人工生命(II)

—情報処理への応用と展望—

下原 勝 憲[†]

1. ま え が き

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，というのが人工生命元来の主張である¹⁾。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²⁾。

人工生命(ALife)あるいはその方法論としての進化的計算論(Evolutionary Computation)，創発的計算論(Emergent Computation)は，いまだ揺籃期にあるとはいえ，人工知能やニューラルネットに代わる新しい情報処理パラダイムとして注目を集めつつある。ここでは，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合せ，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。

では，一体どのような情報処理が新たに可能となるのだろう。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)³⁾”的存在といってもよい。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”の創出が人工生命研究のひとつの目標である⁴⁾。具体的には，自発的/相互依存的に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すことになる。

本稿では，創発と進化をキーワードに，新しい“私たち”の情報処理の創出を目指す人工生命の研究の動向を紹介するとともに，その意義と展開の可能性を中心に大きな気持で展望してみたい。

2. 新しい情報処理パラダイムとしての人工生命

2.1 集団的な情報処理パラダイム

「人工生命(I)基礎理論とその構築の枠組み」で解説されたように，複雑適応系および人工生命に共通する基本思想がコレクショニズムである(図1)。コレクショニズムは，構成要素間の局所的な相互作用を通

図1 人工生命の基本思想：コレクショニズム

[†] NTT ヒューマンインタフェース研究所/ATR 人間情報通信研究所

“Challenge to Complexity; (11) Artificial Life (II) — Applications and Perspectives for Information Processing” by Katsunori Shimohara (NTT Human Interface Labs., Yokosuka /ATR Human Information Processing Research Labs., Kyoto)

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(ミクロレベル→マクロレベル)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る舞いや相互作用に影響を与え変化をもたらすというトップダウン(マクロレベル→ミクロレベル)との双方向の機構を特徴とする。まず、システムを構成する要素の集団と、要素どうし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。その仕掛けは、複雑適応系では非線形非平衡な開放系としてモデル化され、情報処理では自発的あるいは相互依存的に変化を生成する進化的な機構としてモデル化される場合が一般的である(2.2節参照)。

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。

(1) 集中制御から並列分散制御へ

システムとしての振る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どうしの局所的な相互作用から創発する。

(2) 最適設計から集団の冗長設計へ

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。

(3) 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ひとつのシステムと見るとき、生命体の生物学的適応戦略の一般的概念は図2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

図2 生物学的適応戦略の一般的概念

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、一世代の循環が出来上がる。自然淘汰や遺伝子変異はそれらが個体に起こ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2に示すように時間軸上に整理することができる。それらの適応戦略の一部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、生物学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合せたりできる。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、人工生命に基づく情報処理では、生物学的な適応/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、ある解を算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。

進化とは、ある目的に向けて前進していく進歩と違って、いわば目的のない変化である。変化がプラスに作用するのか、あるいはマイナスに作用するのかは、

その変化によって創り出された表現型がいかに環境に適合できるかによって淘汰される。したがって、現象としての進化とは、自己複製を主たる目的とするプログラム(遺伝情報)が書き換えられ(すなわち、変化しつつ)他より自己複製能力に優れたものが選ばれてきたプロセスである。しかし、三十数億年という時間を要したとはいえ、単一細胞から、六十兆もの細胞から成り、かつ、それらが有機的に機能するシステムとしての人までを創り出したのが進化である。すなわち、創造的な方法論として進化に優るものはないといっても過言ではない。人工生命や進化的方法論も、エンジニアリング的な視点からは、進化のプロセスを工学的な方法論として構築するためのアプローチと捉えてもよい。

進化システム/コンピュータとは、自発的あるいは相互依存的に変化を生成する機構を持ち、その変化を利用してソフトウェア的に自ら新しい機能を創り出すのみならず、ハードウェア的にも構造を自律的に造り換えていく自己組織化機構を持ったシステム/コンピュータである。その基本となる技術がソフトウェア進化とハードウェア進化である。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。

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⁾。彼は、1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、プログラムどうしが有限のCPU タイムとメモリー空間をめぐる。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3参照(113 ページに掲載))。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、プログ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、

- (1) (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。
- (2) 集団系を構成する要素(この場合はプログラ

ム)どうしに相互作用がある。

- (3) 共通リソースとしての環境そのものも動的に変化する。

などの仕掛けを持つことが上げられる。

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⁹⁾。

例えば、K. Sims は、彼の Artificial Evolution において方向グラフを遺伝情報とし、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持ち、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⁷⁾。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持った仮想生物が生み出された(図4参照)。また、創り出された生物どうし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、仮想生物どうしの共進化の例も紹介した。

また、大橋らは、生命とは「創造」と「解体」との統一体であるとの視点から、フォン・ノイマンの自己増殖オートマタに自己解体を導入した自己解体モデルを提案し、その検証のためのシミュレータ(SIVA-3: Simulator for Individuals of Virtual Automata-3)を構築した⁸⁾⁹⁾。SIVA-3において、環境は4種類の有限の仮想物質から構成され、それらの分布は均一にも不均一にも個別に設定できる。生命にとって物質と情報はお互い等価であるとの前提から、人工生命体の体構造と生命的プロセスを制御する情報構造の両方が環境を構成する物質を用いて構築される。したがって、個体間の自然淘汰的な相互作用のみならず、人工生命体と環境との物質循環的な相互作用をモデル化している点で極めて画期的である。自己解体モデルは進化を加速するなど興味深い結果も得られつつあり、今後の研究展開が大いに期待される。

さらに、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¹⁰⁾。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

[K. Sims: Evolving Virtual Creatures, Computer Graphics Proceedings, 1994]

図 4 「泳ぐ」仮想生物の例

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ックス(CG)分野で植物の成長をモデル化する方法のひとつである。リンデンマイヤ・システム¹¹⁾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、今後の応用展開が期待される。

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。したがって、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、例えば、セルオートマトンや FPGA(Field Programmable Gate Array)など、素子結線や組合せが再構築可能な構造を持つハードウェア

図 5 ハードウェア進化の基本的枠組み

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を図 5 に示す。情報群から各情報に依存した構造を持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、ひ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を発生・成長・進化させることを提案している¹²⁾。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、ニューラルネットがハードウェアとして出来上がる(図 6(114 ページに掲載))。つまり、そのような状態遷移を実行するルールを持ったハードウェア 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 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¹³⁾。また、先ほど紹介した邊見らも FPGA を前提とし、CAD システムと組合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¹⁴⁾。また、A. Thomson らは FPGA を使って移動ロボットの制御回路を実際に進化させることに成功している¹⁵⁾。

第1回進化ハードウェアに関するワークショップが1995年10月にスイスで、さらに、第2回のワークショップ(Int. Conf. on Evolvable Systems: ICES)が今年1996年10月、つくばで開催されるなど、進化ハードウェアの研究は今後ますます活発化するものと予想される。

5. 人工生命に基づく情報処理の意義と展望

ここでは、人工生命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例えると、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。したがって、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出来上がるハードウェア構造が異なる。
- (2) したがって、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いわれながらも、今世紀末には 10^{10} ~ 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、それを可能に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いわれている。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いえよう。

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える。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する。ハードウェア進化の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ズアップされる。

コミュニケーションのひとつの意義は、自律的に情報を生成/創造できる存在(つまり生き物)どうしが、出会いの意外性、筋書きのないドラマなどといわれるように、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どうし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・進化するができる。そのようなネットワークエージェントは、人工生命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、今年1996年7月に、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開始した¹⁶⁾。多くの人々が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 タイムとメモリー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。コンピュータどうしが光で結ばれる時代を想定すれば、夜間、地球の裏側のコンピュータが表側の処理を実行することなどむしろ当然ともいえるし、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、全地球規模で動的かつ自律的な処理能力の配分を可能とするひと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⁴⁾

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いたかのように死ぬ。それでも百数十億ともい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わた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。ひとつは、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!したがって、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)」¹⁷⁾のように、ネットワーク化された複数の人工脳によって、ひとつの社会脳が構築できるかもしれない。これらはまだお話に過ぎないが、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。

6. む す び

創発と進化をキーワードとする、新しい情報処理パラダイムとしての人工生命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持つ冗長性を生かして何ができるかを考えようとする。そのような人工生命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) C. G. Langton, C. Tayler, J. D. Farmer, and S. Rasmussen (eds.): "Artificial Life II", p. 854, Addison Wesley, Redwood City (1992)
- 2) 上田完次, 下原勝憲, 伊庭斉志編著: "人工生命の方法", p. 323, 工業調査会, (1995)
- 3) S. Turkle: "The Second Self — Computers and Human Spirit", p. 360, Simon and Schuster, New York (1984)
- 4) K. Shimohara: "Evolutionary Systems for Brain Communications — Towards an artificial Brain—" In R. Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, pp. 3-7, MIT Press (1994)
- 5) T. Ray: "An Approach to the Synthesis of Life", In C. G. Langton, C. Tayler, J.D. Farmer, and S. Rasmussen (eds.): "Artificial Life II", pp. 371-408, Addison Wesley (1992)
- 6) J. Koza: "Genetic Programming", p. 819, MIT Press, Cambridge (1992)
- 7) K. Sims: "Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition", In R. Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, pp. 28-39, MIT Press (1994)
- 8) 大橋 力, 中田大介, 菊田 隆, 村上和雄: "プログラムされた自己解体モデル", 科学基礎論研究, 18, 2, pp. 79-87 (1987)
- 9) T. Oohashi, H. Sayama, O. Ueno, and T. Maekawa: "Artificial Life Based on Programmed Self-Decomposi-

- tion Model”, ATR Technical Report, TR-H-198 (1996)
- 10) H. Hemmi, J. Mizoguchi and K. Shimohara: “Development and Evolution of Hardware Behavior”, In E. Sanchez and M. Tomassini (eds.), Towards Evolvable Hardware, pp. 250-265, Springer, (1996)
 - 11) Premyslaw Prusinkiewicz and Aristid Lindenmayer: “The Algorithmic Beauty of Plants”, p. 228, Springer-Verlag, New York (1990)
 - 12) H. de Garis: “CAM-Brain”, E. Sanchez and M. Tomassini (eds.), Towards Evolvable Hardware, pp. 76-98, Springer (1996)
 - 13) T. Higuchi, et al: “Evolvable Hardware and Its Application to Pattern Recognition and Fault-Tolerant Systems”, E. Sanchez and M. Tomassini (eds.), Towards Evolvable Hardware, pp. 118-135, Springer (1996)
 - 14) P. Marchal: “Embryological Development on Silicon”, In R. Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, pp. 365-370, MIT Press (1994)
 - 15) A. Thompson: “Evolving Electronic Robot Controllers that Exploit Hardware Resources”, Proc. of 3rd European Conf. on Artificial Life (ECAL 95), pp. 640-656, Springer-Verlag (1995)
 - 16) T. Ray: “A poposal to Create a Network-Wide

Biodiversity Reserve For Digital Organisms”, ATR Technical Report, TR-H-133 (1995)

- 17) マーヴィン・ミンスキー, 安西祐一郎訳: 心の社会, p. 574, 産業図書, 東京(1990)

しもはら かつのり
下原 勝憲 1976年, 九州大学工学部情報工学科卒業。1978年, 九州大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年, NTT 横須賀電気通信研究所入所。1986年~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, (株)ATR 視聴覚機構研究所認知機構研究室長。1993年, (株)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。1995年, NTT ヒューマンインタフェース研究所映像処理部グループリーダー。以来, NTT およびATR 両研究所において, 脳コミュニケーションのための進化システムの研究や創発的映像生成の研究に復従事。NTT/ATR 進化システム研究室長(現職)。

図 3 Tierra のイメージ図 (上段：罇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．下段：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 6 ニューラルネットの発生/成長のシミュレーション (小さな四角1個がセル、背景全体がCAM 基盤、青色/赤色の四角が各々抑制性/興奮性のニューロン、各ニューロンは樹状突起と軸索に相当する枝を伸ばし、それらが出会ったところにシナプスを形成する)