

物理から見た生命現象の基本原則

名古屋大学大学院理学研究科 垣谷俊昭

概要: 生命は不思議なものである。それは物理現象とあまりにもかけ離れたものに見える。ところが実はそうではない。宇宙レベルの時間の長さや空間の大きさのスケールで見れば、生命現象も物質の多様な運動形態の一つに過ぎないことがわかる。そのような視点は人類が地球規模の活動をはじめた現代にとって、学問的にも社会的にも非常に重要である。本講演では、そのような視点とは具体的に何なのか、その視点からどのような問題意識が成り立ちうるのか、また、物理学はそこでどのように貢献し発展しうるのかなどについてお話しする。

0. はじめに

生命体は物質と情報（遺伝情報および調節情報）と生体エネルギーの3つの要素が協力して働く巨大な分子システムである。これら3要素はまったく異なった概念に属するが、本来、生命体は物質からできているので、情報と生体エネルギーも原理的には、物質の運動・反応に帰着されるはずのものである。すなわち、生命のはたらきはすべて物理学で説明されるものである。とは言え、生命はそんなに簡単に物理学で捉えられそうにない。現在、生命科学が高度に発展してきたお陰で、生命現象の個別の働き（たとえば光合成や視覚の光エネルギー・情報変換、プロトン輸送とカップルしたATP合成、遺伝子の複製・転写・蛋白合成など）は非常によくわかってきた。そこには未知の物理法則を必要としない。むしろ驚くべきことは、個々の物質が必要に応じて作られ、指定されたところに運ばれ、配置し、調和して機能している実態が明らかにされつつあることである。そして進化の結果、人のように意思を持ち能動的な活動を行う生物がつくられたということである。自然科学の問題として、意思のない分子群からなぜそのような複雑で、意志があるような生物が作られるのかはとても不思議なことである。しかしながら、冷静に言えば、これは進化の過程で獲得された分子群のひとつの運動様式である。これを広い概念で捉えるなら、物理の問題になる。以下では、このような問題意識にたって、物理から見た生命現象の基本原則を探ろうと思う。この問題意識で以前に書いたもの（文献[1-2]）があるので、それも参考にさせていただくと良い。

1. 3つのビッグバン

生命の問題を進化の流れの中で捉えてみる。物質進化の歴史をたどると、図1に示すものになる。これに見るように、現在に至るまでに3つのビッグバンがあっ

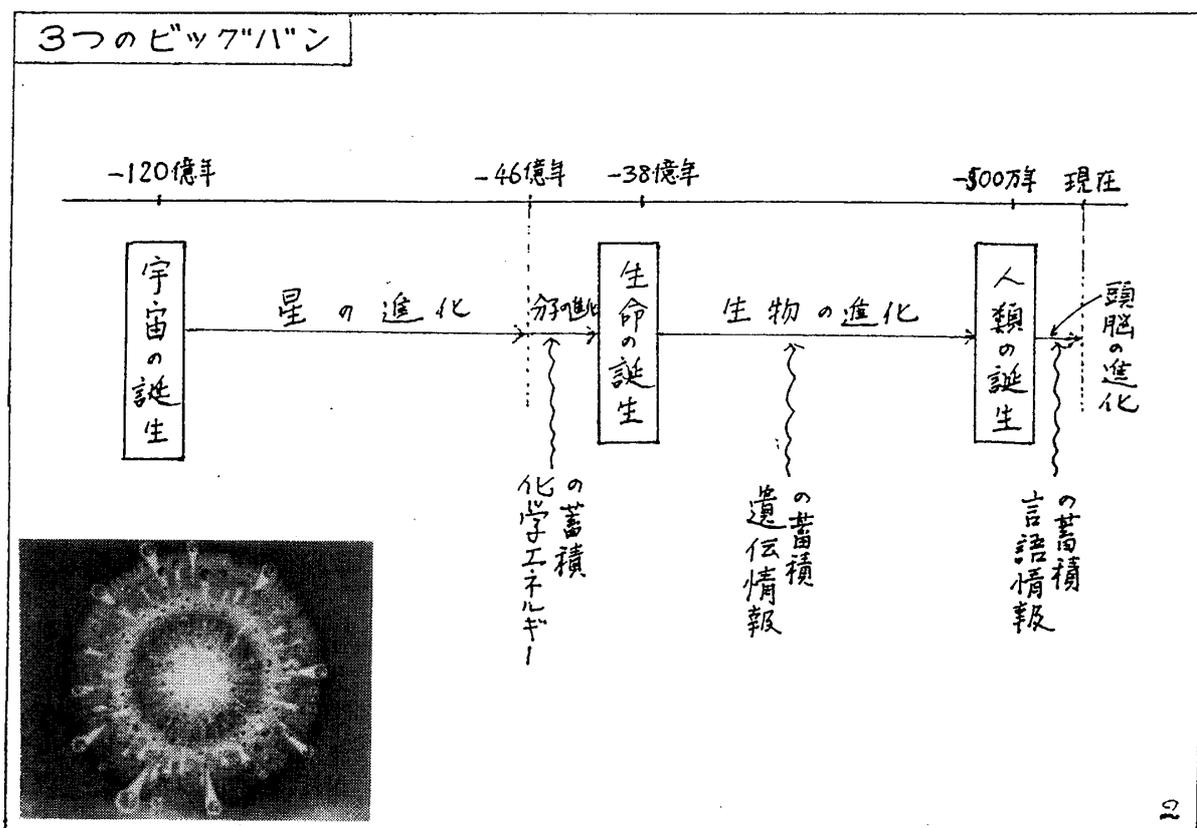


図1. 3つのビッグバンとエネルギー・情報の蓄積

たと思う。1つは宇宙開闢のビッグバンで、今から約120億年以前に起こったとされる。このとき以来、時を刻み出し、すべてのエネルギーが空間の一点に注入され、その後宇宙空間の膨張が始まった。膨張の過程で原子が作られ、分子が作られ、多数の星となり、銀河系ができた。すなわち、星の進化が進んだ。このように、120億年以前の、あたかも無の状態から突然時間と空間、物質群、そしてそれらの構造と運動が産み出されるようになった。物理学ではこの大きな変化を称してビッグバンと呼んでいる。地球は銀河系の1つの星として誕生した。それが約46億年前のことである。

第2のビッグバンは生命の誕生である。地球上の生命の誕生は38億年前頃といわれる。地球の誕生から生命の誕生の歴史は分子自身の進化であり、分子による化学エネルギーの蓄積である。具体的には、有り余る紫外線を吸収し、原始の時代に高還元物質のエネルギーを取り込み、反応を繰り返して、高い還元状態のさまざまな分子・高分子を作り出した。それがアミノ酸であり、脂質であり、タンパク質であり、DNAである。ここでは化学エネルギーの蓄積が行われた。それらのエネルギーに富んだ分子群が集積して、自己複製能力をもつ細胞、原始生命が生まれた。地球誕生から生命の誕生までの時間より、生命誕生から現在までの時間の方がはるかに永い。このことは条件を整えば生命は比較的早くできる。しかも一度できた生

命はタフで絶えることがなかったことを意味する。生命は自己複製能をもっているため、栄養分さえあれば、細胞分裂や個体発生は繰り返し起こり、分裂回数 N に対して2の N 乗倍になって細胞数または個体数が増えていく。これはまったく恐ろしい程の著しい増加関数である。(たとえば、標準的なバクテリアは30分に1回分裂する。1個のバクテリアが1ヶ月で10の433乗個になる。1ヶ年で10の5202乗個になる。これから計算すると、バクテリアの体積は1ヶ月で地球の体積の10の398乗倍、1ヶ年で10の5167乗倍になる。これは1ヶ年で現在の宇宙の全体積のほぼ10の5000乗倍にも達する)。無生物の世界では、通常、化学反応の回数 N または N の2乗に比例して分子は増えていく。これは穏やかな分子数の増加にとどまる。このような物質の数の変化の速度にたいする生物界と無生物界の大きな差異はきわめて著しく、生命の誕生とその増加はビッグバンと呼ぶにふさわしい。

第3のビッグバンは人類の誕生ではないかと思われる。人類の誕生は今から約500万年以前と言われている。生命誕生の歴史から見ると、ごく最近生まれたばかりである。なんと38億年近くの生物進化の過程を経て人類が誕生した。その間さまざまの遺伝情報の蓄積がなされた。特に生物活動と地球環境が相互に影響を及ぼし、生物と地球環境の共進化が実現された。人類の活動の特徴は頭脳を使うことである。そのため、人類の行動は他の生物に比較して格段の能動性を持っている。能動性の大きさにおいて他の生物とは格段の差異がある。頭脳の進化によって、言語情報の蓄積がなされた。自然科学・人文科学・社会科学を含むありとあらゆる文化・文明は人類独自のものである。人類誕生はその活動の複雑さ・高度さにおいて、宇宙のビッグバンと並ぶほどの大きな差異を産み出したといっても過言ではない。

2. 生命における2つのセントラルドグマ

生物には2つのセントラルドグマがある。1つは種の継承を保證する遺伝子に関するものである。すなわち生物の世代交代はDNAを引き継ぐ形で進められる。DNAを引き継いだ新しい生命の種はDNA-RNA-タンパク質の変換の流れによって新しい個体を形成する。この個体はまた、生命を維持するために、必要なタンパク質を必要な量だけ生産する。その制御の仕組みはすべて遺伝子に書き込まれている。この仕組みは地球上のあらゆる生物に当てはまる。ゆえに、遺伝子の継承と遺伝情報の発現は第1のセントラルドグマといわれる。

第2のセントラルドグマは生体エネルギー変換に関するものである。植物やある種のバクテリアや藻類は太陽光のエネルギーを取り込んだ後、巧みな酸化還元反応の連鎖を経て、生体膜にプロトンの濃度勾配を形成する。それにより生体膜内外に電気化学ポテンシャルを蓄積する。これが生物のすべてのエネルギー源になる。この電気化学エネルギーの形成は植物の場合、クロロプラスト(葉緑体)で行なわれる。動物やその他の従属栄養生物は他の生物を食し、その栄養物を分解し、巧み

な酸化還元反応の連鎖を経て、やはり生体膜にプロトンの濃度勾配を形成する。これはミトコンドリアで行われる。植物はミトコンドリアも持つ。こうして蓄えた電気化学ポテンシャルのエネルギーはプロトンATPaseという酵素の助けを借りてADPと無機リン酸からATPを合成するのに使われる。すべての生物のエネルギー変換において、外から取り入れたエネルギーを一度必ずプロトンの濃度勾配に変換するので、これを第2のセントラルドグマと呼ぶ。電気化学ポテンシャルは生体膜内外でのエントロピーの段差と電気ポテンシャルの段差によるもので、まったく物理的効果である。次の2つの章で2つのセントラルドグマをもう少し詳しく説明をする。

3. 遺伝情報のセントラルドグマ

遺伝子の情報は、DNAの中で4つの核酸塩基アデニン（A）、グアニン（G）、シトシン（C）、チミン（T）の1次元配列の形で書かれている。3つの核酸塩基の配列が1つの単位となって（コドンという）、1つのアミノ酸に対応した情報を持つ。そのアミノ酸の並び方がタンパク質の種類を決める。細胞中にはただ一組のDNAしかない。今ある細胞で、あるはたらきのために、あるタンパクが欲しいということになれば、そのタンパク質に対応するDNAの塩基配列情報がm-RNAに写し取られる。この時一本のDNAから数多くのRNAが作られる。m-RNAはリボソームのところに移動し、そこでm-RNAに書かれた塩基配列がt-RNAの助けを借りて翻訳され、ペプチドボンドで結ばれたアミノ酸の一次元配列が作られる。これが目的とするタンパク質の生合成である。タンパク質は細胞中で必要とされる場所まで、運ばれたり、拡散で移動して、生体のはたらきにかかわる。そのはたらきが満たされた後には、タンパク質の合成を止めるように指令が出て（この機構はとても複雑なようです）、RNAを壊し、DNAの転写をストップする。このような必要なタンパク質を必要なときに必要なだけ作るしくみの設計図は、大まかにはDNAの指令塔の中に書かれているらしいが、完全なものではないらしい。

最近、人の遺伝子は全部で約3万種類のタンパク質に関する情報を持っていることが明らかにされた。このことはある意味で衝撃的である。わずか3万種類のタンパク質のはたらきで、われわれ人間が作られ、創造的活動まですることができるといのは何と不思議なことでしょう。タンパク質の多くは酵素であるから、分子の合成の触媒をする。酵素反応によって大量の物質を作る。しかし、この酵素のはたらきは、非常に特化していて、特定の反応にたいしてしか触媒として働かない。そうすると、生合成で作られる分子の種類はそれほど多いというわけではない。したがって、多くの生物の細胞にある分子は非常に似通っているし、そのはたらきもほとんど同じのものが多い。物質的に、人だけが他の生物に比べて特に複雑に出来ているわけではない。

遺伝情報の分子メカニズムの解説は文献[3]に詳しい。

4. 生体エネルギー変換

生命は適度なエネルギーの流入と流出がないと維持できない。地球上の生物のエネルギーの入り口は太陽光である。この光エネルギーが生体内で電子のエネルギー、電気化学エネルギー、化学エネルギーにシステムティックに効率良く変換される。それらのエネルギーが力学エネルギーに使われたり、情報変換の装置を動かす。流入するエネルギー変換を行うところは光合成（植物では葉緑体で行なわれる）と内呼吸（動物でも植物でもミトコンドリアで行なわれる）である。これらの分子システム（オルガネラと呼ばれる）において外部から来るエネルギーの受け手は電子であり、電子こそが生体エネルギー変換の中核部に位置する。最近これらエネルギー変換の分子システムの場合である巨大膜タンパク質の構造が次々と明らかにされるようになった。これらの構造を元に、電子とプロトンの役割を正しく捉えた新しい生体エネルギー論が生まれようとしている。それを以下に簡単に説明する。

図2に3つの代表的なオルガネラにおける電子移動・プロトン移動・ATP合成の概略図を示す。

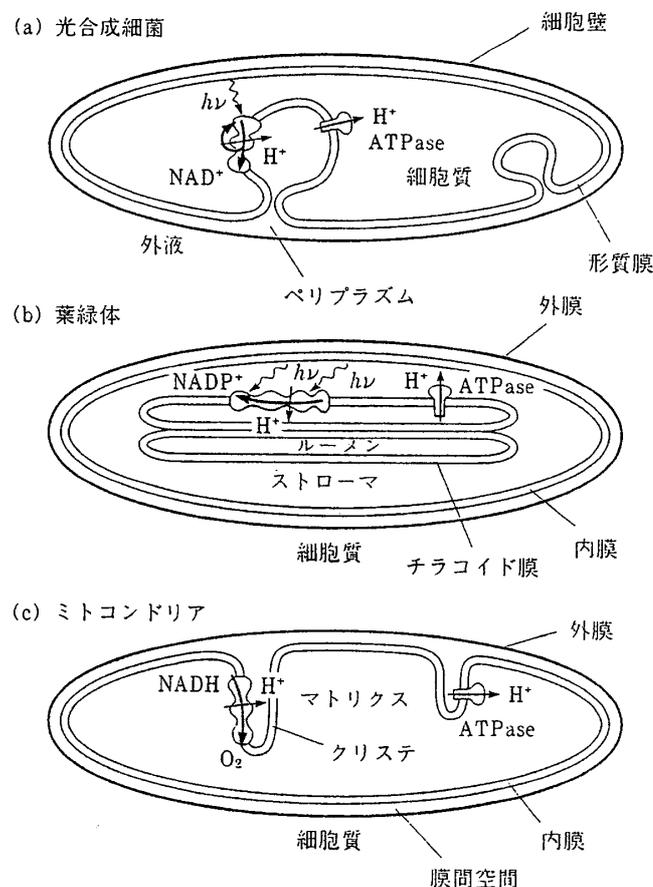


図2. 3つの代表的なオルガネラ

講義ノート

植物が出来る前は細菌〔バクテリア〕が光合成を行い、地球上生命のエネルギーの入り口として働いた。現在でも多くの光合成細菌が存在する。細胞壁の内側に形質膜という柔らかい膜が存在する。これは両親媒性の脂質分子が自己組織化により形成した二層膜である。この膜の内部は高い疎水性の分子環境を作っているため、膜にはイオンの透過を阻止する。この形質膜上に幾種類かの膜タンパク質が捉えられ、高度に分業した分子システムを構成する。光合成では、光エネルギーは電子励起に使われ、ついで電子移動を行い（太い矢印）、次いで電子移動とカップルしてプロトンの能動輸送（細い矢印）が誘起される。こうしてプロトンの濃度勾配が形成され、得られた電気化学ポテンシャルを使ってATPaseでATPを合成する。電子移動の一部は NAD^+ に電子を与え、高還元物質である NADH を生成する。葉緑体では光エネルギーが2つの異なる分子システムで取り入れられ、安定な水から電子を引き抜く電子移動が可能となり、プロトンの濃度勾配の形成と高還元物質 NADPH の生成を行う。細胞質中で NADPH は NADH に変えられる。ミトコンドリアでは、高還元物質である NADH から電子を取り込み電子移動を行うことにより、プロトンの能動輸送を行い、電子は最終的に最も安定な酸素分子に与えられ、水分子を生成する。形成したプロトンの濃度勾配による電気化学ポテンシャルを使って、ATPaseでATPを合成する。ミトコンドリアでの電子の流れとプロトン輸送の方向は光合成の場合と反対である。しかし、これら3つのオルガネラの働くメカニズムは非常に類似している。これはミトコンドリアもかつては従属栄養生物として自活していた細菌であり、すべての生命のオルガネラが一つの細胞から進化し、分化してきたことを示す。生体エネルギー変換のメカニズムの詳しい説明は文献[4-6]を参照していただきたい。

5. 生命の鎖

生物の進化は生物機能の進化であり、世代交代のとき、DNA情報として書き留められる。世代をつなぐ生命の鎖はDNA情報の鎖である。また、生命は単独に存在しない。地球環境を含め、あらゆる生命と依存しあっている。したがって、この生命の鎖は物質の鎖でもある。38億年の長い時間を生命の鎖として生きてきた生物は時間・空間の揺らぎに対して非常にRobust(タフ)であるといわれる。その秘密は生物の可変性にある。この可変性の根本は世代交代のときに起こる遺伝子の可変性である。生物が世代交代を行わず、遺伝情報のない物質世界のみ生きていたら、環境からの刺激・揺らぎによってたちまちに朽ちていたであろう。

DNAに書きこまれた情報はそれほど多いものではない。それにもかかわらず、何故生命のような高度な機能を持った分子システムが出来るのであろうか。DNAの遺伝情報はタンパク質を指定する。タンパク質は複雑な3次元構造を持っている。しかしタンパク質を集めただけで生命は誕生しない。適切なタンパク質を、適切な時期に、適切な分量を、適切な場所へ輸送する必要がある。そのプログラムがDN

Aの中に一応書かれている。それは環境揺らぎにより多少変化する。このタンパク質の3次元情報と時間・分量・場所を合わせた6次元情報を駆使することにより、構造と機能の情報量を飛躍的にふやしている。そこに効率的なエネルギーの流入・循環の条件を整えることにより能動的な分子システム(生命)が作り出されている。

6. 付加価値とシステム概念

生体内の酵素やその他のタンパク質がその場所と時間で最も有効に働くように設計されているらしい。これは機能の調和として捉えられる。この機能の調和を図る目的で進化したタンパク質には付加価値が与えられると考える。その根拠は次の通りである。生命の進化は人間社会における経済活動と良い対応関係にある。経済を動かす原理は需要と供給の競り合いである。商品経済における商品価値は需要をどれだけ満たすかで決まる。絶対的な商品価値は存在せず、需要の大きさに応じて商品価値の大きさが決まる。需要の大きさは固定したものでなく、変化する社会に応じて需要の内容と大きさが変わる。その社会が必要とするものを、必要とする量を供給することが最も経済社会の発展につながる。商品の価値は材料のみによって決まるのではなく、商品の付加価値はその時代とその経済機構と経済状態に依存して決まる。例として、新車を設計するとしよう。多くの蓄積した技能とノウハウを活用し、多大の研究投資をして、やっと新型車を開発する。高性能で経済効率が高く、安全性に優れているだろう。そうすると競争力があり、良く売れるだろう。その次の年にはもっと改良して、コストダウンを図ろうとするだろう。このようにして、ぎりぎりの経済性と機能性を備えた車が年々生まれてくる。新材料を用いたり、新しいエンジンを備えたときに飛躍的に機能性が向上する。これらの技術や新材料は商品に付加価値を与える。その付加価値の大きさは絶対的には評価されにくく、競争力という相対的な形で評価される。社会が要求するもの(現代では、たとえば公害対策がなされている、省エネルギー的であるなど)に合致するもので、適度な価格と性能を持つときに付加価値をより一層高めることができる。

生体内の酵素やその他のタンパク質もその環境で最も有効に働くように付加価値を高めるように分子進化したに違いない。酵素の機能性を絶対的に評価することは出来ず、その環境の場で最適の機能を発揮することに意味がある。多くの酵素群や細胞内構造が互いに影響を与えながら、最適の機能を備えるにいたったに違いない。この意味で、生物の進化の過程は経済の動きに酷似する。すなわち、生物社会では常に生存競争があり、環境の変動がある。これらの競争と変動に対応するために、生物はさまざまな試み〔突然変異によって新しいタンパク質を作る〕をして、生き延びる。そうして得られたタンパク質は溶液中で見せる機能が優れているだけでなく、その生物組織・生物環境の中で、そのタンパク質の発揮する機能が特に優れているという特徴がある。この生物の進化の歴史性を持ち、生物というシステム中で機能を特別に発揮することの出来るタンパク質には生物的な付加価値があると

講義ノート

いう。

上で述べた生物界の進化と人類の経済社会の発展のアナロジーは意味のないことではない。後で述べるように、人の頭脳を用いた創造的活動自身も、生物活動の中で産み出される付加価値の蓄積過程のひとつとして捉えることが出来る。さらに、人の集団としての社会・経済活動も付加価値を産み出す過程と言って良いであろう。ここでは経済学との対応で付加価値という言葉を用いたが、最近の生態学的心理学ではアフォーダンスという言葉で同様の意味付けをしているようである。(文献[7])。付加価値あるいはアフォーダンスは自然科学と経済学と心理学が共有する概念であろう。

この付加価値は当然システム概念である。生体システムの生命活動の流れの中で、タンパク質は単なる物質である以上に、その時その場での役割を果たすことに対して価値が付与されると考えるのである。この価値概念は一つの個体内における価値のみならず、生物集団における価値を含むことは明らかであろう。

7. システム概念と物理概念の融和

既に述べたように、生命体は長い時間の流れを持つ生物システムであり、そのはたらきはシステム概念に支配される。他方、生命活動は物理法則に支配される物理現象である。生命体におけるシステム概念と生命活動における物理概念の融和を図らなければ、生命は理解できない。その融和を図る鍵は生命を生命誕生以来の歴史を持った存在として捉え、地球環境を含む他のすべての生物との関わりを持って存在するものとして捉えることにある。

システム中の物質群の持つ付加価値をAとする。これはシステム中の物質群が持つ機能に対しての情報量であり、付加価値情報量と呼ぶ。各物質が個々に持つ運動の状態数をZとする。システム中の物質群に存在する組織性(Organization, Orgと略す)を次のように定義する。

$$\begin{aligned} (\text{Org}) &= (\text{各物質の個々の運動に関する状態数の逆数}) \cdot (\text{物質の付加価値情報量}) \\ &= (1/Z) \cdot A \end{aligned}$$

システムの全エントロピーSは

$$S = k_B \ln(1/(\text{Org})) = k_B \ln Z + k_B \ln(1/A) = S_m + S_v$$

と書かれる。ここで、 S_m は物質のエントロピーである。また、 S_v は付加価値エントロピーで、負の値を持つ。熱力学とのアナロジーに基づいて、 $-T' S_v$ をシステムが持つ付加価値自由エネルギーとしよう。 T' は温度の次元を持つパラメータである。

不可価値自由エネルギーは物理的エネルギーになりうるのだろうか。生命が誕

生し、生物が進化する時、タンパク質などが特化し、負の付加価値エントロピーが蓄えられる。このとき、特化したタンパク質を作るために消費したエネルギー（生存競争、自然淘汰に費やされたエネルギー）の支払いは進化の段階で既に済んでいる。すなわち、生物が生存競争に打ち勝つために大きなエネルギーを費やして得た成果が新しいタンパク質を作る形で次世代に受け継がれる。そのとき生物が特化したタンパク質はDNAの遺伝情報に書き留められ、次世代でそれを作るとき、過去に使った特別なエネルギーを必要としない。すなわち、新しい世代は生まれたときから付加価値自由エネルギーを蓄積しており、その起源からして物理的エネルギーの裏付けがあるといえる。

生物はDNA情報を介して世代を重ねるたびに、タンパク質機能の付加価値自由エネルギーを蓄積し、どんどん増大させる術を持っている。必然的に生物機能の特化が進行する。これが生物進化の物理的解釈である。

8. 生命の進化の中での人類の位置付けと拡張した散逸構造

人類の活動は生命の進化の中でどのように捉えることができるだろうか。誰が見ても人類の活動はすさまじいと思うに違いない。それは自然に無いものを作り出す創造活動が出来るからである。それを可能にするのは、人類が特に発達させてきた頭脳である。人類の頭脳の特徴は何であろうか。それは「意味概念」を認識することである。ものの意味を理解し、概念を構成することが科学を発展させることにつながった。又、文学や芸術を生んだ。さらに、富みに対する憧れも生んだ。一方では、これが積極的な生産活動と経済活動を生み出すことになった。それと同時に人間同士の争いが増え、戦争を行うようになった。そうした中で、宗教が生まれる。すべて、何故だろう？ どうすれば良いのだろうか？と問いかけ続けることから起こった。このような行為は他の生物でほとんど見られない。なぜ人間だけがこのような能力を特に発達させたのであろうか？ 38億年かかって人のような生物が生まれることは予定されていたのであろうか？

人類の持つ知的活動を科学的に捉えるにはどうすればよいであろうか。知的活動は莫大な情報を蓄積し、高層建築やエレクトロニクスの配線などにみられるように、ものすごいエントロピーの減少を作り出している。これは熱力学的に可能であろうか。それは可能である。地球および人類は太陽光からエネルギーを吸収し、地下資源を利用して、さらに原子力エネルギーを用いて、莫大なエネルギーを消費してそれらをつくり出しているから、熱力学的に問題にならないであろう。逆にいえば、今後もそのような莫大なエネルギーをとりこまない限り、このような知的生産活動は維持できない。人類の活動がエネルギーなしで続けられると思うのは科学的に正しくない。現在の知的活動を維持するに留める場合も、今使っているエネルギーを大幅に節約することは不可能である。

人類は言葉を発明し、記録し、大量の情報を蓄積することを可能にした。この

講義ノート

情報は人類にとって価値があるという意味で付加価値情報として捉えるべきであろう。その中から、科学技術文明が生まれ、付加価値情報の蓄積を加速度的に進行させた。これは生物の進化の成果をDNAに刻んだように、人類は科学技術の進歩を言葉にし、書物して記録した先人の努力による科学技術の成果を、後人は書物から学び、科学技術の成果を引き継ぐことができる。この意味で教育の意味が非常に大きい。人間を人間たらしめるために教育は必要不可欠である。

この科学技術の有様はまさに付加価値情報蓄積という組織化を急速に押し進めることであり、付加価値自由エネルギーの急激な増大を引き起こしている。この付加価値自由エネルギーの増大は人類が消費する膨大な（化学）エネルギーによってまかなわれている。

太陽から地球へ絶え間なく光エネルギーを供給することによって、地球に対して、生物界におけるDNA情報の蓄積と地表におけるエネルギー分布に偏りをもたらした。生物個々の構造とはたらきはDNAの遺伝情報によって支配され、個体間の食物連鎖は地球表面のエネルギー分布によって支配される。どちらもエントロピーを減少させている。

生命を38億年の時間スケールで連続して捉え、地球と生物全体の空間スケールで捉えると、それは拡張した散逸構造であるといえる。この拡張した散逸構造の特徴は、入力されるエネルギーの一部が次第に生物のDNA情報に姿を変え、遺伝情報を蓄積していくことである。人類の活動もまた、言葉の情報を蓄積し、付加価値自由エネルギーを増大させている。生命はこのような大規模非平衡状態にあり、常にエネルギーの流入によって成り立っている。物質の運動の歴史性を考慮すれば、付加価値自由エネルギーは物理的エネルギーに裏付けされていると言える。

まとめ

現在の生物は約38億年の長い年月にわたって生命の鎖でつながれている。生物は生物自身と環境からくるさまざまな圧力に抗して、絶え間ない進化を遂げた。その全体の流れは物理的に見れば、非平衡不可逆過程である。宇宙全体から見て、地球上で起こっていることは少し風変わりであるかも知れないが、地球上のあらゆる変化は物理の法則に則っているはずである。すなわち、地球全体として、太陽光のエネルギーをとり入れることによって、物質を作り、生物を増やし、建造物を作り、エントロピーを減少させるあらゆる人類の活動が可能になっている。熱力学の法則の範囲内に人間の活動がある。人間はそのような制約を忘れたかのように、生産活動・経済活動を続けているが、それは危険なことである。大量生産・大量消費・大量廃棄の現代社会がもたらす地球環境への深刻な影響について多くの報告がなされている。人類の知的生産活動も物質界の非平衡不可逆過程と何ら異なる事のない物理法則に則っていることを指摘することは重要である。