

文明の生命システム論からみる地球環境保全

——教育と研究活動の役割——

川 村 邦 男

(受付 2013 年 10 月 31 日)

1. は じ め に

大量の資源とエネルギーを消費し自然環境に対して様々な影響をもたらす現代文明は、地球を覆いつくしつつある。今後も人間活動の規模は拡大し自然環境はさらに悪化するだろう。特別な技術革新がなくとも、文明を継続することを優先し生産と消費を劇的に減らせば環境問題は解決するかも知れない。しかし現実には、より良い暮らしと同時に環境も守るということが可能であるかのように期待され、生産と消費は拡大している。科学技術の改良や開発はこの相反する難題を解決するための中心的アプローチであるかも知れないが、科学技術の開発に頼って物質的豊かさと環境保全とを同時に満たすことは極めて困難だろう。例えば、環境問題が広く認識されるようになってから、その対策としての科学技術開発も大いに進められてきた。しかし、温暖化問題、エネルギー問題、有害物質の拡散などの難題については、技術的解決法は確立されていない。それどころか、技術開発は経済活動と強力に結びつき、生産と消費を促進する触媒のような働きをしている。近年においても先進国の温室効果ガス排出量と GDP はおおむね増加あるいは横ばいである¹⁻³⁾。生産と消費が拡大すれば環境の悪化は早まる。科学技術開発を担う個々の研究者の思いとは裏腹に、技術開発が進むほど生産と消費は増え、場合によっては新しい環境問題を生みだし、環境問題はますます悪化・複雑化している。結局、技術開発に対して市民が期待することと、技術開発が現実に及ぼす影響とは、現時点では矛盾している。環境問題に対する技術開発以外の、例えば教育や政策などの様々なアプローチについてもこのような矛盾は見つけられるであろう。この例に見られるように、環境問題という視点からは、個々の人々が環境保全のために働きかけようとする方向と文明が進む方向とは同じではない。むしろ個々の人々の思いとは違う方向に文明は突き進んでいるようにみえる。これは何故であろうか。

私はこれまでに主に化学進化のアプローチによって原始地球における生命の起源を探求してきた⁴⁻⁶⁾。原始地球における生命の出現過程を考察するためには「生命とは何か」あるいは「生物のシステムとしての特徴」を考えなければならない。その種の考察を続けた結果、これまでの研究において⁷⁻¹⁰⁾、第 1 に生命が生命らしさをもつための要件を整理した^{7,8,10)}。第 2

にそれらの要件について、様々な階層にある生命システム、すなわち、原核生物、真核生物、多細胞生物、生態系、社会性昆虫などと文明とを比較分析した¹⁰⁾。その結果、文明は生命システム的一种であること、および、文明の生命システムとしての特徴を明らかにした。例えば、細胞型生物と文明との間には生命らしさをもつための要件に関するアナロジーが認められる。また、文明という生命システムは、その発展の段階に応じて、生態系に似たシステムから細胞型生物に似たシステムに近づくことを見いだした。文明には文明としての固有の振る舞いがあり、個々のヒトを足し合わせた単純な集合体ではない。文明の中のヒトは文明を構成する要素の一部であり、文明はヒトを含めた種々の要素から構成される上位の階層にある生命システムとして振る舞う。

このような背景をもとに、文明の生命システムとしての特徴を深く理解し、文明を生命システムとみなす考え方を環境問題に応用すれば、環境問題に対して何らかの指針が得られるのではないかと着想した。本論文では、細胞型生物などの生命システムと文明とを比較したこれまでの研究結果を概説し、文明を生命システムとする視点から環境問題を考察する。

2. 生命システムとは何か

生命の定義は、生命起源を解明するための理論的な拠り所である。原始地球上では、雷放電、紫外線、宇宙線、隕石衝突、熱水などの様々なエネルギー源によって簡単な無機物から生命を構成する有機物を生成し、それらが次第に複雑化、すなわち化学進化して、最初の生命になったと考えられている^{11,12)}。しかし何をもって生命とするのか、生命の定義は生命を研究する学者の間でもまちまちである¹³⁾。2000年に生命とは何かを科学的に議論することを目的とした国際会議で、国際生命の起源学会 (the International Society for the Study of the Origin of Life and Astrobiology Society) の会員に向けて生命の定義をアンケートするという企画があった¹³⁾。国際生命の起源学会に所属する世界的に著名な科学者を含む多くの会員からそれぞれの定義が送られた⁷⁾。この会議では「生命の定義」についての結論は出なかったが、地球上の生物がもっている特徴を集約すると、少なくとも以下の3つの要件は生命らしさの物理科学的な必要条件として考えられている¹⁴⁾。これらの意味するところをもう少し詳しく見よう。

- 要件 (1) 代謝
- 要件 (2) 複製 (増幅)
- 要件 (3) 変異

要件 (1) 代謝：生命は、エネルギーと物質とがその生物の外部から内部に流入し、かつ、

不要物が外部に流出する、熱力学的な開放系かつ非平衡状態にあるシステムである^{5,15)}。生物の体内で起こっている現象は化学反応を土台としている。ただしこの熱力学的な視点において、生物の体内で起こる化学反応と通常の実験室で起こる化学反応とは大きく異なる。実験室で行う化学反応として、例えばビーカーに物質 A と物質 B とを混ぜて物質 C が生成する場合には、その反応が一度起こればその後はいつまで待っても A や B に戻ることはない。この状態が平衡状態である。平衡状態とはある温度と圧力の条件下でそれ以上なんの変化も起こさない最終的な状態である。しかし、生命はこのような平衡状態からは遠く離れた非平衡状態にあり、生命は非平衡状態の下で生じる空間的あるいは時間的な構造（散逸構造）の一種であると見なすことができる¹⁵⁻¹⁸⁾。要件（1）は、この熱力学的な条件、すなわち物質とエネルギーが流入する開放系がととのってなければ生命は成立しないことを示している。

要件（2）複製（増幅）：地球上のあらゆる生物には増殖する性質がある。生物と共通の物質的な特徴をもつウイルスやウイロイドも増殖する。増殖は生物進化において不可欠な要素であり、地球型生物は増殖なしには進化しない¹⁴⁾。複製は生物が採用した増幅の方法である。地球型生物にとっての増幅とは、原核生物や単細胞真核生物のような細胞分裂や、多細胞真核生物の有性生殖や単為生殖を介する、増殖などのことを示す。地球上のあらゆる生物は細胞を単位とするが、細胞複製は生物の複製と増幅の基盤である。細胞の中には遺伝物質として2重らせんデオキシリボ核酸（DNA）があり、細胞の複製はこの2重らせん構造 DNA の複製に起因する（図1左端のサイクル）。

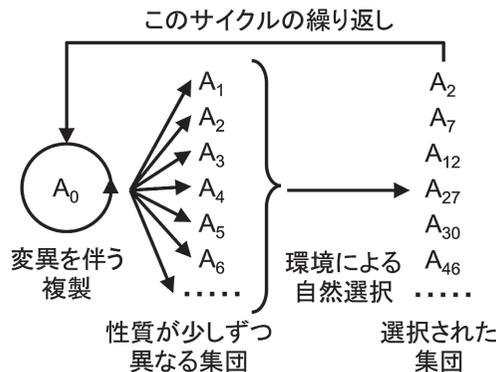


図1. 生物の変異と自然選択が構成するサイクルによる進化の機構

要件（3）変異：変異は自然選択とセットになることで、進化の機構を構成する¹⁴⁾。生命の定義においてもダーウィン進化¹⁹⁾することが1つの要件とされている場合があるが、これはダーウィン進化に変異が含まれていることを言い換えていると考えて良い。複製の誤り＝

変異などによって新しい世代に遺伝子の変化が起こることが、進化の基礎である（図1の中央部のAの変異体が生じる部分）。遺伝子の変化は、その生物の実体、すなわち表現型を変化させる。この表現型の変化が環境のもとで自然選択される。遺伝子の変化によって生じた新しい形質が、その生物が環境に適応する性質であればより多くの子孫を残せるので、やがてその種の中にその新しい形質をもった個体が広がっていくという考え方である。このように、ダーウィン進化の機構の説明は分かりやすいが、一方で、ダーウィン進化論に対する批判は古くからある。例えば、突然変異は多くの場合には悪い性質しかもたらさないことなど、突然変異と自然選択の組合せだけでは説明しにくい現象がある。一方、有性生殖は遺伝子の交雑を行う仕組みであり、突然変異ではないが表現型の変化を含む。また、水平伝搬²⁰⁾や進化に対するウイルスの役割も徐々に研究が進んでおり、進化の機構は未知の部分も多い。要するに変異という要件(3)は、生物に新しい性質が取り込まれる仕組みが必要であることを述べている。

これらの3つの要件に加えて、私は以下の要件を付け加えることを提案した¹⁰⁾。以下、これらについて概説する。

- 要件(4) 情報と機能の対応付けの仕組みを持つこと
- 要件(5) 一体性と安定性をもつこと
- 要件(6) 環境に対して生命から働きかける能力(主体性)をもつこと

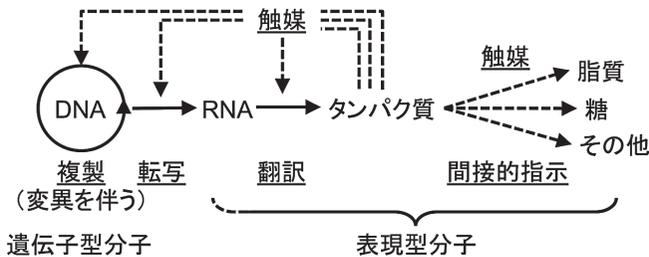


図2. 細胞型生物における遺伝子型分子の複製から表現型分子の生成に至る情報の流れと対応付けの仕組み

要件(4) 情報と機能の対応付け：これは、生物においては遺伝子型分子と表現型分子の間に対応付けの仕組みが必要であるという考え方を²¹⁾、より一般的に生命システム全般を考察する際に拡張したものである^{7,8)}。細胞型生物における遺伝子型分子と表現型分子の対応付けの仕組みを図2に示す。細胞型生物においては、遺伝子を担う分子はデオキシリボ核酸(DNA)であり、それを具体的に発現する分子=すなわち生物の機能を発現するのは、タンパク質、リボ核酸(RNA)、糖質、脂質、などである。この内のタンパク質とRNAはDNAの塩基配列に従って合成される。その他の分子は、一般的にはタンパク質酵素の働きによっ

て生成する。DNA の塩基配列から RNA を生成するには、RNA ポリメラーゼという酵素によって、DNA 上の塩基とワトソン-クリック型相補的塩基対を形成する RNA 鎖が生成し、最終的な修飾などを経て、mRNA, tRNA, rRNA, リボザイム (RNA 分子できた酵素) などとなる。リボザイムが発見²²⁾された1980年代前半以前には、RNA の種類は mRNA, tRNA, rRNA しか知られておらず、RNA は DNA の情報をもとにタンパク質合成する際の橋渡しの役割しかないと考えられていた。しかし、昨今は新しい種類の RNA が次々と発見されるなど、RNA は極めて多様な働きを持つ表現型分子であることが明らかになった。一方タンパク質は、mRNA の塩基配列に従って rRNA 上で tRNA の助けを介して合成される。この際、mRNA の 3 塩基の配列が 1 つのアミノ酸を表しており、正確にアミノ酸の配列は決められる。タンパク質のアミノ酸配列を指示する mRNA は、他の RNA 同様に DNA から合成されるので、タンパク質のアミノ酸配列はもとをたどると DNA の塩基配列によって決まっていることになる。DNA の塩基配列からタンパク質のアミノ酸配列を正しく生成するこの一連のプロセスは、極めて精巧かつ複雑である。この仕掛けは全ての生物で基本的に共通であり、使う分子も基本的に同じである。そして、このプロセスを担う装置一式は細胞に入っている。細胞型生物では、上述した要件 (1) の代謝の仕組みも、情報と機能の対応付けの仕組みによって、必要な分子や反応が遺伝子に対応付けられている。

ここでタンパク質酵素は、その他の糖質や脂質などの生体分子の合成や分解を触媒するので、それらの分子の合成と分解は間接的には DNA に書き込まれていると見なすことができる。この一連のプロセスに「遺伝子型と表現型の対応付け」という概念があてられた。一方、私はこの関係を様々な階層にある生命システムにおける情報と機能との対応付けという概念に拡張し、すなわち細胞型生物の上位の階層を含めて一般化して「情報と機能との対応付け」とした。

要件 (5) 一体性・安定性：一体性 (Individuality)²³⁾ は、生物や生命システムが個体としての特徴を持つことを意味し、さらに私は生物には一定の安定性があることを生命の要件として付け加えた¹⁰⁾。様々な生物個体は、環境の変化をある程度許容できるという安定性がある。仮に要件 (1) ~ (4) の仕組みがあったとしても、要件 (5) の性質がないと、生物として成り立たないだろう。例えば、細胞型生物には細胞膜があり、これが一体性・安定性を保証する基盤である。このため、バクテリアのような、化学的にはいわば柔らかい物でも、水で洗い流される程度では壊れないように、生物としての一体性は保たれる。

要件 (6) 環境に対して生命から働きかける能力 (主体性)：環境との関係において、生物は機械にない特徴をもつ。それは環境に働きかける能力、あるいは環境の変化に対して応じ

る能力である。私はこれまでに、生命は主体的なシステムであるとする定義を提案した⁷⁾。この考え方を発展させ、主体性と生物進化、および生命システムの発展との関係を考察した。自然淘汰は生物の形態を変化させる一因ではあるが、進化は単に環境からの制約によって起こっているのではない。生物は、環境に対して働きかける能力、あるいは環境の変化に対応する能力を持っている。生物が環境変化に対応したり環境をその生物自身に組み込むことは、生物の共通の性質である。ここでは、環境に働きかける生物のこの性質を、主体性を持つ本来の意味を拡張する用語として用いた。今西錦司は進化に対して生物は主体的に働きかけると述べたが^{24, 25)}、主体性による進化の機構を十分には説明できなかった。そこで私は、主体性による進化の仕組みを以下の様に説明した⁷⁾。例えば、ヒトの祖先が類人猿から猿人に進化した過程をどのように理解すると良いであろうか。ダーウィン進化では、ある遺伝子、例えば2足歩行に向く遺伝子や、汗腺を発達させる遺伝子、脳を大きくする遺伝子などが、新たに生まれ、そうするとそれらは人間の生存に有利であるからその個体がより多くの子孫を残し、その遺伝子が定着すると考えるのである。これに対して私はそのような遺伝子の働きを否定するものではないが、次のような提案をした。すなわち、そもそも生物には柔軟性があるので、ヒトの先祖の中にはある程度2足歩行や乾燥にも耐える性質があった。それらの能力を生かして、かろうじてヒトの先祖はそのような環境に耐えて生活した。そのような環境では上記のように2足歩行や乾燥に強い個体がより多くの子孫を残すと考えられる。この場合には、生物自身の環境に対する主体性が進化の第1歩である。一般化すると、生命は主体性をもつので最適でない環境に進出したり、かろうじて生きることができる。この間にそこで世代交代をする過程で、新しい遺伝子が発現するようになり、その環境での最適な遺伝子のセットにやがて置き換えられていく。この説明では、まず生物の主体性=環境の変化に対応したり環境を取り込む性質があることが、進化のきっかけである。

ここにあげた6種の要件は、お互いに他の要件から導き出されるかも知れない。また、こ

表1. システムが生命であると認められる要件

キーワード	簡単な内容
代謝	熱力学的な平衡状態から遠く離れた非平衡状態にあり、エネルギーと物質が流出入する。
複製・増幅	自分自身と同じものを複製するあるいは増幅的に生産する仕組みをもつ。
変異	複製の過程などで変異がおり、その変異が情報として保存される。広義には新しい情報または性質がシステムに付け加わる。
対応付け	遺伝子型と表現型の対応付けの仕組みを持つこと。広義には、情報と機能とを対応づける仕組みをもつ。
一体性・安定性	システムとしてのまとまりと継続性を保持する。
主体性	環境を取り込み環境変化に対応する。

ここに述べた以外にも生命に必要な要件があるかも知れない。それを検証するのは将来に行うこととして、ここでは作業仮説としてこれらの6種類の性質を生命に必要な要件とする(表1)。

3. 生物と環境との関係

生物の世界は多様である。例えばヒトは真核生物であるが、各細胞は生きているし、ヒトから分離して培養液の中でも生きられる。しかしヒトそれぞれを個体と見なすのが一般的である。一方で、社会性昆虫において、働きバチや働きアリは一匹ずつの昆虫であるが、女王バチを中心とする巣を構成する全体が1つの生命体のようにも見える。この様な例を見ると、生物個体という概念は不明確で、何ををもって個体と考えるかということはなかなか難しいように思われる。

私はこれまでの研究によって、生物と環境との相互作用を考えると、個体の意味は明確になることを見いだした¹⁰⁾。例えば多細胞生物の個体は、個体自身はその外界=環境と主に相互作用する階層であり、各細胞はその多細胞生物を構成する要素である。一方、真核生物の起源は原核生物の共生であったとする仮説がある²⁶⁾。実際に真核生物の細胞にはミトコンドリアや葉緑体のように、独自の遺伝子を持ち細胞内で増殖可能な細胞小器官がある。この場合にも、単細胞からなる真核生物における細胞と小器官との関係は、多細胞生物の個体と細胞との関係によく似ている。単細胞の真核生物では、内部の小器官を個体とはみなさず、その単細胞生物という単位を個体と見なす。ここで、我々が個体と認識する階層と、生物として環境と直接相互作用する階層とは一致している。すなわち、多細胞生物では個体が直接環境と相互作用し、各細胞は環境とは直接相互作用しない傾向が強い(図3)。また、単細胞の真核生物では真核生物のレベルの階層が環境と直接相互作用し、細胞内にある小器官は環境

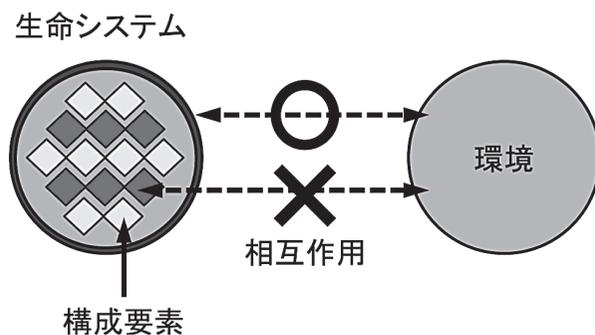


図3. 環境との相互作用に対する生命システムおよび構成要素の役割

とは直接相互作用しない。

この考え方は、いわゆる個体を作る種や生態系などの上位の階層の性質を考察するのにも役立つことを知った¹⁰⁾。雌雄があり有性生殖が唯一の増殖方法である場合には、オスあるいはメスの単独の個体は増殖も変異もできない。種という上位の階層があってその中にオスとメスが存在するから増幅と変異が可能である。また、生物は生態系の中で生きており、この生態系も種々の生物種を含む個体の上位の階層である。ところが一方で、通常は、これらの種や生態系を我々は個体と認識することはない。それは、種や生態系にははっきりとした境界がないことや、一体性や安定性が弱く、また、それ自身が環境に対して働きかける能力＝主体性が明確に存在すると言えないからである。これに対して、社会性昆虫ではどうだろうか。ハチにおいては個々の働きバチを個体として見がちであるが、女王バチの役割は性を決定することと働きバチなどを増やすことであり、ちょうど、女王バチが多細胞生物の生殖細胞に相当し働きバチが体細胞に相当するものと見なすことができる²⁷⁾。社会性昆虫では、女王を中心とするシステムとして環境と接する傾向をもっていると思なすことができる。

結論として、生物の世界は様々な階層構造を持っているが、環境に対するシステムとそれを構成する要素の環境に対する役割を考察すれば、それぞれの階層が個体であるか、個体に準ずるのか、あるいは要素であるのかなど、生命システムとしての特徴を評価できる。裏返せば、生命システムを環境との関係で考察するという考え方は、生命を理解する重要な視点であることを支持している。

4. 文明と生物とのアナロジーおよび環境問題に対する生命システム論的考察

4.1 生命システムとしての要件

文明はヒトや農業・採集や牧畜・遊牧・狩猟に関連する生物的要素、また、人間が作り出したおびただしい種類の工作物と、技術、制度、習慣などの様式を全て含んだ生命システムである。上述した6つの要件、および生命システムにおいてそれを構成する階層が環境に対してどのような役割を果たしているかという視点に基づいて、文明を原核生物、単細胞真核生物、多細胞生物、社会性昆虫、種、および生態系と比較しつつ考察した¹⁰⁾。その結果、文明は発展の段階が進むにつれて生態系に似たシステムから細胞型生物に似たシステムへと移行すると結論づけられた。結果の概略を表2に示す。ここでは、細胞型生物、生態系、および文明について、各要件を比較しつつ文明の生命システムとしての特徴を概観する。

要件(1)代謝：細胞型生物では、原核生物、単細胞真核生物、多細胞生物のどの階層の生命システムにおいても独自の代謝の仕組みを持っている。多細胞生物には、個体の中に代

謝を総括的かつ効率的に行う臓器や器官がある。言い換えると、細胞自身がもつ代謝の仕組みとは別に、上位の階層である個体は独自の代謝の仕組みを持っている。

一方、生態系は複数の種と個体、および生物以外の自然を含む生命システムである。生態系という生命システムに、固有の代謝系が存在するかどうかは、外部からエネルギーや物質をその環境の外界から取り込み不要物を排出するという固有の仕組みが、生態系という上位の階層の内部に存在するかどうかということである。言い換えると、動物が持つ消化器官のような、特別な代謝システムが生態系にあるかどうかということである。結論としては、生態系にはそのような仕組みが存在すると言うことはできない。例えば、サケが遡上する周辺の川、陸地、海を含む生態系を考えるとする。この場合には、サケは有機物を循環するのに重要な役割を担っているが、それは、水などの物質循環する仕組みが地球に存在するからであり、むしろ生態系はそれを背景とする生命システムである。しかも、これらの代謝系に似た自然の物質循環系の仕組みは、生態系という階層の生命システムに情報として保存されているわけではなく、個体が持つ固有の代謝の仕組みとは異なる。

一方、文明においては、エネルギー・食糧・水・その他の物資を供給し循環するための文明の内部に固有の仕組みが明らかに存在する。文明に必要なエネルギーや物資は、要素である人間自身を生物的に維持するために必要なエネルギーや物資をはるかに超えている。巨大な農地、漁場、工場、施設で物資やエネルギーは生産あるいは調達されて、人々に供給されるが、多くのエネルギーや物資は文明そのものを維持するためにも使用されている。さらに廃棄物の処理も組織的に行われている。しかも、後述するところの、文明固有の情報と機能の対応付けの仕組みによって、文明における代謝プロセスに関する情報は文明の情報として保存されている。

要件 (2) 複製：細胞型生物では、上述したとおり、単細胞、多細胞を問わず、細胞が分裂すること＝複製することを土台として、性を持つ場合を含めて生物個体は増殖する。その根幹にあるのは2重らせんDNAの複製にある。一方、生態系はどうだろうか。生態系は環境変化に応じて広がるということはあるが、それはその生態系に含まれる個体と種が増幅するためであり、複製と見なすことはできない。では文明はどうだろうか。技術や制度などの文明の多くの要素は、文明システム内で複製することができる。例えば、近代から現代にかけての日本では、西欧の文明の要素が取り入れられた。現在では日本の文明要素が様々な国々に移植されている。すなわち、文明の要素は他の文明システムに移植可能である。日本の古代文明は、中国文明から様々な文明要素を取り入れることで構築された。古代における日本での文明の構築や、近代における南北アメリカ大陸での新しい国々の建設は、細胞レベルの完全な複製ではないものの、文明システム全体を丸ごと複製可能であることを示している。

これらを担う仕組みは（図4），例えば，ことば・文字・図などによる情報伝達，教育機関による組織的な情報伝達，出版物・テレビ・ラジオ・インターネットなどによる情報伝達など様々であり，現代ではコンピュータの発達により急速に多様化している。

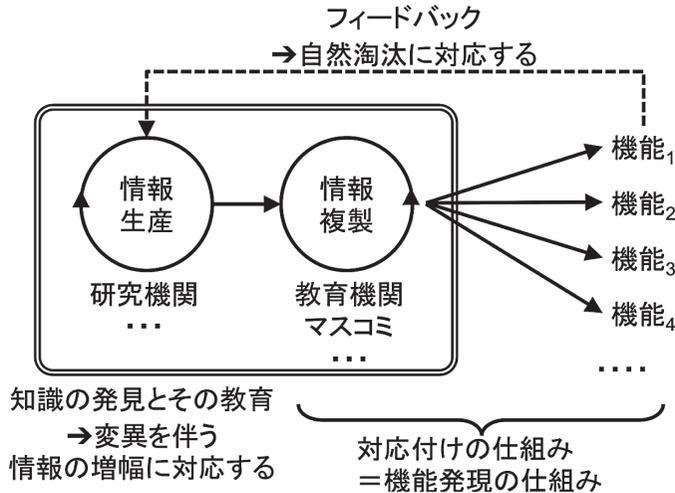


図4. 文明における情報増幅と情報と機能の対応付けの仕組み。図2との相似が認められる

要件（3）変異：細胞型生物の複製は遺伝子である DNA の複製を土台としており，DNA の2重らせんが複製されるときに間違い＝突然変異が起こり得る。性は遺伝子の混ぜ合わせの手法であり，生物に新しい情報を組み込む方法である。また，水平伝搬などの細胞分裂に依らない遺伝子変化の仕組みもある。一方，生態系においては，生態系自身を複製する固有の仕組みがないので，変異という概念がそもそも当てはまらない。生態系の変化はそれの中に含まれる個体および種の種類と数の変化，あるいはその分布状態の変化によるところの見かけ上の変化である。生態系の変化（遷移）はパターンがあるが，それらは複製を土台とした変化ではない。すなわち，生態系の変化は細胞型生物の変異とは異なる。

一方，文明は生態系と異なり，固有の複製の仕組みを持っている。その複製過程では，文明に関する情報は誤りや人為的な工夫＝発明・発見・開発・改良などによって変化する。この変化は細胞型生物の変異とよく似た役割である（図4）。文明において新しい情報を導入する仕組みとして，例えば，大学や企業の研究所をはじめとする高度に組織化された研究機関があり，その支援組織も含め高度化しつつある。

要件（4）情報と機能の対応付けの仕組み：上述したとおり，細胞型生物では遺伝子である

DNA の塩基配列に従ってタンパク質あるいは RNA を合成するが、この仕組みが対応付けの仕組みである（図 2）。また、脂質や糖質などの DNA には直接情報が保存されていない物質はタンパク質酵素あるいはリボザイムによって酵素的に合成されるので、これらは間接的に DNA の塩基配列に対応づけられている。

ではこのような対応付けの仕組みが生態系に存在するだろうか。そもそも生態系という階層には、固有の複製の仕組みや変異の仕組みは、上述したとおり認めがたい。一方、生物の世界における種々の階層にはその階層に独自の対応付けの仕組みが存在することを指摘した¹⁰⁾。例えば真核生物を原核生物の共生体と見るならば、それらの各生物は何らかの共生関係によって 1 つの生物としてまとまっていることになる。このためには、各細胞同士が共生するために何らかの対応付けの仕組みがなければ成り立たない。また、多細胞生物でも多くの細胞が集合し、役割分担をするためにはそのための対応付けの仕組みが存在する。また、種においては、同種に属する個体は交雑するが異種とでは交雑しない。あるいは異種の生物が集合して共生体を構成する場合には、その共生体という新しい階層が出現するために、共生関係を確立するための対応付けの仕組みが存在しなければならない。これらの対応付けの多くは、遺伝子レベルの変異からもたらされる機構で説明できるかも知れない。このような観点からは、生態系には個々の生物個体や種の間は何らかの対応付けが存在する。しかし生態系には固有の複製の仕組みがないので、それらの対応付けの仕組みは、生態系固有の複製の仕組みに保存されているものではない。従って、細胞型生物の情報と機能との対応付けの仕組みとは異なる性質のものである。

一方、ヒトの作る文明においては、ことば・文字・図などを基にして様々な情報を具体的な装置や働きなどに対応付けている（図 4）。この際に用いる手順や道具は、例えば料理のレシピと料理を作る際に必要な一連の道具に相当し、文明内に存在する働き・役割・装置を具体化する。これらの手順は、長い教育によってヒトを養成することで形成することもあれば、マニュアルによって簡単に形成することもある。また、機械がこれらの手順を受け持つようになり機械の役割は文明の発展とともに増している。

情報を増幅し、情報と機能とを対応付ける仕組み、すなわち要件 (2)、(3)、(4) は相互に関係しつつ、いわば生命システムの心臓部を構成している。細胞型生物では、DNA 複製および DNA の情報に従って RNA とタンパク質を合成する仕組みは、細胞内において統一されている。例えば、細胞型生物では情報複製には DNA の複製だけが使用される。一方、文明では要件 (2)、(3)、(4) の過程を担う仕組みには多様性が認められる。例えば、文明における情報の複製・増幅は、人と人との主に言語を介する情報伝達、教育機関、マスメディア、書物などの様々な仕組みを介して行われる。

要件 (5) 一体性・安定性：細胞型生物の一体性と安定性は細胞という小胞によって保たれている。多細胞生物においては、例えば動物では皮膚や殻によって、植物でも表皮など様々な仕組みで一体性と安定性を保持する。また、安定性を保つ仕組みが内部にある。一方、生態系では個々の生物には安定性を保つ仕組みがあるが、生態系を保持するための固有の仕組みはない。例えば、生態系の境界は曖昧である。また、生態系に属するそれぞれの生物は、生物間の共生関係や地形や気候などによって、緩やかにつながっている。この点から、生態系は細胞型生物とは異なる特徴を持つ。

文明系はどうだろうか。文明の単位をどのように考えるかによって境界は変わるが、例えば日本を1つの文明とするならば、海岸線という天然の境界が存在する。このような天然の境界に加えて、言語、行政、軍備、習慣などの様々な仕組みによって構成要素である人間は束ねられ、文明の安定性は保たれている。過去においては、文明にはおおむね固有の範囲や領域があった。それらは拡大したり縮小したりするが、例えば大文明では同じ地域に系譜を同じくする文明が歴史上安定して存在してきた。また現在では、国境が文字通り境界の役割を果たしている。このように、文明は生態系と異なり一体性と安定性を保つ固有の仕組みを持つとみなすことができる。

要件 (6) 環境に対して生命から働きかける能力 (主体性)：細胞型生物は環境の変化に対してある程度の柔軟性を持ち、また環境を生物に取り込むという、環境に対する生物側からの働きかけする能力を持っている。例えば、遺伝子の変異や性の存在は環境変化に対する生物の生存の可能性を実質的に高めている。また、細胞型生物においては、進化によって新たに組み込まれた情報は遺伝子として保存され、保存された遺伝子から具体的な実体であるタンパク質や機能性 RNA が生産される。この遺伝型と表現型の対応付けの仕組みがあるので強力に生物自身を保ちつつ環境に対応できるのである。この観点からは、「進化」は生物が環境に対応する方策の1つであると見なすことができる。

しかし、生態系にはこのような視点そのものがなじまない。例えば、2つの異なる生態系が接しているとき、それらの境界は、内部の生物の種類と個体数の変化や気候の変化によって変動する。従って環境に対して生命システムの側から働きかける固有の仕組みは、生態系の内部には存在しない。

一方、文明は文明という高次の階層において、環境変化に対応する固有の仕組みや環境を取り込む性質をもつ。様々な新しい環境を文明の要素の一部として取り入れることで、実際に文明は拡張してきた。ヒトは生物であるので本来は環境に働きかける性質を持っている。しかし、文明においてはヒトは文明を構成する要素としての傾向が強い。

以上をまとめると、種々の生命システムにおける、システム内の要素間の相互作用の強さ、

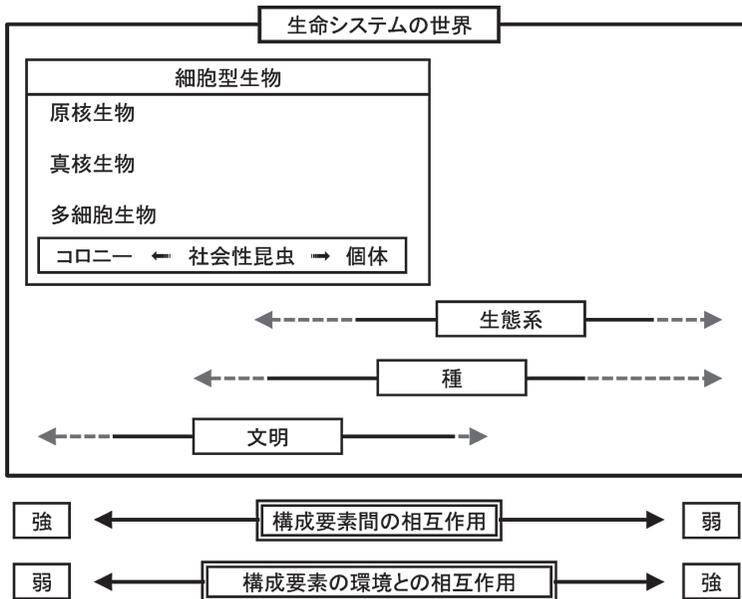


図5. 種々の生命システムの構成要素間の相互作用の強さ、および構成要素と環境との相互作用との強さからみた相異

および、要素と環境との相互作用の強さは模式的に図5のように表される。上述した考察から、文明は生態系や種と比べて要素間の相互作用が強い一方で、システムの構成要素であるヒトと環境との相互作用は相対的に低い。この関係は、社会性昆虫における社会と個体との関係や、多細胞生物における個体と細胞との関係に似ている。さらに、ヒト個体が単に文明の一要素であるという傾向は文明の発展とともに顕著になる。例えば、我々は食糧でさえ文明を介さずに入手することができない状態に近づきつつある。日本のような文明においては、農業従事者といえども文明と切り離して自給自足を行うのは困難である。このように、文明は生命システムとして環境に対するための固有の仕組みを数多く内包している。一方でその内部の要素であるヒト個体は環境に直接相互作用する性質を減じているとすることができる。この関係は後述するように、現在の環境問題を考える上で重要な視点を含んでいると考えられる。

4.2 生命における機能分化のアナロジー

これまでの議論において、細胞型生命と文明はよく似た生命システムであることを概説した。ここで、細胞型生命と文明のアナロジーとして機能の分化について考察する。機能の分化は、生命が生命らしさを持つための要件として含めないが、分化は種々の階層にある生命システムに見られる相同的な現象である（表2）。多細胞生物では、細胞と個体との間には

中間の階層として器官や臓器がある。また、社会性昆虫においては女王と働きバチやアリとの違いばかりか、非常にたくさんの役割に分化している例もある^{28,29)}。文明においてもその内部に機能分化があり、機能分化は文明の発展とともに進む。機能分化があることや、それが生物システムの発展（生物の場合には進化）に連動して機能分化が進むことにおいても、文明と細胞型生命のシステムとしての特徴は似ている。この観点からは、ヒトは文明の要素であるばかりか、より詳細な機能を発現するそれぞれの組織を構成する分化した様々な機能を持つ要素である。従って、各ヒト個体は他の組織の要素として寄与しにくい。このことは、文明の生命システムの心臓部である情報の複製、変異、対応付けという役割には、特定のヒトや組織だけが要素として関与していることを意味する。この点も環境問題を考察する上で重要なポイントである。

表 2. 細胞型生物と文明のアナロジー

項目	細胞型生物	文明
境界	細胞膜, 表皮…	地理的境界, 城壁, 制度による制約など
要素	細胞	ヒト, その他の生物, ヒトが作った工作物など
中間の階層	細胞内小器官, 器官など	様々な集団, 制度上の階層, 機能を持つ組織など
代謝	栄養素の取り込みと排出の仕組みによる	一次産業と二次産業による生産と消費, 廃棄物の処理の仕組み
情報複製	DNA 複製, 細胞分裂, 有性生殖, 単為生殖など	個人の情報伝達, 教育機関, 図書館, マスコミ, インターネットなど
情報生産	DNA 変異, 有性生殖, 水平伝搬, ウイルスの寄与など	研究機関や大学など

4.3 エネルギーと資源枯渇に関するアナロジー

ここではエネルギーや資源の枯渇の観点から生物界と文明とのアナロジーの事例を見る。光合成は生物の歴史の中でかなり初期に形成された^{30,31)}。最初の生物界には光合成の仕組みはなかったため、光合成に依存しない化学エネルギー源をもとにして生態系は作られていたと推定される³²⁻³⁵⁾。現在においても化学合成が行われる場として熱水噴出孔があるが、その規模は太陽エネルギーを基盤とする生態系に対してはるかに小さく局所的である。太古の地球においてこのような局所的な環境で供給される化学エネルギー源は短期間に消費されつくしたかも知れない。エネルギー源が枯渇していった中で、生命は新しいエネルギー源として光合成を獲得したと推察される。光合成という 1 つの機能が生命にもたらされたことがこのエネルギー問題を解決し、その後の生物の進化の道を開いた。太陽エネルギーを化学エネルギーに変える光合成が生物界にもたらされたことは、生物のその後の繁栄を促す画期的な出

来事であった。

一方、ヒトの社会や文明においてもエネルギー源や資源の枯渇に何度か遭遇したが、そのたびに新しい方法論を開拓してきた。第1は、狩猟採集から農業・牧畜に移行した時代である。狩猟採集の生活様式では食糧資源は限られている。例えば縄文時代は人口変動が激しく、気候の変化に対応できなかったことを示唆している³⁶⁾。一方、弥生時代には灌漑農業が導入されこの不安定さは大きく解消され、農地の拡大とともに人口も拡大した。第2は、19世紀後半における窒素資源の枯渇である。作物の栽培には窒素源が不可欠であるが、当時はチリ硝石などに頼っていた。しかし、その埋蔵量には限界があり、いずれ枯渇することが予測された。この問題を解決したのは、ハーバー・ボッシュ法による窒素と水素からのアンモニアの直接合成である^{37,38)}。エネルギーが十分にあっても窒素源がないと作物は育たないので、人口増加や維持には限界がある。この方法の発明によって20世紀の人口爆発を促し、現在の資源とエネルギーを大量に消費する文明のステージに突入した。第3は、現在の化石燃料の枯渇あるいは環境破壊によって化石燃料を使用できなくなることによる問題である。いま文明は、文明を支えるための主要なエネルギー源として、化石燃料から太陽エネルギーに方針転換しなければならない段階にさしかかっている。

これらの例は、生物の世界においても文明においても、それらの生命システムに新しい機能がもたらされることで、劇的にシステムの性質が変化する場合があることを示している。同時に、改良や発明は文明におけるその時点での課題を解決したが、さらに大きな環境問題をもたらしたことを示している。

4.4 環境問題に与える文明内の情報伝達系の役割

文明以前のヒト社会には、6つの要件を支持する固有の仕組みはない、または弱い。文明以前におけるヒト社会のヒト同士の関係は生態系の生物個体間の関係と似ており、文明以前のヒトの社会という生命システムは生態系に類似している。文明以前の社会ではヒトが直接環境と相互作用するのに対して、文明においては要素であるヒトは環境と直接相互作用するのではなく、文明というシステムを介して環境と相互作用する傾向を強く示す。さらに、エネルギーや資源の供給は文明固有の仕組みによって行われる。また、自然環境の変動に対して文明は強い一体性や安定性と主体性を持って自然環境の変化に対応する。このように、文明は生命システムとしての上記の要件を満たし、ヒトという要素を含んだ高次の階層にある生命システムであることが、文明以前の社会との違いである。このことから、環境と文明との関係を考察し生命システムとしての文明の特徴を詳細に理解することは環境問題を考える際にも有効であろうと推察できる。

文明が細胞型生物と似ている点で重要なことは、文明には情報増幅と情報生産の固有の仕

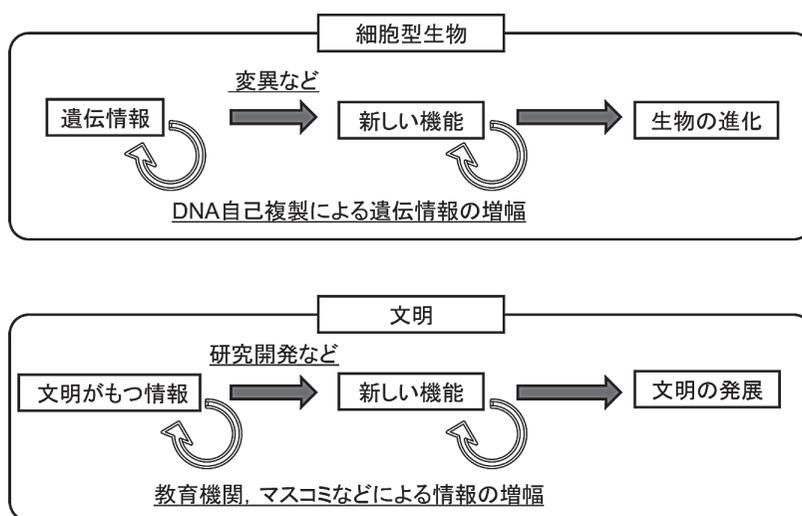


図 6. 細胞型生物と文明における情報複製と情報生産にともなう発展の仕組みの相似

組みがある点である。細胞型生物と文明を対比させた情報伝達の仕組みを図 6 に模式的に示す。教育機関やマスコミなどは組織的な情報増幅装置であり、研究機関は情報生産装置である。これらは文明の性質を劇的に変える可能性を持つため、上述した通りエネルギーや資源の枯渇という問題に大きな役割を果たし、すなわち環境問題に対して重要な役割を担う。情報の複製・増幅の点では、現在の教育制度の枠組みで、例えば 1 名の教師が数 10 人を対象とする講義を中心として生徒に系統的に情報を伝える。一方、マスメディアによれば断片的な情報が桁違いに多くの人々に伝わる。また、個人個人が情報を言葉で対面的に伝える方法もある。このように文明内には、多様な情報の複製・増幅の仕組みが存在する。従って、環境に影響を与える情報がどのような手段によって複製・増幅されるのかは、環境問題に対する対策の効果を大きく左右する因子である。一方、組織的な研究機関は、新しい情報と機能との対応づけを見だし新しい情報を文明内に導入する情報生産の仕組みである。新しい情報と機能の対応づけが文明の内部に取り込まれると、上述した情報を増幅する仕組みによって広がり、文明の中に新しい要素として加わっていく。情報を機能と対応づける仕組みは細胞型生物ではおおむね一元化されているのに対して、文明の場合には複雑かつ多様である。環境問題に影響を与えるどのような要素が文明に加わり得るかは、研究組織のあり方に強く依存する。すなわち、研究機関のあり方も環境問題の解決を担う重要な因子である。

5. 結 論

本論文では、文明が情報の増幅と生産の仕組みを備えた生命システムであるという解析に基づいて、環境問題に対する際にはそのような文明の特性を十分把握することが重要であることを知った。環境問題を解決するためには、教育機関やマスコミなどの情報複製・増幅の仕組み情報発信手法、また、組織的な研究開発機関などの情報と機能との対応付けを生み出す仕組みが、重要な役割を担う。環境問題はとかくエネルギー・資源の枯渇や、温暖化、生態系破壊などの現象に焦点があてられるが、文明における情報の増幅と情報と機能との対応付けという生命システムとしての心臓部を理解し、そこに焦点を合わせて対策を講じる必要があることを、本研究は示している。現在、研究活動などの情報生産は歴史上で最も活発に行われているが、そこで生み出される新情報は教育機関やマスコミなどの多様な増幅過程によって極めて急速に文明の性質を変化させ、最終的に環境との関係を変化させる。従って、教育機関やマスメディアのような情報増幅の仕組みをどのように設計し運営するか、またそれらの重要性自体をどのように教育するか、対応付けの仕組みである研究機関の方向付け・研究者の養成・研究開発機関の設立を慎重に行うことなどは、環境問題に対する重要な対策となり得る。しかし一方で文明は高度に機能分化し、情報複製や情報と機能との対応付けや新しい対応付けを見いだす作業は、一部の人間によって担われている。また、細分化によって別の分野の作業を行うことには様々な制約があることも、文明の特徴として理解すべきである。

一方、要素である個々のヒトは環境問題に対してどのような寄与が可能であろうか。本研究によると、文明はそれ自身が環境と相互作用する生命システムの特徴を持つのであるから、構成要素であるヒトの思いとは必ずしも同じ方向に動かない。例えば、グローバル化はヒトの要素としての性質を強化する文明固有の挙動であり、環境問題の解決とは矛盾する場合があるだろう。このようなことに対する対策として、文明以前にはヒトは環境と直接相互作用する生命システムであったが今や文明の要素に陥っていることをヒトは自覚し、環境と主体的に関わる工夫をすること、すなわち個々の人間が自然環境に対して主体的に相互作用することが提案される。

本研究内容の一部は、The 2nd *EnvironmentAsia International Conference on “Human Vulnerability and Global Environmental Change”*、および日本環境学会第39回研究発表会（東広島大会）で発表した。

引用文献

- 1) 国立環境研究所 (2013), 国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス編 環境省地球環境局地球温暖化対策課監修「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」page 2.1–2.3.
- 2) 国立環境研究所 (2013), 附属書 I 国の温室効果ガス排出量データ (元データ: United Nation Framework Convention of Climate Change, GHG total including LULUCG, http://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_unfccc/time_series_annex_i/items/3814.php)
- 3) 国民経済計算データベース (National Accounts Main Aggregates Database) (2012) <http://unstats.un.org/unsd/snaama/introduction.asp>
- 4) K. Kawamura, (2004), Behavior of RNA under hydrothermal conditions and the origins of life, *International Journal of Astrobiology*, 3(4), 301–309.
- 5) 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.
- 6) K. Kawamura, (2012), Drawbacks of the ancient RNA-based life-like system under primitive earth conditions, *Biochimie*, 94(7), 1441–1450.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) K. Kawamura, (2007), Civilization as a biosystem examined by the comparative analysis of biosystems, *BioSystems*, 90(1), 139–150.
- 11) S. L. Miller, (1953), A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions, *Science*, 117, 528–529.
- 12) S. L. Miller, L. E. Orgel, (1974), *The origins of life on the earth*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- 13) G. Palyi, C. Zucchi, L. Caglioti, (Eds.) (2000), *Fundamentals of Life*, Elsevier, Paris.
- 14) B.-O. Küppers, (1985), *Molecular theory of evolution*, Springer-Verlag, Berlin.
- 15) G. Nicolis, I. Prigogine, (1977), *Self-organization in nonequilibrium systems from dissipative structures to order through fluctuation*, John Wiley & Sons, New York. (散逸構造—自己秩序形成の物理学的基礎, 小島陽之助・相沢洋二訳, 岩波書店)
- 16) I. Prigogine, (1981), *From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences*, W H Freeman & Company. (存在から発展へ, 小出昭一郎・安孫子誠也訳, みすず書房)
- 17) M. Eigen, (1971), Self-organization of matter and the evolution of biological macromolecules. *Naturwissenschaften*, 58, 465–523.
- 18) P. Shuster, M. Eigen, (1977), The hypercycle. A principle of natural self-organization. Part A: Emergence of the hypercycle, *Naturwissenschaften*, 64, 541–565.
- 19) C. Darwin, (1859), *On the origin of species by means of natural selection*, 2nd Ed., (種の起源, 八杉竜一訳, 岩波文庫, 1963).
- 20) M. Syvanen, C. I. Kado, (Eds.) (2002), *Horizontal gene transfer* 2nd Ed., Academic Press.
- 21) N. Nemoto, Y. Husimi, (1995), A model of the virus-type strategy in the early stage of encoded molecular evolution, *J. Theor. Biol.*, 176, 67–77.
- 22) T. R. Cech, A. J. Zaung, P. J. Grabowski, (1981), In vitro splicing of the ribosomal RNA precursor of Tetrahymena: involvement of a guanosine nucleotide in the excision of the intervening sequence, *Cell*, 27, 487–496.
- 23) G. S. Levit, J. Scholz, (2002), The biosphere as a morphoprocess and a new look at the concepts of organ-

- ism and individuality, *Senckenbergiana lethaea*, 82, 367–372.
- 24) 今西錦司, (1941), 生物の世界, 弘文堂.
 - 25) 今西錦司, (1980), 主体性の進化論, 中公新書.
 - 26) L. Margulis, (1981), *Symbiosis in cell evolution, life and its environment on the early earth*, W.H. Freeman and Company, Oxford.
 - 27) K. Ohnishi, S. Hoikari, H. Shutou, D. Kanbe, M. Ohshima, H. Sawamura, N. Furuichi, K. Shibuki, M. Goda, (2002), Neural-network-like biomachinogenesis via semeiogenesis: A unified theory on the origins and evolution of genetic codes and other semeiotic systems, *Viva Origino*, 30, 63–78.
 - 28) T. Miura, T. Matsumoto, (1995), Worker polymorphism and division of labor in the foraging behavior of the black marching termite *hospitahtermesmedioflavus*, on Borneo Island, *Naturwissenschaften*, 82, 564–567.
 - 29) E. J. Fjerdingstad, R. H. Crozier, (2006), The evolution of worker caste diversity in social insects, *American Naturalist*, 167(3), 390–400.
 - 30) R. E. Blankenship, (1992), Origin and early evolution of photosynthesis, *Photosynthesis Research*, 33(2), 91–111.
 - 31) G. N. Nesbit, J. R. Cann, C. L. van Dover, (1995), Origins of photosynthesis, *Nature*, 373, 479–480.
 - 32) J. B. Corliss, J. A. Baross, S. E. Hoffman, (1981), An hypothesis concerning the relationship between submarine hot springs and the origin of life on Earth, *Oceanol Acta* 4(Suppl), 59–69.
 - 33) J. A. Baross, S. E. Hoffman, (1985), Submarine hydrothermal vents and associated gradient environments as sites for the origin and evolution of life, *Origins Life Evol. Biosph.*, 15, 327–345.
 - 34) K. Kawamura, T. Nishi, T. Sakiyama, (2005), Consecutive elongation of alanine oligopeptides at the second time range under hydrothermal condition using a micro flow reactor system, *J. Am. Chem. Soc.*, 127(2), 522–523.
 - 35) K. Kawamura, M. Shimahashi, (2008), One-step formation of oligopeptide-like molecules from Glu and Asp in hydrothermal environments, *Naturwissenschaften*, 95(5), 449–454.
 - 36) 小山修三, 杉森重信, (1984), 縄文人口シミュレーション, 国立民族学博物館研究報告, 9(1), 1–39.
 - 37) 岡部泰二郎, (1981), 無機プロセス化学, 丸善.
 - 38) V. Smil, (2004), *Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the transformation of world food production*, MIT Press, Cambridge.

参 考 文 献

- 梅棹忠夫, (1957), 文明の生態史観, 中央公論, 72, 32–49.
梅棹忠夫, (2001), 文明の生態史観はいま, 中公叢書.