

## デジタル生態系における多細胞生物の進化\*

2AG-3

木目沢 司、和田 健之介、トーマス レイ、下原 勝憲†

ATR 人間情報通信研究所‡

## 1 はじめに

デジタル生態系 Tierra においては仮想生命体（デジタル生物）自身が進化することによって環境が変化し、その変化した環境に適応できた個体がより多く子孫を残す。

Tierra において進化するプログラムの具体的な機能は自己複製に関するもののみであり、それ以外の機能の創発は見い出されていない。

本研究では自己複製以外に仮想的なモデル世界での適応機能を持ったシステムを検討する。仮想3次元空間で形状が成長・進化する生物（樹木）をつくり、形態形成を記述した遺伝コードの進化の可能性を検討した。すなわち、Tierra におけるエネルギー資源のアナロジーの代わりに仮想的な日光を、物質・空間資源のアナロジーの代わりに樹木を成長させるためのフィールド（土地）を与え、これらの資源をめぐるより環境に適応した樹形を生成する個体がより多く生き残るシステムを作成した。

以下では、本研究で使用したシステムを説明し計算結果を示す。

## 2 システムモデル

本研究で使用した進化システムのモデルは、樹木としての個体群とそれらが成長するフィールドからなる。

## 2.1 個体モデル

各個体は一つの遺伝コード（仮想機械語命令によるプログラム）と複数のセルにより構成される。各セルはそれぞれ一つの仮想CPUを持っており、同一の遺伝コードを実行することによって成長や繁殖を行う。また各セルはステータス値を持つ有限状態オートマトンであり、ステータス値によって遺伝コードの実行領域が異なるようになっている。よって各個体は全体としてみると、一つのプログラムの異なるコード領域を複数のCPUで実行する並列計算機と見なすことができる。

\*Evolving multi-cellular organisms in the digital ecological system

†Tsukasa Kimezawa(kim@hip.atr.co.jp), Kennosuke Wada, Thomas S.Ray, Katsunori Shimohara

‡ATR Human Information Processing Research Laboratories 2-2 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto, 619-02, Japan

ここで、個体が仮想植物として成長・繁殖するための仮想機械語命令について説明する。樹木の成長はまず、形態記述用の仮想機械語命令により、L-systemの文法を各セルが持っている形態生成バッファに記述し、それを形態生成用の仮想機械語命令が3次元幾何情報に翻訳することにより行われる。例えば図1の左欄のように、命令語列を実行すると、この図の中欄のようなL-systemの文法を実行したことに相当し、右欄のように成長する。

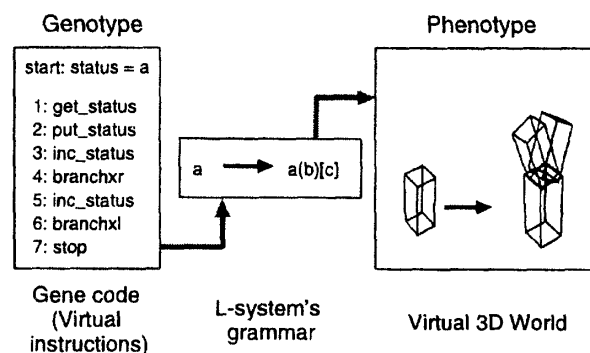


図1: 個体の成長の仕方（遺伝子型から表現型へ）

上記の命令語の1行から7行が形態記述用命令で、1,2行目の get\_status と put\_status で自分のステータス値を取得し、それを形態生成バッファに記述する。inc\_status は、次に分岐するセルのステータス値を一つアップさせる命令、branchxr と branchxl はそれぞれ、x軸のプラス方向への枝別れ、マイナス方向への枝別れを形態生成バッファに記述する。7行目の stop が形態生成命令で、形態生成バッファの内容 a(b)[c] を翻訳して3次元情報を生成する。ここで [] と () は L-system の文法として、それぞれ右と左への枝別れを意味する。実際に用いたモデルでは、分岐の角度（フィールドの垂直線と分岐セルのなす角）や方向（セルが東西南北どちらの方向に分岐するか）を指示する命令語、セルのサイズを増減させる命令語などを用意した。

またセルのステータスが葉と花に相当する終状態になると、上記のような形態生成命令は無効になるが、葉の状態のセルは日光を浴びて、より多くのタイムスライスが得られ、花状態では breed 命令を実行する事ができるものとした。breed 命令はその花状態のセルの位置を中心として種をまく。したがってより高く、より幹から

遠くに伸びた枝から生えた花を持った個体ほど、広範囲に種をまく事ができる。まかれた種の場所が他の個体によって占有されていなければ、それは発芽し独立した個体になる事ができる。

breed 命令によって新たな個体が生まれる際、ある確率で遺伝コードに突然変異が起こる。各命令語は Tierra と同様5つのビット列によりマッピングされている。よってビットの反転が起こると、そのビットを含んだ命令語が別の命令語に突然変異する。この他に、遺伝コードの欠失、挿入、重複、交叉なども生じる。

本システムでは L-system の文法を直接記述せず、仮想機械語命令による一段低いレベルの言語を遺伝コードとする事で、わずかな突然変異の影響が個体の表現型（樹形）に大きな変化をもたらすようになっている。

## 2.2 フィールド

個体は生存の間、フィールド上のある場所を占有する。ただしフィールドの全面積のうち占有できる割合には限りがある。

個体群によってフィールド総面積の 80% が占有されると、自然淘汰の機構が働き、それ以上の個体数の増加を抑えるようになっている。このとき、各個体の [受光量 / 重量] が少ない種ほど強い淘汰圧を受ける。よってより効果的に葉をつけた個体ほど、生存に有利となる。たとえば高いところに葉をつけた個体は、その下層の植物への光を遮断する事により、自分の生存確率を上げ、下層の植物の生存確率を下げる事が可能になる。

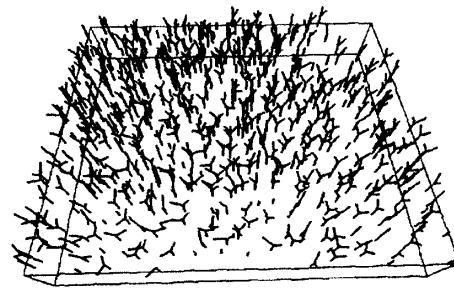
## 3 計算結果

計算結果の一例を示す。図2の (a) から (c) は、それぞれあるステップにおけるフィールドの様子のスナップショットである。(d) のグラフは時間 (ステップ) 毎の個体の平均セル数の変化を示す。まず、先祖種がフィールドに満ちる (a)。約 700 ステップのときセル数の多い個体が急に増えはじめて、先祖種と競合状態になる (b)。約 1700 ステップでは非常にセル数の多い個体も現れた。このように、本システムは時間の経過とともに複雑な生態系を生み出す事に成功した。

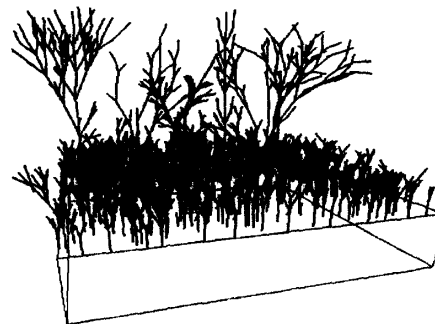
## 4 今後の課題

現在のモデルでは個体の成長は遺伝コードのみで完全に決まり、成長の途中で環境変化に対応できない。今後、光の向きによって枝を伸ばす方向を制御するような適応行動能力を与える必要がある。それには仮想 CPU に I/O バッファを与え環境から情報を得たり、セル同士のコミュニケーションを行う仮想機械語命令を用意すれば良いだろう。これによって、より本物に近い植物モデルができる事が期待される。

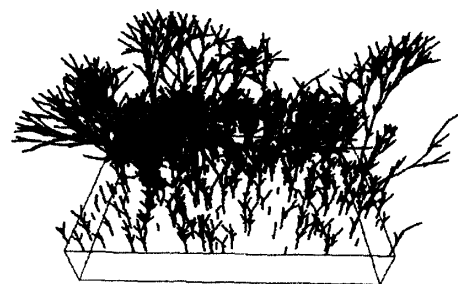
また将来は、動物または進化型ロボットのモデルにも拡張したい。



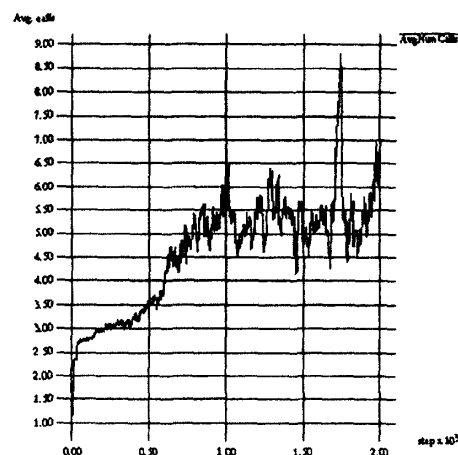
(a) Step 42



(b) Step 714



(c) Step 1719



(d) Average Number of Cells

図 2: 計算結果