《展望・解説》

人工生命

Artificial Life

- 1948年アメリカ、マサチューセッツ州生まれ
- ロックフォードカレッジを卒業後、アリゾナ大学で人類学と哲学の学士号を取り、ミシガン大学でコンピュータ科学と生物学の境界領域で博士号を取得する。その後ロスアラモス国立研究所に所属し、現在複雑適応系研究のメッカであるサンタフェ研究所にも属している。人工生命の父として知られる

- Complex Systems Group Theoretical Division Los Alamos National Laboratory and Santa Fe Institute

C.G. Langton

(翻訳) 大倉和博

神戸大学工学部機械工学科

(〒657 神戸市灘区六甲台町1)

生物学は、原則的には、生命の学問である。実際には、炭素鎖の化学に基づく地球上の生命に関する学問である。生物学を炭素ベースの生命に限定する大原則などないが、単に研究対象となる生命がそれしかなかったのである。そのため、理論生物学は個々の例から一般原則を導き出すのは不可能であるという基本的障害に長い間直面してきた。

生命に関する一般理論を導くためには、一般化できるだけの多くの具体例が必要である。近い将来見知らぬ生命体が我々の前に現れることなどありそうもないから、唯一の方法は我々自ら別の生命（人工生命）、文字どおり“自然ではなく人間によってつくられた生命”を作り出すことである。

人工生命（略してAL、またはALife）は、コンピュータや他の人工メディア内で基本的法則から生物学的現象の再構築を試みることによって“自然”な生命を研究する新しい研究分野に与えられた名前である。ALifeは伝統的な生物学の解析的アプローチに対し、合成的アプローチを補うものである。すなわち、それらがどのように動作しているのかを見るために、生物個々を対象とするのではなく、生命のようにふるまうシステムを集めて生物学的現象を研究しようとするものである。

合成化学との類似からすれば、人工生命は“合成生物学”に相当し、別メディア内での生物学的現象の合成法を研究テーマとする。それにより生命現象の理論的理解をさらに深めるだけでなく、産業や科学技術分野で非常に役に立つ生物学的原

理を取り入れた新しい工学的手法を開発することにもなる。生物学において研究の視野を自然に見いだされる生命（知っている生命 life-as-we-know-it）によって現在囲まれている領域からさらに広げることによって、人工生命は可能な生命（あり得る生命 life-as-it-could-be）の領域に近づくことができる。生物学の一般理論と産業や科学技術分野での応用の基礎を築くことができるのはまさにこの広大な領域内にある。

人工生命は生物的ふるまいとその応用とに関するすべての方面から研究されている。科学的視点からすれば、人工生命は理論生物学が長い間悩まされてきたたった一つの実例（歴史）しかなかったという問題を解決するのに役に立つであろう。例えば、実際の進化過程によって創造された生物の複雑さにはほとんどかなわないが、それらを使ってできない進化に関する実験をコンピュータ内の“生物”集団を使って実験することが可能になる。コンピュータ内では、進化過程を完全に既知の初期状態にまで戻し、少し変化させて再び進化過程を観察することができる。これを何度も繰り返すことによって初期状態の差異による進化の軌跡すべてを必然的なものと偶然的なものにとに区別することができる。化石は地球上の生命の歴史のごくささいな部分を示すにすぎないが、計算機内では完全な“化石の記録”を得ることができる。実験の範囲内での進化過程であっても自然界の複雑さや多様性の元となる進化理論の理解を深めることになる。

科学技術の視点からみれば、挑戦はするものの夢見るだけであった工学的諸問題、たとえば、自

己修復問題、構造の欠陥に対する適応問題、複雑かつ動的な環境下での生残問題、また自律的にゴールに到着するための戦略獲得問題に対して自然はエレガントな解法を備えるたくさんの生物をつくってきた。人工生命は、生物学から特定の解法を借りてきて適用するだけでなく、進化の過程そのものを借用することにより工学的諸問題の解決に貢献するであろう。工学的諸問題における人工物やその解法を進化させることによって、まったく違う方法論、すなわち、我々が理解している問題領域にとらわれることのない方法論で人工物を作り出すことが原理的には可能になるであろう。

哲学的観点からすれば、人工生命の概念は存在論、認識論、倫理学など広い範囲と関わっている。人工生命は科学的技術的挑戦以上のものであり、我々の基礎をなしている社会的、道義的、哲学的、また宗教的信念にも関与している。“単なる”人工物や機械を含めた生命の見方は我々を宇宙の中のもう一つの別の“特別”な位置に置きなおすであろう。コペルニクスの太陽系モデルのように、人工生命によって宇宙での我々の位置や自然の中での我々の役割を再度吟味せざるを得なくなるであろう。

社会的観点からすれば、人工生命は人間社会に非常に大きな衝撃となるであろう。これからの数世紀にわたって我々は自律的でかつ進化する人工生命体とこの世を共有しなければならなくなる。それはどんな世界になるであろうか？ 生物学的なものや技術的なものの境界がぼやけてきたならば、それらの間にどのような関係が定められ管理されていくのであろうか？ 核エネルギー技術のように、生命の技術は非常に有益な利用の可能性があるが、逆に、意図的であれまたそうでなかれ悲惨な乱用の可能性もある。

まとめれば、人工生命は現在比較的小さな研究分野ではあるが、そう遠くない将来に人類のすべての面にわたって影響を及ぼす可能性がある。それは、人類の存在を再度定義しなおし、遠い将来には、どんな形態の生命が存在するかを決定する可能性をも含んでいる。

人工生命アプローチのエッセンス

人工生命は準自律的実体の集団から構成される人工システム内に生命のようなふるまいを合成することである。ここで、実体間の相互作用は単純なルール集合によって局所的に定まるものとする。システムには大域レベルの集団のふるまいルールは含まれておらず、創発的性質により時間とともに複雑で高度なダイナミクスや構造が現れてくる。

生命の起源

生命の起源と機能的自己組織化に着目した“人工化学”にはたくさんの研究例がある。人工化学では、ケモスタット内の分子間の化学反応ネットワークをコンピュータ内の関数どうしの論理的“反応”ネットワークに置き換えて考える。

例えば酸素が基質分子を結合したり分裂したりして新しい機能特性を持つ新しい分子を作り出すのを、コンピュータ内で機能ストリングが他の機能ストリングと結合したり分裂したりして新しい機能特性を持つ新しいストリングを作り出すのに置き換えて、システム内でどのようなダイナミクスが創発されるのか、“本当の”化学のある特性はどれが獲得するのか、また、実験するのはどれが最もしやすいか、などを研究している。

これらの研究の代表例として、Richard Bagley と Doyné Farmer [Alife II⁽¹⁾], Walter Fontana [Alife II], Martin Boerlijst と Pauline Hogeweg [Alife II], Langton [Alife II] などがある。

進 化

現代の生物の構造は複雑な進化の過程によって定まったものであり、獲得された性質が偶然なのか必然なのか区別するのは難しい。生物学者が進化の“テープを巻き戻し”，それをはじめからスタートさせることが何度でもできるならば、一般化できるだけの進化過程の具体例を得ることができであろう。しかし、生物学者たちはそれができ

ず、可能な進化のうち実際におきた唯一のものから逃れられない。進化のコンピュータモデルでは“本物”を研究するのと異なり、何度も“テープを巻き戻し”ながら自由に操作することができる。

プログラム集団は自然選択の過程を経て進化することが知られている。個々のプログラムはあるタスクのパフォーマンスにしたがって評価を受け、良いプログラムは遺伝的アルゴリズムによって“子どもを生む”ことが許され、集団中の評価の悪い個体と置き換える操作が繰り返される。このようなプログラムの改良に対する進化的なアプローチは関数最適化や機械学習に対して既に応用されている。

しかし、このような進化モデルは進化そのものの研究に使われたことはほとんどない。それは“自然な”選択を適切な生物学的意味で捉えようとはしていないからである。ほとんどの研究者たちは主に進化の過程よりもそれがもたらす結果に注目している。その中であって、Kristian Lindgren [Alife II], Danny Hillis [Alife II], Tom Ray [Alife II], David Ackley と Michael Littman [Alife III⁽²⁾], Kaneko と Suzuki [Alife III] の研究は“オートマトン集団”の進化過程に注目した研究例であるといえる。

発 生

多細胞生物はたった1個の細胞から始まり、細胞の分割、移動、分化を繰り返しながら成長していく。この複雑な過程は形態形成と呼ばれる。細胞本体が成長する機構や正しい位置に正しい種類の細胞が生成される機構はいまだ大きな謎である。すべての細胞は同じ遺伝プログラムを持っているのに、異なる種類の細胞が遺伝プログラム空間の異なる領域にどのように分岐していくのかよくわかっていない。

Lシステムは複雑な形態形成過程を解析するのに人工生命研究者の間で広く用いられている。Lシステムは構造を生成する局所的部位に対し単純な再帰的ルールをボトムアップかつ並列に適用していく形式的システムであり、遺伝子型/表現型の区別が自然に行われて形態形成の問題をうまく

抽象化している。

The Algorithmic Beauty of Plants [Prusink 91⁽³⁾]には多くのLシステムの例が載っている。Peter Oppenheimer [Alife I⁽⁴⁾]は木のような構造を生成するフラクタルに適用した。

生 態 学

進化過程における生態学の役割は非線形の生態的相互作用を数学的に取り扱うのが難しいために過小評価されているように思う。コンピュータシミュレーションによれば、共進化するコンピュータ生物の集団内に複雑な生態の相互作用が自然に現れ、またそれらが進化過程に強く影響することがわかっている。

生態学を基にしている研究例として Kristian Lindgren と Mats Nordahl [Alife III], Toquenaga, Ichinose, Hoshino, および Fujii [Alife III], Steeve Lansing [Alife III] があげられる。

学習とコミュニケーションに対する 進化的アプローチ

人工生命分野において、進化学習と従来の学習方法を比較する研究は数多くなされている。一般的には、両方をうまく結合させて行うのが最も良い結果を生むことが知られている。例えば、進化する集団のふるまいをニューラルネットで記述し、シナプス間の結合とその初期重みは遺伝的ストリングで定まるものとし、各個体の生存期間中にバックプロパゲーションのような従来の学習方法でシナプス結合間の各重みを変化させる、といったものである。代表的な研究例として David Ackley と Michael Littman [Alife II], John McInerney と Nicol Schraudolph [Alife II] があげられる。

人工生命研究にとって問題表現は重要な課題である。人間に理解しやすいようにアルゴリズムを表現できる方法は遺伝的アルゴリズムでは扱いにくい。それゆえ、プログラムできる表現方法は進化しないであろうし、進化できる表現方法はプログラムできないであろう。John Koza [Alife II]

のS式を使う方法はプログラム容易性と進化可能性の妥協といえる。Peter Angeline と Jordan Pollack [Alife III] は Koza の遺伝的プログラミングパラダイムの中でマクロ表現を獲得しようとした。

行動生物学, コミュニケーション, 文化

行動生物学は動物の行動を研究するもので、人工生命モデルを適用する主要な領域である。多くの行動生物学者が動物のさまざまな行動の基礎となる機構の仮説を実験するのに人工生命を使うようになりつつある。個体のふるまいはよく共進化によって発達するため、これを理解せずに生物の多様なふるまいを説明するのは難しい。行動生物学の研究をするのに人工生命モデルを使えば、既知の生物のふるまいを生成する以上のことが可能になる。

動物の行動に歴史的にはっきりと影響を及ぼしている一側面にコミュニケーションがある。コミュニケーション手段や自然言語はたった一つの歴史からはその理論構築が難しいもののよい例である。多くの言語学者や行動生物学者は言語の発達や他のふるまいには一般的な原理があると信じているが、たった一つの歴史事象からそれらを引き出すことは難しい。この問題は人工生命モデルを使って歴史的に近い状況の集合を導き出すことで部分的に解決される。これらの視点からの研究は Bruce MacLennan [Alife II], Greg Werner と Michael Dyner [Alife II], Edward Hutchins と Brian Hazlehurst [Alife II] などがある。

コンピュータ生命

人工生命の目的の一つに理論構築のための実験データを獲得することにある。これに対して、既知の生物モデルやそのシミュレーションが示さないような生命らしきふるまいをするプロセスをコンピュータ内や“人工”メディア内に作り出す方法がある。von Neumann は自己複製するシステムの原理を導いた。よく知られているコンピュー

タウィルスもコンピュータ生命と考えることができる。

ハードウェアとウェットウェア での人工生命

これまでコンピュータ内の“ソフトウェア”メディア内で生物的な現象を合成する試みを述べてきたが、同様な試みが“ウェットウェア”(生化学における本物の分子を使った研究)や“ハードウェア”(典型的には移動ロボット)でもなされている。これらはメディアこそ異なるが、創発的で集成的、そして進化するダイナミクスが見つかるようなまったく同じ人工生命研究の原理に基づいている。

ロボティクス

移動ロボットの研究もハードウェアでの人工生命研究の一つである。移動ロボットの研究では、個々のロボットの制御問題よりもロボット集団の集成的ふるまいを議論することがあり、ここに人工生命の方法論が役に立つと信じている。

“人工知能への人工生命の道”は真に知的な人工物を達成する唯一の方法であると私は確信している。伝統的 AI が人間レベルの知性を直接対象としたかわりに、まず昆虫などの最も単純な知性の形態から研究を始めなければならない。伝統的 AI が約 40 年もの間追求してきた方法は知性の初期発達段階を省いたことにより重大なものを見失ったのは明らかである。

この新しいアプローチは Rod Brooks, Luc Steels, Leslie Kaelbling, Tim Smithers, Mark Tilden らによって始められた。彼らは伝統的 AI を使った認知、推論、表現、知覚能力をすべて捨て去り、人間よりも虫にならった知性を持つ“しゃばに通じた”ロボットをつくることを目的としている。これは、高次の認知能力は進化の歴史の中では終わりのほうに獲得されるし、また、先に定まる神経系や感覚器、および移動能力に大きく影響されることに基づいている。十分に発達していない比較的簡単な神経網でもおかれた環境内をうまく動き回ることができる。“象はチ

エスをしない”と言うよりも“ゴキブリはチェスをしない”と言ったほうがいいかもしれない。

MIT の Rod Brooks らはロボットとその制御構造を組み上げるのにボトムアップで分散的な手法（サブサンプションアーキテクチャ）を提唱している [Brooks 89⁽⁵⁾, Brooks 91⁽⁶⁾]。これは並列に動作する多段の層からなり、高次の層が低次の層を制御することを基本としている。この手法で考えれば、伝統的な AI でいう「魚は泳ぎ、鳥は飛ぶ」は「ヒレがピクッと動き、翼がバタッとばたく」となる。泳いだり飛んだりするのはこれら基本的なふるまいが適切な制御のもと創発された結果であると考えられる。

ウェットウェア

世界中の生体分子研究所で生命のような性質を示す化学システムを合成する試みが行われるようになってきている。これらの研究所では自然の生命を作り上げている有機分子の新しい組み立て法を研究しているところもあれば、自然の生命とは全く異質の分子を使って研究しているところもある。

自己複製をする分子システムの研究例として Julius Rebek [Rebek 90⁽⁷⁾], Gunter von Kiedrowski と Leslie Orgel のものがある。自己複製する細胞に似た構造の“micelles”の研究を Bachmann, Walde, Luisi, Lang [Bachmann 91⁽⁸⁾] が行っている。Gerald Joyce [Joyce 92 a⁽⁹⁾, Joyce 92 b⁽¹⁰⁾] は新しい RNA ベースの酵素をダーウィン進化機構によって作り出している。これは遺伝的アルゴリズムの分子版であり、彼らはこれを“方向性分子進化”と呼んでいる。

生命の未来

我々は人工的に生命を合成するのを目前にして

いる。我々がつくった人工物はどんどん我々に近づき、我々もまた人工物に近づいている。生命はどこへいくのであろうか？ 答えは簡単かつ明白である。

我々の技術上の努力によって生命の次の階層レベルが生じるであろう。

我々のレベルでの新しい生命（一生活ているロボットのようなもの一）ではなく、生命の次の階層レベル、しかし我々のレベルよりも上のレベルでの新しい生命であろう。我々の生命は肉体を構築している細胞の生命の上のレベルにあるように。

（原文を約 3 分の一に要約したものである）

文 献

- (1) Langton, C.G.ほか 3 名 (Ed.), *Artificial Life II*, Reading MA, (1991), Addison Wesley.
- (2) Langton, C.G. (Ed.), *Artificial Life III*, Reading MA, (1993), Addison Wesley.
- (3) Prusinkiewicz, P. and Lindenmayer, A. *The Algorithmic Beauty of Plants*, Berlin, Springer-Verlag, (1991).
- (4) Langton, C.G. (Ed.), *Artificial Life*, Reading MA, (1989), Addison Wesley.
- (5) Brooks, R. and Flynn, A.M., Fast, Cheap, and Out of Control : A Robot Invasion of the Solar System, *Journal of the British Interplanetary Society*, **42** (1989), 478.
- (6) Brooks, R. Intelligence without Representation, *Artificial Intelligence*, **47** (1991), 139.
- (7) Rebek, J. ほか, *J. Am. Chem. Soc.*, **112**, 1, 249, (1990).
- (8) Bachmann, ほか 3 名, *J. Am. Chem. Soc.*, **113** 8204, (1991).
- (9) Beaudry, A.A. and Joyce, G.F., Directed Evolution of an RNA Enzyme, *Science*, **257** (1992-7-31), 635.
- (10) Joyce, G.F. Directed Molecular Evolution., *Scientific American*, **267**-6 (1992-12), 90.

（原稿受付 1994 年 3 月 23 日）