

生体と環境を制御する技術

生体と環境の数学的モデルによる考察1

富岡和人

A LIFE COM. バイオ研究室

〒321-0216 栃木県下都賀郡壬生町壬生丁229-20

Tel : 0282-82-6505

e-mail : alifecom@s45.xrea.com

著者抄録

本研究は、情報処理と環境に関する研究である。この研究として、生体と環境を制御する技術について著者は簡単な考察をした。本報告書では、生体と環境を制御する方法の分類と生体と環境を制御する技術について推論・推測をしてまとめた。ある前提を設けて、この結論で生体を操作する方法を2つに分類した。一つは、環境的制御と遺伝的制御に基づく方法である。もう一つは、情報処理に基づく制御方法である。さらに、本報告書の2章3節で提案した数学的モデルに基づき、生体を操作する技術について著者は次の2つの結論を得た。著者は、生体システムへのある環境からの入力で、そのシステムの入力を決定できることを推論した(3章参照)。また、ある系で生体の方程式の関数 f^l_j を記述している遺伝情報でない情報がある。このとき、著者は、遺伝情報と環境との共同作用に基づき決定したこの関数 f^l_j を演算させるための入力にこの遺伝情報でない情報があることを推測した(3章参照)。

キーワード 情報処理・生体・環境・遺伝・数学的モデル・関数・制御・推論・操作

The technologies for the control over living bodies and the environment.

A Discussion1 on mathematical models of living bodies and the environment.

KAZUHITO TOMIOKA

A LIFE COM. Bio Room

229-20 Mibutei Mibumachi Simotsugagun Tochigi 321-0216 JAPAN

TEL : 0282-82-6505

e-mail : alifecom@s45.xrea.com

Abstract

This research is a research on information processing and environment. I made easy studies of the technologies for the control over living bodies and the environment in this research. I summed reasoning on the classification of methods for controlling living bodies and the environment and conjecture on the technologies for the control over living bodies and the environment in this report. I classified methods for controlling living bodies into two categories in inferences which I had in some premise. The one is a method which is based on environmental control and genetic control and the another is a method of control which is based on information processing. Moreover I had the following two inferences —— which are based on mathematical models which I proposed in section 3 of chapter 2 —— on operation of living bodies. I reasoned that input —— of a living body system —— from some environment decides output of a living body system (cf. Chapter 3). And there is information which some function f^l_j of a living body equation of a system has. I conjectured this information except genetic information in input for calculating by this function f^l_j which is based on common action which depends on genetic information and environment (cf. Chapter 3).

keywords information/living body/environment/heredity/mathematical model/function/
control/reasoning/operation

1. まえがき

生体に対する操作に、環境的制御と遺伝的制御がある。地球の多様な環境に適応してきたある種の生物に生物界の進化の過程にみられる生体システムの変化が生じた。生体が外部から受けた情報に対する影響がこの生体システムの変化である。

生体を操作できるシステムがある。たとえば、多細胞動物の神経系や内分泌系がそのシステムである。これらの器官が伝達・統合した、環境からの情報や生体内部の情報で、多細胞動物は活動する。

生体システム自身はその完全な機能を営めないために、その環境で生活するのに都合が悪くなる生物の諸性質は医学・生物学などで知ることができる。

このような問題を解決する方法として、著者は、人工的に生体システムを操作する方法を提案する。本報告書の方法には、数学的モデルに基づいたその制御も含まれており、数学的解析が可能である。このために、一般にはコンピュータを使った解析あるいはシミュレーションなどをおこなうことができる。このことは、情報の大容量かつ高速な処理を可能とする。また、ロボット(付録参照)・サイボーグ(付録参照)・機能の代行システムに応用できる。さらに、「生命現象の主として情動的側面を非有機的あるいは有機的人工物として構成的に捉えたもの」¹⁾である人工生命に応用できる。本研究室では、コンピュータの中で記号の列や、種々の図形等で表現される人工生命体の交配・増殖・運動・摂食・学習・適応・進化といった生命様の人工物を構築し、「そのありさまをシミュレーションなどによって明らかにすることによって、現存する生命の諸側面の理解を深めようとする弱い人工生命」¹⁾に限らず、「およそ生命とよびうる物を構築しその挙動を解明することを人工生命研究の目的とする考え方」¹⁾である「強い人工生命」¹⁾における応用を考えている。

ここで述べた現状の問題点と必要性から著者は、本報告書で以下のような考察をおこなった。2章では、生体システムと環境について論じている。2.1で生体への刺激(付録参照)と生体の反応(付録参照)、2.2で環境に依存する生体内の特性、2.3で生体システムと環境の簡単な数学的モデルを論じている。この生体と環境のモデルに基づいて、生体の制御についての簡単な考察を3章でおこなう。3章では、生体情報処理から生じている生体现象を制御する技術について考察をする。この考察には、2章で考察した数学的モデルを使っている。さらに、生体现象を制御する技術の応用として、生体システムと環境を制御する技術についての考察をしている。

2. 生体システムと環境

環境から影響を受けながらもある種の生体システムは、より環境に適応するように進化をすることができた。その生体システムの特性の変化として、生体システムの環境への適応のため、生体情報処理の変化が現れることがある(2.3参照)。発生過程や環境要因などに対応した、遺伝子の発現や発現の停止をおこなう遺伝的調節を生体システムはする。一般的には、生物は自己増殖系である。その増殖は外部からの影響を受けて、親と異なる遺伝情報をもつことがある。この異なる遺伝情報をもっている生物については、次のことを挙げることができる。

- ✓ 交雑のときの分離や組換えでは、親と異なる遺伝子をもっている。
- ✓ 突然変異と呼ばれる遺伝子そのものから起る変化が、表現型に変化を生じさせる。この表現型の変化は遺伝する。
- ✓ 遺伝子の発現に違いが生じ表現型が変化するが遺伝はしない、一時変異や季節変異などを含む環境変異などがある。

上述のように、遺伝的変異と非遺伝的変異に変異を分けることができる。この変異の分類は、

本報告書の考察の論点にはならない。2.2 以後の考察で、変異を取り上げる。

本章では、環境から受ける情報と自己のもつ遺伝情報に対応する生物の反応を考察する。生体と環境で捉えた系において獲得されるものとして、これらの情報を論じている。

2.1 生体への刺激と生体の反応

本節では、2.2 で使う前提について論じる。「生体への刺激^(注1)は、生体内での情報処理をひき起す。」を2.2 では前提にしている。

生体内で処理される情報は、遺伝情報と非遺伝情報に分けることができる。本報告書では、「非遺伝情報は、遺伝情報でない情報のこと」である。

2.2 環境に依存する生体内の特性

本節で、著者は「生体に、特定の反応が生じるのに必要な情報を獲得させることでその生体システムに対する操作が可能である」ことの簡単な推論をする。本節の推論では、まず、生態系の説明を明らかにして、生態学的な環境的制御に論点をおいた考察をしている。その後、遺伝的制御に論点をおき、生体システムの情報の獲得を原因として生じる生体の反応について考察している。最後に、環境的制御と遺伝的制御の考察で、遺伝情報と非遺伝情報の処理から生体の特定の反応をひき起すことを推論している。

生態系は、「ある地域にすむすべての生物とその地域内の非生物的環境をひとまとめにし、主として物質循環やエネルギー流に注目して、機能系として捉えた系」¹⁾ である。「生産者・消費者・分解者・非生物的環境が、これを構成する四つの部分である」¹⁾。生態学では、生態系全体としては、物質の動きは循環的であり、エネルギーの流れは系への入出力として論じる。このような系は、閉鎖系と呼ばれる。地球全体をひとつの生態系と考えたときは閉鎖系となる。海洋や湖は、外界とエネルギーや物質の交換が行われる生態系である。これらの系を開放系と

呼ぶ。生物システムは、エネルギー・物質を選択的に外から獲得してそれらの変換や排出をする。このシステムも開放系と呼ばれる。開放系としての生体システムを考察対象に本節ではしている。外界と完全に隔絶していて、エネルギーと物質の交換がない系を孤立系と呼ぶ。閉鎖系と孤立系はまとめて閉塞系と呼ばれる。

個体に対する生態系の環境は、非生物的環境と生物的環境に分けられる。以後、生態学における環境要因として、「生物的環境を生きているものに限定し、非生物的環境には生きていないものすべてを含め」¹⁾ する。

著者は、O₂ の摂取量・栄養価の摂取量が生物的環境に依存する生体内の特性で重要なものであると考える。生物の活動におけるエネルギー源としては、太陽の光エネルギーが大部分を占めることの報告がある。太陽の光エネルギーで光合成をおこなう植物が存在する生物的環境を含む生態系は、光合成の生産から生じる酸素や栄養素の分布が可能な環境である。この植物の生産から生じる酸素や栄養素を用いて、この環境の物質やエネルギーがつくれることがある。この植物の生産から説明できる物質の循環とエネルギーの出入りに依存する各種が、相互関係で結ばれた生物社会をこの環境につくる。この生物社会の多様化した各種の類似性は一樣ではない。著者は、ある情報処理を各種の生体内でおこなった結果が生物的環境に基づいている多様性であると推論する。

この環境的制御については、「太陽の光エネルギーで光合成をおこなう植物が含まれる生物的環境でつくる生物社会がある。この社会からなる環境に基づいた生体を制御する方法」を挙げた。この推論で、次の前提を著者は設けた。

「光合成をする植物の生産からの物質の循環とエネルギーの出入りに基づいた、各種の適応や伝達的性質の累積的变化がある。」

生体がある情報を獲得すると、その生体内で生じる特定の反応をひき起す。生体への刺激か

ら、生体の適応や伝達の性質の累積的变化をするのに必要な情報が伝達できることがある。このことから、遺伝的調節のみでなく、生物進化の進行にみられる変異も指摘できる。交配ではゲノムセットの一部を混合あるいは交換し、個体を発生させることができる。交雑では、雑種が発生することを説明している。純系は、「全ての遺伝子についてホモな系統」¹⁾であり、「純系の個体間に生ずる変化は環境の影響によるものであって遺伝しない」¹⁾ことを生物学で報告している。遺伝子型から表現型への決定には、環境との共同作用を原因として生じることを生物学で報告している¹⁾。この報告においては、表現型の決定には生体へのある刺激が必要である。このことから、著者は、生体内のある情報処理をひき起すことで遺伝子型から表現型の発現が生じることを考える。このことを前提とするとき、著者は、生体の獲得する情報に基づいてその生体の反応やその生体の形質が決定することを推論する。

この遺伝的制御については、「遺伝子型から表現型への決定には環境との共同作用を原因として生じる生体を制御する方法」を挙げている。この推論で、次の前提を著者は設けた。「遺伝に基づいていた、各種の適応や伝達の性質の累積的变化がある。」

生体の操作については、環境的制御と遺伝的制御に分けた考察で遺伝情報と非遺伝情報の処理を論じた。生物の多様性が生じた環境に、ある生体を制御するのに必要な情報が発生した。この環境において、その情報がある生体システムへ入力してその生体システムから特定の出力をさせる生体の操作の方法について論じた。情報処理を論点とした場合は、著者は、生体が遺伝情報や非遺伝情報のある処理から特定の反応をひき起すことを推論できた。

適応や伝達の性質の累積的变化をする生物の生体内での情報処理で生体を制御する方法について本章では考察した。この情報処理の特性

の決定は環境と遺伝との共同作用を原因として生じることを考察した。次の節ではこのことで、数学的解析ができることを考察する。

2.3 生体システムと環境の簡単な数学的モデル

本節では、上述までの考察から簡単な数学的モデルの記述を提案する。生体システムとその環境を系とする連立方程式で、この節で提案する数学的モデルが記述できる。

次のように、生体システムと環境を記述した簡単な数学的モデルが式 (2.1) である²⁾。時間に対応しているシステムの出力値が式 (2.1) の左辺であり、その右辺はシステムの特性和その入力を記述したものである。各入力 x_j を変数とする関数 f_j^l で各出力 y_j が記述できる ($i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,k$)。 t は時間である。式 (2.1) を行列で記述したものが式 (2.2) である。関数 f_j^l に記述してある l で、関数 f_j^l の数学的記述を区別している。本報告書では式 (2.2) の要素となる方程式で、生体を記述している式としているときは「生体の方程式」であり、環境を記述している式としているときは「環境の方程式」と呼ぶことにする。式 (2.2) の生体の方程式の関数 f_j^l を記述している入力である変数 x_j が環境の式の出力 y_m であるならば式 (2.2) の系にその環境の方程式を記述する。

$$\begin{cases} y_1(t) = f_1^l(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \\ y_2(t) = f_2^l(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \\ \vdots \\ y_j(t) = f_j^l(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \\ \vdots \\ y_k(t) = f_k^l(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \end{cases} \dots(2.1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{f}^l(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \dots(2.2)$$

式 (2.2) の系についての考察を幾つか挙げる。以下の考察では、式 (2.2) の理想的な記述を前提としている。

▶ 生体の特性についての考察

生体の特性が式 (2.2) の右辺で表現できるので、表現型の発現に依存してこの特性の記述が決定する。しかし、入力のコマンドに対応した出力がこの右辺の記述で表現できる。このために、実際に各時間に生体が反応したときの値以上の多くの値が式 (2.2) の右辺で得ることが考えられる。

▶ 生体の反応についての考察

生体の反応が式 (2.2) の左辺で表現できる。時間に対応している生体システムの出力がその左辺である。一般には、生体の反応は各時間に対応している必要がある。このために式 (2.2) では左辺の記述で反応であることを定める。

▶ 適応についての考察

式 (2.2) の左辺を使った適応の評価ができる場合がある。一般には時間に対応する生体の反応の経過から、生物の諸性質や変化の過程の評価ができることがある。適応については、文献1) で次のようになる。

1. 「生物のもつ形態、生態、行動などの諸性質が、その環境のもとで生活していくのにつごうよくできていること、あるいは生物個体の生存と繁殖の成功に寄与する生物個体の性質。」¹⁾
2. 「生存や繁殖の向上をもたらす進化的な変化の過程。」¹⁾
3. 「自然淘汰によっておこる個体群内の遺伝的变化の過程で、それによって、個体の遺伝的な性質が向上すること。」¹⁾
4. 「選択的な有利性のために個体群内にひろまった特性。」¹⁾

上記の4は個体群に関するものであるので、本報告書では扱わない。次に、適応についての評価を困難であると、著者が考える事柄について述べる。

1)では、「環境のもとで生活していくつごう」¹⁾に依存する点と「生物個体の生存と繁殖の成功」¹⁾に依存する点

2)では、「生存や繁殖の向上」¹⁾に依存する点

3)では、「個体の遺伝的な性質が向上」¹⁾に依存する点

著者は、上述1. ~ 3. のそれぞれを生物学・物理学・数学・工学などの学問から法則を得て評価することが困難であると判断する。

▶ 生物の多様性についての考察

著者は、式 (2.2) の右辺から生物の多様性が説明できることを推測する。関数 f^i_j に基づいて生物の獲得した情報への対応が異なる。

各種に分化した生体システムの式 (2.2) の右辺を記述している関数 f^i_j の類似の程度が一樣でないことを前提として、著者は生物の多様性が説明できることを推測する。

▶ 生物の活動についての考察

式 (2.2) の左辺で生物の活動について説明できる。生体の反応から生物の活動が生じる。一般に、物理学の時間に生物の活動が対応する。生命活動についてのある条件をみだす点の軌跡を式 (2.2) の左辺から得ることができる。これらの点の軌跡で説明できる生物の活動がある。

▶ 遺伝的調節についての考察

著者は、各入力から関数 f^i_j に対応関係を与える写像で遺伝的調節を説明できることを推測する。「遺伝情報は、蛋白質に対応する遺伝子の情報のみならず、情報解読に必要な情報、情報発現の制御に必要な情報など、生物が自己と同じ構造のものを複製するのに必要なすべての情報を含んでいる」¹⁾。著者は、このようなある遺伝情報の発現やその停止などに基づいて表現型が異なる場合を推測する。しかし、現段階では本研究室は遺伝情報の発現が必ず式 (2.2) の右辺に記述できることを保証できない。

3. 生体情報処理

式 (2.2) の数学的モデルを使った生体と環境を制御する技術として、著者が2章で考察した生体を制御する方法を考察する。著者が論点を整理した生体の制御の分類を次に挙げる。

- I. 環境的制御と遺伝的制御
- II. 情報処理に基づく制御

この情報処理は次のように分類した。

- i 遺伝情報の処理に基づく制御
- ii 非遺伝情報の処理に基づく制御

本章で上記の I と II の方法について式 (2.2) を使って考察する。生体システムと環境を系として、式 (2.2) を記述した。生物的環境と非生物的環境に分けて環境を考えた。式 (2.1) の生体の方程式の左辺で各時間に対応する生体の反応を測定あるいは予測する。また、式 (2.1) の生体の方程式の右辺（を演算した結果）と左辺の値が等しいことがその方程式の情報 x_j の組合せに対応する生体の反応となる。

生体の適応や伝達の性質の累積的变化が式 (2.1) の生体の方程式で表現できる。時間との対応から説明できる変化が生体の方程式の左辺で表現できる。生体の方程式の右辺で生体の諸性質や諸特性が表現できる。

2.2 の環境的制御では、式 (2.2) を使うときに環境の方程式群が次の条件を満足している。

- A) 太陽の光エネルギーから光合成をおこなう植物が含まれる生物的環境
- B) Aで、つくられる生物社会
- C) Bからなる環境

環境の方程式でCを満足する環境を記述した式 (2.2) の系から制御に必要な入力を計算することができる。

2.2 の遺伝的制御では、式 (2.1) を使うときに生体の方程式群が次の条件を満足している。

- a) 遺伝子型から表現型の発現が生じる。
- a は、関数 f^i_j で生体の形質を表現することが必要である。

著者は、式 (2.1) の生体の方程式から「Cを

満足する環境からの情報を生体システムに入力するとそのシステムの出力が決定する」ことを推論する。Cの環境からの情報が生体システムに入力されると、その生体システム内で特定の反応が生じる(2.2:第4パラグラフ冒頭参照)。この反応を式 (2.1) の生体の方程式の左辺でそのシステムの出力とみなすことができる。このとき、上記の a を前提としている。この推論では、2.2 の「環境的制御について」と「遺伝的制御について」で著者が指摘したCの前提と a の前提において論じている。

2.2 の情報処理での生体の制御では、遺伝情報と非遺伝情報に基づく制御で生体に対する操作が可能であることを考察した。式 (2.2) の関数の表現に、II の情報処理からの影響を考察することができる。関数 f^i_j が情報処理の特性を表現する。生体システムと環境の関係に基づいてこの情報処理の特性が異なることを以下に分けて説明をおこなう。

生体システムの場合は、生体の表現型の発現に基づいて関数 f^i_j の特性が決定する。この遺伝情報の発現は、ある情報に生体システムの特性を対応させる写像である。表現型の発現を通して、環境との相互関係の影響を生体システムの情報処理の特性が受ける。

環境の場合は、生物的環境と非生物的環境からの生体への入力が存在する。著者は、「ある生物とBを満足する生物社会の各生物を相互関係で結ぶ情報に、その生物社会とその生物の相互関係を説明する入力・出力がある。」ことを推測する。ここで指摘した現象は、式 (2.2) を記述する情報に基づいて表現することになる。式 (2.2) の入力・出力は環境と生体との相互関係を説明している。この相互関係には、酸素や栄養素などで結ばれるものを含む。ここで指摘した現象では、一般に、酸素は光合成の生産から環境に分布する。また、栄養素は生物的環境から生産される場合と非生物的環境から生産される場合がある。

著者は、「式 (2.2) の系で、生体の方程式の関数 f^i_j を記述している非遺伝情報がある。このとき、遺伝情報と環境との共同作用に基づいて決定したこの関数 f^i_j を演算させるための入力にこの非遺伝情報がある。」ことを推測する。生体と環境との相互関係を前提に、遺伝情報と非遺伝情報で式 (2.2) が記述できる。環境との共同作用から表現型の発現が決定する (2.2 参照)。適応・変異・進化などの現象で子の遺伝情報が親と異なる場合を生物学で説明していることは 2 章で考察した。そして、異なる関数 f^i_j に同じ入力をして異なる出力 $y_j(t)$ になることがある。このことは関数 f^i_j の特性が異なるためである。関数 f^i_j で生体の形質を表現している。このことから環境との共同作用から関数 f^i_j が決定することが説明できた。生体への入力に非遺伝情報があることは既知のことである。この式 (2.2) の表現における考察で生体を操作する技術について著者は、生体と環境との相互関係が研究課題であることを提案する。

4. あとがき

本報告書では、人工的に生体を操作できる 2 つの方法を提案した。本文では、次のように分類してきた (2.2, 3.参照)。

- I. 環境的制御と遺伝的制御
- II. 情報処理に基づく制御

物質とエネルギーを操作することで生体を操作する方法では、I の制御の方法がある。情報の処理を制御することで生体を操作する方法では、II の制御の方法がある。

3 章では、著者は式 (2.1) の生体の方程式と式 (2.2) で I と II を考察した。式 (2.2) の生体情報処理からの著者の考察で、生体と環境との相互関係を課題として提案した。

現在では、式 (2.2) に対応する具体的な数学的記述の解析が課題である。著者は、生体情報処理のモデルから生じる誤差値の研究がこの課題にはある、ことを考える。今後、生体の制御や弱い人工生命などにおける式 (2.2) を使った

研究が本研究室の予定である。また、本研究室では、次の 4 つに分類した細胞を制御する方法を提案した³⁾。これらの提案：

- i 「体液を媒介する方法」
- ii 「神経による方法」
- iii 「細胞の細胞質間での直接の交流ができる方法」
- iv 「分子による方法」

である。これらの方法では、環境と遺伝のそれぞれから生体を操作できる。特に iv の提案での「イオン分子分布の制御」では次の数学的モデルの提案をしている。物質に対する細胞膜の選択透過性の機能をする孔の摩擦抵抗を制御する方法⁴⁾で、イオン分子の移動が制御できる細胞膜の回路モデルである。これらの制御の方法に本報告書で提案した方法を応用する研究を今後の予定とする。

参考文献

- 1) 杉龍一, 小関治男, 古谷雅樹, 日高敏隆編集: 『岩波生物学事典第 4 版 CD-ROM 版』, (岩波書店, 1998)
- 2) 富岡和人, “神経系を制御する技術に関する研究”, 信学技報, MBE2000-75, Oct.2000
- 3) 富岡和人, “細胞を制御する技術についての簡単な考察”, 信学技報, MBE2001-65, Jy.2001
- 4) 富岡和人, “細胞膜の回路モデル”, 信学技報, MBE2001-64, Jy.2001
- 5) 新村出編: 『広辞苑第 5 版 CD-ROM 版』, (岩波書店, 1998)

付録

ロボット【robot】については、文献 5) に次のように掲載している。

「(チェコの作家チャベックの造語)」⁵⁾

1. 「複雑精巧な装置による人工の自動人形。人造人間。」⁵⁾
2. 「一般に、目的とする操作・作業を自動的に行うことのできる機械または装置。」⁵⁾

上記のどの定義をとるかの判断は、読者が文中にておこなわれたい。

サイボーグ【cyborg】については、文献5)に次のように掲載している。

「(cybernetic organism から) 異常な環境への順応などのため、動物、特に人間の生体機能の重要な部分を電子機器などに代行させたもの。」⁵⁾

刺激については、文献5)に次のように掲載している。

「(stimulus) 生物体に作用してその状態を変化(興奮)させ、何らかの反応をひき起すこと。また、そのもの。」⁵⁾

反応については、文献5)に次のように掲載している。

1. 「あるはたらきかけに応じて起る結果的な現象、状況。」⁵⁾
2. 「化学反応のこと。」⁵⁾
3. 「生体あるいは生態系などにおいて、刺激に基づいて起る運動を、その刺激に対していう語。応答、応働。」⁵⁾

上記のどの定義をとるかの判断は、読者が文中にておこなわれたい。

注

- 1) 著者は、一般には本報告書での「刺激」の定義としても、考察を理解するために問題はないと考える。しかし、考察では、2.1の考察の結論としている(付録参照：刺激)。