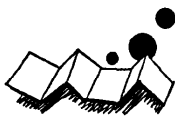


## 解説



### 1. 生体における情報の流れと制御†

#### —バイオサイバネティクスの課題—

鈴木 良次††

#### 1. はじめに

1947年夏、アメリカ、マサチューセッツ工科大学のノバート・ウイナー教授は、通信と制御の総合理論としてのサイバネティクスを世に問うた<sup>1)</sup>。彼は、機械・動物・社会システムの合目的な制御での情報とそのフィード・バックの役割を指摘し、物理学を中心としたそれまでの学問がとりあげていなかった情報やシステム概念を科学の対象とした。ウイナーの拓いたこの道は、今日、情報科学やシステム科学として展開し、20世紀後半の学問を特徴づけている<sup>2)</sup>。

バイオサイバネティクスは、その一分野であり、動物や人間を対象に、そこでの情報の性質や制御の仕組みをさぐり、医学への応用と工学へのフィードバックをめざすものである。

本稿では、生体における情報の流れと制御の仕組みを概観し、ウイナーが提起したバイオサイバネティクスの課題、すなわち、(i)脳波のひき込み現象などにみられる生体の非線形性、(ii)学習・自己増殖など生体の自己組織の機能、(iii)人間と機械の整合、(iv)ホメオスタシスや補綴など医学サイバネティクスなどの問題の今日的意義を考えてみたい。

#### 2. 情報の受容から行動まで

バクテリアを温度勾配のある水槽に入れると、自分が培養されていた温度付近に集まることが知られている。これはバクテリアに温度センサがあって、適温から遠ざかるときは盛んに方向転換し、逆に、適温に向かうときは方向転換を抑制するメカニズムがあるからとされている。

バクテリアは図-1のごとく、べん毛をもった単細

胞生物である。細胞膜に温度を感知するための専門のたん白質分子があって、温度に依存して構造変化を行う。この変化が次のたん白質に伝えられ、最後にはべん毛の回転を切替えるに至る。情報の受容・変換・行動の発現が、それぞれ専門のたん白質分子に担われているわけである。たん白質分子一つひとつが、ある機能をもつという意味で、大沢<sup>3)</sup>はこれを分子機械と呼んでいる。

さて、バクテリアのような単細胞生物では、情報の受容から行動の発現までのメカニズムが、一つの細胞の中に仕込まれているが、多細胞生物では、それぞれの働きを受けもつ特殊化した細胞がある。入力に相当する受容器(視細胞、有毛細胞(耳)、嗅細胞、味細胞、皮フの受容器など)、情報を中枢へ伝える感覚神経細胞、情報を処理する中枢神経細胞(脳)、出力を伝える運動神経細胞、行動を発現する効果器(筋肉、分泌腺)に分類される(図-2)。

受容器は、外からあたえられる光・音・熱・化学物質などの刺激を電気信号に変換する。これを受容器電位と呼ぶ。受容器に限らず、細胞は、細胞膜で包まれていて、その内外はナトリウム、カリウム、塩素などのイオンを含む電解質溶液でみたまわっている。ところで、細胞膜には、イオンを選択的に通すくみがある。通常は、膜の内と外とでイオン濃度に差のある状態で平衡がたもたれている。したがって、膜をはさんで電位差が生じている。このイオン透過性が外からの刺激によって変わり、イオン分布に変化が生ずると、結果として電位が変化する。これが受容器電位である。

たとえば、視細胞に光があたると、視物質と呼ばれているものに光化学反応が生じてカルシウムイオンをとり込みやすくなり、それが原因となって、ナトリウムの透過性が減少し、視細胞に負の電位変化が生じるといわれている。同様に、嗅細胞では、におい物質が吸着されるとナトリウムや塩素イオンの透過性が変化

† Information Flow and Control in the Living Organism—Problems of Bio-Cybernetics—by Ryoji SUZUKI (Dept. of Biophysical Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University).

†† 大阪大学基礎工学部生物工学科

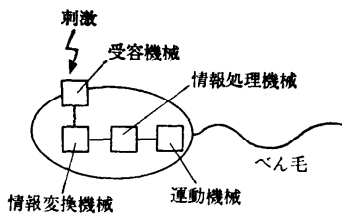


図-1 バクテリアと分子機械による情報処理

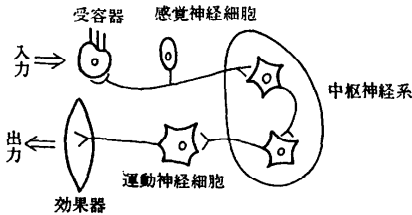


図-2 多細胞生物の情報処理システム

することによって、また、味細胞では、先端にあるミクロビリと呼ばれる味受容膜に味物質が吸着するとイオン透過性が変化し、それぞれ受容器電位が生じるといわれている。

このようにみえてくると、受容器のしくみには、膜のイオン透過性の変化のからくりが重要な要素となっていることが推察できる。

細胞膜のイオン透過性が変化する現象としてこれまで最もよく研究されてきたのが、神経線維である。

神経線維は、外側が高濃度のナトリウムイオン、内側が高濃度のカリウムイオンで満たされていて、通常では、内側が外側に対し、60 mV 負の電位になっている。これを分極しているという。この状態で外から電流が流されると、イオンの透過性が一時的に変化し、内側の電位は外に対し、+50 mV に上昇し（脱分極という）、数ミリ秒でもとの状態にもどる。これが神経インパルスと呼ばれているものである。

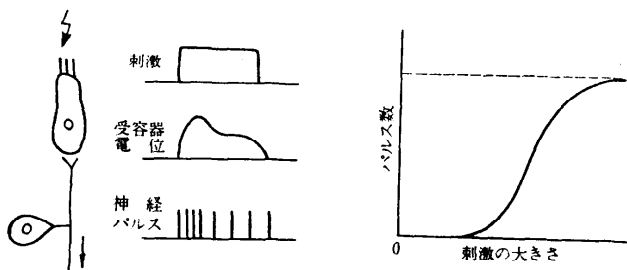


図-3 受容器・感覚神経細胞における信号のパルス密度変調

ホジキンとハクスレイ<sup>4)</sup>は、この過程のダイナミクスを表わす数式モデル (H-H 方程式) をたてた。このモデルのポイントは、膜には、ナトリウムイオン、カリウムイオンをそれぞれ選択的に通す孔 (チャネル) のあること、いずれのチャネルも 0, 1 的に開閉するゲートをもっているとしたことである。Na チャネルには、電位の上昇ともなって、開いている確率が増える  $m$  形ゲートが三つと、逆に確率が減る  $h$  形ゲートが一つ直列に配置されているとする。一方、K チャネルには、電位が上昇すると、開く確率の増加する  $n$  形ゲートが四つ直列に並んでいるとした。

H-H 方程式は、FitzHugh<sup>5)</sup>、南雲ら<sup>6)</sup>により数理的に詳しく研究され、バイオサイバネティクスの先駆的な研究分野の一つとなった。一方、チャネルが 0, 1 的に動作するゲートでできているという考えを支持する実験結果が、人工膜や筋細胞膜などを用いて得られている。つまり、数個のチャネルしかもたない人工膜をつくるか、数個のチャネルだけを含むように測定領域を制限して、膜をよぎって流れる電流をとり出すと、デジタル的にゆらぐのが観測できるのである。このような実験を通して、シングルチャネルの概念が確立し、その実体に迫る研究が進められている<sup>7)</sup>。

さて、話を元に戻そう。外からの情報は、まず、受容器電位として受けとられるのであるが、感覚神経系を通して脳に伝えられるときは、神経インパルスの密度に変換される。刺激の大きさと受容器電位の大きさとの間には、いわゆる S 字特性があるとされている。これは、刺激  $S$  と心理的感覚量  $R$  の間で知られているウェーバー・フェヒナーの法則  $R = K \log S$ 、または、スティーブンスの法則  $R = KS^n$  ( $n$  は感覚ごとに異なる) に対応する。一方、受容器電位と神経インパルス密度は比例するので、刺激の大きさは、線形動作領域の範囲では、パルス密度変調されているとみなすことができる (図-3)。

神経線維を伝わって中枢に向かったインパルスは、次の神経細胞との接合部 (シナプスと呼ぶ) で、ゆるやかな変化のシナプス電位に変わる。一つの細胞には何百何千というシナプスが形成されていて、神経インパルスがやってくるごとにシナプス電位が生じている。これらのシナプス電位は重ね合わされて、細胞体の電位を変化させ、もし、ある値 (閾値という) に達すると細胞体の起始部 (神経線維のつけ根) でイン

パルスが生じて、神経線維へと送り出される。

もし、シナプス電位が階段状で、たとえば、10個のインパルスによるシナプス電位の和が閾値をこえ、その結果次に1個のインパルスを送り出し、細胞電位はリセットされるとすれば、神経細胞は10:1の分周器とみなすことができる。しかし、シナプス電位はゆるやかに立ち上がって減衰する波形で、シナプスの位置による影響や不応期での閾値の上昇などを考えると重ね合わせは非線形なため、シナプスでのパルス列の変換は、これほど単純ではない(図-4)。

シナプス機構によるパルス列の変換の過程については、Perkelら<sup>9)</sup>の研究があり、点過程としての統計的解析も行われているが、神経系における情報の符号をその意味を含めて議論するためには、感覚情報や運動機能と結びつける必要があり、これからの課題でもある。

さて、中枢に送られた情報が処理された結果、何らかの行動をとる必要があるとなると、その司令は、運動神経細胞へのインパルス列として送られ、ここで同じくシナプスを介する変換をうけて、効果器へと伝えられる。この過程については、章を改めて述べることにする。

### 3. パターン認識と自己組織の機能

情報処理機械としての生物の特徴の一つはパターン認識の能力にある。もちろん現在、文字・図形・音声などのパターンを理解する機械の研究も進み、一部では実用化されているが、生物のパターン認識の能力には、はるかに及ばない。しかも、生物における特徴は、これらの能力が学習によって自己組織されることである。

ウイナーも、学習する能力、自己組織する能力は、生物が自分自身を環境に適応していく手段として重要なものであり、これが生物を特徴づけるものとらえている。そして、人工の機械にも、これらの能力をもたせることができるだろうかと問いかけている。

ウイナー自身のこれに対する答は「イエス」で、彼なりに学習機械についての考えを述べているが、ウイナー以後、学習機械やその理論の研究も急速に進み、パターン認識や学習制御系の設計に関係して工学上重

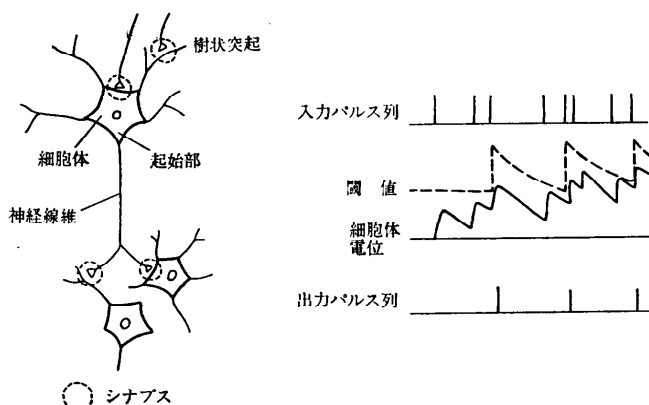


図-4 シナプス機構による神経パルス列の変換

要なテーマとなった。

一方、微小電極法を駆使した神経生理学は、感覚神経系、特に視覚での情報処理の過程をかなり明らかにした(外山氏による別稿参照)。そして、これらの知識にもとづく脳のモデルの研究が進んだのである。

その皮切りは、ローゼンブラットのパーセプトロン<sup>9)</sup>であるが、これらの機械は、神経細胞に相当する素子間の結合係数を、入力と出力に応じて合目的に変化させる自己組織機械である。たとえば、パーセプトロンは、文字などのパターンを見分ける能力を学習する機械であるが、機械が誤った答を出したとき、ある規則に従って素子間の結合係数が自動的に修正される。この手順をくり返すと、パーセプトロンは、やがて文字を正しく見分けられるようになるというものである。

もちろんパーセプトロンには限界があり、その後、多くの研究が行われ、モデルの構造や修正規則についての新しい提案がなされてきた。その最も新しいものの一つは、福島<sup>10)</sup>によるネオコグニトロンである。

経験・学習によって高次の機能をもった神経回路が形成されるわけであるが、これを脳の可塑性と呼んでいる。この可塑性が、神経細胞と神経細胞をつなぐシナプスの伝達効率の変化にもとづくという考えは、上述のモデルでも使われているが、Hebb<sup>11)</sup>の仮説として知られている。図-5のようにシナプスで結ばれた二つの神経細胞の状態を  $x_i, x_j$ 、伝達効率を  $w_{ij}$  としたとき、その変化は

$$\Delta w_{ij} = \alpha x_i x_j - \beta w_{ij}$$

であたえられるとする。すなわち、二つの神経細胞がともに興奮 ( $x_i = x_j = 1$ ) したとき、結合係数は  $\alpha$  だ



図-5 シナプス伝達効率  $w_{ij}$  の変化についての Hebb の仮説

け増し、一方で  $\beta$  の割合で減衰すると考える。

では、実際の脳にこのような可塑性があるのであるうか。塚原・伊藤両氏による別稿にみられるように、シナプスの伝達効率の変化、あるいは、パーセプトロン様の神経回路の存在が示されつつあるのは、バイオサイバネティクスのモデルが、神経生理学の作業仮説を提供したという意味で興味深い。

さて、脳のように複雑で大規模なシステムに対しては、一つひとつの神経細胞の挙動を問題とするのではなく、統計的なアプローチが基本であるというのはウイナーの見解であるが、甘利<sup>12)</sup>は、この立場から統計神経力学の体系化を行い、パターン認識や学習および自己組織の機能の説明を行っている（同氏による別稿参照）。このようなアプローチは、認識や学習の数学的構造を見通しよくしてくれる。もし、認知科学的アプローチと結びついて、脳内での情報の表現の問題が検討されるならば、認識という過程の理解が一層進むものと期待できる。

#### 4. 運動と神経回路

運動の機能は、生物が環境に適応していくための基本的な能力の一つである。

すでに述べたように、単細胞生物のバクテリアはべん毛という特殊化した構造の分子機械をもっている。これに対し、多細胞生物では、筋肉が運動を担当する。みみずには、体軸に沿って走る縦走筋と、体の周囲をとりかこむ環状筋の二種類の筋肉があり、前者が収縮すると体は縮み、後者が収縮すると体が伸びる。この伸縮をくり返すことによって、みみずは移動することができる。イカは外套筋を一気に収縮させジェット水流をつくり出し、その反作用で泳ぐことができる。魚の遊泳、鳥の飛しょう、ネコの四足歩行など、生物には種に適した移動の方法がそれぞれあるが、いずれも、体に分布した筋肉の協調動作によって実現している（図-6）。どの筋肉をいつどのように収縮させるかで、運動のモードがきまるわけであるが、これを制御するのは、直接には運動神経系であり、その背後には脳が存在する。

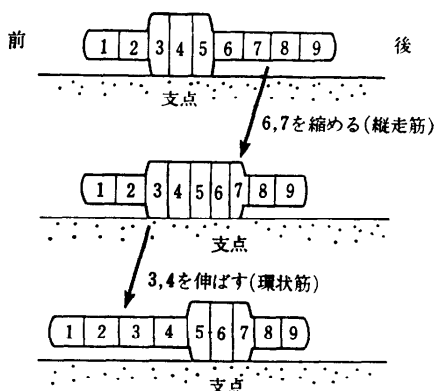


図-6 伸縮のくり返しによる移動（みみず）

筋肉の使い方、これを運動プログラムと呼んでいる。運動プログラムには生れつきそなわっているもの（生得的あるいは遺伝的プログラム）と、生後学習によってつくりあげなければならないものがある。下等動物の多くは生れつきそなわっている運動プログラムによっているが、人間をはじめ高等動物の動作には生後学習しなければならないものが多い。

次の問題は、これらのプログラムがどこにどのように書き込まれているかである。

生得的なものであれ、学習によるものであれ、神経回路の構造として書き込まれているというのが、一般的な見方である。

たとえば、ヒルは図-7(イ)のごとく体にうねりをつくって泳ぐが、この動きは(ロ)に示す体節ごとにある節神経節が、節ごとに位相をずらしながら周期的に活動し、支配下の筋肉を収縮させる結果、生れるものである。この周期的な活動が、同図(ハ)のような神経回路でつくり出されることが Stent ら<sup>13)</sup>によって明らかにされている。

ヒルの遊泳に限らず、生得的な運動プログラムの中には、単純なリズム運動を組合せたものが多い。たとえば、昆虫の鳴く動作、ザリガニの遊泳、ネコの四足歩行など、いずれも、周期的に活動する複数個の神経細胞ないし神経回路によって制御されていることがわかってきた。

これは、工学の言葉でいえば、多数のオッシレータがあって、相互作用によって、周波数や位相の調整を行い、全体として統合された一つの動きをする系とみなすことができる。そこで、これを分散形神経オッシレータ系と呼ぶことにする。次の課題は、この系の制

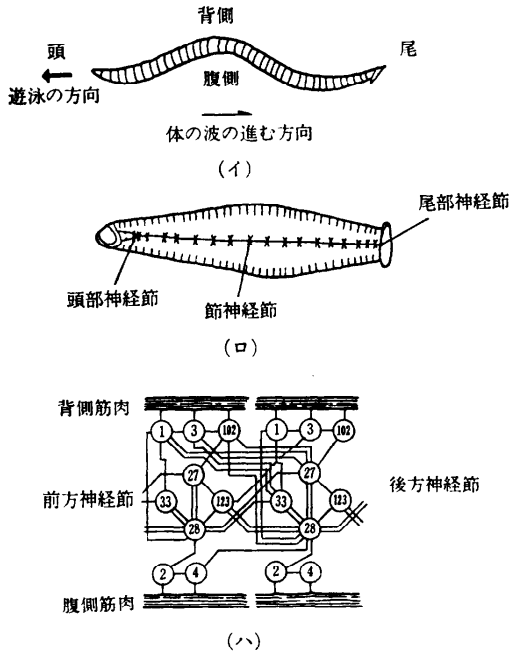


図-7 ヒルの遊泳と神経回路

御の問題である。分散形神経オシレータ系として書き込まれた行動のプログラムを動かしたり止めたりする中枢(脳)からの司令の性質を解析していくことである<sup>14)</sup>。

さて、一方の学習によって得られる運動プログラムも、神経回路の構造として書き込まれるらしいことはすでに述べたが、リズムカルな運動のように話は単純ではない。たとえば、文字を書く動作一つ考えても、関係する多くの筋肉をいつどのように使うかというプログラムが必要で、複雑な時空間信号系列を神経回路によって表現することを考えないといけない。しかも、このような回路を、感覚からのフィードバック信号を使いながら自己組織していくわけである。このテーマは、今後の最も重要な課題の一つといえよう。

なお、運動プログラムの学習については、学習できる範囲が生れつき制限されている(生得的学習機構)ことや、学習可能な時期がきまっている(学習の臨界期)ことが知られている<sup>15)</sup>。また、運動プログラムの学習には小脳が関係していて、感覚によるフィードバック制御から、学習によって小脳に形成される内部モデルを用いたフィードフォワード制御へと変わるといふ伊藤<sup>16)</sup>のモデルは興味深い。

## 5. 生体リズムと非線形振動子

安静時に人の脳波に顕著にあらわれる10ヘルツ付近の周波数の波は $\alpha$ 波と呼ばれているが、周波数スペクトルをよく調べると、その前後で急激な減衰のみられることがある。ウィナーは、脳の中には、ほぼ10ヘルツ程度の周波数の非線形発振器があって、相互作用によって周波数がひき込み合った結果が $\alpha$ 波となってあらわれるものと理解すれば、その前後の周波数での落ち込みは説明できると言っている。

$\alpha$ 波の起源はなお決着のついていない問題であるが、神経細胞が非線形発振器のモデルでよくあらわせること、周波数のひき込み現象が非線形発振器特有のものであることから、ウィナーの推論は的はずれのものとはいえない。実際、 $\alpha$ 波が10ヘルツ付近の光誘発脳波にひき込まれる現象が見出されている。しかも、ひき込み領域にはヒステリシスが両側にあって、このような現象はDuffing-van der Pol方程式という特定の非線形振動子にみられることをわれわれは示している<sup>17)</sup>。このように、巨視的なモデルとして $\alpha$ 波を送り出す非線形発振器の存在を脳内に仮定することは自然なことといえる。

ところで、非線形発振器の理論は、脳波の発生モデルとしてだけでなく、心臓の拍動、呼吸、歩行など比較的是やいリズムから、睡眠のような一日のリズム、月や季節、年を周期とするリズムなど、生物のさまざまなリズムの解析に役立っている。

たとえば、サーカディアン・リズムの分割現象の解析がある。

サーカディアン・リズムは、通常的环境下では、太陽の光に同期して24時間の周期を示しているが、恒明あるいは恒暗状態にすると、生物時計固有のリズムを示すようになる。これを自由継続リズムという。

この自由継続リズムが二つの要素に分離する現象をリズム分割という。たとえば、げっ歯類のTupaiaの活動リズムは、恒明状態で明るさを1ルクス以下にさげると2つに分割される。再び明るさをあげると1つになるが、この変化にはヒステリシスがみられる。

この現象は、このリズムには二つの振動子が関与していて、光強度に応じて、それらの振動が同期したり、180°位相反転したりするものと解釈できる。川人ら<sup>18)</sup>は線形結合した二つの神経オシレータ系を仮定し、分岐理論を用いて解析した。その結果、位相同期

解, 位相反転解の安定性が, 一つのパラメータによって変化することが示され, このリズムには少なくとも, 二つの体内時計が関係しているという生物学者の考えを支持することができた。

また, ヒトのサーカディアン・リズムは, 睡眠を制御する体内時計, 体温を制御する体内時計, 化学物質の尿中濃度を制御する体内時計など複数の時計があって, その間の位相関係が体調に影響するといわれている。この位相調整の方策をさぐることは, 理論的にも興味ある課題であるが, 臨床的にも価値あるものといえる。医学サイバネティクスの今日的課題の一つである。

## 6. あとがき

生体における情報の流れを概観し, ウィナーが提起したバイオサイバネティクスの課題のいくつかについて述べた。より詳しい分析は, このあとの論文で述べられるであろう。ここでは, 脳とコンピュータの対比を通して, ウィナーが晩年特に心をくだいていた人間と機械の整合の問題をとりあげ, あとがきとする。

ウィナーは彼の著書『人間の人間の使い方』『科学と神』でも述べているように, 機械の発達が人間に及ぼす影響を懸念し, 人間と機械とでの仕事の分担に知恵をはたらかせるべきことを説いている。20年以上も前にウィナーによって出された問題は, なお, 今日的課題であり, 一層深刻なものとなっているように思える。

さて, 人間は, 二つの情報伝達系によって育てられる<sup>19)</sup>。一つは遺伝子で, 一生に一度, 親から子へと伝えられる。他の一つは, 本稿でとりあげた感覚器から脳に至る系である。この系を通して私たちは文化情報をうけとる。コンピュータは, この系に脳の外延化されたものとして入り込んできた。しかし, コンピュータは, あくまでも脳の機能の一部を写しとったに過ぎない。このことは, コンピュータあるいは脳の研究にたずさわっている人たちの共通した認識であろう。現在のコンピュータは「思考」と「記憶」を分けているところに一つの特色がある。脳ではこの分離は, それほどはっきりしていない。現状では, パターン認識, 情報検索の能力の差は歴然としているが, 第五世代コンピュータは, この差を大幅に縮めてくれようとしている。しかし, 開発にたずさわっている研究者は, 謙虚であり, 脳にとってかわるものづくり得るとはしていない<sup>20)</sup>。第五世代コンピュータでは, 現在使わ

れている手順型言語から推論規則を記述する論理プログラミングへと変わるのであるから, 確かにプログラムは高級になる。しかし, 論理機械としての性格は変わらず, 論理操作の手順として記述された仕事しか処理できないわけである。

ところが, 脳に貯えられた情報には, 言葉で表現できるものとできないものがある。たとえば, 体で覚えた技能の言語化はむずかしい。戸田は, 人間の情報を, 資料的情報と, その使い方に関する深層の情報処理構造=作用スキーマの二つに分け, 前者を言語化する情報, 後者は非言語的情報だと説明している。作用スキーマには, 技能の他に, 直観力, 創造力などがあり, これらが, 原理的に「論理機械」であるコンピュータにはのらないことになる。

人間を育てる文化情報の伝達系の中にコンピュータという形で, 脳の機能の一部だけが肥大化されて介在した時に, 人間の成長にどんな影響があらわれてくるか。このことを考えたとき, コンピュータにのらない情報の伝達チャンネルを, コンピュータネットワークとバランスのとれた形で用意する必要がある。もちろん, 作用スキーマの意味するものの掘り下げた議論がなお必要であり, 技能の習得が実は, 運動プログラムの学習と重なり合うことを付言しておく<sup>21)</sup>。

## 参 考 文 献

- 1) ノバート・ウィナー: サイバネティクス—動物と機械における制御と通信 (第2版), 池原他訳, 岩波書店 (1962).
- 2) 北川敏男 (編): 情報科学への道, 情報科学講座 A. 1. 1, 共立出版 (1966).
- 3) 大沢文夫: 生物の運動・行動, 日本物理学会誌, Vol. 35, No. 11, pp. 895-904 (1980).
- 4) Hodgkins, A. L. and Huxley, A. F.: J. Physiol. London, Vol. 117, pp. 500-544 (Aug. 1952).
- 5) FitzHugh, R.: Biophys. J., Vol. 1, pp. 445-466 (July 1961).
- 6) Nagumo, J. et al.: Proc. IRE, Vol. 50, No. 10, pp. 2061-2067 (1962).
- 4), 5), 6)の解説は, 南雲仁一 (編): バイオニクス, 情報科学講座 B. 9. 1, 共立出版 (1966) を見よ。
- 7) 曾我部正博: 神経興奮とシングルチャンネル, 数理科学, Vol. 21, No. 4, pp. 53-62 (1983).
- 8) Perkel, D. H. et al.: Biophys. J., Vol. 7, No. 4, pp. 391-440 (July 1967).
- 9) Block, H. D.: Rev. Mod. Phys., Vol. 34, No. 1, pp. 123-135 (1962).
- 【10】 福島邦彦: 神経回路と自己組織, 情報科学講座

- E. 18. 1, 共立出版 (1979).
- 11) Hebb: *The Organization of Behavior*, Wiley (1949). 解説は 10) を見よ.
  - 12) 甘利俊一: 神経回路網の数理一脳の情報処理様式一, 産業図書 (1979).
  - 13) Stent, G. S. et al.: *Science*, Vol. 200, No. 23, pp. 1348-1357 (1978).
  - 14) 久保田, 堀田編: 行動のリズムと学習, 産業図書 (1983).
  - 15) 大沢, 鈴木編: 個性の生物学, 講談社ブルーバックス (1978).
  - 16) 真島, 猪飼編: 生体の運動機構とその制御, 杏林書院 (1972).
  - 17) 中沢他: 日本 ME 学会雑誌掲載予定, および森すみ子: 大阪大学基礎工学部卒業研究 (1984).
  - 18) Kawato, M. and Suzuki, R.: *J. theor. Biol.*, Vol. 86, No. 3, pp. 547-575 (1980).
  - 19) 鈴木, 首我部: 遺伝子と文化の相互進化, 現代文化のポテンシャル, ヒューマンサイエンス 5, 中山書店 (1984).
  - 20) 広瀬, 潤: 第五世代コンピュータの文化, 海鳴社 (1984).
  - 21) 鈴木良次: 情報処理における人間的特質は何か, 経済評論, Vol. 33, No. 5, pp. 80-88 (1984).

(昭和 59 年 11 月 14 日受付)