

非線形・非平衡な開放系における生命的挙動
— 生命の非線形挙動の物理過程と情報 —

米澤保雄

愛知技術短期大学電子工学科情報処理コース¹⁾
名古屋大学大学院人間情報学研究科・物質・生命情報講座²⁾
「日本工業技術振興協会「遺伝的アルゴリズム研究委員会」³⁾

(1993年12月 7日受理)

はじめに:

本稿は1993年5月、6月に名古屋大学大学院人間情報学研究科において、同大学院の吉川研一教授のご厚意で大学院修士課程の院生に対して行った数回の連続セミナーの資料を基にしたもので在り、非生命的な物質及びその物理則に根ざした生命挙動を非線形・非平衡な開放系としての生命システムとして理解する試みに根ざしたレビューである。セミナーを行った大学院が境界領域の研究を目指す目的の為に、院生の出身は生物系、物理系、化学系並びに情報系と多岐に及んでおり、その為に、そのセミナーの内容は勢い、「生命の非線形挙動の物理過程と情報」と言う基本的な枠組みに終始したものとなった。

コンピュータの情報処理機能が物理学分野での研究対象たる自然システムのシミュレーションを実現出来る程に迄進歩してきた現在では、非生命的な物質を基盤として来た様々な学問領域が生命的挙動を捕らえる為に総動員されている現実を、情報を共通のプラットフォームとして行われつつ在る状態の明示をセミナーの第1目標とするのが、総合科学としての生命科学に適していると判断して講義した。既存のニュートン的な物理則から一見、はみ出した様に見られる生命的挙動である自己組織化、自己修復、自律分散適応、進化などを新たな科学的意識を持って従来の生物科学の枠組みに捉えられない共通性を持った、原理性に迄逆上る為に検討するにはどんな方法論の枠組みが芽生えて来ているのか、これが本稿の執筆意図であり、主に、専門を異にする大学院学生諸氏へ本分野へ参入する為の共通基盤を幾らかでも整備して、提示して置く事が重要であろうと配慮した結果生まれたものである事を先に申し添えておきたい。

1. 序：生命と情報

自然法則の解明をめざして芽生えた当時からの自然科学の主要な課題には^{*)}「生命とは何か」と言う耐え問ざる問いかけがあった。自然科学は物理学、化学、生物学などへと分化しつつもその各々の方法論の下で共通的な解答を導く努力を行って来ている。現在におけるこの解答は^{*)}「生命とは^{*)}」と言うシュレデンガーの問いかけ¹⁾によってはじまった。

¹⁾ 同短期大学助教授, ²⁾ 同大学院共同研究員, ³⁾ 同研究委員会客員

”非線形平衡な開放系”と言う見解であろう。生物学でその現象観測が、化学ではその基本的反応が、そして、物理学ではその基礎的な法則が各々、生命体”非線形非平衡な開放系である事を支持している。自然界に存在する様々な多様性を保持するシステムは、従来において、ニュートン力学系を基盤とする線形記述で多くの成功を収めて来た。今世紀(20世紀)多くの進歩はこの自然システムの線形記述を基礎とした工学的な応用として成されて来たと言える。分子生物学と呼ばれる生命の科学的記述分野もその例外ではなく、シュレデンガーの著名な著書「生命とは何か：物理的に見た生細胞」に始まる分子生物学の流れは、熱力学第二法則に反する極めて特異的な挙動こそが「生命的挙動」であるとして、その物理的基盤を解明する事の重要性の喚起をスタートラインとしている。

そして、一量子物理学者のこの生命挙動に関する知的好奇心の喚起は、遺伝子情報たるDNAの解明を生み出し、さらに、その人為的な操作技術に迄いたって、生物をこれまでの観測を重視する博物学から物理化学に基礎を置く還元主義に根ざした科学へ押し上げていったのである。我々の先人達は生命体とその示す挙動を徹底的な還元主義に基づく方法論を持って解明して来、分子生物学と呼ばれる分野を形成するにまで及んでいる。生物を機械システム的な観点に立って研究する事によって、我々は生命の仕組みと呼ばれる多くの知見を得てきたわけである。しかし、今世紀後半に至ってはこれらの還元主義に貫かれた生物科学の多くの成功とは裏腹に、生命現象と呼ばれる複雑さを持ち、高度に柔軟なシステムの理解が停滞期に入ってしまった。すなわち、決定論的な還元主義で与えられる知識だけでは生命が取る戦略や方法論は理解されるのであるが、その原理は謎に包まれたままなのである。これは、生命を機械システムとして見、その機械部品をつなぎ合わせる事で生命体が見せる様な超システムにはたどり着けない事を意味する。すなわち、生命の特徴とする部品の総和は部品の機能単純な合計を遙に越えてしまうのである。ここで、何か足りない事は明白であり、その何かに関しての探究が生命の原理とは何かと言う「生命システム論」を中心として展開されて行った事は自然の流れであろう。そして、複雑な系を複雑なままに扱う”なにか：方法論”が必要となって来たと言える時代が来ているのである。この何かは、従来の自然科学分野では扱い難いものであるがゆえに無視され、又、主要な因子とは認められ難い存在であった非線形現象である。そして現在、人工的な知能機械を目指して始まったコンピュータ科学によって、我々は生物の特徴的な挙動、物理的な機構、化学的な反応などを情報と言う統一的な媒体の中で操作する事が可能となりつつある。簡単には、コンピュータやその周辺機器などの情報処理媒体を用いた”非線形非平衡な開放系”の物理過程の情報的な実現が可能となっているのである。そして、この様な分野が”Artificial Life”と呼ばれて統合されはじめてるのである^{2・3・4)}。本論文ではサイバー・スペースにおける生命挙動の創生や解析による人工生命研究を踏まえて生命の非線形挙動の物理過程と情報を筆者の研究もまじえて総括する事とする。

注) Artificial Life : 人工生命又は人造生命と訳され、ALifeと略される

2. 物理過程と情報のパラドックス

コンピュータやその周辺機器などの情報処理媒体に於ける人工的な生命挙動生成について述べるまえに、物理過程と情報との密接な関係に言及しておく必要がある。すなわち、人工生命研究がその前提としている物理過程における情報の役割を明確にして、生命を物理的に捉える場合の情報の位置付けを明確にしておかなければならない。

先ず、Cairns-Smith の考察にもとづく物理状態と情報の相関を以下に示す⁵⁾。

物 理 状 態	情 報 的 定 義
Disorder: 無 秩 序	情 報 の 保 持
Order : 秩 序	複 製 伝 達 精 度 の 向 上
Growth : 増 殖	複 製 過 程 の 実 施
Cleavage: 分 裂	複 製 過 程 の 修 了

自然界で形や機能を持つものは組織化されており、組織・システムと呼ばれる。ここでは、情報とはシステムや組織の関数であるとの立場取っていて、システムを無秩序化することは、そのシステムの情報が失われて行くことと指すわけである。反対には、情報量を序々に低下させたシステムはその以前の組織を保持することが出来ずに、組織化される事で発揮されていた機能（組織的機能）も又低下してしまう事を意味している。

コンピュータ上で人工生命を創生（シミュレーション）する時に使われる様々な物理過程と、その生成源である情報との関係は上述した組織性（Organization）と情報との関係によって次の様に集約される。

[情報と組織性: Stonier の公理]

① 組織化されている構造は情報を持つ

何らかの構造的、すなわち、形態的な情報を含まないで秩序化は行われず、よって、情報を持たない組織化された構造は存在しえない。

② 組織への情報供給はその組織を再組織化させる

無秩序状態への情報供給は組織を生成させ、すでに組織化されているシステムへの情

報の供給はその組織を変化(再組織化)させる。すなわち、より多くの情報量を含む組織構造はその情報量に対応した複雑さを持ちうる。

- ③ 組織・システム(組織化されたシステム)は情報の放出および伝播能力を持つ情報によって組織化されている事から、組織は情報を放出する機能を本来的に供え、又、情報の再組織化機能は近傍への情報伝播機能を構成出来る。

この様に情報を組織化と言う物理過程と関連づける媒体としてエントロピーを用いてその関係を下記の様に定式化することが出来る。

(I : 情報, S : エントロピー, k : 物理定数, c : 情報容量)

$$I = c e^{-s/k}$$

ここで絶対零度の時、すなわち、エントロピーが0の場合での情報容量を I^0 とすれば

$$I = I^0 e^{-s/k} \text{ である。}$$

この様に、情報を物理的な実在として扱う事が可能である。さらには、情報の扱いを筆者は人工生命を生成すると言う観点から次の3つに分類している。つまり、情報理論の中で吟味・展開されて来た情報の数理的・形式的な定式化である「情報の量」としての取扱、コンピュータ・シミュレーションなどによって急速に進展しつつある情報の物理学的定式化とそれにもとづく「情報の作用性」に関する取扱、そして、個々の組織やシステムごとで与えられて行く「情報の意味」に関する取扱である。

情報の取扱分類	<u>情報の量</u> ・ <u>情報の作用性</u> ・ <u>情報の意味</u>
---------	--

我々はすでに、コンピュータによって、情報を量的に扱う事、そして、その高度な情報処理機能によった、物理的な実存として扱う事は可能となっている。すなわち、物理過程は情報表現可能であり、又、コンピュータ上での物理的情報モデルやその理論計算は物理的な実在性を持ち得ると言えるのである。人工生命の研究はこの様な情報科学の背景を基盤として成立しており、3つ目の「情報の意味」に関しては、まさに今、人工生命の研究の枠組みの中で言及されようとしている。情報の意味論がコンピュータの仮想環境の中で育まれた人工生命の集団社会の中で開花しようとしているわけである。情報の意味論がとりざたされて久しいが、その情報が存在する環境に対応して、その情報の持つ「価値と役割：意味」が異なる事は理解されるが、その共通項を物理則と対応させて探ることが人工生命研究では期待される。

3. 人工生命の基本：時間発展性を持つリミットサイクルをカオス系

主に、遺伝子工学において遺伝子操作された生物（遺伝的な改良種の生物）に用いられていた「人工生命：Artificial Life」という言葉が情報科学分野で公式に使われ始めたのは1988年の第1回人工生命会議であり⁷⁾、比較的最近のことである。すでに、この会議は第2回が1990年に、第3回が1992年に開催（米国ニューメキシコ州・サンタフェ：サンタフェ研究所にて）されており、開催回数ごとに参加人員が増加すると言う盛況ぶりを見せている。この会議において、会議の主催者であるクリスタファー・ラングトンが人工生命研究の枠組みを次の様に提唱している。

「人工生命研究とはとはコンピュータやその周辺機器を含めた情報処理媒体を用いた生命的な挙動生成の研究である」

そして、その方法論に関しても以下の5つに分けて述べている。（概略図参照）。

- ① 構造のモデリングによる生命挙動生成
- ② 機能のモデリングによる生命挙動生成
- ③ 集団挙動のモデリングによる生命挙動生成
- ④ 原理的計算（物理則計算など）による生命挙動生成
- ⑤ ①～④による普遍的な生命挙動生成原理の抽出

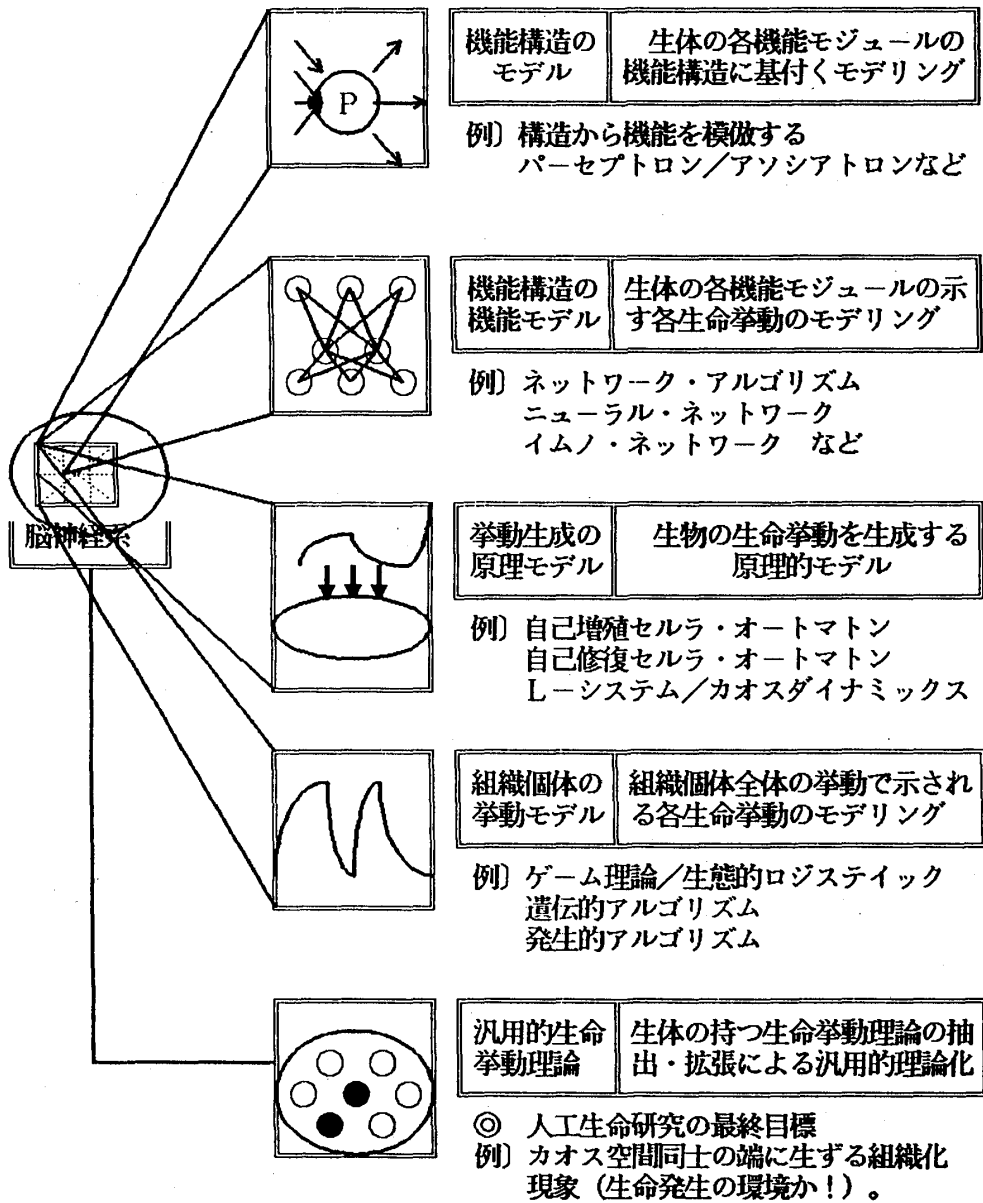
我々は①、②、③までの方法論に関してはすでに生命科学や情報処理における人工知能の研究に用いて来た経緯があるが、従来の生体情報処理モデルを基盤とした研究分野において類を見ない、又、最も強力な方法論として登場したのが④であろう⁸⁾。

④は生命の物理的な基本構造である「非線形非平衡な開放系」に認められる挙動の生成原理を用いた情報処理媒体上での生命挙動の生成を図るものであり、ここにその新規性がある。従来の生体情報処理モデルのシステム記述がトップ・ダウンであるのに対して、この記述はボトム・アップと言え、生命の様な高度な自律分散システム構築を夢見てきた我々の踏み入れていない方法論と言えよう。

◇ 生命システム理解への人工生命のインパクト

生命現象解明への様々なアプローチはその観察、計測、制御において無生物には見られない生体に特有な生化学的、組織化学的、又は自然環境（物理則環境下）と言う物理的障害などによる制限下で行われる為に様々な制約を余儀なくされている。その為に、これらの制約が取り除かれる為の工学的又は生化学的な手技・手法が開発されるまでの間の研究遅滞は逃れえぬものとなる。ところが、人工生命では物理過程を情報として扱い、コンピュータなどの情報媒体の内的空間で実在物として処理することが可能である。よって、生体特有の実験的な障害はひとまずは取り除かれる。以上の様な人工生命におけ

ソフトウェアによる
人工生命の生成方法論



〔 概 略 図 〕

う物理過程を情報処理で代行する方法論は生命システム理解に取って、極めて強力なものと言える。我々は現在の強力なコンピュータ能力で様々な観測や測定が可能な現象からその物理過程を仮定して、シミュレーションすることが可能なのである。⁹⁾

では、情報における原理的な生命的挙動生成にはどのようなものが使われているのか！。この原理には「非線形非平衡な開放系」を対象とする非線形物理学の研究領域では日頃から見慣れ、又聞き慣れているリミットサイクルとカオスが用いられている。自励振動 (Self Excitable Oscillation) と呼ばれるリミットサイクルは近傍の位相面軌道が閉軌道にざんじ漸近して行くので、我々はしばしば揺らぎとして観測出来る。又、カオスはリミットサイクルに加える周期外力の振幅を大きくして行くと起こる現象で、構造が単純な系で現れる一見乱雑な非周期運動として観測される。

リミットサイクルとカオスの両者ともに「構造安定」であるが、その差はリミットサイクルでは僅かな初期値の差(初期条件の差)ではその後の運動(取りうる軌道の終点)に大きな影響を与えないのに対して、カオスでは初期値の僅かな差異が時間経過とともに急区に拡大されて行き、近似的にも再現困難(軌道不安定性と呼ばれる)である事である。生命システムに当てはめた場合、簡単には、リミットサイクルは生命システムのローバスタ性を与え、カオスは多様性を与えていると考えられる。

コンピュータのサイバー空間における生物(細胞:セルラ・オートマトン)ではリミットサイクルが生体のマイクロリズムを生み、複数のリミットサイクルの「引き込み現象」によって、さらに、さらに新たに異なるリズムを生成して行く様が容易に観察される。又、組織化された秩序系から序々に乱雑度を増したカオス系に移行する、もしくは、カオス系から序々に組織化された秩序系へ移行して行く場合にも生命的な興味深い挙動が見受けられる¹⁰⁾。これは、カオスと秩序の境に認められる軌道不安定性であるが上ゆえの膨大な記憶容量と、秩序性による制御の可能性に基づく高度な情報処理機能への期待につながっている。

4. バーチャル空間の生命とその共通性

人工生命はコンピュータのメモリー上に構築されるバーチャル空間で生成される様々な生命的な挙動である。空間におけるカオスやリミットサイクルの情報的な枠組みに基づき研究の多くはウムラによって考えられ、そして、現存するコンピュータ・アーキテクチャーの考案者として名高いJ. F. ノイマンによって確立された「自己増殖セルラ・オートマトン」をその基礎としてなされている。筆者らを含む原理的アルゴリズムによる「人工生命」創生に係わる研究者達の多くが、このセルラ・オートマトンを細胞又は生物のモデルとした、多峰性・離散系である非連続空間でその生成を実施している¹¹⁾。

ここで、セルラ・オートマトンで構築される理論空間(バーチャル空間)において人工

生命生成に共通的に用いられている理論（アルゴリズム）を一覧する事とする。

生命的挙動の特徴としては自律的な自己組織化、自己増殖及び修復、さらに、その組織のリズム生成や適応機能、それに基づく学習機能、進化性などが挙げられる。これら野挙動は人工生命では次に掲げる理論やアルゴリズム化された現象などでなし遂げられている。

生命的挙動	理論及びアルゴリズム
自己増殖 自己修復	自己増殖セルラ・オートマトン理論 [セル状態の遷移理論]
自己組織化	リミットサイクルなどの引き込み [アトラクタの引き込み理論]
形態形成	① L-システム [セルラ・オートマトンにグラフ生成機能を付加したアルゴリズム] ② カオス周期上に生まれるフラクタル次元のアトラクタ
学習機能 進化機能	① 遺伝的アルゴリズム [Genetic Algorithms] (生物集団群におけるゲーム理論やコンフリクト数理を含む) ② カオス・秩序境界領域の計算性

以上の理論やそのアルゴリズム化されたものが人工生命生成の枠組みの共通項として使われており、これらが複合的に組み合わされているのが現状である。どれを取っても非線形非平衡系に対応する事が出来るものばかりであり、これらの組み合わせはプリミティブではあるが生命挙動に必要な組織化機能と同時に適応の為の多様化機能(乱雑性:自由度)と学習の為の記憶機能を与える事が出来る。

生命的な複数の特徴的挙動の統合化によって現される「自己組織化」と呼ばれる物理過程に関しては、フォン・ベルタランフィー、アイゲン、ハーケン、ローレンツ、プリゴジン、ヤンツなどを代表とする極めて多くの研究者達によって言及され続けてきた。だが、現時点において振り返って見ると、これらの言及は自己組織化の一つの側面にのみ関心を示されて行われてきたと言わざる終えない。この様な経過は一つ一つの側面だけでもその当時の情報処理能力では手に余す程のものであった事を意味している。

しかし、人工生命は物理過程を情報として実在化する事と、その情報を今までに無い程強力な計算機能力を持ったコンピュータと言う高性能な情報処理媒体で扱う事によって、

この様な現状をひっくり返す程の駆動力を持っていると期待される。我々は十分に注意深く提起すべき物理過程を各々に情報化（アルゴリズム化又は定式化）し、コンピュータに入力する事で、複数の物理過程を複合的に又階層的に、しかも、容易に扱い、観測する事が可能である。我々は生命挙動を構成する複数の物理過程を精確に、いかなる組み合わせにおいても、複合させて、同時に、繰り返し得るのである。しかも、情報処理のアルゴリズムに乗せられている（インプリメントされている）全ての条件は、すぐに変更可能である。理論的には、生命挙動の生成機構に関しての複雑性の異なる全ての階層に当てはまる様な枠組みを検討する事が出来るのである。もちろん、納得の行く結果が得られたならば、その結果をどの様にして生体原理として実証するのかと言う問題は付きまとうのではあるが、人工生命は新たな実証の方法論を得る為の知見すら検討する事が可能である。

5. 人工生命による複雑系の解析と生命システム

生命システムの研究では生体機構の解明が重大事項である。実際の生体においては、その複雑な系を同時に、又、単一な観測系として扱う事は極めて困難であると言わざるを得ない。ここで、人工生命研究の一端を示す為に、実際に筆者らも含めて行われている複雑系の解析研究を要約する事とする。

先ず、我々は人工生命研究ではポピュラーであるセルラ・オートマトンを細胞又は生物の一個体として扱った「遺伝的アルゴリズム：Genetic Algorithms [以下GAと呼ぶ]」と呼ばれるアルゴリズムによって複雑系の解析を行った。^{12, 13)} このアルゴリズムは対象とする系に対処する情報を生物内に遺伝子情報（Genetic Code）として持たせたセルラ・オートマトンの系を用いる。そして、生物の営みである交叉、自然環境で起こる突然変位による情報の混雑や新規情報の生成を行い、多峰性を持つ複雑系での準最適解を与えるアルゴリズムとして知られている^{14, 15)}。その本質は遺伝子情報として記述された環境系への適応の情報を効果的に利用する為の学習であり、又、その学習で乗り越えられない場合の新規情報の生成にある。もちろん、新規生成された情報も又、学習に組み込まれて行き、系への適応学習の効率を向上させるべく用いられる。しかし、GAを施された個体を構成要素とする集団群で作られる階層構造による複雑系（社会系）では、或る程度までの解析が期待されるが、一個体内部に階層構造を含む複雑系の解析には十分な効果が期待出来ないと言う結果を得た。これは、GAで記述される遺伝子情報の発現系（デコード系が単純過ぎる事に起因していると結論された。すなわち、情報発言が直接的な系への適応に役立つのみならず、生物個体そのものの様な高次機能の構築に用いられている様な、連鎖的な情報関連性を持っている場合には、GAでは記述困難であり、又、この実現を現状のGAで行う為には、膨大な発現制御情報の記述が必要とされるのである。

この様な問題点を解決する為には、すでに実存の生体DNA情報の発現で知られている

様な階層的な発現を可能とする記述が必須である事は明らかである。そこで、我々は生体内に見られる様な遺伝子発現のネットワーク処理が必要であると考えてGAのデコード系の拡張を行う事による「発生アルゴリズム」の開発を行っている¹⁶⁾ (図1参照)。

従来の方法では生体のDNA情報の記述形式やその発現制御をモデル化する事が妥当であるが、人工生命では実際の生体で解明されている機構モデルをさらに付加する事が可能である。さらに、この様にして構築された情報モデルは、先にも述べた様に、複雑度の異なる階層においても適応出来る。よって、生物個体の発生現象の情報モデルとして構築した本モデルを、再び、集団群における多峰性事象に当てはめる事が出来る。この場合、遺伝子ネットワークでの情報通信は生物個体間の情報通信に書き換えられなければならないが、アルゴリズム記述(プログラム)の簡単な書換え(修正)で全てが実行出来る(又は、セルラ・オートマトンの遷移関数の受渡して行う事も可能)。すなわち、極端な例ではあるが、遺伝子ネットワーク通信から生物社会の情報通信(文化の伝播)に至るまでの同じ処理の枠組みで検討する事は可能となるのである。

さらに、同様なかたちで免疫機構モデル、酵素反応の機構モデルなどが研究されている。又、脳の情報モデルはニューラル・ネットワーク情報処理として著名であるが、このモデルが実際の脳の情報処理とはかけ離れている事は周知である。人工生命では脳の示す非線形非平衡系特性であるカオティックな挙動から、カオスと秩序との境界における計算機能性に着目して、脳が行う複雑な計算モデルとしてカオスによる情報圧縮や情報検索の構築をすでに行いつつあるのが現状である。ちなみに、カオスの持つ軌道不安定性は想起的な記憶の可能性を秘めていると言える、すなわち、初期値をキーコードとして持てば、カオスを再現して軌道を生成すれば、膨大な情報記憶空間がそこに得られる可能性があるのである。この様なことによって、従来の形式的なニューラル・ネットワークよりも実際の脳の情報処理に近づくようとしているのである。

おわりに：非線形非平衡系の情報処理能力

生命はその維持の為に自己組織化を定常に行わなければならない、そして、組織化と言う物理過程を行う為には情報を必要とする。それも、外界から与えられる情報だけではなく自己組織化を行う為に自己生成(自律生成)する必要が生じる。非線形非平衡系で現れるカオスは初期値の小さな違いによって、「軌道不安定性」と言う軌道を大きく変える性質を持っている。この性質によって、軌道安定なものに比べて無限大とも言える情報生成が可能である。軌道不安定性による膨大な量の情報生成は様々な自然界の変化に対処する為の情報源として用いられているのではないかと考えられる。¹⁷⁾ 後は、生体内に見られる個別な機構がどの様にしてその生物個体にとって意味ある情報を選別し、用いているのかに取りかかる事である。以上、人工生命を通じた生命システムと言う「非線形非平衡系における挙動」を総括して来たが、情報と言う媒体を通して、生物学、化学、そして、物理学を真の意味で統合出来る時代に差しかかっているのではないかと筆者は考えている。

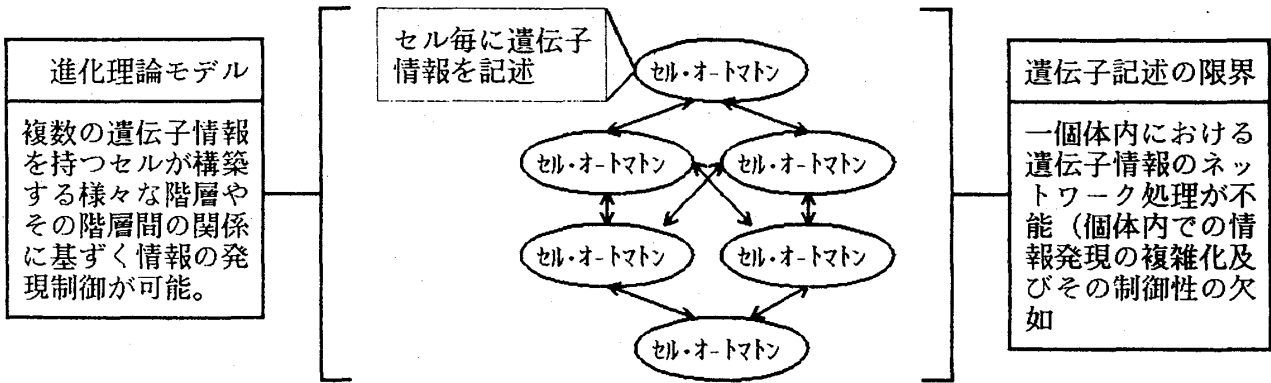


図1. A : 遺伝的アルゴリズムの欠点

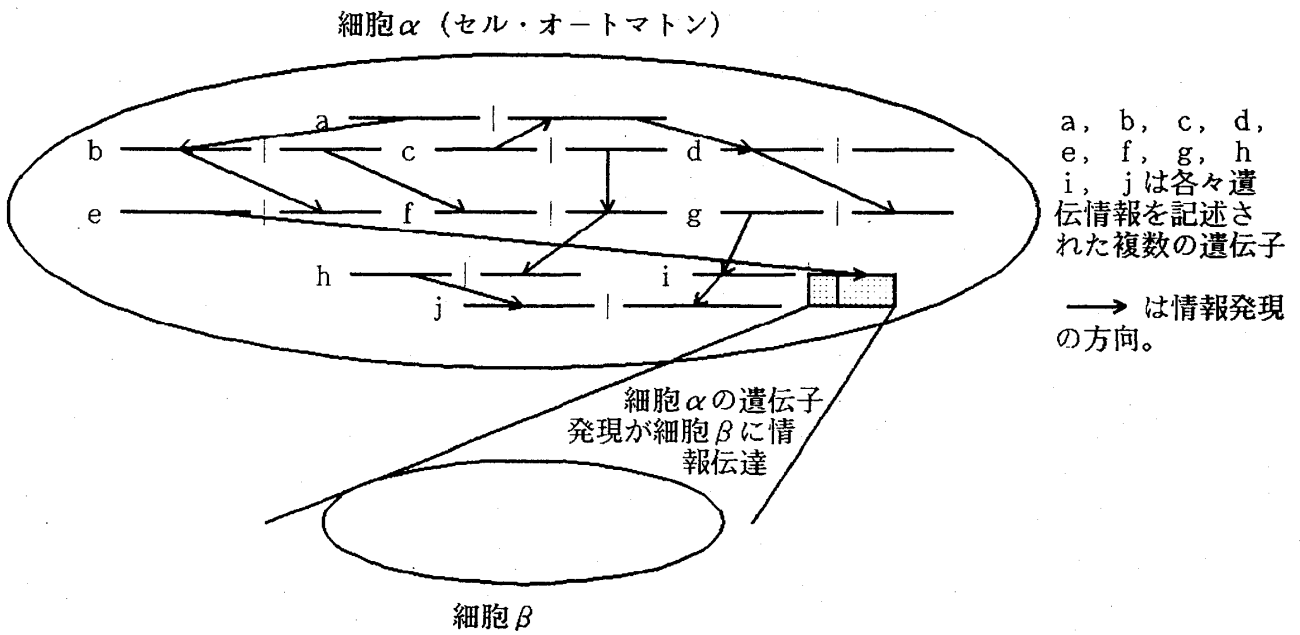


図1. B : 発生アルゴリズムの概念

図1 : 遺伝的アルゴリズムの問題と発生アルゴリズムの概念図

最後に、本稿を執筆するに当たり、筆者を共同研究者として迎え入れ、様々な貴重な示唆を与えて頂いている名古屋大学大学院人間情報学研究科の吉川研一教授、並びに、同研究室の大学院生諸氏との議論が大きな刺激となった事をここに記して、感謝の意を表したいと思います。

文 献

- 1] Erwin Schrödinger(1944) "What is Life: The Physical Aspect of the Living Cells" Cambridge University Press.
- 2] C.G.Langton(1988) "Artificial Life" Addison-Weseley
- 3] C.G.Langton(1991) "Artificial Life II" Addison-Weseley
- 4] C.G.Langton(1993) "Artificial Life III" Addison-Weseley
- 5] AG Caris-Smith & Hartman(1986) "Clay Minerals and the origin of Life" Cambridge University Press.
- 6] T.Stonier(1990)"Information and the Internal Structure of the Universe" Springer-Verlag.
- 7] 米澤保雄" ECAL-93 & WAL-92会議報告 -人工生命研究の伝統と斬新性 -" 人工知能学会誌(1994) in Press.
- 8] Y.Yonezawa(1993) Computer Today, Vol 10, No3, pp70-79
- 9] 米澤保雄(1993) "研究開発支援システム・構築活用便覧", pp127-175 アーバンプロデュース社刊
- 10] N.Magome, Y.Yonezawa and K.Yoshikawa(1993), Proc.Self-Organization and Life : From Simple rule to global complex. pp639-648
- 11] L.Davis(1991),"Handbook of Genetic algorithms" Van-Nostrand-Reinhold.
- 12] 米澤保雄(1993) "遺伝的アルゴリズム: 進化理論の情報科学" 森北出版刊

- 13] 米澤保雄(1993) 第4回自律分散システムシンポジウム資料, pp93-97.
- 14] 米澤保雄(1993) 通学技報, Vol193, NLP93-11-14, pp1-8.
- 15] 米澤保雄(1992) システム制御情報学会大会論文集, pp331-332
- 16] 米澤保雄(1993) 知識野リフォーメーションシンポジウムプロシーディング., pp81-88
- 17] Y.Yonezawa(1993) Proceedings of Advanced Database system Symposium'93 pp191-196