

解説



人工生命への招待†

稲吉 宏 明††

1. はじめに

その昔、無機物質から生命を合成しようと「試験管内での生命合成」の実験が行われた。原始の地球の大気成分などの環境を、人工的に試験管内に再構成して生命の出現を再現しようという実験であった。……これと同様の考えに基づいて、前記の「試験管」を万能シミュレータである「コンピュータ」に置き換えた研究が、現在行われている⁵⁾。これは近年出現した、AL (Artificial Life=人工生命) と呼ばれる研究分野の一領域である^{1)~4)}。

ただし、これら「試験管内での生命合成」と「コンピュータ内での生命合成」の間には根本的な違いがある。前者は物理/化学法則が、現在われわれの属している世界のそれと同一のものに従っているのに対し、後者では研究者が、物理/化学法則を自分で設定できる、という点である。すなわち、通常自然科学が「与えられた自然現象をもとに未知の自然法則を解明」しようとするのに対し、後者の研究においては、「人工的」法則を(あらかじめわれわれが)与えた後、この法則に従う系の振舞いつまり“人工”現象の観測を行う*。すなわち後者では、従来の自然科学とちょうど逆方向(「現象→法則」のかわりに「法則→現象」)の模索がなされるわけである。

ゆえに、コンピュータ内にわれわれの「創世」する小宇宙においては、元素が7個しかない世界であっても構わないし、重力・電磁力などの4種の力の代わりに8種の力に従う世界でもよい。要は、「生命のように振る舞うもの」をもたらす系

を作り出すことである。

そのような系の最も単純なものは、セルラーオートマトン(CA)である。Langtonは、図-1に示す8状態の構造が、珊瑚の成長のように、死んだ核(中心部)の回りに自己複製していく能力があることを見つけた⁹⁾(図-2参照)*。

ここで誤解のないように注意しておく、上記の例および以降で取りあげる例は、あくまでもALの一領域である。一般の生物学が、{細胞生物学、分子生物学、免疫学、遺伝学、生態学}などの多様な研究対象で構成されているのと同様に、ALの研究対象も広範囲にわたる。(3.のジャンル

```

22222222
2170140142
2022222202
272 212
212 212
202 212
272 212
21222222122222
207107107111112
2222222222222

```

図-1 自己複製する CA のパターン

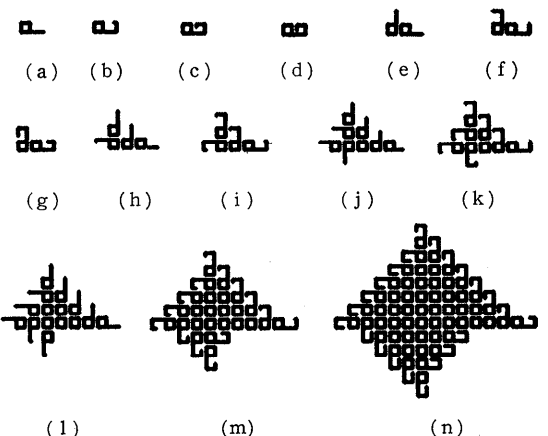


図-2 珊瑚のように成長する CA

† An Introduction to Artificial Life by Hiroaki INAYOSHI (Computer Models Section, Computer Science Division, Electrotechnical Laboratory).

†† 電子技術総合研究所情報アーキテクチャ部計算機構研究室
*これだけではALというよりは、AU (Artificial Universe) とも呼ぶべきものになってしまう。AL研究ではあくまでも、「生命のように振る舞うもの」をもたらす系を探求する。

*このCAに興味のある方は、SUNの上で走る“Cellsim (v2.5)”というCAシミュレータでRule="loop, v8"; Image="loop 256 x"; とすると、この成長の様子を実際に見ることができる。

例および4.の定義参照。) ゆえに、「ALの森」全体*を解説するのは不可能なため、本稿で取りあげる例は、「森の中の一部の木」である点をお断りしておく。

2.で「一部の木」として、三つほど研究例を紹介した後、3.ではAL研究の簡単な歴史とジャンルの例を示す。4.ではALの定義やエッセンスを、文献を基に述べる。5.でAL研究の分類を述べ、6.でALの問題点およびGAとの共通点を示す。7.では人工知能への貢献についてふれる。

2. 研究例の紹介

2.1 “Boids”⁷⁾

C. Reynoldsの実装した、群れ行動(flocking behavior)のシミュレーションである。各個体の従うべき規則として以下の三つを与える。

- 1) 環境における自分以外の対象(他の“boids”を含む)間との最小距離を保つ。
- 2) 近傍のほかの“boids”の速度ベクトルとマッチする。
- 3) 近傍のほかの“boids”の重心と思われる方向に移動する。

これらの規則に従う個体を、「集団」として障害物のある環境下に同時におくと、鳥の群れで見られるのと類似の現象が見られる。すなわち、障害物のないところでは、“boid”集団はまとまって飛行し、障害物に近付くと二手に分かれ、通り過ぎると、再びまとまった飛行を見せる。(ただしガチョウの群れのようなV字型の飛行は、前記の規則のみではさすがに無理である。)

ここで重要な点は、「全体の振舞いが明示的に指定されていない」つまり「群れで飛行せよ」とか、「障害物では二手に分かれるべし」などの規則は指定していない、という点である。これはALにおける重要な性質、すなわち、

「部品(=各個体または各個体の従う規則)は“人工的”に設定したものであるが、『部品間の相互作用により出現する振舞い』は“本物(=人工的でない)”

という性質を意味する。

なおこのモデルは、4.にあるポイント5カ条を

満足している点を付言しておく。

2.2 “AntFarm”⁸⁾

Collinsらによる「人工的に設定された環境に適應する個体(集団)」を探索する例である。16×16の2次元格子世界のほぼ中心に巣があり、巣を通る{水平・垂直・対角}線上以外の格子には餌(全196個)がある、という環境の下で、「効率的に餌を巣に運ぶ能力をもつ人工蟻集団」を見つけようという研究である。蟻集団は4個体で構成され、「フェロモン」をコミュニケーション手段として利用する。各個体の入力は、

- 自分の回りの3×3格子各点の、{フェロモン/餌/巣}の各有無；

- 巣の方向；
- 餌所持の有無；

であり、これらを基に、

- フェロモンをおく；
- 回り8方向のいずれかに移動；
- 餌を拾う/おく；

のいずれかの行動をとる。

4個体の蟻集団を1群体とし、独立な全16,384群体について、おのおの「巣からスタートした4個体が、50の時間ステップでどれだけの餌を巣に集積できたか」で評価する。これら群体の集団での「局所的競争」すなわち、「近傍の群体よりも好成绩の群体に遺伝的オペレータを適用し、次世代の群体を作る」という手順により、より適應した群体を探索する。いかにフェロモンをうまく利用するかがポイントの一つである。

各個体のI/Oを決めるブラックボックスとして、{(1)Parameterized Function, (2)Lisp S-Expressions, (3)Deterministic Finite State Automata, (4)Primitive Rule-Based Organism, (5)Artificial Neural Network}の5通りの表現を用いたが、いずれも不十分だとCollinsらは述べている。そして「個体表現のもつべき諸条件」を列挙している。

2.3 “Tierra”⁹⁾

Rayの開発した(そして現在進展中の)「デジタル生物」間で見られる生態系のシミュレーションである。このデジタル生物は、{MOVE, JMP}などのコンピュータ命令群で構成される。

有機生物が、エネルギー(たとえば太陽)を利用して物質を組織化(たとえば光合成)することの

* しかもこの森は成長過程の途中であるため、今後どの木が最も成長するかはまだ不明である。

アナログで、デジタル生物は、CPU 時間 (= エネルギー資源) を利用して、メモリ空間 (= 空間資源) を組織化する。(有機生物では、20 種類のアミノ酸に変換される $4^3=64$ 通りのコドンの列で、DNA 上に情報が表現されるが、) デジタル生物は、32 種類の 5 ビット命令 (オペランドを含む) の組合せで個体が構成される。そしてアドレスの代わりに、「テンプレートアドレス」が用いられる。これは、番地によるアドレス指定でなく、指定されたテンプレート (= パターン) にマッチするもの (ただし、分子生物学の A-T 対, G-C 対のように、相補形) を探すことにより、アドレスが選ばれる。

人工的に作られた、80 命令で構成される「自己複製生物」や 45 命令の「寄生生物」を、60K 命令の容量のメモリ空間にばらまき相互作用させると、突然変異による新種誕生や、寄生関係、重複寄生関係 (ほかの寄生体にさらに寄生する関係) などの現象が現れる。

3. AL の簡単な歴史およびジャンルの例

AL の歴史はまだ浅く、AL 関係の国際会議は下に示すように、最近のものが多い。

1987. 9: AL-I.

1990. 2: AL-II.

1990. 9: SAB (Simulation of Adaptive Behavior).

1991. 12: ECAL (European Conference on AL).

1992. 6: AL-III.

1992. 12: SAB-2

1993. 5: ECAL '93

しかしこれは、「AL」という形で顕在化した後のことである。AL のルーツをたどれば、von Neumann の自己増殖オートマトンや Wiener の Cybernetics に遡り、さらにある意味で生命のように振る舞う「機械仕掛けの人形」にまで遡ることになり、大変古い歴史があるともいえる。

このような背景で出現した AL 研究が、どのようなジャンルで構成されているかを、次に示す。現時点で入手可能な 4 文献 1)-4) 中の 3 冊から、そのジャンル項目と論文数を順に列挙する。

(AL-I では、AL がどのようなものになるかまだ不明であったため、ジャンルわけがされていない。) これらから、AL がどのような研究から構成されているか、およその感じがつかめると思

う。なお、AL の分類については、5. を参照されたい。

● AL-II (全 31 編) =

{overview (2); origin/self-organization (7); evolutionary dynamics (6); development (1); learning and evolution (8); computation (2); philosophy/emergence (4); the future (1);}

: () 内の数字はそのジャンルの論文数を示す。

● SAB (全 62 編) =

{the animat approach (7); perception and motor control (8); cognitive maps and internal world models (6); motivation and emotion (4); action selection and behavioral sequences (5); ontogeny and learning (8); collective behaviors (2); evolution of behavior (8); architectures, organizational principles, and functional approaches (12); animats in education (2);}

● ECAL (全 56 編) =

{autonomous robots (14); swarm intelligence (9); learning and evolution (12); adaptive and evolutionary mechanisms (7); epistemological issues and conceptual foundations (14);}

4. AL の定義・エッセンス・ポイント

4.1 AL の定義

文献 2) の “what is artificial life?”: pp. xiv-xv より要約すると、AL の定義は以下のようである:

生物的現象の裏にある「基本的なダイナミクスの原理を抽出」し、抽出された原理を「(コンピュータなどの) 物理的媒体上に再構成」して、通常の生命に対しては不可能であった実験操作やテストを可能にすることにより、生命を理解しようとする研究分野を指す。

研究分野の範囲は広く、{生命の起源、分子の自己集合、胚発生 (成長、発達、分化を含む)、自己複製、動物行動、昆虫集団のダイナミクス、進化、種形成、生態的ダイナミクス、言語/社会/文化的進化} などの生物的現象が対象となる。これらの自然現象から「論理的形態 (logical form)」を抽出して、人工的に再現するのが AL 研究の目標のひとつである。

AL 研究により、地球上の「既知/既存の生命体 (life-as-we-know-it)」のみならず、「未知/未存

の生命体 (life-as-it-could-be)……いかなる物質で構成されていようと、また宇宙のどこに存在していようと構わないような生命体……についての「生命論理 (“bio-logic”)* へと、われわれの研究領域を拡大することが可能となる。

地球上で進化した生命体と同一の化学的/物理的原理に基づいているいかにかわらず、また構成する物質種類にかかわらず、コンピュータあるいはほかの「人工的媒体 (artificial media)」上に生命体を実現することにより、生命への理解を深めることができる。

■要約おわり。

4.2 AL のエッセンス

以下は、文献 1) の “the distilled <essence> of artificial life”: p. xxii からの引用である。

“要約すると、会議での「AL のエッセンス」についての全般的合意は、次のような視点に集約した。…AL は、人工的システム上で生物のような振舞いの〈実現〉を引き起こす。ただしシステムは、半自律的実体の〈集団〉で構成され、この実体間の〈局所的相互作用〉は、〈単純な規則〉の集合により支配される。このようなシステムにおいては、大域レベルでの集団の振舞いについての規則は存在せず、観察される複雑な高次のダイナミクスおよび構造は、〈出現 (emergent)** した性質である。この出現した性質は、低次のプリミティブ間の局所的相互作用全体から時間とともに展開する。展開をもたらすプロセスは、〈発生学的発達 (embryological development)〉を思い起こさせるもので、高次構造の〈局所的階層〉が、低次の実体の支持を求めて〈競合〉し、発達する。出現した構造は、低次の実体の振舞いを組織化するという、極めて重要な役割を果たし、この役割は、低次の実体が局所規則を呼び起こす背景を設定することによってなされ、結果として、出現した構造が時間とともに進化し得るようになる。”

■引用おわり。

4.3 AL 研究のポイント

文献 1) の Preface (p. xvi) に AL 研究の際の

* 従来の生物学 (biology) を拡張し、「生命に普遍的な性質のもつ論理または形態」を追求する学問を意味するものと思われる。

** 引用者注：システム的设计者は、システムの要素の振舞いを決定する「局所的規則のみ」を設定するのであって、要素の集団 (=システム) が全体としていかに振る舞うかという「大域的な振舞いの規則」は、あらかじめ定められていない。ゆえにこの大域的性質は〈出現〉したものである。

重要な点が、5点ほどあげられている。以下の5つである。

- トップダウンでなく、ボトムアップモデル
- 大域制御でなく、局所制御
- 複雑な仕様でなく、シンプルな仕様
- あらかじめの指定でなく、出現する振舞い
- 個体でなく、個体集団のシミュレーション

これらを満たせば、図-3 に示すループが構築できる。つまり、「局所的振舞い」が「大域的ダイナミクス」を構成し、構成された「大域的ダイナミクス」により「局所的環境」が形成される。そしてこの「局所的環境」が「局所的振舞い」に影響を与え、影響を受けた「局所的振舞い」が再び「大域的ダイナミクス」を構成し、……というループである。

5. AL 研究の種々の分類

二通りの分類方法として、媒体による分類と、時代による分類の二つを以下に示す。

5.1 媒体による分類

生物学的現象から抽出された原理を再構成する媒体の種類として、現在三種類が考えられている。

- (1): software…コンピュータソフトウェア
- (2): hardware…ロボットなどのハードウェア
- (3): “wet” ware…化学物質として再構成する。…必ずしもわれわれのように炭素ベースである必要はない。

5.2 時代による分類

図-4、図-5 のような生物史を考えたときに、どの「時代 (phase)」を対象とするかにより、大雑把に次の二つに分類できる。

- (1): 物理法則系を創る。(アプローチ A).
- (2): 生物を表現するプログラムを設計する。(アプローチ B).

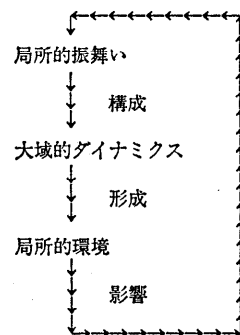


図-3 局所と大域の相互依存関係のループ

前者では、設定された法則のもとで系の出現する振舞いを観測する。後者では、生物の適応すべき環境を設定し、適応し得る生物プログラムを進化させる。図-5 は、「□や☆が生物種に相当する」（系統樹）とみなしてもよいし、「分岐地点で歴史的事件が起きた場合／起きなかった場合のパラレルワールド」*とみなしてもよい。いずれにせよ、時間が過去に遡っているほど、その後の複数の分岐によって到達し得る状態の多様性が増加する。すなわち、アプローチAでは、系の自由度が大となり、同時に探索空間（系のとり得る状態の数）も膨大なものになる。他方、アプローチBでは、（生命がすでに出現した状況などを前提とすることにより）系の自由度を減らし、探索空間をより制限することになる。両アプローチは、ともに設定者がその「環境／世界の創造主」である、という点で共通している。

なお、前者の代表例としては、CA（セルラオートマトン）があげられ、後者には、2. で取りあげた三つの例が含まれる。ただし“Tierra”はやアプローチAに近い性質ももっている。

6. AL 研究の問題点および GA との共通点

以下に、現在問題とされていると思われる点を6つほど示す。3~5 は GA と共通の問題である。

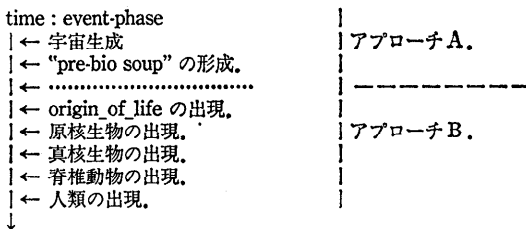


図-4 現存生物史略図および二通りのアプローチ

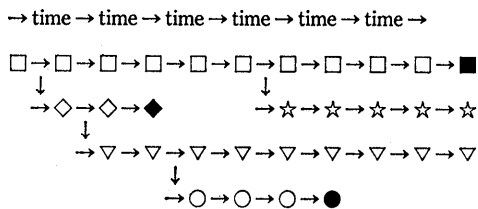


図-5 生物史の分岐図。(■◆●) = extinction

* AL の定義の部分で述べた「life-as-we-know-it」が、現在われわれの属している世界であり、「life-as-it-could-be」は、パラレルワールドのほかの枝に属する世界（たとえば知能的昆虫の支配する世界、または、重力定数などの物理定数がわれわれのそれと異なっている世界）である。

1) AL の定義の問題……コンピュータ内でシミュレートされた台風は、台風そのものではない（何も吹き飛ばさない）のと同様に、コンピュータ内で再構成された「生命のように振る舞うもの」は、生命とは呼べないのではないか？ という問題。

2) 形態と物質の分離に関する問題……自然現象から抽出しようとする「論理的形態 (logical form)」は、物質基盤 (material basis of construction) から、分離できないのではないか？ という問題。(文献 10) では、形態と物質が相互依存している例として「大腸菌におけるトリプトファンというアミノ酸の合成する／しないを決定する仕組み」が取りあげられている。

3) 個体の表現の問題……同じ振舞いを示すものでも、その個体をどのように表現するかにより、その個体の属する探索空間の構造や大きさが決定される。(2.2 の例の、5通りの表現による探索参照。)そしてこの探索空間の構造から、いわゆる“fitness landscape” (淘汰値曲面: 文献 11) 参照) が決定され、この曲面と次項で述べる「探索における遷移規則 (探索戦略)」の二つが、探索における「進化能力 (evolvability)」を決定する。

さらに、表現に関連した問題として、「検出器 (detector or sensor) / 効果器 (effector)」の進化能力の問題がある (文献 12)。実際、進化過程において視覚器官が出現しなければ、世界像は今のそれとは別なものとなっていたであろうし、翼などの飛行能力をもたらず効果器の出現がなければ、鳥類 / 有翅昆虫 / コウモリといった生物の行動形態は出現しないであろう。この例からも明らかのように、生物の振舞い (行動形態) は、その生物のもつ検出器 / 効果器系に強く依存するものである。ゆえに従来のアプローチすなわち、「検出器 / 効果器系を固定 (不変)」しておいて、検出器 - 効果器間の調整器官 (coordinating organ … 脳に対応する部分) のみを可変とするアプローチでは、とり得る行動形態がかなり制約されたものとなる。そこで、(魚類のヒレが両生類の脚となるような) 進化能力をもつ検出器 / 効果器系を「いかに」表現するか？ という難題に直面するわけである。

4) 探索戦略の問題……探索空間内の探索地点の「遷移規則」をいかに設定するのがよいのか？

のみの記号列) 上においたときの動作を示す。この例では、第13ステップでTMは状態0となり、停止する。

{現在の内部状態と入力記号}の組合せ順序を固定すれば、K状態のTM(=K個の内部状態をもつTM)の動作規則は長さ6Kの記号列で表現できる。これがTMのGTYPEである。GTYPE(=動作規則)の指定されたTMを、アルファベット記号の書かれたテープ(=環境)上において初めて、TMが動作する。この環境下で出現する「TMの動作」が、PTYPEに相当する。ここで重要な点は、TMの動作が「動作規則のみ」では一意的に決められない、という点である。なぜなら、同じTMであってもテープの初期状態が違えばTMの動作は当然異なるし、またテープの初期状態が同じでも、ヘッドの初期位置が違えば、その後の動作も当然異なったものとなるためである。表現型が遺伝子型から一意的に決定されないという性質は、生物の場合と共通であり、環境が遺伝子型→表現型の写像において重要な役割を果たす。

遺伝子型と表現型に関する問題は、上記TMにおける「停止問題」に関連する。任意のTMに対し、それが停止するか否かを出力するアルゴリズムを求めよ、というのがTMの停止問題であり、テープを空白テープに制限(=環境を固定)した場合でさえ、解決不能であることが知られている¹⁴⁾。ここで、生物の表現型が血液型や身長といった形質により「分類」できるように、TMの動作すなわちPTYPEも、「停止する/しない」という「形質」で分類することを考えよう。停止問題が解決不能であることは、「与えられたGTYPE(動作規則)に対して、(環境を固定しても)そのPTYPEの一形態(停止する/しない)を判定するには、実際に動作させるしかない」ことを意味する。これは前述のCAについても同様であり、GTYPE(=状態遷移規則)の一部を変更した場合、その結果PTYPEがいかに変化するかは、動作させねば分からない。変更前と類似したPTYPEとなるかもしれないし、まったく異質なPTYPEとなるかもしれない。このように「表現型が遺伝子型から予測不能」である点が、遺伝子型と表現型に関する問題である。

7. 人工知能への貢献¹⁵⁾

知能を科学的に理解するためのアプローチは、以下のように分類できる：

《分析アプローチ (analysis)》

- 内部分析派…特に神経生理学；
- 外部分析派…特に実験心理学；

《合成アプローチ (synthesis)》

- top-down 派…標準的 AI；
- bottom-up 派…“child machine”；

第一は、自然科学的アプローチであり、生命や知能の示す現象の分析/実験という手法を用いる。このアプローチには二つの分派があり、一つは生理学、特に神経生理学派で、「生命体の内部探索」が行われる。もう一つの分派は、実験心理学派であり、「外部から見た振舞い」を通して生命体が研究される。

知能への第二のアプローチは、合成的/計算的手法を用いるもので、生命やその振舞いを模倣するように構成されたものが、研究対象となる。このアプローチは二通りの方向が可能である。一つは「標準的 AI」であり、チェスなどのゲームに勝つプログラムに代表される。第二の方向は、「子供機械 (“child machine”）」すなわち、人間とやりとりのできる感覚器官をその機械にもたせて、「無知」な状態から、教育によって機械に知能をもたせよう、という方向である。

AL研究の可能性の一つとして、この「子供機械」の実現を通じて、人工的な知能を構築することが期待できる。

8. おわりに

生物学の理想をいえば、あらゆる形態の生命を対象とすべきである。しかし現在の生物学は、ただ一つの例すなわち「地球上に出現した生命のみ」を対象としている。例が一つしかないため、「生命にとって普遍的な性質とそうでない性質」の区別ができない。しかしながらAL研究により別の例が発見できれば、共通部分と相違部分を求めることにより、「普遍的に生命にともなう性質(必然)」と「地球上の生命固有の性質(偶然)」の区別が可能となる。これが4.の定義の部分で述べられた「生命への理解を深める」ことにつながるわけである。

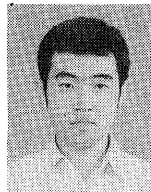
コペルニクスにより、宇宙観の大変革がもたらされたのと同様に、AL 研究により、「生命観の大変革」がもたらされるものと思われる。

参 考 文 献

- (国際会議の論文集: 1)~4)) : 3) = SAB, 4) = ECAL.
- 1) Langton, C. (ed.): *Artificial Life*, SFI Studies in the Sciences of Complexity (1988).
 - 2) Langton, C., Taylor, C., Farmer, J. D. and Rasmussen, S. (ed.): *Artificial Life II*, SFI Studies in the Sciences of Complexity (1991).
 - 3) Meyer, J. A and Wilson, S. W. (ed.): *From Animals to Animats*, MIT press (1991).
 - 4) Varela, F. J. and Bourgine, P. (ed.): *Toward a Practice of Autonomous Systems*, MIT press (1991).
 - 5) 例えば, Fontana, W.: "Algorithmic Chemistry" in AL-II, pp. 159-209 (1991).
 - 6) Langton, C. G.: "Studying Artificial Life with Cellular Automata" in *Physica* 22 D, pp. 120-149 (1986).
 - 7) Reynolds, C. W.: "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavior Model" in *Computer Graphics*, 21(4), pp. 25-34 (1987).
 - 8) Collins, R. J. and Jefferson, D. R.: "Representations for Artificial Organisms" in SAB, pp. 382-390 (1991).
 - 9) Ray, S. T.: "An Approach to the Synthesis of Life" in AL-II, pp. 371-408 (1991).
 - 10) Emmeche, C.: "Life as an Abstract Phenomenon: Is Artificial Life Possible?" in ECAL, pp. 466-474 (1991).

- 11) 伏見 譲: 生物進化を促す2重の散逸構造, 科学朝日 1990-2, pp. 18-23 (1990).
- 12) Cariani, P.: "Some Epistemological Implications of Devices Which Construct Their Own Sensors and Effectors" in ECAL, pp. 484-493 (1991).
- 13) Langton, C. G.: "Artificial Life" in AL-I, pp. 1-47 (1988).
- 14) たとえば, Machlin, R. and Stout, Q. F.: "The Complex behavior of Simple Machines" In Forrest, S. (Ed.) *Emergent Computation*, A Bradford Book, pp. 85-98 (1991).
- 15) Wilson, S. W.: "The Animat Path to AI" in SAB, pp. 15-21 (1991).
- 16) Toquenaga, Y., Ichinose, M., Hoshino, T. and Fujii, K.: Contest and Scramble Competitions in an Artificial World: Genetic Analysis with GA, to appear in *Artificial Life III*.

(平成5年3月1日受付)



稲吉 宏明 (正会員)

1965年生。1987年筑波大学第三学群基礎工学類卒業。1992年同大学院博士課程工学研究科修了。工学博士。1992年電子技術総合研究所入所。情報アーキテクチャ部計算機構研究室所属、人工生命の研究、特に“emergent property”をもたらし系の探求に従事。細胞の構造/機能や分子生物学、生物の適応、ならびに物理・化学現象など、自然現象全般に興味をもつ。

