

Langton の自己増殖ループをもとに構成した 構造解消可能型自己増殖ループ

佐 山 弘 樹†

生命の死という現象には、機能破綻と構造解消という2つの側面がある。本研究では、後者をモデル化してその意義を考察するため、既に機能破綻としての死が備わっている Langton の自己増殖ループ (SR ループ)¹⁾ に、新たに構造解消機能を導入して「構造解消可能型自己増殖ループ (SDSR ループ)」を構成した²⁾。具体的には、SR ループを構成するのに用いられたセルラオートマタ (CA) の状態集合に解消状態 '8' を導入し、さらに状態遷移規則に幾つかの変更を加えた。この変更により SDSR ループは、自己増殖に必要な空間が不足するなどの困難な状況に遭遇した際に自分自身の構造を解消する能力を得た。システム全体の中で一部のサブシステムが消失するというこの仕組みにより、SDSR ループの個体群は、動的な安定性と潜在的な進化可能性を持った特徴的な振舞いを示すようになった。本稿では、SDSR ループの構築の方法とその振舞いについて詳しく紹介し、それらに関連した幾つかの考察を述べる。

A Structurally Dissolvable Self-Reproducing Loop Implemented from Langton's Self-Reproducing Loop

HIROKI SAYAMA†

The phenomenon of death, or disappearance of life, has two aspects. One is failure in the function of life and the other is dissolution of the structure of life. In order to model the latter aspect and examine the significance of it, the author has contrived a "structurally dissolvable self-reproducing (SDSR) loop"²⁾ by introducing the capability of structural dissolution into Langton's self-reproducing (SR) loop¹⁾ in which death as functional failure has already been installed. To be more specific, a *dissolving state* '8' was introduced into the set of states of the cellular automata (CA) used for embodying the SR loop, besides other modifications to Langton's transition rules. Through this improvement, the SDSR loop can dissolve its own structure when faced with difficult situations such as a shortage of space for self-reproduction. This mechanism (disappearance of a subsystem of the whole system) induces, for the first time, dynamically-stable and potentially evolvable behavior into the colony of SDSR loops. In this article, we report in detail the process of implementing the SDSR loop and its behavior, and have some discussions relevant to them.

1. はじめに

本研究は、既に「機能破綻としての死」が組み込まれている有名な Langton の自己増殖ループ (SR ループ)¹⁾ に「構造解消としての死」を導入しようという試みである。これは、Langton の SR ループの持つ特徴的な振舞いを有限空間内で半永久的に継続させられないか、という筆者の単純な興味に端を発した作業であるが、同時に、生命のダイナミクスにおける死の持つ意義を考察し、それを反映した新しい進化モデルを構築する試みでもある。

「生命とは何か」この基本的な問いに解答を与えるた

めに、増殖、代謝、運動、知覚、学習、免疫、遺伝、進化、集団行動、死、など、数多くの生命独特の振舞いがこれまでに研究されてきた。この中で死は、他に比較するとあまり詳細な研究がなされてこなかった振舞いのひとつであるといっても過言ではないであろう。

「死とは何か」という問いに対しては、少なくとも自明な定義として「生存状態から非生存状態へのシステムの状態遷移」とであると答えることができる。この定義を成立させるには「生存状態/非生存状態」に関する定義も必要となるが、ここでは単に生存状態を「システムが正常に機能し、先に挙げた生命独特の振舞いが実現している状態」とするにとどめよう。システムの正常な機能が失われ、生存状態から非生存状態へ移行する生命の死を、本稿では「機能破綻としての死 (death as functional failure)」と呼ぶことにする。

† 東京大学大学院理学系研究科

Graduate School of Science, University of Tokyo

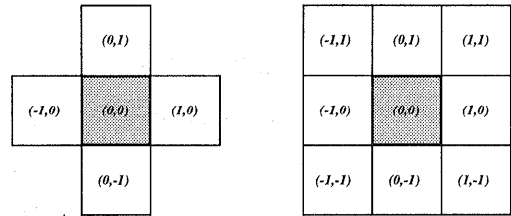
しかし実際には、死は機能の破綻だけでなくシステムの物理的な構造自体が消滅していくプロセスを含めて捉えられる場合も多い。このシステムの構造の消滅を、本稿では「構造解消としての死 (death as structural dissolution)」と呼ぶことにする。例えば、人間を含む地球上のあらゆる生物は機能破綻としての死を迎えた後、人為的な操作を加えない限り自己消化や微生物のはたらきなどによって有機物に分解されてゆく。また、Genetic Algorithms (GA)^{3),4)} や Genetic Programming (GP)⁵⁾ などの工学的な最適化技法や、*Tierra*⁶⁾ のような人工生態系においても、個体の死は個体の機能の停止だけでなくメモリからの個体の除去をも意味する。このように、有限の環境内におけるシステムにとっての死は、単なる機能破綻でなく、それともなう構造解消という面にこそ価値が存在しているものと思われる。しかしこれまでのところ、死について、機能破綻と構造解消とを明確に区別した議論はあまり行なわれてこなかった。

そこで本研究では、機能破綻はあるが構造解消のないシステムに後者を導入することで「構造解消としての死」をモデル化し、その持つ意義を明らかにすることを狙い、その題材としてセルラオートマタ (cellular automata, CA) 上に構築された自己増殖モデルとして有名な Langton の SR ループを選択した。SR ループの仕組みを完全に継承するために、Langton によって提案された状態 '0'-'7' に関わる状態遷移規則には変更を加えず、代わりに CA の状態集合の中に新たに状態 '8' を導入し、これがループの中を伝わって構造解消が生じるような規則を新たに追加した。この改訂されたループを「構造解消可能型自己増殖ループ (structurally dissolvable self-reproducing loop, SDSR ループ)」と名付けた²⁾。この SDSR ループを用いて幾つかの実験を行なったところ、SR ループにおいては見られなかった興味深い現象が観察された。

本稿では、Langton の SR ループの構造、SDSR ループの具体的な実現の方法、および実験によって得られた結果について、その詳細を紹介し、それらに基づいて幾つかの考察を加える。

2. Langton の自己増殖ループ

セルラオートマタ (CA) は von Neumann によって考案された離散物理系モデルで、 D 次元格子状の離散的な空間 Z^D 内の格子点上に均一に並べられた同一の機能を持つオートマトン (セル) の集合について、時刻 t における座標 $z \in Z^D$ 上のセルの状態を $s_t(z) \in \Sigma$ (Σ は状態集合) としたとき、その時間発展が一律に



Von Neumann 近傍系

Moore 近傍系

図 1 2次元の CA でよく用いられる近傍系の例。Von Neumann 近傍系の場合 $n = 5$ 、Moore 近傍系の場合 $n = 9$ となる。

Fig. 1 Examples of neighborhood templates often used for 2-dimensional CA.

$s_{t+1}(z) = \Delta(s_t(z+z_1), s_t(z+z_2), \dots, s_t(z+z_n))$ の形で表されるようなモデルを指す。ここで、 $\Delta: \Sigma^n \rightarrow \Sigma$ は局所写像 (状態遷移規則とも呼ばれる) を、 $\mathcal{N} = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ ($z_i \in Z^D$) は近傍系をそれぞれ表す。2次元 ($D = 2$) の CA では図 1 のような近傍系がよく用いられている。

CA は、極めて多様で複雑な非線形現象を記述可能であるにも関わらず、(1) 空間・時間・各セルの状態の全てが離散的であること、(2) 状態遷移規則が空間に対して一様に適用できること、(3) 状態遷移規則が単純な参照テーブルで実現できること、などの特徴により、その実装と解析が一般に容易なので、流体力学から人工生命まで様々な分野においてモデル化の手法として用いられている。中でも、CA を用いて生命の自己増殖をモデル化する試みについては、CA の考案者である von Neumann⁷⁾ をはじめ、これまでに様々な研究がなされてきている^{1),8)~15)}。

Langton の SR ループ¹⁾ は、これら CA 上に構築された自己増殖モデルの中で、最も有名かつ重要なものの一つである。

CA (もしくはそれに類する空間) による自己増殖のモデル化の研究が始められた当初は、Turing 機械をモチーフにして計算・構成万能性を備えた機械を空間内に実装し、これに機械自身の設計情報を与えることによって自己増殖が実現されていた^{7),9),15),16)}。これらの基になったのは 1948 年に von Neumann によって提案された¹⁷⁾ アイデアで、これは DNA と細胞質からなる現実の生命の自己増殖メカニズムを DNA の 2 重らせん構造の発見 (1953 年) の前に理論的に予言した研究として、非常に重要なものである。しかし、計算・構成万能性を持つ機械を実現するには一般に極めて多くの構成要素が必要となるため、これらの研究によって得られた自己増殖モデルはどれもみな非常に大規模で複雑なものであった。従って、現実には計算機を用いてそれらの振舞いをシ



図2 LangtonのSRループの構造。アルファベットのQのような形をした管の中に、腕を1セル分伸長させる信号‘7’が6つ、その後腕を左折させる信号‘4’が2つ（これは2つで1回の左折を実現する）入っている。右のチャートは各セルの状態が図中でどのような色調で示されているかを表している。これ以降の図も同様。

Fig. 2 Initial configuration of Langton's SR loop. The right chart indicates the correspondence between states of cells and shades of pixels in the figure.

ミュレートすることは、当時は全く不可能であった。これに対してLangtonは「個体の構造を指定する情報列が個体内に明確に存在し、それが翻訳 (translation) と転写 (transcription) という2つの形で利用されることによって構造の複製が実現されるならば、計算万能性や構成万能性がなくとも、このプロセスを自己増殖とみなしてよい¹⁾」という新しい基準を提案し、さらにCoddのモデル⁹⁾の一部分を応用して、上記の基準を満たす非常に小さな構造から成るSRループを考案した。彼の提案によって示された最も重要な点は、「計算・構成万能性は自己増殖にとって十分条件ではあるが必要条件ではない」ということであり、この緩和によって従来よりも飛躍的に小さな規模で自己増殖をモデル化することが可能となった。これ以後、多くの研究者らが彼のモデルを題材にして、様々な自己増殖モデルの提案を行っている^{8),12)~14)}。

LangtonのSRループは、8状態をとる von Neumann 近傍系のCAの上に考案されており、その構造は図2のようになっている。「鞘 (sheath)」と呼ばれる状態‘2’によって覆われたアルファベットのQの形をした管の中に、状態‘4’や‘7’などの信号が配置されている。各状態の名称と主な働きを表1に示す。

SRループの中の信号は、隣接する状態‘1’の方向へ管の中を伝播してゆく。ループから外へ突き出された腕の根元のT字路の部分に信号が到達すると、信号の転写 (transcription) が生じて、一方の信号は再びループの中に向かい、もう一方は腕の先端の方へと流れてゆく。腕の先端に信号が到達すると、遺伝型から表現型への翻訳 (translation)、即ち腕の伸長や左折が生じる。腕が3回左折してその先端が自らの根元に接すると、それらが結合して新しい子ループが生じ、親ループと子ループの間の結合が消滅する。以上のようなやり方で、SRループは151ステップかけて巧みに自己増殖を行なう。その様子を図3に示す。

表1 LangtonのSRループを構成するCAにおける各状態の名称と主な働き。

Table 1 Names and main functions of the states in the CA of Langton's SR loop.

状態	名称	主な働き
‘0’	背景	何も無い空間を表す default の状態。
‘1’	芯	ループの管を満たし、中の信号を伝播させる。
‘2’	鞘	ループの管構造を構成する。
‘3’	信号	腕の左折や管同士のを補助する。
‘4’	〃	腕の左折を記述する遺伝情報を表す。
‘5’	〃	親と子の間の結合を解消し、親が次に腕を出す箇所を指定する。
‘6’	〃	子が最初に腕を出す箇所を指定する。
‘7’	〃	腕の伸長を記述する遺伝情報を表す。

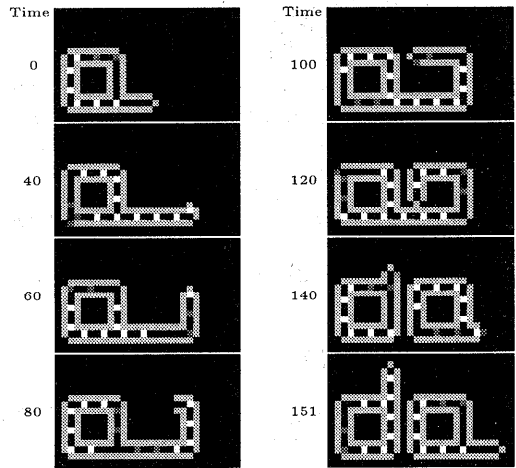


図3 LangtonのSRループの自己増殖の様子。ループの中の信号が反時計回りに流れるに従って、それらのコピーが腕の先端へ向けて送り出され、腕は伸長と左折を繰り返しながら成長する (time=40-100)。腕が3回左折して、その先端が自らの根元に接すると、そこで結合が生じて新しいループが生じ、もとのループとの間の結合が切れる (time=120-140)。こうして151ステップで、もとの個体の右隣に、親と完全に同一の構造を持った子個体が複製される (time=151)。

Fig. 3 Self-reproduction of Langton's SR loop.

SRループは、子個体を生成し終わると、反時計回りに90度回転した形で再度同様のことを行なう。これを空間が許す限り永遠に繰り返す。もし、これから子個体を生成しようとする領域が既に他の個体によって占有されていたら、そのときは体内に鞘の薄片を生成して信号の通り道をふさぐ。すると、時間とともに体内の信号はこの薄片に吸収され、最終的に環状の管のみが残る。その様子を図4に示す。これを見ると、LangtonのSRループには明らかに機能破綻としての死が存在しているが、構造解消としての死は（親ループと子ループの間の結合の消滅という部分的な解消を除いて）実現されていないことがわかる。

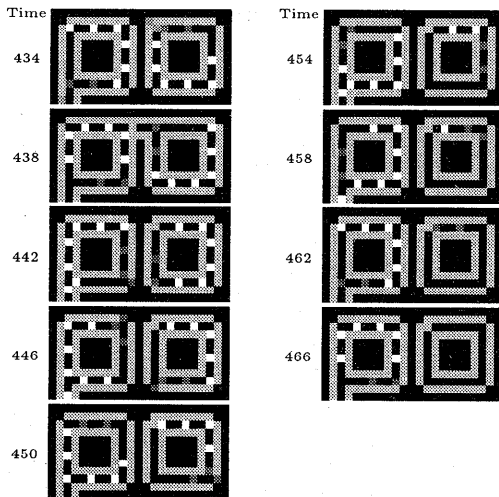


図4 LangtonのSRループが機能破綻としての死を生じる様子。右の個体は左に腕を伸ばそうとする (time=438) が、すでにそこが他の個体に占有されているため、鞘の小片が右の個体の左上部の管内に出現する (time=442)。個体内を伝播する信号は次々にこの小片に吸収されていき (time=446-462)、最終的に全ての信号が消滅して環状の管構造のみが残る (time=466)。

Fig. 4 Death as functional failure of Langton's SR loop.

3. 構造解消可能型自己増殖ループ

前章で紹介したLangtonのSRループの性質を全て継承しつつ、新たに構造解消する能力をモデルに導入するために、本研究では、Langtonの提案した状態‘0’-‘7’とそれに関する状態遷移規則をそのまま継承した*上で、新たに解消状態‘8’をCAの状態集合に加え、解消状態がループの中を伝播することによって構造解消が実現されるようにした。具体的な実現の方法を、順を追って以下に記す。

第一に、まずLangtonの状態遷移規則に内在する技術的な問題について述べなければならない。1984年にLangtonによって発表されたSRループの状態遷移規則は、単純な自己増殖の過程で発生する状況に対応した、極めて小数の規則のみに限られており、その他の多くの状況については未定義のままであった。これは、Langtonが暗に「ループの息する環境は無限であり、従って状態遷移規則に定義されていない不規則な状況は生じ得ない」と想定していたためと考えられる。しかし、ひとたび周期境界条件もしくは自由境界条件が空間の周囲に課されて空間の大きさが有限に制約された場合、そこに息するループが空間の限界に直面して未定義の状況が頻発するのは明らかである。そこで、この不

都合を回避するために、構造解消機能の導入に先立ち、まず状態遷移規則を可能な限り拡張して未定義状況を大幅に削減することにした。拡張に当たっては、先に提案されたCoddやLangtonらのアイデア^{1),9)}の自然な延長となるように留意し、以下の通りとした。

- (1) 管の中にある状態‘0’は、隣に状態‘1’があれば‘1’に遷移する。そうでなければ‘0’のままとする。
- (2) 管の中にある状態‘1’は、隣に状態‘7’があれば‘7’に遷移する。もしくは隣に状態‘6’があれば‘6’に遷移する。もしくは隣に状態‘4’があれば‘4’に遷移する。
- (3) 管の中にある状態‘4’、‘6’、‘7’は、隣に状態‘0’があれば‘0’に遷移する。
- (4) 状態‘2’は、隣に状態‘3’があれば‘1’に遷移する。もしくは隣に‘2’があれば、‘2’の状態を維持する。

上記のうち、1, 2, 3は、管の中における信号の伝播についての一般的な規則を定義している。また4は、2つの管の結合についての一般的な規則を定義している。なお、あるセルが管の中にあるかどうかの判定には「そのセルの周囲の4近傍に状態‘1’、‘2’、‘4’、‘6’、‘7’に含まれるものが2個以上あるかどうか」という基準を採用した。

第二に、CAの状態集合の中に新しく解消状態‘8’を導入し、これに関する規則を次のように定めた。

- (1) 解消状態‘8’は無条件に‘0’に遷移する。
- (2) 解消状態‘8’が近傍に存在するとき、
 - (a) 状態‘0’及び‘1’は、近傍に状態‘2’-‘7’のいずれかがあれば‘8’に遷移する(解消状態の伝染)。そうでなければ、‘0’もしくは‘1’の状態を維持する。
 - (b) 状態‘2’、‘3’、‘5’は‘0’に遷移する(管構造の解消)。
 - (c) 状態‘4’、‘6’、‘7’は‘1’に遷移する(管内における信号の解消)。

これらの定義により、解消状態は、管に沿って伝播しながら、近接する構造を順次解消していく能力を得る。その伝播の方向は、管内で信号が流れる方向と一致する。これは、図5に示すように、信号の流れに逆らった伝播が信号列によって阻害されるためである。このような性質を解消状態に与えることにより、個体の一部分(腕の先端)のみの構造解消が起こる可能性もたらされる。このことが生み出す効果については後で紹介する。

第三に、Langtonから継承した状態遷移規則に対し、1箇所だけ次のような修正を施した。

* 後述するように、この継承には1つだけ例外が存在する。

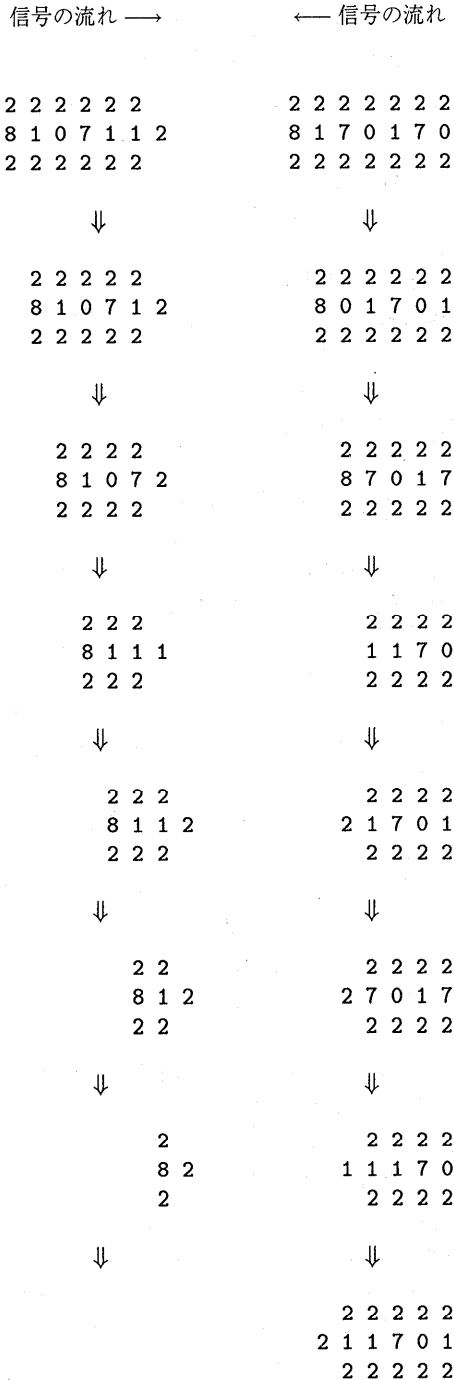


図5 解消状態‘8’の振舞い。空白は全て背景状態‘0’で占められている。解消状態が信号の流れと同方向に伝播する場合(左図)は、管構造はその先端まで完全に解消されるが、解消状態が信号の流れと逆に伝播する場合(右図)は、その進行は信号列によって阻害される。従って、解消状態は常に信号の流れに沿って管構造を解消していくことになる。

Fig. 5 Behavior of dissolving state ‘8’.

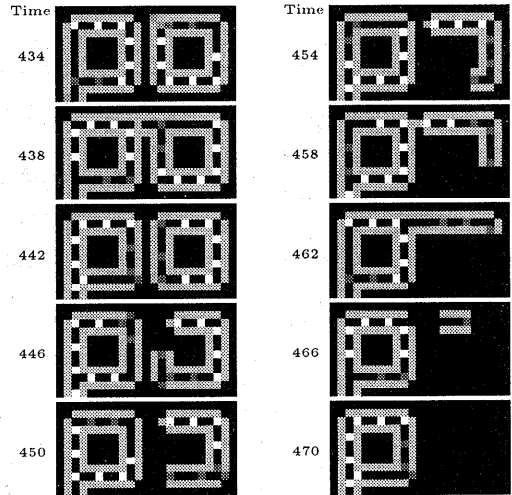
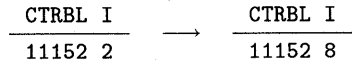


図6 SDSR ループが構造解消としての死を生じる様子。右の個体は左に腕を伸ばそうとする (time=438) が、すでにそこが他の個体に占有されているため、解消状態が右の個体の左上部の管内に出現する (time=442)。発生した解消状態は管に沿って反時計回りに伝播しながら近接する鞘を次々と解消していき (time=446-462)、ついに右のループは完全に消滅する (time=466-470)。

Fig. 6 Death as structural dissolution of the SDSR loop.



CTRBL はそれぞれ近傍のセルの状態を、I は状態遷移の写像となる状態をそれぞれ表している。この修正は、SR ループの死の最初に鞘の薄片を発生させる状態遷移規則を、代わりに解消状態を発生させるように変更したものである。

第四に、以上の定義によってもなお未定義となつて残った状況については、全て解消状態‘8’に遷移するものとした。

上記の改訂により、ひとたびあるセルが解消状態になると、それを含む一連の構造は解消状態の伝播により急速に消失するようになる。即ち、SDSR ループは、SR ループからそっくり継承した自己増殖能力に加えて、自らの構造を解消する能力を獲得する。SDSR ループが構造解消としての死を生じる様子を図6に示す。これは、アポトーシスのような細胞のプログラム死に似た現象であると考えられることもできる。但し、SDSR ループにおける構造解消は、個体の中に遺伝的にプログラムされているのではなく、自然法則である状態遷移規則の中にプログラムされていることに注意が必要である。

また、SDSR ループが個体の一部分を解消させて外界の困難をある程度克服するという興味深い現象も観察された。例えば、図7のようにループが増殖しようと

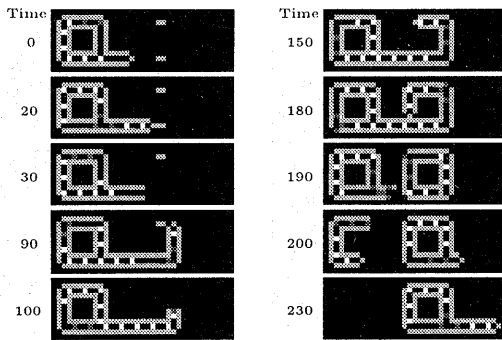


図7 SDSR ループの器官構造解消の様子。SDSR ループが増殖しようとする先に2個の鞘の小片を配置する (time=0)。個体は腕を伸ばしていくが、腕の先端が小片に接すると未定義の状況が発生して解消状態が生じ、そのため小片をふくめて腕の先端部が解消する (time=20-100)。こうして障害物を取り除いた後、右側に正常な子個体が生成される (time=150-190)。但し、障害物を除去する過程で腕の長さに変化が生じているため、親個体の中に不整合が生じて、構造解消がおこる (time=190-230)。

Fig. 7 Structural dissolution of organs of the SDSR loop.

する先に障害物(鞘の小片)を配置した場合、SDSR ループは障害物を腕の先端と共に構造解消させることによって除去し、正常に自己増殖を行なうことがある。これは、例えばトカゲが外敵から逃げるために尻尾を切ったりする行動と同様、個体全体の生存を確保するために、個体の中の一部の器官を廃棄する現象であると解釈することもできる^{*}。

本節で述べた構造解消の導入の手順を、他のCAモデルにも応用可能なように一般化して整理すると、次のようになる。

- (1) CAの状態集合に解消状態‘d’を追加する。
- (2) ‘d’は背景状態‘0’に遷移するように定める。
- (3) ‘d’の伝播に関する規則を定める。
- (4) ‘d’に隣接する構造の解消に関する規則を、必要に応じて適宜定める。
- (5) 未定義の状況はすべて‘d’に遷移するように定める。

これらのうち、1、2及び5はどのようなCAにも一様に適用することが可能であるが、3及び4に関してはモデルに応じた工夫が必要となる。これらの操作がモデルに対して適切に行なわれれば、そのCAは、空間内のあるセルに設計者の意図せぬ状況が発生した場合、そこに

解消状態を発生させ、そのセルを含む一連の構造を速やかに空間から除去する能力を備えるようになるであろう。この手法は、今回対象としたLangtonのSRループに限らず、様々なCAに応用が可能であると考えられる。

4. 実験

本節では、SRループとSDSRループとを用いて行なった幾つかの実験の結果を紹介する。

実験に先立ち、SRループにも、解消状態‘8’に関するもの以外はSDSRループと全く同様に状態遷移規則の拡張を施した。その際、未定義のまま残った状況については、状態遷移を起こさないと設定した。

4.1 無限空間内での自己増殖

第一の実験は、ループを無限空間内において自由に増殖させる試みである。図8は、無限空間内での増殖過程における個体の空間分布の変化を、SRループとSDSRループとを比較して示したものである。1世代は、ループが1回の自己増殖を完了するのに必要な151ステップを表す。

成長するコロニーの外周部分においては、空間の閉塞がなく構造解消が生じないため、個体の様子はSRループとSDSRループとで全く同一である。しかしコロニーの内部においては、SRループでは機能破綻を生じた個体の残骸が静的に残っているのに対し、SDSRループでは構造解消が頻繁に生じて一度占有された空間が解放され、新たな個体が増殖している。そのためSDSRループのコロニーの内部は粗に見える。

双方の増殖過程における生存個体数の時間変化を各世代ごとにサンプリングして比較したものが図9である。この図から、SDSRループが個体数においてSRループを遥かにしのぐことが明確にわかる。SDSRループは、SRループでは個体の死骸で埋まっているコロニーの内部に進出できるため、崩れた渦巻のような形に2次元的に広がる。このため、時間の進行にともなってその生存個体数は $O(\text{Generation}^2)$ に近付くと予想される。これはSRループがコロニーの表面にしか増殖できず、その生存個体数が $O(\text{Generation})$ であるのに対して、本質的に異なっている。

4.2 有限空間内での自己増殖

第二の実験は、有限空間内においてループを増殖させる試みである。有限空間においては、SDSRループの優位性は先の実験よりもさらに強調される。図10は、有限空間内での増殖過程における個体の空間分布の変化を、図8同様に示したものである。空間の大きさは 200×200 セルとし、空間の境界は x, y 方向それぞれに

^{*} 但し、SDSRループにおけるこの現象は、解消状態の伝播方向を管内の信号の流れと同方向に制限した今回の状態遷移規則の拡張方法に依存していることに注意が必要である。即ち、この能力は構造解消をモデルに導入したこと自体から本質的に導かれた現象ではなく、その次の段階として、個体的一部分に限った構造解消を可能としたことから派生した現象である。

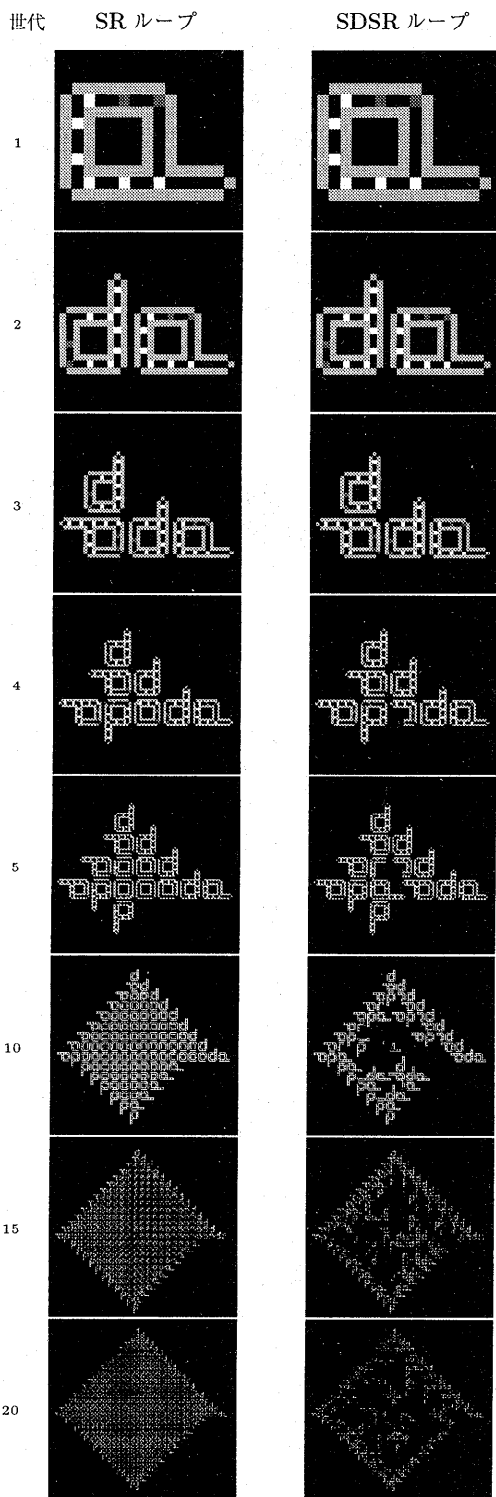


図8 無限空間内でのSR/SDSRループの増殖の様子。各図の縮尺はコロニーの大きさに応じて変更してある。

Fig. 8 Development of spatial distribution of SR/SDSR loops in infinite space.

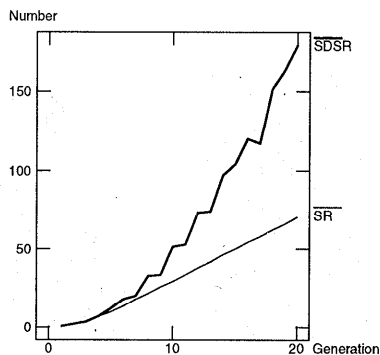


図9 無限空間内で増殖させた場合(図8)のSR/SDSRループそれぞれの生存個体数の変化。

Fig. 9 Development of the number of living SR/SDSR loops in Figure 8.

周期的に連続しているとした。

SRループの世界では、空間内に広がったコロニーの両端同士が空間の周期性により接触すると、未定義の状況が発生して機能破綻が生じ、自己増殖は正常に行われなくなる。やがて空間の全てが個体の残骸で充満されると、その後は永遠にそのままの状態がつづく。これに対してSDSRループの世界では、新たな個体が増殖可能な空間が構造解消により継続的に生産されるため、自己増殖が活発に継続される。勿論、構造解消によって偶発的に全ての個体が空間から消滅する可能性も孕んでいるが、実際は10000世代以上という極めて長期間に渡る実験を行なってもループの絶滅は観察されなかったので、SDSRループは自己増殖を半永久的に継続する能力を獲得しているとみなして差し支えない。これは、SRループが静的な安定状態に陥りやすいのに対して、極めて対称的である。

また、SDSRループの自己増殖過程において、図11のように奇妙な形に融合したループが多数観察された。SDSRループは構造解消の結果極めて長期に渡り自己増殖を継続することが可能となったため、このように表現型同士の直接の相互作用によって融合ループが生じるような稀少な状況に何度も遭遇するようになったものと考えられる。但し、これらは複数のループがそれぞれの腕を結合させることによって生じているため、それらは必然的に自己増殖に必要な腕を失っている。その意味では、これらは全て機能破綻によって自己増殖能力を喪失した死骸であるといえる。これらの融合ループはいずれ近隣の他の正常ループと接触し、構造解消を生じて空間から除去されてしまう運命にある。

なお、今回拡張した状態遷移規則の下では、残念ながらこうした複数個体の表現型同士の相互作用から新種のループが生成されるという現象は生じなかった。これは

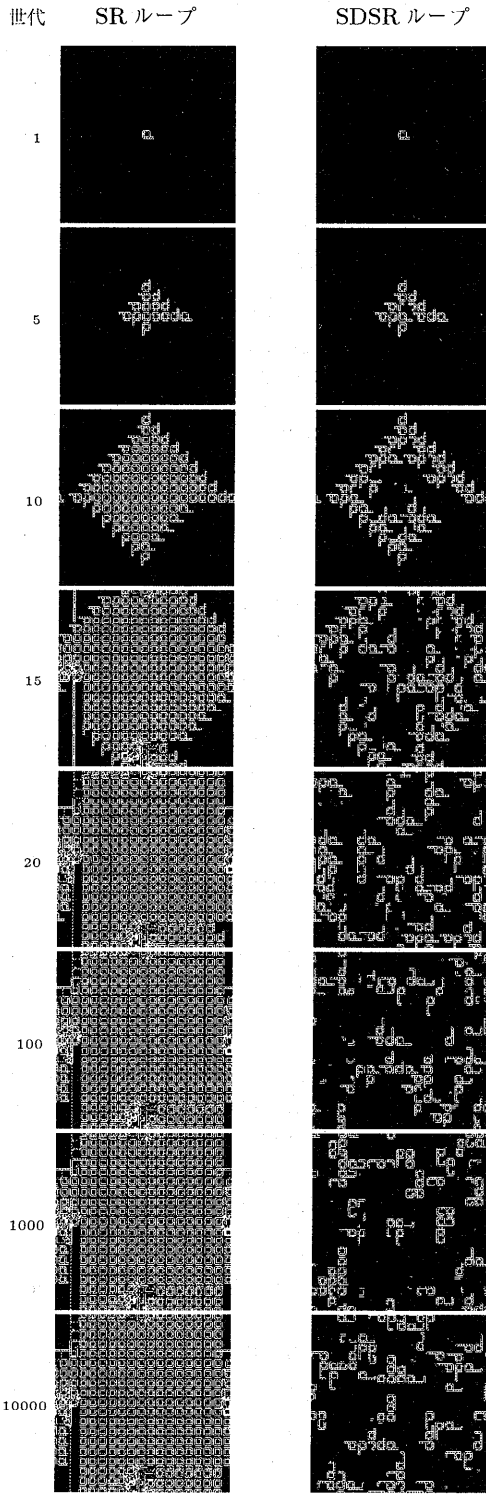


図10 有限空間内でのSR/SDSRループの増殖の様子。各図は全て 200×200 セルに縮尺である。

Fig. 10 Development of spatial distribution of SR/SDSR loops in finite space.

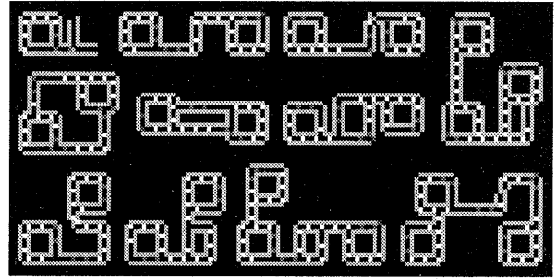


図11 SDSRループの増殖過程において、表現型同士の相互作用により生成された融合ループの例。

Fig. 11 Examples of merged loops produced through the interaction of phenotypes in the course of self-reproductive process of SDSR loops.

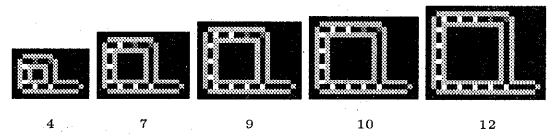


図12 種の異なるループの例。種の名前は各個体に含まれる信号‘7’の数とした。

Fig. 12 Examples of loops of different species.

主に、構造解消の導入に先だって施した状態遷移規則の拡張の中に、新しい腕の出芽に関係する状態‘3’、‘5’、‘6’についての拡張が含まれていなかったためである。この点の改良については今後の重要課題であり、後に簡単に触れる。

4.3 有限空間内での生存競争

第三の実験は、有限空間内において、異なる種のSDSRループの間に生じる生存競争を観察する試みである。Langtonが提案したSRループは腕を伸ばす信号‘7’を6つ含んだものであったが、今回拡張した規則の下では、信号‘7’の数が4以上であれば、任意のサイズのループを構築することができる。図12はその例である。

異なる2つの種のループを同一の有限空間内に配置して増殖させたところ、SDSRループの世界において、time=10000位までの間にどちらか一方が他方を駆逐する現象が観察された。図13は、種4と種6とを競争させた例である。この対戦を種4から種12まで総あたり形式で行なった結果を併せて表2に示す。この結果から、今回の条件の下では、一般に小さいサイズの種の方が適応度が高いことが確認される。これは、個体のサイズが小さければそれだけ1回の自己増殖に必要な時間が短く、かつ1つの個体の構造解消がコロニー全体に与える損失が小さくなるためであると考えられる。

また同時に、今回のモデル特有の現象として、種9や種12といった $3n$ の種が比較的高い適応度を示した。その一例として、種9が種7を駆逐する様子を図14に

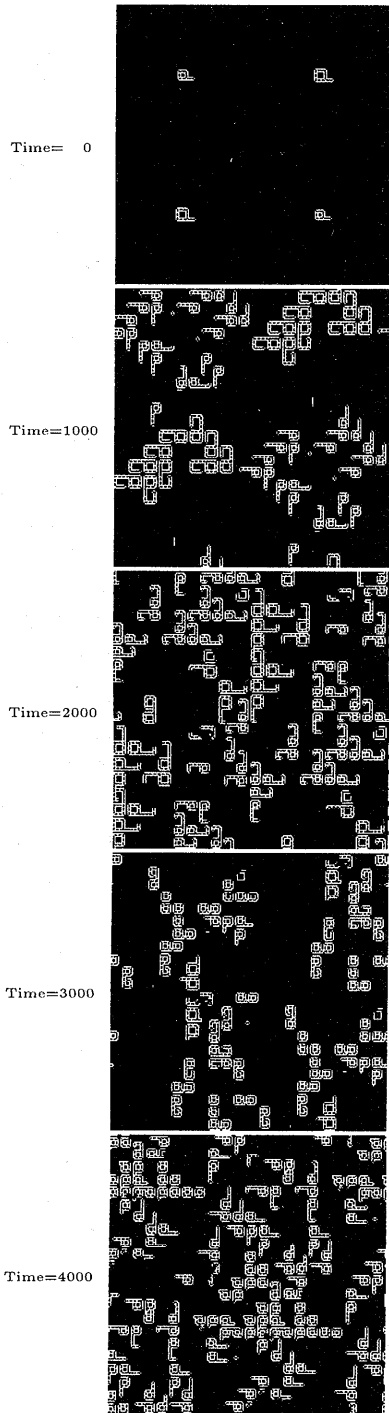


図 13 種 4 と種 6 の間に生じた生存競争の例。開始時点では左上と右下に種 4 の個体を、右上と左下に種 6 の個体をそれぞれ配置する (time=0) . 時間の進行とともに徐々に種 4 が優勢になり (time=1000-3000) , 最終的に種 6 は完全に駆逐される (time=4000) . 空間の大きさは 200 × 200 セル.

Fig. 13 Example of struggle for existence between loops of species 4 and 6.

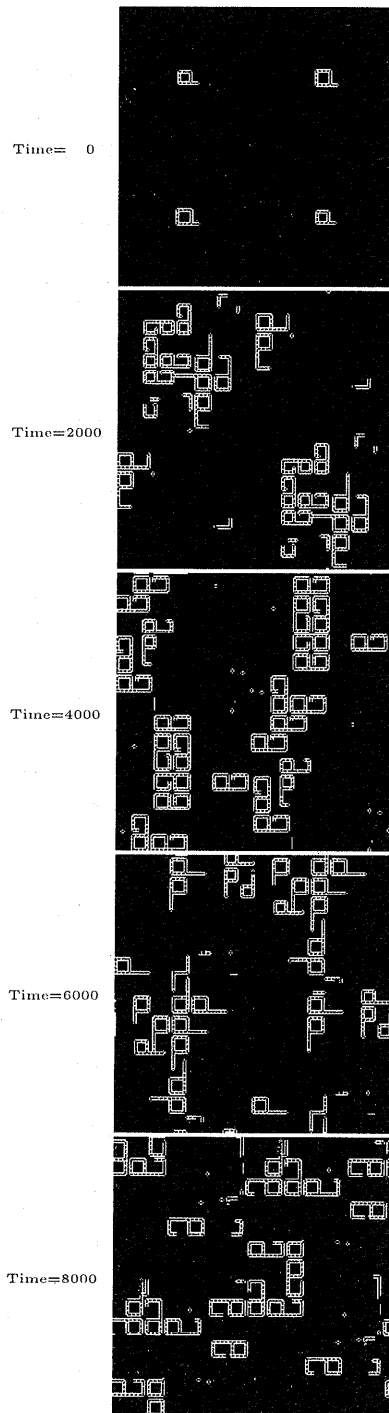


図 14 種 7 と種 9 の間に生じた生存競争の例。開始時点では左上と右下に種 7 の個体を、右上と左下に種 9 の個体をそれぞれ配置する (time=0) . このケースでは、個体のサイズが大きく一見不利に見える種 9 が、接戦の末、最終的に種 7 を駆逐する (time=8000) . 空間の大きさは 200 × 200 セル.

Fig. 14 Example of struggle for existence between loops of species 7 and 9.

表2 異なる種同士を同一空間内で競争させた場合の勝敗。先に相手を駆逐した方の種を勝ちとした。初期条件の微妙な違いに結果が大きく左右されるのを防ぐ意味で、空間の1辺の大きさが200、202、204セルの3つの場合について実験を行ない、その結果の集計を表に示した。Aについて、Oは全勝、oは2勝1敗、xは1勝2敗、Xは全敗をそれぞれ表す。適応度の高さは4, 5, 6, 7, 9, 8, 12, 10, 11の順となった。

Table 2 Records of a round-robin among all species.

A	B									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
4		O	O	O	O	O	O	O	O	O
5	X		O	O	O	O	O	O	O	O
6	X	X		O	O	O	O	O	O	O
7	X	X	X		o	o	O	O	O	O
8	X	X	X	x		X	O	O	O	O
9	X	X	X	x	O		O	O	O	O
10	X	X	X	X	X	X		O	x	
11	X	X	X	X	X	X	X	X		X
12	X	X	X	X	X	X	o	O		

示す。これは、Langtonによって構築された状態遷移規則が種6にとって最適となるように設計されていること、及び、ループの中を流れる信号が3つのセルを1単位として構成されているため、個体の大きさが3セル異なるもの同士の間で似たような状況が生じやすいこと、の2点から、 $6 + 3i$ ($i = 0, 1, 2, \dots$) という種の適応度が相対的に高くなっているためであると考えられる。

5. 考察

本節では、SDSR ループとその振舞いから推察される事柄、及びこの成果を用いた今後の応用などに関し、幾つかの考察を述べる。

5.1 構造解消の意義

CAを用いた従来の自己増殖モデルの研究では、自己増殖現象そのものを実現させることにのみ重点が置かれていたので、その結果実現された自己増殖機械は、設計者の意図した規則的な振舞いしか示さないものがほとんどであった。これに対して本研究では、CAの状態集合に新たに解消状態‘8’を導入し、またCAの状態遷移規則に幾つかの変更を加えることによって、LangtonのSRループに構造解消としての死を実現し、単純な結晶成長のようだったその振舞いを動的でより生命らしいものに変貌させることに成功した。

そこでまず初めに、今回導入した構造解消という現象が、システムに新たな振舞いをもたらす上でのどのような意義を持っていたのか、という点について考察する。

新たに導入された解消状態‘8’に関する規則以外は全く同一の2種類のループについてその振舞いを比較した結果、SDSRループの世界においてのみ観察された現象は、整理すると次のようになる。

- (1) 個体の一部を構造解消させることによって、外界の困難をある程度克服する能力が生じた。
- (2) 無限空間内での自己増殖の際、生存個体数が2次関数的に増加するようになった。
- (3) 有限空間内において、自己増殖が半永久的に継続された。
- (4) 増殖の過程で、複数の個体の表現型が直接相互作用することにより、融合した奇形ループが多数発生した。
- (5) 同一の有限空間内で増殖する異種ループ間に、排他的競争が生じた。

このうち(2)は、有限の大きさを持つコロニーの内部にループが再度進出可能になったためであるから、本質的には(3)と同じことである。(4)は、自己増殖が長期に継続された結果として、融合ループを形成する稀少な状況が多数発生したのであるから、(3)が実現したことによる副産物であるとみなすことができる。また、(5)は、双方の種の自己増殖活性が長期的に継続したことによって実現されたこと、及び、相手種を環境として見た場合には外的困難の克服に相当することから、(3)と(1)の両方に端を発する現象であると解釈できる。以上のように考えると、構造解消の本質的な意義は(1)と(3)にあるものと考えられる。この両者の違いは構造解消の生じる階層が器官レベルか個体レベルかの違いであり、システムの振舞いを考察する上ではそれほど本質的ではないといえる。

両者に共通する重要な点は、(1)においても(3)においても、構造解消が環境との不適合を生じたサブシステムを消滅させるある種のネガティブフィードバック機構として機能している、ということである。この機構により、消滅したサブシステムが占有していた資源(この場合は空間)は、後に別のサブシステムによって使用されるようになり、このプロセスの反復によって、システム全体に動的で適応的な安定性、さらには進化の可能性がもたらされている、と考えられる。例えば、個体は部分的な器官の解消によってその生存状態を確保し、コロニーは個体の解消によってそのダイナミックな振舞いを継続している。

5.2 構造解消と戦略的な死

次に、死と構造解消との関係について、拙いながら一考を加えたい。

本研究における構造解消のメカニズムは、各ループの中の遺伝型に記述されているのではなく、CAのダイナミクスを支配する状態遷移規則(=自然法則)の中に埋め込まれている。一方、近年の分子遺伝学の発展の結果、老いや死に直接関係する様々な遺伝子が発見され

題となっているが、これらの発見からは、現実の生物に死が遺伝的な方法でプログラムされていることが示唆されている。これらのことから、本研究における構造解消と現実の生物の死とを短絡的に同一視できないことが、容易に理解できよう。

ここで、死に関する一つの疑問が生じる。もし死というメカニズムが個体の中に完全に遺伝的な方法で記述されているならば、進化過程における変異によって死の遺伝子を失った不死の個体が出現し、それらによって死の遺伝子は必ず駆逐されてしまうはずである。この問題は Todd によって指摘されている¹⁸⁾。にも関わらず、老いと死に関する遺伝的なプログラムは、自然選択の過程で駆逐されずに現実の生命の中に実在している。この矛盾について、我々はどのような解釈を加えればよいのだろうか。

筆者は、本研究でモデル化した構造解消の概念が、この問題に解答を与える上での助けとなりうるのではないかと考えている。ここでの仮説は次のようなものである。即ち、本研究の CA の状態遷移規則のように自然法則の中に原始的な構造解消の仕組みが組み込まれているならば、遺伝的にプログラムされた死は有効な戦略となり得て、淘汰されずに個体群の中に残り伝えられてゆくのではないか。換言すれば、「どんなに構造を維持しようと投資しても万物はいずれ朽ちてゆく」という法則を世界が備えている場合には、固定された構造を静的に保持する戦略よりも積極的に構造解消を行なって動的に継承をした方が効率がよくなり、結果として遺伝的にプログラムされた死が選択されるようになるのではないだろうか。

勿論、こうした動的な構造継承の対極に位置する自己保存戦略として、ダイヤモンドの中における炭素原子の配列のように、静的な平衡系において極めて強固な構造を解消せずに継続する、というやり方もある。しかし、こうした構造は一般に単純で規則的かつ静的であり、生命独特の動的で複雑な振舞いの源泉とはなり得ない。生命は際だった非平衡系内に生成される構造であるから、それらは本質的に常に変動し解消する可能性を持つ。こうした基本的な構造解消機構の上に成立する世界では、戦略的な死が他の戦略に比較して有利となり生命の本質的な特徴となることは、大いに起こり得るものと考えられる。

なお、現実の生命における原始的な構造解消の仕組みにあたるものの候補としては、熱力学の第 2 法則を筆頭に、生体高分子の中に比較的切れやすい非共有結合が多く含まれていることや、水分子の電気的極性などによって水溶液中の生体高分子が常に外乱を受けていることな

ど、多くの事柄を挙げるのが可能であろう。また、それらの相互作用や階層化の結果、複雑な高次効果が生じていることも大いに考えられる。こうした現実世界の持つ複雑さに照らしてみると、今回 CA に導入した構造解消は、解消状態の伝播という単純な機構によって生じる極めて抽象的な現象であることが明確となる。従って、今回導入された構造解消に対する具体的な意味付けを考える場合には、「現実世界における特定の現象を近似したものではなく、生命の構造解消の定性的な側面のみを数理的な方法の一つを用いてモデル化したもの」という解釈に留めておくのが現段階では妥当であろう。

5.3 進化モデルとしての SDSR ループ

最後に、SDSR ループの進化可能性について簡単な考察を述べる。

実験の結果、ループの表現型がそれらの直接の相互作用によって変化したこと、及び SDSR ループの世界において異なる種の間には排他的競争が生じたことは、変異と選択という進化を構成する 2 大要因の萌芽がこの系内に認められること、即ち SDSR ループが表現型同士の直接の相互作用によって進化する可能性を潜在的に持っていることを示唆している。もし、あるループ同士の融合によって親とは異なる自己増殖可能な子ループが生じ、そしてその子ループが親よりもこの世界の法則により適合していれば、子ループは空間に広がりやがて親の種を駆逐するであろうことは、想像に難くない。

しかし他方で、こうした表現型の相互作用からもたらされる進化という概念は、通常我々が進化とみなすプロセス、即ち遺伝型の上に偶発的に起こる変異によってもたらされる表現型の変化、という考えには馴染みにくい。この通常の考え方は、「生命の細胞 = DNA というテープに記述された内容に忠実に子細胞を構築できる計算・構成万能な機械 (universal constructor)」という認識に基づいている。勿論、人類を含む真核細胞生物のような高等な生命に関していえば、この考えはほぼ正しいといえる。

しかし、Langton も述べている¹⁾ように、黎明期の生命が構成万能性を備えていなかったことについては、疑いの余地は少ない。なぜなら、計算・構成万能性を持つ機械を実現するためには、先にふれた通り、一般に非常に大規模なシステムが必要であり^{7),9),11),15),16)}、発生当初の簡単な生命がこうした機構を最初から実現していたとは考えにくいからである。おそらく、発生当初の生命においては、遺伝型と表現型は明確に区別できない同じスケールの物理的構造であり、互いに似たような特徴を保持していたに違いない。こうした状況の下では、遺伝型の偶発的な変化だけでなく、表現型の相互作用の

ような環境要因も、進化の原動力となっていた可能性が高いといえる。

Langton が SR ループを考案した目的の一つは、構成万能性を持たないが自己増殖を行なうことのできる、非常に小さな原始生命のモデルを作ることであった。この世界における遺伝型と表現型は、共に影響を及ぼし合う可能性を持った同じスケールの空間構造である。これを発展させた SDSR ループの世界において、融合したループが多数生成されたことは、こうした原始的な進化の始まりを彷彿とさせる。先述の通り、現段階の SDSR ループは、まだ不十分な点が多々あるため進化を生じるレベルに達していないが、今後さらに幾らかの改良を施して自律的な進化を導入することができれば、SDSR ループは生命の原始進化を考察する上で有用なモデルになり得るものと考えられる。

また、この方向性に沿った新たな進化モデルが、決定的な振舞いをする CA 上に実現された場合、それは GA や GP、*Tierra* などに代表される従来の進化モデルには見られなかった、次のような非常に特徴的な性質を持つようになるかと予想される。

- (1) 遺伝型と表現型という2つの構造が明確に存在する進化モデルでありながら、遺伝型に対する確率的な操作を一切用いずに進化過程が創出される。
- (2) 生成された構造がその世界に適応しているか否かは、状態遷移規則によって完全に自律的に決定されるので、全体を統括する管理者によって個々の個体の適応度を判定させる必要がない。
- (3) 系の振舞いは、全て隣接セル間の極めて局所的な相互作用によって生じるので、系全体が非常に粒度の細かい並列性を備える。

これらの性質は、大規模な進化システムが非常に簡単なアルゴリズムを用いて高並列に実現可能となることを示している。現在、CA を用いて並列型計算システムを実装する研究が様々な方法で行なわれている^{19)~22)}が、本研究の今後の展開は、こうした新しい計算モデル構築の試みに対しても、少なからぬ貢献をもたらす可能性を持っているのではないかと筆者は考えている。

6. おわりに

本研究では、Langton の SR ループを改訂し、構造解消の能力を備えた SDSR ループを実装した。この SDSR ループを用いて幾つかの実験を行なった結果、SR ループの世界では見られなかった動的な安定性や潜在的な進化可能性など、注目すべき振舞いが新たに観察された。

自己増殖の単純な一モデルに過ぎなかった Langton

の SR ループは、本研究で行なった規則の拡張を通じて、新たな進化モデルとしての第一歩を踏み出した。現在筆者は、SDSR ループが実際に進化するようにモデルを改良する作業を継続して進めている。これは Langton によって予言された「CA 上の仮想状態機械 (virtual state machines) による自然選択と進化の過程」²³⁾ を実現する試みである。

なお、本稿で紹介した SDSR ループに関する情報を下記の WWW サイトでも紹介している。

<http://proton.is.s.u-tokyo.ac.jp/~sayama/sdsr/>
本稿に掲載した図のカラー版の動画も掲載されているので、関心をお持ちの方には一度ご覧いただきたい。

謝辞

本研究の基となった C. G. Langton 博士とその研究に対し、ここに心から敬意を表する。また、本研究を推進する上で貴重な助言を下された、小柳義夫、Chris Adami、佐山真理の各氏、及び匿名の査読者の方々に、この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

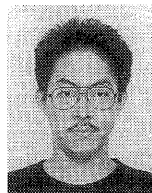
- 1) Langton, C. G.: Self-Reproduction in Cellular Automata, *Physica D*, Vol. 10, pp. 135-144 (1984).
- 2) Sayama, H.: Introduction of structural dissolution into Langton's self-reproducing loop, *Artificial Life VI: Proceedings of the Sixth International Conference on Artificial Life* (Adami, C., Belew, R. K., Kitano, H. and Taylor, C. E.(eds.)), Los Angeles, California, MIT Press, pp. 114-122 (1998).
- 3) Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts (1989).
- 4) Holland, J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan (1975).
- 5) Koza, J. R.: *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts (1992).
- 6) Ray, T. S.: An Approach to the Synthesis of Life, *Artificial Life II: Proceedings of the Workshop on Artificial Life* (Langton, C. G., Taylor, C., Farmer, J.D. and Rasmussen, S.(eds.)), SFI Studies in the Sciences of Complexity, Vol. X, Santa Fe, New Mexico, Addison-Wesley, pp. 371-408 (1990).

- 7) von Neumann, J.: *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana (1966). edited and completed by A. W. Burks.
- 8) Byl, J.: Self-Reproduction in Small Cellular Automata, *Physica D*, Vol. 34, pp. 295-299 (1989).
- 9) Codd, F. F.: *Cellular Automata*, ACM Monograph Series, Academic Press, New York and London (1968).
- 10) Morita, K. and Imai, K.: A Simple Self-Reproducing Cellular Automaton with Shape-Encoding Mechanism, *Artificial Life V: Proceedings of the Fifth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems* (Langton, C.G. and Shimohara, K.(eds.)), Nara, Japan, MIT Press, pp. 489-496 (1996).
- 11) Pesavento, U.: An implementation of von Neumann's self-reproducing machine, *Artificial Life Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 337-354 (1995).
- 12) Reggia, J. A., Armentrout, S. L., Chou, H. H. and Peng, Y.: Simple Systems That Exhibit Self-Directed Replication, *Science*, Vol.259, pp. 1282-1287 (1993).
- 13) Sipper, M.: Non-Uniform Cellular Automata: Evolution in Rule Space and Formation of Complex Structures, *Artificial Life IV: Proceedings of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems* (Brooks, R. and Maes, P.(eds.)), Cambridge, Massachusetts, MIT Press, pp. 394-399 (1994).
- 14) Tempesti, G.: A new Self-Reproducing Cellular Automaton Capable of Construction and Computation, *Advances in Artificial Life: Proceedings of the Third European Conference on Artificial Life (ECAL'95)* (Morán, F., Morcno, A., Merelo, J. J. and Chacón, P.(eds.)), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 929, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Granada, Spain, Springer-Verlag, pp. 555-563 (1995).
- 15) Vitányi, P. M. B.: Sexually Reproducing Cellular Automata, *Mathematical Biosciences*, Vol. 18, pp. 23-54 (1973).
- 16) Arbib, M. A.: A Simple Self-Reproducing Universal Automaton, *Information and Control*, Vol. 9, pp. 177-189 (1966).
- 17) von Neumann, J.: The General and Logical Theory of Automata, *Papers of John von Neumann on Computing and Computer Theory* (Aspray, W. and Burks, A. W.(eds.)), MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 391-431 (1948).
- 18) Todd, P. M.: Artificial Death, *Proceedings of the Second European Conference on Artificial Life (ECAL'93)* (Deneubourg, J. L., Bersini, H., Goss, S., Nicolis, G. and Dagonnier, R.(eds.)), Vol. 2, Brussels, Belgium, pp. 1048-1059 (1993).
- 19) Chou, H.H. and Reggia, J.A.: Problem Solving during Artificial Selection of Self-Replicating Loops, *Physica D*, Vol. 115, pp. 293-312 (1998).
- 20) Gers, F. and de Garis, H.: CAM-Brain: A New Model for ATR's Cellular Automata Based Artificial Brain Project, *Evolvable Systems: From Biology to Hardware, Proceedings of the First International Conference on Evolvable Systems (ICES'96)* (Higuchi, T., Iwata, M. and Liu, W.(eds.)), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1259, Tsukuba, Japan, Springer-Verlag, pp. 437-452 (1996).
- 21) Mitchell, M., Crutchfield, J. P. and Hraber, P. T.: Evolving Cellular Automata to Perform Computations: Mechanisms and Impediments, *Physica D*, Vol. 75, pp. 361-391 (1994).
- 22) Sipper, M.: *Evolution of Parallel Cellular Machines*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1194, Springer-Verlag, Berlin (1997).
- 23) Langton, C. G.: Studying Artificial Life with Cellular Automata, *Physica D*, Vol.22, pp.120-149 (1986).

(平成10年4月22日受付)

(平成10年6月12日再受付)

(平成10年6月29日採録)



佐山 弘樹 (学生会員)

昭和46年生。平成6年東京大学理学部情報科学科卒業。平成8年同大学院大学院修士課程修了。現在同大学院博士後期課程在学中。生命現象シミュレーションへの並列処理の応用、セラオートマタによる生命の各種挙動の記述などに興味をもつ。日本応用数理学会、人工知能学会、シミュレーション学会各会員。