

生命起源論

——フリーマン・J・ダイソンの理論を中心として——

立木 教夫

目次

- 一、はじめに——科学的生命観の現在
- 二、様々な生命論および生命起源論
- 三、ダイソンの生命起源論における二段階仮説
- 四、ダイソンのトイ・モデル
- 五、生命の基本的特色——ホメオスタシス

一、はじめに——科学的生命観の現在

科学技術の進歩により、人間の生命にたいする根本的操作が可能となってきた。それは、DNA組み換えというレベルからはじまり個体間の臓器移植、更には、生命の誕生から死の操作に至るまで、時間的にも空間的にも様々なレベルで行われている。すでに我々は生命技術を実用化し、人類を含めた生命系全体の進化の舵取を手掛けている。将来、この科学技術はますます洗練の度を高めていくことは確実である。

我々が、どのような生命系の未来を描き出すのか、また、どのような価値観に従って生命技術を利用していくのかということに大きな影響をもっているのは、我々が共有している科学的生命観である。もちろん、科学技術の発展により科学的生命観は変化していくが、科学技術の適用を方向づけているのはやはり科学的生命観である。

このように、我々がどのような科学的生命観を共有しているかということは、人類の未来にとって重大問題なのである。

現在、我々が共有している科学的生命観は、生命の本質を遺伝子に還元してとらえる立場である。遺伝コードの解読、遺伝子の発現機構の解明、DNA組み換え技術の実用化と、その基盤はますます堅固なものとなつてきている。分子生物学者は、「遺伝子は、生物の形、行動、考え、働き、すべてを決めている」^[1]とまで断定している。このような分子生物学的生命観は、圧倒的な実証性を背景として、我々の科学的生命観を規定しているのである。我々は、知らず知らずのうちにDNA一元論ともいふべき生命観に支配されるようになってきた。

我々は、人間も含めたすべての生物はDNAの表現体にすぎないといわれたとき、たとえそれがすべてではないだろうとの疑問を抱いたとしても、その疑問をDNA決定論と比肩し得るほど強固な基盤の上に展開することはできない。我々は、つい最近まで、そのような理論を持ち合わせていなかったのである。

最近、「三次元の情報は一次元の情報だけでは生成されない」として、「三次元の構造情報」の重要性が取り上げられている⁽²⁾。これなどが、DNA一元論的見方を根本的に修正することになるのかもしれない。しかし、現在のところでは、DNA中心論を相対化し得るほど強力な理論と実証性を備えているわけではない。

私を知る範囲では、プリンストン高級研究所の理論物理学教授、フリーマン・J・ダイソン (Freeman J. Dyson, 1923-) の理論が、DNA一元論を相対化するであろう最も有力な議論であると思われる。

彼は、生命の起源論に、次のような生命の特色を持ち込もうとした。

「私は、生命の主要な特質は、複製よりはむしろホメオスタシス、単一性よりはむしろ多様性、遺伝子の圧政よりはむしろ細胞の柔軟性、部分における厳密性よりもむしろ全体性におけるエラー・トレランス (error toler-

ance) にあるとする、個人的な哲学によって導かれつつ、生命の起源の枠組を推測してきた⁽³⁾。」

彼は、このような生命観が盛り込めるような生命の起源に関する仮説を提示し、その後生命の起源の数理モデル——彼はおもちゃのようなモデルという意味で、トイ・モデルと呼んでいる——を作ってみせた。彼が提示した生命の起源論は、きちんとした数理モデルとして提示されているが故に、我々の科学的生命観をより豊かなものとしていく上で、貴重な議論となっている。

生命現象は複雑な現象である。この複雑性を問題にする場合、立場は、大きく二つに分かれる。第一は、単純なものからスタートして次第に複雑になってきたと考える立場であり、第二は、もともと複雑なものからスタートし、ますます複雑さを増大してきたと考える立場である。第一の立場は、DNAに到達し、そこから総合を目指すという展開をとりつつある。第二の立場は、はじめから複雑性をとらえて出ることから、理論化も実験も非常に困難を伴った。近年に至ってようやく、ダイソンの理論的定式化が行われたが、実験的検証はまだまだ実現していない。

私は、ダイソンが生命の起源の問題に取り組んでいることを知ったとき、ちょうどシュレーディンガーがおこなったのと同じような、生命の研究における重大なブレイク・スルーがもたらされるのではないかと思った。ダイソンは、朝永振一郎 (1906-79)、ファインマン (Richard P. Feynman, 1918-88)、シュウィンガー (Julian S. Schwinger, 1918-) とならんで、量子電磁力学の定式化を成し遂げるとともに、理論物理学者として数多くの業績を生み出した天才的物理学者である。ダイソンの伝記をかいたケネス・ブラウアーの著書を読んでみると、コネル大学でダイソンに物理学を教えたノーベル賞学者ハンス・ベーテ (Hans Albrecht Bethe, 1906-) の言葉として、「私の教えた生徒のなかでも、おそらく一番才能に恵まれた男じゃなかったのかな。彼は非常によくで

きた⁽⁴⁾とあり、また、彼のかつての同僚研究者であるセオドア・テラーの言葉として、「フリーマンの才能？ 宇宙的さ。彼ほどいろいろなものあいだに潜んだ相互関係を見抜ける人間はいないんじゃないか？ 彼はね、相互の関連性を見るんだ⁽⁵⁾」とある。更にまた、「この惑星が生み出した、もつとも傑出した理論物理学者のひとり⁽⁶⁾」という評もある。複雑性を最初に想定した生命の起源論は、システムの動的側面を定式化できる人物を、必要としていたのである。

ダイソンは、一九八二年に「生命の起源に対するモデル」(A Model for the Origin of Life)と題する論文で、『ジャーナル・オブ・モレキュラー・エヴォリューション』に発表した⁽⁷⁾。これが、彼の生命の起源に関する最初の貢献である。そして、二年後の一九八四年十月に、彼は日本を訪れ、東京と京都で行われた仁科記念講演で、「生命の起源」(Origins of Life)——「⁽⁸⁾」に於いて、単数のoriginではなく、複数形のoriginsが用いられていることに気付かれたであろうか——について論じた。

このとき、彼は、生命の起源に関心をもつようになった経過の一端と、彼の取り組みの姿勢について、次のように語った。

「ほかの年配の物理学者たちと同じように、ハドロンとレプトン⁽⁸⁾のこみいった階層構造を説明するために、毎日のように新しいモデルを考へだしている若い研究者と競争をすることを、私はしばらく前にやめました。私は若い人々がやっておられることに敬服しておりますが、進歩のペースがもつとおそい、あまり流行していない領域を研究することの方が性に合っています。私は生物学、特に生命の起源の問題に注目しました。これは、物理学というよりもむしろ化学の問題ですが、物理学者でも、化学実験によって検証可能なアイデアを出すことによって、この問題の解明にささやかな寄与ができる望みがあります。生命の起源の問題が、理論的な思弁

のみによって解決できると想像するのは、ばかっています。生物学の分野に入った理論物理学者は、謙虚な気持ちで行動しなければなりません。われわれの役割は、問題に答えることではなくて、生物学者や化学者が答えることができるかもしれないような問題を提出することです⁽⁹⁾。

本稿では、ダイソンの議論を中心として、生命をいかにとらえるかという基本的視点、彼の生命の起源における仮説、モデルの構築と解釈、生命全般への言及などを取り上げ、遺伝子中心の生命起源論にたいする、相補的立場を浮き彫りにしていきたい。ダイソンが提示したモデルは、今日、一面化しつつある遺伝子中心の生命観を補い、より豊かな科学的生命観を構築していく上で、大きな第一歩となるであろう。このような意味において、彼の生命の起源に関する理論は、人類にたいする貴重な貢献なのである。

〈注〉

- (1) 本庶佑「ヒトの生命は特別か——遺伝子から見たヒト」、宇沢弘文・河合隼雄・藤沢令夫・渡辺慧編『転換期における人間——生命とは』、岩波書店、一九八九年、八〇頁。
- (2) 神沼「真」コンピュータとしてみた生命——発生・形態形成・知能」、前掲書、二一六頁。
- (3) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, Harper & Row, Publishers, New York, 1988, p. 96.
- (4) ケネス・ブラウアー著、芹沢高志訳『宇宙船とカヌー』、ちくま文庫、一九八八年、四〇頁。
- (5) 前掲書、一〇二頁。
- (6) 前掲書、一二頁。
- (7) Freeman J. Dyson, "A Model for the Origin of Life," *Journal of Molecular Evolution*, Springer-Verlag, 1982, 18:344-350.
- (8) 現在、素粒子は三種に大別されている。それらは、強い相互作用をするハドロン族、強い相互作用をしないレプトン族、そして、相互作用を媒介するゲージ粒子であ

る。ハドロン族は更に、バリオン族（陽子、中性子、 Λ 粒子、 Σ 粒子、 Ξ 粒子など）と中間子族（ π 、 K 、 η など）に細別できる。しかも、ハドロン族はクォークとグルオンの結合状態であることがわかっている。（『岩波理

化学辞典第4版」による）

(9) フリーマン・J・ダイソン「伏見謙訳」『生命の起源』、『科学』Vol. 55, No. 5, 岩波書店、二六八頁。

二、様々な生命論および生命起源論

ダイソンの生命起源論は、先人の学説を踏まえた上で提出されている。主な生命起源論としては、オパーリンの理論、アイゲンの理論、ケアンズ・スミスの理論が検討されているが、そのほかに、彼の理論を構築する上で、影響を受けた考え方として、シュレーディンガー、ノイマン、オーゲル、マーグリッス、木村資生などの研究者の名が挙げられている。ここでは、ダイソンが、どのような視点から、これらの理論ならびに考え方に注目しているのかを、見ていくことにする。

(一) オパーリン

ダイソンが一番気に入っていると述べているのが、オパーリン (Aleksandr Ivanovich Oparin, 1894-1980) の生命起源論である。オパーリンの理論は、『生命の起源』⁽¹⁾において展開されている。この著書は、遺伝子の化学的構造や性質が発見されるはるか以前——DNAの二重らせん構造が解明されるのは一九五三年である——に書かれたものである。彼は、生命の起源における順序としては、細胞↓酵素↓遺伝子の順に出現したと考えている。

適当な油液と水を混合したとき、油と水はコアセルベートという安定な液滴様混合物を形成することが知られている。コアセルベートは非生物学的過程で容易に形成され、外見的には生細胞とよく似ている。オパーリンは、自然に生じる液滴が細胞の物理的フレームワークとなり、その内部により複雑な分子が次々と蓄積することによって、生命がスタートしたのだと主張した。次に、タンパク質が、液滴内部の多様な分子を自律的な代謝サイクルに組織し、そして最後に、遺伝子が登場したのだとした。オパーリンは、遺伝子の機能に関しては明確な観念をもっておらず、タンパク質よりも高次の生物学的組織に属するものと考えていた。⁽²⁾

ダイソンは生命の起源をモデル化する際に、このオパーリンの理論を基礎とした。その理由は、細胞内部に集積した分子集団から議論をスタートすることにより、ホメオスタシス、多様性、柔軟性、エラー・トレランスといった特質を組み込んだモデルを作れると考えたからである。

(二) シュレーディンガー

シュレーディンガー (Erwin Schrödinger, 1887-1961) は、生命の起源を論じてはいない。しかし、ダイソンは、シュレーディンガーが敷いた生命研究の路線、つまり、物理学者の立場から生命の研究を行っていく上で彼が指し示した方向が、後の生命の起源の研究に大きな影響を与えることになったとして、彼の考え方を検討している。

シュレーディンガーは一九四三年——DNAの構造が解明されるに先立つこと十年——、アイルランドのダブリンで、生命に関する講演を行った。そのときの講演は、『生命とは何か』⁽³⁾という本にまとめられている。この本は、多くの科学者に影響を与え、分子生物学の出現を促すこととなった。それは、シュレーディンガーの問い

の設定が、適切であったからだといわれている。

ダイソンは、シュレーディンガーが立てた問いを、次のように要約している。

「細胞が分裂するとき、複製される分子の物理的構造はどのようなものか？ 複製過程はいかに理解されるのか？ 世代から世代へと伝えられながら、これらの分子はいかにしてそれぞれの個性を確保していくのだろうか？ これらの分子は、いかにして高等動物の構造と機能にみられる組織を、作り出しているのだろうか？ また、これらの分子は、⁽⁴⁾

物理学の立場から生命を論ずるに当たって、シュレーディンガーは生命の二つの特質に着目した。それは、複製 (replication) と代謝 (metabolism) である。複製は、分子構造の量子力学的な安定性により説明 (『生命とは何か』の全七章とエピソードのうち、第二章から第五章までがこの説明に当てられている) し、代謝は、生細胞が熱力学の法則に従って環境から自由エネルギーを取り出す能力——負のエントロピーの議論として有名になったのはこの議論である——により説明 (第六章がこの説明に当てられている) した。しかし、シュレーディンガーは、この両者の関係について、根源的な問いを発していない。つまり、生命は一つであるのか、それとも二つなのか、代謝と複製の間には論理的な関係があるのか否かといった問いを、問うていないのである。このような問いかけなしに、彼は代謝よりも複製に重点を置いた説明を展開したのである。ダイソンは、その理由を二点指摘している。⁽⁵⁾ 第一は、シュレーディンガーが量子力学の発見者の一人であったため、量子力学がもつ生物学的意義により強い関心を抱いたということである。第二は、シュレーディンガーはデルブリュック (Max Delbrück, 1906-1981) のファージ研究から多くの示唆を得ていたため、デルブリュックの目を通して生物の世界を見ていたことである。それがために、シュレーディンガーがとらえていた生命体は、バクテリア的でもなく、シヨウ

ジョウバエ的でもなく、複製機能に特殊化したバクテリオファージ的であったということである。

ダイソンは、シュレーディンガーの偉大な貢献を認めると同時に、彼が複製と代謝に注目しながら、これらの関係について根源的な問いを発しなかったことが、後の世代の生命研究を大きく歪めてしまったとしている。つまり、生命と複製は同一視されるようになり、生命の起源は複製の起源にほかならないとまで、考えられるようになったのである。

(三) ノイマン

シュレーディンガーが重要視しなかった代謝の問題を取り上げ、複製と代謝が等しく重要であることを示したのは、ノイマン (John von Neumann, 1903-57) である。ノイマンは、一九四八年——シュレーディンガーがダブリンで記念碑的講演を行ってから五年後のことであり、分子生物学が登場する五年前にあたる——に、プリンストンで、生細胞をコンピュータにたとえて複製と代謝の論理的関係を扱った講義を行った。ノイマンは、生物の機能と機械的オートマトンの機能の類似性を解明し、「オートマタの一般理論」⁽⁶⁾ を打ち立てたのである。

ノイマンのオートマトンは、二つの要素を備えていた。これらは、後に、「ハードウェア」と「ソフトウェア」と呼ばれることとなった。「ハードウェア」は情報を処理し、「ソフトウェア」は情報を構成している。

ノイマンは論理的立場から、ソフトウェアなしのハードウェアだけのオートマトンが存在し得ること、しかもそのオートマトンが代謝を維持し得ることを示した。また、ハードウェアなしのソフトウェアだけのオートマトンも存在し得ることを示した。このソフトウェアだけのオートマトンは、必然的に寄生的にならざるを得ず、他のオートマトンのハードウェアを借用しなくては、機能し得ないという特徴をもっている。

このようにノイマンが、複製と代謝が分離可能なことを、論理的立場から示したことにより、「代謝は可能だが複製は不可能だという、ハードウェアだけの生命体も考えられるし、また、複製は可能だが代謝は不可能だという、ソフトウェアだけの生命体も考えられる」ことになったのである。しかも、論理的にハードウェアがソフトウェアに先立たなくてはならないということが示された。これらのことが、ダイソンの生命の起源における二段階仮説にたいする論理的基礎を提供することとなったのである。

(四) アイゲン

ダイソンは、シュレーディンガーが重要視した複製の面を徹底的に追究した代表的研究者として、ドイツのマックス・プランク研究所のアイゲン (Manfred Eigen, 1927-) を挙げて⁽⁸⁾いる。

彼は、RNAの構成単位である四種類のヌクレオチドと、RNAの複製を媒介する触媒タンパク質を、試験管内の水に溶かしておき、これに少量のRNAを加えるという実験を行った。タンパク質は、溶液中のヌクレオチドを集めて、RNAを複製した。これはRNA分子が一つの場合でも実現することが判明した。

次にアイゲンが行ったことは、RNAなしの実験である。この場合、ヌクレオチドは複製すべきRNAという鋳型をもっていないことになる。この場合にも、試験管中にRNA分子が出現したのである。RNA分子が出現するまでの時間は、実験ごとにはばらつきはあるものの——典型的には、一、三時間の後に出現した——、統計的にランダムなプロセスを経て、RNA分子が作られたのである。このときのRNAにおけるヌクレオチドの配列は、実験ごとに異なっていた。

一旦、RNAが作られると、複製がはじまること、そしてまた、突然変異が生ずることも観察された。はじめに生じたRNAは、後に現れた突然変異体のRNAが、より効率的な複製を行ったために、取って変わられてしまふという淘汰も観察された。

アイゲンの実験が示していることは、複製すべきRNAがなくても、タンパク質触媒さえあれば、ヌクレオチドからRNAが生じ、子孫との間で生存闘争が行われるということである。

ダイソンは、これを非生命 (non-life) 状態から、生命が生じたと誤解してはならないと、注意を促している。アイゲンの実験では、生物から抽出されたタンパク質触媒が加えられていることを、忘れてはならないのである。生物起源の前駆物質なしに、生命的秩序を作り出すことには、未だ成功していない。しかし、アイゲンのこの実験は、生命の起源という問題を、単なる推測的議論から実験的検証が可能を議論に持ち込んだという点において、重大な意義を有している。⁽⁹⁾

このようなRNAを用いた実験を基礎として、アイゲンは複製重視の生命起源論を提示した。アイゲンの理論では、遺伝子↓タンパク質↓細胞という出現順序である。つまり、自己複製を行うRNAがはじめに出現したとし、次にタンパク質が出現し、それから細胞が物理的結合を与える道具として出現したと⁽¹⁰⁾しているのである。

この理論は、現在、広く受け入れられている。ダイソンは、その理由を二つ指摘している。第一は、遺伝子は核酸であるというエイヴリー (Oswald Theodor Avery, 1877-1955) の発見——一九四四年のこと——により、遺伝子の研究がタンパク質の研究よりも容易になったことである。第二は、RNAを作業物質に選ぶことにより、RNAの複製こそ、もろもろの生物学的な発展が可能となった基本的な過程であるということを示し得たことである。一度、遺伝コードが解明されると、核酸が基本的でありタンパク質は二次的であると考えるのは、ごく自然なこととなったとしている。

ダイソンはこのアイゲンの生命の複製起源説には、深刻な問題があることを指摘している。それは、複製が完璧に行われなくてはならないことである。つまり、複製にエラーが生じると、それは世代を重ねるごとに蓄積していき、徐々に生命系の劣化を招来し、ついには、系を無秩序化してしまうからである。これは、エラー・カタストロフイと呼ばれる。アイゲンが示した、エラー・カタストロフイ回避のための基準では、最大エラー率 N^{-1} が複製系のもつ情報量 N にたいして、 N^{-1} のオーガーでなくてはならないとしている。現在までに無生物条件で行われたRNA複製実験では、エラー率はせいぜい 10^{-2} のオーガーである。このことから、生命の起源時においては、100ビット以下の情報量をもつ系を想定しなくてはならないということになる。ところが、100ビット以下の情報量では、意味あるタンパク質化学を記述する上で、あまりにも情報量が少ないのである。このことは、アイゲン理論では生命の起源を論じられないということではない。ただ、彼の理論が必要としていることは、単純でしかも非常にエラーの少ない情報処理システムという、厳しい要求だということである。⁽¹¹⁾

(四) オーゲル

ダイソンは、アイゲンの実験とちょうど相補的な関係にある実験として、オーゲル (Leslie E. Orgel) が行った実験に注目している。⁽¹²⁾ アイゲンは、RNAなしのタンパク質触媒という条件で、ヌクレオチドからRNAを作ったが、オーゲルは、タンパク質触媒なしのRNAという条件で、ヌクレオチドからRNAを作ったのである。

もし、RNAが最初の生命体であると仮定するならば、生命の起源を理解するためには、RNAもタンパク質も存在しないと、RNAを作り出さなくてはならない。アイゲンもオーゲルも、まだこの目標は達成していない。

アイゲンもオーゲルも、タンパク質生命における代謝の起源については、何も語っていないが、ダイソンは、「代謝の起源こそ、実験化学者の探究を待ち望んでいる、次なる広大な処女地だ」と指摘している。⁽¹³⁾

(五) リン・マーグリス

リン・マーグリス (Lynn Margulis) は、エコロジストである。彼女は、細胞解剖学 (cellular anatomy) と分子遺伝学 (molecular genetics) の間に橋をかけるという、大きな仕事をした。彼女は、細胞進化の原動力は、寄生 (parasitism) と共生 (symbiosis) であったという考え方——この考え方は彼女のオリジナルではないが——を、熱心に追究し、体系化した。マーグリスの考え方は、侵入者とホストの関係は、病原体であったものが、慢性的な寄生者となり、共生的なパートナーとなり、そしてついには、ホストにとって欠くことのできない一部となったというものである。⁽¹⁴⁾ 彼女は、細胞内構造の大半は、細胞内部で起源したものでなく、伝染病のキャリアーのように細胞外から侵入してきたものに由来していることを証明するために、数多くの証拠を集め、一九八一年に、『細胞進化における共生』⁽¹⁵⁾ という著書を著した——例えば、ミトコンドリアは太古の好気性細菌、葉緑体はラン藻、ペン毛はスピロヘータに由来することを、明らかにしている。

ダイソンは、核酸こそ、最も古くしかも最も成功した細胞寄生者だと考えている。彼は、この考え方に基づき、マーグリスの進化説の枠組を進化のごく初期の段階にまで適用できるよう、理論的拡大を行ったのである。⁽¹⁶⁾

(六) 木村資生

ダイソンは、オパーリンの理論を数理モデル化する際に、木村が開発した分子進化の統計的扱いに関する数式⁽¹⁷⁾

を利用した。

木村は、進化の中立説を開拓した遺伝学者である。中立説とは、生命の歴史における種の進化の原因において、終始、ダーウィンの選択よりも、ランダムな統計的変異のほうが、重要であったとする主張である。ランダムな統計的変異による進化は、遺伝的浮動 (random genetic drift) —— 「遺伝子頻度が偶然に世代とともに増減する現象」⁽¹⁸⁾ —— と呼ばれている。木村は、遺伝的浮動のほうが、自然選択よりも強力に、進化を推し進めているといふ。

ダイソンは、遺伝的浮動も自然選択も、ともに重要であり、時と場所により、いずれかが重要となる、という考え方である。生物進化のごく初期、つまり、遺伝の機構が正確になる以前には、遺伝的浮動が支配的であったと考えている。⁽¹⁹⁾

この点について、ダイソンは次のように説明している。⁽²⁰⁾ 現在、生命の起源については何も分かっていない。生命の起源は、ゆっくりと生じたのか、急激に生じたのか、分らない。つまり、百万年もの時間的広がりの中で、ゆっくりとした過程を経て生じたのかもしれないし、あるいはまた、一秒の何分の一という短い時間に生じた分子的現象なのかもしれない。通常、自然選択は、長い時間においてより重要となり、遺伝的浮動は、短い時間においてより重要となる。生命の起源を、ゆっくりとしたものだと考えるなら、自然淘汰によるダーウィンの過程を考えなくてはならない。また急速なものだと考えるなら、淘汰なしの統計的ゆらぎによる木村の図式が適当となる。実際の過程は、おそらく、急激な変化が、ゆっくりとした適応期間によって分断されているという形であろう。完全な記述には、浮動と選択の両方を取り入れなくてはならない。生命が起源し正確な複製が行われなまま繁栄したという、生命の起源の二段階假説を検証しようとするなら、進化の初期においては、遺伝的浮動

が強く残っており、自然選択が比較的弱かったと想定するのが自然である。ダイソンはこのように指摘している。

(ハ) ケアンズスミス

ダイソンは、ケアンズスミス (A. G. Cairns-Smith, 1931-)⁽²¹⁾ の生命起源論が、二段階假説である点に注目している。⁽²²⁾

ケアンズスミスの理論は、粘土↓タンパク質↓細胞↓遺伝子の順序で展開したと仮定している。粘土から細胞にいたる第一段階では、主としてタンパク質の代謝機構が出現し、この機構に粘土粒子が複製要素として加えられている。第二段階では、粘土がもっていた複製機構が、核酸によってできた効率的な複製機構によって置き換えられた —— ケアンズスミスは「遺伝的乗っ取り」 (Genetic takeover) と呼んだ —— と考えている。

ケアンズスミスの理論を、要約しておこう。⁽²³⁾ 生命は、表面に吸着されたタンパク質分子の合成を誘導した粘土の結晶をもって、スタートした。後に、粘土とタンパク質が、細胞膜をつくることを学習し、細胞膜の内部に閉じ込めることとなった。粘土の結晶を含んだ細胞は、現生細胞において核酸が行っているような複製を、粗雑ではあるが、とりおこなった。原始的な粘土に基盤をおいた生命は、何百万年ものあいだ進化し続けていったであろう。そしてある日、細胞はRNAのほうが、粘土よりもよい遺伝物質であることを発見した。RNAが採用されるや否や、RNAを用いた細胞の代謝の正確さは、粘土を用いている細胞を、はるかに凌ぐこととなった。粘土に基盤をおいた生命は食べられてしまったか、あるいは、存在を抹殺されてしまい、RNA基盤の生命だけが残った。

<注>

- (1) A. I. Opalin, *The Origine of Life on the Earth*, 3rd ed., translated by Ann Sygne, Oliver & Boyd, Edinburgh, 1957. 石本真訳『地球上の生命の起源』、岩波書店、一九五八年。第四版の翻訳は、石本真訳『生命の起源』、岩波書店、一九六九年。更にその後のオパーリンの著作としては、一九七七年に出版された著書の翻訳がある。石本真訳『物質→生命→理性』、岩波書店、一九七九年で終焉。
- (2) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, pp. 77-8.
- (3) Erwin Schrödinger, *What is Life?: The Physical Aspect of the Living Cell*, Cambridge University Press, Cambridge, 1944. 岡小天・鎮田恭夫訳『生命とは何か——物理的のちみな細胞——』、岩波書店、一九五一年、一九七五年改訳。
- (4) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, pp. 58-9.
- (5) *Ibid.*, pp. 60-1.
- (6) John von Neumann, "The General and Logical Theory of Automata," in *Cerebral Mechanisms in Behavior--The Hixon Symposium*, ed. L. A. Jeffress, John Wiley, New York, 1951, pp. 1-41; and in *J. von Neumann, Collected Works*, Vol. 5, ed. A. H. Tsaub, MacMillan, New York, 1961-63, pp. 288-328. 「人工頭脳と自己増殖」、湯川秀樹・井上健編『世界の名著 現代の科学II』、中央公論社、一九七〇年。
- (7) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, p.63.
- (8) Manfred Eigen, William Gardiner, Peter Schuster, and Ruthild Winkler-Oswatitsch, "The Origin of Genetic Information," *Scientific American*, 244, No. 4, April, 1981, pp. 78-94. 邦訳は『サイエンス』11, 85, 1981. また、M・ナイマン・R・ナインクラー共著、寺本英・伊勢典夫・岩橋保・西尾英之助・椋弓絃共訳『自然と遊戯——偶然を支配する自然法則——』、東京化学同人、一九八一年、も参考にせよ。
- (9) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, p. 67.
- (10) *Ibid.*, p. 78.
- (11) Freeman J. Dyson, *Origins of Life*, Cambridge University Press, 1985, Cambridge, pp. 36-7.
- (12) Leslie E. Orgel, "Mini Review: RNA Catalysis and the Origins of Life," *Journal of Theoretical Biology*, Academic Press, London, 1986, 123, pp. 127-149. Stanley L. Miller and Leslie E. Orgel *The Origins of Life on the Earth*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1974. 野田春徳監訳『ミュー・ケー・エム 生命の起源』、培風館、一九七四年。
- (13) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, p. 68.
- (14) *Ibid.*, p. 68.
- (15) Lynn Margulis, *Symbiosis in Cell Evolution*, Freeman and Co., San Francisco, 1981. 永井進監訳『細胞の共生進化』、学芸出版ヤンマー、一九八五年。
- (16) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, p. 69.
- (17) Motoo Kimura, "Stochastic processes in population genetics," in *Mathematical Topics in Population Genetics*, ed. K. I. Kojima, Springer, Berlin, pp. 178-209, and *The Natural Theory of Molecular Evolution*, Theory of Automata," in *Cerebral Mechanisms in Behavior--The Hixon Symposium*, ed. L. A. Jeffress, John Wiley, New York, 1951, pp. 1-41; and in *J. von Neumann, Collected Works*, Vol. 5, ed. A. H. Tsaub, MacMillan, New York, 1961-63, pp. 288-328. 「人工頭脳と自己増殖」、湯川秀樹・井上健編『世界の名著 現代の科学II』、中央公論社、一九七〇年。
- (7) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, p.63.
- (8) Manfred Eigen, William Gardiner, Peter Schuster, and Ruthild Winkler-Oswatitsch, "The Origin of Genetic Information," *Scientific American*, 244, No. 4, April, 1981, pp. 78-94. 邦訳は『サイエンス』11, 85, 1981. また、M・ナイマン・R・ナインクラー共著、寺本英・伊勢典夫・岩橋保・西尾英之助・椋弓絃共訳『自然と遊戯——偶然を支配する自然法則——』、東京化学同人、一九八一年、も参考にせよ。
- (9) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, p. 67.
- (10) *Ibid.*, p. 78.
- (11) Freeman J. Dyson, *Origins of Life*, Cambridge Cambridge University Press, New York. 木村資生監訳・向井照美・日下部真一共訳『分子進化の中心説』、紀伊國屋書店、一九八六年。
- (12) 木村資生著『生物進化を考へよ』、岩波新書、一九八八年、三三頁。
- (13) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, p. 72.
- (14) A. G. Cairns-Smith, *Genetic Takeover and the Mineral Origins of Life*, Cambridge University Press, New York, 1982. 野田春徳・川口啓明共訳『遺伝的乗っ取り——生命の鉱物起源説——』、紀伊國屋書店、一九八八年。また、この大著を分かりやすく解説した書物として、A. G. Cairns-Smith, *Seven Chances to the Origin of Life: A Scientific Discovery Story*, Cambridge University Press, Cambridge. 石川純訳『生命の起源を解く七つの鍵』、岩波書店、一九八七年がある。
- (15) *Ibid.*, pp. 72-3.
- (16) *Ibid.*, pp. 79-80.

三、ダイソンの生命起源論における二段階仮説

ダイソンの生命起源の二段階仮説とは、生命は二度の起源をもつというものである。そして、それぞれの起源に対応して、二種類の生命体が仮定されている。一つは、正確な複製能力をもたずに代謝のみ行う生命体、つまり、タンパク質生命体であり、もう一つは、代謝能力をもたずに複製のみを行う生命体、つまり、核酸生命体である。¹⁾

この仮説の中には、先に概観した研究者の研究成果が、みごとに取り入れられている。つまり、生命を複製と代謝に分け、問題を理論物理学的立場から扱うにあたってはシュレーディンガー、生命を二種類に分離するにあたって、その考え方の論理的基礎はノイマン、生命起源論を二段階に分けたところではケアンズミス、二種類の生命体が寄生から共生へと進化したとする図式はマーグリス、第一段階の起源において、細胞が出現したとする仮説はオパーリン、この細胞内部で生じた現象を数学的に定式化するにあたっては木村の中立説、第二段階の起源において、核酸生命体が出現したとする仮説はアイゲンとオーゲルという形で、先人の研究成果が踏まえられているのである。

さらにまた、アミノ酸の前生物的合成および蓄積は簡単だが、ヌクレオチドの前生物的合成および蓄積はむずかしいという化学実験の成果も、考慮されている。ダイソンの二段階仮説では、アミノ酸のみが前生物的に合成されることを要求し、ヌクレオチドのほうは、タンパク質代謝の副産物として位置付けられている。²⁾

ダイソンは、生命の起源における二段階仮説を立てた後、第一段階を数理モデル化して見せた。次に、その数理モデルを多少詳しく検討していくことにしよう。

〈注〉

- (1) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, p. 64. (2) Freeman J. Dyson, *Origins of Life*, p. 24.

四、ダイソンのトイ・モデル

(一) トイ・モデルの構築

ダイソンの生命の起源モデルは、多様性、柔軟性、エラー・トレランスといった複雑性を組み込んだホメオスタティックなモデルである。彼は十個の主要な仮定を基礎として、モデルを定式化した。¹⁾

仮定1は、「オパーリン理論」を基礎とするというものである。

「細胞が最初に出現し、次に酵素が出現し、そしてずっと後に遺伝子が出現したとする。」

ダイソンがオパーリン理論に注目した理由の一つは、これが代謝モデルであり、その代謝が集団を構成する分子の触媒活性にのみ依存しているので、高いエラー・トレランスをもつということであった。

仮定2は、細胞の構造に関する仮定である。

「細胞は、不活性な液滴であり、液滴内に高分子集団を含んでいるとする。高分子は単量体——現在タンパク質をつくっているアミノ酸と似たようなものと考えてよい——から構成されている。細胞内の高分子は、一定数Nの単量体からなる。それに加えて、細胞外から内へあるいは細胞内から外へと拡散し得る遊離単量体が、外部から供給されており、また、高分子と単量体間の化学反応を引き起こすためのエネルギーも、外部から供給さ

れているとする。」

細胞は、物質的にも、エネルギー的にも、開放系である。また、細胞を特徴づけているのは、単量体の数 N である。

仮定3は、細胞の進化に関するものである。

「細胞は死なず、互いに相互作用をしないとす。ダーウィンの選択はない。細胞内の分子集団の進化は、ランダムな浮動によって進行する。」

ここに、木村資生の中立説が取り入れられている。

仮定4は、細胞の変化に関する仮定である。

「集団の変化は離散的に生じ、各段階は一つの置換突然変異よりなるとする。一つの突然変異は、高分子中の部位の一つにおいて、一個の単量体を別の一個の単量体で置き換えることである。」

ここに、変化の素過程が、離散的な置換突然変異という形で規定されたことになる。

グイソンは、この仮定について、必要以上に限定的であるが、扱いやすくするために導入したとしている。数学的な複雑さをいとわなければ、高分子の切断や接合、あるいはまた、単量体の付加や除去などといった、より現実的な化学反応過程を持ち込むこともできるのである。

仮定5は、突然変異の発生確率に関する仮定である。

「どの段階においても、高分子集団の N 個の部位はどこでも同じ確率 ($1/N$) で突然変異を生ずるものとする。」

ここにグイソンは、計算を容易にするために、非現実的であるとしながらもあえて、突然変異の発生確率はどこでも一様に $1/N$ と仮定したとしている。

仮定6は、高分子に結合されている単量体の状態に関する仮定である。

「与えられた高分子集団において、結合されている単量体は、活性あるいは不活性の二種類に分けられるとする。」

この仮定も、モデルを数学的に扱いやすくなるためのものである。グイソンは、分子配置の巨大な多次元空間を、一つの変数で置き換えたことになるのだと説明している。その変数は、活性に対しては1という値をとり、不活性に対しては0という値をとるのである。

仮定7は、単量体の活性と高分子の触媒機能に関する仮定である。

「活性単量体は、活性部位にあって、高分子が酵素として機能するための能力に寄与する。酵素として機能するということは、他の高分子における突然変異を選択的に触媒し、正しい種類の単量体が、活性部位に優先的に運び込まれるようにすることである。」

グイソンは、この仮定7には「代謝」の概念が定義されないまま用いられている、と指摘している。このモデルでは、活性単量体とは、他の単量体を活性化することであり、代謝とは、単量体間の循環的な入れ替えを意味する。そして、この循環的な入れ替えが、活性単量体を自律的に高いレベルに維持しているとき、集団全体として代謝活性をもっているということになる。

高分子 a が活性状態にあれば、これは他の高分子 b における突然変異を選択的に触媒し、正しい種類の単量体を選び込むことにより、 b は酵素機能をもった b' となる。 b' は c に働きかけ c' とし、 c' は d に働きかけ d' とする。このような循環的な入れ替えを通じて、集団全体の代謝活性が高まり、秩序状態を現出することになる〔図1〕。ここに、単量体の機能と高分子の機能が結び付けられ、酵素の触媒作用が定義され、自己組織性を生み出す基礎

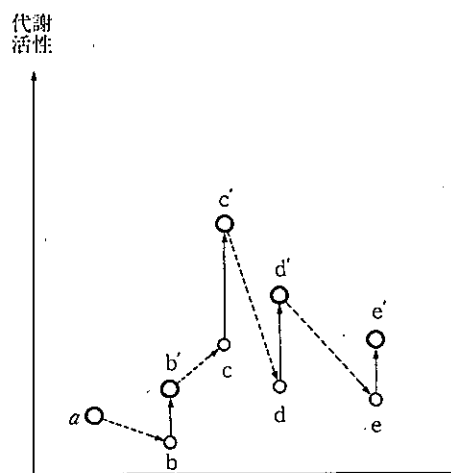


図1 酵素の触媒作用

媒の化学的性質の詳細によって決定される。」

ダイソンは、この仮定8は思い切った仮定だと指摘している。ここでは、一個の触媒集団の効率の平均を、一個の平均的触媒の効率で置き換えているのである。このようにすることにより、関数 $\phi(x)$ は単量体の詳細な配置には依存せず、ただ活性単量体の数にのみ依存することになるわけで、分子集団の記述は非常に簡略化されることになる。ダイソンはこれを、平均場近似 (mean-field approximation) と呼んでいる。これには、親集団全体の状態を示すパラメータ x が、突然変異における個々の単量体の振舞い $\phi(x)$ を支配し、突然変異が生じたときには、その突然変異を生じた単量体の (x) が娘集団全体の活性単量体の割合を示すパラメータとなっていることによって、

過程が取り込まれている。

仮定8は、突然変異により置き換えられた単量体が活性である確率を定義する。

「細胞中の活性単量体の割合が x (ここで $x = n/N$)、 n は活性単量体の数、 N は単量体の数) であるとき、新しい突然変異によって挿入された単量体が活性である確率を、 $\phi(x)$ とする。関数 $\phi(x)$ は、現存触媒集団が新しい触媒の生成を促進する際の効率 (efficiency) を示している。 $\phi(x)$ が x に依存するという仮定は、触媒活動が、親集団から新しく突然変異してできた娘集団へと、ある程度遺伝することを意味している。関数 $\phi(x)$ は、親から娘への遺伝法則を表現している。 $\phi(x)$ のとする数値は、触

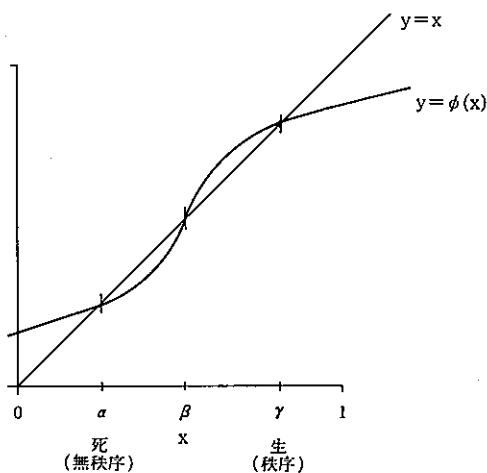


図2 出典 *Origins of life*. P.47

全体と個との間の動的関係が定式化されているのである。

仮定9は、関数 $\phi(x)$ の形を仮定している [図2]。

「 $y = \phi(x)$ はS字形をしており、0と1の間で、 $x = \alpha, \beta, \gamma$ の三点において $y = x$ と交わると仮定する。」

この曲線は、分子集団が三つの平衡状態を有することを意味している。平衡状態は $\phi(x) = x$ のときに生じる。なぜなら、親集団はそのときに限り自分と同じ平均活性をもった娘集団を生じるからである。ダイソンの指摘に従えば、この平衡状態は、曲線 $y = \phi(x)$ の傾きが1より小さいときは安定で、1より大きいときは不安定となる。

この安定性および不安定性を、グラフを用いて説明してみよう [図3]。例として、はじめに、一番下の平衡状態 $x = \alpha$ を考えてみることにする。ダイソンは、この状態を「無秩序状態」(disordered state) —— なぜなら、このとき平均活性が最も小さいから —— と呼んでいる。ここで、親集団のもつ平均活性 x_1 が α より少しばかり大きいところで、突然変異が生じたとき、突然変異の結果、娘集団が生ずる。この娘集団の平均活性は $\phi(x_1)$ である。この娘集団は、次の突然変異により孫集団を生ずる。そのとき娘集団は $\phi(\phi(x_1)) = \phi^2(x_1)$ という親集団として、孫集団を生じる。この孫集団の平均活性は $\phi^3(x_1)$ である。以下、突然変異が生ずることに同様の過程が繰り返されることにより、 $\phi(x_1), \phi^2(x_1), \dots, \alpha$ と、次第に α に近づいていくことが理解できるであろう。このように、突然変異を重ねることによって集団が変化するに従って、集団は α に向かって

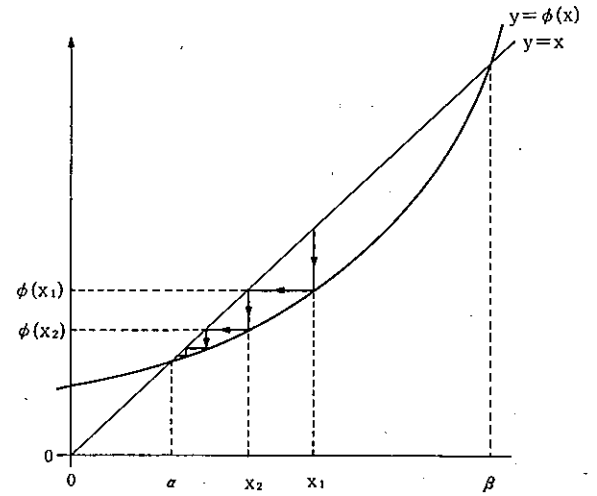


図3

ある。

グイソンは、秩序状態を「生」(alive)、無秩序状態を「死」(dead)と呼んでいる。「生」または「死」の状態にある集団は、平衡状態の近くでゆらぎを生じながら長時間その状態に止まる。しかし、大きな統計的ゆらぎが生じて、秩序状態から無秩序状態への跳躍、あるいはその逆の跳躍がおこる可能性がある。秩序状態から無秩序状態への跳躍を「死滅」(death)、無秩序状態から秩序状態への跳躍を「生命の発生」(origin of life)と呼ん

でいる。ここにおいて、生命の起源の問題を定量的に扱う準備ができたことになる。

仮定10では、熱力学的議論に基づき、関数 $\phi(x)$ を具体的に決定している。

「細胞内の触媒はどれも、突然変異分子の位置に活性単量体あるいは不活性単量体を置く活性化エネルギーに差を生ずることで、機能していると仮定する。もし触媒を構成しているすべての単量体単位が活性で、触媒分子が完全であれば、活性化エネルギーの差は、 U という一定値——この値はどの完全触媒にたいしても同じ——であると仮定する。ある一個の触媒が不完全で、細胞内の単量体全体のうち $x \ll N$ が活性であれば、正しい突然変異とまちがった突然変異の間で、活性化エネルギーにおける xU の差を生ずるものと仮定する。我々は、ここで再び平均場近似を行っているのである。つまり、様々な程度の不完全さをもつ触媒集合の平均的效果は、全集団の平均活性 x にまで識別力を低下させた一個の触媒の効果に等しいと仮定している。これは、より厳密な計算をする場合には、不必要な仮定である。

単量体の種類を $(1+a)$ 種とする。どの種類も同様に十分量存在すると仮定する。これは、各突然変異において、一つの正しい単量体置換と、 a 個のまちがった単量体置換が存在していることを意味する。触媒の効果は、正しい選択においては、まちがった選択に比して、 xU だけその活性化エネルギーを低下させることになる。このようなわけで、正しい選択の確率は、まちがった選択の確率よりも因子

$$b^x$$

だけ大きい。(3.11)で、

$$b = \exp(U/kT)$$

は、絶対温度が T のときの完全な触媒の識別因子であり、 k はボルツマン定数である。統計的重み b^x をもつ一種

滑り落ちてくることになる。親集団の x が α よりわずかに小さいときも同様にして、滑り上がっていくことがわかる。このようにして、 $\phi(x) \triangleq \Delta$ であれば、 α における平衡状態は安定であることが示されるのである。

同様に、一番上の平衡状態である $x \ll \beta$ も、 $\phi(x) \triangleq \Delta$ であるから安定であるといえる。この上方の状態を「秩序状態」(ordered state)——なぜなら、そのときの触媒活性が一番大きいから——と呼ぶことにする。

中間の平衡点 $x \approx \beta$ では、集団が β より少しでも大きな x をもっている場合、突然変異を重ねるに従って β から遠ざかって行く。また逆に、 β より少しでも小さな x をもっている場合、やはり β から離れていってしまう。このようにして、 $\phi(x) \triangleq \Delta$ であれば、 β における平衡状態は不安定であることが示されるのである。

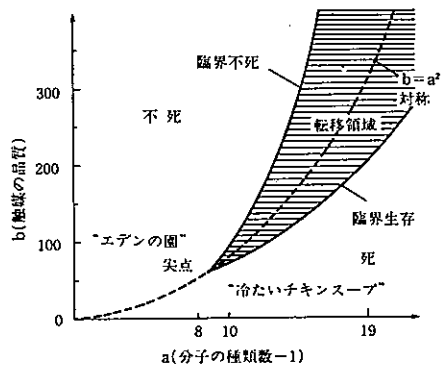


図 4-1 出典『科学』Vol. 55, No. 6, p. 373.

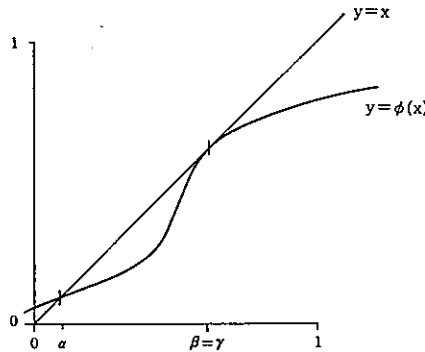


図 4-2 臨界生存

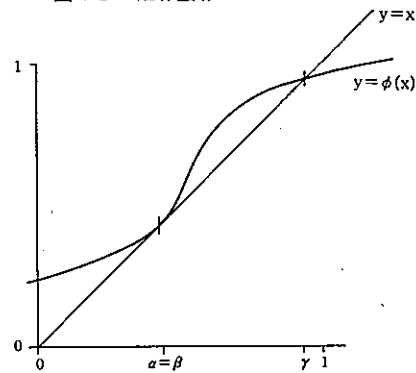


図 4-3 臨界不死

この数値は非常に興味深い推論を可能にする。つまり、秩序-無秩序転移が生ずるためには、 $a \parallel \infty$ 、単量体の数としては、 $a+1 \parallel \infty$ 種類以上が必要だということを示している。このことは、 $a \parallel \infty$ 、つまり、単量体の数が 4 —— RNA のヌクレオチドの数に相当している —— では、秩序-無秩序転移は生じないことを示している。また、 b のオーダーとしては、大体 10^3 である。現生生物の酵素の場合、そのオーダーは、 10^3 から 10^4 である。この b の値は、原始酵素の識別能力としては合理的な値であると、ダイソンは指摘している。

という数値が得られる。

$$A > 2, a > e^2 = 7.4$$

$$B > 4, b > e^4 = 54.6$$

とする。計算の見通しをよくするために、対称モデル、つまり、 $\alpha, \beta \parallel 1/2, \gamma \parallel 1 - \alpha$ の場合で考えることにする。計算の見通しをよくするために、対称モデル、つまり、 $\alpha, \beta \parallel 1/2, \gamma \parallel 1 - \alpha$ の場合で考えることにする。

$$\phi(\beta) = \beta = 1/2$$

$$\phi'(\beta) > 1$$

という条件から

$$B = \log b$$

$$A = \log a$$

$$\phi(x) = [1 + ab^{-x}]^{-1} = [1 + \exp(A - Bx)]^{-1}$$

より、

まず、 $y = \phi(x)$ が $y = x$ と $x = \alpha, \beta, \gamma$ の二点で交差する場合を考える⁽⁵⁾。

このようにしてモデルが得られた後、次に吟味すべきことは、モデルの影響を計算することと、どのような a, b, N の値にたいして「興味深い振舞い」をするのか —— つまり、無秩序状態から秩序状態へ妥当な確率でジャンプするのか —— ということである。

(二) モデルに基づく考察

類の正しい選択に対し、統計的重み 1 をもつ a 種類のまちがった選択がある⁽⁴⁾。関数 $\phi(x)$ は、各突然変異において、正しい選択をする確率であるから、

$$\phi(x) = (1 + ab^{-x})^{-1}$$
 となる。これは、S 字形の関数となっている。」

この $\phi(x)$ が秩序-無秩序転移を示すのは、臨界生存 (marginally alive) ——つまり、 $a, \beta \ll \gamma$ の場合——と、臨界不死 (marginally immortal) ——つまり、 $a \approx \beta, \gamma$ の場合——で限界付けられる範囲内に入っている場合である[図4]。先に吟味した、対称の場合は、ちょうどこの中心に相当している。臨界生存と臨界不死の限界付けられた範囲内で、モデルが、秩序-無秩序転移を示す場合、 a, b は、

$$a \text{ は } 8 \text{ から } 10 \\ b \text{ は } 60 \text{ から } 100$$

である。このとき集団の規模はどのくらいであろうか。ダイソンは、

$$N \text{ は } 2000 \text{ から } 20000$$

という計算結果を示している。⁽⁶⁾

また、他のパラメータの数値についても、表1のような計算結果を示している。⁽⁷⁾

ここにおいて重要なことは、このトイ・モデルが高いエラー率に耐え得ることである。トイ・モデルは、正確な複製を放棄することにより、複製系固有のエラー・カタストロフィを克服している。また、分子構造の制御を正確に行う必要もないし、また、そのようなことを実現してもいない。この正確さの欠如こそ、10000の構成単位からなる集団を、奇跡を引き合いに出すことなく、秩序状態へとジャンプさせるものである。はじめから正確な複製とエラーに対する低い耐性を想定した生命の起源モデルにおいて

パラメータ	a	b	α	β	γ	N_c
臨界生存	8	62.9	0.32	0.59	0.59	11131
対称	8	64	0.33	0.50	0.67	26566
臨界不死	8	65.7	0.39	0.39	0.70	∞
臨界生存	10	89.4	0.19	0.67	0.67	1006
対称	10	100.0	0.20	0.50	0.80	2070
臨界不死	10	128.0	0.29	0.29	0.87	∞

表1

は、N個の構成単位からなる集団を、無秩序から秩序状態へと自発的にジャンプさせるには、Nのオーダーは、100またはそれ以下でなくてはならないことは、すでに指摘した通りである。これとは対照的に、非複製モデルでは、秩序状態への転換は、10000のオーダーの集団で生じ得る。ダイソンのモデルでは、秩序状態——つまり、点 γ ——におけるエラー率は、典型的なところでは、20から30パーセントというものである—— $\phi(x)$ は正しい選択をする確率であるから、エラー率は $1-\phi(x)$ で与えられる。エラー率25パーセントとは、各分子の構成単位でいえば、四つのうち三つは正しい位置にあるということである。このように大きなエラー率は、非複製システムの場合には、許容できるが、複製システムの場合は、全く受け入れることのできなものである。25パーセントのエラー率で機能しうる能力が、ダイソンのモデルにおける秩序状態を、生物学的に興味深い集団規模において、統計的に接近可能なものとしている。⁽⁸⁾

(三) トイ・モデルが示唆する問題

代謝中心の生命の起源モデルが作られたことにより、これまでの複製中心の生命起源論とは異なる問いの立て方が可能となった。ダイソンは、生命の起源から進化にわたるいくつかの問題を検討している。⁽⁹⁾

「最初の生命体はタンパク質でできていたのか、核酸でできていたのか、それともこの両方が混じったものでできていたのか。」

ダイソンは、彼のモデルから得たaが8から10という数値であること、生命起源当時における前生物的化学環境では、ヌクレオチドよりもアミノ酸のほうがうまく適合していたであろうこと、そしてさらに、核酸を寄生生物として取り扱いたいという好みの問題から、タンパク質を選ぶとしている。

「どの段階においてランダムな遺伝的浮動が自然選択へ道をゆずったのか。」

トイ・モデルでは自然選択が作用しないと仮定していた——仮定3がこれにあたる——が、一旦、細胞が秩序状態に到達すると、モデルの限界を超えて、進化の新しい局面へ入っていく。同化により集団の大きさNが増大し、Nとともに秩序状態の寿命が指数関数的に増加していく。細胞は、無秩序状態に逆もどりすることなく、急速に安定化されていく。成長と分裂を繰り返す、単量体の供給が欠乏してくると、死ぬ個体が出てくる。この時点から、自然淘汰による進化が始まったとダイソンは考えている。

「このモデルは分子生物学のセントラル・ドグマに矛盾するものであろうか。」

トイ・モデルは、ごく初期の生命には、このドグマが適用されないことを示唆している。ダイソンは、始原細胞は子孫に遺伝情報をタンパク質の酵素の形で伝えたのではないかとしている——代謝生命体における遺伝は仮定8に示されていた——。そして、論理的には、相互の合成を触媒し合っている一群の酵素が、遺伝情報を運んではならないとする理由は存在しないと述べている。

「核酸はどのようにして生じたのか。」

核酸の起源は、ATP——核酸の化学的近縁体であり、代謝過程におけるエネルギー運搬体——の取り込み過ぎに起因する始原細胞の病気にある、と説明している。ダイソンはマーグリスの図式に従って、核酸は、ATP代謝の消化不可能な副産物↓病原物質↓寄生生物↓共生生物↓細胞の構成器官へと、変遷してきたものにとらえている。

このほか、「現生生物の遺伝装置はどのようにして進化してきたのか」、「全生物種に共通の祖先——最も新しいもの——はどのくらい古いのか」といった興味深い問題についても、考察が加えられている。

〈注〉

- (1) Freeman J. Dyson, *Origins of Life*, 1985, pp. 45-50.
- (2) この平均場近似は、多体系の統計力学や量子力学的問題を取り扱い扱う一つの基本的な近似法である。系の中の一個の粒子に着目して、それ以外の粒子との相互作用の効果果はある平均的な力の場(平均場)で表せるとし、その中での粒子の運動や統計的挙動をしらべ、それが他の粒子に及ぼす力の平均を求め、これが仮定された平均場に等しい、という無矛盾条件(self-consistent condition)から、平均場を決定するという手法がとられる。(『若波理化学辞典第四版』による)
- (3) エネルギーEの微視的状态の一つが実現される確率は、
(4) $\frac{1}{N} \exp(-E/kT)$ に比例する。
(5) Freeman J. Dyson, "A Model for the Origin of Life," *Journal of Molecular Evolution*, 1982, 18, p. 347.
(6) Freeman J. Dyson, *Origins of Life*, p. 51.
(7) Freeman J. Dyson, "A Model for the Origin of Life," p. 349.
(8) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, pp. 84-5.
(9) *Ibid.*, p. 67.

五、生命の基本的特色——ホメオスタシス

ダイソンは、原始生命の特色は複製ではなく代謝にあったとして、トイ・モデルを構築した。このトイ・モデルに組み込まれた生命の基本的特色は、多様性、柔軟性、エラー・トレランスといったものであったが、とりわけ重要な特色は、ホメオスタシスである。彼は、ホメオスタシスの重要性について、次のように述べている。

「私は、始めに複雑性があったと主張する。生命の本質は、初めから、分子構造の複雑なネットワークに基礎

をおいた、ホメオスタシスであった。生命は、一個の細胞のレベルであれ、生態系のレベルであれ、あるいは人類社会のレベルであれ、本質的に単純化に抵抗するものである。⁽¹⁾

ホメオスタシスという用語は、アメリカの生理学者、キャノン (Walter B. Cannon, 1871-1945) によって概念化されたものであり、現在では、「固定的あるいは恒常的な内部環境を含んでいるが、しかし、そこから更に進んで、恒常性を保持するための、あるいは、秩序状態からはずれたときに内的状態を正常に戻すための、動的な自己」制御的過程を示唆するようになってきた⁽²⁾と、説明されている。

ダイソンは、この生理学的概念を生命起源論に適用し、ホメオスタシスとは、「変化する環境にあって、定常的かつほぼ一定の化学的バランスを維持する能力」、あるいは、「化学的な制御とフィードバック・サイクルからなる機構で、細胞中の分子種が正しい割合——多すぎないよう、少なすぎないよう——で生産されるよう保証するもの」と、とらえた⁽³⁾。

この定義は、トイ・モデルを構築する際に、始原細胞内の分子集団が定常的な代謝レベルにおいて、ホメオスタティックな平衡状態を維持し得るとするならば、その集団は何種類の分子種を含んでいなくてはならないかという問いとして設定され、秩序・無秩序転移が生じるためには、2000から20000の単量体が重合してできる数百種の高分子集団からなることが必要だという、計算結果を得たのであった。

ダイソンは、このような理論的結果は、実験的研究によって裏付けされなくては意味がないとして、ホメオスタシスの起源に関する実験法にまで踏み込んで、次のような提案を行っている。

「そのような実験は、どのようにしたらやれるだろうか。私は、実験を示唆することが、実験を行うよりも遙かに容易であることは、よく心得ている。まず第一に必要なことは、実験を可能にするホメオスタシス系の研

究素材——すなわち、スピーゲルマンのQ β ウイルスやアイゲンのヌクレオチド・スープに匹敵する研究素材——を見つけることである。この素材を、トップ・ダウンとボトム・アップの両方向から研究し、中間のどこいから両者が出会うかを見つけることである。トップ・ダウンで調べるには、適当な生物が必要である。これは、複製装置を失っているが代謝やホメオスタシスの機能は維持している脱核細胞である。われわれは、これから本質的でない分子構成物を徐々に取り除いていく間、これを人工的に生かしておく必要がある。このようにすることで、多くの試行錯誤があるうが、ホメオスタシス装置における、これ以上は単純化し得ない最小限度の複雑さというものを、見いだせると予想される。ボトム・アップで調べるには、オペーリン流の液滴の中に合成分子の集団を閉じ込め、様々な触媒や代謝物質を組み合わせたものを加え、永続的なホメオスタシスの平衡が成立するまで続けるのである。もし、われわれが幸運であるならば、トップ・ダウンの実験と、ボトム・アップの実験が、ある程度収束してくるようになるだろう。両者が収束してくれば、生命が原初の発展において、混沌からホメオスタシスへとたどってきたであろう道を、示すことになるだろう⁽⁴⁾。

このような生物学的・化学的実験研究と平行して、ホメオスタシスの起源モデルのコンピュータ・シミュレーションの必要性についても言及している。ダイソンは、コンピュータ・シミュレーションにより、様々なカタストロフィが明らかになるだろうと予測している。カタストロフィを通して、ホメオスタシスが崩壊するモードの研究がすべて行われたとき、はじめて、ホメオスタシスの意味が理解できるようになるだろうと期待している⁽⁵⁾。

ダイソンの生命の起源における二段階仮説では、第二段階目に複製の起源が位置づけられている。細胞寄生者としての核酸は、分子生物学者によれば、生物のすべてを決めているといわれるごとく、圧政的な厳密性をもった複製システムを作り上げている。生命起源の第二段階以降の発展においては、第一段階において仮定されてい

た、多様性、柔軟性、エラー・トレランスをもったホメオスタティックな特徴は失われてしまったのだろうか。

ダイソンは、第一段階と第二段階の特質の関係は、失われることなく、相互に協調しながら進化してきたとらえている。生命の歴史というものは、ちょうど音楽における対位法のようなもので、二つの声部からなる二部楽曲である。複製機構は、その利己的な目的を全体のネットワークに課せうとし、また、ホメオスタシスが、構造における多様性と、機能における柔軟性を、最大化しようとする。生命は、この間の動的バランスの上に成立してきたのである。複製機構の圧政は、どの生物体にも本質的に備わっているホメオスタシス——複製機構よりも古くからある——という協同的な構造によって、つねに緩和されてきたのだ。⁽⁶⁾

そして、生命のこのような特質をよく示しているのが、ジャンクDNAの存在である。ジャンクとは、がらくたとか、廃品ということであり、ジャンクDNAはまさに、「無機能で無用の長物」であると考えられている。このようなDNAを大量に抱え込んでいるところに、生命の本質的「杜撰さ」(slapdashness)が表れているとダイソンはいう。そして、最もよく生存するシステムというのは、ジャンクを大量に抱え込むことができるような、あまり微調整されていないシステムであるとしている。⁽⁷⁾

これは厳密さが求められる複製中心の生命起源論からは出てこない、非常に興味深い指摘である。ダイソンのトイ・モデルは、約25パーセントのエラーを許容し得るモデルであることを、思い出してほしい。

ダイソンが作ってみせたトイ・モデルは、複製ではなく代謝を取り上げたモデルである。このことは、別の表現をするならば、生命の起源を物質的側面から説明するのではなく、いわば機能的側面から説明したものであるといえよう。彼は、生命の始原物質を突き止めたのではなく、構成分子の動的状態における機能を明らかにしたのである。動的状態が無秩序から秩序へ転移し、その秩序が保持されるところにホメオスタシスと呼ばれる動的

恒常性が実現したとして、ここに生命の起源を読み取ろうとしたのである。

分子生物学が問題にしている生命の起源は、複製の起源であり、始原物質の解明に主眼がおかれていた。この探究の路線において見いだされてきた複製分子——つまりDNA——の働きを通して構築された生命観は、単一的、圧政的、エラーにたいする不寛容性といった性格をもった複製的生命観である。

ところが、ホメオスタシスを基礎として展開された生命の起源は、動的生命観であり、多様性、柔軟性、エラーにたいする寛容性といった性格をもった代謝的生命観である。ここでは、DNAの絶対的支配は相対化されており、システム全体との協調関係が重要視されている。このような生命観は、これまで思想としては語り得たものの、確固とした科学的立場からは、厳密なモデルを欠いていたため、取り上げることができなかったものである。従来、とかく一面的になりがちであった現代の科学的生命観を、より正しいものへと導いていく上で、ダイソンの生命起源論は、非常に貴重な貢献である。

〈注〉

(1) Freeman J. Dyson, *Origins of Life*, p. 75.

(7) 大野乾著『生命の誕生と進化』、東京大学出版、一九八

(2) L. L. Langley, *Homeostasis*, Reinhold Publishing

八年、一八頁。

(3) Freeman J. Dyson, *Origins of Life*, p. 61.

(8) Freeman J. Dyson, *Infinite in All Directions*, pp. 95-6.

(4) *Ibid.*, pp. 64-5.

(5) *Ibid.*, pp. 65-6.

(6) *Ibid.*, p. 76.

参考文献

ダイソンの生命の起源に関する文献としては、次のものがある。

- Freeman J. Dyson, "A Model for the Origin of Life," *Journal of Molecular Evolution*, Springer-Verlag, 1982.
——, *Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, 1985. 大島泰郎・木原抜訳『ダイソン生命の起源』、共立出版、一九八九年。
——, 『生命の起源 I』、『科学』、岩波書店、Vol. 55, No. 5, May, 1985.
——, 『生命の起源 II』、『科学』、岩波書店、Vol. 55, No. 6, June, 1985.
——, *Infinite in All Directions: Gifford Lectures Given at Aberdeen, Scotland, April–November 1985*, Harper & Row, Publishers, New York, Cambridge, Philadelphia, San Francisco, Washington, Sydney, 1988. 鎮目恭夫訳『多様化世界——生命と技術と政治——』、みすず書房、一九九〇年。

私は、フリーマン・ダイソンが非常に興味深い研究を数多く手掛けてきたことを承知していた。とくに彼の宇宙の未来と生命の関係に関する議論は、いつか本格的に取り組んでみたいと考えていた。一九八九年に *Infinite in all Directions* をモラロジー研究所研究部の図書として購入していただいたのは、そのための準備でもあった。ダイソンの本を手にして内容を見てみると、私個人でも購入しておく必要があると思いついた。一九九〇年一月十八日に丸善で購入し、早速翌日から読み始めた。この本を読み進むうちに、私の気分は次第に充実し、知的興味を掻き立てられ、嬉しくなるといふ体験をした。こういう読書体験をさせてくれる本には、めったに巡り会えない。生命の起源をめぐるダイソンの研究が、英知を感じさせるものであったことに加えて、彼の議論の仕方、プレゼン

テーションの仕方、そして、彼の書く英文がまことに素晴らしいことなどが原因である。私は、彼の研究により深く学び、多くのものを吸収したいとの思いから、本稿を執筆することにした。

また、ダイソンの伝記としては、次のような文献がある。

- , *Disturbing the Universe*, Harper & Row, Publishers, 1979. 鎮目恭夫訳『宇宙をかき乱すべきか——ダイソン自伝——』、タイヤモンド社、一九八二年。
Kenneth Brower, *The Starship and the Canoe*, Rinehart and Winston of Canada, Limited, 1978. 芹沢高志訳『宇宙船とカヌー』、ちくま文庫、一九八八年。

*本稿の構想段階で、何度か口頭で発表する機会を与えられた。特に貴重なアドヴァイスを戴いた方は、京都大学の下程勇吉名誉教授、早稲田大学の岡山隆教授と永安幸正教授、また、川村学園女子大学の小山高正講師、そして、モラロジー研究所研究部の高巖研究員である。ここに記して感謝の意を表します。