

自己創出系と2つの時間

郡司幸夫⁽¹⁾ 今野紀雄⁽²⁾ 中村隆志⁽¹⁾

(1) 神戸大学理学部地球科学科、(2) 室蘭工業大学理科教育数学

自分で自分をプログラムするシステムを形式化しようとする時、(形式論理では禁じられている)異なる論理レベル間での相互作用を記述せざるを得ない。そこに原理的なプログラム不可能性が現れる。この問題は、システムの内部と外部とが異なる論理レベルにあるといった形式で、生物を形式化する際の基礎にたち現れる。プログラム不可能性を如何に記述するかという問題を抜きに、我々は進化を語り得ない。

1 はじめに

自己組織系のモデルといわれるものが登場して久しい(e.g. Haken 1978; 1988)。例えば、代謝機能をもつ細胞は非線形振動子として表され、多細胞生物はそれらが多数集まって空間的に相互作用する(拡散、神経系によって)システムとして表される。ここまでは必然項でありいわば生物的内因を表現している。一方、外因としての環境は、第一に偶然項として、ランダムな揺動力の形で付加されるに過ぎず、第二には境界条件として表現されるに過ぎない。このようなモデルで注意すべきことは、外因によってシステムの入力に変化はあっても、システム自体(決定項)は決して変化し得ない点にある。しかしcAMPの細胞注入により、代謝機能自身が変化する¹等、現実の生命現象では外因は内因を変化させる。

こうして、外因と内因との相互作用とは、偶然と必然とが分離不可能な状況に置き換えられる。別言すると、状態変数(オペランド)と写像(オペレーター)とが分離不可能(これが実現されたシステムをここでは自己創出系と呼ぼう¹⁾)で、そこに決定不能性が出現する状況に置き換えられる(本論では、状態変数と写像の分離不可能性から出発して、偶然と必然とが分離できないという順序で説明する)。ところがこの問題は、理論生物学の中で殆ど問題視されてこなかった。そこで、ここでは、この決定不能性(形式論理におけるプログラム不可能性)にこそ焦点をあて、まずこれが如何なる問題なのか、更に如何に困難なのかを明らかにしようと思う^{2-4,7,9,13}。最後に、我々がこれに対してどのようなアプローチを採っているかを紹介し、この問題に対する多くの興味を喚起したい。

2 機能と形態の非分離

直観的に、生物の機能もまた生物自体である。すなわち、形態が外部環境へ作用する機能は、形態自身と切り放して考えられない。この状況は、力学系の言葉を用いても以下のように表わすことができる^{2,3}。形態は実数集合 $\mathbb{R}$ の様な状態として、機能は状態間の関数 $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ として表現される(機能も関数も英語ではfunctionであることに注意)。ここで、状態を細胞の内部状態と考え、

$$f \in \text{Hom}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}) \quad (1)$$

を代謝反応と考えよう($\text{Hom}(\cdot, *)$ とは、 $\cdot$ から $*$ への関数の集合)。これだけなら状態と関数は分離独立したものとして定義されるが、外部環境によって形態が

一部破壊され、それが自己修復される場合を考えると、先のように形態＝状態とは単純に考えられない。形態の変化は、内部状態だけでなく、代謝反応自身にも変化を及ぼすのであり、それを自己修復する点に生物の特質が認められるのである。こうして自己修復操作は、

$$\text{Hom}(\underline{R}, \text{Hom}(\underline{R}^n, \underline{R})) \quad (2)$$

の要素と表され、オペランドとオペレーターの非分離が見いだされる基礎が与えられる。では、式(1)と(2)とはどの様に時間発展と関係しているのであろうか？ 実はその点の扱いによって、オペランド・オペレーター非分離の問題が、性格を変えてしまう。これを明らかにするためにも、まずスペンサー・ブラウンとヴァレラの議論^{10,11}を追ってみることにしよう。

スペンサー・ブラウンは、オペランドとオペレーターが区別されない原始代数を考案した。一般に、原始代数はブール代数に等価であるが故に彼の議論全体も意味がないとみなされているが、それは彼の主張の本質を理解していない。彼は、人間の原初的行為である区別から出発し、形式論理におけるシンタクスを原始代数として定義し、セマンティクスを原始算術で定義した(全ての形式論理はこの両者から構成される)。シンタクスで定義される命題は、ここでは公理系から証明できる等式に置き換えられる。証明できる命題は有意味であると定義し、有意味性を記号で表し、意味要素間の位相を定義したものがセマンティクスである。この時、シンタクスで使用される関数記号と定数記号を区別せず、さらにそれらとセマンティクスの意味要素とも同一視する。このようなセマンティクスとシンタクスの混同があると、一般に意味を決定できない命題の存在を許すことになる。このような形式言語は、無矛盾かつ不完全で悪い言語と呼ばれる。しかし、原始代数と原始算術から成る形式論理はセマンティクスとシンタクスの混同故に意味を決定できない命題の存在を許すわけではない。自らの内部で定義された記号の操作さえ、かかる形式体系内部の記号を用いて定義できるとする信念が、形式体系構築の動機と不可分であるために、それを実行せざるを得ず、その時初めて、彼の言語は悪い言語となる(自己矛盾を持つ)。

スペンサー・ブラウンの議論の要点は、以下の2点であると私は解釈する。第一に、我々の記述が区別から発せられたもので、区別とは数えるという操作を基礎に置いていると同時に、数えるという操作も区別されたものを単位として始まらざるを得ないという点である。ここで、数える単位としての区別が、数えることで基礎付けられる区別と同じであることを証明することは、不可能である為、数える単位としての区別は、公理系に矛盾する形式である可能性を否定できない。これが自己矛盾の一義的理由である。第二に、自己矛盾を時間で解消するという点だが、一般に理解されるように、彼は振動を時間と呼んでいるわけではない。振動を導入してもむしろ矛盾は解消しきれないのであり、解消しきれない矛盾の、定義できない解消操作を時間と呼ぶのである。

第一の要点は、数える行為を含む全ての形式的記述に通底する。従って、原始代数と原始算術が有する矛盾を解消せん為、振動を導入したところで、同様に自己矛盾がたち現れる筈である。さて、ヴァレラが展開した拡張されたブラウン代数¹⁰とは、振動を、原始算術で定義された意味要素の対で表し、それを新たなセマンティクスの意味要素としたものである($\underline{a} = \text{not}(\underline{a})$ は、 $\underline{a} \in \{1, 0\}$ では成立しないが、 $\underline{a} \in \{(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)\}$ で、 $\text{not}(p, q) = (\text{not}(q), \text{not}(p))$, $p, q \in \{0, 1\}$ と定義する時、成立する)。関数記号を任意の n 周期振動にまで拡張したとき、 n 対の意味要素から成るセマンティクスと、それに対応するシンタクスを構成することが、彼の目的であった。しかし、そのような形式体系が完成したところで、また第二の要点に曝される筈であり、それこそがスペンサー・ブ

ラウンの強調した点である。

ここで、ヴァレラの拡張されたブラウン代数を、力学系の言葉に翻訳して考えてみよう。2 値の n 周期振動関数は、 k 個の ($2 \leq k < 2^{n+1}$) 要素の相互作用で最小実現される^{11, 12}。従って、 n 周期振動は $\underline{b}_1 = (a_{11}, \dots, a_{1k})$, $\underline{b}_2 = (a_{21}, \dots, a_{2k})$, $\dots$, $\underline{b}_n = (a_{n1}, \dots, a_{nk})$ と書き下せる ($a_{ij} \in \{0, 1\}$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, k$)。この振動関数を、

$$\underline{b}^{t+1} = f(\underline{b}^t) \quad (3)$$

と記述すると、結局この式は、一般的に言うところのリミットサイクルに引き込まれる力学系に過ぎないことが判る。ヴァレラは、この振動を一括し不動点として表示したに過ぎない。(3)における t を、我々は普通、時間と呼んでいる。こうしてスペンサー-ブラウンのいう自己矛盾の解消とは、リミットサイクルが出現するような力学系に過ぎないのではないかという誤解が生じた。

スペンサー-ブラウンのいう時間とは、(3) 式のような新しい次元の導入(これを時計時間と呼ぼう)でないことは、既に述べた。ではそれは何なのか?(3) 式は、定義より、

$$a_i^{t+1} = f(a_1^t, a_2^t, \dots, a_k^t), \quad a_i^t \in \{1, 0\}, \quad i = 1, \dots, k \quad (4)$$

と書ける。これはセル・オートマトンの定義である。ここでスペンサー-ブラウンの第二の要点を思い出せば、オペレーター f には数えるという操作が含まれており、その数える操作の単位を、振動 f で基礎付ける根拠はないということであった。ところが(4)の操作を、 f を繰り返し適用して時計時間 t を進めることと解釈する(セル・オートマトン)と、その時、我々は時刻 t を、 f の t 回の合成で表す意味に於て、数える単位を f 自身で基礎付けているのである。つまりスペンサー-ブラウンは、そのようなことが論理的にはできないことで、 f が記述に於て安定ではないと主張しているのである。

これを、 f が変化することであると考えたヴァレラは、異なる周期の代数間を、準同型写像で結び、全体を一括するシステムの構築を試みた。両者は各々、

$$f \in \text{Hom}(\underline{D}, \underline{D}) \quad (5)$$

$$\phi \in \text{Hom}(\text{Hom}(\underline{D}, \underline{D}), \text{Hom}(\underline{D}', \underline{D}')) \quad (6)$$

と書ける。すると、

$$\underline{D} = \text{Hom}(\underline{D}, \underline{D}) \quad (7)$$

の時、(5)の周期振動を式(1)の関数で、(5)と準同型写像(6)の合成を式(2)で書ける。結局(7)を満足する $\underline{D}$ を見つけることが、オペランドとオペレーターを区別できない状況を記述する際の本質であると解釈されるに至った。これは、(1)と(2)を合成しても矛盾がない状況を見つけることに他ならない。すなわち、(1)の状態空間上の軌道を(2)で変化させるとき、軌道は変化するが、元の軌道と新たな軌道とが交差しないような(1)と(2)を見いだすということである。つまり最もノン・トリビアルには、(1)と(2)の合成軌道は、状態空間をつながったまま埋め、無限大の周期振動をすることが予想される(こう考えるとこの問題はカオスにつながる)。

しかし、スペンサー-ブラウンの意味した、矛盾が解消し得ないところにある時間とは、このような目論見をも拒絶する。先のように、例え(1)の要素

f とそれを変化させる(2)の要素 ϕ を矛盾なく構成したとしても、新たな f' が、 f によって根拠付けられないのと同じ理由で、 ϕ で根拠付けられる理由も存在しない。つまりこれは、 f がどの様に変化するかを決定することが原理的にできないのだという主張である。

ここで一番最初の問い、(1)と(2)とが時間発展とどの様に関係しているのか(この時間は、力学系の言葉なので時計時間)を、改めて考える。我々のここまでの議論は、すべて規則を関数で表した(定義域の要素を一つ決めると、値域の要素が必ず一つ存在する)。この時、オペランドとオペレーターの非分離が、(1)と(2)の、(同じく(5)と(6)との)合成が定義できるときにのみ形式化されたことに注意しよう。かかる合成が可能であるとき、(1)、(2)の二つの計算は直列的にしか進行し得ない。ところが、(1)、(2)が描こうとする現象、生物の代謝と自己修復は、同時に進行するのである(自己修復を行うとき、自らの代謝を止めるわけにはいかない)。こうして、(1)(2)の計算を同時に(並列的に)処理したうえで、オペランドとオペレーターを区別しない状況こそ最初に掲げた生物学的問題であることが解る。ところが、このとき(1)、(2)を関数で定義できない。これが、スペンサー-ブラウンの主張の生物学的意義であろう⁶⁻⁸。

本節での結論をまとめておこう。オペランドとオペレーターが区別できない状況を考えるとは、一般には(7)を認めることであるが、スペンサー-ブラウンの意味では、規則の原理的決定不能性を認めることである。そして、後者の要請は生物の記述においてこそ出現する。そこで焦点となるのは、(1)と(2)のような異なるレベルが、相互作用しながら同時進行する状況を記述する際の、関数での記述不可能性である。これを生物の階層性という立場から再度吟味しよう。

3 自律的階層性と1対多型の関数

外因と内因とが切り放せない形式で系を成立させている(各々を独立に記述できない)。この状況を如何に形式化するかが、一般のパターン形成では問題にされない、理論生物学独自の課題である。しかし、2節で述べたような記述不可能性を認めることは、生物学ですらなくなるとの見解もある。少なくとも我々がニュートニアン・パラダイムに留まる限りはモデルを構築できないからだ。

生物学では、二重螺旋の発見によって、ニュートニアン・パラダイムの枠内で生物を理解する可能性が見いだされたといってよい。ニュートニアン・パラダイムとは、説明対象の原因を、独立に記述できる形相因、作用因、質料因の3つだけで構成する説明体系のことである。各々を、パラメータ、時間発展を表す関数、初期/境界条件とする時、我々が物理学で提示するモデルは、非線形非平衡系を含めてニュートニアン・パラダイムである。こうして遺伝子からアミノ酸、タンパク質、細胞、組織、個体、個体群、...種へと、階層構造全体にニュートニアン・パラダイムの階段をかける企画が草案され、遺伝子一元論が、原理として浮上した。レベル間関係は関数で記述でき、遺伝子レベルから上位レベルを合成すれば、説明すべきレベルの原因は遺伝子に求められるとの確信が生まれた。

例えば、特定の組織形態の個体発生は、幾つかのパラメータを用いて微分方程式で近似できる。もちろんこれ自体ニュートニアン・パラダイム内のモデルである。しかし方程式自身が、有限領域で安定な理由を、我々は、より下位レベルに求めることになる。果して我々は、遺伝子レベルに到達し、特定の遺伝子集団が安定な理由を考える段となる。さて今、遺伝子から個体発生までを結ぶ規則はできあがっている。一方、最上位の表現形レベルに、環境による淘汰が直接作用する。従って我々は、淘汰の評価関数を階層構造全体の規則を合成して構

成できるはずである。しかし、ここに問題の根元がある。環境が揺らぐ効果は、この評価関数にどのように働くのであろうか？ たとえ微少な揺らぎであろうと、それは遺伝子からアミノ酸へと翻訳する際の環境、そして、蛋白質合成の場にも、細胞間相互作用にも、影響を与えるのである。つまり、生物が生きているということは、このように、一方で直列的な階層構造が、他方では各レベル同時進行し、並列的でもあるということなのである (Fig. 1)。我々は、これを自律的階層性の定義と考える。

ここでは、例えば細胞間相互作用の規則 (オペレーター) は、高分子タンパク質をスイッチとして用いている。更にそのスイッチは、高分子の立体構造で決定され、立体構造はアミノ酸レベルでの相互作用の計算結果 (オペランド) として決定される。従って、各レベルのオペランドに揺らぎが存在する時、それはすぐさまオペレーターに影響を与える。かつ各レベルが同時進行することより、下位レベルの状態出力 (上位レベルのオペレーター決定) 後に、上位レベルを変化させることはできない⁴⁻⁶。これこそ2節で述べた、オペランド・オペレーター非分離と、直列計算が原理的にできない状況をあわせもつ制約である。システム内部で進行する時間に沿って、時計時間で時間発展規則を記述しようとする、我々は1対多型の関数 (関数の非決定性) に直面せざるを得ない。この問題はまさしくスペンサー-ブラウンの示唆した問題なのである。

4 自己発生境界モデル

上述の意味での自律性を正面から捉えようとする研究は、理論においてむしろ極めて少ない。外的状態が、関数で表されるところのモデル自身に影響を与える状況は、ニュートニアン・パラダイムの規格外問題であるからだ^{2,3}。この状況では、形式論理に於ける記述不可能性が現れる。力学系の言葉で言うなら、過去から未来を計算する時間発展を関数の形で記述できない (つまり、一対多型の関数)。このメタレベルの記述不可能性を、モデル記述レベルに再投影する点に、生物の理論を構築する困難さと意義がある。

我々は、この、時計時間に沿った記述不可能性を、過去から未来への時間発展と、未来から過去への時間発展という二つの時計時間を用いて、以下の様に提出する^{7,8}。二つの時計時間両方によって初めて、時間が表れる。それは、一つの時間向きに留まる限り、決定不能性 (時計時間に沿った因果関係の矛盾) を解消し得ない。こうしてスペンサー-ブラウンの示唆する時間は、過去→未来、未来→過去の両者から成る "現在" の連続としてのみ理解される。

1次元上に並んだ細胞列を考え、細胞の状態は1か0であると仮定する ($\Omega = \{0, 1\}$)。出発点は式 (4) と同じ形式となる。細胞が最隣接細胞のみと相互作用する、最も単純な場合を考えよう。

$$\begin{aligned} 0 \quad R &\equiv \{f: \Omega^3 \rightarrow \Omega\} \\ R_1 &\equiv \{f \in R: f(0,0,0)=0, f(a,b,c)=f(c,b,a)\} \end{aligned}$$

ここで、

- 1 未来から過去への時間: $f: \Omega^3 \rightarrow \Omega$ (局所的時間発展)
- 2 過去から未来への時間: $g: \Omega^{\mathbb{N}} \rightarrow \Omega^{\mathbb{N}-2}$ (大域的時間発展)
- 3 システムの定義: $R = \{f\}$ の部分集合 R_1
- 4 1と2の関係: $g(\emptyset(t\text{状態} \cup t\text{境界}) \cup (t+1)\text{境界}) \Rightarrow \text{恒等射} (\Omega^{\mathbb{N}} \rightarrow \Omega^{\mathbb{N}})$
- 5 境界条件、局所的時間発展規則は4を満足すべく事後的に決定さ

れる。

を定義する。この時、 ϕ とは f を空間全体に適用することを意味し、 n は細胞数を意味する。一般のモデルでは、 1 を定義することが、系の時間発展を定義することであり、それが、系の内因にほかならず、外因は線形に付加される揺動項として明示される。我々のモデルでは、2-5により、 1 に従わない揺動力が非明示的に出現する。その結果、系は時間軸上の記述不可能性を常に含みながら、時間発展し、 f を変更し続ける。定義1、2、4が、部分と全体、上位レベルと下位レベルの自律的階層性における関係を示している（全節の例より下位レベルの規則を局所的規則とするなら、上位レベルの規則が大域的規則となるのは明かであろう）。もし、定義1と2が、分離独立した定義を与えられているなら、両者は何の関係もない。逆に、ニュートニアン・パラダイム内でされるように、全体の規則（ポテンシャル等）を空間微分すれば、局所的規則が得られるなら、両者の関係は、一方から他方が帰納され、互いに完全に従属的である。2が、1の時間に対して逆行していることで、部分と全体は、分離独立も完全従属的でもないものとして定義される。実際、2は、次のような局所的時間発展規則

$$\begin{array}{cccccccccc} t+1 & d_1 & d_2 & d_3 & d_4 & d_5 & d_6 & d_7 & d_8 & a_{i+1}^{t+1} \\ t & 000 & 001 & 010 & 011 & 100 & 101 & 110 & 111 & a_{i-1}^t a_i^t a_{i+1}^t \end{array} \quad (8)$$

$$d_i \in \{0,1\}, i=1, \dots, 8$$

に対して、Fig.2のようなBoxと有向エッジからなる流れ図によって表される。各Boxは、0から4個までの次遷移Boxをもち、そのような16個のBoxを連結することで、規則 f に対し、唯一の流れ図ができる。従って、 ϕ が $\Omega^n \rightarrow \Omega^{n-2}$ の全射である時には、全てのBoxが、2個の次遷移Boxをもつ流れ図がかける（Fig.3）。この時のみ、

$$g(\phi(\eta \cup \xi), \xi') = id_B \quad (9)$$

が成立する（但し、 η は Ω^n の要素、 ξ, ξ' は Ω^2 の要素で境界条件、 $B = \Omega^{n-2}$ ）。我々は、矢の向きに従って計算するので、Boxが、2個の次遷移Boxをもつ場合のみ g を関数で記述できる。そうでない場合には、1対多の関数が現れることになる。この時には、 g の形をできるだけ壊さないような定義の基に、 g を、全てのBoxが2個の次遷移Boxをもつ流れ図に書き換える。ここでは、もはや（9）式は成立しない。そこで、定義4の基に、境界条件、局所的時間発展規則 f を事後的に決定する操作を与え、前者をMacroscopic Perpetual Disequilibrium(Macro PD)、後者をMicro PDと呼ぶ。Macro PDは、以下のように定義する。

Macro PDとは、以下を満足する時間逆行関数 $g^{(k)} \in R_{g,r} = \{g^{(1)}, \dots, g^{(n)}\}$ と境界条件 $\xi \in \delta \Omega_n = \{0,1\}^2$ および $\xi' \in \delta \Omega_n = \{0,1\}^2$ を選ぶことである。

$$\min_{0 \leq k \leq m+1} \min_{\xi, \xi' \in \delta \Omega_n} d_H(g^{(k)}(\phi(\eta \cup \xi) \cup \xi'), \eta \cup \xi) \quad (10)$$

ここで、 $R_{g,r}$ とは前述のような流れ図が関数でかけるような場合の、関数の集合 R_g の部分集合である。 d_H は、ハミング距離である。同様に、Micro PDは、次のように定義される。

Micro PDとは、MacroPDを実行した後、MacroPDで決定された ξ, ξ' の対 (ξ, ξ')

$\underline{\varepsilon}^{\cdot\cdot}$) を適用するという制約の基に、以下を満足する $g_{r,\cdot}^{\cdot(k)}$ を選ぶことである。

$$\min_{g_{r,\cdot}^{\cdot(k)} \in R_{g,\cdot}} d_H(g_{r,\cdot}^{\cdot(k)}(\phi(\eta \cup \underline{\varepsilon}^{\cdot}) \cup \underline{\varepsilon}^{\cdot\cdot}), \eta \cup \underline{\varepsilon}^{\cdot}) \quad (11)$$

但し、 $R_{g,\cdot}$ とは、 R_g の各要素 f および $(\underline{\varepsilon}^{\cdot}, \underline{\varepsilon}^{\cdot\cdot})$ に対して、以下を満足する $g^{\cdot(k)} \in R_{g,\cdot} = \{g^{\cdot(1)}, \dots, g^{\cdot(n)}\}$ の集合である。

$$\min_{0 \leq k \leq n+1} d_H(g^{\cdot(k)}(\phi(\eta \cup \underline{\varepsilon}^{\cdot}) \cup \underline{\varepsilon}^{\cdot\cdot}), \eta \cup \underline{\varepsilon}^{\cdot}) \quad (12)$$

式 (11) によって選ばれた $g_{r,\cdot}^{\cdot(k)}$ の f が f と異なるとき、時刻 t から $t+1$ への時間発展は、 f によって計算された方が式 (9) をより小さくする可能性がある。こうして、時刻 t から $t+1$ への時間発展は、 f が決定したのだと事後的に解釈し得る。この時、時刻 $t+1$ から $t+2$ への時間発展を、 f を空間全体に適用する ϕ で計算することにする。

以上から、各 step の計算において、ハミング距離の意味でできる限り (9) 式を成立させるべく、Macro PD, Micro PD が起こり続ける。その結果、我々外部観察者は、Fig. 4 の C_1 から C_{t+1} への時間発展をみることになる。この時間発展を R の要素で universal に決めることはできず (f の意味では 1 対多の関数になっている)、唯一の f に従わない局所において、我々は、内・外因が切り放せない形式でもたらず揺動力を認めることになる。更に、 f を変える規則を静的に明示できない意味で、内因と外因とが相互に変化させるという関係は、時間発展として記述不可能である。こうして初めて、内・外因が切り放せない状況が表される。

5 おわりに

理論生物学の根本問題とは、生きている = 自律性とは何かという問題である。そして自律性とは、プログラム不可能性、時計時間に沿った関数の非決定性の問題である。我々は、これを、スペンサー-ブラウンの議論を援用して論じ、非決定性を再投影するような自己発生境界モデルを提出した。ここで一つ重要な点を確認しておこう。スペンサー-ブラウンの言う、数える単位 (規則) を基礎付けることができないということは、全ての形式的記述に当てはまる。従って、我々は生物に関わらず、記述全般においてこの問題を無視し得ないはずではなからうか? ところが、そうではない。第一に規則を基礎付けられないとは、記述において基礎付けようとする時のみに、顕現するのだ。例えば、我々は規則の意味 (基礎) を知らずに、規則に従うことができる。ここには我々が規則に従うという事実があるだけだ。同じ理由で、必要がないとき、規則の基礎を疑うことに意味はない。オペランドとオペレーターが分離できるとき、我々は規則の基礎を疑う必要がない。

逆にここまで述べてきたように、自律的階層系では、階層的である故に規則の基礎を問うことが不可避であり (下位レベルは上位の基礎)、同時に実はレベルを分離することができない (オペランドとオペレーターが非分離かつ各レベルが同時に進行する故に) が故に、あるレベルとそれを基礎付けるレベルをまず分離し、基礎付けるための下位レベルの基礎については疑わないという論法をとることができないのだ。ここに、ニュートニアン・パラダイムで理解されるところの階層構造とは異なる自律的階層性が描き出される。

記述の不可能性、規則の不安定性は進化の必要条件である。規則が安定であるところに進化は存在しない。我々は、進化を考えるための基礎を与えよう

とするものなのである。

引用文献

- 1 Liberman, E.A., Minina, S.V., Shklovsky-Kordy, N.E. and Conrad, M.
Microinjection of cyclic nucleotides provides evidence for a diffusional mechanism of interneuronal control. *Biosystems* 15: 127-132(1982).
- 2 Rosen, R. *Theoretical Biology and Complexity*. 210pp. Academic Press, Orlando San Diego, New York (1985).
- 3 Casti, J.L. The theory of Metabolism-Repair systems. *Appl.Math.& Comp.* 28:113-154(1988).
- 4 Conrad, M. Microscopic-macroscopic interface in biological information processing. *Biosystems* 16:345-363(1984).
- 5 Conrad, M. The price of programmability. In "The Universal Turing Machine: A Half-Century Survey"(R. Herken, ed.), pp.285-307. Oxford Univ. Press.(1988).
- 6 Gunji, Y. & Nakamura, T. Non definite form for autopoiesis, illustrating automata in the forward and backward time. *Proc. IEEE/ENBS* 12(4):1778-1780(1990).
- 7 Gunji, Y. & Nakamura, T. Time reverse automata patterns generated by 'Spencer-Brown's modulator: Invertibility based on autopoiesis. *Biosystems*(in press).
- 8 Gunji, Y. & Konno, N. Artificial Life with autonomously emerging boundary (submitted to *Appl. Math. & Comp.*)
- 9 郡司 幸夫、長島知正 生物学的自律性とその形式化-システムとしての生物を理解する試み-. *計測と制御* 29(10):893-898(1990).
- 10 Varela, F.J. *Principles of Biological Autonomy*. North-Holland (1979)
- 11 Spencer-Brown, G. *Laws of Form*. George Allen & Unwin (1969)
- 12 Gunji, Y. Pigment color patterns of molluscs and asynchronous cellular automata. *Biosystems* 22:274-295(1990).
- 13 Matsuno, K. *Protobiology*. CRC Press(1989).

Autopoietic System and Two Time Structures

Gunji, Y.⁽¹⁾, Konno, N.⁽²⁾ & Nakamura, T.⁽¹⁾

(1) Dept. Earth-Sci., Facult. Sci., Kobe Univ., Nada, Kobe 657, Japan. (2) Dept. General Education, Muroran Institute of Technology, Mizumoto 27-1, Muroran 050, Japan.

S u m m a r y

A living system contains a dynamical hierarchical structure in which operand(substrate) and operator(e.g. enzymatic switch) cannot be separately defined between any pairs of upper(non-local) and lower(local) dynamics. Hence we regard it as an unprogrammable system resulted from self-reference. When we define it by a sequential machine, unprogrammable system is replaced by a system whose next-state map is one-to-many type

mapping. One-to-many means indeterminacy a priori, however a value of output is decided a posteriori. The problem arises from how to talk about indeterminacy. In order to express this attitude, both forward- and backward-dynamics are prepared in our model. However local next-state rule can be defined by a map, we find one-to-many type mapping of a local rule in an aggregate. Therefore we utilize non-local backward-dynamics by many-to-one type mapping in order to express what do not obey a universal local rule. This is first attempt to formalize a living system as unprogrammable system.

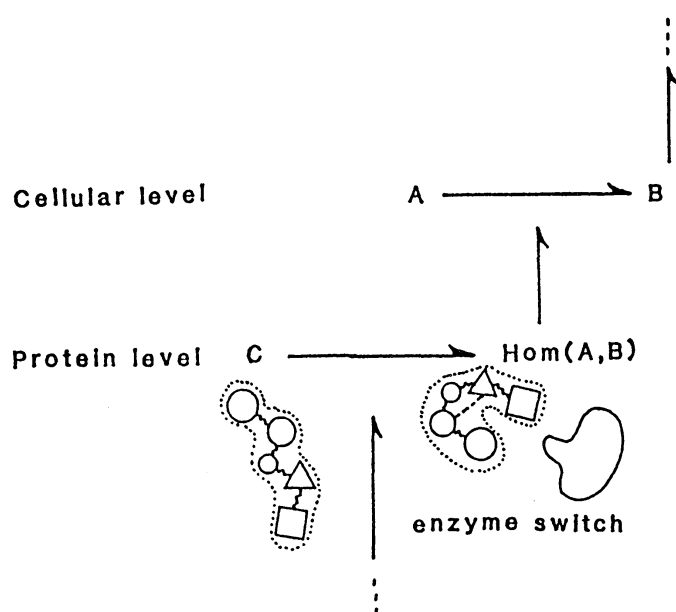


Fig. 1. Schematic diagram of biological system which is expressed by an autopoietic hierarchical system. Note that operators of the upper level dynamics cannot be independent of operands of the lower level one, and that all levels proceed synchronously. See also Conrad(1984).

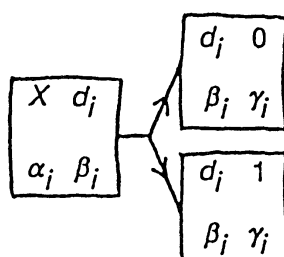


Fig. 2. How to construct flow diagram for reverse automata. $(\underline{\alpha}, \underline{\beta}, \underline{\gamma}) \rightarrow \underline{d}$ represents a transition rule in $\underline{R}$ s. $\underline{\alpha}, \underline{\beta}, \underline{\gamma}$ and $\underline{d}$ are elements of $\{0,1\}$

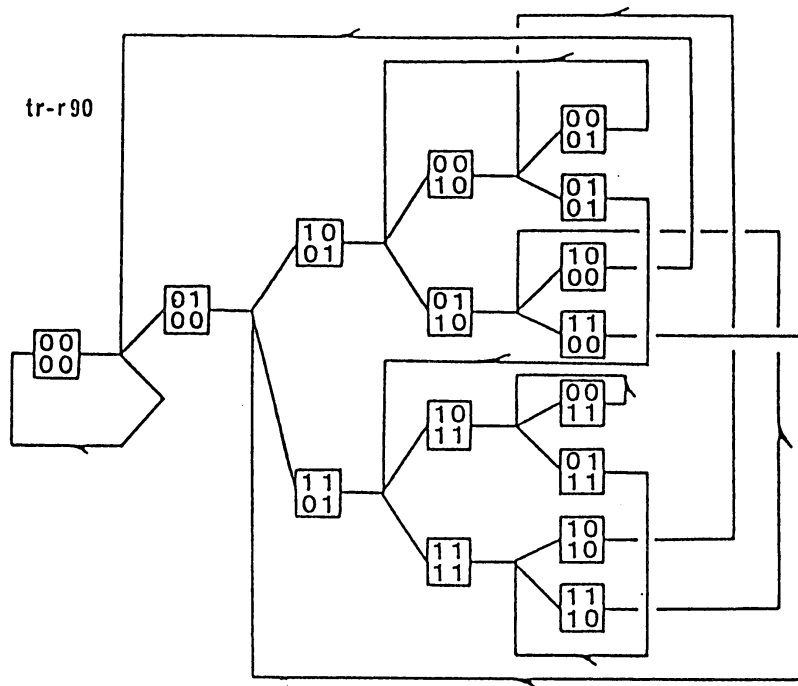


Fig. 3. Flow diagram of reverse automaton corresponding to a subjective rule (R90). Each Box represents the state

$$\underline{a}_i(t+1), \underline{a}_{i+1}(t+1)$$

$$\underline{a}_i(t), \underline{a}_{i+1}(t).$$

Note that each box has two next boxes.

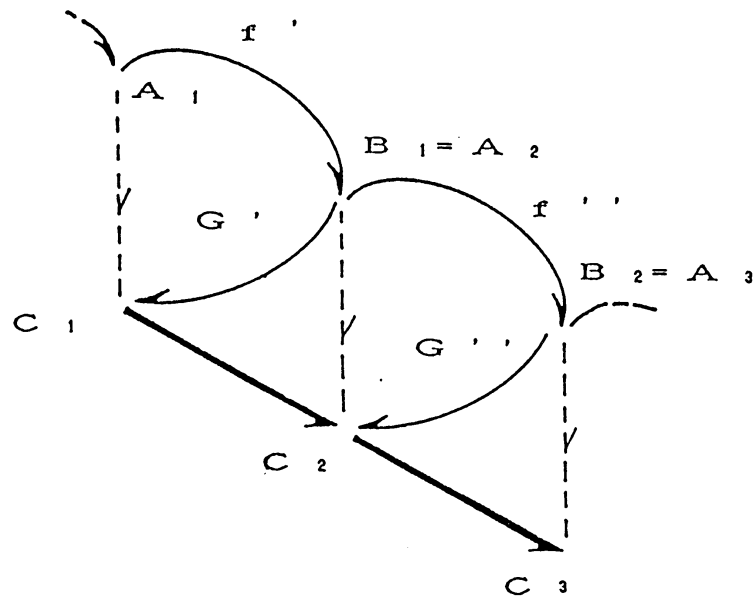


Fig. 4. Schematic diagram for the evolution of autonomously emerging boundary model. External observers recognize the transition from C_i to C_{i+1} as the time evolution. f represents the transition rule of elementary cellular automata and G represents time-reverse automata with Micro and Macroscopic PD.