

生物進化の数理モデルが与える生命観

(The Life in Mathematical Model of Biological Evolution)

坂 恒夫
(Tsuneo Ban)

1. 序論

十九世紀フランスの画家ポール・ゴーガンの絵画に「われらはどこからきたのか？ 何者なのか？ どこへゆくのか？」がある。横長の大きな画面にタヒチの数名の女たちが描かれている。女たちは、深い森の高い樹木の下で、生まれた子供を眺めたり、美しい肢体を誇るかのよう、若い腕を持ち上げて木の実を取ったり、悪霊の前で頭を抱えたりしている。画面からは、生を受けることの不思議、生きる悦びの裏にひそむ不安、老いさらばえて朽ちていく虚しさが漂ってくる。生の不安が、画面全体を覆っている。

この人間の不安は、どのようなときに解消されるのか。それは、タイトルの疑問「われらはどこからきたのか？ 何者なのか？ どこへゆくのか？」に、解答が与えられたときである。これらの疑問に対する解答は、何によって与えられるのか。解答を与えるものに進化論があると思われる。進化論は、人間がいかなる生物種から進化したかを示すことによって、われらがどこからきたかを教え、進化するためにいかに振る舞っているかを示すことによって、われらが何者であるかを教え、進化の方向を未来に伸ばすことによって、われらがどこへゆくのかを教えるのである。

生物進化が、人間の生き方や社会の在り方に密接な関連をもつことから、生物進化という科学事象を背景に、科学論・人間論・社会論を展開した哲学者がいる。フランスの哲学者アンリ・ベルクソン(1859年～1941年)である。ここで、ベルクソン哲学を例に、人間は生物進化をいかなる観点から把握してきたかを考えることにする。ベルクソンの哲学は、生命の哲学

と言われている(1)。この呼称は、ベルクソン哲学が、生物事象を基盤として成り立つ哲学であることと、生物事象に対して新しい意味付けを行なう哲学であることを意味している。この二つの観点から、ベルクソン哲学を考察することにする。

生物進化は、これまで機械論あるいは目的論で把握されてきたと、ベルクソンは主張する(2)。機械論は、物質世界の因果律に従って生物は進化するとするのに対し、目的論は、生物世界には一つの目的があって目的の実現を目指す形で進化するとする点において、目的論は、一つの目的に準ずる形で進化が継起するとする点において、固定的に進化を捉えており、生物進化の事実を把捉していないとする。生物の進化系統樹は、巨大な樹木のように多数の生物種に分岐している。生物進化は、新しい生物種が偶然に生じ、生物の多様性が限りなく増大していることを示す。ベルクソンは、この生物の特徴を「生命の躍動(エラン・ヴィタール)」の言葉を用いて説明する。生物は、新しいものに絶えず分裂する傾向にあり、新しい自己を不断に創造していると言うのである。

生物進化の観察から得られた生物の特徴「生命の躍動」を基盤に、ベルクソンは「生命の哲学」と呼ばれる独自の哲学を展開する。ベルクソンは、宇宙は生成であると主張する。すなわち、宇宙には、創るものと創られたものの枠組で把握する「もの」は存在せず、ただ「動き」だけが存在すると考える。生成が生じるためには、事象を動かすエネルギーが必要である。地球上の生成を司るエネルギーは、地球に注がれる太陽エネルギーである。太陽エネルギーは、まず葉緑素の光化学反応によって植物に蓄えられる。植物に蓄えられた生成のエネルギーは、動物により捕食されることによって動物に移される。すなわち、生物系において、植物はエネルギー蓄積系として機能しているのに対し、動物は、生成そのもの、動きそのものとして機能していることが理解できる。これから、ベルクソンは、生物は、まずエネルギー蓄積系としての植物と生成系としての動物に進化し、さらに種々の形態と機能をもつ動物・植物に進化したと考えるのである。

それでは、人間を規定する自由という特質は、どのように生物進化的に

位置づけられるであろうか。動物の生成の現れである動きは、動物の身体や周りの物質に不可分に繋がれているのに対し、人間の生成の現れである意識は、形式的な生成であり、身体や物質から独立に生じると、ベルクソンは主張する。動物の生成である動きは、動物の身体の欲求と身体が置かれる環境に依存するが、人間の生成である意識は、身体や環境から離れた形式的なものであり、種々の異なる状況にも適用できるものであって、自由の性格をもつと主張する。人間の自由は、生成を本質とする宇宙の進化の到達点であり、人間すなわち宇宙は、人間の自由によって生物進化の歩みを進めることができるというのである。

本論考で考察するのは、生物進化を説明する進化論には種々のものがあるが、これらの進化論の中の数学的なもの、すなわち生物進化の数理モデルが明らかにする生物進化像である。生物進化の数理モデルには、進化の個別事象を数学的に解析するもの、進化を生物個体や生物種の協同現象として解析するもの、進化の論理構造を計算機上で表現して解析するものなどがある。これらの数理モデルから看取される生物進化像を、本論考で考察することにする。

2. 生物進化の数理モデル

生物進化の科学的探究は、これまで、生物の起源から始まって現在の生物種へと続く進化系統樹の完成、および化石として発見される生物種の年代確定を目的として行なわれてきた。例えば、進化論の父チャールズ・ダーウィンは、地球の地殻の移り変わりを説くライエルの『地質学原理』、ビーグル号による周航で得た種々の化石、および同周航で発見した生息生物種の場所による著しい相違により、「自然選択による進化」を発見したのだった(3)。このダーウィンの進化論が、物理学におけるニュートンの万有引力の発見に匹敵する科学的業績とされ、キリスト教から派生する「生物は一度に創造された」とする説や、アリストテレスに起因する「生物は劣るものから優れたものへと階段をなす」とする説の、人々の心に深く根付いた思考様式を改め、「生物は原始生物種に起源をもち徐々に進化してきた」とする現代の生物観を確立したことは周知のことであろう。

最近の生物進化の研究は、生物種の核酸配列を調べる生化学的方法や、ウイルス RNA を連続的に複製して分子の変化を調べる分子進化による方法等の実験的方法によっても行なわれる (4)。核酸配列による生化学的方法とは、種々の生物種のヘモグロビンやシトクロム c (呼吸に関係する酵素) に関する遺伝子の核酸配列を比較し、それらの違いから生物種間の相違を定量的に把握しようとするものである。一方、ウイルス RNA を繰り返し複製する分子進化による方法とは、ウイルス RNA の材料である GTP、ATP、CTP、UTP と複製酵素であるレプリカーゼを入れた試験管を数百本用意し、その一つにウイルス RNA を入れると複製が起こるが、複製されたウイルス RNA の一部を、一定の時間後に他の試験管に入れて再度複製し、これを何百回と繰り返して、分子の変化を調べる方法である。この複製を繰り返すと、ウイルス RNA は変化し、すなわち進化し、最終的に一つの状態に近づく。ウイルス RNA は、一定時間後に試験管から取り出され、次の試験管に入れられるから、この進化は、一定時間内に大量に複製するもの、すなわち複製速度の大きいものを選択する進化である。換言すれば、複製速度が大きいものへと変わる進化である。

このように生物進化の研究は、自然的な観察によっても、構成的な実験によっても行われているが、これらの方法は、進化的事象の複雑なダイナミズムの理解には、系統樹という静的な進化的事象を扱っている、実験には極めて簡略化した進化的事象しか扱えない等の理由から、不十分であると思われる。生物進化の本質である生物種と個体数の増減、およびこれらが生じるメカニズムの理解は、微分方程式や差分方程式による事象の記述、すなわち数理モデルによってのみ可能になるとと思われる。

生物進化の数理モデルを考察する準備として、進化的事象の特色について考える。進化的事象は、①不可逆性 (歴史性)、②偶然性、③複雑化の三つの特色をもつと、筆者は考える。以下に、これらを順次考察する。

不可逆性 (歴史性) とは、事象展開の展開方向を逆にする事象展開は生じないということである。よって、不可逆性をもつ事象は、一定方向にのみ事象展開することになる。不可逆性の典型例は、熱現象におけるエントロピー増大である。熱現象は、エントロピーが増大する方向にのみ事象展開する。生物進化の場合、現時点の生物種を基盤に進化が生じることが、

不可逆性の原因の一つになっている。生物は、生物系の現在の状態に何らかの変異が生じ、それが契機となって新しい状態に変わる。進化の初期状態は、現在の生物の状態である。物理系の可逆な力学事象のように、進化事象は、任意の初期状態を選ぶことができない。生物系の現在の生物種は、生物系の変遷の結果として生じたものであり、生物系の全歴史が反映するものなのである。

それでは、偶然性とは、どのような特色だろうか。現在の生物系は、沢山の生物種から成っている。これらの生物種の間には、論理的で必然的な繋がりはない。すなわち、種々の生物種は、偶然性により生まれたと考えられる。例えば、ヒト、サル、ウマ、ウサギの生物種は、生物系で固有の位置を占めるために必然的に発生したとは考えられない。また、サルの中にも、ニホンザル、アカゲザル、テナガザル、クモザルなどの種類があるが、これらも生物系の必然性により生じたと考えられない。ダーウィンは、『種の起源』の中で、何らかの原因で生物個体に生じた変異が生存機会の違いとなって、この生存機会の違いが生存競争により適者を生存させて生物系に新種をもたらすと述べているが、このダーウィンの進化論も、偶然性の変異を生物進化の契機としているのである。

最後の複雑化について考える。生物は、簡単な構造をもつ原核生物から、哺乳類などの複雑な構造をもつ生物に進化したとされる。ダーウィンの自然選択説からは、進化における生物構造の複雑化は帰結しない。簡単な構造の生物種の生存機会は小さく、複雑な構造のものは大きいとは限らない。例えば、象はねずみより生存機会が大きく、動物はウイルスより生存機会が大きいとは限らない。簡単な生物が、変動する環境の中で生存機会を得て、生き延びることも有り得るのである。だが、生物系は、明らかに複雑化に沿う進化をしている。生体の構造においても、生物種の多様性においても、不断の複雑化が生じている。無性生殖と有性生殖を比較すると、有性生殖は、システムの的に複雑であり、より多くの労力を生物個体に要求するが、高等生物の大半は有性生殖を採用している。

進化事象は、いかなる数理モデルによって解析できるだろうか。不可逆性、偶然性、複雑化という進化事象の性格は、いかなる数理モデルによる記述を許すのだろうか。熱現象の不可逆性は非平衡熱力学で扱われている

が、同じ手法が進化事象に適用できるとは思えない。例えば、I・プリゴジンは、化学反応を含む流体系において、温度や物質濃度に非平衡があると、物質の流れに空間構造が生まれること、すなわち空間構造の複雑化を、非平衡熱力学と流体力学を基礎に論じている(5)が、この解析法がそのまま進化事象の解析に役立つとは思えない。また、進化事象の偶然性は、数理モデルに確率過程を含めることを要求する。事象の時間変化を記述する微分方程式に確率過程を加えると確率微分方程式になる。近年、確率微分方程式は、金融工学において株価や金利の時間変化の記述に使用されているが、そのまま進化事象の記述に使用できるとは思えない。このように進化事象は、通常の数学的記述を超える複雑性を持った事象なのである。

それでは、生物進化の事象変化は、いかなる数学的方法で記述できるのだろうか。これには、次の三つの方法があると思われる。一つは、生物進化の一般的な記述や全体的な記述をあきらめて、生物進化の部分的な事象や個別的な事象に考察を限って、事象の数理モデルを作成し、数理モデルが示す事象変化を通して生物進化を理解しようとするものである。例えば、オーストラリアで野生のウサギの個体数を抑えるため粘液腫ウイルスを導入したところ、ウイルスは、ある毒性をもつものに進化したという事象に対して、ウイルスの繁殖率は毒性に比例する感染率と毒性に反比例するウサギの生存率の積で与えられ、繁殖率が最大となる毒性のウイルスに進化するとする数理モデルで説明するのである(6)。次の一つは、すべての進化事象に共通する事象に着目し、この事象を数理モデルで表すことにより、生物進化を理解しようとする方法である。このような方法の一つにシナジェティクスがある。シナジェティクスは、多数の構成要素から成る複雑系において、構成要素の協同現象により、全体的秩序をもつ事象が現れるとする科学である(7)。例えば、生物進化が生じるためには、生体の構成要素である化学種が多量に存在せねばならないが、この化学種は、生成物が触媒となって化学反応が加速される自己触媒反応という多数の化学種の協同現象によって生成されると考える科学である。最後の一つは、生物進化が、生物種間の、生物個体間の、環境と生物の間の密接な相互作用の下に展開する複雑な事象であるから、進化事象の忠実な記述は断念して、進化に関係すると思われる相互作用を計算機の論理構造の上に構成的に表現して、計

算機に現れる事象によって、進化的事象を理解しようとする試みである(8)。この試みの例に、次のものがある。遺伝子として0または1の繋がった数字列を考える。遺伝子には、遺伝子の状態(数字列)によって値を変える適応度が付与されている。遺伝子の数字列の数字の一つを突然変異(偶然)により変えて、その数字列の適応度が大きければ、その数字列を遺伝子の数字列とし、適応度が小さければ元の数字列を遺伝子の数字列とする。これらの約束を計算機上で表現して実行すると、遺伝子である数字列の進化の様子が判るのである。

以下に、生物進化の数理モデルの三つの形態、すなわち個別事象モデル、協同現象モデル、計算機モデルが与える生命観を考察することにする。

3. 個別事象モデルの生命観

個別事象モデルは、生物進化の種々の事象、例えば化学進化、RNA複製、共進化、細胞分化、遺伝的浮動、性と組換え、DNAの突然変異、性淘汰などの進化的事象を数学モデルで記述し、数学モデルの上に生起する事象を通して、個々の進化的事象の詳細を理解しようとするとき、作成されるモデルである。個別事象モデルの作成を通して進化研究を進めた研究者に、ジョン・メイナード＝スミスがいる。メイナード＝スミスの進化研究を通して、個別事象モデルの生命観を探ることにする。

メイナード＝スミスは、1920年にロンドンで生まれた進化生物学者である。ケンブリッジ大学の工学部を卒業して、航空機設計会社に一時勤めるという工学者であったが、ロンドン大学に入り直し、集団遺伝学の創始者の一人J・B・S・ホールデンの下で生物学を学んだ(9)。メイナード＝スミスは、老化、利他行動、有性生殖、性表現、配偶者選択などの突然変異と自然選択の進化論では容易に解答が求まらない問題に果敢に取り組んだ。彼は、工学の出身者らしく、言葉で論じるのではなく、数学モデルを作成し、定量的に進化的事象を説明した。彼の最も大きな業績とされているのは、経済学などの社会科学で使われてきたゲームの理論を生物学に導入し、動物の社会行動や性行動を、生物進化の結果として説明したことである。この研究で得られた進化的に安定な行動戦略(ESS)という概念は、生

物の適応を理解するのに不可欠の概念になっている。メイナード＝スミスは、ハミルトン、クレブス、ドーキンス等と共に、生態学・生物行動学の分野で画期的な業績をあげ、社会生物学・行動生態学・進化生態学などと呼ばれる分野を創立したとされている。また、メイナード＝スミスは、工学者としての発想によると思われるが、対立している主張の論点整理に優れているとされる。彼は、何が問題なのか、何が判っていて、何が判っていないか、どのように考えれば明らかになるかを、明確に把握する能力をもつとされる。これは、工学的数学的発想に起因すると思われる。

上で見たように、メイナード＝スミスの業績は、ゲームの理論に基礎をもつ安定な行動戦略 (ESS) という概念により生物集団の進化の方向を示したことにあった。ここで、このメイナード＝スミスの進化モデルを考察することにより、個別事象モデルの内容について考えることにする。

いま、一つの生物集団があつて、集団に属する生物個体のいずれも、遺伝子の表現型 A 、 B の何れかをもつとする。これらの二つの表現型は、個体の行動の性格を表すもので、戦略と呼ばれることもある。集団は個体間の相互作用の場であり、二つの個体は不断の相互作用の下にある。表現型 A の個体の、表現型 A の個体および表現型 B の個体に対する相互作用によって得る利得を、それぞれ $E(A, A)$ 、 $E(A, B)$ とする。同様に、表現型 B の表現型 A 、 B に対する利得を、それぞれ $E(B, A)$ 、 $E(B, B)$ とする。表現型 A と B の個体の集団における適応度 $W(A)$ 、 $W(B)$ は、 A と B の個体の集団における割合、すなわち頻度を $p(A)$ 、 $p(B)$ とすると、次式となる (10)。

$$W(A) = K + p(A)E(A, A) + p(B)E(A, B)$$

$$W(B) = K + p(A)E(B, A) + p(B)E(B, B)$$

ここで、 K は定数である。個体は、この適応度の大きさに比例する子供の数を残すものとする。また、生まれる子供の表現型は親と同じとする。 $E(A, A)$ 、 $E(A, B)$ 、 $E(B, A)$ 、 $E(B, B)$ の利得は相互作用の性格が与える定数であり、 $W(A)$ と $W(B)$ は次世代の頻度 $p(A)$ と $p(B)$ を与えるから、上の2式は集団の頻度 $p(A)$ と $p(B)$ の世代による変化を与える一種の差分方程式であることが分かる。

メイナード＝スミスは、これらの方程式が規定する世代変化を調べると

き、進化的に安定な戦略 (ESS) を考えることを提案する。進化的に安定な戦略 (ESS) とは、方程式が与える世代変化に終状態がある戦略、すなわち方程式が一つの状態に収束する戦略 A および B のことである。生物集団が進化するとき、進化的に安定な戦略 (ESS) に向かって進化するのである。それでは、ESS となる戦略 (表現型) の条件を求めてみよう。ESS となっている戦略を I とし、集団の個体の一つが突然変異して生じた戦略を M とする。 M の頻度は非常に小さいが、それを p とすると、 I と M の適応度 $W(I)$ および $W(M)$ は、

$$W(I) = K + (1 - p)E(I, I) + pE(I, M)$$

$$W(M) = K + (1 - p)E(M, I) + pE(M, M)$$

となる。 I は進化的に安定な戦略 (ESS) であるから、突然変異によって生じた任意の戦略 M に対して、 $W(I) > W(M)$ が成り立たねばならない。何故なら、 $W(I) < W(M)$ が成り立つと、 M の適応度が大きいから、 M の侵入を許すことになり、 I は ESS でなくなるからである。 $W(I) > W(M)$ が成り立たつためには、 p は微小であることを考えると、上式の第 3 項が無視できて、 $E(I, I) > E(M, I)$ が成り立てばよいことが分かる。 $E(I, I) = E(M, I)$ のときには、上式の第 3 項から、 $E(I, M) > E(M, M)$ が成り立てばよいことが分かる。

メイナード=スミスの数学モデルを、闘争行動を解析するために考案されたタカ・ハトゲームに適用することにしよう。タカ (H) とタカ (H) が対決するときには、両者は激しく戦い共に傷つくから、利得 $E(H, H)$ は負の値、例えば -2 である。タカ (H) とハト (D) の対決では、ハトは逃げ出し利得はないから、 $E(D, H) = 0$ である一方、タカは勝利するから、タカの利得は大きく、 $E(H, D) = 2$ である。また、ハト (D) とハト (D) が対決するときには、平和的に資源を分け合うから $E(D, D) = 1$ である。以上の利得を考えると、 $E(H, H) < E(D, H)$ が成り立ち、タカの戦略が ESS ではないことが分かり、さらに $E(D, D) < E(H, D)$ が成り立って、ハトの戦略も ESS でないことが分かる。

それでは、いかなる戦略が ESS となるのだろうか。それは、タカ (H) とハト (D) を組み合わせる混合戦略である。ESS となる混合戦略 I を「確率 P でタカ (H) を採り確率 $1 - P$ でハト (D) を採る」とする。混合戦

略 I が ESS である条件は、集団を構成するタカ (H) とハト (D) が混合戦略 I と対決するとき、利得が同じでタカとハトが一定の比率を保つ条件であるから、 $E(H, I) = E(D, I)$ であることが分かる。この条件は、 I が確率 P でタカ (H) を採り確率 $1 - P$ でハト (D) を採る戦略だから、 $P E(H, H) + (1 - P) E(H, D) = P E(D, H) + (1 - P) E(D, D)$ と表すことができる。この式に、上で求めた $E(H, H)$ 、 $E(H, D)$ などを代入すると、 $P \times (-2) + (1 - P) \times 2 = P \times 0 + (1 - P) \times 1$ が成り立つから、 $P = 1/3$ を得る。すなわち、ESS となる混合戦略 I は、確率 $1/3$ でタカ (H) を採り確率 $2/3$ でハト (D) を採る戦略であることが分かる。生物集団は、この混合戦略を採ると最も適応度が高いことから、この混合戦略に向かって進化するのである。

メイナード＝スミスの進化の数学モデルは、どのような生命観を与えるのだろうか。数学モデルの性格を見るには、最も取り扱いが困難な生物進化の分野に数学モデルを適用したとき、数学モデルが示すものを調べればよいのではないか。何故なら、記述が困難な事象の数学モデルが示す振る舞いは、事象の現れであるよりもモデルの性格の現れであると考えられるからである。記述が困難な進化的事象の一つに生物社会の進化がある。ここで、メイナード＝スミスの生物社会の進化論を考えることを通して、メイナード＝スミスの生命観を探ることにしよう。

メイナード＝スミスは、アリ、ハチ、ライオン、サル、ヒトなどの動物社会の起源は生物個体の行動の協同にあると考え、生物個体の行動に協同現象が芽生えて進化が始まる条件を探ろうとする (11)。協同現象が発生する条件の考察に対して、メイナード＝スミスは、闘争行動の考察に使われたタカ・ハトゲームに似た囚人のジレンマ・ゲームを使用する。囚人のジレンマ・ゲームは、投獄されている 2 人の囚人が、協同して犯行について語らず、共に同じ刑罰を受けるか、それとも、白状すると刑罰を軽くするとの約束に従って、白状して自分の刑罰を軽くし他の一人の刑罰を重くするかを判断をするゲームである。ゲームの利得は、協同を C 、裏切りを D とするとき、次の値をとるとする。 C の C に対する利得 $E(C, C)$ は共に協同して得をするから $E(C, C) = 30$ 、 C の D に対する利得 $E(C, D)$ は裏切られて大損をするから $E(C, D) = 10$ 、 D の C に対する利得 $E(D, C)$ は裏切って刑罰が軽くな

るから $E(D, C) = 40$ 、 D の D に対する利得 $E(D, D)$ は共に裏切つて損をするから $E(D, D) = 20$ の値をとるとする。このゲームの進化的に安定な戦略 (ESS) は、裏切り (D) である。何故なら、 $E(C, C) < E(D, C)$ が成り立つことが協同 (C) の戦略が ESS ではないことを示し、 $E(D, D) > E(C, D)$ が成り立つことが裏切り (D) の戦略が ESS であることを示すからである。このように、囚人のジレンマ・ゲームは、利得が上の値をとるとき、協同現象が生じないことを示す。囚人のジレンマ・ゲームは、「協同して犯行について語らず」を「協同して契約を守る」、「白状して自分の刑罰を軽くする」を「違反して契約を破る」に置き変えると、社会契約ゲームになる。社会契約ゲームは、利得が上の値をとるとき、社会に協同の意識が生まれなことを示す。協同の意識を生じさせるには、利得の値を変えねばならない。利得の値を変える手段の一つに、違反者への処罰がある。違反者 (D) の協同者 (C) に対する利得 $E(D, C)$ を、処罰として -50 を加えて、 40 から -10 に変え、協同者 (C) の協同者 (C) に対する $E(C, C)$ は、違反者への処罰の手間が増えることから、 30 から 25 に変えるのである。すると、 $E(C, C) > E(D, C)$ が成り立って、集団個体間の協同が ESS となり、社会に協同の意識が発生すると考えられるのである。

以上のメイナード=スミスの数学モデルは、いかなる生命観を与えるのか。メイナード=スミスの進化論は、「進化はダーウィンの自然選択によって生じる」、「自然選択は適応度の大小によって決まる」、「適応度は数学モデルによって計算できる」の仮定の下に成り立っている。これらはニュートン力学の決定論的世界観ではないか。進化学事象は、多数の要素が絡む複雑な事象であるかも知れないが、進化学事象を分析すれば、選択された要素と淘汰された要素が特定できて、それらの適応度を計算することによって、進化学事象の展開が一義的に説明できると考えている。だが、進化学事象には、鹿の極端に大きな角、キジ、クジャク、ゴクラクチョウの不必要に華麗な羽毛など、適応度の大小によって説明できないと思われる事象も数多い。このような事象に対して性淘汰などの新しい進化要素を加えて説明する。性淘汰とは、動物が配偶者を獲得するとき、配偶者の評価によって進化の方向が決まるとする自然選択である。このように、メイナード=スミスは、あらゆる進化学事象には自然選択があり、自然選択される要素と淘汰される

要素を明確にして、それらの適応度を計算することによって、進化的事象は説明できると考えるのである。例えば、言語においても、類人猿の簡単な言語から人間の複雑な言語への発展があることから、言語も進化的事象として把握し、自然選択によって進化したと主張するのである。

4. 協同現象モデルの生命観

協同現象モデルは、シナジェティックス (synergetics) と呼ばれる科学方法論に基づく事象解析モデルである。シナジェティックスは、H・ハーケンが提唱した複雑系を解析する科学方法論である。H・ハーケンは、1927年に生まれ、1951年にエルランゲン大学の数学科を卒業し、1956年に同大学の理論物理学の講師となり、1960年にはシュトゥットガルト大学の理論物理学の教授となった数学者・物理学者である(13)。H・ハーケンは、また、アメリカ合衆国、イギリス、フランス、日本などの大学や研究所で客員教授・協同研究員を務め、全世界に広がる活動領域をもつ研究者である。H・ハーケンの研究領域は、群論、固体物理、レーザー物理、非線形光学、統計力学、プラズマ物理学、分岐理論、化学反応モデル、形態形成理論、脳科学など、多方面にわたり、それぞれの領域でシナジェティックスの科学方法論が有効なことを実証しようとしている。このH・ハーケンの業績は、著書『The Science of Structure : Synergetics』、『Synergetics : An Introduction』、『Advanced Synergetics』、『Information and Self-Organization』、『Principles of Brain Functioning』等として、Springer社の「Springer Series in Synergetics」の中で刊行されている。H・ハーケンは、レーザー理論に対する著しい寄与により英国物理学会およびドイツ物理学会からMax Bornメダル賞を、レーザー理論およびシナジェティックスの開拓者としての功績によりアメリカのフランクリン研究所からAlbert A. Michelson賞などを授与されている。

シナジェティックスは、どのような科学方法論なのか。H・ハーケンは、物理系・化学系・生物系・社会系などの相互作用をもつ多数の要素から構成される複雑系を解析する科学方法論であると主張する(14)。デカルトに基づく古典的な科学方法論は、事象を要素事象に分けて、要素事象を自然法

則で記述して、それらを総合することによって、事象を説明しようとする。この方法で複雑系を解析すると、要素事象が無数にあることから、要素事象を記述する方程式が著しく多くなり、計算機を用いても解けなくなってしまう。この様な複雑系に解析手段を与えるのが、シナジェティックスである。シナジェティックスは、複雑系の事象は多数の要素の協同によって生じると考える。すなわち、シナジェティックスは、複雑系の微視的な要素を巨視的な事象に結び付ける理論なのである。複雑系において関心のある事象は、巨視的なものである。例えば、気体系の温度、流体系の流速、生態系の個体数などの変動である。これらの変量は、微視的なものとは異なるレベルに属し異なる性格を持つ。この巨視的な事象の振る舞いを、微視的なものの協同現象として、シナジェティックスは理解しようとするのである。それでは、巨視的なものの特異な振る舞い、例えば、気体系の液化、流体系における乱流の発生、物質系という無生物系における生物の発生は、微視的なものの協同現象として、どのように生じるのか。H・ハーケンは、自己組織的に生じるとする。新しい状態の成立条件に系が到達すると、系は自ら新しい状態に変ると言うのである。すなわち、シナジェティックスは、協同現象の自己組織的理論なのである。

シナジェティックスの数理モデルを考えることにする(15)。シナジェティックスは、協同現象を扱う科学であった。協同現象を記述するパラメータ(変数)を秩序パラメータと呼び ξ と書くことにする。シナジェティックスが扱う協同現象の代表的なものは、液体を器に入れて下面を加熱し上面を冷却したとき、上面と下面の温度差 T が臨界値 T_c 以下では熱伝導による熱の移動が生じ、臨界値 T_c を超えると対流による熱の移動に代わるが、この対流の発生であろう。この対流の流速の空間構造が、秩序パラメータ ξ で記述されるのである。秩序パラメータ ξ は、当然、系の構成要素すなわち微視的なものの関数である。微視的なものが集まって秩序パラメータが表す巨視的なものとなるには、微視的なものは巨視的なものに従う動きをせねばならない。すなわち、微視的なものは巨視的なものに従わねばならない。これを、H・ハーケンは隷属原理と呼んでいる。だが、微視的なものは、単に巨視的なものに従うだけではない。微視的なものは、巨視的なものを形成するものでもある。微視的なもののそれぞれの傾向が合わさっ

て巨視的なものとして現れるのである。従って、微視的なものと巨視的なものは相互に依存し合うことになる。これから巨視的なものの発生は自己組織的と呼ばれている。また、系が取り得る巨視的なものは一つではなく多数である。同等に可能な巨視的なものが多数ある場合、それらの一つが偶然に選択されて生起するとされる。すなわち、巨視的なものの発生は偶然性をもつことになる。また、巨視的なものを発生させる外的条件、上の液体の対流の場合は下面と上面の温度差は、制御パラメータと呼ばれている。制御パラメータが変化して臨界値を越えると、巨視的なものの可能な一つが、偶然に選ばれて自己組織的に生起するのである。

それでは、巨視的なものの運動は、どのように記述されるのだろうか。制御パラメータが変化すると、巨視的なものが突然に現れたり、形態が徐々に変化したりするが、これらの運動は、どのように記述されるのだろうか。この巨視的なものの運動は秩序パラメータの運動方程式で記述されるとシナジェティックスは考える。すなわち、秩序パラメータ ξ の時間的変化率は、巨視的なものの構造に起因する力と、微視的なものの乱雑な運動による偶然的な力の和になると考える；

$$\frac{d\xi}{dt} = -\frac{dV}{d\xi} + F(t)$$

ここで、 V は巨視的なものの構造による力のポテンシャルであり、 $F(t)$ は微視的なものの揺らぎによる力である。制御パラメータを α として、ポテンシャルを $V = -\alpha\xi^2 + \xi^4$ と置くと、 $\alpha < 0$ では、 V は $\xi = 0$ で極小となり、 $\alpha > 0$ では、 $\xi = \pm\sqrt{\alpha/2}$ の二箇所極小となる。すなわち、このポテンシャルは、制御パラメータ α が負から正に変るとき、秩序パラメータが $\xi = 0$ から、揺らぎによる力 $F(t)$ によって決まる二つの極小点 $\xi = \pm\sqrt{\alpha/2}$ の何れかに変る運動を表すことになる。 $V = -(\xi + \alpha)^2 + \xi^4$ とすると、制御パラメータ α が負から正に変るとき、ポテンシャルの極小となる ξ の値は負から正に変るから、秩序パラメータが負から正になる運動を表すことになる。

シナジェティックスは、秩序パラメータ、制御パラメータ、およびポテンシャルを、巨視的なものの構造に合わせて、多くしたり複雑にしたりすると、種々の系の記述に適用できる普遍的な科学方法論であるとされる。こ

ここで、シナジェティックスを生物進化に適用してみよう(16)。H・ハーケン
は、生物進化は協同現象そのものであり、シナジェティックスを適用する
ことにより、生物進化の詳細が理解できると主張する。ダーウィンは、環
境に適應するものが競争に勝って遺伝子を残すという自然選択によって、
進化学事を説明する。だが、ダーウィンの進化論は「生存するものが生存
する」という循環論法から成り立ち生物進化の具体象を与えないとされる。
ダーウィンの進化論は、シナジェティックスが扱う物質の協同現象を考察
することにより具体的に理解されると主張される。ここでも上で考察した
対流の発生を通して、H・ハーケンの主張を考えることにしよう。温度差
が臨界値に近づて対流が始まる直前の液体には、種々の流速の揺らぎが発
生している。上下方向や左右方向の流速の揺らぎが乱雑に生まれ消滅して
いる。この多数の揺らぎの中で、容器の形などの流体が置かれた環境に合
致した揺らぎが大きくなって、この大きくなった揺らぎに発生する多数の
揺らぎが協同現象として加わって、対流が発生するのである。同様に、生
物進化においても、多数の生物種が発生して、その中で環境に最も合致し
たものが生き残り、残った生物種が、遺伝過程や生存過程で協同現象とし
て増強されて、生物進化が起こるのである。また、ダーウィンの進化論は、
競争に基づく自然選択の結果、一つの定常状態に近づくという静的な理論
であるのに対し、シナジェティックスは動的な進化論を与えると、H・ハー
ケンは主張する。シナジェティックスは、運動方程式を基礎に置くことか
ら判るように、事象のダイナミズムの記述を目的としている。加えて、事
象を変化させる力に微視的な揺らぎによる力があることから判るように、
事象は不断に動きに曝されている。すなわち、生物種は、絶えず増減して
いるはずである。また、シナジェティックスは、制御パラメータが変化し
たとき、秩序パラメータが、ポテンシャルの現在の極小点から次の極小点
へと、一挙に変わることを示す。すなわち、生物進化は、ゆっくりとした環
境変化にもかかわらず、大きな変化として突然に起こり得ることを示す。
この様な進化学事は、現実に見られることである。以上のことから、シナ
ジェティックスは、進化学事に対して、次の描像を与えることが判る。進
化学事は、不断の動的状態にある。すなわち、生物種の個体数は絶えず増
減を繰り返している。環境が緩やかに変動したとしても、進化学事は、急

激でラジカルな変動を見せる可能性がある。すなわち、微小な環境の変化が、全く新しい事象変化を引き起こす可能性がある。

シナジェティックスの進化論は、いかなる生命観をもたらすのか。生命現象の現れの一つである経済事象へのシナジェティックスの適用を通して、これを考察することにする(17)。H・ハーケンは、シナジェティックスを経済事象に適用すると次の結果が得られるとする。経済が発展すると、会社・役所・住宅が集まる都市や、商店・喫茶店が集まる繁華街が生じるが、これは、シナジェティックスの協同現象の現れだとする。シナジェティックスは、微視的な個別事象が巨視的な全体事象に隷属することによって協同現象が現れるとするが、会社・住宅・商店などの個別事象が、都市や繁華街の全体事象に隷属した結果、都市や繁華街が大きくなったと考えるのである。この現象は、非線形現象であることに注意しよう。会社や商店が集まって都市を大きくした結果、都市は会社や商店を引き付ける力を増大し、限りなく大きくなろうとするからである。また、シナジェティックスは、個別事象は全体事象に隷属する一方、全体事象は個別事象の現われに過ぎず、個別事象と全体事象は相互依存の関係にあるから、協同現象には明確な因果関係がないと考える。この特徴は、次の経済事象に現れているとする。経済事象における賃金と物価の関係を調べると、賃金が上がると物価が上昇し、物価上昇の理由から、労働者が賃上げを要求して、再び賃金が上がるという賃金—物価サイクルが存在することに気付く。これが、シナジェティックスの協同現象の現れであるとH・ハーケンは主張する。物価が全体事象であるのに対して、賃金は、労働の価格であって物価の構成要素であり、物価という全体事象の個別事象である。すなわち、シナジェティックスの協同現象における相互依存の関係があることが判る。それでは、シナジェティックスは、この賃金—物価サイクルを、どのように解けと言うのだろうか。巨視的なものは、制御パラメータの値が変わることによって、現在の構造が不安定になり、新しい構造のものへと変わるのだった。これから、制御パラメータの値を変えて経済構造を新しくすることが、シナジェティックスが提案する解であることが理解できよう。

以上の考察から、次のシナジェティックスの生命観が看取されよう。生命事象は、個別事象が全体事象に隷属するという協同現象によって、構造・

組織などの全体的秩序を生み出す。全体的秩序は、その大きさに比例して、個別事象を隷属させる力を増し、加速度的に大きさを増す。生命事象は、個別事象は全体事象に隷属し、全体事象は個別事象の現れに過ぎぬ、という協同現象であるから、生命事象では、個別事象と全体事象の間や個別事象の間の因果関係が成り立たない。生命事象は、環境に依存する制御パラメータ、例えば温度や物質濃度の変化に従って構造・組織を変える。制御パラメータが臨界値に近づくと、現在の構造・組織が不安定となり、新しい多数の構造・組織が揺らぎとして発生する。これらの構造・組織の一つが、偶然に選ばれて、次の構造・組織となる。

5. 計算機モデルの生命観

生物進化の計算機モデルは、生物進化の機構を計算機上に表現して、計算機に現れる事象の振る舞いから生物進化を理解する試みである。生物進化を計算機上に表現するとき、進出事象そのものを表現するのではなく、進出事象の枠組みを決めると思われる支配的事象に着目し、支配的事象に成り立つ論理を計算機上に表すことが試みられる。例えば、DNAの取り得る状態の数が遺伝子間の相互作用に強く依存すると考えられるとき、DNAを0と1の数の並び、すなわち遺伝子を0あるいは1の数で表し、将来の遺伝子の状態(0または1)が、現在の自己の状態と他の遺伝子の状態で決まるとする数理モデルでDNAの状態数を調べるのである。この様に、生物事象を可能な限り忠実に表現しようとするのではなく、計算機の論理機構に合わせる形で表現して、事象の振る舞いを考察しようとするのが、計算機モデルであると言える。計算機モデル以外の数理モデルも、計算には計算機を使用する。だが、モデル作成においては、可能な限り現実に合わせようとする。例えば、個別事象モデルで生態系の個体数の変動を考察する場合、生物種間の種々の相互作用を調べ、これらの相互作用を個体数の運動方程式に可能な限り加え、得られた運動方程式を計算機で解くことによって考察する。すなわち、この場合は、計算機は運動方程式を解く手段に過ぎないのに対し、計算機モデルにおいては、計算機が機能する論理であるブール代数を利用する形で計算機を使用するのである。

計算機モデルによって生物事象を探求した研究者にスチュアート・カウフマンがいる。カウフマンは、生物系を多数の要素が複雑に相互作用する複雑系として捉え、相互作用を計算機上で表現することによって、生物系の振る舞いを考察する。カウフマンの生物探求を通して、計算機モデルとは何かを考えることにする。カウフマンの研究上の経歴は、次の通りである(18)。米国ダートマス大学に入学した頃には、劇作家を夢見て、脚本を書きまくる。同大学の奨学金を得て英国オックスフォード大学に留学したときには、哲学者を目指して、科学哲学・心理学・生理学を学ぶ。だが、米国に戻ってからは医学を志し、1968年、カリフォルニア大学で医学博士号を取得する。これらの幅広い試みを通して、理論生物学が肌に合うことに気づいたカウフマンは、医学研究を進める傍ら、生物事象の論理を計算機上に表現し、計算機に現れる振る舞いから生物を理解する試みを始める。このカウフマンの試みは、相互作用をもつ多数の要素からなる複雑系の解析方法の一つとされ、カウフマンは複雑系科学の創始者の一人となる。こうしてカウフマンは、シカゴ大学理論生物学教室とペンシルベニア大学医学部生化学・生物物理学教室の教授を経て、1986年、複雑系科学の研究施設であるサンタフェ研究所の教授となる。計算機の独創的な使用で研究を進めるカウフマンの姿は、マイクル・クライトンの小説『ジェラシック・パーク』と『ロスト・ワールド』に登場する数学者として描かれることになる。

複雑系科学者であるカウフマンは、複雑系として生物系を把握する。カウフマンにとって、複雑系は、構成要素の間に強い相互作用があって、全体が一つのネットワークのように振る舞う系である。カウフマンは、生物種の発生・消滅や生物種数の増減など、生物全体が示す振る舞いは、細胞などの構成要素の機能の現れではなく、構成要素のネットワーク構造に起因する現れであると考え(19)。すなわち、構成要素から離れて、細胞のネットワーク、遺伝子のネットワーク、計算機のネットワークなど、ネットワーク構造を持つ系が示す振る舞いであると考え。このネットワーク構造を持つ系が示す、構造要素に依存せず全体的秩序を生み出す機能を、カウフマンは自己組織化と呼ぶ。自己組織化によって初めて、進化という生物系に固有の現象が説明可能になり、生体系・生態系・社会系などの事象

が統一的に理解可能になると、カウフマンは主張する。これらの系の不可逆的な変化が、自己組織化現象として、理解可能になるというのである。また、自己組織化は、偶然的な事象としての生物進化の説明を、自己組織化現象という必然的な現象として、説明可能にすると主張する。ダーウィンの進化論は、突然変異という偶然事象と、自然選択によって、生物進化を説明する。一方、自己組織化は、自己組織化によって必然的に、新しい生物種が生じると考える。すなわち、偶然事象を基盤に置く進化論が、必然的で法則的な進化論に代わるのである。

カウフマンは、生物進化という自己組織現象を、次の計算機モデルで解析する(20)。カウフマンは、生体高分子や遺伝子の複雑系を、 N 個の電球のつながりで表現する。電球は、計算機のオン・オフ二進法の状態表現に似て、点灯・消灯の二つの状態を取る。個々の電球の状態は、その電球の状態と他の電球の状態によって決まる。すなわち、次の段階の電球の状態は、現段階の電球の状態を結び付けるブール関数で与えられる。ブール関数は、AND・OR・NOTなど論理から構成され、ノイマン型コンピュータの論理構造として使われている関数である。ブール関数を適当に選択することにより、現段階の電球の状態と次段階の状態の間に、任意のつながりを設定することができる。電球間の相互作用の広がりも、ブール関数の選択により、自由に調整することができる。また、初期状態は、可能な状態の中から一つをランダムに選んで与える。計算機にブール関数を記憶させ、現段階の状態から次段階の状態を計算すると、系の状態変化を辿ることができる。

計算機が示した状態変化を考察することにする。電球の数 N を 1000 とすると、1個の電球の状態数は2であるから、系が取り得る状態数は 2^{1000} となるが、これは計算機で辿り得ぬ膨大な数である。この系に対して上のシミュレーションを実行すると、次の三つの結果の何れかになるという；①有限個の状態を循環する、②不断に新しい状態に変わる、③長い周期の循環的变化をする。①のとき、定まった状態を循環的に移り変わるから、系は秩序状態にあるとカウフマンは考える。②のときには、次々と新しい状態に移るから、系はカオス状態にあると考える。一方、③のときには、長い循環過程にあるから、①と②の境界、すなわちカオスの縁にあると考

える。①の秩序状態は、系が自己の論理に基づき展開し、その結果として得る秩序であるから、自己組織的秩序であるとカウフマンは考える。計算機による有限回数の計算によって、①の秩序状態が得られたことから、この秩序は、ネットワーク状複雑系に生じた自己組織的秩序であるとカウフマンは主張する。生体系・生態系・社会系など、どのようなネットワーク状複雑系においても発生する自己組織的秩序であるとカウフマンは主張する。また、この秩序状態の性格として、外部摂動に対する堅牢性があるとされる。一つの電球の状態を強制的に変えても、秩序状態は大きく変わることはないのである。一方、②のカオス状態は、外部摂動に対して鋭敏性をもつとされる。一つの電球の状態を変えると、その影響が大きな領域に広がって、系の状態をまったく新しい状態に変えるのである。③のカオスの縁の状態は、①の状態と②の状態の相転移点に相当し、①と②の中間の性格をもつとされる。すなわち、外部摂動によって系の適当な部分が影響を受けるのである。

どのようなとき、系は、これらの状態に達するのであろうか。系をこれらの状態の一つにするには、何を調整すればよいのであろうか。この系の展開に影響を与えるものに、電球間の相互作用の広がりやブール関数の関数値の偏り（例えば1(点灯)あるいは0(消灯)が多い）があるとされる。1個の電球の状態に影響を与える電球の数を K とすると、 K が最大値 $K = N - 1$ をとって、すべての電球から影響を受けるときには、系はカオス状態となる。最小値 $K = 1$ をとって、他の1電球からのみ影響を受けるときには、系は単調で秩序的な振る舞いをする。一方、 $K = 2$ あるいは $K = 3$ の中間値では、③の中間状態の振る舞いをする。また、ブール関数の関数値すなわち次段階の出力に偏りがあると、例えば関数値に1(点灯)が多いと、点灯状態の電球が増えて結果が単調になる。逆に、1(点灯)と0(消灯)が同数に近いときには、系は多彩な変化をしてカオス状態になる。このように、電球間の相互作用の広がりやブール関数の関数値の偏りを選ぶことにより、系を任意の状態にすることができるのである。それでは、系が、外界との相互作用を持っていて、外界への対応を迫られるとき、すなわち外界の変化への追従を迫られるとき、系は、どのような状態を取ろうとするのだろうか。外界の変化に追従するように K の値やブール関数を変える

モデルでシミュレーションを行うと、系は③の中間状態、すなわちカオスの縁の状態を取ろうとする傾向をもつと、カウフマンは主張する。外界との相互作用をもつ系は、自己組織を保持する秩序的状態と、外界の変化に追従して自己組織を大きく変えるカオス的な状態が共存するカオスの縁に存在する傾向をもつというのである。

カウフマン進化論の特色の一つは、ダーウィン進化論の限界と、その修正を主張することにあるといえる。カウフマンは、ダーウィンの進化論が、次の二つの点で不完全であると主張する。一つは、有用な変異が蓄積されるところの進化の漸進主義が成り立たないことである。遺伝子の小さな変化は、生体の小さな変化を生じるとは限らず、生存不可能な破滅的な変化を引き起こす場合が多いのである。これは、コンピュータ・プログラムの一部をランダムに変えると、通常、実行不可能なプログラムになることから推測できるという。さらに一つは、突然変異によって遺伝子が変わり得る状態は無数にあつて、可能な遺伝子の発現形態のすべてを調べることができないということである。遺伝子数が10万の動物の遺伝子が取り得る状態数は、各遺伝子が0と1の2状態しか取れないという最も簡単な場合を考えると、 2^{100000} となるが、これは膨大な大きさの数であり、約35億年とされる地球上の生物の生存期間では調べ得ぬ状態数なのである。これらのことからカウフマンは、ダーウィンの進化論は不完全であると結論する。さらにカウフマンは、このダーウィン進化論の不完全性を補うのが、自己組織化による自発的な生物構造の発生であると考えている。自己組織化によりダーウィン進化論が成り立つ状況が形成され、その状況の下で突然変異と自然選択による生物進化が成り立つというのである。自己組織化、突然変異および自然選択が、生物進化を可能にしたというのである。

複雑系をネットワーク的相互作用をもつ系として捉えるカウフマンは、生物種は単独で進化するのではなく、多数の種のネットワーク的相互作用の下で進化する系、すなわち生態系として共進化すると考える(21)。生態系の共進化においては、それぞれの生物種は生態系におけるそれぞれの役割を求めて変化するのであって、自然選択による生物種の消滅は起こり得ないとされる。生態系は、生態系を構成する生物種の平均適応度を最大にするように進化するとされるのである。それでは、共進化において生物種

は、どのような場合に、消滅するのであろうか。計算機シミュレーションの結果は、平均適応度を最大にする共進化の過程で、生態系の構成要素としての位置づけに失敗した生物が消滅することを示すとされる。地球上に現れて消滅した多数の生物種は、生態系の一員としての位置づけに失敗して消滅したというのである。また、生態系として定常状態になった系においては、新しい種が加わる等の環境変化によって、全種が消滅するという生態系の構造的崩壊も起こり得るとされる。それでは、新しい種が不断に加わって定常状態にない生態系においては、生態系や生物種はどのように変化するのであろうか。このような系においては、遺伝子間の相互作用を変える、種間の相互作用を変える等の、生態系や生物種の改変によって、生態系すなわち生物種は存続可能になるとされる。さらに、この生態系の改変が可能となるのは、生態系が秩序状態とカオス状態の境界のカオスの縁に位置するときだと、カウフマンは主張するのである。

6. 生物進化の数理モデルの生命観

これまでの考察の結果を整理すると、次の様になる。

メイナード＝スミスの個別事象モデルは、偶然性が支配し予測不可能に見える進化的事象も、事象の展開を支配する数種の生物種の相互作用に還元し、それぞれの生物種の適応度を計算して、進化的に安定な戦略 (ESS) を求めれば、進化の方向が一義的に決定されることを示す。すなわち、個別事象モデルは、ニュートン力学に起源をもつ決定論的世界観に基づくモデルで、いかなる複雑な事象も、事象の解析において、副次的な働きをする要素を捨て、本質的な働きをする要素を残して数理モデルを作成すると、事象の展開が一義的に決定できるとする近代科学の精神を背景とするモデルである。進化的事象も、物質から構成される生物において派生する事象であり、物質事象が物理法則により厳密に記述され、事象の展開が正確に予測できるように、進化的事象も、事象の本質を把握しモデル化することによって、一義的に解明できるとするモデルである。だが、メイナード＝スミスの数理モデルは、モデルに問題があると思われる。メイナード＝スミスは、生物種間の相互作用を、生物個体間の相互作用に還元する。この還元は可

能だろうか。生物種を構成する生物個体は、物質系を構成する分子のように同質ではなく、異なる性格をもつことを特色としている。この生物の特色は、微生物から昆虫、哺乳動物、人間へと、生物が高等になると共に著しいものとなる。したがって、高等生物の進化学事をメイナード＝スミスのモデルによって解析すると、不十分な結果に終ると考えられる。また、メイナード＝スミスのモデルは、生物種間の相互作用を、2個あるいは3個の種間の相互作用で記述するが、実際の生物系は、多くの生物種から成り立ち、多くの相互作用をもつのではないか。このような簡単なモデルは、現実の生物系の事象を表現しないのではないか。仮に、多数の相互作用を含むモデルを作成したとしても、事象の展開を一義的に決定する解は得られないと思われる。物理学に三体問題と呼ばれる事象があつて、相互作用のある3個以上の要素から成り立つ物理系は、正確な予測ができないことが分かっている。同様に、3個以上の生物種からなる生物系の振舞は予測できないと考えられる。

ハーケンの協同現象モデルは、個別事象が全体事象に隷属するという協同現象によって、自己組織的に系の構造が形成されるとする数理モデルである。全体事象の構造は秩序パラメータによって記述されるが、秩序パラメータは一種の運動方程式によって時間的に変化するとされる。秩序パラメータの運動方程式には、系が置かれた環境の状態を示す制御パラメータが含まれている。制御パラメータの値が変わると、すなわち環境が変化すると、秩序パラメータの値が変わるが、制御パラメータが臨界値を越えて変わると、秩序パラメータの運動形態が大きく変わる。この変化は、系の構造の変化と見なされる。このとき、系の取り得る構造には多くのものとされる。秩序パラメータは、微視的なものによる不断の揺らぎの中にあつて、制御パラメータが臨界値に達すると、揺らぎが著しく大きくなり、この揺らぎの中で可能な構造の一つが選択されるとされる。すなわち、生物系は、個体数が絶えず変動する揺らぎの中にあつて、気温・雨量・日照量などの環境の状態を映す制御パラメータが臨界値を越えて変化すると、この揺らぎが大きくなって、生物系に新しい構造が生まれる、すなわち進化するとされるのである。ハーケンの主張の一つである「全体事象は個別事象の隷属という協同現象によって生じる」は、動物は集団として生息する

傾向があること、人間は社会的なものに順応して生きる傾向があることを考えると正しいと思われる。だが、もう一つの主張「進化は制御パラメータの変化による構造変化として生じる」は、複雑な生物系の秩序パラメータの運動方程式を導出することが困難であることから、現実の生物進化系の解析には役立たないと思われる。だが、現実の進化的事象は、協同現象による自己組織的な構造形成と、制御パラメータの変化による構造変化によって生じると考えられ、ハーケンのモデルは、進化の解析モデルではなく、進化の認識モデルとして役立つと思われる。

カウフマンの計算機モデルは、多数の要素がネットワーク状に相互作用する複雑系として、生物系を捉えるが、生物系においては相互作用があまりに複雑で、生物系を方程式で表現しても、計算機によって方程式を解くことができないので、計算機上に計算機固有の論理を利用する形でネットワーク状の相互作用を表現し、計算機における事象の展開から生物系の振る舞いを理解しようとするモデルである。このとき、計算機上のネットワーク状の相互作用は、生物系のそれとは、内容において全く異なるが、生物系の振る舞いは、構成要素の振る舞いに起因するのではなく、相互作用のネットワーク構造の振る舞いに起因するから、計算機モデルによって生物系の理解が可能になるとカウフマンは主張する。生物事象の計算機モデルによるシミュレーションは、秩序状態、カオス状態、およびカオスの縁の状態という三つの状態を、生物系が取り得ることを示す。秩序状態は、生物系が構造をもつ状態であり、生物系の自己展開によって生じることから、自己組織的に発生するとされる。カオス状態は、生物系が乱雑な変化を繰り返す状態であるが、系の一部の恣意的な変化が系の全体的な変化として系全体に広がる状態でもある。カオスの縁の状態は、秩序状態とカオス状態の中間の状態、系の構造をわずかに変えるだけで、系を秩序状態にもカオス状態にもすることができる状態である。生物系は、カオスの縁の状態にあると、環境の変動に対して、すばやく対応できるとされる。ダーウィンの自然選択の進化論は、突然変異による生物系の有用な変化が蓄積されて、徐々に複雑な構造の高等な生物に進化すると考えているが、突然変異による生物系の変化は生物系を破壊に導くものが多く、不完全であるとカウフマンは主張する。ダーウィンの進化論に、生物系の自己組織化が加わ

ると、進化論は完全なものになるとカウフマンは主張する。生物系の自己組織化により、ダーウィンの進化論が成り立つ状況が作られ、生物は進化すると主張するのである。

これらの三つの数理モデルが示す生命観を対比すると、次の様になる。メイナード＝スミスのモデルの生命観は、生物系も物質から構成される一種の物質系であり、物質系が物理学の分析的手法で解明できるように、生物系も事象の本質的な要素を捉えることにより、分析的手法で解明できるとなる。ハーケンのモデルの生命観は、次のものである。生命事象は個別事象が全体事象に隷属する共同現象であり、生物系は共同現象によって系自らが生み出す自己組織系である。生物事象は、全体構造を反映する秩序パラメータの運動方程式によって記述されるが、運動方程式には環境の状態を反映する制御パラメータが含まれている。進化的事象は、制御パラメータの変化による新しい解の出現として表される。全体構造を表す秩序パラメータは、個別事象の揺らぎの中にあるが、制御パラメータが臨界値を越えて変化すると、揺らぎが著しく大きくなり、現在の構造が不安定になって、新しい構造が生まれる。新しい構造には多数のものがあって、その一つが揺らぎの中で偶然に選択される。すなわち、進化的事象は不可逆変化であることが分かる。カウフマンのものは、次の通りである。生物事象は、系の構成要素の振る舞いの現われではなく、構成要素間のネットワーク状相互作用の現われである。したがって、ネットワーク状相互作用をコンピュータ上に表現することによって、生物事象のシミュレーションができる。シミュレーションが示す系の状態には、秩序状態、カオス状態、カオスの縁の状態の三つがある。秩序状態は、生物事象が組織的な振る舞いを示す状態で、生物としての機能を果たしている状態である。カオス状態は、乱雑な振る舞いをする状態で、生物の機能が破壊された状態である。秩序状態は、シミュレーションの時間展開に従って現われるから、自己組織的に発生したことになる。すなわち、進化的事象は自己組織的事象であることになる。突然変異と自然選択に基づくダーウィンの進化論は、突然変異の多くが負の作用を生体に及ぼすことから不完全とされ、突然変異による進化が可能なように、自己組織化によって構造が生み出されることによって完全になるとされる。すなわち、生物進化は、自然選択と自己組織化によって

可能となる。また、生物が環境変化に機敏に対応するためには、カオスの縁に位置することが必要とされる。

上の考察から、三つの数理モデルは補完的關係にあることが理解される。メイナード＝スミスのモデルは、生物事象を物質事象の一部と考へて、物質科学の方法論で生物系を解析したときの生命観を与える。ハーケンのモデルは、メイナード＝スミスが無視した要素間の複雑な相互作用を、協同現象という形で考察の対象とし、生物事象の不規則で不可逆な変化を、揺らぎを加えた非線形微分方程式で記述している。カウフマンのモデルは、生物系の要素間のネットワーク状相互作用を、生物事象そのものであると考へ、計算機の論理構造を利用する形で相互作用を計算機上に表わし、生物的秩序が自己組織的に発生することと、変動する環境に順応するために、生物系がカオスの縁に位置することを明らかにする。この生物系の自己組織的発生が生じて初めて、ダーウィンの突然変異による自然選択が可能になると、カウフマンは主張する。すなわち、いかに生物系の要素間の相互作用を扱うかが、モデルの違いになっていることが理解される。

生物系の要素間の相互作用をいかにモデルに取り込むかで、ここで考察した三つのモデルの違いが生じたとすれば、この相互作用を異なる手法で取り込み、新しいモデルを作り出せないだろうか。経済事象、例えば投資という金融事象について考へてみる。この事象の構成要素は、多数の投資家、企業、銀行、証券会社などである。これらには、複雑で強い相互作用がある。投資家は、種々の企業の株価、利益、売上高を見て投資先を決めようとする。企業は、設備投資の資金を銀行からの融資で得るべきか、それとも証券会社での株式発行で得るべきかで迷っている。銀行は、手持ちの資金の投資先を探している。証券会社は、高利回りの投資信託を計画中である。このように金融事象の構成要素には、ネットワーク状の強い相互作用がある。もしカウフマンが主張するように、生物事象が、構成要素そのものの特性ではなく、ネットワーク状相互作用の特性であるならば、金融事象においても、金融事象のネットワーク構造によって、生物事象に相当するものが現れているはずである。すなわち、金融事象を、生物事象のシミュレーション・モデルと考へることができる。生物事象の振る舞いが、金融事象の振る舞いを調べることによって明らかになるのである。

それでは、金融事象を支配する特性は何だろうか。それは、不確実性である(22)。金融事象においては、株価・金利・為替相場などが不規則に上下している。社会を混乱に陥れる突然の大幅な株価の下落がある。金融資産の下落による金融機関の突然の倒産がある。この様に金融事象においては不確実性が溢れている。この不確実性は、何が原因で発生するのか。企業経営の失敗、国際政治の緊迫、不順天候による農作物の不作なども原因の一つであろう。だが、これは付随的な原因ではないか。重要なのは、金融事象の要素間の相互作用ではないか。複数の投資家が同じ銘柄の株を購入すれば株価が上がり、売却すれば株価は下がる。複数の銀行が、自己資産を国債から株に換えれば国債の金利は上がり、株から国債に換えれば金利は下がる。複数の企業が持っている通貨を同時に他国のものに換えれば自国の通貨の価格は下がり、持っている外国通貨を自国のものに換えれば自国の通貨の価格は上がるのである。金融事象においては、事象の構成員のすべてが、株・債権・通貨の売買を通して利益を得ようと、企業の経営状態や投資家の投資傾向を調べて、売買の時期を探っている。この金融事象の要素間の強い相互作用が、金融事象を不確実にしていると思われる。すなわち「生物事象はネットワーク状相互作用の現われである」というカウフマンの主張に符合している。

不確実性は、金融事象にとってリスクである。不確実性は、企業を損失や倒産へと追い詰める。リスクを解消するため、金融界は種々の方策を考案する。それらに分散投資とデリバティブがある(23)。分散投資は、資産を多方面に分割する投資である。異なる性格をもつ種々の株、必ず収益が得られる国債、経済が好調な国の通貨などに資産を分散して投資するのである。分散投資によって、投資先の資産価値の大幅な下落による破産等のリスクを回避するのである。デリバティブは、保有する資産の現在価値を確保したり、将来のある時期において定まった価格で資産を獲得したりする手段である。例えば、保有する株の価格が下落して資産が劣化する危険があるとき、将来のある時期に定まった価格で株を売る契約を、投資家・金融機関等と結ぶのである。このことにより現在の資産価値が保たれ、損失・破産等のリスクから免れるのである。これらの不確実性に起因するリスクを回避する方策は、新しいシステムの自己組織的形成ではないだろう

か。不確実性を忌避する金融系が、不確実性が少ない系を自己組織的に形成したのである。規制緩和の必要性が、金融事象においても説かれている。投資家の種々の分野への自由な投資を保証するシステムの簡略化が説かれている。規制緩和は不確実性を増大させることではないか。だが、この不確実性は、金融系の相互作用を増すための不確実性である。この不確実性により相互作用領域が広がり、新しい系が生まれる可能性が増大するのである。すなわち、規制緩和は、金融系をカオスの縁に誘い出すのである。このことも、カウフマンの主張に符合すると思われる。

7. 結論

以上の考察から、三つの数理モデルの生命観として、次のことが結論される。メイナード＝スミスのモデルは、生物事象を物質事象の一部と考えて、物質科学の方法論で生物系を解析したときの生命観を与える。ハーケンのモデルは、生物事象を構成要素の協同現象による自己組織的事象として把握し、系の構造が環境変化によって新しい可能な構造の一つに変わる構造変化として、進化的事象を捉え、進化的事象の不可逆性を明らかにしている。カウフマンのモデルは、生物系の要素間のネットワーク状相互作用を、生物事象そのものであるとし、相互作用を計算機上に表現し、系の構造が自己組織的に発生し変化することと、変動する環境に順応するために、生物系がカオスの縁に位置することを明らかにしている。この生物系の構造の自己組織的变化があつて初めて、ダーウィンの突然変異による自然選択が可能になると、カウフマンは主張する。構成要素が強い相互作用をもつ経済事象を、生物事象のシミュレーション・モデルとして捉えると、経済事象はカウフマンの主張に符合する事象を示している。

参考文献

- (1) 市川浩『ベルクソン』、講談社(1991年)、69頁。
- (2) ベルグソン『創造的進化』(松浪、高橋訳)、白水社(1965年)。
- (3) C・U・M・スミス『生命観の歴史』(八杉訳)、岩波書店(1981年)、19章。

- (4) フリードリッヒ・クラマー『カオスと秩序』(高木、山中、藤島、横関訳)、学会出版センター(2001年)、4章.
- (5) G・ニコリス、I・プリゴジヌ『散逸構造』(小畠、相沢訳)、岩波書店(1980年).
- (6) ジョン・メイナード＝スミス『進化遺伝学』(巖佐、原田訳)、産業図書(1995年)、200頁.
- (7) Hermann Haken "The Science of Structure : Synergetics", Van Nostrand Reinhold (1984).
- (8) 金子邦彦、津田一郎『複雑系のカオス的シナリオ』、朝倉書店(1996年)、1章.
- (9) 文献(6)、365頁.
- (10) 文献(6)、140頁.
- (11) J・メイナード・スミス、E・サトマーリ『進化する階層』(長野敬訳)、シュプリンガー・フェアラーク東京(1997年)、第16章.
- (12) 文献(11)、第17章.
- (13) ハーマン・ハーケン『脳機能の原理を探る』(奈良、山口訳)、シュプリンガー・フェアラーク東京(2000年).
- (14) 文献(13)、第1章.
- (15) 文献(13)、第4章－第5章.
- (16) 文献(7)、chap.7－chap.8.
- (17) 文献(7)、chap.12.
- (18) スチュアート・カウフマン『カウフマン、生命と宇宙を語る』(河野訳)、日本経済新聞社(2002年).
- (19) スチュアート・カウフマン『自己組織化と進化の論理』(米沢訳)、日本経済新聞社(1999年).
- (20) 文献(19)、第4章.
- (21) 文献(19)、第10章.
- (22) ピーター・バーンスタイン『リスク』(青山訳)、日本経済新聞社(1998年)、第13章～第18章.
- (23) 文献(22)、第15章および第18章.