

コンピュータは生物情報処理をまねられるか？

田仲 広明、村田 典幸、鎌田 富久

ACCESS 研究開発室

概要：推論、パターン認識、音声認識など情報処理の各分野で、生物的（あるいは人間的）な情報処理に対する期待は大きい。しかしながら、他方で真の生物らしい情報処理に近づくための決め手となる成果が少ないのも事実である。ここでは、生物の本質を簡単に解説しながら、その特徴を参考にすることにより何等かの情報処理工学分野でのヒントは得られないか、お話したい。

1. はじめに

コンピュータという人間が発明した機械に何をやらせるかというのもまた人間の問題である。かつては、たいした能力もないのに、高価で大きかったことから、特別な数値計算など特定の用途に使われるだけであった。ところが、最近ではマイクロプロセッサの進歩にともない、高い性能を持つにもかかわらず安価でかつ小型な形態となり、ありとあらゆる装置に応用されようとしている。また、その用途は単なる数値計算にとどまらず、制御やユーザインタフェースにふんだんに使われてきている。

見かけの機能も、どんどん優秀になってきて、なんとなくものを考えたり、話を理解したり、図形を認識したりしてるかのごとき振舞いをするような仕掛もコンピュータを利用して考案されてきている。このため、ともするとコンピュータがそのまま進化すれば生物（あるいは人間）のような情報処理能力を容易に持つのではないかという錯覚にとらわれたりする人も多い。

しかしながら、どうだこうだといっても現在の

コンピュータは所詮チューリングマシンである。余り多くない内部状態をどの様に遷移させるか、人間が知恵を絞ってプログラムすることにより動作している機械である。したがって、生物というかなり異なる複雑なメカニズムを内在するシステムに容易に肉薄できるとは思えない。しかし、とりあえず敵を知ることは重要である。また、その敵に向かって攻めていく内に、思いもかけない分野で工学的成果に結び付くことも十分考えられることである。われわれはそのようなスタンスに立ち、生物のもついろいろな特徴を学ぶことにより、新たな工学的展開を考えたい。

2. 必要な基礎的知識

一般に分子の世界では、もし系が外界と独立しているとすると（独立系）、完全に無秩序な状態（平衡状態）が最も安定である。そしてもし、系が非平衡な状態であれば系は平衡状態に向かって時間変化していくと信じられている。これは熱力学の第2法則で示されている。すなわち、エントロピー(S)は平衡状態の時最大であり、もし非平衡（つまりエントロピーが低い）状態にあれば、時間とともにエントロピー(S)は増大し、ついには平衡状態に達して変化は終了する（図1）。

Possibility of Biomimetic Information Processing by the computer.

Hiroaki Tanaka, Noriyuki Murata, and Tomihisa Kamada
Research and Development, ACCESS CO., LTD.

$$\frac{ds}{dt} \geq 0 \dots\dots\dots (1)$$

このことは、一見「生物」の存在と矛盾している。何故なら、生物はきわめて精密な秩序をもって（エントロピーが低い状態）、その秩序が長時間にわたり（生まれてから死ぬまで）維持されつづけるからである。

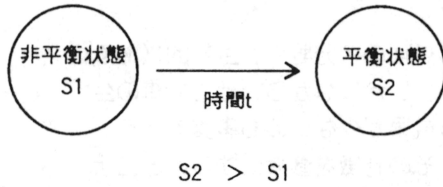


図1. 非平衡から平衡状態へ（独立系）

このなぞは実は別のところで解決されている。すなわち、生物は上で仮定したような独立系ではなく、常に物質とエネルギーの交換を外界と行っているのである。このような系は開放系とよばれるが、この系がエントロピーの低い状態を維持しつづけることは以下のように、不可能ではない。

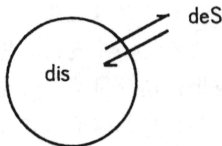


図2. 開放系（たとえば生物）

開放系の場合、系のエントロピー変化（dS）は2つの部分に分けられる。一つは、外界とのエネルギーおよび物質の交換に関するエントロピー流であり（deS）であり、今一つは系の内部で生じる不可逆過程（非平衡状態から平衡状態へ向かう）に由来するエントロピー生成（diS）である。

$$dS = deS + diS \dots\dots\dots (2)$$

ここで、系の内部の不可逆過程に関しては熱力学第2法則より次式である（等号は熱平衡時）。

$$diS \geq 0 \dots\dots\dots (3.a)$$

独立系の場合、外界とのやりとりがないので deS=0

であるから、

$$dS = diS \geq 0 \dots\dots\dots (3.b)$$

となり、(1)と等価である。

さて、外界とのやりとりの結果、deSは正にも負にもなりうる、従って、もしdeSがdiSに比べ十分負であればdSは負となる。そして、そのような状態がづけば系は初期状態よりもよりエントロピーの低い状態に時間発展することが可能である。

$$\Delta S = \int dS < 0 \dots\dots\dots (4)$$

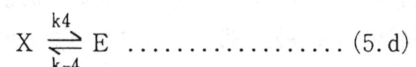
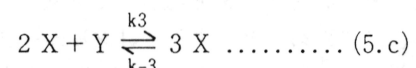
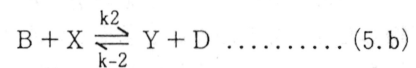
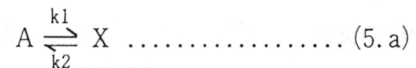
もちろん、その後 deS=-diSであれば、系はそのエントロピーの低い状態を維持できる。

熱力学は、諸々の現象を最も大きな枠組みでくくっている、そのようなレベルで考えて生物の本質は何かといえ、[常に外界とエネルギーならびに物質のやりとりをして、内部の秩序を維持している]ということがいえよう、逆にいえば、何らかの外界の非平衡性を利用（すなわちエネルギーの散逸）して、系にある秩序を造り出し、それを維持し、機能に結びつけるメカニズムを備えなければ、”生物らしい”と呼べる装置を作ることにはできない。このことは、問題点を整理する上で常に頭の中に入れておかなければならないポイントである。

3. 化学反応系での秩序形成

さて、前項での議論を、ブリュセレータと呼ばれる仮想的な化学反応を用いて説明したい。

ブリュセレータは次式に示すような非線形反応である。



ここでA,Bは原料、D,Eは生成物、X,Yは中間体である。

詳細は省略するが、反応中に3次以上の非線形性が入っていることが重要(5.c)であり、秩序の形

成はこの条件が必須である。

この仮想的反応を解析もしくはコンピュータシミュレーションすると、次のような事柄が明らかとなってくる。

(1) 独立系

A, B, D, Eを一つに容器に入れ、反応を開始させる場合を考える。容器は外界と物質のやりとりはできない。すると、系はどのような初期状態にあっても、反応がすすむに従いより安定な状態へ向かい、ついには平衡状態へ到達する。図3

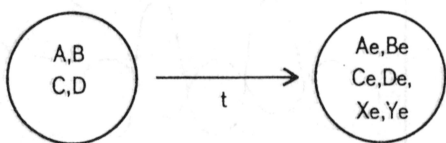


図3. 独立系の反応

※A, B, C, Dは初期状態の各物質の濃度、Ae, Be, Ce, De, Xe, Yeは平衡状態での濃度

この時間経過は図4のようになる。初期状態の非平衡性があまり大きくなければ、単純に緩和していくだけである。

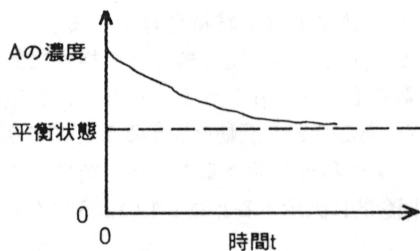


図4. 独立系の時間変化 たとえばAの濃度

最終的にA, B, D, Eが到達する濃度は次式のようになる。

$$E/A = K1 \cdot K4 \dots\dots\dots (6.a)$$

$$D/B = K2 \cdot K3 \dots\dots\dots (6.b)$$

ここで、 $K1 = k1/k-1$, $K2 = k2/k-2$, $K3 = k3/K-3$, $K4 = k4/k-4$ である。

平衡状態に至るまでの非平衡状態下では、次項以降で述べる非平衡の特徴が観察される。しかし

ながらそれは持続せず、ついには平衡に至ってみられなくなる。

(2) 弱い非平衡状態

原料であるA, Bおよび生成物であるD, Eの濃度を外部から制御し、常に弱い非平衡の状態を維持するようにすると、非平衡の定常状態を作り出すことができる(図5)。

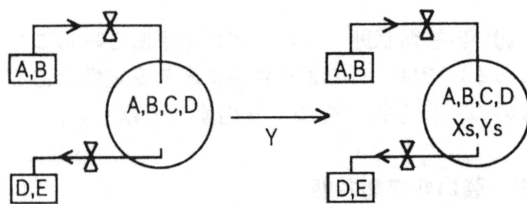


図5. 開放系の反応 Xs, Ysは定常状態の値

もちろん、A, B, C, Dの濃度を一定に保つよう現実の装置を考案することは大変だが、ここではあまり深く考えない。当然、この系は外界と物質のやりとりがあるため、開放系である。

弱い非平衡とはE/Aの比、D/Bの比が平衡状態の値に近く、反応を線型とみなしてもよい領域を指す。この時、X, Yの時間変化は図6のようになる。

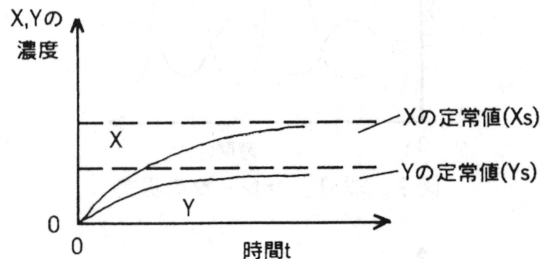


図6. 非平衡定常状態

X, Yは初期値によらず、それぞれの定常値に緩和する。定常状態においては、反応は一定の速さで進んでいる、定常状態からはずれているときは、時間あたりのエントロピー生成量は定常状態のときよりもずっと多くなる。しかし、この生成量は定常状態に向かうに従い減少し、定常状態では最少となる。これをMinimum Entropy Productionと呼ぶ(図7)。

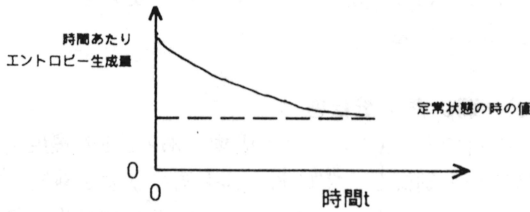


図7. Minimum Entropy Production

弱い非平衡状態（これを線型非平衡と呼ぶこともある）では、このように系にある安定性はあるものの、自ら秩序をつくり出すことはない。

(3) 強い非平衡状態

A, BおよびD, Eの濃度を大きくずらし、系の非平衡性を十分強くすると、反応のもつ非線型性が効いてくる。このような状態になると、系は自発的に振動を開始する（図8）。すなわち、時間軸方向の秩序を自ら形成する。この振動の観察結果を、図9に示すようにXYの座標にプロットすると、ある軌道がえがかれる。

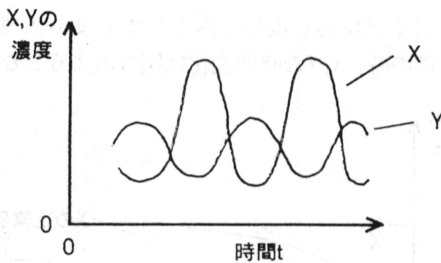


図8. ブリュセレータの振動

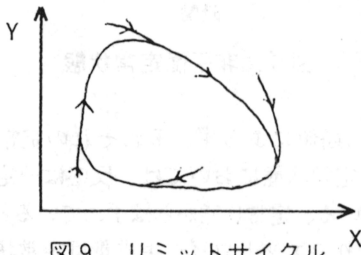


図9. リミットサイクル

当然この軌道上を回るのに伴い、化学反応の方も振動しながら進むわけで、この軌道を維持するには、外からの物質（非平衡性）の持続的流入出

（逸脱）が不可欠である。

この軌道はリミットサイクルと呼ばれ、ある安定性をもっている。すなわち、この軌道上からXとYの値を少しずらしても、必ずこの軌道上に収束し、この軌道上を回転する。その意味である種の動的安定性があるといえる。

振動が観察されるようなプリューセレータを空間的に複数接続すると、X, Yの空間的パターンが生成する（図10）。

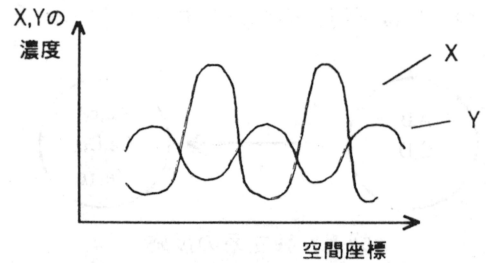


図10. 空間的パターン

このパターンにも安定性があり、局所的にX, Yの値を多少ずらしても、通常しばらくすればもとに戻る。もちろんパターンの出現のベースには、化学反応の進行があるわけで、このパターンもエネルギーの散逸によって維持されている。

出現するパターンは、空間的結合の様式に依存して、複数のものが存在しうる。そして、特定の位置のX, Yにある特定の摂動を加えることにより、別のパターンへ移行させうることが可能である。これを概念的に図示すると図11のようになる。

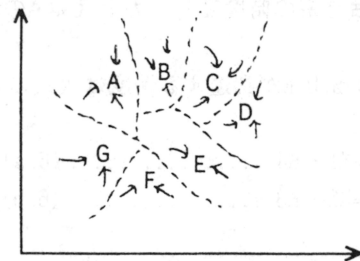


図11. パターンの遷移

たとえばある適当な多次元空間を用いると、それぞれのパターン（A~G）は、定常点としてプロッ

ト可能である。空間内のある位置からこの点へ収束するかにより、あるマップを書くことができるはずである。また、となりあうパターン（たとえばA→B、A→G）へは移りやすく、A→Dは他の領域を一度経ることが必要である。しかし、適切な経路（摂動）を選ぶことにより、非常に小さなエネルギーで、系全体に出現するパターンを自在に制御できるのではなかろうかと想像することはそれほど難しいことではない。

空間的パターンが出現するような系の非平衡性をさらに強くしていくと、空間的に波が伝搬するような、動的な時空パターンを観察することも可能である。これはちょうど図11の空間上にリミットサイクルが生じるようなものである。

これら散逸にとまなう時空的構造を散逸構造という。

(4) カオス

ブリュセレータ単体の場合には、仮定に由来する制約から観察されることはないが、一般に高次の非線型性をもつ非平衡系の、非平衡の程度を強くしていくと、ついにはカオス状態に至る。この状態では、軌道はリミットサイクルのように収束するのではなく、ある空間領域もしくはある軌道（ストレンジアトラクタ）の近傍を中心として動くような、複雑な挙動を示すようになる。これをカオス状態と呼ぶ（図12）。

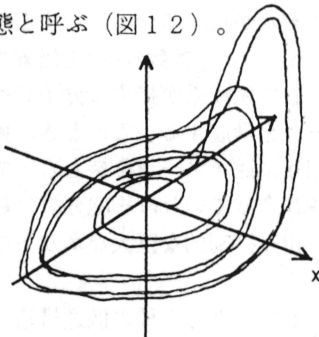


図12. カオスの例

カオス状態の詳細については、他書に譲るとして、以下の事項について注意したい。

- 1) カオスもまた散逸により維持されている。
- 2) 軌道の時間発展は、ある有限時間内にある精度で予想することが可能であるという意味で安

定性がある。

- 3) 将来大きくはなれてしまう二つの軌道が空間的に接近している所では、小さな摂動を加えることにより、別の軌道へ移るといったタイプの制御を効果的に行えるであろう（図13）。

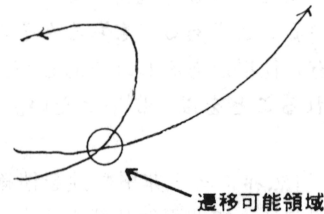


図13. カオス軌道間の遷移

さて、以上述べてきた系の性質を非線型非平衡性の程度により分類すると図14のようになる。

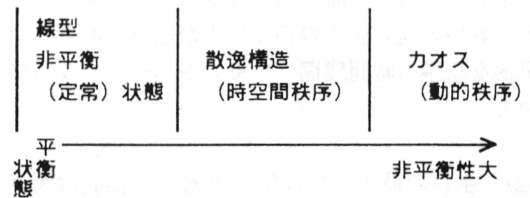


図14. 非線型非平衡の程度

生物の場合少なくとも散逸構造が現れるより右側でその生命動を営んでいる。一般に生物は多種多様な非線形な多数の要素からなりたっていることから、非線型性は非常に強い。従って、当然カオス状態が生命活動に現れたり、あるいはカオス状態を生命活動がうまく利用したりすることは、容易にありえることと考えてさしつかえないのではないと思われる。

(5) 系の制御

前述したように、散逸構造やカオスに対しては、適当なタイミングで適当な位置に適切な大きさの刺激を加えることにより、系を任意に制御できる可能性がある。この制御は系の自律的時間発展をたくみに利用することにより、非常に小さな（しかし有限の）エネルギーで行うものである。

4. 生物の特徴

さて生物は、確かに散逸構造のカテゴリーに含まれるが、一般に非生物の世界で見られるものと本質的に異なる。それは、非生物の世界の散逸構造に比べ、圧倒的に安定性が高いことで、何十億年もの歳月にわたって生物進化という形で徐々にそのその形を変えつつも、現在までとりあえず存在し続けていることである。もちろんそのためには、生物特有の仕掛があるわけであるが、とりあえず考えられることを以下に挙げたい。

(1) 生物は自然界にある非平衡性を積極的に自分の体内に取り込んで非平衡状態を体内に作り出し、それによって生じるエネルギーの流れにより、動的にその構造を保っている。生物を構成する要素は、その生物活動を維持するために極めて多様化しており、個々には互いに特異性の高い相互作用をしている。生命活動と呼ばれる諸現象は、この特異性の高い個々の相互作用が組み合わさった動的な秩序の時間展開プロセスがベースになっている。

(2) 生物の最小単位は細胞である。細胞は大きく分けて、細胞質の部分と、核に分けられる。

細胞質では、エネルギー代謝反応があり、その結果として、細胞の構造維持に必要な要素を作り、構造を更新する。また細胞運動をおこす。細胞質は、一種の散逸構造で、核がなくてもしばらくの間はその動的構造を維持できる。

細胞質で起こる反応の鍵となるタンパク質の構造を決める記号列は、核の中のDNAに記されている。核では、細胞質の状況に応じて、それがいかに読み出されるかということによって制御が行われている。

(3) 細胞の集団の中に、集団全体にわたる分化因子の散逸構造ができ、その構造からのフィードバックで個々の細胞が分化する。個々の細胞の分化は、個々の細胞が持っているルールにしたがう。一部の細胞が死んだり、入れ替わっても、構成要素が更新されるだけで、全体には影響が無い。一

旦分化が起これば、今度は分化した細胞集団が構成する散逸構造が、その次のステップのためのフィードバックを個々の細胞に与える。そして、それぞれの細胞で、分化したルールにしたがってさらに分化が進む。この繰り返りで、高度な分化が起これる。

(4) 細胞が集まって機能を発現するに当たっては、筋肉のようにエネルギー消費を利用して効果を発揮する部分と、神経や内分泌系のように主にこれらを制御をする情報系の部分の2つに大きく分けられる。しかし、後者の場合も、その基本的な機能はエネルギーの消費をとまなう動的なプロセスより維持されている。実際、例えば脳における神経の興奮のも散逸構造的なパターンやリズムがみられている。

(5) 生物（細胞或いは個体）は、細胞分裂や単為あるいは有性生殖により、同じ様な形の同じ様な機能を持つ構造（娘細胞或いは子孫）を作る。この時、遺伝子に含まれる情報は保たれる（有性生殖の場合には一定の規則で組変わる）が細胞質の部分は大幅に更新され、その機能が老朽化することを防ぐ。

(6) 異物の排除は、免疫系が行う。免疫担当細胞は、それぞれが接する分子に対する小さな逆イメージを持っている。多数の免疫担当細胞が集まって、全体として免疫系が接する分子レベルの世界の逆イメージを構成する。このとき、免疫担当細胞同士も相互に逆イメージを持ち合っており、相互に認識され合っていれば細胞分裂は起きない。すなわち、相互抑制的な巨大なネットワークが構成される。

このネットワークも一種の散逸構造であり、破綻のない限り相互抑制的に構造が維持される。もし、外界から異物分子がくれば、ネットワークの持つイメージに合わないイメージを担当するところで相互抑制がなくなり、その細胞が分裂して数を増やし、異物分子を攻撃して、全体のイメージが保たれるように働く。

(7) 生物（細胞或いは個体）は、外的環境がその存在にとって都合がよくなるよう外部に対してなんらかの働きかけをしたり、それ自体の状態を変化させたりする。即ち、外部環境から生存にとって必要な情報を取り込み、適切に判断をして、特異性の高い（従って価値の高い）応答を示すための情報処理系と奏功器官を持つ。個体を構成する細胞の場合には、個体全体の状況に応じて機能する。

(8) 外界の物理世界との、知覚および運動による相互作用は、脳・神経系の働きによる。物理世界（この中には、腕や足など身体の一部を含めてもよい）に対する逆イメージが脳の中に形成されており、目標が与えらるとその逆イメージを利用して最適な制御を行い、外界に対し働きかける。

このような制御を行う脳の内部では、よく知られているように、神経細胞のネットワークによる信号の処理がなされているほかに、神経細胞の集合体としての動的な処理も行われているようである。これは、例えば脳全体としては脳波というリズムが観察されており、また脳のスライスには散逸構造的パターンが観察されることなどから想像されるところである。

(9) 一般に高等な生物の、脳や神経系などの情報処理系は、外部環境に適応出来るようにその機能に可塑性があり、学習が可能である、そして外部環境のダイナミクスをモデリングして、予測制御的に応答することが出来る。この結果、生存にとって厳しい環境から積極的に逃れ、むしろ都合のよい環境を自ら作り出せるようになる。あるいは、次に起こることを読めるように新たな固有の情報空間を時々刻々設定できるようになる。

この様に、生物には自然界に存在する大きな非平衡性を旨く利用して、その生存に役立つ仕掛が極めて巧みに整っているが、なぜこのような仕掛が整備されたかという問題は「進化」の問題の根幹に関わることであり、未だ十分に明らかにされてはいない。

5. 生物を学ぶながら

最近のキーワードは、“バイオ”である。この大きな流れは、基本的には生物の諸性質を研究し、その成果を工学的な分野で応用しようとするものである。一口に言って「生物に学ぶ」ということである。この背景には、従来の工学的アプローチでは不得手な問題を「生物に学ぶ」ことにより解決できるのではないかという期待がある。特に、大規模なシステムの最適制御の方法とか、図形や音声情報の認識の方法など、生物らしいやり方を用いない限り解決できそうにない問題が数多く残されている。

しかしながら、従来の多くの取り組み方は、基礎的考察にやや欠けるきらいがある。すなわち、理解し易い知見を単純に外挿し、従来技術の延長線上に位置づけられるものとして捉えた方向の研究が余りにも多い。たとえば、機能性タンパク質を調製し、人工膜に埋め込み、センサを作るとか、遺伝子情報を組み替え、人工的なタンパク質を大量に生産しバイオ素子をつくるといったレベルでは、本当の意味での質的進歩はない。

一旦システムとしての機能に期待して、システムを構築しようとする、大きな困難に直面する。仮に多数の神経細胞を培養し、回路網を形成させたとしても、これらがシステムとしていかにうまく情報を処理し、何等かの信号をわれわれに対して出力してくれるかという点に関しては、皆目見当がつかないわけである。あるいは、素子のレベルでのバイオデバイスや分子デバイスは、とりあえず想像可能だが、それをいかに安定性よく構成し、機能を発揮させるかに関しては、今のところ机上の議論すらもほとんどされていない状態である。

最近、このような状態に対する問題意識は高まってきており、安易にバイオ素子や分子デバイスの有用性を議論するようなことは少なくなっている。むしろ、生物が機能を発揮する際のメカニズムを解析し、その原理を応用しようという方向性が定着しつつある。例えば、神経回路網の分野でみられるように、詳細なメカニズムは未だ完全には明らかではないにしても、もっともらしい仮設（パラ

タイム)をもとにそのシステムとしての機能をコンピュータシミュレーションで確かめるといった方法もとられてきている。

神経回路網の研究は、最近になっていくつかの注目すべき報告がされたことが引き金となって、世間の注目を浴びるようになっていく。

その一つは、スピニンググラス的に舞う神経回路を利用し、その仮想的なポテンシャルの局所最小値への収束を利用することにより、循環セールスマンの問題などもっともらしい近似解が比較的容易に解けるということが報告されたことである。今一つは、多数の階層からなる神経回路網において、その要素間の結合係数を、バックプロパゲーションと呼ばれる手法により学習させることにより、人間が経験的にしか識別できなかった各種の特定パターンなどを自動的にかつ発見的に識別できるようになったという事実である。現在、各種の神経回路網をシミュレートするための汎用機上でのソフトウェアや、専用のハードウェアとそれのためのソフトウェアの開発などが盛んに行われており、今後これらを利用して、特定の用途には実用化されていくと思われる。

もちろんこれらの神経回路網の能力は、せいぜい入力された信号をもっともらしく分類するといった程度であり、生物システムとの間には未だ決定的な違いがあるといわざるを得ない。しかし、システムとしての機能に着目したアプローチは重要である。

脳の情報処理のような生物の高次機能を研究しまねようとする場合、高い見識と深い理解、それにもまして、鋭い洞察力に基づく理論的考察が、必要である。なぜなら、例えば、「はたして生物は情報を創っているか?」といったことに対する研究者の認識が不十分であると思われるからである。これは例えば、学習に対する考え方をみれば明かである。どれだけの研究者が忌避学習と報酬学習のちがいを理解しているであろうか?

いわゆる忌避学習 (Aversive Learning) のような受け身の環境では、生物は限られた種類の入力信号の中から関係づけ可能なものに対し重みづ

けをするという、シャノン流の情報量でいえば情報エントロピーを単に減らすようなことしかしていない。ところが報酬学習 (Reward Learning) では、積極的な情報の獲得が必要とされるわけで、生物は自らが持つ方法論にしたがっていろいろな働きかけを外界に対して行い、偶然ではなくある必然の結果として入力信号の種類を増やし、その中から関係づけ可能なものを捜し出すという積極的なダイナミクスで振る舞っている。

後者の場合もはやシャノン流の情報量を計算することは意味がない。むしろ問題となるのは、どのようなメカニズムで外界に対する働きかけのやり方を決定し、その結果必然的に得られた情報をもとに新しい情報体系を内的世界に作り上げていくかということである。これは、根本的には情報を獲得したいという「意欲」とか「やる気」が出るためのメカニズムは何かという問題につながるものであり、極めて生物的ではあるが、解決しがたいものに通じるのである。

6. 情報工学への展開

はたしてコンピュータは生物情報処理を真似できるであろうか?以上述べてきたことをもとに、生物と現在のコンピュータとを比較すると次のようになる。

生物: 散逸構造がベース
無限に近い数の内部状態
内在するダイナミクスによる内部状態遷移 (リミットサイクル、カオス)
外界からの刺激で大きな内部状態の遷移、適切な応答
合目的な状態遷移のための学習
外界のモデルを内部に構築

今のコンピュータ:
チューリングマシンがベース
たいして多くない内部状態
人間が作ったプログラムにもとづく内部状態遷移
これ以上の機能はプログラム次第

もちろんこの比較は、現在のコンピュータについて言っているのであって、必ずしも原理的限界

を言っているわけではない。たとえば、IC技術の進歩にともない今後機能要素の数は飛躍的に増やせるであろうから、内部状態の数はどんどん多くできるであろう。また、何等かの妥当な内部ダイナミクスを考案して、仕込むことも不可能ではない。

問題があるとすればそれは外界との相互作用の面である。すなわち、生物は生まれながらにして持つ「からだ」のうえに情報処理装置を乗せている。コンピュータの場合、このような「からだ」がないわけで、このため生物と同じ様な実空間内での経験を持つことはかなりむずかしいであろう。もちろん、問題を限られた世界に求めれば良いことである。

むしろ本質的な問題点は、現在余りよく解明されていない生物の持つ本能的な性質である。例えば、「向上しようという意欲」とか「やる気」の類は、もし究極の学習機械を作ろうとすると避けて通れない問題と思われる。あるいは、いわゆる「五欲」等もこれに含まれる。この意味で、コンピュータはなかなか生物情報処理を真似できないのではないかというのがとりあえずの結論である。

それでは、副次的効果かも知れないが、生物を学ぶことによって何か新しい工学的的方法論が生まれるであろうか？ 実は、われわれはこちらの方にかなり期待をしている。しかし、それには発想の転換が必要である。

従来からの工学的発想では何か作ろうとする場合、「剛いもの信仰」というか、まずすみからすみまできちんと設計図に表現されなければならなかった。そして、製作する場合にはいかに設計図に忠実に作れるかが大切にされてきた。あるいは、制御系などでは設計段階できちんと安定性が保証されなければ安心できなかった。

しかし、生物のベースになっている散逸構造を工学の対象にしようとするとそのような考え方は通用しなくなる。なぜならある散逸構造を考案したとして、その挙動はシミュレーションならともかく解析的にはほとんど予測できず、このため思った通りに設計するなどということは不可能に近い。したがって、根本的に逆のアプローチが必要とな

る。

たとえば、そこそこ可能性のあるシステムをまず組み立てる。このシステムは、多くの動作モードを持つが、もちろん目的とする機能を実現するのに都合のよいモードも予め持っている。つぎに、実際に動かしながら望ましい機能を発揮するように、システムの制御系に学習させる。システムが都合のよいモードに入るのに最も効果的な制御を見つけられれば成功である。もちろん、システムの挙動が安全領域から外れて破綻しないようマクロに安全サイドに倒れるような仕掛は用意しておく。

このことは、プログラミングの場合にも当てはまる。従来は、全ての入力ケースを想定して、それに対して適切な応答ができるよう完璧なプログラムをかかなければならないと考えられてきた。堅い記号（論理）処理が要求される場面ではもちろんこれは必須である。しかし、ある意味でおおざっぱな処理が必要とされるパターン認識や音声認識などでは、このような考え方は生きてくるはずである。実際、カオスを生成するシステムを計算機中に仕込み、制御に利用しようという試みがあるようである。

非線型非平衡状態で生じる動的秩序（散逸構造）を工学に生かした試みはまだ少ない。しかしながら、この分野はまだだれも手をつけていない分だけ多くの可能性を秘めている。今後の展開に期待したい。

参考文献

合原一幸 編：

"カオス-カオス理論の基礎と応用"，
サンエンス社

ニコリス、プリゴジン：

"散逸構造"，（小島，相沢訳），
岩波書店

グランズドルフ、プリゴジン：

"構造・安定性・ゆらぎ"，（松本，竹山訳），
みすず書房

プリゴジン：

"存在から発展へ"，（小出，我孫子訳），
みすず書房

本 PDF ファイルは 1992 年発行の「第 33 回プログラミング・シンポジウム報告集」をスキャンし、項目ごとに整理して、情報処理学会電子図書館「情報学広場」に掲載するものです。

この出版物は情報処理学会への著作権譲渡がなされていませんが、情報処理学会公式 Web サイトに、下記「過去のプログラミング・シンポジウム報告集の利用許諾について」を掲載し、権利者の検索をおこないました。そのうえで同意をいただいたもの、お申し出のなかったものを掲載しています。

https://www.ipsj.or.jp/topics/Past_reports.html

過去のプログラミング・シンポジウム報告集の利用許諾について

情報処理学会発行の出版物著作権は平成 12 年から情報処理学会著作権規程に従い、学会に帰属することになっています。

プログラミング・シンポジウムの報告集は、情報処理学会と設立の事情が異なるため、この改訂がシンポジウム内部で徹底しておらず、情報処理学会の他の出版物が情報学広場 (=情報処理学会電子図書館) で公開されているにも拘らず、古い報告集には公開されていないものが少からずありました。

プログラミング・シンポジウムは昭和 59 年に情報処理学会の一部門になりましたが、それ以前の報告集も含め、この度学会の他の出版物と同様の扱いにしたいと考えます。過去のすべての報告集の論文について、著作権者（論文を執筆された故人の相続人）を探し出して利用許諾に関する同意を頂くことは困難ですので、一定期間の権利者搜索の努力をしたうえで、著作権者が見つからない場合も論文を情報学広場に掲載させていただきたいと思います。その後、著作権者が発見され、情報学広場への掲載の継続に同意が得られなかった場合には、当該論文については、掲載を停止致します。

この措置にご意見のある方は、プログラミング・シンポジウムの辻尚史運営委員長 (tsuji@math.s.chiba-u.ac.jp) までお申し出ください。

加えて、著作権者について情報をお持ちの方は事務局まで情報をお寄せくださいますようお願い申し上げます。

期間： 2020 年 12 月 18 日 ~ 2021 年 3 月 19 日

掲載日： 2020 年 12 月 18 日

プログラミング・シンポジウム委員会

情報処理学会著作権規程

<https://www.ipsj.or.jp/copyright/ronbun/copyright.html>