

土木学会第5回システム最適化に関するシンポジウム

(1) 人工生命の夢と悩み*

筑波大学 構造工学系 星野 力

(hoshino@darwin.esys.tsukuba.ac.jp)

1997.12.11

要 旨

人工生命のドグマと思想的な系譜、人工生命の過去と現状の総括、その原理的困難、将来への展望などについて、私見を述べる。

1 はじめに

工学の各分野において人工生命手法の応用が広がっているが、そもそも人工生命は工学ではない。生命一般に関する機械論的哲学というべきものである。人工生命は、20世紀も終わりに近づいた今日、装いを新たに出現した生命の機械論・システム論の一つとっていいだろう。ここではまず人工生命につながる生命のシステム論を歴史的に述べる。人工生命を特徴づける思想に創発がある。創発とは、上下の2階層間の非線形的からみによってシステムが創り出されることである。人工生命の過去、現在の夢と困難、これから来世紀に向かってどう発展または消滅するのかについて、筆者の考えを述べよう。

2 人工生命のドグマ

マスコミでも「何が何だかわからない人工生命」がとり上げられる世の中である。その結果、人工生命という言葉が一人歩きし、これを自己流に解釈し、人工生命の本質的な主張（サンタフェで開かれた人工生命国際研究集会 ALIFE [2] で取り上げられ主張されたもの）すら理解していないで議論する人が現れている。ここでは筆者が選んだ、人工生命のいくつかのドグマを列挙しておく。もちろん、ドグマを採用するしないは個人の自由であるが、これらを共有しないと話が擦れ違ってしまう。

(1) 強人工生命：生命の本質はシステム機能であり、システムとしての機能が同じならば等しく生命である。従って、コンピュータ中のソフトウェアもロボットのような機械生物も、なまもので出来ている生物も、複雑な現代の社会経済も、生命のいくつかの特徴を持っていれば、等しく生きているといっている。

(2) 階層構造：自然は階層構造を成している。下部には素粒子を最下層とし、上方向へ向かって原子・分子の物理世界があり、その上部には遺伝子、細胞、組織の生物世界があり、さらにその上部には個体、群、社会、文化・精神の世界がある。

(3) 創発：このような階層世界の下位の自由運動が上位のパターンを生み、またこの上位のパターンが下位の境界条件となって個々の運動を間接的に規定する。この相互規定関係は非線形なフィードバックであり、その機構によって上位の複雑なパターンが生まれ出てくることを「創発」という¹。現存する生命は、この創発のメカニズムによって生まれてきた。生命とシステムの等価な人工生命も同じく創発するものである。

*この小論は、「計測と制御」に掲載した、星野「人工生命と創発システム」[1]に、新しい知見や見解を加えたものである。

¹創発を説明するのにアリなどの生物の例がよくあげられるが、身近な人間社会の例がもっともわかりやすい。いま新入生があるサークルへ入ったとしよう。すでにサークルの体制や雰囲気は先輩たちが創り出しているのだから、新入生はそれに合わせるしかない。しばらくするとサークルの成り立ち、人間関係、意見の通し方などがわかってくる。上級生になると、かなりの制御もできる。サークル全体の（上位の、マクロの）秩序は、下位のミクロの構成員の活動や個性が創り出したものだが、それがまた個々の構成員の環境として働きかけ、サークルは発展し、また解消する。多くの粒子からなる物質・場、銀河系、高分子・遺伝子、細胞、神経系・脳、生物個体、個体群、家族、会社、地域社会、学会、宗教、政治、経済、文化など、あらゆるところで、創発現象の例には事欠かない。

(4) ボトムアップ：上下の双方向の絡みはあっても、第一原因は下位の物質的な世界にある。この意味で、システムはボトムアップに創発している。創発認識は無神論的機械論に属する。

(5) 非明示性、無目的性：創発運動は明示的な目的（神、設計者、評価者）を持たない。これを無目的性または非明示性と呼ぶ。明示的に上位の運動やパターンを決め付けているモデルまたは方法論は、（程度によるが）人工生命からは外れている。工学では通常、目的があり、明示的な設計を行なうことが多い。これが、工学と人工生命が原理的に相性が悪い理由である。

3 機械論の歴史

筆者は歴史家ではないので、断片的にならざるをえないが、自然、生命と知能の機械論に関係する歴史を述べておこう。歴史という極めて多次元の現象を相手にするには、いくつかのキーワードに特微化し低次元化して述べるしかない。ここでは、ボトムアップ vs トップダウン、明示性 vs 非明示性、一般性 vs 個別性、動的 vs 静的、などという座標軸を採用する。

ヨーロッパにおける中世世界は、われわれにはよくわからないが、神学に採用された自然認識は、ギリシャのアリストテレス哲学が基盤になった、多分に日常的で実験的検証を経ないドグマと言われている。この世界観は統一法則を指向しないで、多分に個別法則的である。その世界認識は静的であり、トップダウンである。

17世紀のデカルトとニュートン以後の自然哲学は、明示的で一般的である。すなわち、ニュートンの運動法則などの統一法則で万物を説明しようという執念がある [3]。古典物理学の基本には動的認識がある。法則を人間が書き下すのだからトップダウンであるが、しばしば法則は下位の運動を記述し、それを積分すれば、ボトムアップに大域的パターンが発展し形成される（実際これを示そうとすると、ラプラスのデーモンか、スーパーコンピュータが必要だが）。古典力学が成功した対象は太陽系のような単純系だけであった。多体系・流体系など複雑系の多くの分野では個別性、各論性を色濃く残している。

19世紀の産業革命以後の機械論は、物理・工学・産業の成功に裏付けられて発展を続ける。他の科学分野でも、ダーウィンの進化論やマルクス主義（唯物論）が現れる。バイロンの娘、エイダ（人類最初のコンピュータ・プログラマと言われているが、その真偽には諸説ある）が「星の運動を支配する重力の法則と同じように、大脳の現象を数学的な方程式として表したい。困難は実験にあるが、... いくつか私はきっとやってみせる。生理学者が誰もこの正しい方向へ向かっていないのは信じられないことだ。」と手紙に書いたという [4] [5]。しかしまだまだベルグソンの哲学に象徴されるように、生命を聖域とする見方が体制的であった。

20世紀は40年代に入ると、ノーバート・ウィーナーによって、生命と機械の統一のアプローチを目指す「サイバネティクス」が提唱された [6]。それまでばらばらに扱われてきた、工学、数学、生理学などに共通するシステム構造を数学的モデルとして表現し、その個別的な局面を取捨したシステムの共通法則としての、確率過程、フィードバック、制御、通信、情報の概念を樹立した。サイバネティクスの認識と精神は、多くの賛否を巻き起こしたが、今日では20世紀の科学技術とその基盤を代表する思想として定着している。生命へのシステムの認識という点で、サイバネティクスは人工生命の原点である。サイバネティクスは、フィードバックのような非明示的な枠組みをもっている。それは、方程式によって全部のシステム行動が明示されていなくても、与えられた入力や環境からの外乱などの動的変動にも対処し、システムの目的を十分に達することができる。しかし、創発という概念は、サイバネティクスの裏にはあっても表には強く出ていない。

50年代に入ると人工知能が提唱された。原典の一つはチューリングの論文 [7] である。そこでは後天的学習と先天的遺伝による人工知能が提唱されている。マッカーシーらによって「サイバネティクスでもない、オートマトン²でもない」という位置づけで人工知能は、サイバネティクスへのアンチテーゼとして提唱された。フォーゲルの進化オートマトン [8] を批判したマッカーシーは「適当に過酷な環境中で、コンピュータプログラムを突然変異させ、知能を進化させるような、自然淘汰のコンピュータシミュレーションを行うことである。この方法は、... しかし成功することもありえよう。... いずれにせよ、知能とは何であるかを理解することを通じて人工知能を製作しようとするアプローチのほうが、著者（マッカーシー）にはより性にあっており、また早期に成功しそうに思われる」、「人工知能、とりわけ汎用的知能の仕事は、知能とは何であるかについてのより明確なアイデアによって進展するであろう」と書いた [9]。これからもわかるように、人間が知っている常識は明示的に使えば良く、人間が「人工知能を内省して作りだす」という意味で、その認識はトップダウンであり、代表的なひとつの知性を想定していて、静的である。

² 当時のオートマトンに関する学会論文を読むと、今日のニューラルネットのそのようだ。当時は両者は不可分で神経回路モデルの一種であった。

この人工知能は60年代において新しいパラダイムとして喧伝されるが、その約束した成果はえられず絶えず批判にさらされた[10]。60年代には20年後に復活する、多くのパラダイムが提唱された。これは50年代では一部の大学・研究所に限られていたコンピュータが、広く使われ出したことが原因の一つであり、またサイバネティクスの主張が、現実の技術的イノベーションの形をとって社会に浸透したことによって、受け入れられたからであろう。

70年代になり、人工知能に新風を吹き込む動きもあったが、それは改良主義的であって、根本的な見直しではなかった。80年代に到って、やっと初心のチューリングの提唱になる学習のパラダイムを「真面目に」やる機運が出てきたが、人工知能の個別の分野の間口はますます狭くなり零細化した。

80年代では、60年代のパラダイムの復活があった。すなわち、ニューラルネット、ファジー、遺伝的アルゴリズム(GA)である。また60年代のコンピュータ・シミュレーションの発展の流れの上には計算科学が出現し、スーパーコンピュータを武器に流体、多体系、複雑系やカオスの研究が進んだ。

人工生命は80年代後半、クリストファー・ラングトンの提唱による。ラングトンは生命の特徴的な現象には共通のメカニズムが支配していると捉え、その一般論として人工生命を提唱した。人工生命はサイバネティクスから発する一般システム論[11]の系譜上に位置づけられよう。しかし、人工生命以前のシステム論では、階層構造を論じていても、ホメオスタシスや分散制御というような閉システムの安定性に注目したのに対して、人工生命は階層構造をもつ開システムへの創発認識による切り込みを大きな特徴とする。この人工生命の創発認識へ到る歴史については文献[1]を参照してほしい。

4 物理学・文学軸

いろいろな学問を、一般的 vs 個別的という特徴で分類すれば面白い。最下層は物理学、最上層は文学であろう。この両極端の間にいろいろな学問や芸術を配置できる。

伝記によれば、ニュートンは法則をできるだけ短い単純な記述ですませることに執念を持っていたようである[3]。明示的な方法論はニュートンの独自のものではなく、この時代のデカルトらに共通している。ニュートン以来、物理学者たちはこの単純理解という方法論に則り、自然をできるだけ単純に理解しようとし、学生たちは単純に理解できたときに真に理解したことになると教育され続けた。

単純理解が可能となるのは単純系においてである。流体、ガス、銀河系のような高自由度の多体系では、ニュートン力学は、下位の運動方程式を与えるが、それを積分してえられる、上位の創発パターンについては、役に立つ見通しを与えない。単純理解即理解という精神は、複雑さを増し個別的認識が必須となるシステム階層の上方向へ向かって、どこまで通用するのだろうか？

物理学は概して明示的であり、法則は仮説という段階ではトップダウンに与えられ、それが実験で検証される。法則は著しく一般的である。物理学は多くの成功を収め、諸学のお手本としての地位を確立した。

一方、最上階の文学は、私小説や私的エッセーという極端な例をとれば、きわめて個別的で、一つの物語を語るだけである。物語の一般化は読者に任されている。

個別的認識を特徴とする立場は、たとえば生物学でいえば、博物学にあたる。個々の現れた生物の多様な形態・生態をそのまま受け入れてそのレベルで分類し、多様性をそのまま記述する。一方進化学は生命一般の進化のメカニズムを対象とする。個別の議論があってもいいが、あくまで関心の在処は、進化の一般法則である。工学も、物理学的方法論が破綻する多自由度系(流体や大規模系)を相手にするとき、かなりの個別的側面をもつ。

理解すると一言でいっても、このように物理学と他の博物学的学では違っている。個別の具体性と多様性が本質的なとき、そのレベルでの法則が(もしあれば)求められているのであって、下部の個々の運動法則(しばしばそれは自明であったりする)は目的ではない。この場合物理学的な単純理解は方法論として破綻する。物理学の「単純理解こそ理解」という方法論は、現代科学に携わるものに強く影響を与えている。「複雑系には一般法則がまだ見つかっていない」、という批判をよく見聞きするが、批判者はどのような理解の仕方を要請しているのだろうか？

5 生物学と人工生命の関係

5.1 生物から人工生命へ

Biologically Inspired (生物から啓発された) 分野というくくり方で、最近のシステム科学・工学の新しい展開は特徴づけられることが多い。絶えず生物学からのヒント、解釈が流入してこそ、実りの多い成果が期待できる。なぜなら、現存する生命こそ、もっとも複雑で知的なシステムを進化によって実現した例であるから。とは言っても、現存する生命を忠実に真似ないといけないということはない。強人工生命が本命である人工生命では(とくに工学的応用では)、生物学では禁じられている仮説やドクマを採用してもかまわない。たとえば、獲得形質が遺伝するラマルク主義的モデルや手法がそれである。また生物界では想像もできない、工学的制約条件を満たすような遺伝的オペレータなどが採用されている。

一方、その傾向が強まると、汎化の行き過ぎが生じる。例えば、GAによる進化の枠組みを、汎用手法(対象のシステムを問わないという意味の)と見なし、遺伝子集団の中身を見ることにあまり熱心ではないアプローチが初期にはあった。むしろサイエンスではなく、積極的に工学であるべきであるという主張である[12]。しかし、対象が複雑系であるときは、そのような一般的な手法は存在しない。「このような対象には、このようなパラメータ群を選びなさい」というような、ノウハウの集積が可能なのである。そのようなGA技術のノウハウ集(クッキングブック)は膨大な厚みになるだろう。職工的コツを脱却して、見通しを提供してこそ工学であるから、それでは工学的手法としての責任が果たせない。

いまや適応度のグラフが右上がりであることを示しただけの論文は、時代遅れである。遺伝子の中身を解析し、遺伝子レベルで起こっていることを知ってはじめてGAを最適に動かすことができる。人工生命でも「すばらしいものが出てきました。見てください」といって放りだす「ぶん投げ型人工生命」の時代は終わっている。

5.2 人工生命から生物へ

逆もまた期待されている。逆とは、新しいツールや認識を生物学へ提供し、進化生物学に貢献することである。現実には生きている生物をターゲットとして忠実に研究する立場を「弱人工生命」という。弱というあまり重要ではないというニュアンスがあるが、この人工生命から生物学への貢献は、人工生命が科学として定着するための一つの重要なステップである。

脚光を浴びている生物学の最先端では、生物のシステムの解明よりも、がちがちの「物質主義」が主流のようだ。典型的には「遺伝子決定論」がそれで、「なになにを支配する遺伝子が見つかった」という記事が新聞を賑わしている。遺伝子がすべての個体の特性を決定していない(遺伝子は個体の完全な設計図ではない)ことは、簡単な情報量の推算でわかることである。発生の過程では多くの不確定なプロセスが関与していて、遺伝子は発生という坂の構造と、その坂をころがる方向(最初の一押し)を決めるだけなのである。発生の解明が困難な理由は、すでに発生した生体(部分的にできあがった大域的パターン)が、その後の発生過程にフィードバックするという、典型的な創発過程だからである。

また各個体が生態学的な体制(群と環境)に適応するプロセスも創発的である。この遺伝子、発生、適応という全過程が数十億年にわたって繰り返されて、進化がすすんだ。この生物学における究極の謎を、人工生命はシミュレーションによって解明しようとしている。生物学で行なわれているような、現存する生物を丁寧に調べて進化を論じることは、エンディングの場面から全部のドラマを想像するように、大変困難なことである。これを(強)人工生命は、生命一般の進化というように視点を広げて、この現実に関わった進化は、偶然性に支配された一例にすぎないのかもしれない、という可能性も含めて解明しよう(せめてヒントをえようと)している。

物質万能主義の中で、このシステムの理解への理解をえることは容易ではないが、その試みは徐々に(若い研究者の間に)広がっている。

6 個人的な人工生命との交点

6.1 ロスアラモス・サンタフェと2つのルポルタージュ

人工生命は1987年、アメリカはニューメキシコ州、ロスアラモス研究所の研究集会で産声をあげた。ロスアラモスは火山台地に開かれた研究都市で、メキシコ国境方向には超えられない死火山があり、リオグランデ川

に流れ込む急峻な侵蝕谷と崖が台地を取り巻き、天然の要害となっている。2次世界大戦中の原爆の研究と製造で有名になったところである。1987年当時、筆者（星野）は超並列スーパーコンピュータ PACS の研究をしていて、ロスアラモス研究所に招待されて講演をした思い出がある。ここには非線型システムの研究グループがあり、それが中心となって人工生命の最初の集会在開かれた。オーガナイザーはクリストファー・ラングトン。彼は物理学や情報科学の経歴がある、いろいろな分野を渡り歩いた、ヒッピー世代の人である [13]。

人工生命研究が日本へ本格的に紹介され、研究者の注目を集めだしたのは1990年ごろだろうか。筆者は当時、これも評判になりつつあった遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた生命のシミュレーションに魅せられて研究を始めていた。最初から工学的な最適化問題には興味がなかった。GAの研究というよりは、人工生命の研究をしていることに気がついたのは、あとになって ALIFE 国際研究集会の論文集を読んでからである。この論文集の序文はオーガナイザーのクリス・ラングトンによる、人工生命の宣言と檄文であった。筆者の若いころの（時代的にはちょっと遅れ気味の）夢だったサイバネティクスのやり残した課題が、物理学、生物学、芸術、哲学、なども巻き込んで、熱っぽく語られていた。

最近「複雑系」というキーワードで括られるこの分野の発展の経緯は、ワールドワイドウェブのルポルタージュ「複雑系」[13]に詳しい。人工生命はその中でも一つのホットスポットであった。研究体制は、1987年にはロスアラモス研究所から山を下りて、州都といっても小さな町サンタフェの「サンタフェ研究所」へ移っていた。そこへ方々から集まった、いわば梁山泊たちが持ち寄り、創って見せた複雑系と人工生命の世界、たとえば、パソコンの中で RNA 世界とその進化を見事に作った Tierra, カオスの縁へ進化するセルラーオートマタ、生命の多くの階層間で見られる創発の概念など、わくわくするようなトピックスが詰まった文献からは、科学としては不徹底に終わったサイバネティクスの「弔い合戦」という予感すら、沸き上がってくるのであった。そして、ジョン・ホランドが GA とクラシファイアシステムをひっさげてサンタフェ研究所へやってきた。こうして複雑適応系の研究は、工学的に実現が容易でない知的システムを、適応と進化の手法で実現するという、壮大な夢が工学分野でも可能ではないかと予感させた。

このルポルタージュ「複雑系」と合わせ読むべき本は、最近出版されたマレイ・ゲルマン「クォークとジャガー」[14]である。表題の「クォークとジャガー」とは、自然の最下層から最上層までを意味している。著者は、物質の究極の構成要素クォークの予言と命名で有名な、1969年ノーベル物理学賞受賞者である。ここで語られているのは、「自然の基本法則と偶然の働きの相互作用」によって出現する複雑さと、その維持機構である。物理学者のもつ基本的なスタイルは、基本法則の単純さにこだわり、それさえ分かれば物理の使命は終わり、あとはただ具体的な初期・境界条件のもとでスーパーコンで計算すれば、自然は全部再現できるのだ、という還元主義である。しかし、ゲルマンの理解は一概に還元論だとは決めつけられない。彼の理解を要約すれば、量子の世界の不確定性は準古典領域では平均されてほとんど現われないし、さらに初期条件レベルの歴史の偶然、カオスによるその増幅、観測の粗さによって、圧倒的に大きな複雑さが生まれ、系の持つ規則性はスキーマとしてエージェントに獲得され、淘汰にさらされて適応する。この理解は、今日の人工生命や複雑系の研究者が共有しているものと大筋では同じである。ところで、複雑さの源とされている初期条件、つまり偶然に支配された歴史的経緯は、その歴史が属する階層における何らかの基本原則に従っているはずである。しかし、それが物理学的単純理解の範囲を超えているのだ、というように読める。

6.2 人工生命をとりまく雑音と体制化の動き

一方、日本ではマスコミなどが人工生命を取り上げるようになって、雑音が激しくなった。真面目な科学ジャーナリズムはいいのだが、一般のマスコミや、イエロージャーナリスト達は、この人工生命という日本語から「怪しい」響きを嗅ぎ取るのか、世紀末に出現した擬似科学の一種という趣旨の取材すらあった。一般の科学ファンは、学術雑誌などに載った人工生命の解説記事を、さらに解説した（しばしば不鮮明な）記事を読んでいるだけとも思えた。まったく創発概念やボトムアップや非明示性や、国際集会で的人工生命研究の成果とは関係のない、自己流の定義をして、迷惑な議論を吹っかけて来る人もいた。他方、学者・研究者の一部がこのような世相に合わせて、知名度や研究費をえたことは否定できない。そのうちにリアクションがやってきた。人工生命や複雑系への真面目な批判記事 [15] や、真面目に人工生命を研究しようとする若者を挫く記事がでたり、まったく人工生命とは関係ない内容に人工生命という名前をつけた本も店頭に並んでいる。

「人工生命研究会」という真面目な研究と議論をする任意参加の研究会が、佐倉統さん（現、横浜国大）の呼びかけで始まり、毎月東京を中心に活発な議論をしていたが [16]、その後、日本の研究会の宿命（踊っているコアメンバーと見ていただけの野次馬の2層への分離）に陥り、現在活動は休眠状態に入っている。真面目な研究とキャンペーンによって、多くの雑誌記事、書籍、シンポジウムが開かれ、げても的ない受け取り方

は減ったが、体制的な科学者や行政官からは、まだ認知されていないと言っていいだろう。そのせいか最近では「人工生命による…」という言い方は避けられる傾向にあり、進化的計算という言い方が一般的になりつつある。

最近のマスコミは人工生命へ興味を失ったかのように見える。具体的な素人わかりする成果が出ないこともその理由だろう。しかし、一方着実に研究は進展し、3年前から文部省科学研究費重点領域研究「創発的機能形成のシステム理論」でも取り上げられ、生命の起源、生態系、進化などの研究成果が公開報告されている。筆者を含む、いわば日本の人工生命第1世代の何人かはこの研究活動に参加し、1998年3月には終了することになっている。

7 人工生命の原理的問題

7.1 人工生命と複雑系研究への批判

複雑系や人工生命の抱えている困難は本質的なものであるという認識が広がっている。たとえば、Scientific Americanに掲載された「複雑系から困惑へ (From Complexity to Perplexity) [15]」という批判記事がある。筆者の見るところ、指摘されている困難には、根本的な問題が含まれている。それは、複雑系を理解することとは何かという問である。この記事が提起している問題は、一言でいえば、「複雑系や人工生命が約束した、熱力学第2法則に相当するような、複雑系の基本法則がまだ発見されていないこと」である。複雑系の基本定理は見つかったのかと。しかし、批判者が口ぐせのようにいう「見つかっていない基本統一法則」とは何なのか？一体なにを期待されているのだろうか？物理学的単純法則なのか？それが見つかるのなら、それは単純系である。一方、物語的記述なのか？まさかそれでは批判者は満足しないだろう。そのような基本法則は中間的な「実効複雑度が最大になる」[14]あたりで存在する、複雑系のモデル（コンピュータプログラム）のことなのだろうか？それならもういくつも出来上がっているが。

7.2 多段創発の困難

現実の生物の世界では、直接影響し合っている上下の2階層では到底話は終わらない。高分子・蛋白質などから生物個体が構成されているといっても、高分子を器へ入れて攪拌しても生物が生まれるわけではない。まず、高分子が自己増殖する仕掛けが現れることが、非生物と生物の境界を乗り越えるためにもぜひ必要だ。池上らが提示したテープとマシンの自己複製モデルは、この境目を超える一つの道を示している [17]。

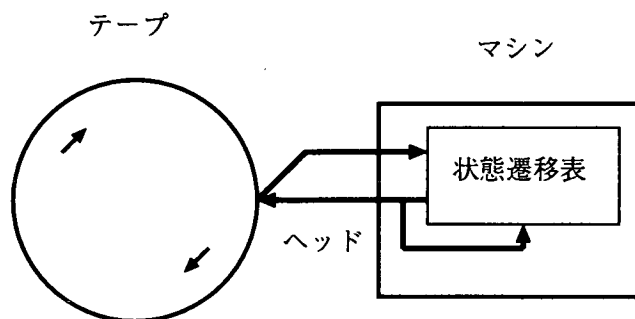


図1: マシンとテープの共進化モデル（池上，橋本）

図1に示すように、エンドレスのテープに最初はランダムな情報が書かれている。それをマシンが読み、内部で状態遷移をし、テープを書き換える。ここまでは普通のチューリングマシンと同じだが、テープを書き換えると同時に、自分自身の状態遷移表も書き換える。こういうマシンとテープの集団が「原始の海」の中に置かれ、突然変異をうけながら進化する。そのうち、自然界にも存在する2種類の自己触媒系（2重ループ型とアイゲン・シュスター型）が出現していることが発見されたという。そもそも無生物と生物の間の越え難い溝は「自分で自分を如何にコピーするか？」にある。それが、何も明示的には教えていないのに自然に進化して現れたのだ。

しかし、この計算をさらに長時間続行すると、このテープ・マシン生物以上のものが進化して現われるのだろうか？たとえば、カンブリア紀以前にいたような単純なアメーバや軟体動物が現われるのだろうか？ちょっとそれは無理だろう。自己増殖する高分子とこれらの動物の間には細胞の獲得という壁がある。ある有効な仕掛けが、2段階創発的に、下位の運動から出現したとしよう。それを使ってそれ以上のレベルへジャンプするには出てきたものがさらに上のレベルの積み木となって、より大きな構造を創発させることが出来ないといけない。これはきわめて難しい。

GAによって高分子が何個かくっついて原核細胞が偶然出来たとしよう。それが有効な構成要素（積み木）となって、交叉によって合成され、より大きな組織や器官となるというように、生物の階層を登ってゆくのだろうか？折角GAによって獲得された積み木も、それを積極的に保護しない限り、交叉によって再び失われることがある。とくに遺伝子が染色体中の並んでいる有様（生体をいかに遺伝子と染色体にコーディングするかという方法）によっては、積み木の遺伝子がばらばらに離れて染色体中に分散してしまう。細胞や組織は当然2、3次元の構造をもっている。その本質的に多次元の構造を、1次元染色体中に展開すると、多次元の構造に対応する積み木は、離れ離れになってしまい、交叉オペレータによって切られやすくなるだろう。そうならないような仕掛けは、遺伝子表現にある文法を持たせ、複雑な多次元構造を表現することだろう。しかし、そのような積み木構造に、「これが積み木です」という印があらかじめついているわけではない。また、適応度に貢献した積み木がGAによって自動的に判定できるわけでもない。人間にとっても、構造やその存在自体が曖昧な積み木は、万人に等しく認識されるとは限らない（観測者依存性）。たとえ見えない積み木でも、それを自動的に合成して、より高次の細胞や組織のレベルへ飛躍させる役割をもっているはずの交叉オペレータが、進化の足を引っ張って、折角獲得した細胞という積み木を壊してしまうことが十分起こりうる。

もっとわかりやすい例を挙げよう。一昔前のコンピュータは多くのトランジスターや抵抗やコンデンサーなどの個別部品で出来上がっていた。しかし、トランジスターや抵抗や半田などを鍋に入れてぐつぐつ煮ても、コンピュータは出現しない。まず、トランジスターは抵抗などにつながって、いろいろな種類の論理回路を構成しないと行けない。論理回路は集まって意味のある演算器やレジスターを構成するべきだ。演算器やレジスターは、意味のある構造（アーキテクチャ）にしたがって集まり、やっとコンピュータが出来上がる。

この少なく数えても3段階の階層を一気に、単純な「遺伝的アルゴリズム鍋」またはそれに類似の進化計算によって駆け上がるができるだろうか？それは出来ない。なぜなら、トランジスターが抵抗と、たまたまうまくつながってフリップフロップが鍋の中に出来たとしよう。そのときGAは、適応度が上がったことを認めてそれにふさわしい動きをするだろうか？もし、適応度として、プログラム制御や演算・判断ができることに対してだけ評価を与えるのではなく、フリップフロップが可能とする論理的な演算に対しても（それが如何に部分的な動作であっても）、適当な中間の評価を与えるならば、それは可能だろう。つまり、そのフリップフロップ（という積み木）をもつ個体は親に選ばれやすくなるだろう。

しかし、GAは明示的にフリップフロップの存在を認識していない。交叉や突然変異に対して積極的な保護もしていない。たまたま、フリップフロップに対応する積み木が、染色体中で離れた位置（遺伝子座）にあると、数世代の内には折角獲得されたフリップフロップは、交叉によって壊れてしまいかねない。

いままでGAによる進化計算の例、とくに多段創発らしき成果（つまり積み木が獲得されその上へ創発が伸びるという研究）はあるが、子細に見るとやはり、下の階層の要素と上の階層の望ましいパターンという2段階の階層の間の1段創発であることがわかる[18]。

この困難は本質的であって、積み木が壊れないなんらかの明示的方法を講じない限り、または40億年を待つ以外に、進化の梯子は登れないだろう、ということである。しかし、希望はある。多段創発を試みるならば、中間層に最小限度のなんらかの枠をはめる（解をもちろん教えてはいけない）という工夫が可能だろう。つまり中間階層は、モジュラー構造（細胞のようなもの）や、一般的なオートマトンのモデルとする、というような規制をすることである。

しかしこれをやり過ぎると、「仕組んだ八百長人工生命」になってしまう。これが「人工生命の悩み」[19]の最大のものであり、GAなどの進化計算によって、高度に知的な大規模なシステムを創発させるときに直面する、最大の問題である。安易に人工生命や進化計算で、高分子から高度な知能が実現するとか、コンクリートと鉄をかき混ぜると都市が出現するというような宣伝はすべきではない。（今日ではそのような過大な宣伝はなくなってきているが）。

7.3 その他の原理的混乱

紙面が尽きたので、その他の原理的混乱について簡単にコメントしておく。

7.3.1 適応度論争

しばしば「ダーウィン進化論は適者生存というトートロジー（同義語反復）である」という批判が聞かれる。適者（適応度の高いもの）とは生存競争に生き残ったもの、という定義をするとトートロジーになる。実際には、生存する必然的な理由または偶然的なチャンスがあったものが生き残り、それが子孫をつくり、遺伝子情報を伝えて進化が起こった。進化とは物事が発展 (evolution) する過程にすぎず、最適化ではない、ということは今や常識となっている。

式で書けば、集団のダイナミックスを個体 i に注目して書くと、（進化過程には、これ以外に遺伝子レベルの変化が連立する。遺伝子とそれから発生した表現形と生態系の変化は、関数 f 自体に変化をもたらす）、

$$dn_i/dt = f(n_i; \text{other } n_j's; \text{other parameters}) n, n = \text{個体数}, f = \text{個体の適応度関数},$$

であって、この式から $(dn/dt)/n$ を適応度と定義すればいい。つまり、ある個体の適応度とは、その個体のある時点での増加率であって、事後的に測定されるもの、としておけばいい。たまたま、 $f = f_i/f_{ave}$, f_i = 事前に明示的に与えられる個体適応度, f_{ave} = 群平均適応度, と書ける理想の場合には、事前的な基準 f に照らして適しているものが増えた、というモデルが成り立つが、それは一般化できない。現実はずっと複雑である。理想化されたモデルは現実にはあてはまらないが、考えるときの出発点（物理学における摂動が入らない系）にはなる。

7.3.2 工学との相性の悪さ

工学には目的（目標）がある。また設計が工学の本業である。設計は逆問題を解くこと（要求されている仕様を満たすシステムをつくり出すこと）であって、解析をするとしてもそれは将来の設計への基礎的理解とデータの蓄積のためである。設計は明示的に行なわれるのが普通である。なぜなら、設計が行なわれるフェーズでは、システムの理解と解析は終わっている筈だから。一方、非明示的に設計されたものがあるとすれば、それは危なくて信頼度を要求する場面では、使えないだろう（GA で設計された飛行機や原子炉は安心できるか?）。進化的手法が使われている現状は、このようなクリティカルな場面ではなく、スケジューリングやゲームなど、比較的安心な対象や再確認が何重にもなされる場面であろう。

方法論的な革新の度合という観点からは、進化的手法は生成検査法（多数の試行を検査し、いいものを選ぶ）の一種というに留まっている。研究の主流は、やや副次的なテーマすなわち、有望なものを効率良く生成するための遺伝子操作や制約を満たす探索手法に関してなされている。

一方、本当にどう設計していいかわからない、高度に知的なシステムの設計（現実には人間が直観的になんとか解決している問題など）には、原理的困難が付きまとう。すなわち、どう設計していいかわからないということは、多分多段創発を必須とするだろうし（それは原理的に困難）、また、明示的に誘導するという手段はとれない（なぜなら、それがわかっていれば明示的に解けばいい）。

これらの困難は決定的ではないかもしれない。道の幅は狭いがなんとか通って行けるという程度に狭いだけなのかもしれない。

8 おわりに：もっと楽しい夢を見よう

人工生命の研究は、楽しいようで、実態はかなりつらい。それは、わざとストイックな（わかっていることでも、知らないふりをして、それが創発してくるのを待つ）姿勢を持っているから。特に自分をまだ確立していない若い学生は、目的の不明確さ、手段の非明示性、結果の評価の難しさ、の3重苦にさいなまれる。この息苦しさは、研究目標や枠組自体のもつ息苦しさではないのか？

週末の秋葉原は、流行のエレクトロ・グッズを冷やかすヤングで溢れかえっている。彼らは今は可哀相なほど自由のない選択を強いられている。つまり、目の前のものをそのまま買うか買わないか、という二者択一しかない。どうし自分好みにカスタマイズしたグッズが買えないのだろう。部分的にはもちろんそれが出来る。限定されているがそのような機能をもつソフトはある。「たまごっち」も自分好みに育てる楽しみ（苦しみ?）を味わえる。

だが、そのような自由度はすごく限られている。そもそもグッズそのものに「複雑さ」が足りない。システムの複雑さの源泉は、カオスの増幅などと並んで、再帰的構造にあるのではないだろうか。複雑なフラクタルなパターンは、単純な縮小写像の繰り返しででてくる。モデルの構造自体は単純なのだが、その内部にある自己参照の度合い（自己へのフィードバック）によって、複雑なパターンや行動が生成される。

まだこれは商品段階ではないが、内部で自己参照を高速にやるような LSI チップによって、それを手軽に（購入するときや、使用するとき）自分好みにカスタマイズすることが出来る時代が来ている。具体的には FPGA (Field Programmable Gate Array) と呼ばれる、いつでもデータに適応して、自己を再構成し進化できる、ハードウェアかソフトウェアか区別できないような LSI が実用されてきている。これによって近未来のコンピュータ・アーキテクチャは大変革を遂げるだろうと予想されている [20]。

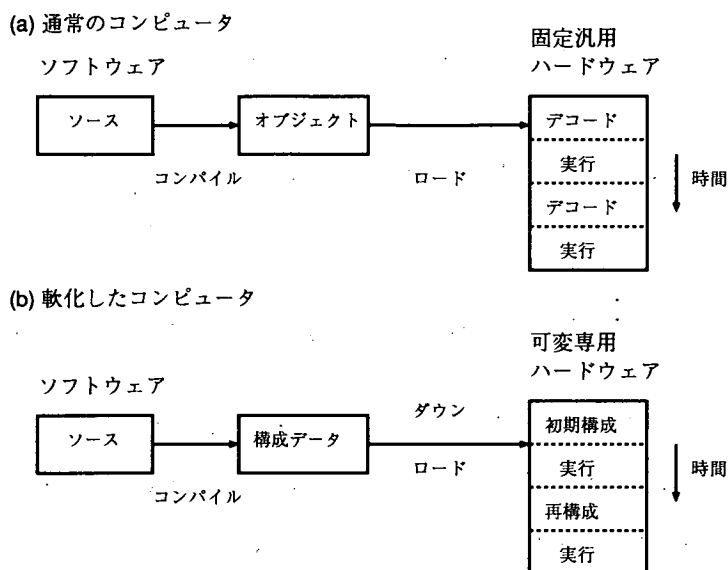


図 2: 通常型 (a) と軟化型コンピュータ (b) の処理方法の違い

図 2 (a) のように、従来のコンピュータでは、実行段階では、既成の固定したハードウェアで、命令をいちいち解釈しながら汎用演算器で計算している。FPGA では、図 2 (b) のように、直ちに（一時的に）ハードウェアが出来上って動く。これを筆者の造語だが、「軟化」と呼ぼう。従来の硬いハードウェアが動的に再構成されるので、ソフトウェアによって「軟らかくなった」というニュアンスである。回路構成のための時間はかかるが、命令解釈の手間が省けるので、ほとんどの計算が FPGA 内部に閉じて実行される限り、ハードウェア固有の高速度が実現する。しかも製作コストは安い。プログラムを変えてハードウェアを再構成することは、普通のコンピュータでソフトを作るのと同じようにお手軽にできる。その意味で、もっぱら FPGA は「お手軽に作れるハードウェア」という位置付けがなされている。

しかし FPGA の可能性はもっと別のところにある。一つはその再構成能力を利用して適応や進化をするハードウェアを作ることである。われわれが実験した GA による all-one 関数の最適化では、商業的なワークステーションの約 100 倍の速度が出た。FPGA の中へ自己参照型の人工生命的なからくりを使ったゲームやグッズを（再）構成（「再」の意味は、店頭でも自分でも気に入らなければ、ソフトウェアを変更するようにハードウェアを構成できる、という意味）すれば、秋葉原にやってくるヤングたちは、もっと広い選択肢から自分好みのグッズを選べるだろう。このテクノロジーは小型化に適している。なぜなら一つの LSI が何通りにも、必要に応じて再構成されるから。だからモバイルな用途には最適である。

FPGA と人工生命モデルのようなテクノロジーは、21 世紀のバーチャルな社会で、目に見えないところへ浸透して行くだろう。その未来の姿は、今ははっきりとは予測できないが、多分われわれの予想を裏切るものに展開するかもしれない。（コンピュータの歴史を調べると [5]、将来予想をことごとく裏切る展開の連続であることがわかる）。

テクノロジーも生物と同じく、新天地を見つけて大きく発展する。適応放散する。従来型の学問やパラダイムの外で、新しい動きが生まれる。それを批判して殺すのではなく、うまく育てることが大切だ。

人工生命はすでに初期のフェーズを終えている。第一世代研究者（遊牧民）は警察に追われるノミ屋のように、シヨバを変えつつある。第 2 世代（農耕民）に課せられた使命は、多くの課題と制約に狭められた隘路を渡りつつ、技術の定着化を図ることだろう。

参考文献

- [1] 星野 力：「人工生命と創発システム」，計測と制御，計測自動制御学会，Vol.35, No.7 (1996).
- [2] C.G. Langton, (ed.): ARTIFICIAL LIFE (1988), ARTIFICIAL LIFE-II (1991), ARTIFICIAL LIFE-III (1993), Addison-Wesley. ARTIFICIAL LIFE-IV (1995), MIT Press.
- [3] リチャード・ウエストフォール：アイザック・ニュートン，平凡社 (1993).
- [4] Betty A. Toole (Narrated and Edited) : “Ada, the Enchantress of Numbers”, Strawberry Press (1992).
- [5] 星野力：誰がどうやってコンピュータを創ったのか？，共立出版 (1995).
- [6] ノーバート・ウィーナー：サイバネティクス，第2版 (1961).
- [7] アラン・チューリング：「計算機構と知能」，ファイゲンバウム，フェルドマン：コンピュータと思考 (1969) に採録.
- [8] L.J. Fogel, A.J. Owens, M.J. Walsh : Artificial Intelligence through Simulated Evolution, John Wiley (1966).
- [9] マッカーシー，ヘイズ，松原：人工知能になぜ哲学が必要か，哲学書房 (1990).
- [10] ヒューバート・ドレイファス：コンピュータに何ができないか？，産業図書 (1992).
- [11] フォン・ベルタランフィ：一般システム論，みすず書房 (1973).
- [12] D.E. Goldberg : Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley (1989).
- [13] M. ミッチェル・ワールドロップ：複雑系，新潮社 (1996).
- [14] マレイ・ゲルマン：クォークとジャガー - たゆみなく進化する複雑系，草思社 (1997).
- [15] J. ホーガン：岐路に立つサンタフェ研究所，日経サイエンス，1995年8月 (J. Horgan : “From Complexity to Perplexity,” Scientific American, 1995年6月) .
- [16] 人工生命研究会編：人工生命 — 情報と生命と CG の交差点、共立出版 (1994).
- [17] T. Ikegami, T. Hashimoto, “Active Mutation in Self-Reproducing Networks of Machines and Tapes” Artificial Life 2, pp.305-318 (1996).
- [18] J. Koza, “Reuse, Parameterized Reuse, and Hierarchical Reuse of Substructures in Evolving Electrical Circuits Using Genetic Programming,” ICES 96 (Evolvable Systems: From Biology to Hardware), pp.312-326, Lecture Notes in Computer Science 1259, Springer Verlag (1997).
- [19] 星野 力：人工生命の夢と悩み - コンピュータの中の知能と行動の進化，ポピュラーサイエンス，裳華房 (1994).
- [20] 星野 力：「静かに進むコンピュータの軟化革命」，bit, Vol. 29, No. 9, pp.4-12 (1997).