

進化する成長システムのシミュレーション

畝 見 達 夫*

ABSTRACT This paper introduces an approach to simulate evolutionary process of growth system in biological organisms. It is not from a position of traditional biology but a new methodology to understand life through synthesis, namely Artificial Life. A simplified growth model of multicellular plant in 2D and 3D Euclidean space is proposed where the size and shape of each cell is unique and fixed. Rules of growth are encoded as gene on the chromosome in each cell, and it evolves through a Genetic Algorithm. Computer simulation of three different cases are described, predefined fitness function on 2D space, ecological fitness function on 2D space, and predefined fitness function on 3D space.

1. はじめに

我々人間を始めとする多くの動物も、サクラやイネなどの植物も、その体は多くの細胞の集まりからなる。いずれの場合も、最初はひとつの細胞であった受精卵が分裂と膨張と死滅を繰り返した結果、様々な形態に成長する。どのような体で成長するかは、細胞内に含まれる遺伝情報と周囲の環境条件によって決定される。形の違いは遺伝子と、成長時の環境の違いによるものである。

細胞は分裂によって増えるが、その時、細胞に含まれる遺伝子は複写され、新たな細胞には分裂前と同じ遺伝情報が引き継がれる。つまり、体を構成するひとつひとつの細胞は、どれもほぼ同じ遺伝子を持っている。にもかかわらず、内臓、皮膚、骨、といったさまざまな組織ができあがるのは、それぞれの細胞が自己の内部状態と周囲の状況から、次の成長の方法を決めているからである。状態とは、具体的には様々な化学物質の濃度や、重力や圧力などの物理的な条件などである。生物学研究の大部分は、この物質の面からの生命現象の解明に力を注いでいる。しかし、人工生命研究では、物質よりも抽象化されたシステムとしての生物のモデルを考え、シミュレーションを試みる。物質を追いかけている生物学者の側から見ると、人工生命のシミュレーションは、おそらく、過度に抽象化されたものに見えるだろう。実際に生物が使う物質の働き

は極めて複雑かつ巧妙で、現在のコンピュータでシミュレートできるような代物ではない。しかし、システムとして生物を見ると、細かな物質の働きを捨象して、本質と思える情報だけを取り出すことが重要となる。これが、物質ではなく情報の側からの生物の理解に継る接近方法なのである。発達の形式モデルとしてはL-systemが有名であり、主に植物の成長過程のモデルとしてCGにも多く応用されている。(たとえば1))また、セル構造オートマトン(たとえば2))も発達システムのモデルの1つと見ることができる。

生物は、環境に対する適応度に応じて自然選択にかけられ、子孫を残す際に、突然変異と交配によって少しずつ遺伝子を変えることにより、多様な生態系へと進化をとげたものと考えられる。発達の形式モデルにおける状態遷移規則を遺伝子としてコーディングし、発現形態に対し定義される適応度に従って進化させる。以下では筆者が人工生命研究の一貫として行なった進化する発達システムのシミュレーションについて解説する。

2. 成長の物理モデル

個体の成長の場合は2次元あるいは3次元のユークリッド空間である。ここで紹介するモデルの細胞はすべて一定の大きさの円あるいは球であり他と重なることもないし、移動することもない。実際の生物の細胞は、大きさも形も様々で、自由に移動するものもあれば、隣接する細胞と接着されているものもある。また、変形もする。これらの物理的性質をすべてシミュレートすることが、現実の生物を理解する上で重要であることは確かだが、まず、第一段階として、このよ

Simulating Evolution of a Simple Growth System. By Tatsuo Unemi (Dept. of Information Systems Science, Faculty of Engineering, Soka Univ.)

*創価大学工学部情報システム学科

うな単純なモデルから出発することにした。

多くのセル構造オートマトンで用いられるような矩形に区切られたチェス盤世界に比べれば、連続なユークリッド空間とただけでも、大きな変革と見ていただきたい。ユークリッド空間上の近傍領域を効率良く探索するために、データの管理方法について以下のような工夫を施した。

2次元の場合について説明する。新たな細胞が生まれようとする時、既にその場所に他の細胞があれば衝突を起ることになる。次節で述べるように、この成長モデルでは他の細胞と衝突する可能性がある場合には成長できないものとしている。これを実現するには新たな細胞を生み出す度に、既存の細胞との衝突の有無を確認しなければならない。細胞はすべて円形であるから、既存の細胞の中心と新たに作ろうとする細胞の中心の間の距離が、それぞれの半径の和より小さければ衝突が起きることになる。しかし、既存のすべての細胞について距離を計算していたのでは細胞数に比例した計算時間が必要となる。もし、個体が平面を埋め尽くすように成長すると、1つの分裂のステップに生み出される新しい細胞の数は成長開始からのステップ数に比例して増加し、その結果、個体に含まれる細胞の数は時間の2乗に比例することになるから、1つの分裂のステップでの衝突の確認にかかる計算時間は、ステップ数の3乗に比例することになる。成長の場合が3次元の場合には4乗に比例する。

このような計算時間の増加を抑制するために、空間を格子状に区切り、各区画に要素を対応させた配列を用意して、区画に入る細胞のリストを該当する配列要素に格納するという方法を採用した。図1にその概念図を示す。

新たな細胞が生まれた場合には、その中心座標から所属する区画を計算し、リストに追加する。死滅した場合にはリストから削除する。衝突の有無を確認する

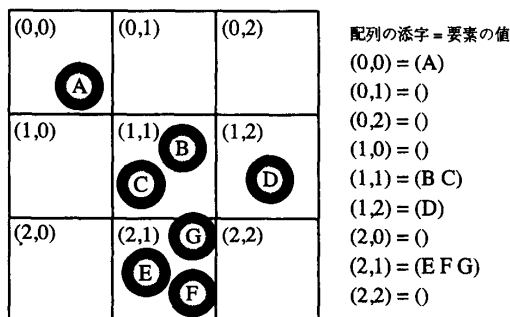


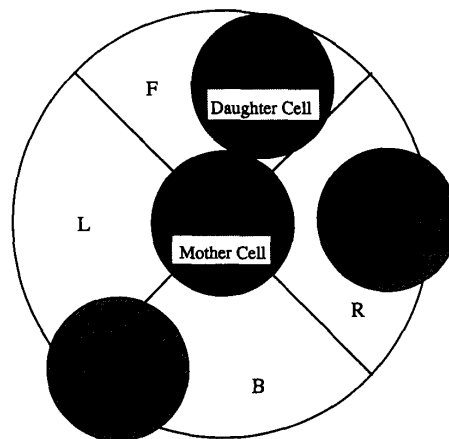
図1 配列を用いた位置による細胞の分類

には、細胞の最大半径と新たに生まれようとする細胞の半径の和の範囲内にかかる区画だけを調べれば良い。区画を小さくすればするほど、調べるべき細胞の個数は減るが、区画の数に比例した記憶が必要となり、また、一度に調べるべき区画の数が増すため、必ずしも区画が小さい方が良いわけではない。以下で述べるシミュレーションでは、細胞の半径を一定にしているため、区画の大きさを記憶容量の範囲内で、細胞の直径を少し越える大きさを取るようになっている。

3. 成長のアルゴリズム

当モデルでは、細胞は分裂と膨張により増えるのではなく、既存の細胞が隣接する子細胞を作り出すことによって増殖する。1つの計算ステップに各々の細胞が1つの子細胞を作ろうとする。

子細胞の位置と状態は、(1)細胞自身の内部状態、(2)隣接する領域にある他の細胞の配置、(3)遺伝子、の3つの情報から決定される。各計算ステップにおいて、個々の細胞はあらかじめ決められた9通りの状態のうちの1つを自身の状態とする。このうちの8状態は、増殖状態で、残りの1つは停止状態である。停止状態にある細胞は子細胞も作らないし、自身の状態を変えることもない。増殖状態にある細胞は、図2のように、隣接領域を前後左右の4領域に分割し、それぞれの領域に他の細胞の中心が含まれるかどうかを観察する。各細胞には向きがあり、前後左右は個々の細胞自身を中心とする相対的な位置である。1つでも含まれていれば1、1つも含まれていなければ0とし、4領域を合わせて4ビットの数とする。つまり、周囲の状態



環境 : FLBR = 0011₂ = 3

図2 細胞分裂のプロセス

は $2^4=16$ とおりある。遺伝子は、増殖状態8とおりと周囲の状態16とおりの組合せ、つまり $8 \times 16=128$ とおりの場合について、子細胞の位置と初期状態を決める整数を引き出す「表」の形式をとる。つまり、図3のように、状態によって表の位置を決め、その項目に書いてある整数値を引き出す。1つの整数は、位置を決める相対角度に8ビット、初期状態4ビット、次の時刻ステップにおける自身の状態4ビットからなる。つまり有効な情報は合計で $(8+4+4) \times 128=2048$ ビットである。また、状態も4ビットの整数の内0から7までを増殖状態、8から15までを停止状態とする。このような冗長な遺伝子表現は、プログラミング上の都合もあるが、同時に、次に述べる遺伝操作に大きな影響を与えるものである。

図2にあるように、子細胞は親細胞に後ろを向けて接した状態になるものとする。ただし、作ろうとした子細胞が、既存の他の細胞と領域的に重なる場合には、子細胞を作らない。

以上のようなアルゴリズムに従うと、様々な形態を生成することができる。具体例は次節以降を参照されたい。以下では3種類の設定でのシミュレーションについて紹介する。

4. 形態進化のアルゴリズム

個体の形態の進化を見るため、成長過程での個体間の相互作用がない状況を設定した。つまり、それぞれの個体は1つの細胞から、他の個体からの干渉は一切受けずに成長する。進化は一般的な遺伝的アルゴリズム³⁾と同様に、つぎのような手順に従う。

1. 初期集団である N の遺伝子を乱数で初期化する。
2. 個体毎に成長させ、表現型を作り、その適応度を計算する。

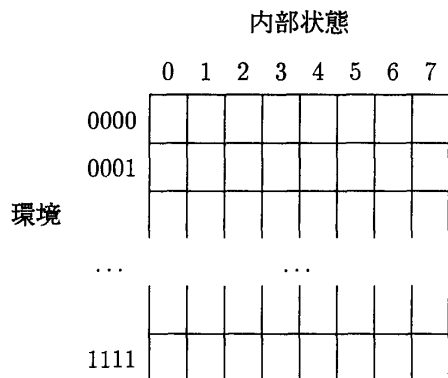


図3 染色体の形式

3. 適応度に応じて遺伝操作を行ない、次の世代の遺伝子集団を作る。
4. 2へもどる。

遺伝操作は、つぎのようなものである。

1. 集団の中で適応度の高い方から1/3はそのまま残す。
2. 次に適応度の高い1/3の個体を、それ自身と、適応度の高い方から1/3の個体との交叉結果で置き換える。
3. 適応度の低い方から1/3の個体を、高い方から1/3の個体のそれぞれを突然変異させたもので置き換える。

図4に1世代交代における操作の概念図を示す。これは、ある意味では極端なエリート主義戦略と見ることもできる。

ここで用いた適応度は「40ステップ以内に成長が停止した個体のうち、細胞数の多い方が適応度が高い」というものである。成長が停止しなかった個体には、全て一律に低い適応度を割り当てる。このような適応度評価を用いた結果、一般には巻貝のような形が発生した。個体の成長が停止するには、個体に含まれるすべての細胞が分裂不可能な状態にならなければならず、そのためには停止状態となるか、あるいは子細胞と衝突する位置に既存の細胞が存在する必要がある。内部状態の半分を停止状態とした理由は、ランダムに遺伝子を生成した場合に停止状態となる確率を1/2程度にするためである。増殖状態となった細胞も次のステップでは1/2の確率で停止状態となる。この確率が大きすぎると細胞の数がなかなか増えない。逆に小さすぎると成長が停止せずに発散してしまう。細胞数を増やし、かつ成長を停止させる1つの戦略は、停止状態ではなく、渦巻を形成し衝突により成長を止めることである。巻貝のような形は、この戦略を実現した結果である。

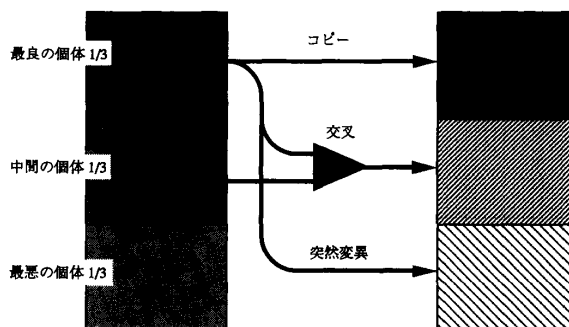


図4 1世代交代における操作の概念図

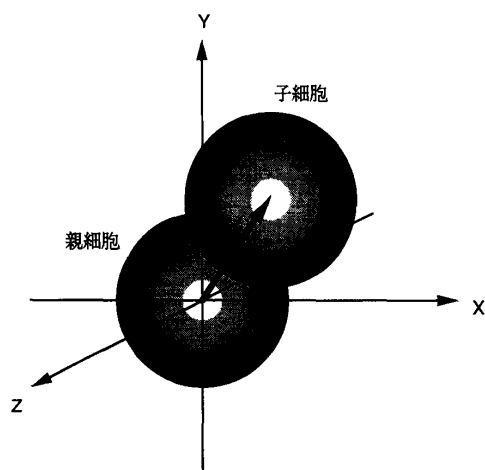


図5 3次元における親細胞と子細胞の位置関係

1世代当たりの成長のステップ数である40という数字は、試行錯誤の後に、計算時間、記憶容量、発生する形態の多様性などのバランスから経験的に決めたものである。ここでは、Sun SPARCStation 10/41やHP Apollo 9000 730などのエンジニアリングワークステーションを計算に用いたが、更に高速で大容量の計算機の利用が可能なら、ステップ数を大きくとることができる。計算時間はほぼ細胞数に比例するので、細胞が密な形態が発生する場合には、ステップが進むに比例して計算時間がかかることとなり、結果的に1世代当たりの計算時間は停止ステップの2乗に比例することとなる。つまり、2倍のステップ数のシミュレーションを同じ計算時間内で実行するには4倍程度の計算速度が必要となる。

図6に、シミュレーション結果の例を示す。非常に興味深い形態が発生する。シミュレーション結果に関する解析としては、系統樹、遺伝子頻度の変化、表現型の特徴に基づく分類、などが考えられるが、これらはすべて今後の課題である。

なお、このシミュレーションによる画像は、A-Life World「人工生命の美学」展⁴⁾にも参考出品された。

5. 生態系の試み—種で越冬する一年生植物

進化による複雑系の発生という「人工生命」らしいテーマについて考えるならば、前節で用いたような恣意的な適応度評価には、どこか無理があるように感じられる。実際の生物界に複雑化をもたらした要因の1つは、個体間の相互作用、つまり生態系の存在である。前節で紹介したシミュレーションでは、それぞれ

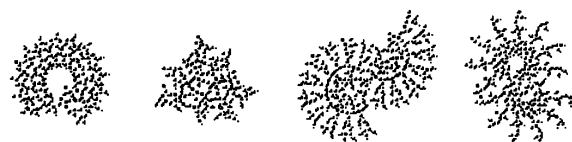


図6 2次元ユークリッド空間上の発達システム。進化の過程を経て発生した個体の例

の個体が独立に成長させたが、複数の個体を同じ空間上で成長させ、個体同士が衝突する可能性を持たせたらどうなるだろうか。

また、生物進化における適応度は、繁殖成功率によって決まる。つまり、いくつの子孫を残せたかによって適応度が決まるのであって、適応度によって子孫を残せる数か決まるのではない。繁殖成功率は、繁殖できる成体にまで成長できる確率と、1個の個体が一生の内に産める子孫の個体数で決まる。

ここでは一年生草本のような生物を考える。つまり、春、種から成長を始め、秋に種を残して枯れる。残された種は翌年の春に再び芽を出し成長をする。細胞の状態の種類として種状態を1つ追加し、種状態の細胞だけが冬を越すことができ、その他のすべての細胞は死滅することとする。ただし、個体の大きさ、すなわち、個体を構成する細胞の大きさに比例して、残せる種の個数に制約をつける。つまり、十分に成長できなかった個体は、いくら多くの種を作ったとしても、それら全てが発芽できるわけではない。また、突然変異は全ての細胞分裂ではなく種の生成のときにだけ起きる可能性があるものとする。この設定は、繁殖成功率に基づく自然選択のモデルとしても不自然ではない。

図7に実行例を示す。大きく成長できても、種が実らない個体は淘汰される。多数の同種の個体からなる群落の生成が観察できる。シミュレーション結果を観察して言えることは、繁殖力は、1個体が残せる種の数だけで決まるのではなく、いかに広い範囲に種を分散できるかという点にも強く依存するという点である。いくら多くの種を残せても、それらが元の種の付近に密集していたのでは、次の世代の個体が成長するための空間的余裕がなくなり、結局、繁殖力は弱くなる。現実の植物では枝を伸ばしたり、風や虫の力を借りて種を遠くへ飛ばす。動物では、個体が自ら移動することで居住領域を拡張する。人間が冒険を好み、未踏地の探険にあこがれを持つのも、こんなところから来ているのかもしれない。

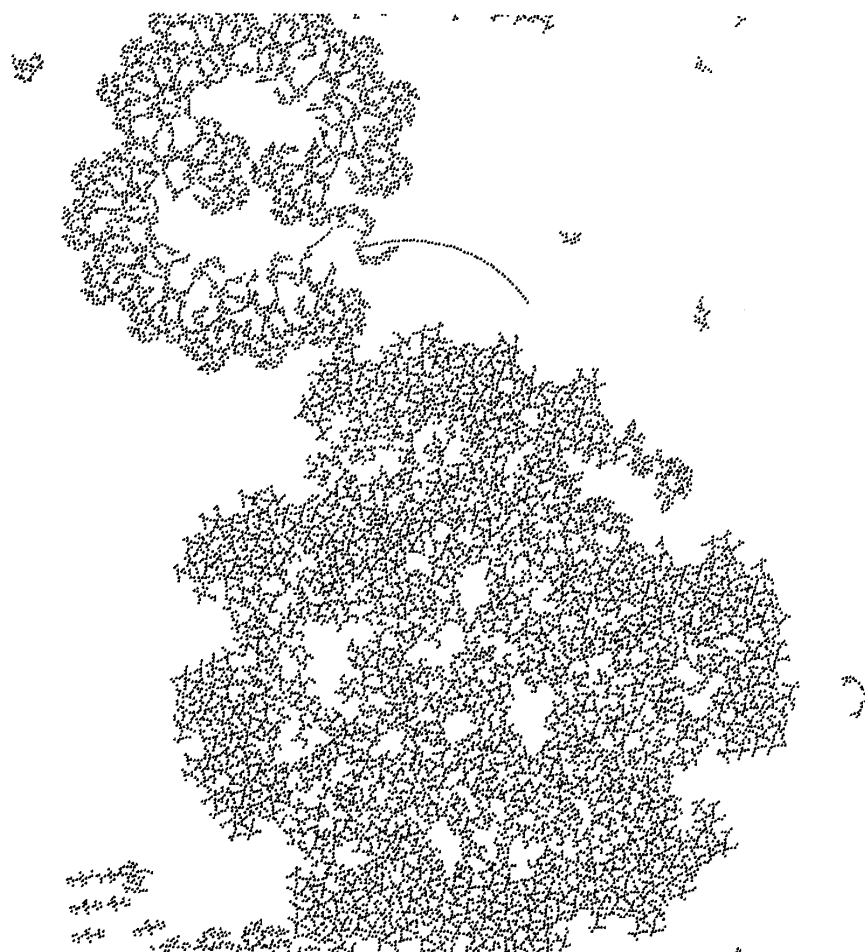


図7 種で越冬する発達システムの進化の例

6. 3次元への拡張

3節と4節で述べた手法を3次元に拡張する。細胞の形状は、2次元では円形であったが、3次元では半径一定の球体とする。隣接する他の細胞の存在を効率良く調べるために、空間を立方体の区画に区切り、2次元の場合と同様に、細胞の位置による分類を行なう。成長の方向は、3つの角度 α , β , γ によって決定する。 α と β によって、子細胞の位置を決め、 γ によって子細胞の姿勢を決める。2次元の場合と同様に、子細胞は親細胞に後ろを向けて接するものとするが、3次元の場合には、これだけでは姿勢は一意に決まらず、細胞の向きを表すベクトルを軸とする回転角を指定しなければならない。図5に3次元における親細胞と子細胞の位置関係を示す。

染色体は、2次元の場合と同じく表形式とする。表中の要素は3つの角度それぞれに8ビット、子細胞の

初期状態に4ビット、次の時刻ステップにおける自身の状態に4ビットを用いると、 $8 \times 3 + 4 + 4 = 32$ で合計32ビットとなり、2次元の場合の倍のビット数が必要となる。環境の状態は、前後左右上下の6方向を見ることも考えられるが、現在、実現されているシミュレーションプログラムでは、環境の情報は扱っていない。つまり、表の大きさは、増殖状態の数8に等しい。

進化のアルゴリズムは4節で述べた2次元の場合と同様である。ただし、適応度の定義にはつぎのような式を用いた。

$$\text{適応度} = \frac{n}{0.1d^2 + 0.2d + 0.7\sqrt{d}}$$

ここで、 n は個体を構成する細胞の数、 d は最初の1つの細胞から個体内の最も遠い細胞までのユークリッド距離である。式の分子は細胞数が多いほど良いことを表現している。分母は、ある程度のまとまりが好ま

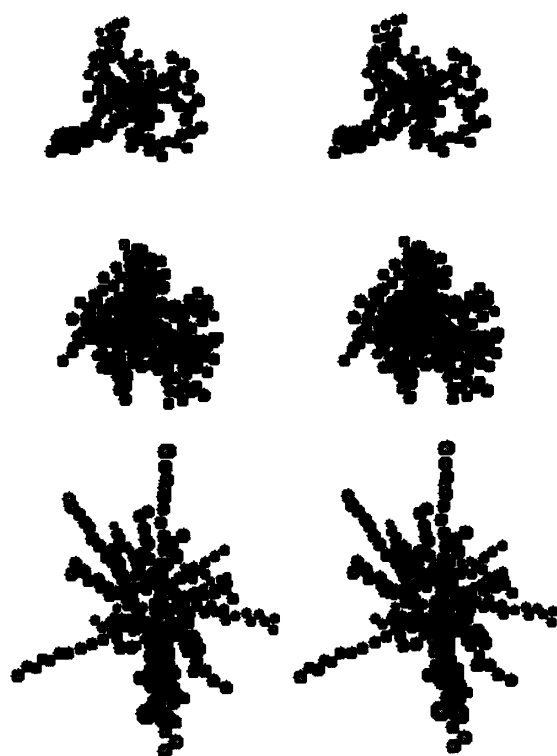


図8 3次元ユークリッド空間上の発達システム．進化の過程を経て発生した個体の例（両眼立体視画像）

しいことを表現している。分母を d のみにすると球体に近い形状が優先されることになるが、上記のような重み和をとることにより、板状や渦巻状の形態を有利にすることができる。2次元の場合に用いた個体の成長の停止という条件は、ここでは取り入れていない。3次元では成長の過程で自分の体に衝突する確率が大幅に減るため、そのような条件を満足する個体の数が極端に少なくなる。適切に進化させるためには、適応度地形がある程度滑らかである必要があるので、集団内の大部分が一律に低い適応度となることは進化の妨げになる。

図8に進化の結果として発生した形態の例を示す。3次元では、立体構造を視覚化するために、回転させながら画面に表示している。

7. おわりに

ここで紹介したモデルは、いずれもシミュレーションを行なったに留まっており、進化に関する解析は今後の課題として山積みされたままである。この研究に科学的貢献を期待するなら、それらの解析を早急に進める必要がある。もちろんシミュレーション画像から得られる定性的な知見もいくつかある。1つの重要な事実は、単純な遺伝子コードと発達プロセスとしての遺伝子の解釈から、思ったよりも複雑な形態が発生するという点である。進化論におけるダーウィニズムへの批判としてしばしば眼球の進化が取り上げられる。新たな器官を獲得するときダーウィニズムでは、進化の途中の段階でも、それを有することが他より有利でなければならない。しかし眼球は中途半端な構造ではほとんど機能を果たせず、突然変異と自然選択から徐々にできあがったとは考えにくい。しかし、この成長システムの進化シミュレーションを見る限り、ある世代において突然、複雑な形態が現れることがかなり頻繁に起きる。このような観察から、眼球のような複雑な構造が突然現れることも不思議ではないのではないかと考えさせられる。眼球の進化に対するもっともらしい説明を得るには実験がまだまだ簡単過ぎるが、進化に対する誤った直観を修正するために、シミュレーションは極めて有効な手段である。

参考文献

- 1) Lindenmayer, A. and P. Prusinkiewicz: Developmental Models of Multicellular Organisms: A Computer Graphics Perspective, in C. G. Langton (ed.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, 221/249 (1989)
- 2) Langton, C. G.: Artificial Life, in C. G. Langton (ed.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, 1/48 (1989)
- 3) Goldberg, D. E.: Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison-Wesley (1989)
- 4) 畝見達夫: 2次元ユークリッド空間上の単純な発達システムの進化, A-Life WORLD「人工生命の美学」展, 1993. 6. 23-8. 30, 東京国際美術館 T-BRAIN CLUB (1993)