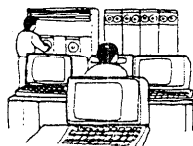


特別論説



情報処理最前線

生命論パラダイムに基づく情報処理†

下原 勝憲†

1. はじめに

人工生命 (A-Life) や進化的計算論 (Evolutionary Computation) 等の分野で進化や創発 (Emergence) をキーワードに新しい情報処理に向けた機運が芽生えつつある。これまで個別に提案された、脳の可塑性、個体の発生、適応や進化など生体や生物に学んだモデル化手法を組み合わせてあるいは総動員して情報処理の新たな可能性を探ろうとする。大胆かつ挑戦的ではあるが、ここではそのような研究の流れを生命論パラダイムと呼ぶことにする。

生命論的な情報処理によって一体何が新たに可能となるのだろうか。個人的には、情報処理系自らが自律的な内部処理を通して情報を生み出せるといった、自律性や創造性に富む機能の実現が可能となることを最も期待している。今やコンピュータは、私達の考えや文章を表現しコンピュータとの対話を通して文章や考えを練りまとめるために欠かせないものとなった。コンピュータは自己を表現し対話できる“第2の自己 (Second Self)”¹⁾的存在と言ってもよい。しかし、あらかじめプログラム化された以外のことはできないし、コンピュータ自らが情報を生み出すこともないのも事実である。

自律性と創造性に富む情報処理系、すなわち、“情報を生み出すコンピュータ”や“生き物みたいなコンピュータ”の創出が一つの目標である^{2), 3)}。具体的には、自発的/相互依存的な変化を生成する機構を利用して、プログラムを自ら書き換え新しい機能を創り出すソフトウェア進化や同様にハードウェアの構造も自律的に創り変えていくハードウェア進化の方法論の構築を目指したい。

本稿では、生命論的な情報処理の考え方並びにそのような発想から新しい“かたち”の情報処理の創出を目指す研究の動向を、その意義と展開の可能性 (可能と思われる展開方向) を中心に大きな気持ちで展望してみたい。もちろん、そのような考え方もここで紹介する研究事例に対する見方もワンオブゼム (one of them) であることをお断りした上で。

2. 生命論パラダイム

せっかく、生命論パラダイムと謳ったことでもあるので、とりあえず、生命論パラダイムとは、人工生命のコレクショニズム (Collectionism) の考え方と、生物の適応/進化戦略のコンピュータ・プログラミングへの適用を図る進化的計算論の考え方を融合した、概念的な思考の枠組みを与えるものとしよう。

2.1 人工生命：集団的な情報処理パラダイム

情報・計算といった視点から生命や生命体の特徴的な諸現象をコンピュータなど人工的メディアで合成しよう。そうすることによって、“私達が知っている”地球上の生命を理解するのみならず、“可能なもの”としての生命の原理を探ろう、というのが A-Life 元来の主張である⁴⁾。工学的な立場では、生命や生命体の持つ自律性、適応、進化、自己増殖、自己修復などの優れた特長を人工システムとして実現することを目指そうとする。

A-Life の基本思想がコレクショニズムである。コレクショニズムでは、構成要素間の局所的な相互作用を通して大局的な秩序や挙動が生成されるというボトムアップ的な創発と、創発された大局的な秩序や挙動が構成要素の振舞いや相互作用に影響し変化をもたらすというトップダウンとの双方向の機構を考える。まず、システムを構成する要素の集団と、要素同士がお互いに影響し合う (相互作用) 仕組みを考える。環境から与えられ

† Information Processing based on Life-like Paradigm by Katsunori SHIMOHARA (Evolutionary Systems Department, ATR Human Information Processing Research Laboratories).

†† ATR 人間情報通信研究所進化システム研究室

る刺激や情報にいくつかの要素が反応し、それらの相互作用が働き出す。そして、それらの相互作用の結果、ある種の“かたち”（組織、構造、秩序、ネットワーク、全体的な状態など）が出現する。その“かたち”がさらに他の要素の反応を呼び起こして“かたち”が変化する。そのような仕掛けで機能を実現したり情報を処理しようというわけである。大事なことは、要素がいつまでも固定ではなく、発生/消滅、増加/減少、結合/分裂したり、そのものの性質が変化したりする仕掛けも考える点である。

コレクションニズムの提唱する、(生物)集団的な情報処理への流れは以下のようにまとめることができる。

●集中制御から並列分散制御へ：

システムとしての振舞いや動作は集中的な制御によって実現されるのではなく、集団系を構成する要素同士の局所的な相互作用から創発する。

●最適設計から集団的冗長設計へ：

各々が最適設計された必要最小限の部品・要素によって系の最適設計を目指すのではなく、多少の冗長性をもつ多種多様な多くの要素からなり、集団的、組織的な挙動としての機能の実現を考える。

●固定から流動へ：

自発的/相互依存的な変化を生成する機構を利用して、集団系を構成する情報処理要素の種類や数が固定ではなく増減し、かつ、要素自体も代謝あるいは世代交代(のようなもの)を通して自律的に変化する。

2.2 生物の適応(進化)戦略をモデル化した進化システム

生命体を、多くの要素から成りそれらが有機的に機能し環境に適応する一つのシステムと見るとき、生命体の生物的適応戦略の一般的概念は図-1のように表すことができる。すなわち、まず遺伝子型という情報を基に分裂・増殖といった発生過程を経て構造や形態(表現型)を形成し、脳など制御系の可塑性を利用して個体としての機能や行動を生み出す。その機能や行動によって子孫を残せる(複製)か否か(死)が環境への適合の度合いによって決まる(自然淘汰)。複製は新しい遺伝子型を生成し、一世代の循環ができあがる。自然淘汰や遺伝子変異はそれらが個体に起こ

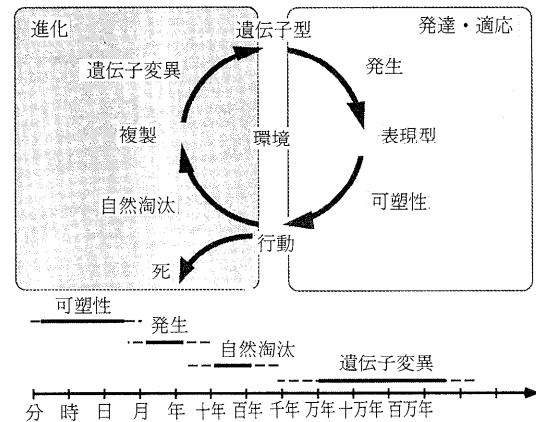


図-1 生物的適応戦略の一般的概念

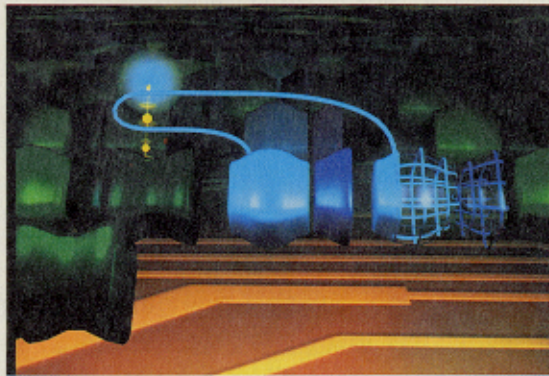
ったとしても集団レベルの進化的な過程である。

発生、可塑性、自然淘汰、遺伝子変異といった適応過程あるいは戦略は当然環境の影響を受ける。それらの適応戦略は図-1に示すように時間軸上に整理することができる。それが、生物が生化学的な実体であることの必然的な帰結なのか、あるいは、偶然の結果なのかは筆者には分からない。しかし、それらの適応戦略はニューラルネットや遺伝的アルゴリズムとしてすでにモデル化され情報処理に利用されている。少なくとも情報・計算といった観点では、生物的な時間軸とは関係なく、情報処理の基本手法としてそれらを使い分けたり組み合わせたりできる。すなわち、生物の発生、成長、発達、分化、進化をモデル化して、電子のスピードで多種多様な情報処理構造や処理様式をシミュレーションしようというわけである。

以上のように、生命論パラダイムに基づく情報処理では、生物的な適応/進化戦略をモデル化した進化的な方法論と、冗長性と多様性を保持しつつ動的に変化する集団系を用いて、どのような情報処理が新たに可能となるかを考えようというわけである。遺伝的アルゴリズムなど進化的な方法論ももちろん集団系をベースとするが、工学的な最適化問題への適用のようにある解を導出するといった視点ではなく、適応進化(変化)するシステム構成への適用を考える視点を特徴とする。以下では、研究事例としてソフトウェア進化とハードウェア進化を取り上げよう。



(a) 雷は種に破壊をもたらす死神を、稲妻は新種出現の可能性を創り出す突然変異を表す。



(b) 自らは自己複製できず、他個体の情報を盗用して自己複製する寄生種 (Images by Anti Gravity Workshop : courtesy of the Santa Fe Institute)

図-2 Tierra のイメージ図

3. ソフトウェア進化：“進化するプログラム”

ソフトウェア進化とは、変化やエラーを利用してコンピュータ・プログラムがプログラム自身を書き換え構造を変え、新しい機能を自律的に創り出すこと、すなわち、機能するものとして（あるいはある機能を保持しつつ）複雑化・多様化するものとする。

T. Ray のデジタル生態系ティエラ (Tierra) はその代表例である^{9), 10)}。彼は、一個の自己複製する電子生物としてのプログラムから複製時のエラーやランダムなエラーを突然変異として多種多様なプログラムが生まれあるいは消滅しながら、プログラム同士が有限の CPU タイムとメモリ空間をめぐる自然淘汰によってソフトウェア進化が可能であることを実証した (図-2 参照)。ここで自然淘汰とは、人為的な適応度を用いる人工淘汰ではなく、競合、寄生、共生や協調などプロ

ラム間の相互作用によって自己複製できるかどうかが決まるということである。他の特徴としては、

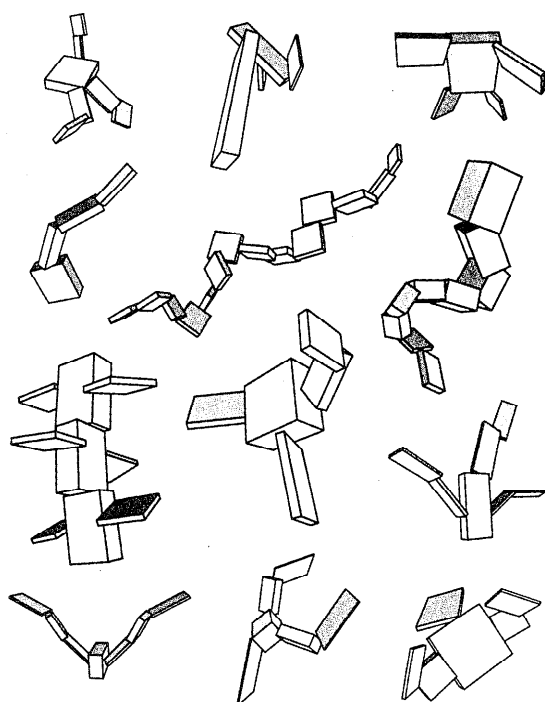
- (ティエラの場合は効率的な自己複製のための) 解としてのプログラムの形や構造が変化する、
- 集団系を構成する要素 (この場合はプログラム) 同士に相互作用がある、
- 共通リソースとしての環境そのものも動的に変化する、

などの仕掛けをもつことが挙げられる。

第1点目に関しては、遺伝的アルゴリズム (GA) をグラフ構造や木構造などの構造的表現を遺伝情報として直接扱えるように拡張した、遺伝的プログラミング (GP) を用いても実現できる^{11), 12)}。

たとえば、K. Sims は、彼の Artificial Evolution において方向グラフを遺伝情報として、コンピュータ上の3次元世界に、複数のブロックから成る形状をもちセンサ入力に対して行動を生成する仮想生物を創り出した^{9), 10)}。方向グラフはブロック状の構成要素を表すノードとノード間の接続情報から成り、複数のブロックから成る形状形成と同時にそれらを制御するための神経回路網を生成する。神経回路網はセンサ入力に応じた動きを生成する刺激反応系として機能する。「歩く」「泳ぐ」といった課題に対して進化的なプロセスを通して、カンブリア爆発を彷彿させる多種多様な形状デザインと行動をもった仮想生物が生み出された (図-3 参照)。また、創り出された生物同士がある共通のリソースを巡って闘い、勝者は生存と複製が許されるといった、仮想生物同士の共進化の例も紹介した。

また、元々の目的はハードウェア記述言語 (HDL) を用いたハードウェア進化システムの構築にあるが、邊見らは HDL プログラムの自動生成に GP 的な進化的方法論を導入している^{13), 14)}。HDL 文法を定義するプロダクション・ルールのセット (BNF 記法) に基づき文法的に正しいプログラムを発生させることを特徴とする。これは、受精卵が細胞分裂を繰り返して成体を形成する形態形成過程が、コンピュータ・グラフィクス (CG) 分野で植物の成長をモデル化する手法の一つである、リンデンマイヤ・システム¹⁴⁾ を用いて表現できることに相当する。HDL とともに開発が進められている CAD システムと容易に統合化でき、かつ、記述性と了解性の高い高級言語を

図-3 「泳ぐ」仮想生物の例¹⁰⁾

利用できる進化手法としてのみならず、HDL 以外の一般的なプログラミング言語へも適用できる考え方として今後の展開が期待される。

4. ハードウェア進化：“発生・成長・進化する電子回路”

ソフトウェア進化と同様な表現をすれば、ハードウェア進化とは、変化やエラーを利用して電子回路としてのハードウェアがその構造を自律的に創り変えること、そして当然構造とともにその機能を複雑化・多様化することとなる。従って、表現型がプログラムではなく電子回路である点を除けば方法論的には基本的な差はない。ただし、回路素子やデバイスそのものは進化しないが、たとえば、セル・オートマトンや FPGA (Field Programmable Gate Array) など、それらの結線や組合せが再構築可能な構造を持つハードウェアを前提とする。もちろん、ハードウェア進化の概念は、ナノ・テクノロジーを用いて素子構造自体を進化させる究極のハードウェア進化の可能性も含んでいるが、ここではより実現性の高い研究事例を紹介する。

ハードウェア進化の基本的枠組みを図-4に示

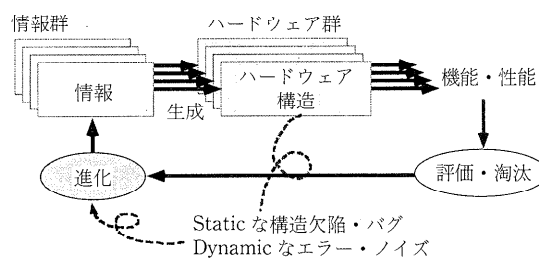


図-4 ハードウェア進化の基本的枠組み

す。情報群から各情報に依存した構造をもつハードウェア群を形成し、実現される機能や性能に応じてハードウェア群を評価・淘汰し、淘汰したハードウェアに対応する情報に進化的な操作を加えて次世代の情報群引いてはハードウェア群を発生・成長・進化させる。

H. de Garis は CAM-Brain (CAM: Cellular Automata Machine) と呼ぶ研究において、相互接続されたセルオートマトンを構成要素とする CAM 上に遺伝的な情報から任意のニューラルネットワークを発生・成長・進化させることを提案している^{15), 16)}。セルオートマトンは周辺のセルの状態に依存して自らの状態遷移を自動的に行うことができる。外部からストリング状の情報を与えると神経細胞が軸索や樹状突起に相当する枝を伸ばし、それらが衝突するところにシナプスを形成し、ニューラルネットワークがハードウェアとしてでき上がる(図-5)。つまり、そのような状態遷移を実行するルールをもったハードウェア CAM を考えようというわけである。

一方、FPGA に関しては、樋口らは FPGA のアーキテクチャビット列を遺伝情報として GA を適用する方法を提案するとともに、情報群の進化も含めて 1 チップで実現できる FPGA の開発を目指している¹⁷⁾。また、先ほど紹介した邊見らも FPGA を前提とし、CAD システムと組み合わせた総合的なハードウェア進化システムの構築を目指している。邊見らが受精卵からの発生による形態形成をプログラムとしてモデル化しているのに対して、P. Marchal らはハードウェア的に増殖可能な FPGA アーキテクチャを提案している¹⁸⁾。

ハードウェア進化に関するこのような試みは英国サセックス大や米国 MIT でも研究が開始され、P. Marchal らスイスのグループが中心になってハードウェア進化に関するワークショップが今秋に

も計画されようとしている。

5. 生命論パラダイムに基づく情報処理の意義と展望

ここでは、生命論パラダイムに基づく情報処理の意義とこれから有望と思われる展開方向をいくつか展望してみたい。個々の展開方向は全く別のように見えるが、それらは相互に密接に関連している。

5.1 ソフト（情報系）とハード（物質系）を統合する新しい方法論の構築へ向けて

ハードウェア進化とは情報に依存してハードウェア構造を創り変えようということである。情報を種、ハードウェア構造を再構築できるデバイス基盤を畑にと考えると、種に応じたハードウェア構造を畑に作り出し、目的に合うようにそれを繰り返しながら徐々に品種改良していくことに相当する。従って、以下のような特徴を持つことになる。(1) 種は同じでも畑が違うとできあがるハードウェア構造が異なる。(2) 従って、畑はデバイス基盤として均一性を要求されない、すなわち、畑ごとに多少の違い（デバイスの構造欠陥やエラー）があってもよい。(3) 逆に畑に適合する種を見つければよい、つまり、構造欠陥やエラーは情報の変化で吸収できる。(4) 動的なノイズやエラーについても同様である。しかもそれらは情報系が変化（進化）するトリガともなる。

種である情報と同様、畑であるデバイスについても冗長性の高い集団系を前提とするため、大量のハードウェア資源を必要とする。そこで、ハードウェア進化のフィージビリティについて考えてみたい。

現在、技術はハードウェア（物質）系とソフトウェア（情報）系とに明確に区分され、特にハード側からソフト側に対しては、品質と性能を保証するという境界条件がある（LSI屋さんは均一性が高く動作を保証できるデバイスや部品を提供し、ソフト屋さんはハードは同じとの信念の下、プログラムによって異なる機能やサービスを具現化する）。ハード側の製造技術の進展は著しく微細化技術は極限に近づきつつあると言われながらも、今世紀末には $10^{10} \sim 10^{11}$ の素子を1チップに集積することが可能となりつつある。ウエハースケールで考えると何と1兆素子ということになる。しかし、それを可能とする製造技術にもまし

てテストビリティが大きな課題であると言われていた。つまり現状技術と同程度の歩留りで構造欠陥やエラーのないものを提供することが極めて難しいということである。半導体技術のブレイクスルーを目指す、量子デバイスなどのナノ・エレクトロニクスやナノ・テクノロジーにおいても同様のことが言えよう。

そこで、ハード（物質）系とソフト（情報）系との関係に発想の転換を要求する、ハードウェア進化の考え方が重要な意味を持ち、しかも、双方に大きなブレイクスルーをもたらすものと考えられる。つまり、構造欠陥やエラーを排除することに躍起になることはない。その代わりに、ハードウェア進化は大量のハードウェア資源を必要とする。そのような意味で、ハードウェアの構造欠陥や動的なエラーを許容し、さらに、進化に活用しようとさえする、生命論的な考え方は情報系と物質系を融合化・統合化する新しい方法論へと展開できるものと期待している。

5.2 自律性と創造性に富むネットワーク・エージェントを目指して

21世紀は、情報スーパーハイウェイやGII（Global Information Infrastructure）といった情報インフラとユーザとの掛け橋となるコンピュータやネットワーク・エージェントの果たす役割が大きくクローズアップされる。

コミュニケーションの一つの意義は、自律的に情報を生成／創造できる存在（つまり生き物）同士が、出会いの意外性、筋書きのないドラマなどと言われるように、お互いの想像性や創造性を喚起し内部世界を広げることにある。指示した以外の情報を集めたり、アイデアを出してくれたり…など、自律性・創造性に富むコンピュータは、人と人との場合と同じように人がコミュニケーションでき、人の想像性や創造性を喚起し内部世界を広げてくれる存在となりうる。むしろ、絶えず変化・成長する情報源としての情報インフラの潜在力をどれだけ引き出し活用できるかという意味において、自律性・創造性を有するコンピュータやエージェントは必須のものとなろう。人とのコミュニケーションによって彼ら自身も成長・進化するのみならず、そのようなコンピュータ同士を結ぶ情報インフラ上のエージェント社会でのコミュニケーションによっても成長・進化することができる。そのようなネットワーク・エージェントは

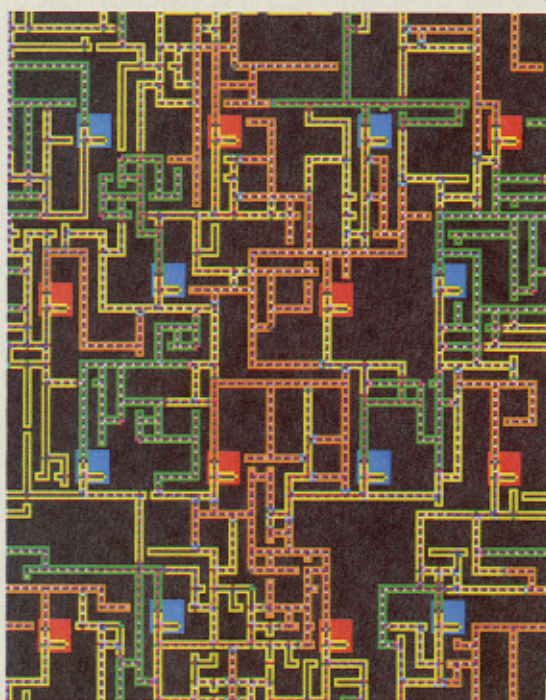


図-5 ニューラルネットの発生・成長シミュレーション：小さな四角が1個のセル，背景全体がCAM基盤，大きな青色/赤色四角が各々抑制性/興奮性ニューロン，ニューロンは樹状突起（黄）と軸索（緑・橙）に相当する枝を伸ばし，それらが出合ったところにシナプス形成する。

生命論パラダイムに基づく情報処理の近未来の最も有望な応用となるだろう。

また、T. Ray らは、ティエラをネットワーク型に拡張しインターネットなど地球規模のネットワークを環境とするソフトウェア進化の実験を計画している¹⁹⁾。多くの人々に関わる動的な環境としてのインターネットは間接的にデジタル生物に自然でかつ変化と複雑性に富む環境を与えることができる。デジタル生物はインターネット内を移動することもでき、より豊かなCPUタイムとメモリ空間を求めて絶えず地球の裏側に向けて移動するであろう。このことはそれとは全く逆に絶えず地球の表側、すなわち、処理能力を必要とするところに集まってくる助人エージェントの可能性を示唆する。コンピュータ同士が光で結ばれる時代を想定すれば、夜間地球の裏側の処理をこちらのコンピュータが実行することなどむしろ当然とも言えるし、そのようなことが可能となることが地球規模の情報インフラの大きな意義であろう。世界規模での情報インフラの時代に向けて、全地

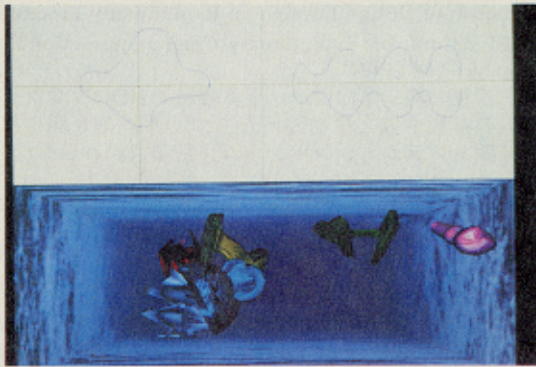
球規模での動的かつ自律的な処理能力の配分を可能とする一つの方法への展開が期待される。

5.3 進化システムとしての人工脳を目指して²⁰⁾

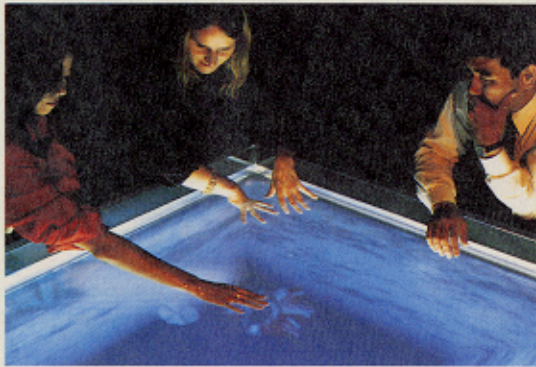
生体の脳では、生誕前後から幼少期にかけて神経細胞が大量に発生する。不思議なことに、それらの大半があらかじめプログラム化されてたかのように死ぬ。それでも百数十億とも言われる神経細胞が生き残る。残った神経細胞は樹状突起と軸索を伸ばし、軸索がシナプスを介して樹状突起に接続されることで神経回路網が形成される。しかし、そのような発生と成長の後、神経細胞は減り続ける。幼児期の脳が柔軟性や創造性に富むのは、ハードウェア構造が成長過程にあり柔らかいからと考えることができよう。軸索と樹状突起とを結ぶシナプスの可塑性は学習や経験を可能にする。しかし、脳は生体とともに死に、脳（つまり人）がいくら学習や経験を積んでも子には遺伝子しか残せない。そのような発生・成長・学習を、遺伝を通して何万世代に渡って繰り返しながら脳は進化してきた。

ハードウェア進化とソフトウェア進化の考え方は進化システムとしての人工脳の創出を可能にするだろう。人工脳にはいろんな利点が考えられる。一つは、柔軟性が要求される時には、全体でも部分的にでも何度でも幼児期に戻し、神経細胞を増やしてネットワークを張り替えることができる。生体の脳はその保持のために生体に見合った大きさ限定されるが、人工脳は限定されない。そして、最も大きな利点として、人工脳は死ななくてもよい！ 従って、学習や経験の結果を残したまま、新しい部分をつけ加えるように進化させることもできよう。つまり、脳の進化過程として説明されるように、魚の脳の外側に爬虫類の脳、その外側には哺乳類の脳、さらにその外側に大脳新皮質というように、蓄積的に情報処理系の重層化を進めることができる。しかも、そのような人工的な脳の進化を電子のスピードで、かつ、異なる条件で並列にシミュレーションできる。多種多様な人工脳を増殖、進化させることができるということになる。

多種多様な人工脳を情報インフラによって相互にネットワーク化することによって人工脳の社会をつくることも可能となろう。ミンスキーの「心の社会 (Society of Mind)」²⁰⁾のように、ネットワーク化された複数の人工脳によって、一つの社



(a) 2次元形状の入力画面と創り出された人工生物の例 (3次元表示)



(b) 自プール中に投影された人工生物は、人の手の動きに反応し、泳ぎ、捕食し、成長し、あるいは交配して新しい形の生物を生み出す

図-6 A-Volve

会脳が構築できるかもしれない。これらはいまだお話しに過ぎないが、人工脳は、生体の脳が生体であるがために課されている限界を打ち破る、大きな可能性を秘めている。

5.4 人の“自己表現”欲を助長・支援するコミュニケーションの創造に向けて

人は、“自己表現したい”という欲求を持ち創造することに喜びを感じ、そしてまたそれを認められることにも喜びを感じる。特別の技術もスキルも持たない普通の人が、ごく日常的なインタフェースを介して、自らの内部状態に依存した映像表現や音楽表現ができる。そのようなことが案外容易なのではないかと予感させてくれたのが、インタラクティブCGアートと人工生命とを組み合わせさせたC.SommererとL.Mignonneauらの作品である²¹⁾。A-Volveでは簡単な2次元形状を入力すると3次元化された人工生物が水中に出現し、人の手の動きに反応し、他の生物と交配して子孫



(a) スクリーンの前に置かれた実際の植物に手を近付けたり触れたりするとスクリーン上に植物が成長する



(b) 成長した植物の例

図-7 Interactive Plant Growing

を残す(図-6参照)。Plant Growingでは、人が実際の植物に手を近付けたり触れたりするとスクリーン上に植物が成長する(図-7参照)。CGとしての植物も生物も彼ら芸術家の感性に基づきコンピュータが創り出す。従って、作品としても素晴らしい映像が出現する。しかし、何がどのように創り出されるかはその時点のその人の状態に依存するという意味で、人の自己表現支援システムと捉えることができる。

これらはシステムやコンピュータの創り出す自律性や創造性と人がごく日常的な関わりを持つことによって可能となるコミュニケーションの一つの形でもある。ごく普通の人々が気軽にかつ気楽に映像や音楽を創造し、それらを身近な人々との間で交換する、そのようなコミュニティに根ざしたコミュニケーションの世界が生まれるだろう。芸術性に富み質の高い映像や音楽でしかもその人独自の自己表現を支援し、コミュニティ間でのコ

コミュニケーションを活性化するところにはやりのマルチメディア・ネットワークの意義と進むべき方向を見い出すことができる。

6. おわりに

人工生命のコレクショニズムと進化的方法論とを融合した概念的な枠組みとして生命論パラダイムの考え方を紹介した。生物の適応戦略をモデル化しそれらを集団系で考え、しかも、最適化ではなく集団系のもつ冗長性を生かして何ができるかを考えようとする。そのような生命論パラダイムに基づく情報処理の最も大きな特長は自律性や創造性といった機能の実現がソフトウェア/ハードウェア双方で可能となることである。そのような視点から研究事例を紹介し今後の展開方向を大きな気持ちで展望した。

参考文献

- 1) Turkle, S. : The Second Self - Computers and Human Spirit, Simon and Schuster, 360 p., New York (1984).
- 2) Shimohara, K. : Evolutionary Systems for Brain Communications - Towards an Artificial Brain -, Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, MIT Press, pp.3-7 (1994).
- 3) 下原勝憲：脳コミュニケーションの進化-進化システムとしての人工脳を目指して、柴田崇徳・福田敏男編著「人工生命の近未来」, 時事通信社, pp.43-68 (1994).
- 4) Langton, C. G., Tayler, C., Doyne, J. and Rasmussen, F.S. (eds.) : Artificial Life II, Addison Wesley, 854 p. Redwood City (1992).
- 5) Ray, T. : An Approach to the Synthesis of Life. In C. G. Langton, C. Tayler, J. Doyne Farmer, Steen Rasmussen (eds.) : Artificial Life II, Addison Wesley, pp.371-408 (1992).
- 6) 下原勝憲：人工生態系ティエラ, 画層ラボ, Vol. 5, No. 9 (1994).
- 7) Koza, J. : Genetic Programming, MIT Press, 819 p., Cambridge (1992).
- 8) Koza, J. : Genetic Programming II, MIT Press, 819 p., Cambridge (1994).
- 9) Sims, K. : Evolving Virtual Creatures, Proc. of SIGGRAPH'94, pp.15-22 (1994).
- 10) Sims, K. : Evolving 3D Morphology and Behavior by Compection, Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, MIT Press, pp.28-39 (1994).
- 11) Hemmi, H., Mizoguchi, J. and Shimohara, K. : Development and Evolution of Hardware Behavior, Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, MIT Press, pp.371-376 (1994).
- 12) Mizoguchi, J., Hemmi, H. and Shimohara, K. : Production Genetic Algorithms for Automated Hardware Design through an Evolutionary Process, IEEE Conf. on Evolutionary Computation, Vol. II, pp.661-664 (1994).
- 13) 邊見 均, 溝口潤一, 下原勝憲：HDLプログラムの自動生成と生物のかたちづくり, 第6回自律分散システム・シンポジウム, 計測自動制御学会, pp.201-204 (1995).
- 14) Prusinkiewicz, P. and Lindenmayer, A. : The Algorithmic Beauty of Plants, Springer-Verlag, 228p., New York (1990).
- 15) de Garis, H. : An Artificial Brain - ATR's CAM-Brain Project Aims to Build/Evolve an Artificial Brain with a Million Neural Net Modules Inside a Trillion Cell Cellular Automata Machine, New Generation Computing, OHMSHA. LTD and Springer-Verlag, 12, pp.215-221 (1994).
- 16) フーゴ・デガリス, 邊見 均：CAM-Brain：進化する人工脳, Computer Today, Vol.62, No.7, pp.62-66 (1994).
- 17) Higuchi, T. et al. : Evolvable Hardware - Genetic based Generation of Electric Circuitry at Gate and Hardware Description Language (HDL) Levels, ETL Tech. Report, 93-4 (1993).
- 18) Marchal, P. : Embryological Development on Silicon, Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, MIT Press, pp.365-370 (1994).
- 19) Ray, T. : A Proposal to Create a Network-Wide Biodiversity Reserve For Digital Organisms, ATR Technical Report, TR-H-133 (1995).
- 20) マーヴィン・ミンスキー, 安西祐一郎訳：心の社会, 産業図書, 574 p., 東京 (1990).
- 21) Sommerer, C. and Mignonneau, L. : A-Volve & Interactive Plant Growing, 作品紹介用のリーフレット (1994), 問合せ先：NTT-ICC 推進室または katsu@hip.atr.co.jp.

(平成7年2月14日受付)



下原 勝憲

1952年生。1976年九州大学工学部情報工学科卒業。1978年同大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社横須賀電気通信研究所入所。1986～87年MITメディア研究所客員研究員。NTTヒューマンインタフェース研究所主幹研究員を経て、1992年ATR視聴覚機構研究所認知機構研究室長。1993年ATR人間情報通信研究所第六研究室（進化システム研究室）室長、現在に至る。1995年よりNTTヒューマンインタフェース研究所映像処理研究部映像言語研究グループ・リーダーを兼任。脳コミュニケーションのための進化システムの研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 神経回路学会等各会員。