

# 人工生命の研究動向

皆川 雅章

近年、学際的な研究領域として、種々の分野から関心を集めている人工生命の研究動向を情報学的な側面から概説する。人工生命は「ありうる生命 (life-as-it-could-be)」の枠組みの中に、「われわれが知っている生命 (life-as-we-know-it)」を位置づけ、より一般化した形式でコンピュータなどの人工的媒体上で生命体を実現することにより、生命への理解を深めようとする研究分野である。実現の過程では、人工知能とは逆のボトムアップ的アプローチにより局所的な相互作用から大域的な挙動が創発される。本稿では、サンタフェ研究所のラングトンの提唱により開催されたワークショップ、Artificial Life I, II, IIIにおける話題を中心に、研究例の紹介を行ないつつ、今後の方向を探る。

## 1. はじめに

「人工生命 (AL: Artificial Life)」という名のもとに学際的な研究分野が構成され始めている。わが国においても、ニューラル・ネットワーク、遺伝的アルゴリズムなど、生物界の情報処理を模倣した計算パラダイムを含んだ大きな枠組みとして、方向付けが模索され始めている。各学会誌、雑誌等の記事からも、人工生命に対する関心の高さが伺える<sup>8),10),11),12),27)</sup>。

この人工生命という分野の命名者はサンタフェ研究所 (Santa Fe Institute) のラングトン (Langton) である。彼はコンウェイのライフゲームやフォン・ノイマンの自己増殖するオートマトンに触発され、コンピュータ上で、自己増殖するセルオートマトンのシミュレーションの実現、セルオートマトンの空間での生命が存在可能な複雑な系の存在条件の考察などを行なった。そして1987年にロスアラモスにおいて開催された最初の人工生命ワーク

ショップのオーガナイザとなった。

この当時、ラングトンは、ロスアラモスのCNLS (Center for Nonlinear Studies) に籍を置き、自分自身のALの研究を推進するのみでなく、自分と同様な問題意識を持つ研究者達を組織化して、新しい分野を構成しようとしていた。当時彼は、そのような人々が自分の周囲にはいないことを知っていた。ALの分野に属すると彼が考えられる論文は

Physica D

Journal of Theoretical Biology

Complex Systems Journal

American Scientist

などの雑誌において見いだされたという。彼はこれらの異なった分野で、個々にAL的な方向付けを持って研究を行なっている人々が意見交換を出来る状況をつくりだそうとした。ラングトンはこのときの状況を、「ALの研究分野は存在していた、ただし表面化してはいなかった」と述べている。

ラングトンはこれらの研究者達に呼びかけ、個々の経験を共有し合い、それらを関連

付け、各々の理論を説明し、それに基づいて新たな分野の境界を定義しようとした。この意図を反映して、会議のテーマは

*An Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living System*

であった。

会議の呼びかけの文章は以下の通りであった。

Artificial life is the study of artificial systems that exhibit behavior characteristics of natural living systems. It is the quest to explain life in any of its possible manifestations, without restriction to the particular examples that have evolved on earth. This includes biological and chemical experiments, computer simulation, and purely theoretical endeavors. Processes occurring on molecular, social, and evolutionary scales are subject to investigation. The ultimate goal is to extract the logical form of living system.

Microelectronic technology and genetic engineering will soon give us the capacity to create new life form in silico as well as vitro. This capacity will present humanity with the most far-reaching technical, theoretical, and ethical challenges it has ever confronted. The time seems appropriate for a gathering of those involved in attempts to simulate or synthesize aspects of living system.

この呼びかけに対して、約 160 名の、コンピュータ科学者、人類学者、理論生物学者、集団遺伝学者、生化学者、動物行動学者、物理学者らが集まった。参加者のなかにはドーキンス (Richard Dawkins)、リンデンマイ

ヤー (Aristid Lindenmayer)、ホランド (John Holland) らの顔が見られた。ドーキンスは利己的な遺伝子 (The Selfish Gene)、ブライント・ウォッチメイカー (The Blind Watchmaker) の著者、リンデンマイヤー、ホランドは各々 L システム、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms) の提唱者としてよく知られている。

初回のワークショップの予稿においてラングトンは人工生命について以下のように述べている。

Artificial Life is the study of man-made systems that exhibit behaviors characteristic of natural living systems. It complements the traditional biological sciences concerned with the analysis of living organisms by attempting to synthesize life-like behaviors within computers and other artificial media. By extending the empirical foundation upon which biology is based beyond the carbon-chain life that has evolved on Earth, Artificial Life can contribute to theoretical biology by locating life-as-we-know-it within the larger picture of life-as-it-could-be.

このワークショップにおいて、AL の本質に関して、参加者の間で次第に、次のような合意が得られていったとラングトンは後述している<sup>17)</sup>。

- ① トップダウンではなく、ボトムアップ的モデル化
- ② 大域的ではなく、局所的な制御
- ③ 複雑な仕様ではなく、単純な仕様
- ④ 予め指定された挙動ではなく、創発的な挙動
- ⑤ 個体のシミュレーションではなく、集団のシミュレーション

会議は熱気に包まれ、1956 年の人工知能に

表1 人工生命ワークショップ (含予定)

AL 会議名	開催年 (開催地)
Artificial Life I	1987 (Los Alamos, USA)
Artificial Life II	1990 (Santa Fe, USA)
Artificial Life III	1992 (Santa Fe, USA)
Artificial Life IV	1994 (Cambridge, USA)
Artificial Life V	1996 (Kyoto, Japan)

表2 人工生命関連学会での講演カテゴリー  
( ( )内は件数)

Artificial Life II	
A2-1: Origin/Self-Organization	(7)
A2-2: Evolutionary Dynamics	(6)
A2-3: Development	(1)
A2-4: Learning and Evolution	(8)
A2-5: Computation	(2)
A2-6: Philosophy/Emergence	(4)
A2-7: The Future	(1)
Artificial Life III	
A3-1: A Replicator	(1)
A3-2: Evolution	(4)
A3-3: Ecology and Evolution	(5)
A3-4: Artificial Worlds	(2)
A3-5: Robotics	(4)
A3-6: Biochemistry	(1)
A3-7: Morphology and Collective Pattern Formation	(2)
A3-8: Dynamics	(3)
A3-9: Emergence	(1)
A3-10: Philosophy	(3)
European Conference on Artificial Life	
E1: Autonomous Robots	(14)
E2: Swarm Intelligence	(9)
E3: Learning and Evolution	(12)
E4: Adaptive and Evolutionary Mechanisms	(7)
E5: Epistemological Issues and Conceptual Foundations	(14)

おけるダートマス会議に比較されたほどであったという。

これに引き続き、第2回、第3回のワークショップが開催され、第4回、第5回目もすでに予定されている。ヨーロッパにおいても人工生命に関する学会が開催され、昨年で2回目を数えている。回を重ねるごとに話題を構成する分野が広がっているようである (表1, 表2 参照)。

## 2. Artificial Life I, IIからの話題

Artificial Life I, II及び、これらに関連した、いくつかの話題を紹介する。

### 鳥の群行動シミュレーション (Boids)

上述の局所的相互作用と、創発の典型的な例がレイノルズの Boids (= Birdoid) である<sup>19),22)</sup>。これはコンピュータグラフィックスにおける鳥の群行動のシミュレーションで、群れ全体に対する大域的挙動の指定はなく、個々の鳥に対して、

- ① 群れを維持する力
- ② 群れに属する鳥が同一速度で移動できるための速度調節能力
- ③ 鳥相互間の過度の接近を防ぐための離反する力

なる基本的な挙動の仕様が与えられているだけである。これによってシミュレーション上の鳥達は群れ全体で障害物を回避しながら飛行する。図1に示すように、紙飛行機のような形をした鳥の群れは、柱状の障害物群の各々を通過する際にいったん分離するが、障害物を通過し終わるのに伴い、再びもとの群れを構成する。この集団行動は予め与えられたものではなく、局所的な相互作用の結果として得られている。

### セルオートマトン

これまで、現在の人工生命研究とセルオートマトンとは深いかかわりを持ってきた<sup>22)</sup>。ラングトン自身もセルオートマトン (CA: Cellular Automata) に関していくつかの成果を公表している<sup>15),16)</sup>。

そのひとつは、自己増殖するセルオートマトンのシミュレーションの実現である。これはフォン・ノイマンの自己増殖するオートマトンに触発されて始められたもので、図2に示すようにQ字型のループ内を信号が伝播

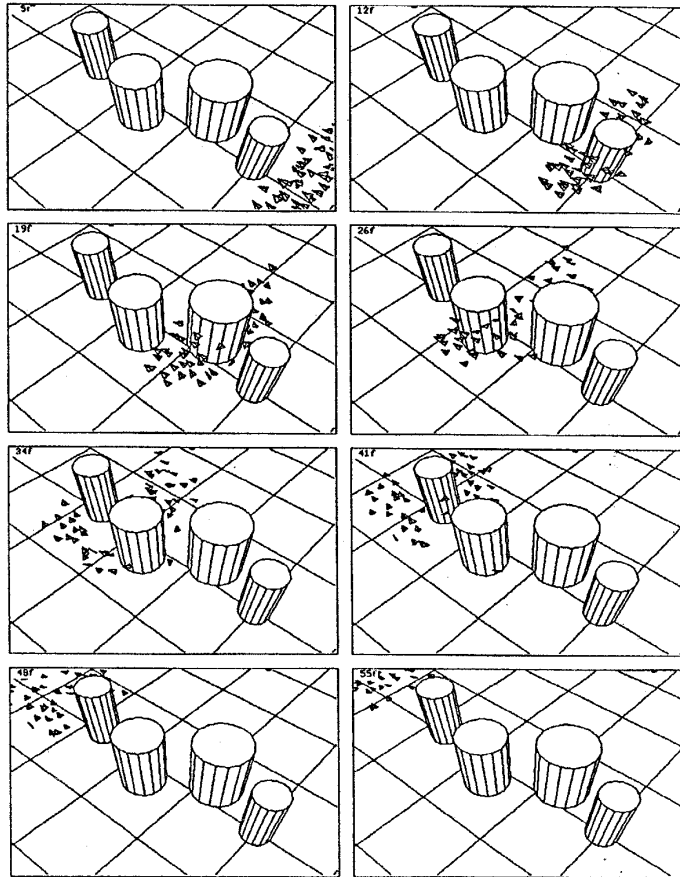


図1 Boids (Reynolds)

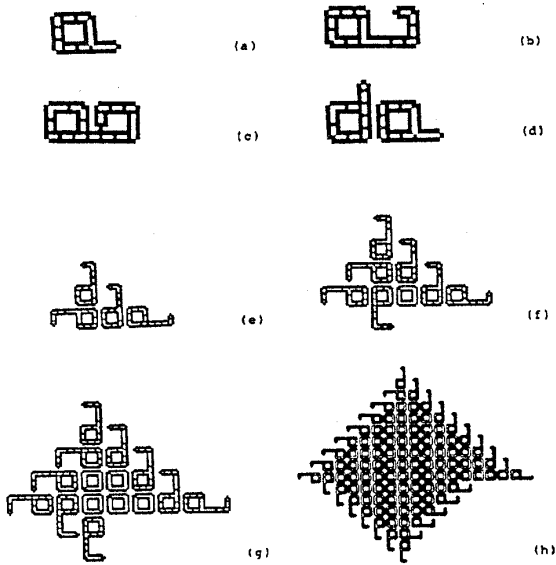


図2 自己増殖するオートマトン (Langton)

し、初期のループの端が伸びて自分自身の方向へと成長し、子孫のループを生成する。各ループはさらに、さんごののような増殖を続

けるといものである。

また、彼は「どのような条件のもとで、情報の複雑なダイナミクスが創発し、CAの挙動を支配するようになるのか？」という問題に対する解を得るために、次のような「λパラメータ」を導入したシミュレーションを行なった(Kはセルの状態数、Nは近傍テンプレート (neighborhood template) で覆われるセルの数、 $n_q$ は静止状態に至るまでの状態遷移数)

$$\lambda = \frac{K^N - n_q}{K^N}$$

1次元のCAで、 $K=4$ 、 $N=5$ として実験を行ない、次のような結果を得た。λパラメータの値と、ウォルフラム (Wolfram) によるCAの挙動のクラス分け

Class 1 CA：固定された、均一な状態へと発達

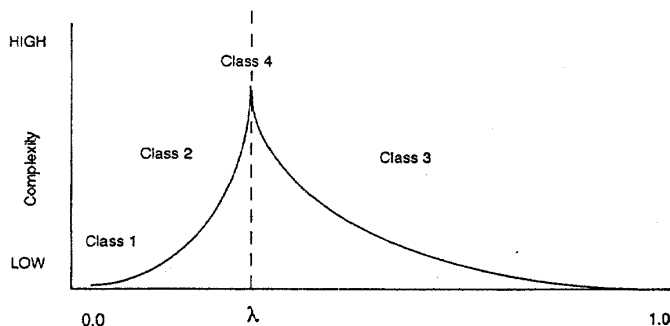


図3 セルオートマトンにおける、 $\lambda$ パラメータとウォルフラムのクラス分けとの関係 (Langton)

- Class 2 CA：単純な周期的構造へと発達
- Class 3 CA：カオス的なパターンを生じる
- Class 4 CA：局所的な構造の複雑なパターンを生じる

との間で図3に示すような対応付けが出来ることを示した。横軸は区間[0,1]での $\lambda$ パラメータの値、縦軸は複雑さを表している。特にClass 2からClass 3へと遷移する領域において、系の複雑さが最も高くなり、情報の複雑なダイナミクスが現われる。彼はこの領域を「スイートスポット」と呼んだ。

バイオモルフ (biomorphs)

著名な進化生物学者、ドーキンスはALを「実際の生命を理解するための洞察をつくりだすもの」として見ている。彼は自ら、進化の特性を取り入れたプログラムをMacintosh上で書き、グラフィックス上の生命体をバイオモルフ (biomorphs) と名付けた<sup>5),22)</sup>。この生命体は樹状の構造をしており、作画のためのパラメータは、枝分れ、セグメント化、対称など9個のパラメータによって制御される。ドーキンスはこれらのパラメータを遺伝子と呼んだ。各遺伝子は突然変異を受け、これによって次世代でバイオモルフの変化が得られる。各遺伝子は19の対立遺伝子を持っている (19<sup>9</sup>のバラエティ)。

バイオモルフにおける大きな特徴は、淘汰が人為的に行なわれるということである。適合度はプログラムの使用者によって与えられ

る。彼のシステム自体は単純ではあるが、植物から昆虫にいたるまでの広い範囲にわたる図を作りだした。図4は初期状態から始めて、29世代にわたって徐々に複雑なバイオモルフが構成されていく様子を示し、図5は種々の生物を連想させるバイオモルフが作り出された例を示している。

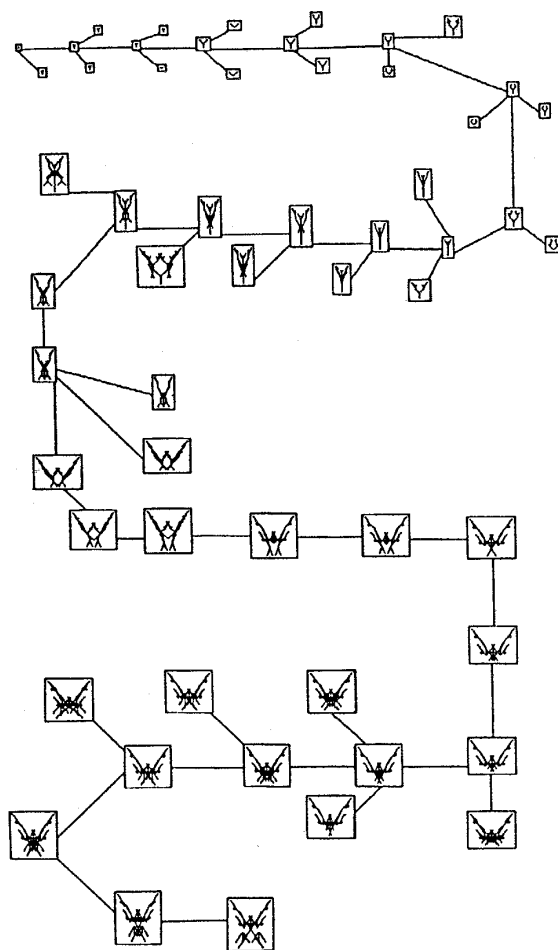


図4 バイオモルフの発生過程例 (Dawkins)

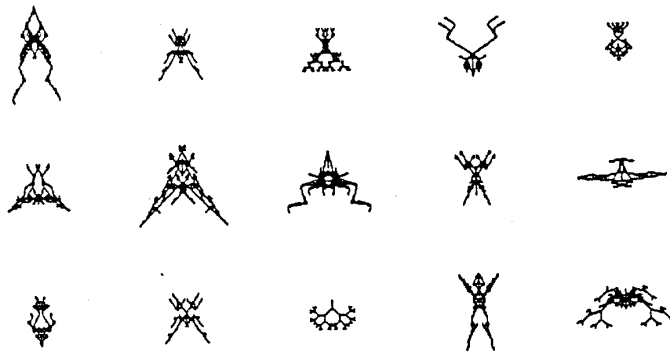


図5 バイオモルフの発生例 (Dawkins)

### Lシステム

リンデンマイヤーは当初、植物の発生を記述するのに形式言語理論を用いることを考えていた。彼の作りだした文法が生物学的な過程をモデル化出来ることを示したのは、それがあつた特定の「藻」の成長パターンに一致することを見いだしたときであつた。

この植物は初期の段階では2種類の細胞があり、大きさと分割のしかたが異なっている。彼の数学モデルでは、各細胞のタイプは記号a, bのいずれかで表現された。発生は次の2つの規則によって作りだされた。

ルール1：現在aであれば、次のステップではabになる。

ルール2：現在bであれば、次のステップではaになる。

この例では、2つの記号abからなる初期ストリングから発生の過程が始まる。最初の時間ステップの後にはaba, 次の時間ステップにはabaab, さらにabaababaとなる。この言語において形成されたルール集合はLシステム<sup>24)</sup>として知られるようになった。

リンデンマイヤー自身はこのLシステムを、純粹に植物の発生システムを記述する数学的概念として使うことを意図し、それに基づくコンピュータシミュレーションには関心を持っていなかった。1970年にヘスパー(Hesper)らがLシステムを使って実際に植物の形を描くことを試みた<sup>22)</sup>。5000個の記号からなる長いストリングから枝分れなどの解

釈を行なうプログラムで計算機実験を行ない、彼らはLシステムによって形態発生したシダに似た絵を生成することに成功した(図6)。

### アントファーム (AntFarm)

コリンズらによるアントファーム<sup>4)</sup>はコロニーにおける蟻の集団捕食の挙動を進化させようとするシミュレーションである。アントファームにおける進化は遺伝アルゴリズム<sup>7),9)</sup>を用いており、個々の蟻に対してではなく、コロニーに対して遺伝的なオペレーションが行なわれている。全ての蟻の動作(蟻の挙動関数で決定される)が適合性値に寄与する。各コロニー単位に、そのコロニーに属する蟻の挙動関数をコーディングした染色体(25,590ビット)を持っている。あるコロニーのメンバー(蟻)は同一の性質を持つが、各蟻ごとにセンサー入力異なれば異なった挙動を示す。適合性値は主として、巣に運びこまれた食物の個数に基づいて決まるので、捕食能力が高ければ巣への食物運搬戦略を促し、高い評価値を得て増殖の成功の度合いが高くなる。

アントファームではコロニーごとに128匹の蟻が存在し、異なったコロニーが16384個ある。このシミュレーション上の蟻の世界(空間)は格子状に区切られており、各格子の位置ごとに巣、蟻の存在、食物の量、フェロモンの量が表現されている(図7)。蟻が残した

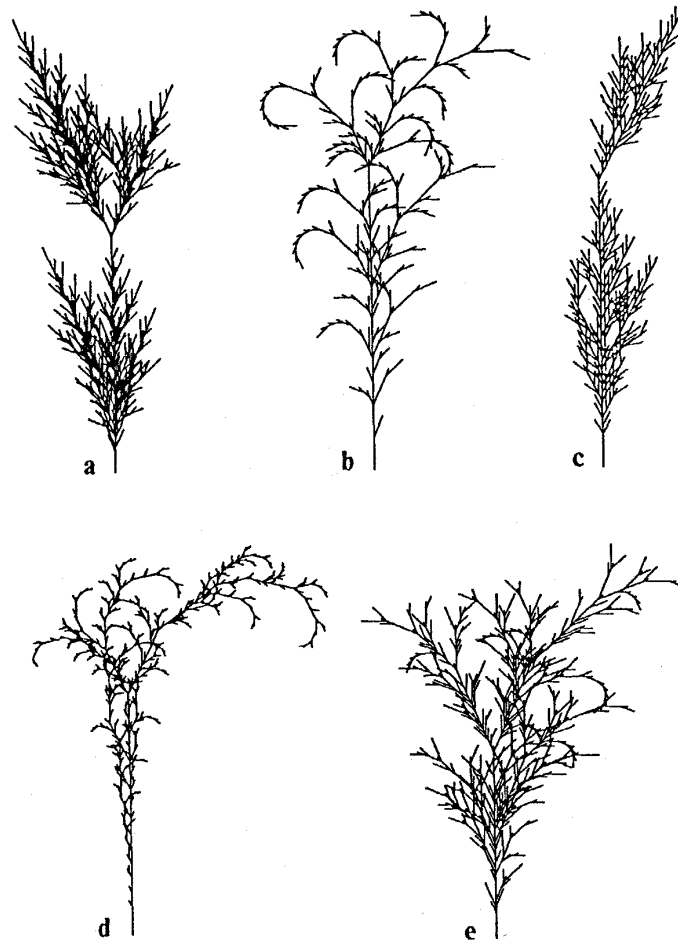


図6 Lシステムを用いた植物の図の発生例 (Lindenmayer, Hogeweg, Hesper)

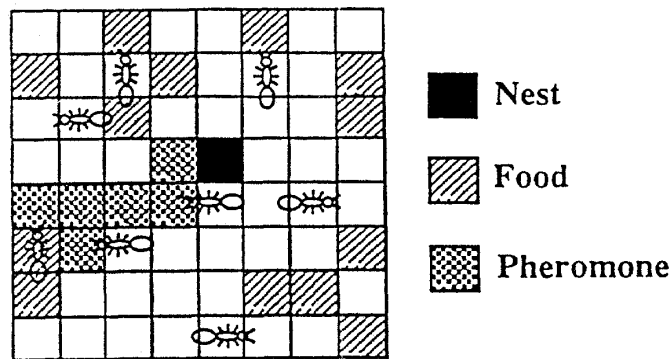


図7 アントファームの空間と属性の表現 (Collins, Jefferson)

フェロモンは徐々に拡散して消失する。

蟻のセンサー入力は挙動関数 (ニューラルネットワークで構成されている) で処理され、蟻の挙動が決まる。現在の格子位置に中心を置いた蟻の 3 x 3 のセンサー配列は、食物の存在、巣の存在、フェロモンの量を検知することが出来、さらに蟻は自分が食物を運んで

いるかどうか、巣への正しい方向なども検知できる。各時間単位ごとに蟻は、①隣接する 8 個の格子位置のいずれかに移動する、②食物を拾いあげる、③食物を落とす、④ 0 ~ 64 単位のフェロモンを落とす、のいずれかの動作を選択する。

アントファームは 65,536 個のプロセッシ

ングエレメントを持ったコネクションマシン上にインプリメントされている。

### サブサンプションアーキテクチャ

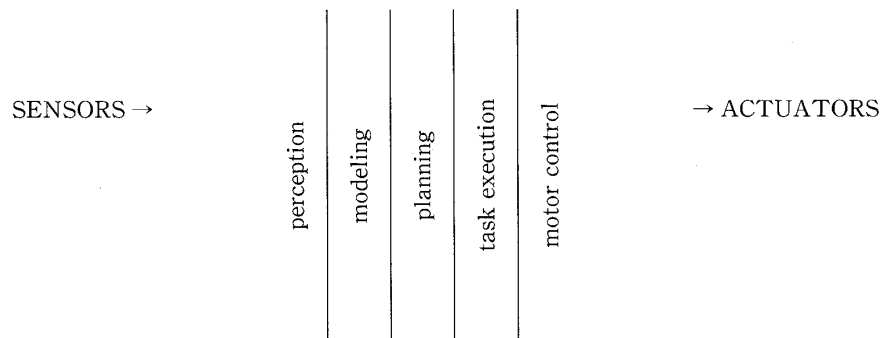
MITのブルックス(Brooks)はロボットのナビゲーションに従来型のトップダウンアプローチではなく、ボトムアップ型のアプローチを提案し、これをサブサンプション・アーキテクチャ(subsumption architecture)<sup>3)</sup>と名付けた。

MITにおいてブルックスは最初のロボット Allen を製作しようとしていたときに、古典的 AI のパラダイムに従ったものとは異なるものを目指していた。つまり、知覚、モデリング、プランニング、タスクの実行、動作制御に至るトップダウン型の方式に従ったものではなく、認識におけるボトルネックを持たない、知覚と動作とを直接結びつけた方式

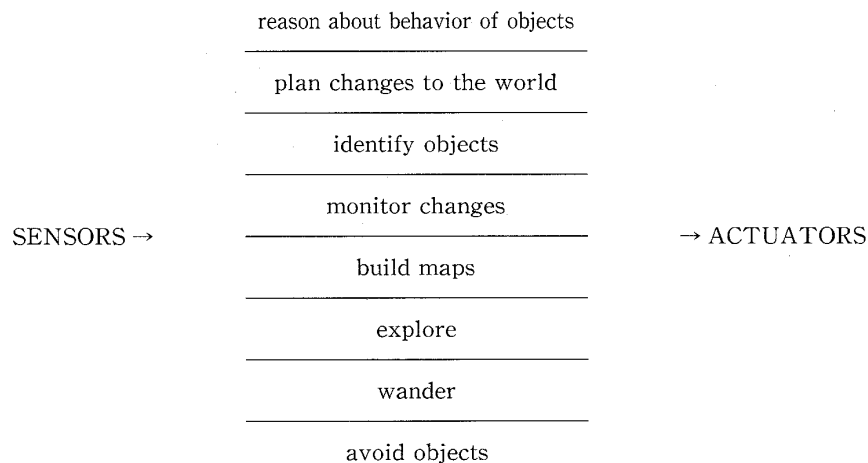
を考えていた。

図8(b)に示すように、要素行動は並列的に処理され、ロボットはその場その場の状況に対処する。ロボットは最初、自分の前の空間をチェックし、そこに障害物がなければ車輪を回転させて前進する。この動作を経路をさえぎる障害物を見つけるまで続ける。この時点で、別の行動ルールによって、「歩行」動作が抑制され、「障害物を回避する」が起動され、旋回あるいは後退動作が引き起こされる。また、ロボットが数動作ステップの間、障害物に出会わなかった場合には、「探索」レベルの動作が引き起こされ、異なった状況をもとめて移動方向を変える。

このロボットは、高次の挙動によってゴールを目指すとともに、低次の動作によって自分の回りの世界をリアルタイムで処理する。ひとつの挙動が他の挙動を包摂(subsume)す



(a) 従来の知能ロボットの処理系



(b) SSAに基づく知能ロボットの処理系

図8 サブサンプション・アーキテクチャ (Brooks)



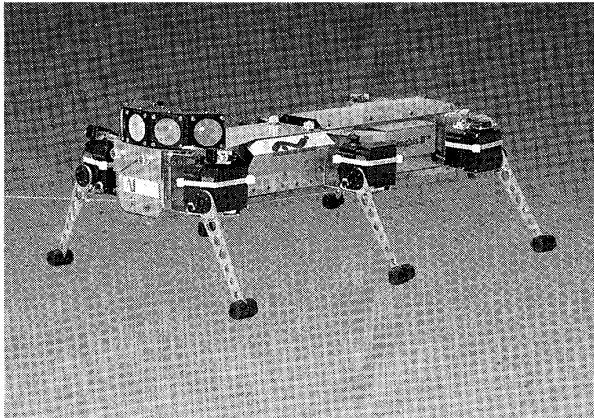


図9 昆虫ロボット, GENGHIS (Brooks)

るので、サブサンクションという表現が使われている。偶然にもブルックスはラングトンと同様に「ボトムアップ」という表現を使い始めた。そして、SSAを用いた6本足の有名な昆虫ロボット、ゲンギス(Genghis)が登場した(図9)。

### 3. Artificial Life IIIからの話題

1992年春に開催された第3回ワークショップの話題のなかからいくつかを紹介する。予稿の冒頭でラングトンはこのワークショップの開催によって、人工生命が単一の奇跡を描いているのではないことが明らかになったと述べている。さらに「人工生命研究が知的な意味でカンブリア期の大爆発に類似した状況にあり、生命の現象学を見る際の有効な科学的、工学的、哲学的な見通しとしてとらえられていること、この見通しが多くの異なった知的方向で追及されていること」を述べている。

#### ラマルク説的進化

生物学的には認められていないが、ラマルクの進化説(獲得形質が遺伝するという説)は遺伝的算法による問題の解法においては、その有効性が主張されている。アックレイ(Ackley)はグラフ分割問題にラマルク説的進化に基づく方法論を適用している<sup>26)</sup>。これは

「時間ワープ分散型ラマルク説的進化」と名付けられ、以下のような手続きが実行される。

- ① 混合(Mix)：各サブ集団(subpopulation)から1個の個体をランダムに選び出し、別のサブ集団に転送する
- ② 時間ワープ(Time warp)：山登り回数パラメータ $h$  ( $> 0$ )を与え、サブ集団あたり $h$ ステップの山登り回数を割り当てる。
- ③ 山登り(Hillclimb)
- ④ 増殖(Reproduce)：各サブ集団内において、適合した2個体を選び出し、集団内で子孫の居場所をつくるために、いずれかの個体を除去する。

320ノードのグラフ分割問題を対象として、ダーウィン説的方法と、ラマルク説的方法とを比較し、後者によって良い解を得たことを示している。探索性能以上に着目すべき点として、ラマルク説的進化の集団で出現したダイナミクスがあった。第5840ステップで細胞構造が出現し、領域の競争を行ない、最後には最適解を持つ個体群が領域全体にわたって支配的に広がっていった。アックレイはこの現象がラマルク説的進化シミュレーションに特有なものではないが、このような方法によっても「生命的」な現象をつくりだせることを示そうとした。

#### ポリワールド (PolyWorld)

アップルコンピュータのイェーガー(Yager)は多面体の生命体が生息する単純で平坦な世界をコンピュータ上で実現し、これをポリワールドと名付けた<sup>26)</sup>。

ポリワールドに住む生命体はヘップの学習則を用いたニューラルネットワークの頭脳への入力となる視覚を持っている。この頭脳の実出力によって生命体の挙動が決定される。生命体を持つニューロンのうち、いくつかは食物摂取、交配、闘争、移動、旋回、視界の制御、体上の面の輝度の制御などの可能な原始

的挙動を活性化するために固定化されている。

この人工の生命体は、動作に伴ってエネルギーを消費するので、その補充をする必要がある。環境内で成長する食物を摂取することも出来るが、生命体が死んだときにはその死体が食物に転じる。原始的挙動として「闘争」があるので、各生命体は他の生命体を傷つける可能性を持ち、生命体どうしが殺しあい互いに相手を食物とする。これによって捕食のモデルが構成される。この生命体の生理と代謝の程度はニューラルアーキテクチャとして、遺伝子内で決定されている。

増殖は空間内で重なった位置にある生命体の双方が交配の挙動を示したときに行なわれ、交叉と突然変異とによって子孫の遺伝子をつくる。最も適応能力の高い生命体は食物摂取によってエネルギーを摂取することをうまく学習し、繁殖する。

イエーガーはこの人工世界を設計しインプリメントした当初の目的は、次の3つであると述べている。(1)複雑な行動学レベルでの生存戦略や挙動を、プログラミングすることなく創発的な現象として引き起こすことが可能であるかどうかを決定する、(2)人工システム内に現実の生命の決定的な構成要素を出来る限り多く組み入れることによって、現実の生命体に出来るだけ近いものを作りだすこと、(3)人工知能への接近として人工生命の可能性を探り始めること、の3点を挙げている。

### 細胞分裂

フライシャー (Fleischer) らは、知覚と制

御に関する問題を解くニューラルネットワークを生成する長期的な目標の一環として、多細胞発生シミュレーションを行なった<sup>6)</sup>。彼らはこれを「生成モデル上での進化シミュレーション」と呼んでいる。

細胞のモデルは、細胞質中のものと細胞膜中のものと2種類の蛋白質を含んでいる。これらの蛋白質が細胞の状態を構成し、各蛋白質はそれが当該細胞中にある量を記述する状態変数 (state [i]) によって表現されている。

細胞は、時間軸上での蛋白質の変化 ( $dstate [i]/dt$ ) をコーディングした遺伝子 (細胞状態方程式 (cell state equation)) の作用で連続的にその状態を変える。この導関数は、細胞の現在の状態と、細胞周辺の局所的な情報 (局所的に測定される放散可能な化学物質、隣接細胞との接触量など) に依存する。

この人工的な遺伝子が相互に影響を及ぼし合うことができるように、各微分方程式に条件部を付加している。ある細胞 C において、状態変数  $i$  に対する1個の遺伝子は次のような形式を持つ。条件部はシグモイド形式の連続関数が用いられている。

IF Condition<sub>c</sub> (state<sub>c</sub>, env<sub>c</sub>),

THEN  $\frac{dstate_c[i]}{dt} = Consequent_c (state_c, env_c)$

$\frac{dstate_c[i]}{dt} = \sum_s (Continuous\ Condition_s (state_c, env_c))$

$\times (Consequent_c (state_c, env_c))$

細胞の状態は細胞挙動関数 (cell behavior function) によって決定されている。この関数

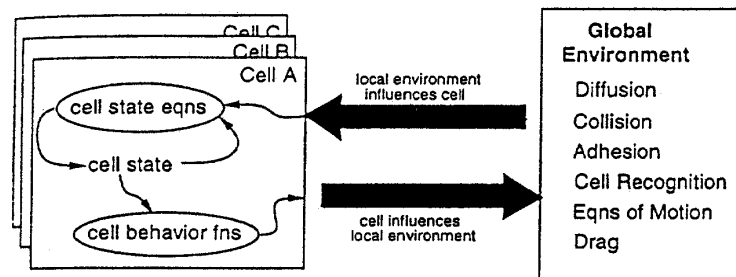


図 10 細胞状態方程式、細胞挙動関数と環境との相互作用 (Fleischer, Barr)

は蛋白質がどのようにして細胞を機能させるかを記述している。例えば、移動力、化学物質の放出、他の分子への付着などである。

フライシャーらの実験では、細胞の移動、細胞分化、側抑制、軸索成長をシミュレーション上で実現している。

#### 4. おわりに

人工生命研究の動向を、Artificial Life I, II, IIIの話題を中心に概説した。ラングトンは「人工生命研究が知的な意味でカンブリア期の大爆発に類似した状況にあり、生命の現象学を見る際の有効な科学的、工学的、哲学的な見通しとしてとらえられていること、この見通しが多くの異なった知的方向で追及されていること」を指摘した。これは既存の分野が「人工生命という視点/切り口」を新たな展開のきっかけとして着目し始めていることを意味していると言えるのではなかろうか。まさに、AL-IIIにおいてLansingらが述べているように、人工生命の話題から除きうる対象はほとんどないのではないかという印象がある（彼らは、バリ島の水田地帯の寺院の

ネットワークが、自己組織的に共進化したという例を示している（図11）<sup>21)</sup>。

今回の人工生命ワークショップ、AL-IVはオートマトンのラングトンからロボットのブルックスへとオーガナイザが交代し、94年にMITで開催される。これは、コンピュータシミュレーションからハードウェアインプリメンテーションへと、人工生命が具体化する方向の1つを明示しようとしているのだろうか？ここでもさらに、様々な立場から人工生命が論じられていくのではないかと思われる。応用情報処理などで問題解決を行なう上では、さらに多くの示唆を得られる可能性があるのではないかと思われる。

今後の方向に関しては、星野<sup>10)</sup>が、人工生命に期待する課題として

- (1) 生物学においては、生命の起源、動物行動学、進化生物学におけるいろいろな仮説を創発的コンピュータシミュレーションで検証する。
- (2) 記号的人工知能に背後状況モデルを提供し、フレーム問題の疑似解決の枠組みを示唆する。
- (3) 知能の最上層から1段下がって合成的モ

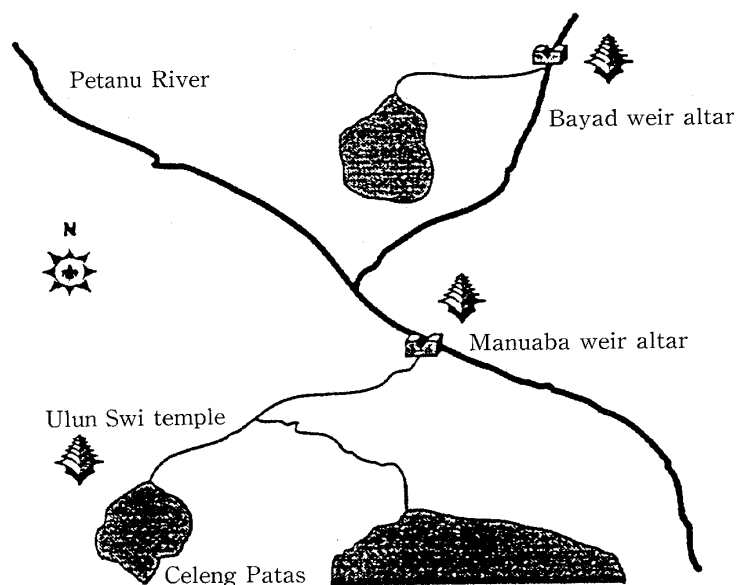


図11 バリ島水田地帯の寺院ネットワーク (Lansing, Kremer)

デルを構築しようとする, Multi-agent, Subsumption, Classifier System, などのさらに下方から, それらのモデルを創発させる。

- (4) 新しい構造を持ったニューラルネットワークを創発させ, コネクショニズムに有力なモデルを提供する。

を挙げている。

特に, 情報处理的な立場からは, (2), (3), (4)には大きな期待がかかるのではないかと考えるが, 人工生命 (的問題解法) が単なるシミュレーションで終わらないようにするためには, 実現に際して問題環境をどう設定し, 結果をどう評価するかがポイントではなからうか。

#### 参考文献

- (1) Ackley, D.H. and Littman, M.L.: A Case for Lamarckian Evolution, in *AL-III*, pp.3-10, (1994).
- (2) Baas, N.A.: Emergence, Hierarchies, and Hyperstructures, in *AL-III*, pp.515-537, (1994).
- (3) Brooks, R., 五味隆志: 複数の要素行動間の競合・協調により知能ロボットの行動を決める「サブサンクション・アーキテクチャ」, 日経インテリジェントシステム, 別冊 1992 春号, pp.152-167, (1992).
- (4) Collins, R.J. and Jefferson, D.R.: AntFarm: Towards Simulated Evolution, in *AL-II*, pp.579-601, (1992).
- (5) Dawkins, R.: The Evolution of Evolvability, in *AL-I*, pp.201-220, (1989).
- (6) Fleischer, K. and Barr, A.H.: A Simulation Testbed for the Study of Multicellular Development: The Multiple Mechanisms of Morphogenesis, in *AL-III*, pp.389-416, (1994).
- (7) Goldberg, D.E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, (1989).
- (8) 服部 桂: 時計じかけの細胞たち — 人工生命研究の最前線, ASAHI パソコン, pp.24-29, (1992).
- (9) Holland, J.H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, (1992).
- (10) 星野力: 人工生命の現状と将来への期待, 計測と制御, Vol.32, No. 8, pp.677-683, (1993).
- (11) 稲吉宏明: 人工生命への招待, 情報処理, Vol.34, No. 7, pp.884-891, (1993).
- (12) 伊庭齊志: 人工生命, 日本機械学会誌, Vol. 97, No.902, pp.64-68, (1994).
- (13) 北野宏明(編): 遺伝的アルゴリズム, 産業図書 (1993).
- (14) Koza, J.R.: Artificial Life: Spontaneous Emergence of Self-Replicating and Evolutionary Self-Improving Computer Programs, in *AL-III*, pp.225-262, (1994).
- (15) Langton, C.G.: Artificial Life, in *AL-I*, pp.1-47, (1989).
- (16) Langton, C.G.: Life at the Edge of Chaos, in *AL-II*, pp.41-91, (1992).
- (17) Langton, C.G. (ed.): *Artificial Life: The Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living System*, Addison Wesley, (1989).
- (18) Langton, C.G. et al. (ed.): *Artificial Life II: Proceedings of the Workshop on Artificial Life*, Addison Wesley, (1992).
- (19) Langton, C.G. (ed.): *Artificial Life II Video Proceedings*, Addison Wesley, (1992).
- (20) Langton, C.G. (ed.): *Artificial Life III: Proceedings of the Workshop on Artificial Life*, Addison Wesley, (1994).
- (21) Lansing, J.S. and Kremer, J.N.: Emergent Properties of Balinese Water Temple Network: Coadaptation on Rugged Fitness Landscape, in *AL-III*, pp.201-223.
- (22) Levy, S.: *Artificial Life: The Quest for a New Creation*, Pantheon, New York, (1992).
- (23) Raynolds, C.W.: An Evolved, Vision-Based Model of Obstacle Avoidance Behavior, in *AL-III*, pp.327-346, (1994).
- (24) Lindenmayer, A. and Prusinkiewicz, P.: Developmental Models of Multicellular Organisms: A Computer Graphics Perspective, in *AL-I*, pp.221-249, (1989).

- (25) Varela, F.J. et al. (eds.): *Toward a Practice of Autonomous Systems*, Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, MIT Press, (1992).
- (26) Yaeger, L.: Computational Genetics, Physiology, Metabolism, Neural Systems, Learning, Vision, and Behavior or PolyWorld: Life in a New Context, in *AL-III*, pp.263–298, (1994).
- (27) 米澤保雄: 人工生命, *bit*, Vol.25, No.7, (1993).
- (付録: AL-III<sup>20</sup> 掲載論文リスト)

### Artificial Life III Papers

#### A REPLICATOR

1. An Instance of a Replicator  
*Erik Schultes*

#### EVOLUTION

2. A Case for Lamarckian Evolution  
*David H.Ackley and Michael L.Littman*
3. Evolution and Coevolution in a Rugged Fitness Landscape  
*Per Bak, Henrik Flyvbjerg, and Benny Lathrup*
4. Evolution to the Edge of Chaos in an Imitation Game  
*K.Kaneko and J.Suzuki*
5. Coevolving High-Level Representations  
*Peter J.Angeline and Jordan B.Pollack*

#### ECOLOGY AND EVOLUTION

6. Artificial Food Webs  
*Kristian Lindgren and Mats G.Nordahl*
7. Evolution of a Size-Structured, Predator-Prey Community  
*Alan R.Johnson*
8. Iterated Prisoner's Dilemma with Choice and Refusal of Partners  
*E.Ann Stanley, Dan Ashlock, and Leigh Tesfatsion*
9. Contest and Scramble Competitions in an Artificial World: Genetic Analysis with

#### Genetic Algorithms

*Yukihiko Toquenaga, Masanori Ichinose, Tsutomu Hoshino, and Koichi Fujii*

10. Emergent Properties of Balinese Water Temple Networks: Coadaptation on a Rugged Fitness Landscape  
*J.Stephen Lansing and James N.Kremer*

#### ARTIFICIAL WORLDS

11. Artificial Life: Spontaneous Emergence of Self-Replicating and Evolutionary Self-Improving Computer Programs  
*John R.Koza*
12. Computational Genetics, Physiology, Metabolism, Neural Systems, Learning, Vision, and Behavior of PolyWorld: Life in a New Context  
*Larry Yager*

#### ROBOTICS

13. Evolutionary Robotics and SAGA: The Case for Hill Crawling and Tournament Selection  
*Inman Harvey*
14. An Evolved, Vision-Based Model of Obstacle Avoidance Behavior  
*Craig, W.Reynolds*
15. Simulation of Autonomous Legged Locomotion  
*David Zeltzer and Michael Mckenna*
16. The Motility of Microrobots  
*Johndale C.Solem*

#### BIOCHEMISTRY

17. Artificial Biochemistry, Life Before Enzymes  
*Harold J.Morowitz*

#### MORPHOLOGY AND COLLECTIVE PATTERN FORMATION

18. A Simulation Testbed for the Study of Multicellular Development: The Multiple Mechanisms of Morphogenesis  
*Kurt Fleischer and Alan H.Barr*

19. Swarms, Phase Transitions, and Collective Intelligence

*Mark M. Millonas*

DYNAMICS

20. How Topology affects Population Dynamics

*Jeffrey O. Kephart*

21. The Ghost in the Machine

*Andrew Wuensche*

22. The Computational Completeness of Ray's Tierran Assembly Language

*Carlo c. Maley*

EMERGENCE

23. Emergence, Hierarchies, and Hyperstructures

*Nils A. Baas*

PHILOSOPHY

24. Artificial Life: Synthesis vs. Virtual

*Stevan Harnad*

25. Is Life as a Multiverse Phenomenon?

*Claus Emmeche*

26. Against the Global Replacement: On the Applications of the Philosophy of Artificial Intelligence to Artificial Life

*Brian L. Keeley*