出現した生物を支えるエネルギー源は、光エネルギーではなく、非生物的に生成した高エネルギー化合物の持つ化学エネルギーであったと推定される。光合成は遅れて進化したと推定される。地球表面には太陽からエネルギーが供給されるが、その一方で地球内部の高温の熱エネルギーは様々な形態のエネルギーとして表面に伝わる。地球内部の高温の環境では様々な高エネルギー物質が生成し、それらは生物のエネルギーとして利用され得る。原始地球の表面は現在と異なり酸素はなく還元的な環境であったが、高い自由エネルギーを持つ物質が生成し、それらからエネルギーを得る方法を獲得すれば生命は成立し得る。現在でも深海底熱水噴出孔には光合成に依存しない生態系があり、それらはその種のエネルギーによって成り立っている。

一方、生物の歴史において光合成は比較的初期に確立された^{12, 13)}。光エネルギーにより、大気中の二酸化炭素を還元し有機物を生成する過程である。上述の通り、現在の生態系においてはこれらの有機物が様々な生物のエネルギー源であり、また文明系のエネルギーの多くを担っている。深海底熱水噴出孔などのエネルギー源は光合成のエネルギー源に比べて小さいが、光合成が登場するまでは、光合成に依存しない生命体しか存在しなかったと推定される。もし光合成が確立されなければ、太陽の膨大なエネルギー源を利用することはできず、生物の歴史は現在のものとは大きく異なるものだったであろう。初期の生物進化のシナリオは、最初に地球が生み出した高エネルギー化合物を利用する生物が出現し、まもなく光合成

が確立されて生態系が地球規模に拡大したものと、推定される。

(2) 農業・牧畜

文明を支えるためには、生物としてのヒトを支持するだけでなく、文明システムという階層に固有の仕組みを支持するために、過剰のエネルギーが必要である。文明が発祥した地域で行われた大規模あるいは効率的な農業は狩猟採集と比較して生産性が高く、人口は増加する。言い換えると、これらの農業が過剰な食糧を生産し、文明を創出するのに大きな役割を担ったことを示している。また、家畜を大量に飼うことも同様の効果があると考えられる。文明Ⅰにおいては、農業や牧畜の生産量を決定するのは、元々のエネルギー源である太陽エネルギーの量や水量などの自然の環境条件である。文明を維持するために必要な過剰エネルギーと過剰の物質は、自然条件に恵まれた生産量の高い地域で得られやすいであろう。しかし、自前の地域に過剰の生産がなくとも、他の地域や社会から食糧などのエネルギー源を何らかの方法で得るなどによって、過剰のエネルギーと物質を得ることができる。エネルギーと物質の流入・流出という点からは、交通や軍事技術が大きく発展した時代には、ヨーロッパ人によって植民地が形成され、それらはそれ以前と比べて遙かに大きな過剰のエネルギーと物質を生み出した。同様のことが北米や日本などで行われ、先進国地域の文明の発展の基礎となったと見なすことができる¹⁴⁾。

(3) 化石燃料資源のエネルギー化

文明Ⅱにおいては、産業革命によって生み出された技術体系によって、化石燃料から大量の化学エネルギー源を生産し利用する。化学エネルギーから変換されるエネルギーは、熱、電気エネルギー、食糧、および運動エネルギーなどに転換される。蒸気機関や内燃機関などの動力・工業プラント・火力発電所・大規模農地は、エネルギー変換装置あるいは物質製造装置である。これらの利用を可能にしたのは、化石燃料を利用するための一連の技術の発明である。

(4) アンモニア合成

食糧は、文明の要素である生物としてのヒトが利用するエネルギーであるとともに物質である。アンモニア合成は、19世紀に起こった窒素源の枯渇に対して人間が開発した空中窒素の固定法である¹⁵⁾。窒素肥料を作物に与えると収量が増える、および成長が早まるなどの利点がある。これにより作物の生産量が増し人口増加が起こる。アンモニア合成法は20世紀の人口爆発を誘引した主因である。

(5) 化石燃料から太陽エネルギーなどへの転換

現在の社会は、環境問題や化石燃料の枯渇という問題のため、エネルギーの転換を迫られている。太陽エネルギーは量としては極めて大きいですが、エネルギー密度が低いという難点がある。風力、バイオマス、水力は、太陽エネルギーが形を変えたエネルギー源である。また、

地熱エネルギーは地球内部から得られるエネルギー源である。化石燃料からこれらに変換する技術は存在するが、現在の文明システムは化石燃料を利用する体系として最適化されており、エネルギー源の変換に伴って、物質生産などの様々な分野でシステムの変更も必要である。このためには、新たに開発する装置やそれらを製造するためにエネルギーや物質が必要である。この事情は、原始生態系から光合成に依存する生態系へと転換した生物の歴史と相似である。光合成が確立された過程では、それまで生物が存在しなかった無生物の広大な地球が存在していた。しかし、現在の地球上には既に文明とヒトの社会が広い範囲で繁栄している。この観点からは、光合成出現のときと事情は異なっている。この点は環境問題を考察する上で重要な点であろう。

(6) 情報の流出・流入の仕組み

情報をエネルギーや物質と同様に流入・流出という用語で表現すると違和感がある。これは、情報には発信する側や受信する側という存在があり、生命システム側からの働きかけを感じさせるからであると推察される。エネルギーと物質についても、特に受ける側については生命システム側からの働きかけを考慮しなければならないかも知れない。ここまで、このような生命システム側からの働きかけという印象を排除するために、情報をエネルギーと物質と同列に扱って、流入・流出という語を用いた。細胞型生物では、化学物質・電磁波・音波などの様々な方法で情報は入り出る。文明でも同様である。これらの事例は多いが、例えば化学物質を個体が放出・受容することで様々な生物の集団が形成され集団としての振る舞いが制御される。同様にして、20世紀以降の通信手段等の進歩は、文明の発展をもたらした。

この他にも、言語や文字は人類が文明を作る上で大きな寄与をしたと考えられる。ここまでエネルギーと物質について主に論じたが、生命システムの出現の過程などにおける環境からあるいは環境に対する情報の流入・流出の役割は、代謝に関わるエネルギーと物質と同レベルで議論すべき重要な課題である。

4.2 エネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みの組織化

(1) 細胞型生物

細胞型生物は生物として一括りで考えられやすいが、既報で述べたように、原核生物、真核生物、多細胞生物は、生命システムを環境との関係から考える場合には、異なる階層にある別の生命システムであると見なすべきである^{1,2)}。トリプレットコドンやリボソームの構造などに見られるように、情報中枢系の基本部分には共通性が高い^{1,2)}。しかし、真核生物では核内にDNAは保存されており、そこからmRNAが転写を行うなどの過程は原核生物には存在しない。細胞核に収まっているDNAの情報を転写する過程は複雑であり、この点で真核生物の情報中枢系は原核生物の情報中枢系は大きく異なる。また、多細胞生物には体細胞と

生殖細胞の分化があり有性生殖する。2つの性が増幅系を構築しており、単細胞生物の増幅の仕組みとは大きく異なる。従って、多細胞生物の増幅の仕組みはこの生命システムに固有の仕組みであると言える。

これらの情報の集約化と同様に、エネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みにおいても、細胞型生物の進化とともに組織化・高度化が認められる。すなわち、単細胞の真核生物では細胞内小器官の機能を発現するために、細胞という単位でエネルギー・物質・情報を取り入れる。また、多細胞生物においては、エネルギー・物質・情報の流入・流出ための器官や臓器がある。これらはエネルギーと物質の流入・流出の仕組みの組織化である。しかも、これらを作動させるための設計図は遺伝子に記録されている。一方で、高エネルギー物質としてATPが生物界で共通に使われている。また、エネルギー源として糖類や脂質が主に利用されるなどの点は共通である。これらも組織化・高度化の一種である。

以上の点に基づいて生命起源を推測するならば、エネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みの組織化と情報中枢系にこれらの仕組みが設計図として組み込まれることは、生命の出現にとっても必要不可欠であったことが想像される。

(2) 文明

文明の活動に必要なエネルギー・物質・情報は、文明の発展とともに組織化し同時に情報中枢系によってその情報は保存されている。この程度は文明Ⅱにおいて顕著である。文明Ⅰにおいては、食糧は生物としてのヒトに必要なエネルギーであり物質である。文明に依存しなくても、かなりの程度を個人で得ることができる。言い換えると、かなりの程度自給自足的な生活が可能である。また、エネルギー源以外の物質も同様である。一方、高度に進んだ文明Ⅱにおいては、生産・流通の仕組みに依らなければ食糧を得ることは困難である。また、文明Ⅱを支える膨大なエネルギーや物質は、巨大な装置によって採取され運搬される。従って、文明の仕組みを介さないと個人はこれらを容易に得ることはできない。

これらの事実は、エネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みが集約されてきたことを示す。並行して情報中枢系の高度化も進行し、そこに納められる情報としてエネルギーと物質の流入・流出の仕組みは記録されている。従って、エネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みの組織化は、情報中枢系の組織化と連動している。これは、生命システムとしての文明を理解する上で重要な特徴である。

(3) 細胞型生物間の相互作用と文明間の相互作用

全ての細胞型生物は種に属し生態系にも属す。すなわち、生物は他の生物との相互作用の中で生きている。遺伝子でさえ細胞型生物間で移動することが分かっている¹⁶⁾。これらの個体間の相互作用を土台とし、細胞型生物には種や生態系という上位の階層が成立する。種と生態系は個体の上位の階層としての生命システムである。

一方、文明の上位の階層を考えることは可能であろうか。文明間には相互作用があり、全体として一つの人類社会という生命システムを形成していると思えることも可能であろう。例えば、古代においてはこのような文明間の相互作用は現在よりも密接ではなかった。古代アメリカ文明は、ユーラシア文明とはほぼ独立に存在した。一方、現代では交通・物流・通信が密になり文明間の相互作用は強まった。このような相互作用は、細胞型生物の個体間の相互作用と相似の関係にある。従って、文明間の相互作用が強まることによって、文明に対してさらに上位の階層が形成し得る可能性が推測される。文明Ⅰにおいてはエネルギーと物質の流入・流出はそれぞれの文明の種類によって多様性があるが、文明Ⅱではエネルギー・物質・情報の流入・流出は共通性が高まっている。一方で、複数の文明が一体化して上位の階層を形成するならば、エネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みは一元化し、その大きな仕組みへと個々の仕組みは組み込まれていくであろう。同時に相互依存が高まっていることを示唆する。

5. エネルギー・物質・情報の流入・流出からみる環境問題の考察

5.1 環境問題における文明要素としてのヒトの位置づけ

以上の考察によって、エネルギー・物質・情報の流入・流出に関する文明の特性を分析した。現代文明においてこれらの仕組みは高度に組織化され、情報中枢系によって関連する情報は記録され制御されている。従って、例えば、個人が環境のためにエネルギーや物質の消費を抑制しようとする場合には、基本的にはこのシステムの範囲内で行うことになる。一方で、このような集約化・高度化されたエネルギー・物質・情報の導入・導出の仕組みは、すなわち効率的で環境に適合する仕組みであるということではない。言い換えると、文明要素であるヒトは文明の制度や仕組みに対して強い影響力を持たないので、エネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みも容易に変えることはできない。この点はエネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みを効率化する場合の、文明システムとしての難点である。以下に、現代文明のエネルギーと物質消費に関する問題点として2つの事例を考察する。

5.2 電気の生産における現代文明の課題

電気エネルギーは文明のエネルギー利用の方法であり、細胞型生物にはない特徴である。電気は便利であるが難点もある。第一に貯めることは困難である。このため消費量に合わせて作るのだが、様々な場面でどれだけ必要かを予測するのは困難であるため無駄が出る。第二に、現在は化石燃料が電気エネルギーの主要な原料であるが、このために化学エネルギーを熱エネルギーに変換し、さらに電気エネルギーに変換して使うと言う多段階のステップを

含むことである。これらの変換の際に損失が発生し熱として失われる。ところが、家庭では電気を再び熱に変換して利用することも多い¹⁷⁾。例えばガスを利用する場合には、このような損失を防ぐことができる（図5）。電気を生産する過程で発生する熱を利用しにくい原因は、巨大な発電所によって電気を生産し分配する仕組みへと、エネルギー製造の中枢化が起こったことにある。すなわち発電所は使用する場所から遠くにあるため、熱を利用することは困難である。

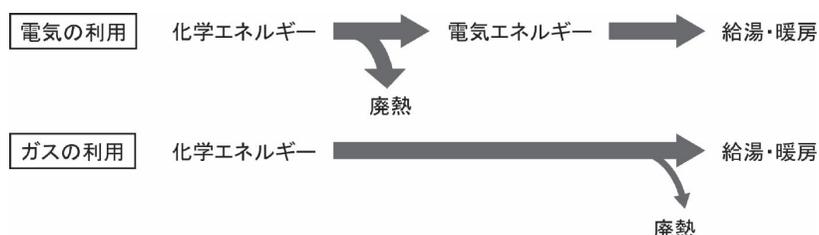


図5. 給湯・暖房のためのエネルギー源による損失の違い

第一の問題に対応する方法の一つは、使用する現場で必要な電気を作ることであろう。ただし、化学エネルギーから電気エネルギーに変換する装置が小型化することによる損失を考慮しなければならない。一方で、巨大な発電装置を使うことによって、効率の向上などの利点はあるが、長い距離を運ばねばならないのでその際の損失が発生する。使用する現場の近くに小型発電機を設置するのとどちらがより効率的なのかは、詳細な検証が必要であろう。

第二の問題は、いわば電気は便利であるがために、変換の際に損失があることを考慮せずに使用する点である。火力発電の効率は送電の損失などをいれなくても40%程度である¹⁸⁾。コジェネレーションを行わなければ残りは廃熱となる。その一方で、家庭での熱の需要は大きい。発電所で無駄に発生する熱を利用することはできない。さらに上述の通り、家庭の電気消費の数%は暖房と給湯に利用される¹⁷⁾。これらの点においても、消費現場で熱を利用するには電気を熱に変換するのではなく、化学エネルギーを熱に変換した直後・直近で使用するべきである。例えば、湯沸かし器やストーブでは高温の水や空気を得ることが目的なので原理的に効率は高い。しかも、ガスや灯油などの燃料は保存できる。これらの方法の利点を考慮して最適のエネルギー源と使用法との組合せも必要である。すなわち熱を効率良く利用できないという点で、巨大な発電所が離れたところにあることは大きな損失を生み出している。日本では、エネルギーの内の50%は電気に変換されており¹⁹⁾、大きな課題である。

以上の通り、電気エネルギーに関する2つの問題は、高度に組織化され中央集権的に生産された電気を使うのであれば、基本的には解決できない。

5.3 エネルギー・物質・情報の集中化の解消

文明の進歩は、いわばヒトという生物が単なる文明の部品として機能する方向で進むことを、これまでの分析は示してきた。エネルギー・物質・情報の流入・流出においても同様である。他の細胞型生物と同様に、情報中枢系を持つ生命システムは自発的に階層化する傾向が文明にも当てはまるならば、この傾向は今後ますます進むものと推察される。エネルギー・物質・情報の流入・流出に対して、個人が制御に関われないような集中化を解消することは、生命システムは自発的に階層化するという一般則とは逆行する現象であるかも知れない。また、集中化を解消するためには既に確立されたシステムの多くを別の体系に変えなければならない。同時に、文明発祥以来、延々と続いてきた文明に対する要素としてのヒトの役割から、環境に対して主体的に働きかける生物としての役割へと、大きく変革することが必要である。また、エネルギー・物質を使用する現場に近いところで生産する技術や仕組みが必要である。

6. 結 論

本研究では、文明の特性を知ることにより環境問題を論ずるための指針が得られるという考えに基づいて、文明においてエネルギー・物質・情報がどのように流入・流出するか、その特徴を細胞型生物と比較しつつ考察した。この結果、エネルギー・物質・情報の流入・流出という観点においても、文明は細胞型生物と相似の関係にあることが分かった。これらの考察からは、ヒトが要素としてではなく生物という階層としてエネルギー・物質・情報を得るために主体的な立場を取り戻すことが、環境問題の解決に対しても重要であることが推察された。

一方、生命システムの階層化が自発的に起こる一般的な現象であるならば、今後はエネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組み、情報中枢系の仕組みのどちらも、ますます集中化・組織化が進むと考えられる。現状では、例えばグローバリゼーションなどの方向性が為政者・経営者などから打ち出されており、ヒトは文明の要素であり文明は上位の階層であるという傾向はますます強まるように見える。しかし本論文は、この方向性はエネルギーと物質の効率的利用という点で欠点を含むことを示した。この課題を解消するためには、エネルギー・物質・情報の流入・流出の仕組みが集中化していくという大きな流れに逆行することが必要であることを本論文での考察は示唆している。これは、文明が進んできた方向性に対しても、生命システムは階層化するという一般的傾向に対しても逆行する、非常に困難なことであるように見える。

しかし一方で、文明の構成要素であるヒトと文明との関係は、細胞型生物における要素と

システムとの関係と完全に相似ではない。従って今後は、これらの間の違いを土台として、エネルギー・物質・情報の流入・流出に対するヒトの役割を見いだし、環境問題に対するヒトの立場を明確にする分析が必要である。

引用文献

- 1) 川村邦男 (2014), 文明の生命システム論から見る地球環境保全——教育と研究活動の役割——, 人間環境学研究, 12, 65–83.
- 2) K. Kawamura (2007), Civilization as a biosystem examined by the comparative analysis of biosystems, *BioSystems*, 90(1), 139–150.
- 3) K. Kawamura (2002), The Origin of Life from the Life of Subjectivity, in “Fundamentals of Life”, Eds. by G. Palyi, C. Zucchi, L. Caglioti, 563–574, Elsevier, Paris.
- 4) K. Kawamura (2003), The relative importance of genes, subjectivity, and self-organization for the origin and evolution of life, in “In the shadow of Darwinism: Alternative evolutionary theories in the 20th century”, Eds. by G. S. Levit, I. Y. Popov, U. Hossfeld, O. Breidbach, 218–239, Fineday-press, St-Petersburg.
- 5) 川村邦男 (2005), 生命の主体性に基づく生命系の時間発展の理論——化学進化, 生物進化, 文化・文明の発展を生命現象としてみる——, *Viva Origino*, 33(1), 17–35.
- 6) 川村邦男 (2014), 生命の定義を再考する, *Viva Origino*, 42, 印刷中.
- 7) 今西錦司 (1941), 生物の世界, 弘文堂.
- 8) Organisation for Economic Co-Operation and Development (2014), Energy Balances of OECD Countries 2014 Edition, Organization for Economic.
- 9) Organisation for Economic Co-Operation and Development (2014), Energy Balances of Non-OECD Countries 2014 Edition, Organization for Economic.
- 10) K. Kawamura (2012), Reality of the emergence of life-like systems from simple prebiotic polymers on primitive earth, in “Genesis - In The Beginning: Precursors of Life, Chemical Models and Early biological Evolution” Eds. by J. Seckbach, R. Gordon, 123–144, Springer, London.
- 11) K. Kawamura (2012), Drawbacks of the ancient RNA-based life-like system under primitive earth conditions, *Biochimie*, 94(7), 1441–1450.
- 12) R. E. Blankenship (1992), Origin and early evolution of photosynthesis, *Photosynthesis Research*, 33(2), 91–111.
- 13) G. N. Nesbit, J. R. Cann, C. L. van Dover (1995), Origins of photosynthesis, *Nature*, 373, 479–480.
- 14) A. Maddison (2008), The west and the rest in the world economy: 1000–2030, *World Economics*, 9(4), 75–99.
- 15) V. Smil (2004), *Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the transformation of world food production*, MIT Press, Cambridge.
- 16) E. V. Koonin, K. S. Makarova, L. Aravind, L. (2001), Horizontal gene transfer in prokaryotes: Quantification and classification, *Annual Rev. Microbiol.*, 55, 709–742.
- 17) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット (2010), EDMC/エネルギー・経済統計要覧2010年版, 省エネルギーセンター.
- 18) W. H. J. Graus, M. Voogt, E. Worrell (2007), International comparison of energy efficiency of fossil power generation, *Energy Policy*, 35, 3936–3951.
- 19) 経済産業省編集 (2013), エネルギー白書2013年版, 新高速印刷.