

人工生命：新しい情報処理パラダイム

A T R 人間情報通信研究所／
N T T ヒューマンインタフェース研究所
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動きである。

ここでは、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で展望してみたい。

2. 生命論パラダイム

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とを融合した、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¹⁾⁷⁾

人工生命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る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ひと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のように表わすことができる。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。

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既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。最適化問題への適用のようにある解を導出するという視点ではなく、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。

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だすこと、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^{[1][2]}。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、

- （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^{[3][4]}。

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だした^{[5][6]}。方向グラフはブロック状の構成要素を表わ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彩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、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^{[7][8]}。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リンデンマイヤ・システム^[9]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、例えば、セル・オートマトンやFPGA (Field Programmable Gate Array) など、それらの結線や組み合わ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。

ハードウェア進化の基本的枠組みを図4に示す。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を発生・成長・進化させることを提案している^{[10][11]}。セルオートマトンは周囲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、ニューラルネットがハードウェアとして出来上がる (図5)。

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^[12]。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^[13]。

5. 今後の展望

■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だし、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、(1) 種は同じでも畑が違ふとできあがるハードウェア構造が異なる。(2) (1)より、畑は均一性を要求されず、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、構造欠陥やエラーあるいは動的なノイズやエラーについても情報の変化で吸収できる、といった特徴を持つ。

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大前提がある。ハード側の製造技術の進展は著しく、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。しかし、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、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状況にある。

ハードウェア進化の考え方は、ハード（物質）系とソフト（情報）系との関係に発想の転換をもたらす。つまり、ハード側は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。ソフト側はその代わりに冗長に使える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。

■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）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。そのようなネットワーク・エージェントは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。

■進化システムとしての人工脳を目指して^{[14][15]}

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、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。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。

■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¹¹⁶⁾

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々が、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たC. Sommerer とL. Mignonneau らの作品である。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)。

これらはシステムやコンピュータの創りだ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ひとつの形でもある。ごく普通の人々が気軽にかつ気楽に芸術性に富み質の高い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マルチメディア・コミュニケーションの世界が生まれるだろう。

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] T. Ray : 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).
- [2] 下原勝憲：人工生態系ティエラ，画層ラボ，Vol. 5, No. 9 (1994).
- [3] J. Koza : Genetic Programming, MIT Press, 819 p., Cambridge (1992).

- [4] J. Koza : Genetic Programming II, MIT Press, 819 p., Cambridge (1994).
- [5] K. Sims : Evolving Virtual Creatures, Proc. of SIGGRAPH'94, pp.15-22 (1994).
- [6] K. Sims : Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition, Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, MIT Press, pp.28-39 (1994).
- [7] H. Hemmi, J. Mizoguchi and K. Shimohara : Development and evolution of hardware behavior, Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, MIT Press, pp.371-376 (1994).
- [8] 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).
- [9] Premyslaw Prusinkiewicz and Aristid Lindenmayer : The Algorithmic Beauty of Plants, Springer-Verlag, 228p., New York (1990).
- [10] H. de Garis : 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).
- [11] 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).
- [12] T. Higuchi et al. : Evolvable hardware---genetic based generation of electric circuitry at gate and hardware description language (HDL) levels, ETL Tech. Report, 93-4 (1993).
- [13] P. Marchal : Embryological Development on Silicon, Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, MIT Press, pp.365-370 (1994).
- [14] K. Shimohara : Evolutionary Systems for Brain Communications ---Towards an artificial Brain---, Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, MIT Press, pp.3-7 (1994).
- [15] 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).
- [16] 下原勝憲 : 感性と理性を結ぶ人工生命 --- 自律性と創造性に富むコンピューターへの挑戦 ---, 「感性・人間・コンピューター」, 富士通ブックス, pp.9-46 (1995).
- [17] 上田完次, 下原勝憲, 伊庭斉志編著 : 財団法人日本情報処理開発協会監修「人工生命の方法」, 工業調査会 (1995).

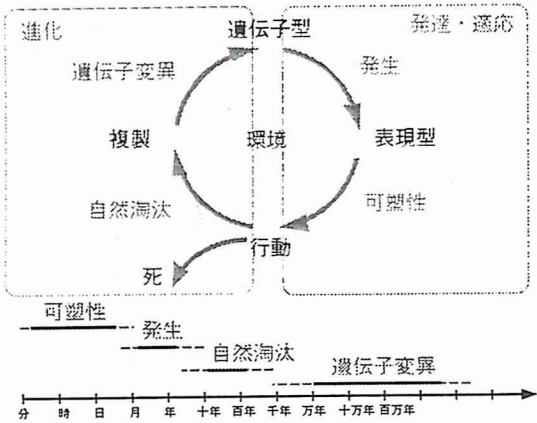
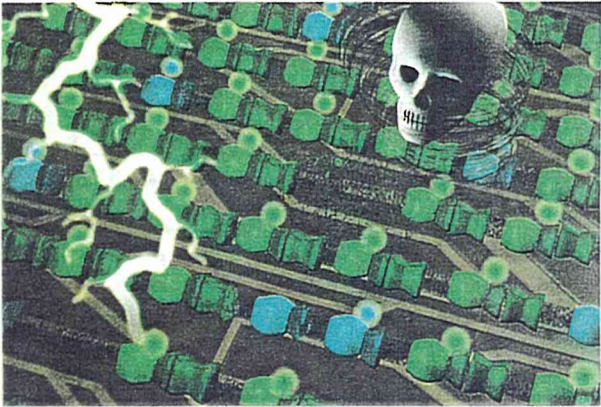
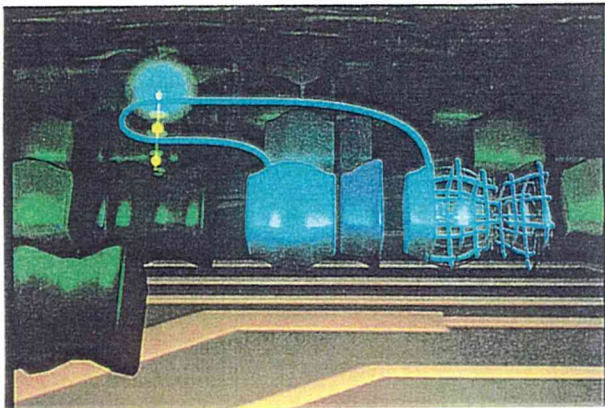


図-1 生物的適応戦略の一般的概念



(a) 獨棲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

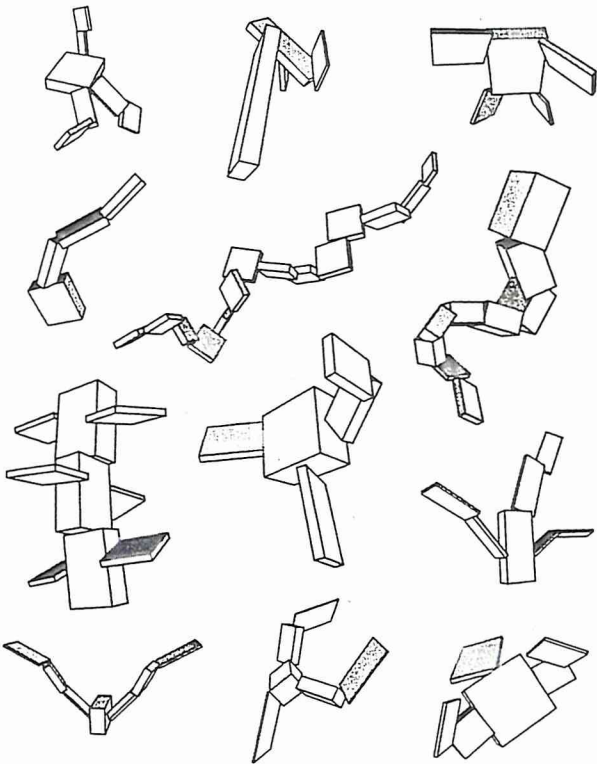


図-3 「泳ぐ」仮想生物の例⁽¹⁰⁾

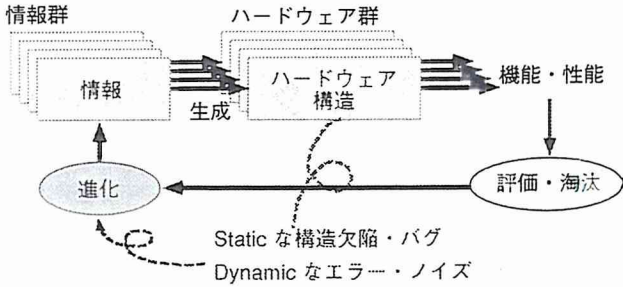


図-4 ハードウェア進化の基本的枠組み

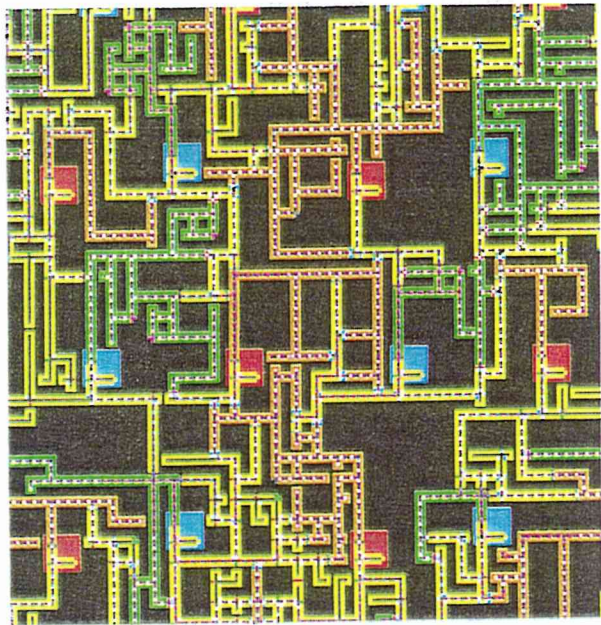
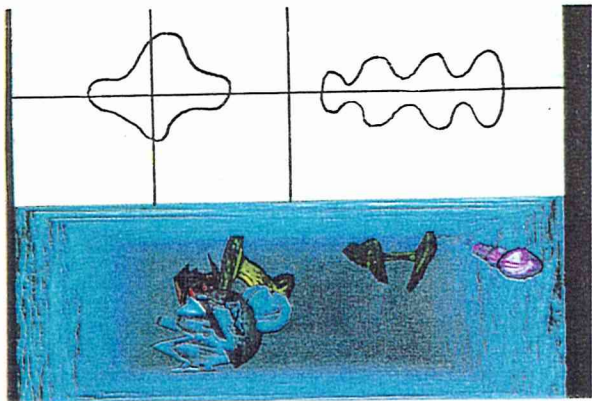


図 - 5 ニューラルネットの発生・成長シミュレーション：小さな四角が1個のセル，背景全体がCAM 基盤，大きな青色／赤色四角が各々抑制性／興奮性ニューロン．ニューロンは樹状突起（黄）と軸索（緑・橙）に相当する枝を伸ばし，それらが出合ったところにシナプスを形成する．



(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



(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