

ティエラを基にしたリソース保存システムにおけるデジタル生物の進化

松崎 周一^{†1} 鈴木 秀明^{†2} 小佐野 峰 忠^{†1}

本論文では、人工生命モデル「ティエラ」を基にした進化システムを提案する。このシステムでは、自己複製プログラムの基本リソースが保存されている。そのため、生物はシステムにあるリソースを再利用することで自己複製を続けることができる。また我々は、異なるリソースを利用する、2種類の先祖種を作成して実験に用いた。その結果、両種には食物関係に似た相互作用が見られ、安定して共存を維持した。また、それらは捕食関係を通して、互いに適応する進化が見られた。さらに、単純複製体を追加した実験結果から、本モデルでは種の多様性が失われず安定したシステムであることが示された。

Evolution of Digital Creatures in a Resource-Conservative Artificial Life System

SHUICHI MATSUZAKI, ^{†1} HIDEAKI SUZUKI ^{†2} and MINETADA OSANO ^{†1}

In this paper, we present an Artificial Life system with a remodeling of Tierra. This system provides a rule of system environment, which is induced by the natural resource property: that is "matter resource" will be conserved and recycled through the biochemical reactions. Due to this point, fundamental components (as matter) of digital creatures with being conserved (never being added/deleted) are introduced in this system. Therefore the system forces the creatures to recycle its program ingredients in order to self-replicate. We have developed two distinct ancestor programs called "Plants" and "Animals", in which they can recycle resource by executing photosynthesis/preying. Our experimental results show that particular interactions, which are similar to *the food chain*, appeared by the recycling actions, and such interactions stabilized population equilibrium between groups of Plants and Animals. In addition, co-adaptive evolutionary behaviors caused by predator-prey interactions are also observed.

1. はじめに

ティエラ^{1),2)}は、人工生命の手法から生命進化の再現を目指した進化システムである。本報告では、ティエラのデザインを変更したモデルを提案して、またその中で見られた特徴的な動態について議論することを目的としている。

ティエラにおける生物とは、メモリ空間に書き込まれている機械語プログラムであり、これは、自己複製を繰り返しながら、プログラムを進化させていく。進化の例として、寄生体と呼ばれる変異体がある。これは、他者のプログラムの一部を利用して自己複製を実行することから、自身はより単純なプログラムへと進化している。寄生体に限らず、ティエラを基にした人工生命システムでは、主に自己複製を短時間で実行する方向へ進化が行なわれる。そのため、プログラムはよりシンプルなもの

へ変異する傾向が見られる。しかし、実際の生物進化はこのように定向的なものではなく、多様な環境への適応が行なわれ、その結果より複雑な形質へと進化する傾向がある。そして、そのような環境の多くは、食物関係によって繋がる種間相互作用からもたらされると考えられる。

本研究では、生態系における生物の相互作用を再現するシステムの構築を目的としている。この手法で一つのキーとなるのが、「シンボルのリソース保存性」である。ここでシンボルとは、自然界の物質に相当する、人工システムの要素を指している。鈴木らは「人工生命システムの複雑な進化に必要な条件」の一つにリソース保存性を挙げた³⁾。また、人工化学モデルを用いた Neveh らの実験において、シンボルが無限なシステムでは種の多様性が次第に失われるのに対して、シンボルを有限にすると、種の多様性が維持される結果が報告されている⁴⁾。これらを踏まえて、本研究では、ティエラのデザインを変更して、リソース保存性を取り入れたシステムを提案している。ティエラにおける基本的なリソースとは、自己複製プログラムの各命令語である。オリジナルのティエラでは、命令語はメモリ上へ自由にコピーされている。

^{†1} 会津大学大学院コンピュータ理工学研究科
Graduate School of Computer Science and Engineering,
Aizu University

^{†2} ATR ネットワーク情報学研究所
ATR Network Informatics Laboratories

そのためリーパー（オペレーティング・システム）が適当なタイミングで自己複製プログラムを削除しない限り無限に増え続けて、永続的な進化を続けることができなかった。これに対して本研究では、ティエラにおけるシンボルを有限なものとして、リーパーのような外部からの介在なしに、システム内でのリソース再利用から自己複製を続けるシステムを構築した。

2. 先祖種

本モデルのメモリ空間には、「命令語」と「非命令語」の2種類のシンボルが存在しており、それらは共に6ビットで表されている。すなわち、各ビットはシンボルの基本リソースであり、システムの中では常に保存されている。そのため、生物はリソースを再利用しない限り自己複製を実行できない。我々が設計した2種類の先祖プログラムは、リソースを再利用して複製する処理を持ったものである。

§ 植物先祖

植物種は、命令語を複製する処理において、メモリ上から任意の2つの非命令語を取得してレジスタに格納する。そして、それらのビットを組替えて、複製に利用する命令語を作成する（ここで利用された非命令語は失われる）。すなわちこのプログラムの処理では、命令語として直接利用できないシンボルを消費して、そのリソースをもとに、複製のためのシンボルを生産している。図1に、この生物種が命令語を複製するまでの手順を示す。

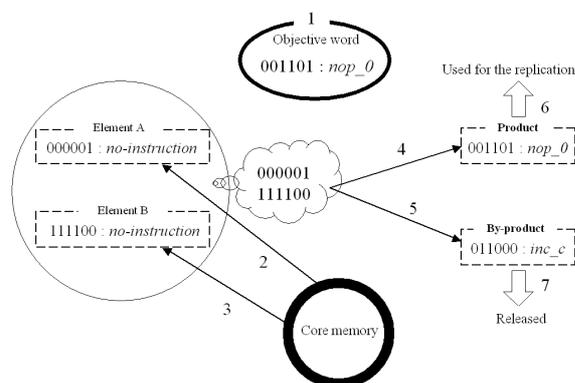


図1 植物の命令語複製の手順。1)複製する自分の命令語をチェックする。2),3)メモリ上の任意のアドレスから非命令語を取得する。4)取得した非命令語のビットを利用して複製する命令語(Product)をつくる。5)さらに残ったビットから任意の命令語(By-product)を作る。6)Productを自己複製先へ移動させる。7)By-productをメモリ3)で取得した非命令語と置き換える。

§ 動物先祖

植物種の複製処理に対して、動物種は、複製するため

の命令語をメモリ上から直接取得する。この処理では、自分から外側に向かって、各アドレスにあるシンボルを順番にチェックする。ここで、自分自身や娘のプログラムの命令語を捕食する（命令語を奪う）ことを避けるために、テンプレート照合を利用して、命令語を取得できる空間を判別する（これらの処理を実行する空間は、前後の350アドレス以内とした）。ここで判別の指標に用いるCPU状態は、True/Falseの2状態を持ち（初期状態はFalse）、特定の照合が起きると切り替わる（表1）。動物種は、CPU状態がTrueとなった探索空間に限り、命令語を取得することができる。図2に示すように、先祖種では、自分の両端の膜テンプレートとの照合によって、自己の内側と外側でCPU状態を切り替えている。さらに、他の自己複製プログラムの膜テンプレートとの照合を調べることで、その生物を捕食可能かどうか判別する。

表1 テンプレートの照合によるCPU状態の変化。相補または同等のテンプレートに対して照合が行われ、照合が起きるとCPU状態はその照合のタイプとサーチの方向に対応した状態(True/False)になる。

Template	Equal	Complementary
Direction: register		
Forward: Sf	False	True
Backward: Sb	True	False

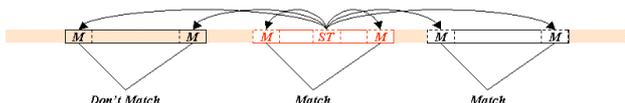


図2 動物種（赤）による命令語取得の概念。照合元であるサーチ・テンプレート(ST)が、膜テンプレート(M)と照合するたびにCPU状態が切り替わる。その結果、色付けされたメモリ空間では命令語を取得することができる。

3. 実験と考察

3.1. 個体群動態の安定性

図3に、先に述べた2種を各先祖種とした実験における個体数変化を示す。この結果から、植物種と動物種が与えられるシステムでは、両種が安定して共存することがわかる。そこで、この動態を生物学の理論と照らし合わせて考察する。

自然界で捕食関係にある2種の動態を見ると、それらは互いに相手の個体数に従って変化している。捕食者が得られる餌の量は、被食者の個体数に比例することから、

両種は一定の平衡状態を維持して共存する傾向にある。本モデルにおける2種は捕食関係にあり、動物種が利用できる命令語の数は、植物種の個体数に比例している。そのため、植物種の捕食は一定以上行われず、共存を維持していると考えられる。

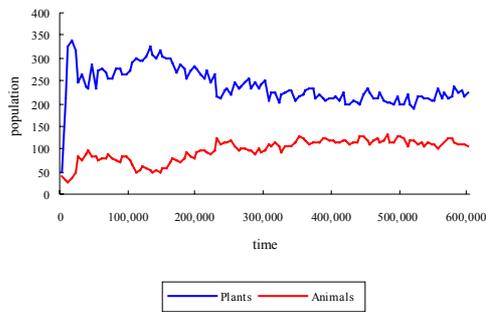


図3 植物と動物各集団における個体数変化

3.2. 捕食関係による多様性の進化

自然界では、捕食関係にある2種が、互いに適応するための改良進化を続けるといわれている。この場合、捕食関係に関わる形質は、互いに適応進化する傾向があるため、生存や繁殖には意味の無い(または不適當な)進化が起こることもある⁶⁾。

本モデルの捕食関係では、両者のテンプレート照合によって捕食の成否が左右される。図4に示した結果から、捕食に関わるテンプレートは、集団にあるパターンが一樣にならず、常に多様であることがわかる。また各テンプレートの長さは、進化により一樣に増加している。その結果、生物はより多くの照合パターンを持ったテンプレートを獲得している。これらは、捕食関係においてのみ意味のある進化であることから、2種は互いに適応的な進化を行ったと考えられる。

3.3. リソース保存性の意義

自己複製の資源が保存されることで、システムの集団は均一な種にならず多様性を維持すると考えられる。本モデルでこれを検証するため、単純な自己複製プログラムを集団内に追加する実験を行いティエラと結果を比較した。ここで我々は20のティエラ命令語からなる自己複製プログラムを作成した(ティエラおよび我々の先祖種は約80語である)。これは自己複製を行うために最低限必要な命令語からできており、メモリ上の非アクティブな命令語を複製に利用する(例えば jmp が必要ならば、メモリ上の「死んでいる生物」の jmp を利用する)。この単純複製体はティエラや我々の先祖種に比

べて約6倍の速さで自己複製を行う。

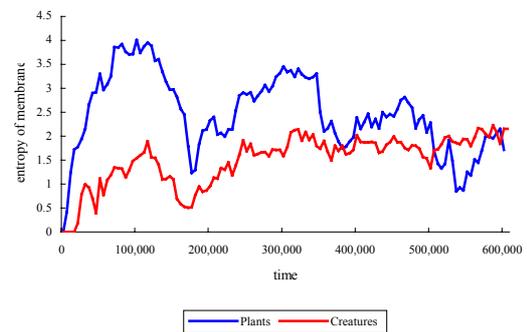
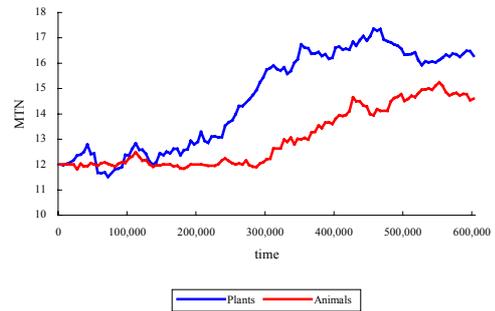


図4 上から(A)集団内での膜テンプレートのエントロピー。(B) 集団における MTN の平均値。

図5にはこの単純複製体を途中で追加した実験結果が示されている。ティエラでこのプログラムを追加した結果、個体数は急速に増加し、数千ステップ後には他の生物が全て失われた。一方、我々のモデルでは単純複製体を追加するとわずかに増加したものの、その後はほとんど増加しなかった。また他の集団の動態は単純複製体を追加した前後でほとんど変化がみられない。本モデルではこの単純複製体が発生してもこれまでと同様の集団を維持できることが示された。

仮に、新たな命令語として「自己複製する命令語」を追加したシステムを想定する(これは1命令による複製体である)。オリジナルのティエラ環境において、この複製体を追加すれば、全ての種は失われるであろう。しかし、本モデルでは、命令語が有限であるため、一定以上の複製は不可能である。このように、有限な資源により自己複製するシステムでは、種の多様性を維持する性質が見られる。

ここで示した単純複製体の実験は、この議論を裏づけるものである。本モデルに固有の相互作用を通して、単純複製体は抑制され、集団を占拠することはできなかった。すなわち、単純複製体は、資源を循環利用するための段階に割り当てられない。システムを構成する集団は、資源を循環する相互作用から、互いに安定した共存を維

持っている。そのため、資源の循環に関わらない個体は、システムから容易に排除される対象となる。さらに、単純複製体は、動物と共通の資源を利用することから、動物との共存はより難しく、その多くが捕食の対象となる。

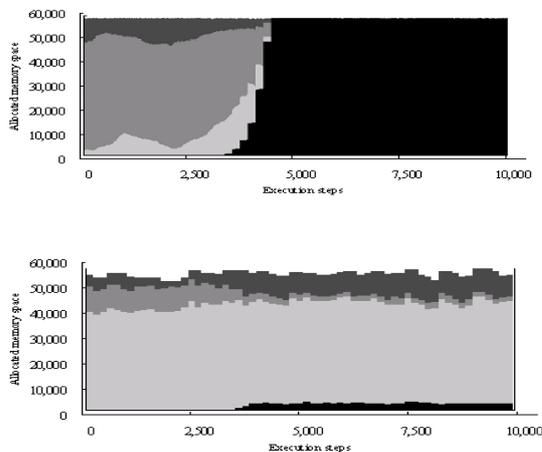


図 5 生物のメモリ占有率。ティエラ(上)で黒は単純複製体、その他は先祖から派生した生物を表わす。本モデル(下)では下から単純複製体(黒)、植物(ライトグレー)、動物(グレー：植物のみを捕食。ダークグレー：植物以外も捕食)。

4. まとめ

本報告では、ティエラのデザインを基した人工生命モデルを提案した。本モデルでは、自己複製プログラムのリソース保存性が導入された。また我々は、システムからリソースを再利用するための命令セットを持った、2種類の先祖種を導入した。実験では、2つの種は共存し、互いの動態が安定する結果となった。またこれらの2種は、捕食関係を通して互いに適応的に進化し、より多くの多様性を創出した。また、本モデルとティエラで単純複製体を挿入した比較実験から、ティエラでは既存の種が全て失われたのに対して、本モデルでは種の多様性が維持される結果が得られた。

参 考 文 献

- 1) Ray T, S. (1992). *Evolution, Ecology and Optimization of Digital Organisms*, Santa Fe Institute working paper 92-08-042.
- 2) Ray T, S. (1994). *An Evolutionary Approach to Synthetic Biology: Zen and the Art of Creating Life*, *Artificial Life 1*: 195-226.
- 3) Suzuki H., Ono N., &  K. (2003). *Several Necessary Conditions for the Evolution of Complex Forms of Life in an Artificial Environment*, *Artificial Life 9*.
- 4) Naveh B., Sipper M., Lancet D., Shenhav B. (2003). *Lipidia: An artificial chemistry of self-replicating assemblies of lipid-like molecules*, in *Artificial Life IX: Proceedings of the 9th International Conference on*

the Simulation and Synthesis of Living Systems, J. Pollack, M. Bedau, P. Husbands, T. Ikegami, and R. A. Watson, Eds. 2004, pp. 466-471, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

- 5) 巖佐庸 (1990): 数理生物学入門 —生物社会のダイナミクスを探る, HBJ出版局
- 6) Nitecki M. (1983). *Coevolution*. Univ. of Chicago Press: Chicago.