

オートポイエーシスとアフォーダンス

安念 保昌

愛知みずほ大学人間科学部人間科学科

Autopoiesis and Affordance

Yasumasa ANNEN

Division of Human Sciences, Department of Human Sciences, Aichi Mizuho College

Two types of methodology for life, studies based on evolution and autopoiesis, are discussed. In the former studies, there are four types of problem setting method: mechanism, development, function, and evolution (Tinbergen, 1963). The latter methodology, concepts on autopoiesis, leads biology and psychology to the new style of studies: artificial life, which has no constraint on the history of life on the earth. On the other hand, theory of affordance (ecological psychology), which is the study belonging to functional type of problem setting method, is liberated from Descartesian mind-body dualism and is deeply linked to the concept of autopoiesis.

Key words: evolution; ecological psychology; theory of life; scala naturae; instinct and intelligence.

1. 一つの生命の樹

我々が、心を含めた生命のあらゆる現象を、冷徹に普遍的で科学的に捉えようとするとき、そこには2つの仕方がある。まず、1つは、そういう問いかけを始めた自分を起点に考えようとする。もう一つは、生命とは何ぞ哉、と考える仕方である。

まず、最初の自分を起点とする仕方に従うと、自分を育ててくれた親を考え、さらにその親というふうに先祖を辿っていく。そしてさらに、自分が属する民族の起源に辿り着き、さらに大陸から渡ってきた人類の辿った道に、そして、人類を生み出した霊長類の起源に辿り着き、さらに、霊長類を生み出した哺乳類の歴史、脊椎動物門、動物界、真核生物、原核生物、生命の起源と、地球上のおよそ38億年の時間を遡ることになる。

こうした生命進化の歴史は、最初から分かっていたことではなく、人は、まず、生物の分類を行おうとした。それは、アリストテレス(Aristotle, 384-322 B.C.)に始まり、リンネ(Carolus Linnaeus, 1707-1778)によって、体系化され、ヘッケル(Ernst Haeckel, 1834-1919)によって洗練化された。しかし、アリストテレスは、「自然の階梯 *scala naturae*」という考え方を示し、無生物から、植物、動物を経て、ヒトに至る、段階を小刻み連続的に経ながらの移行を唱えている。しかし、それ以降、聖書の宗教的世界

の隆盛とともに、この階梯が神に繋がっているという神学理論となり、多様な生命存在は、造物主によって個別に作られたとする創造説を形成し、何世紀にもわたって、生命の捉え方を支配していった。

この宗教的な流れにあって、「方法論的懐疑」をもって神の存在を証明しようとしたデカルト(Rene Descartes, 1596-1650)は、ヒトは他の動物とは異なって、理性(精神的な経験ができる能力)を持っており、動物の行動は、機械的な説明が可能であるが、ヒトのそうした精神過程は身体機械論で解き明かすことができないという、心身二元論を唱えたのである。人は特別なのだという考え方の起源は、自然の階梯にある。

しかし、デカルトの、絶対的な存在を求めようとして、悪魔に騙されているかもしれないと疑ってかかることが、徐々に創造説に向けられてゆくことになる。ラマルク(Jean B. Lamarck, 1744-1829)は、獲得形質の遺伝を提唱し(1801)、身体の特定の部位の用・不用(行動的変化)が世代にわたって受け継がれ、身体の形態的変化(形質転換)が起こると考えたのである。また、ヒト以外の動物の行動を機械として捉えることは、生理学を誕生させ、この時点で、創造説は、完全に否定され、科学的な事象として因果関係の中で取り扱われ始める。

ラマルクの言う「形質転換」が進化であると見なされる

には、もう半世紀ほど必要であった。ダーウィン(Charles Darwin, 1802-1882)は、よい形質を系統として保存してきた家畜化の歴史で行われている育種の原理(人為選択)が、そのまま自然界においてもなされていて、それを自然選択という言葉で呼んだ(『種の起源』 Darwin, 1859/1993)。この自然選択が、悠久の時間を掛けて、生物の多様性を説明できるとしたのである。

しかし、この自然選択によって漸進的に進化するという事は、自然の階梯においてヒトだけが特別な存在と考えられてきたことを切り崩すことに繋がった。というのは、漸進的に変化してきているのであれば、現在のヒトの持つ能力は、その先祖の種とかなりの部分共有されていることになり、ひいては心の連続性が仮定されることになり、ここに、比較心理学が誕生する源があったのである。

当初、動物の逸話的証拠によってヒトと動物の心的状態の比較がなされたが、モーガンの公準(C.Lloyd Morgan, 1894)によって、より低次の能力で解釈できるなら、高次の心的能力の結果と解釈してはならないとして、証拠によって推し進める科学の強い方向性が示された。

デカルトの心身二元論によって生じた流れは、動物は機械であり、その機械の成り立ちを生理学的手法で解き明かし、当時心理学の世界ではやっていた内観法への反発もあって、動物の行動解釈に依存しない数量的・統計学的方法が重視されることこそが、証拠による科学であると考えられるようになっていき、ワトソン(John B. Watson, 1878-1958)の行動科学全盛の時代へと入ってゆくのである(Watson, 1913)。

生命の振る舞い=行動によって、次の世代に命をつないでゆく、その仕方には、二通りの区別が存在する。アリストテレスの自然の階梯において、最高位に位置づけられ、デカルトによって人には自由な精神、つまり知能が備わっているとされる。一方、動物は、自由の利かない機械的な本能によって支配されているとする、心身二元論的世界観である。行動主義は、人を含めた動物の中に、本能ではないどれだけ自由な精神つまり学習があるのか、その仕組みに関心を持ったのであるが、ダーウィンを起源として、この本能の方に関心を向けていった流れがあった。ダーウィンは複雑に見える動物の本能行動も、近縁種には共通に見られる行動的要素があり、それを比較することで本能の進化を追えたと考えていた。これを最初に受け継いだのが、ホイットマン(Charles Whitman, 1842-1910)である。彼は、ハトの近縁種において比較解剖学的な違いと対応で、ハトの飛び方を比較している。同じように、ハインロート(Oskar Heinroth, 1871-1945)も、カモ・アヒル類の行動

について研究している。我々が行ってきた筑波情動系ラットの一連の研究(Fujita, Annen & Kitaoka, 1989; 安念, 2001)も、ダーウィンの人為選択圧下で共通祖先から分離してきた2種類の系統の行動を生理学も含めて比較している意味で、ここに位置づけられると考えられる。

こうした流れは、ローレンツ(Konrad Lorenz, 1901-1989)によって、エソロジーとして確立されていった。そこにおいて総合的に説明された本能行動の全体像は、動物の内的状態としていくつか存在する衝動が葛藤を起こして、一部は転移行動によってその緊張を解こうとするが、ある衝動は、リリーサーを求める欲求行動をとり、出会えると遺伝的に固定された生得的解発機構により、特定の行動が解き放たれ、衝動が収まるまで、一連のプログラムによって行動が進行する(完了行動)が、リリーサーに出会えないと真空行動を起こしたり、極端な刺激を偏好する超正常刺激も存在するという図式である。これこそが、デカルトが求めていた、動物の機械としての姿であり、遺伝子から、生理発生過程を経て行動への姿が、*nurogenetic-ethology* において追い求められている。

こうした生命に関わる研究の問題設定のあり方について、ティンバーゲン(Niko Tinbergen, 1907-1988)は、因果性のレベルの違いを区別した(Tinbergen, 1963)。それは、生物個体内の問題なのか、個体間の問題なのかとも関わる。前者の場合、行動を引き起こす構造について調べ、行動のスケジュール等の操作、生理的な操作最終的には、生理学的構造として説明される、機構(mechanism)の問題と、行動が発達してゆく姿を捉えるそこに至るには、どのような過程を経てゆくのか。そのような変化を起こすには、どんな、構造的な問題があるのかを問う、発達(development)の問題があり、生物に働く近接要因からの因果関係である(図1参照)。

後者の生物個体間の場合、その行動が生態系の中で、どの様な意味、機能を持っているのか、それが起こってくる背景の構造は何があるのか、なぜその様な機

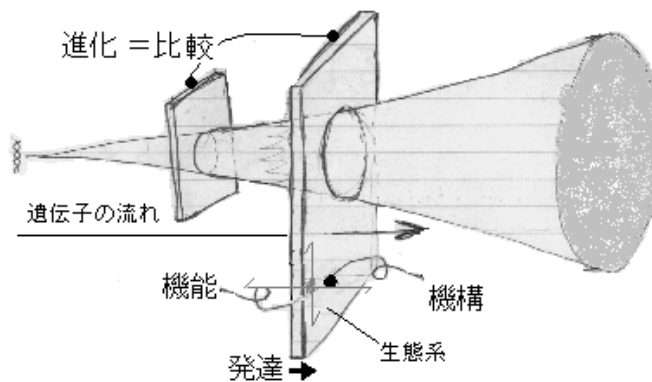


図1 生命科学における4つの問題設定

能が必要かを問う、機能(function)の、問題と、なぜ、そのような行動が必要だったのかそのような行動が起こる生態系の背景は何で、その様に振る舞わせたものは何なのかを問う、進化(evolution)の問題があり、生物の系統発生史に焦点を当てた究極要因からの説明である。これまでの多くの研究は、研究のしやすい前者、とりわけ機構の問題を解明して、納得してきたと言ってもいいかもしれない。

ここまで見てきた流れは、自分を起点とした、生命のとりえ方であるが、それは、自分に至る唯一無二の歴史を辿っていることにすぎないことに気がつかなければならぬ。命の流れがどこでとぎれても、今の自分にはたどり着けない、壮大な一つの事例だと言える。こうした中で、科学的であり得る、つまり、再現可能な事象を扱うと言うことは、時間的スパンを限りなく相対的に零に近づけて、多くの事象を統計に掛けると言うことをやっていることになる。非常に長いひもを、できるだけ小刻みに九十九折りにして、それぞれを一事象と見なしているようなものであると言っても良い。それでも、近接要因である構造や発達の問題は、個体(内)の現象を扱っているのだから、(ある意味、疑似)科学的に行いやすいが、究極要因である、機能や進化の問題は、その種を取り巻く環境が絡むので、地球上にそう多くのフィールドがあるわけではない。その方法としては、そのフィールドにおいて、様々な操作を加え行動を無理やり変え、生き残りを比較する実験的方法、その種のフィールド内での様々な生き様を観察し、最終的な生き残りを比較する種内相関関係による方法、近縁種や、環境との関わりの似た種同士の行動の比較を行う適応的相関関係による方法、そして、行動遺伝学的手法がある。この最後の分野は、ワトソン (James D. Watson, 1928-) とクリック (Francis H.C. Crick, 1916-2004) によって、遺伝子が二重螺旋構造をしていることが、発見されて以降、急速に技術が開発されてきた。ダーウィンに進化論を導かせたのも、育種という古典的な遺伝学的手法であったが、最近では、永い進化史において作り出された遺伝子そのものを操作したり、特定の遺伝子を欠損させたりして、生理発生過程だけでなく、高次認知行動・機能への影響までもが調べられ始めている。ノックアウトマウスは、カペッキ (Mario Capecchi)、エバンス (Martin Evans)、スミーズ (Oliver Smithies) によって開発された。それは、相同組み替えによって目標の内在DNAを入れ替えたマウスの胚性幹細胞 (ES細胞) をつくり、そのES細胞を発生させ、特定のDNAセグメントの機能を消失したマウスが誕生させられる。この技術の広範な可能性により、その三氏は、2007年ノーベル医学生理学賞を受賞している。

DNAを改変し、発生成長させられるようになり、遺伝子の意味がいずれ分かっていくだろうとしても、やはり、

これは、地球上に起きた唯一の歴史的事例を、確証しているにすぎない。まさに、ノックアウトマウスが、異なる歴史を持った生物の遺伝子の断片から作られたキメラマウスであるということは、ひいては、この地球上の全ての生物が、同じDNAで構成された一つの生命であることを確認しているかのようである。

2. 生きているとは

ここまで見てきたように、生きていることに関するあらゆる学問、人文科学、心理学、生理学、生物学など、証拠に基づいた実証的な研究の殆どが、地球上の唯一の生物のあり方を探ってきたただけだ、とするなら、もう一つのやり方で、生物を探るしかないであろう。

「生きている」とはどういうことなのだろうか。まず、常識的にはどう考えられているのかを知るために、近くの19-20歳の学生67人に「生きているとはどういうことか」と尋ねてみた(複数回答可)。その回答を生理、生物、心理、社会的現象に緩やかにリストにまとめた。

生理的現象

呼吸していること。18
代謝があること。11
体内の細胞・組織・器官が働いていること。11
発生、成長、退化などの変化があること。9
心臓が動いていること。8
欲求が起こり、満たすこと。4
眠ること。3
再生できること。2
ホメオスタシスができるもの。2
性欲があり、それを満たすこと。

生物的現象

死んでいないこと。枯れないでいること(植物)。5
死があること。4
自然の営みの一つ。生かされている。3
食物連鎖のような、何かがある対象になっていること。2
子孫が残せること。2
突然変異、遺伝子の広がりがあること。
大地に根をはること。

心理的現象

思考すること。13
能動的に動くこと。自分の意志で行動すること。12
目標・目的・希望・中心的な核を持っていて、達成させようとする。11
感情を持っていること。9
自分が生きていると実感すること。6
自分のアイデンティティを探し求めること。3
ここに存在していることを感じること。3
感覚があること。2
活力・気力が漲っている状態。2
「死ぬこと」を考えること。2
趣味とか生き甲斐を持つこと。1
存在があること。1
存在の感じを別の形で再構成できること。1
悩み考えること。1

意識していること。1
 複雑なものを持っているもの。1
 自分の人生を全うすること。1
 自分の意志ではできないこと。1
 環境に対応できるもの。1
 活動していること。1

社会的現象

周りや何らかの社会的関係を持つこと。10
 自分の考えを持ち、思うように伝えることができること。4
 周囲が自分の存在を認めること。3
 他者に自分というものを知らせることができること。1
 周りの情報が入ってくる。1

生理的現象としてまとめられた回答を一言で言えば、体を維持するための代謝があることが生きているということになり、生物的現象としてまとめられたものは、種としての生態系の中で維持されてゆく仕組みということになる。心理的現象としての分類においては、「自分で考えること」にまとめられるが、特に目的、自己存在、死と生き甲斐、悩みなどを考え意識しながら、自分の意志で行動することが、生きていることととらえられる。社会的現象の分類においては、周囲との関係を持って自分の存在を認めてもらうことが生きていることだという回答であった。すなわち、代謝する存在を個体の時間レベルと、個体を超えた時間レベルで維持する活動を自ら行い、その結果として、社会的、生態的環境のなかで存在をも認めてもらうし、自らも確認する。これが、常識として考えられる総てとはいえないだろう。質問をした相手が二十歳前後の若い人たちである偏りは確かにある。が、一般常識的に理解されている、「生きている」という姿の一部であることは確かである。

だが、これに正解はあるのだろうか、あるとしたら、誰がどういう基準で決めたのか、その基準はどうやって誰が決めたのか、、、と永遠に後退してゆく。

この生きているということを表す一部でも、いざ自らの手で創り出そうとすると、なにをどうしていいのか見当もつかない。その根元的なものをまず見いだす必要があるだろう。

我々の持つ「生きている」というイメージのリストの中に、「生き」＝「息」がどうしてもつながっているようだ。呼吸に限らず、心臓が動き、食べ、排泄し、眠るということによる細胞、組織、器官の働きがあると言うことが、生きていることの根元的イメージであるかもしれない。そのイメージの大本にあるのは、何なのであろうか。そのひとつは、外と内を分けている境界が明確にあるということではないだろうか。境界があることで、外にあるものをうちへ取り込んで、中のあるものを外へ出すことができる。境界がなければ、心臓による循環という概念も存在できない。というのは、囲われている限界がなければ、巡り戻ってくることはできないからである。

だが、その境界は誰が与えてくれるのだろうか。もし、誰かが屋外の地面にが何らかの囲いを作って、囲いの中にある汚泥を外に出すポンプと、外のきれいな空気を吹き込むファンを設置したとしよう。その囲われた全体が生きているというイメージを持てるだろうか。日曜大工で作ったポンプと換気扇のついた小屋を誰も生物だとは考えないはずである。ところが、その囲いが、それ自身によって創り出されたものだとしたらどうであろうか。その小屋みたいな存在自体が、ポンプやファンなどの助けを借りながら、囲いが壊れればまた直したり、核延縮小を繰り返す。そうなれば、かならず生きているように見えるはずである。一方、コンピュータを生産する完全自動機械が稼働しているとして。それだけでは、生きているとイメージは出てこない。しかし、その機械が作り出すものの中に、自分自身である完全自動機械が含まれているとしたら、あるいは、壊れた場合、その部分を自らが作り出した部品で置き換えてゆくとしたら、その機械は生きているというイメージを与えられてもよいだろう。

我々の持つ生へのリストの心理的現象の中には、自律に関するものが多くみられる。自分の意志で、能動的に、思考するなどがそれに当たるが、自分の目標、目的など、存在などということばも、自律に関わった言葉である。上記のいくつかの例でも、自律という問題が境界を自ら作り出すということと裏腹に関わっている。

さらに、我々の生へのイメージとして、アイデンティティ、自分、存在などと言うことばが並んでいる。これは、一つの個体として自分自身を自分で同一に保つことである。環境がどのように変化しようが、その存在が同一であると認識できることが生きているということにとって、重要なことであろう。"同じ"であるということが自分自身によって成り立たせられているということは、どういうことなのであろうか。記憶は"同じ"が時間を経て実現することである(安念・藤田, 1988)が、風雪に耐えられる、強固な無機物が、空間の中に長い年月存在していれば、それは、時間に対して"同じ"であるということが成り立ち、何らかの記憶を持つと言えるかもしれない。しかし、誰がそれを同じと認めるのか、その存在がなければ、記憶は成り立たない。"同じ"が、自分でしか、あるいは、時間に抗して続いてきた存在でしか認めることができないとするなら、その時間に抗して続いてゆく中に、"同じ"が、"自己撞着的"に組み込まれている厄介な問題なのである。

ある結晶が、部分的に欠けたときに、そこを補うように結晶が成長したとすれば、"同じ"であることが、自分自身によって成り立たせられているといえるかもしれない。そこらに落ちている石ころも、地球の歴史と同じくらい古いはずである。しかし、その石ころは、風雪に耐えられずに削られて砂になり、海へと流れ、また固められ岩になって隆起するか、溶岩に溶けてなって地表に出れば、

また削られ丸くなってゆく同じことの繰り返しである。"同じ"を自分自身で実現できない。

細胞、器官、肉体といった、生きている組織も、環境の中に一定の空間を占めていることだけでは、同じを実現できないであろう。なぜなら、炭水化物でできたものが、それだけでは、数日たりとも同じを実現することは不可能だからである。ミイラを作り出そうとした古代エジプトや中国の技術は、同じを肉体に対して実現するための技術であったのだろう。しかし、劣化したミイラは自ら修復することはできない。そうであれば、いかに、"同じ"を自分自身で実現させるかということが、生きていることの本質であるかが、分かるであろう。

肉体に宿る心の場合はどうであろうか。たいていの人は、自分が小さい頃から同じ自分であることが、自分によって実現している。しかし、多重人格者の場合のように、いくつもの人格を持ちながらそれを、絶えず入れ替えているとしたらどうであろうか。ある人格の時の自己が、途中何人もの人格で入れ替わったとしても、同じ人格として続いていると自分で思えるのなら、このことに関しては生きているといえるだろう。しかし、くるくると人格が入れ替わりながら、同じ人格が出てきても、前の人格からつながっているという実感が自分でなければ、このことに関して生きているということには当てはまらなくなるだろう。自分は、環境がどのように変わろうがいつも同じ自分であるという実感が、自分によって実現されている限り、生きている実感は得られているといえる。去年の自分、昨日の自分、数時間前の自分、数秒前の自分が現在の自分とは違う(肉体的にはもちろん、代謝されて同じ物質ではあり得ないが)と感じられてしまい、連続性が無くなってしまうと、そこには高等な精神活動など存在できなくなるだろう。同じであるからこそ、発達、学習、記憶、認知が成り立つのである。さらにいえば、社会が成り立つのも同じが成り立つからである。

3. オートポイエーシス(自己創出組織)

このような、生きていることに対する本質概念を考えている研究者がいた。マトゥラーナとヴァレラ(1987,1991)である。マトゥラーナが、神経生理学と神経解剖学の研究を行うかたわら、医学部の学生に生物学を教えていた。そのとき、学生の質問が集中したのは、「生命システムが起源以来、世代交代を経ながら保持している固有性とは何か」ということに気がついたという。そして、同時に研究の過程でも、色視の中心課題は色彩世界を神経システムにおいて作成することではなく、むしろ観察者が色彩空間を作り出すに際して、網膜(ないし神経システム)がどのように参加しているかを解明することであることが分かったという。

第一の生命の有機構成とは何かという問いに対して、

上であげたようなリストをあげてゆくことはできるが、そのリストはどれくらいの長さで、いつになれば完成するのか、適応、進化、発生、分化についてかたり、自然選択によってどのように結びついているかを示すことはできたが、生命システムの固有の特徴は何かという問いはそのままにもとに戻るだけであったのである。そこで、マトゥラーナは、不十分なものを除外してゆくと、この困難は、認識論的なものであると同時に、言語的なものであることが分かったという。そして生命システムを環境によって規定される開放系と見なすことを止め、生命システムを自律的実体として特徴づけ、そのために目的や機能といった概念を相関概念として除外し、生命システムのように自らに言及する以外に特徴づけることのできないシステムと、コンテキストに言及することではしか特徴づけることのできないシステムを分離することにした。生命システムで生じることはすべて、それ自身との関係から必然的、構成的に規定されて生じるのであり、自己言及によって単位体として規定されることこそ、その自律性のあり方だとした。一方、他のシステムで生じることはすべてコンテキストとの関係から構成的に規定されて生じ、コンテキストとの関連からそれらのシステムは単位体として規定される。

マトゥラーナは、生命システムの固有の特徴として定義している本質を、その自律性からさらに「絶えず自己を産出し続けるということ」ととらえた。元々彼らの中にあっただのは「もしまかりに円環的な有機構成が、生命のシステムを単位体として特徴づけるのに十分ならば、それをより形式的な語を用いて表現できるだろう」ということで、その語に合う言葉を探していた。あるとき、ドンキホーテのジレンマで、武器の途(プラクシス、行為)か、言葉の途(ポイエーシス、創造、生産)のいずれをとるかという問題について話していて、プラクシスをとるとポイエーシスのあらゆる試みが延期させられてしまうという。そのときに、ポイエーシスの語の威力に感じて、その言葉を作り出した。こうして、自己言及によって単位体として規定されるシステムをオートポイエーシス、コンテキストとの関連から単位体として規定されるシステムをアロポイエーシスと呼ぶことにしたのである。

彼らは、このオートポイエーシスを例えば細胞レベルにおいて見いだしている。単細胞を構成している諸分子は、ダイナミックなネットワークを相互に持っていて、今日それは生化学的に解明されて細胞のメタボリズム(代謝)と呼ばれているが、この細胞のメタボリズムのもっとも特徴的なことは、それが作り出す構成要素は、それらの構成要素自身を作り出した変換ネットワークをも作り上げていて、これらの構成要素のうちのあるものが、境界つまりこの変換ネットワークの限界を形成している点にある。これが細胞膜と呼ばれるものである。

これを、膜のようなものを機械的に作り出す織機と比べてみると、織機の布が織機を構成しないのに対して(アロポイエーシス)、細胞がその働きで作りに出すのが膜であるのだが、その膜は細胞を構成する点が明確に異なっていて、こうした点に我々は敏感に気がつくのである。それはすなわち、境界 \leftrightarrow メタボリズムで示されるが、これらがひとつつづきのプロセスなのではなく、一つの現象の二つの局面なのである。

オートポイエーシスをマトゥラーナとヴァレラ(1987)は、自らの動作で、環境から独立した境界を産出している様子を示すために、下記の様な模式図で表している。

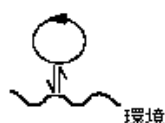


図2 オートポイエーシスの模式図

マトゥラーナ と ヴァレラ (1991)は、オートポイエーティックな有機構成から導かれた特徴を次のように述べている。

(1)オートポイエーシスは自律的である。それがプロセスの中でどのように形態を変えようとも、オートポイエーシスはあらゆる変化をその有機構成の維持へと統御する。

(2)オートポイエーシスは個性を持つ。すなわち絶えず産出を行い有機構成を不変に保つことによって、観察者との相互作用とは無関係に、オートポイエーシスは同一性を保持する。

(3)オートポイエーシスは特定のオートポイエーシスな有機構成を持っているので、そしてまさにそのことによって、単位体を成している。オートポイエーシスの作動が自己産出のプロセスの中でみずからの境界を決定する。

以上の3項目は、我々の生きていることに対するイメージのリストのほとんどを取り込んでしまう。そして、一方アロポイエーシスはすべて逆の特性を有している。アロポイエーシスは、生産されるものは、それ自身とは異なった生産物に付属し従属するため、自律的ではなく、またその同一性は、観察者に依拠していて、個性を持たず、その境界は観察者が定めるのであり、観察者は外的な入力と出力を見定め、対象の作動に関するものは何かを特定する。しかし、次の項目は、オートポイエーシスがアロポイエーシスの反対であるとはいへ、我々の持つ生へのイメージとはかけ離れたものである。我々の常識は、入力を受けてそれに反応して出力する

存在ではあるが。

(4)オートポイエーシスには、入力も出力もない。オートポイエーシスとは無関係な出来事によって攪乱が生じることがあるが、この様な攪乱を補う構造的変化が内的に働く。もし攪乱が繰り返されれば、機械も内的な変化を繰り返す。この変化は同じこともあれば違う場合もある。だがどのような変化が連続しようとも、これらの変化は、オートポイエーシスを規定する条件である有機構成の維持に常に従属している。従ってこれらの変化と攪乱との関係は、どれをとっても観察の領域に属しているのであって、有機構成に属しているのではない。この様にオートポイエーシスはアロポイエーシスとしても扱うことができるが、それによってオートポイエーシスの有機構成が解明されることはない。

実際には、オートポイエーシスである有機体は、環境から、多くのエネルギーを取り込んでいる様に見える。しかし、それは、直接ではなく、オートポイエーシス内での多様な生成過程があつて、多様な自己の構成要素が産出されてゆく。その全てが、元のオートポイエーシスになるのではなく、取り込まれるものと、廃棄されるものがあり、取り込まれるもので次の瞬間のオートポイエーシスが構成されてゆくのである。自分で動くこと(行為)によって、その都度自分自身(内と外)を決めてゆくので、動きに先立って、内部も外部もないので、入力も、出力もないと言えるのである。動きの中で、オートポイエーシス要素の集合が決まっているが、動きのために完全に閉じているわけではない(河本,1995)。この特徴を最もよく示しているのは、ヒトなどの免疫の働きであろう。

(5)マトゥラーナとヴァレラ (1991)は、以上の構成から導かれるオートポイエーシスには、テレオノミー(目的論)は不要となると述べている。我々の生命に対する常識のリストの中にも目的を持つ存在であるというのは出てきていたが、マトゥラーナによれば、それは生きているシステムを構成するものではなく、観察者が、そのシステムへの入力と出力の関係をそのコンテキストに関係づけるための記述の領域に属するものであるという。それは、機能の概念も同じであつて、ある状態から別の状態へと変化した際の関係状態を指し示す記述にすぎないのである。それ故、どちらも、システムの作動を説明する際に用いてはならないのだと言う。

こうして、個体発生は不完全な状態からより完全な最終形態へと至る推移過程を意味するのではなく、生命システムの生成の表現であると同時に、個体が発現されるプロセスをも示しているのである。それゆえに、発展という概念も、観察のコンテキストから生じているにすぎないのである。

もし我々が、ある生きている組織やシステムを見ていて、これはこういう目的に向かって突き進んでいるのだと確

信を持って、それから起こる出来事をその目的から次々と予測が的中していったとしても、それは、単に記述のレベルのことにすぎず、その生きていることを説明することには何ら関係のないことなのである。歴史家は、過去の人物の不可解な行動を、その隠された意図なり、目的を暴くことで、多くの人を納得させようとする。しかし、それは、過去生きていた人物の行動を解釈しているに過ぎず、その過去の生きている有機構成の説明には何ら関係のないことなのである。なぜなら、オートポイエーシスとしての、人物の世界は、入力もなく出力もない閉ざされたものだからである。

4. 人工生命

この生きている姿、オートポイエーシスの姿をコンピュータの世界に見出そうとしたのが、Chris Langton (Chris Langton) である。彼は、セルオートマトンを簡略化したコンウェアの「ライフゲーム」(1970)に夢中になる内に、啓示を受ける。「ライフゲームの画面にふと目をやると、とんでもなくおもしろいパタンが展開していた。その瞬間だった。急に、部屋に誰かがいるような、強い感覚にとらわれた。それは私の頭で判断したものではなくて、突然、誰かにつかまえられて、神経系がそのまま反射的に反応したような何か強い衝撃だった」と、彼はその夜の体験を語っている。その衝撃から、機械が生命を表現でき、それが生命を表現しているばかりでなく、それ自身も生命なのだという考えにいたるようになった。1987年、そうした一連の研究を「人工生命」というアドバレンをあげて新たな一歩にしようと、ロスアラモスにおいて、コンピュータ関係者だけでなく、生物学、物理学、人類学、社会学、経済学、芸術家を含めた約160人の研究者を集めて会議が行われ、それ以降2年に1度開催されている(服部, 1994)。

その前後、F. ヴァレラを中心とした、ヨーロッパにおける人工生命会議が1985年より、また1990年には、人工動物 (animat) の適応行動に関するシンポジウム (Simulation on Adaptive Behavior) が開かれ始めている。

これらの他、人工生命にまつわる哲学思想上の展開も見逃せない。イリヤ・プリゴジンの散逸構造理論(1971)、ルーマンの自己組織化の社会学、ローレンツによるカオスの発見(1963)、マンデルブロートのフラクタル集合、リンデンマイヤーの L-システム、ミンスキーの「心の社会」(1986)、それに、マトウラーナ、ヴァレラのオートポイエーシス(1991)などが、人工生命を醸し出す基盤でもあった。

以上あげた領域は、人工生命を生み出す方向で存在していたと言うよりは、それぞれの領域で展開がなされており、また互いに絡み合っていて、もっとも緩やかな共

通項が「生きているということ」であるだけなのかもしれない。そういう点では、認知科学をも含んださらに大きな大風呂敷であるといえる。

しかし、ラングトン(1989)が掲げた人工生命研究は、これまでの人工知能研究を基盤とした認知科学や、従来の生物学と決定的に異なっていた。人工生命の研究の方向性は、以下の5つである。

(1) 先ず中心には、現在知られている生命 (life as we know it) は、あり得たかもしれない生命 (life as it could be) の極一部でしかないと言う、視点である。我々は、生命を「この地球上に生じたたった一つの偶然の生命の実例でしか知らない」。

(2) そのために、我々は、従来の還元・分析手法ではなく、合成手法によって、生命を研究すべきだとしている。

(3) さらにその合成によって、予測できない新たな性質が創発 (emergent) してくるだろう。

(4) また、その創発の過程として合成された要素間に生態系が出来上がり、個々の要素がそのダイナミズムの影響を受け始めるフィードバックが起こるのである。

(5) 前二者のうち、(3) はボトムアップ的アプローチであり、(4) はトップダウン的アプローチであるが、どちらかだけではダメで、両方のアプローチを総合的に適用しなくてはダメであり、これを「コレクションズム」と呼んだのである。

人工生命の典型例としてあげられているのは、Ray (1992) がコンピュータの中に作ったティエラと呼ばれる人工生態系である。ティエラとはスペイン語で大地を意味する。これは、パソコンの中で、プログラムが自己増殖を起こし行くもので、増殖するプログラムは、CPU 時間と、メモリ空間を奪い合うことになる。メモリ空間には限りがあるので、タイムスタンプの古いものから消されて行く。そこにばらまかれたプログラムは、頭に 1111 がきて、最後が 1110 で終わるようになっており、これが個体としての膜に相当するものである。プログラムが実行されると、(1) 自分の大きさがどこからどこまでかを検証し (1111 で始まり、1110 で終わるところが一個体とみなす)、(2) その大きさを記録する (最初の大きさは80であった)。(3) 次に、自己増殖の過程が起き、自分のプログラムをコピーする。しかし、これだけでは、多様性が生じないので、(4) コピーの際に、突然変異の意味として、ビットが反転する過程を僅かに入れてある。それには2種類あって、メモリ全体で一定の割合で変化してしまう背景ノイズとして1万回に1回の割合での、もう一つは、コピーエラーとして、100-2500 回に1回の割合での、ビットの反転である。

ここで重要なのは、上記の突然変異によって、原型の大きさ80の途中で突然変異を起こしてしまい、1110の個体の尾部の符号が出てしまうことが当然あり得て、その場合にも自分の境界を検証する過程が、1111で始まり、1110で終わるところを一個体とみなしてしまうために、プログラムとしての個体が、分裂したままコピーされて行くことである。そうこうしているうちに、長さの短い個体がたくさん棲息するようになっていった。長さ45の個体は、自己増殖過程を持たないプログラムであるが、他のプログラムの自己増殖過程に寄生して、自分を増やしていった。ところが、それに対抗するかのように、長さ79の個体は、その寄生体を増殖することを許さなかった。しかし、さらに長さ51の個体は長さ79の個体に寄生できるようになった。さらに、寄生体に寄生する個体や、それらの寄生体同士の情報のやり取りを横取りしてしまうと言うものまで現れていったのである。

最初の環境とプログラムの設定は、非常に単純であるので、この様に多様な生き物が生まれてくることを、誰も予想はしていなかったのである。これは、まさに、人工生命研究が目指す「創発(emergency)」である。だが、マトゥラーナのオートポイエーシスの基準からするとどうなのであろうか。プログラムが勝手に自分の大きさを判断してコピーを行っているので、自律性、入出力がない、目的性がないという特性については、当てはまるであろう。しかし、個性性、境界の自己決定に関しては、「1111で始まり、1110で終わる」という決定がT.Rayによって与えられたという点が気になるところだ。「1111で始まり、1110で終わる」という決定が、メモリ空間での駆け引きの中で成り立ってきたものであるなら、オートポイエーシスに近づくであろう。例えば、メモリの奪い合いが起こったときに、「1111で始まり、1110で終わる」の基準だけは常に侵されなかったなどの歴史性が必要になってくるかもしれない。しかし、個性性がないところで、奪い合いはどうして起こるのかという、問題が出てくるであろう。

従来のロボットの研究は、閉じられた空間で、あらゆる起こりうる場合を風潰しに調べ上げ、それぞれへの対応の一覧表を人工知能の形で持たされたものであった。それに対して、Brooks(1986)は、そのような手法ではいつまで経っても複雑な環境で対応できるロボットの開発はできないか、膨大な費用がかかりすぎるかであるとして、サブサンクションアーキテクチャを提唱した。それは、認知科学の中で最近重視されている状況意味論とも通じる、状況性(situatedness)「実際に動かしてみないと何も分からない」と具現性(embodiment)「知能はそもそも肉体を経て得た主観的な経験から分離することができない」(ブルックス・シュタイン, 1994)という考え方に基底がある。そして、知能は、認識、モデル化、プランニング、課題実行、駆動系制御と言ったモジュールに分解され

るものではなく、環境と反応して実行される要素行動(competence)に分解され、それによる階層構造を持ちながら各階層がある程度独立して働くようになっているのではないかと考えたのである。サブサンクションアーキテクチャは、最初から開かれた空間で、何が起こるか知らされないままに、自律ロボットが放たれて、はじめは不十分な働きしか示さないが、その機能を繰り返し改良して、その空間に適応してゆくという技術である。完成された行動を細分化された反射的な要素行動に分割し、制御プログラムはその要素行動の集まりとして書かれ、逐次その集合を変えながら作られて行く。また、新たな要素行動も並列的に付け加わることによって、複雑な環境に適応させて行くものである。最初のうちは、旧来の領域から強い反発にあったが、人工知能的なプログラムの探索を行わず、簡単な回路に組み込めるため、サブサンクションアーキテクチャによる応用技術が開発されてきている。

これまでの心理学は、表象された意識の象徴や記号表現、あるいは、外に現れた行動だけを扱ってきた。しかし、心理学の対象としている意識、心がどの様にボトムアップ的に発生してくるのか、心の本質的なシステムの動きを理解しようとはしてこなかった。「意識は、脳細胞のセルオートマトン上に発生した人工生命である」としたら、人工生命の明かりは、これまでのそのような心理学のあり方を根本から変える可能性を持っている。重要な点は、このような研究が、完成すれば、それは、モデルとしての心理学ではなく、心そのものを扱った研究が可能となるのである。

Wolfram(1994)は、1次元のオートマトンの行動が、上記のアトラクタと似た分類がなされることを見出した。1次元状に並んだ3個のセルの1/0状態($2^3=8$ 通り)で次の世代のセルのon/offが決まるという、単純なルールが存在するだけであるが、その組み合わせは、8通りに対してそれぞれon/offあるから、 $2^8=256$ 通りあり、そのすべての行動を実験してみたところ、以下の4種類のクラスに分類された。

クラス I のセルオートマトンは、固定化した、均質な状態に進化する。

クラス II のセルオートマトンは、限定した周期構造に進化する。

クラス III のセルオートマトンは、カオスの周期性の無いパターンを産み出し、ストレンジアトラクタに連合したカオス行動に進化する。

クラス IV のセルオートマトンは、局所構造の複雑なパターンを産み出し、非常に長い転移を持ち、しかも、持続するダイナミックシステムの中でそれと似た方向を持つものが認められない。

アトラクタが1点である場合が、クラス I、リミットサイクル

を描く場合がクラス II、ストレンジアトラクタを描く場合がクラス III に相当するが、さらに複雑ではあるが、無秩序に見えないパターンを生み出すクラスがオートマトンの中に生まれうることを示したのである。

Langton(1991)は、この論文に影響を受け、あらゆるセルオートマトンの行動を統一的に理解する枠組みを示した。

各セルがK個の状態をもって、N個の隣接体をとまるとすると、そのN個のセル全体が取りうる可能な状態は、KのN乗である。 λ パラメータは、静止状態に至らなかった状態数の可能な状態数(KのN乗)に対する割合で、これが、0であるなら、すべて、静止状態クラス I となるし、1であれば、クラス III になる。こうして調べてみると、 λ 値が増大すると、だんだんと周期的状態が増えて行き、0.45 のあたりで、複雑さが最高となり、それを越えると、複雑さは減ってカオス状態となることが分かったという。

Langton(1991)は、決定論的世界を下のような図に表し、カオスの縁”edge of chaos”に複雑なシステムが出現し、おそらく生命のような複雑なものはここにいるのだと考えたのである。これについて電車を例にあげて考えてみよう。電車の運行は決定論的世界である。クラス I の制状態とは、電車が終電で停まっている状態である。クラス II の周期的状態とは、電車が定期的運転をしている状態で、日常生活はほとんどこの2つの状態に納まっている。また、クラス III のカオス状態とは、電車や線路が解体されてばらばらになっている廃虚の状態である。しかし、クラス IV の複雑なシステムが発生する状態は、日常的に電車に乗っている我々には想像がつかない。例えば、電車が動くことの意味を知り始め、それまでの線路を逸脱して独自運行し出した場合であろうか。我々の身の回りの道具、乗り物、機械は殆どクラス I, II の間で動いていて、壊れればクラス III に移行するだけであり、クラス IV については殆ど想像もできないであろう。シーソーで考えてみても、クラス IV に至るには、複雑さが足りないのである。だが、シーソーに子供達が乗っていると、時折、実に複雑な動きを楽しんでいる光景にぶち当たる。それは、単純に、ギッタンバッコンしていることに飽きてきた子供達が、複雑で微妙なバランスをとり始める時である。人間が乗ることで、複雑な要素(自由度)が加わったのである。しかし、誰も乗らない、シーソーが自律してバランスを取り出すことなど、我々は考えたくもないことであるが、生命のようなものは、かくして発生してきたのではないだろうか。

そうした機械の中の幽霊にも似た、我々の意識もまた、上記のセルオートマトンのクラス I から IV までの状態変化を示すはずである。しかし、機械やシステムにおいては、クラス IV が出現すると、人間は、必ずそれを止めて

もとの I か II の状態に戻そうとするか、解体させてしまうであろうから、人間に気づかれてしまううちは、クラス IV の状態は長続きしない。しかし、我々の意識は、その寿命と同じだけ続きうるほど、長生きである。しかし、それは見せかけだけのものであるかもしれない。というのは、意識もクラス IV の状態はそう長くは続かず、もとの安定した概念的固定点か、周期的ルーチンワークや堂々めぐりに戻ってしまう。しかし、意識空間の中において、働いている意識は幾つもコピーを作っており、それが重なって束となって、意識の流れ=自我が形成されているのかもしれない。そこでは、分身を作った意識は、さらに上位へ、自己展開して行くと考えられないだろうか。

5. アフォーダンス論

生きていることの本質が、動的に動き回り、環境と相互作用しながら、自律的な境界を造っていくオートポイエーシスにあるとするなら、この言葉が生まれる二十年以上前に、ギブソン(James J. Gibson, 1904-1979)は、その姿に気がついていたのかもしれない。ギブソンは、ナチスドイツに追われアメリカに亡命して、スミスカレッジに奉職したコフカ(Kurt Koffka, 1886-1941)に、同じ大学で影響を受ける。コフカはゲシュタルト心理学の創始者の一人であるが、「行動的環境」という概念をギブソンに伝えたのである。そして、ギブソンは、独自の知覚論を展開しはじめ(Gibson, 1966)、生態学的知覚論を確立していった(Gibson, 1979/85)のである。

この行動的環境の中で、ヒトを含めた動物が生かされていることを考えたのである。生き残るために、環境を切り開いて、新たなニッチ(生態学的地位)を得たとして、その環境が与えてくれる、生きてゆくための情報がアフォーダンスである。このアフォーダンスを与えてくれるのは、ただの環境そのものではなく、動物の身体的動きが行動的環境と切り結んだところから、与えられるわけで、オートポイエーシスが動的に環境の中を動き回りながら、多様な構成要素を産出してそのうち自己に合うものだけを取り込む部分と見なすこともできる。

例えば、ユリカモメは、平らな場所に、同心円状に密集して営巣地を構えるが、一方ミツユビカモメは、断崖絶壁の小さな岩棚に営巣地を構える。密集しているユリカモメは、親鳥が自分の卵や雛を模様や姿形、匂いで個体識別できるが、個別の岩棚に営巣しているミツユビカモメは、自分の巣やひな鳥を岩の形状や場所で識別するが、雛の個体識別は遅い。また、ミツユビカモメの幼鳥は、攻撃されても、巣から落ちてしまうため走らないと言われている。ユリカモメにとって、飛翔中に断崖を通過したとしても、営巣可能だというアフォーダンスは与えられない。また、ミツユビカモメにしても逆が成り立つ。生物にとって、環境は、生きていることと切り離せることが

できず、生態系と生命が一環となった動的に閉じた閉鎖系をなしている。どちらのカモメも、それぞれの環境で、育ってきていて、その生育環境が生き残ってきたことと切り離せない、即ち、環境の意味や価値(=アフォーダンス)を、生きている円環として直接知覚しているのである。

筑波情動系ラットの営巣地に関しても同様なことが見出されている(安念, 1986)。狭くて暗い箱に閉じこめられた後、ドアが開かれても外に出ようとしない方向に人為的に選択交配されてきた THE 系のラットがいる。THE 系ラットは、新奇な場面では全く動けずに、恐怖のあまり、糞尿を漏らしてしまう。それは、屋外の 3.6m 四方の広い空間でも同じで、暗くなるまで、数時間、THE 系は全く動けなかった(図3)が、夜間の内に隅に穴を掘りはじめ、翌朝には、その窪みに身を潜めてしまった(図4)。



図3 フィールド投入後、数時間全く動けなかった THE 系。 図4 翌朝、THE 系ラットは、地下に潜った。

一方、狭くて暗い箱に閉じこめられた後、ドアが開かれるとすぐ外に出ようとする方向に人為的に選択交配されてきた TLE 系のラットの場合、同じく、3.6m 四方の広い空間に同時刻に放たれた瞬間、動き回り始め、雄雌で放たれたため、すぐに性行動を始めた(図5)。

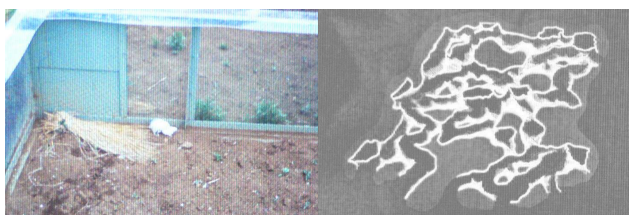


図5 フィールド投入後、直ぐに性行動を始めた TLE 系。 図6 TLE 系の掘った地下道の石膏取り像のイラスト。



図7 THE 系の掘った地下道の石膏取り像。

この TLE 系は、なかなか穴を掘らずに、枯れ枝を集めてきて、地上に鳥の巣のような窪みを作って、そこをねぐらにしていた。しかし、2週間後には、どちらの系統も、本来の野生の生活の仕方に戻って、地下に穴を掘って暮らし始め、石膏による型取りでは、どちらも、同じ様な複雑な地下経路を構築し、餌の貯蔵所や、子供の飼育室、寝室といった構造化された地下空間を持っていたことが確認されたのである(図6, 7)。

筑波情動系ラットは、10年程度の人為選択兄妹交配によって、近交系化したとは言え、ユリカモメとミヅビカモメほどの遺伝的な開きは無いため、最終的には、同じ様な地下道を造って営巣したといえよう。しかし、屋内の実験室で、150年以上繁殖させられてきたラットが、初めて出会った土のフィールドという環境は、その系統の持っている遺伝的な行動特性と、明確に異なった切り結びをして、全く異なるアフォーダンスを与えていたことになる。

こうしたことから、アフォーダンスは、ヒトの性格特性にも同じことが言える上、生き物の様々なレベルで環境から与えられ、個体毎に異なったり、種で共通していたり、あるいは、さらに近縁種や、それ以上の属、綱、門、界レベルで共通しているといったことや、もっと、下位のレベル、つまり個体を構成している機関、組織、細胞単位で、アフォーダンスが共有されているといったことが成り立つ。このこと自体、オートポイエーシス単体が、カップリングや内包を繰り返して、複雑化していく姿と重なっていると言えるだろう。さらには、個体を超えた社会的なカップリングでもオートポイエーシスが成り立つわけで、特にヒトの世界においては、社会的アフォーダンスが問題となってくる。

ティンバーゲンが述べた4つの問題設定の枠組み(Tinbergen, 1963)を考えた3年後、ギブソンは、『知覚系として捉えられる諸感官』において独創的な感覚器官のシステム論を世に出し、生態学的心理学への流れをつかんだのである。ティンバーゲンの枠組みからすると、ギブソンは、当時も、現在も主流となっている機構の問題を扱っているわけではなくて、生態学という個体間、個体と環境との関係性という機能の問題を扱っていることになる。機構の問題は、デカルト由来の心身二元論による身体の構造に基づいていて、外界の情報が、感覚器官で神経インパルスに変換され、神経系を伝って、脳で処理され知覚が起こるという間接知覚論に繋がる。知覚を担う身体の機械的構造を明らかにすることに主眼がおかれ、それを意識する主体の心は、デカルトによればそれとは全く相容れないものとしておかれ、脳によって、騙されているかもしれないと説かれるのである。あるいは、環境世界の内的表象を、神経系を介して、脳内に形成することが知覚であると考えられ、表象を構成する脳の

ネットワーク構造が問題となる。

しかし、ギブソンは、情報は、はじめから最後まで、環境にあり、それを生き物が動き回りながら直接知覚すると考えている。感覚器官が外界の信号エネルギーを"情報"に変換し、それが内的表象を構成するというのは、全く間違っており、生き物は、動き回りながら、その外界のエネルギーの差異を感じているだけだとする。ただ、それは、一点に制止しているわけではなく、生き物の能動的な動きと対応した、面として常に変化している差異である。生き物は、この知覚される常に変動する差異パタンの中に、変わらない部分、つまり不変項を見出す。不変項が見出されると、可変項と区別されて、行動環境の知覚が分節化してゆくのである。『探りを入れる』、『当たりをつける』といった言葉は、動的に動き回りながら、環境の不変項を探っている姿である。これら二つの考えは対立しているように見えるが、ティンバーゲンの言うところの問題設定がそもそも異なっているだけだということができる。

動物の生態系の話を考えている限りは、遺伝的に組み込まれた環境知覚の仕組みから、直接知覚が成り立っていると考えるのは容易であるが、自由意志、知能を持った生き物が直接知覚するという枠組みが受け入れがたいのも確かである。しかし、むしろ本能と考えられている行動において、環境の知覚が、不変項を見出すごく一般的な知覚過程を経ていることに、ダーウィン(Darwin, 1881/1982)は、ミズ類が地面の巣穴の入り口を詰め物で塞ぐ行動の観察で気がつき、ミズが知能を有していると述べている。詰め物、多くは葉や葉柄部であるが、のタイプや、どの様な方法で穴まで引っ張ってゆくかを記録した結果、物体の尖頭部の形状が何であるかによって、引っ張り込むかどうかを判断していることが分かったという。そこで、ダーウィンは、ミズが、物体の大まかな形状という、ある種の概念のようなものを獲得している可能性を指摘している。

遺伝的に固定されているかに見える行動ですら、行動的環境のなかで知的にアフォーダンスを得ているとするなら、自由意志を持った知能のとらえ方自体が、デカルトの心身二元論、ひいては、アリストテレスの自然の階梯によるヒトの思い上がりからくる、間違ったとらえ方なのかもしれない。あらゆる生き物は、行動的環境の中で、知的にアフォーダンスを直接知覚しているだけで、生態学的地位をまだ見つけられていない場合に、我々は、自由意志による知能的行動を振る舞っていると考えていただけなのかもしれない。

引用・参考文献

安念保昌 1986 情動性と社会構造. 学位論文, 筑波大学.
安念保昌・藤田統, 空間の記憶と適応行動—生態学的アプ

- ローチ. 伊藤正男・佐伯胖編「認識し行動する脳」, pp.259-282, 東京大学出版会, 1988.
- 安念保昌 2001 社会的認知の起源. 岡野恒也(編)『社会性の比較発達心理学』アートアンドブレイン社, pp.81-100.
- Brooks,R.A. 1986 A robust layered control system for a mobile robot., IEEE Journal of Robotics and Automation, March.
- ブルックス,R.・シュタイン,L.A. 1994 ヒューマノイド計画:体に合わせて頭脳をつくる, 五味隆志訳, 柴田崇徳・福田敏男編著「人工生命の近未来」, 時事通信社, pp.203-257.
- Darwin, C. 1859/1993 The origin of species. New York: Random House.
- Darwin, C. 1881/1982 The formation of vegetable mould, through the action of worms, with observations of their habits. Chicago: University of Chicago Press.
- Fujita,O., Annen,Y., and Kitaoka,A. 1994 Tsukuba High- and Low-Emotional strains of rats (*Rattus norvegicus*): An overview. Journal Behavior Genetics, 24, 389-415.
- Gibson, J.J. 1966 The Senses Considered as Perceptual Systems. Illinois: Waveland.
- ギブソン, J.J. 1985 古崎敬・古崎愛子・辻敬一郎・村瀬(訳)『生態学的視覚論—ヒトの知覚世界を探る』サイエンス社.
- 服部桂, 「人工生命の世界」, オーム社, 1994
- 河本英夫, 「オートポイエーシス第3世代システム」, 青土社, 1995.
- Langton,C.G.(ed.) 1989 "Artificial Life (The proceedings of an Interdisciplinary Workshop on The Synthesis and Simulation of Living System held September 1987 in Los Alamos, New Mexico)", Addison-Wesley Publishing Co..
- Langton,C.G. 1991 Life at the Edge of Chaos. in C.G.Langton, C.Taylor, J.D.Farmer and S.Rasmussen (eds.), Artificial Life II., Addison-Wesley Publishing Co., pp.41-91.
- マトゥラーナ, H.R.・ヴァレラ, F.J. 1987 菅啓次郎(訳)『知恵の樹』朝日出版.
- マトゥラーナ, H.R.・ヴァレラ, F.J. 1991 河本英夫(訳)『オートポイエーシス』国土社.
- Morgan, C. L. 1894 An introduction to comparative psychology. London: Scott.
- Ray,T.S. 1992 An approach to the synthesis of life. in C.G.Langton, C.Taylor, J.D.Farmer and S.Rasmussen (eds.), Artificial Life II., Addison-Wesley Publishing Co., pp.371-408.
- Tinbergen, N. 1963 On aims and methods of ethology. Zeitschrift fur Tierpsychologie, 20, 410-433.
- Watson, J. B. 1913 Psychology as the behaviorist views it. Psychological Review, 20, 158-177.
- Wolfram,S. 1994 "Cellular Automata and Complexity (collected papers)", Addison-Wesley Publishing Co..

