

バイオニックスの数理と経済学

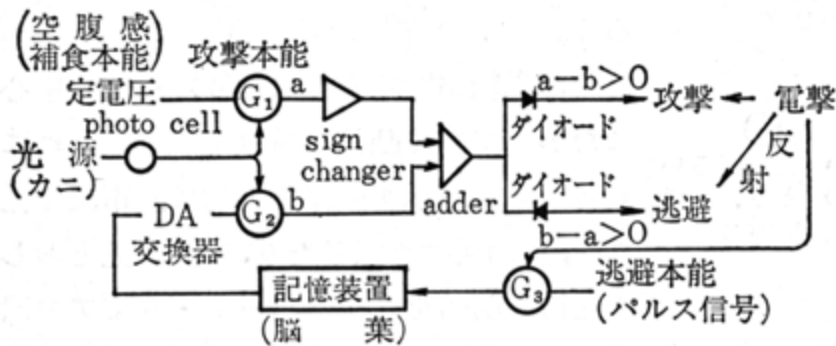
杉 田 元 宜

バイオニックスは生体工学の1部として、ME や宇宙学の影響の下に急速にのびてきた分野である¹⁾が、その数理やモデルには経済学に役立つと信じられるものが少ない²⁾。生体をまねる工学系のあるものは、アメリカにおける軍事的な要望によるものと推測されるが、非数値情報の取扱やパターン認識、経済学における思考過程の反省などで参考になるだろうと思われるものを2,3述べて見ることにする。

1. タコと学習

Youngの本³⁾には、タコがカニを襲うとき近よると電撃をあててみる実験が出ている。これを視覚にうったえ、またモデル実験をするために図1のようなものを考えて見た。カニを見た視覚で G_1 と G_2 のゲートが開き、 G_1 により補食本能と攻撃本能(簡単のため両者一まとめに考える)の信号が出てくる。その強さは空腹だと増巾される。他方 G_2 が開くと逃避本能が記憶をとって出

第1図 学習モデル



タコの行動は $a-b$, $b-a$ で動くXY記録計で示し、電撃が加わると反射的に一時逃避すると共に、 G_3 のゲートが開き、逃避の信号を脳葉に集積させる。

てくる。これらの信号は生理学的にはパルスの密度で強さがきまるが、私の研究室では便宜上電圧の高さで a (攻撃)と b (逃避)をあらわし、アナログ計算機の加算機に入れ、かつダイオードで整流して $a > b$ なら攻撃の行

動、 $a < b$ なら逃避になるようにして、XY記録計で x 軸上の運動を攻撃と逃避に対応させて見ている。即ち x 軸上右に動くのを攻撃とし、ある所まで動くと電撃で反射的に逃避するようにし、それと共に G_3 を開いて逃避本能を呼び出し、その信号を記憶に入れて集積させる。すると数回の電撃が“学習”となり、 b の信号は強くなり、しまいには“カニを見ると逃避する”ようになる。動物実験では、記憶装置にあたる脳葉を手術で取除いたタコでは、こういう学習は見られなくなるという。

人間の経済行為でも、買いたい、さしひかえよう等々の相拮抗する信号が神経回路で動いていることは、タコするときと同じであろう。また記憶を通じて学習が行なわれることも、タコよりは複雑でも、どちらも動物だから違いはないであろう。本能は固定記憶(生まれつき持っているプログラム)ともいわれ、何らかの神経回路ができていて、それが外からの刺激で開発されるのだが、大事なことは“相拮抗するものが行動をたずなでさばくように制御している”ということである。人間では後天的な記憶が複雑化しているが、それらも開発されて $a-b$ のような制御信号となり、それにより行動がおり、その結果が記憶にフィード・バックされて、プログラムされる点ではタコを複雑にしたような所がある。

現代人というのは、こうした現代社会の経済生活で学習し類型化された存在で、ドル不安があれば換金に殺到するなどの習性を持っている。1人1人の意識は何であれ、そういう習性は機にふれて出てくるし、個人としてはそれに反撥しても大勢にはひびかず、大衆としてのマクロな行動は結局は平均人化されたものが大きく支配するのであろう。

2. カエルの視覚

人間をタコなみに考えてきたが、動物の視覚は人間のものとは違って、ずっと単純化された情報処理を行っているようで、人間では概念化が伴うので、場合によっては様子が違って来る。しかし人間の場合でも大企業とかお役所となると、入力データのあるものはすてられ、ごく限られた情報にのみ形式的に反応していて、常識人から見ると下等な動物に近いとさえいる情報処理を行って

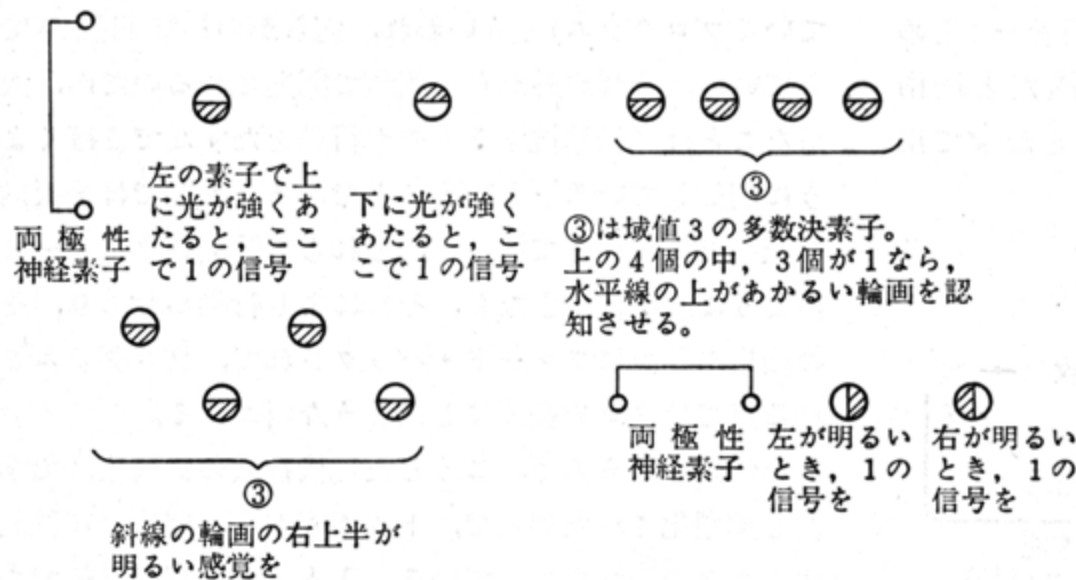
1) Digest of the 7th Intern. Conf. on Med. and Biol. Engin.(1967).

2) 明治大学の工学研究科で博士課程の講義に、バイオニックスをとりあげ、はじめてその意義を私自身確認し、講義中経済学との関係に気づいたのである。

3) J. Z. Yong, Doubt and Certainty in Science (1951), 岡本彰祐訳, 人間はどこまで機械か(白揚社)。

いる。イトヨの雄は繁殖期には腹部に婚姻色といって赤色をあらわすが、この色を示すと形は仲間と似もつかないモデルに雄が攻撃をかけてくるという⁴⁾。昔ある工学部の学生が MARX という人名のある専門書を持っていたため特高につかまった話がある。特高とサカナでは生物学的には大差があるが、知能的には近い所がある。またニワトリは鳥としても知能の高い方ではないが、ヒヨコの脚をしばりガラス器の中に入れて悲鳴が聞こえないようにすると、オヤドリは見ているが平気であるが、姿は見えずとも悲鳴だけは耳に入るようにすると、大騒ぎをするそうである⁵⁾。この点ではメンドリといっても官僚なみの知能は持っているのかも知れない。つまり全体の状況を概念化してとらえる常識人から見ると、情報の1部のみに応ずるお役所方式はおかしく見えるのである。またチヨウの場合雌のモデルを示しても、それだけでは雄はよりつかないが、ひらひらさせるとよってくるという。風俗罪とも関係がありそうだが、物価の変動でも、品不足でも、“変化に対して敏感”なのは動物共通のことらしい。

第2図



カエルでは視界に入ったものの 1) 輪画, 2) 視野の中心にむかって動く凸体, 3) コントラストの変化, 4) 暗くなるといった4種の情報に反応し⁶⁾, これにより身を守ったり, 捕食したりしているわけである。この場合もごく限られた情報しか利用していないことになる。これをモデル化⁷⁾しようとする努力には軍事的な背景が感じられるが, 第2図はそのモデルの1部である。なお動態(相手の運動)を知覚するためには, 回路に delay を使

っている。

視覚を生ずるとかパターン認識とかいうとき, 情報工学でいうと“何らかの回路ができていなければならない”ことになる。経済現象は直接の視覚では知覚されないが, 整理されてグラフや表となり, 経済学者や財界人の情報回路に入り, 何らかのレスポンスをもたらす。これらの人々はカエルとは違うので, 複雑な記憶や抽象化された概念をつかい, またハード・ウェア的な生まれつきの回路によるだけでなく⁸⁾, 意識的にソフト・ウェアをつくり, それで処理しているのであろう。つまりハード・ウェアによる複雑な回路の代わりに, AND とか OR や NOT などの簡単な回路と記憶とをつかうと, 適当なプログラムでハード・ウェアによるのと同様な情報処理を行うことができる。人間は電子計算機を使わなくても自分の生まれつきの神経回路と記憶をつかって, ある種のソフト・ウェアを心の中に開発して, 複雑な情報回路に対応したはたらきをさせていて, これが“推論”である。つまり動物は生まれつきのハード・ウェアで情報処理をしているが, 人間は意識的に努力してソフト・ウェアをつくり, もっと複雑なことをしている

わけである。それをもしハード・ウェア化したらカエルとは比較にならない複雑なものになるはずが, しかし同じく脊椎動物のことだから同類のカエルの場合を考えるのも, 経済学者として示唆にとんでいるであろう。

故に動物が明暗を感じたり, 視野の中心にむかって動く凸体や輪画を感じ, それにレスポンスを示す回路を参考に, 市況を見たり, 物価変動を感じたり, 経済の見とおしや先行の明暗を感じずるハード・ウェアの回路を工夫したり, また自身の心の中のソフト・ウェアを反省して見るといったことも, 学問をする上に意味のあることである。医学でも自動診断が要望されているが, それは名医の坎を機械でおきかえることを目標としている。つまり名医が心の中でソフトウェアで行っていることを, 外部のハード・ウェアの等価系でやろうとしていることにあたる。これができたら, また心の中のソフト・ウェア

を工夫したり, また自身の心の中のソフト・ウェアを反省して見るといったことも, 学問をする上に意味のあることである。医学でも自動診断が要望されているが, それは名医の坎を機械でおきかえることを目標としている。つまり名医が心の中でソフトウェアで行っていることを, 外部のハード・ウェアの等価系でやろうとしていることにあたる。これができたら, また心の中のソフト・ウェア

4) N. Tinbergen, 永野為武訳, 本能の研究(1959, 三共出版)。

5) 小野嘉明, 動物心理学, 現代生物学講座 4, 生物の反応性 p. 264(1957, 共立出版)。

6) M. B. Herscher, IEEE(1963), Mil-7, p. 98.

7) J. Y. Letvin and H. R. Maturana, Proc. IRE, 47, 1940(1959)。

8) 計算機用語では機械の金属部をさすが, 神経回路にも拡張した。ソフト・ウェアは使方即ちプログラムなどであるが, 人間の記憶や論理などもそれになぞらえた。

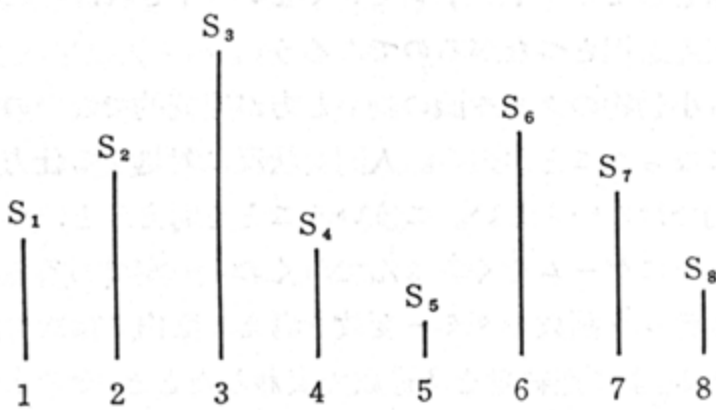
アを改良する機縁ともなる。経済学でもそういうことができないわけではなからう。

電子計算機は算盤の進んだものではない。いろいろの学問での認識過程を新しい立場でふりかえり、科学者のカンを機械化したり、心の中のソフト・ウェアをハード・ウェア化したり、それと関係のあるシミュレーションをしたりするのが大事な使命となるのである。

3. 聴覚とパターン認識⁹⁾

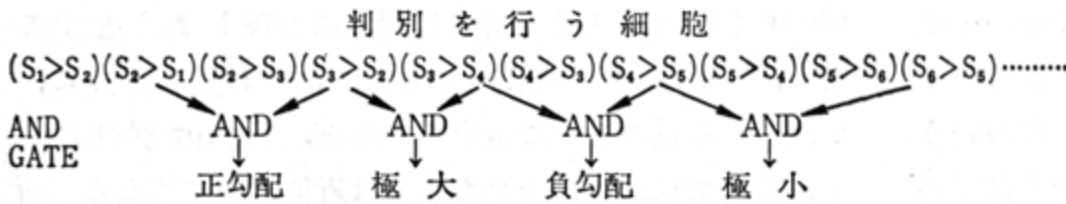
音声の場合、まずスペクトル分析が自然と行われているらしい。第 3a 図がそのスペクトルで、 S_1, S_2, \dots の位

第 3a 図 音声のスペクトル



第 3b 図 非数値情報の極値と勾配

$s_2 > s_1$ でありかつ (AND) $s_3 > s_2$



置が音波の振動数に応じて、右ほど振動数が高くなっている。これらの高さが、ある振動数の音の強さに対応している。番号は適当に、ある振動数の所を 1 とし、それより高い振動数で次にくるスペクトル線の所を 2 という具合につける。音声の場合このようにある振動数の所にだけスペクトルが出て、中間がぬけた離散値的な形になるが、このスペクトルの形から、どこに極大があるか勾配はどうなっているかなどを無意識に判断して、これにより母音を識別したり、さらに甘い声とかしぶいのどまで感じとっているのである。所で、このような離散値的なスペクトルでは、連続函数のときのように微分係数を求めて勾配を知ったり、極大を求めるということはできない。そのかわり S_n と S_m の大小を識別する細胞があって $S_n < S_m$ なら 1 という信号を出す、 $S_n > S_m$ なら

0 しか出さないといった形になっていて、ここで 1 に対する信号がくれば $S_n > S_m$ と判断するのである。これを $(S_n > S_m) : 1$ とかくことにする。すると第 3b 図により

$(S_2 > S_1) \cdot (S_3 > S_2) : 1$ なら正勾配

$(S_3 > S_4) \cdot (S_4 > S_5) : 1$ なら負勾配

$(S_3 > S_2) \cdot (S_3 > S_4) : 1$ なら極大

$(S_4 > S_5) \cdot (S_6 > S_5) : 1$ なら極小

ここで () · () は論理積で両者ともに 1 のとき 1 になることを示している。こういう論理回路が生まれつきできていて、判断にあたることを無意識にやっているのである。

詳細は略するとしても、こういう情報の取り扱い方は“花よりだんご”といった非数値情報を扱う方法を示唆している。このような論理回路の net-work で、声の主の個性や感じの明るい暗いまで感じとっているのである。経済現象では絶対量はわからなくても、順位のつけられる情報は少くない。そういう非数値情報の集合から、経済の先行の明るい暗いを感じとる(明るければ 1 となる)回路を考えることもまんざらではなからう。また物価の変動にあたり、diffusion index から何かを読みとる回路を組み立てたり、それに成功したハード・ウェア的回路を今度はソフト・ウェア化して、論理を組み立てたりできれば、理論としても面白いことになる。計算機は定量的な取り扱いにだけ使うものではなく、これからは非数値情報を扱う使い方(機械翻訳などもその中に入る)を開発する必要がある、これに成功してはじめて計算機は社会科学で真に

有用な利器となるのであろう。

4. ホメオスタットの数理

Ashby¹⁰⁾ はホメオスタットというモデルをつくり、それから超安定という大事な概念を導入している。今日ではホメオスタットを特殊なモデルとしてつくるよりも、これを数学化して、その数理をアナログ計算機なりデジタル計算機にかけて見る方がすぐれているといえよう。Ashby のモデルの微分方程式は

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 - k_i x_i \quad (4.1)$$

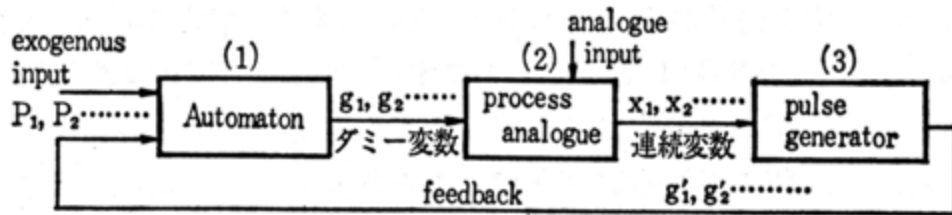
($i=1, 2, 3, 4$)

ここで x_1, x_2, x_3, x_4 はある域値をこえるとパルスを出し、それにより a_{i1}, a_{i2}, \dots などのパラメータの値が切替えら

9) T. B. Martin & J. J. Talavage, IEEE(1963), Mil-7, 189.

10) R. Ashby, Design for a Brain, 山田坂仁他訳, 頭脳への設計(1967, 宇野書店)。

第 4 図



れ、その結果この系は安定な状態 (x_1, x_2 などが域値をこえない範囲内にある) にもって行かれるのだと Ashby はしている。

この微分方程式系に対応する計算機のブロック・ダイヤグラムは第 4 図のようになる。ここで (2) のブロックが上の微分方程式 (4.1) に従うプロセス・アナログで、これはアナログ計算機でもよく、この式を解くようにプログラムされた汎用デジタル計算機でもよい。ブロック (3) は x_1, x_2, \dots がある域値を超えると g'_1, g'_2, \dots というパルス信号、警報などを出す装置とし、それがブロック (1) のオートマトン¹¹⁾ にフィード・バックされるとする。このオートマトンは g_1, g_2, \dots という 2 値数の集合で、ある時刻 t の $g_i(t)$ は

$$g_i(t) = G_i(g'_1, g'_2, \dots; p_1, p_2, \dots) \quad (4.2)$$

という論理関数になっていて、警報その他で変化するとする。ここで p_1, p_2, \dots は exogenous digital input (衝動的なニュースなど) である。

g_1, g_2, \dots はいわばダミー変数にあたり、 a_{i1}, a_{i2}, \dots はこのダミー変数でステップ関数の形にあらわされているとする。このように書くと、ホメオスタットは私のいうハイブリッド計算系¹²⁾ の 1 部になる。私はこういう計算系を細胞制御系に適用しているが、これを社会科学に適用すると、別の面白さがあるようである。

(2) のプロセス・アナログは微分方程式と限ることはなく、経済モデルの場合は経済動学モデルの定差方程式を持ち込んでもよい。そして連続的な変数 x_1, x_2, \dots が域値を超えると g'_1, g'_2, \dots という危険信号を出す。それにより (4.2) のオートマトンの内部状態 g_1, g_2, \dots がきまり、(2) を支配するダミー変数もきまると考え、このオートマトンが人間の主体的な活動をシミュレートしているとするのである。このオートマトンはミクロ的に個人 (消費者や生産者) であってもよいが、そのときは連続系

の方は普通の経済動学のものとは少し違って別の形のモデルになる。一般にダミー変数を考え、マクロの式で扱って行くときは、このオートマトンは政策立案者に対応していると見るべきであろう。ただし数学的には何れも連続量と 2 値数の組み合わせによることは変りはない。

このモデルではダミー変数をオートマトンの出力と見ていて、単なる与件や外生的なものとは見ていない。ここでは人間の主体的な活動はデジタルなものとして見ていて、連続系の方には人間の主体性は直接にはきいてこないとしている。ただ間接的にダミー変数をとおしてきいてくるので、政策論争や政治闘争にしても非数値情報の関係としてオートマトンでシミュレートされ、それらが立案の過程とつながるのである。

昔小動物のクビや眼の動かし方が連続的でないのが問題になったことがある。人間も状況に対処する仕方は連続的ではないらしい。こういうことを考えると、オートマトンにゲームをくみこんでおくのも一案であろう。

ステップ関数やダミー変数を考える面白さは次の諸点にある。まず連続量を 2 進数で表わしたとき、その末位の 1 ビットでも、これが 2 値数として定性的には増巾されて大きい影響を及ぼす可能性があることで、域値を踏み越えるような場合がそうである。またある曲線の behaviour を n 個の有限な点で近似的に表現しようとするとき、Weierstraß の定理からもうかがわれるように、 n 個をある点の近くに集中させると、Taylor 展開になり、これではかけはなれた点では近似度が悪くなる。所で、ある部分にステップ関数近似を使うと、のこりの部分に n 個の点を有効にばらまくこともできる。“現象は本質より複雑である” というのが、ステップ関数を使うことは何か本質的なものを浮かび上らせる方法になっているようである。考え方によっては、上の方法は無限に複雑な現象を本質をうまく掴んで、有限なもので近似的に包みこんでとらえようとする“苦肉の策”とも考えられる。

超安定というのは (4.1) の示すような連続系が安定でないとき、各 x は域値を越えてパルスを出し g_1, g_2, \dots の 2 値数を切り替え、それにより a_{i1}, a_{i2}, \dots などのパラメーターの値をかえて、遂に安定状態に移って行くような 2 値数のことで、Ashby は生体にはそういう性質がある、といている。ここである安定な範囲をもつような変数を本質的変数といている。生体ではこの x_1, x_2, \dots などがそれで、そういう変数がある許容範囲にあるとき生活が保たれるので、その安定さは流動平衡系の安定であるといえる。ここで考えられた流動平衡系は非線

11) これは連続過程に対し制御用計算機になっていて、後者が域値をこえたとき警報が出るので、それをデジタルに判断して、 g_1, g_2, \dots を通じて連続系を制御するのである。

12) M. Sugita, J. Theor. Biol. 13, 330 (1966); —, Helgoländer wiss. Meeresunters. 14, 78 (1966).

型の複雑なもので、それを2値数を使って単純化して上のような切り替えで安定状態を求める、と考えているのである。

5. 人間の特色

人間の心は制御テープのようなもの、行動はそのアウトプットによると考えられるが、このテープには本能のような固定記憶と、後天的な可変記憶とがあり、これらが場合に応じて呼び出されアウトプットになる。可変記憶は新しい皮質(cortex)に主として記録されていて、それは後天的に社会生活でプログラムされたもので、かつ不断に更新されて行く特色も持っている。他方その更新には相当の抵抗があり、時間的なdelayもある。国民性とか平均人といったものも、社会生活で類型化され、相当期間あるパターンを保つようなソフト・ウェアといえるであろう。大脳は複雑ではあるが、心のテープの複雑さは生理学的なものというより、そこに反映されている社会生活の複雑さによるものである。

人間社会は各人各様の心のテープからのアウトプットの総和である。しかし1人1人がどのように行動しても、大衆の1人としてなら次にのべる特別な場合は除いてその特異性は相殺され、社会を動かすのは共通な何かで、それは社会生活で類型化されたもので、存在が意識を規定した部分とも考えられ、また経済的な平均人がこれにあたることも考えられる。テープのこの共通部分は相殺されないもので、これがマクロスコピックな現象を規定し、計量経済学でもこういう部分に制御されるモデルが問題となり得るのである。

他方1人の人間でも社長とか指揮官とか大統領などの場合は、そのアウトプットは組織の力や財力、兵力、権力などで増巾され、他方そのアウトプットからのフィード・バックは非線型で、ある限度まではきかないようになっていて、地位が上になるほど大きい自主性があることになる。しかしその自主性は無制限ではなく、限界をこえると非線型の大きいフィード・バックがかかるようになっていく。Cyberneticsは舵取からきているが、航海は帆まかせ風まかせの自然現象ではないが、舵取の自主性には大きい限界がある。船長となると自主性は大きくなるがやはり制約がある。歴史の海を行く大統領でも同じで、強い権限で世界の世論をうけつけないようでも、やがてはそれに耐えられなくなる。

その他学者や作家にも、それなりの自主性と、アウトプットの増巾とがある。学問の自由ということもこれに関係していて、また学部教授と研究所教授とでは、そ

こは多少の性質の違いが感じられる。

古来将器ということがいわれ、勝敗の数が明らかなきでも器を得ないともたつくとされ、また以正合以奇勝ということもあり、トップの名人芸が可能性の現実性への転化にあたり、その速度にきいてくることを示している。故に経営が科学化されようとも、名人芸がなくなることはないであろう。こういう場合は個人的なソフト・ウェアでもアウトプットは増巾をうけて、歴史に大きくひびくのである¹³⁾。これに対して若い人々が気負いたって行動しても、増巾回路とマッチしないと、線香花火に終ることも考えられる。こんなことはバイオニックスの関係すべき問題ではないが、ちょっと考えて見たくもなることである。

本能にも攻撃と逃避のような相拮抗するものがあり、その他相反するものが後天的にもソフト・ウェアにプログラムされているとし、それによるパルス信号はホルモンや神経回路のnet-workの相互作用でいろいろに増巾され、そのされ方で情報回路が不安定になったり、またそれでは困るので、それをおさえるために必要な信号を頑張らして送りこむこともある。意志というのがこれに関係し、また上の不安定さに関係して感情や情緒があらわれるのであろう。こういうことを考えると、あたえられたシステム・テープの下に行動する電子計算機と人間の心のはたらきとは違っていることがわかる。バイオニックスで人間を見るときにここが注意すべき所で、計算機の方は去勢された馬のようなもので、人間が使うには便利だが、生体類似の情報処理系として見るとカタワの存在にすぎない。カタワだが情報処理系としては人間と共通の面もある。しかし、人間では欲望や煩悩が情報処理をみだし、また相矛盾し拮抗するテープが心の中で争ったり、それにより更新されてある発展(人間としての成長)などもおこっていて、その点でコンピューターとは全然違っている。そうかと思うと職業意識とか訓練で私情をぬき去って計算機のようになろうとしたり、長年のつとめが身にしみこんでカタワの存在になる場合もある。

しかしソフト・ウェアにより制御されている点では工学的な情報処理系と大差なく、そういう系が集まって相互のcommunicationで社会をつくっている。その中で経済生活は何よりも強い類型化とプログラムの作用を持っていて、他方1人1人の相違は相殺されるとすると、社会のある期間(テープの変化の無視できる程度)内の

13) 故にハイブリッド計算系でも、オートマトンの所は政策立案にあたる要衛にいる人々を中心に考えることになるであろう。

behaviour は工学系との対比で考えても、それほどま
と外れではないであろう。経済工学という耳なれない用
語も、このように考えて解釈してはどうであろうか。こ
れに対してテープ更新に関する運動は、非数値情報を扱
う系で別の形で simulate すべきものなのであろう。

このように考えると、資本主義的な経済生活で十分に
プログラムされていない人々の社会に、資本主義の制度
だけを持ち込んでも、簡単にうまく行くものではないと
いうことや、戦後の日本人の心が強くプログラム更新を
うけ、心のテープが資本主義的にすっきりしたものへ脱
皮したことが、戦後の日本経済とその発展を考えると、
示唆するものを持っているであろう。

このように考えると、McCulloch & Pitts¹⁴⁾ の神経回
路のモデルや、それを押広めた Caianiello¹⁵⁾ のモデル
が社会科学に役立つであろうということが想像されるが、
ここでは省略する。Caianiello 自身も実際にそう考えて
いるようで、そのことをはっきりと説明している。

6. 粗い数学の考え方

人間社会にも工学系に近い面があるとしても、やはり
複雑な系なので、数理も粗いものを開発する方が、目的に
適うこともあるであろう。次のような考え方も一つの試
みである。例えば正弦曲線を x 、余弦曲線を y とすると

$$\frac{dx}{dt} = y, \quad \frac{dy}{dt} = -x$$

となるが、これを

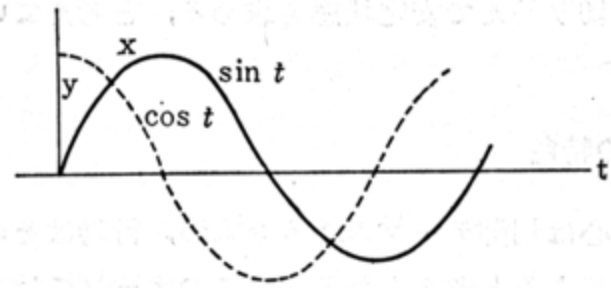
$$\frac{dx}{dt} = g_2 - \bar{g}_2, \quad \frac{dy}{dt} = \bar{g}_1 - g_1$$

とし、 $x \geq 0$ のとき $g_1 = 1; y \geq 0$ のとき $g_2 = 1$

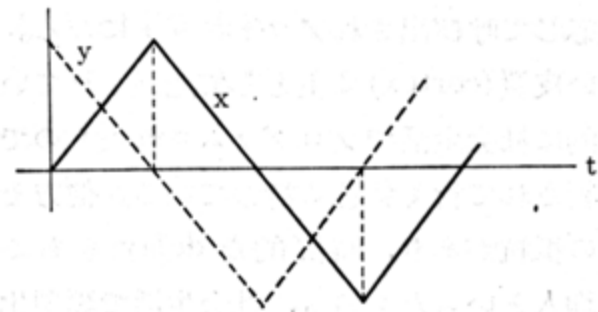
$x < 0$ のとき $g_1 = 0; y < 0$ のとき $g_2 = 0$

\bar{g}_1, \bar{g}_2 はそれぞれ g_1, g_2 の否定(例えば $g_1 = 0$ なら $\bar{g}_1 = 1$,

第 5a 図



第 5b 図



$\bar{g}_1 = 0$ なら $g_1 = 1$) とすると、第 5a 図のような正弦や余
弦曲線に対して、第 5b 図のような折線近似が得られる。
こういう近似法で大体の behaviour がつかめる場合(景
気変動の場合は?)もあるであろう。何かこういった粗
い数理を開発して行くことは、社会科学にも生物学にも
有効であろう。

こういう取扱は意識的に何かを犠牲にしているので、
事実とあうあわないというとき余程注意してかかる必要
がある。何かぜひ掴まいたい大事な特色をしっかりとら
える反面、何かは覚悟の上でおとしていて、それを理解
しないで揚足ばかりとりはじめると、先には進めない。
自然科学では(van der Waals の式のように)そういう
覚悟の上で使われる式もあるが、社会科学では相手のす
きをねらうことがしばしばで、お互いに敵視しあったり、
言葉じりをとらえて批判しあっている状況がつづくとな
ると、こういう提案は実行困難かも知れない。

14) W. S. McCulloch & W. Pitts, Bull. Math. Biophys, 5, 115(1943).

15) E. A. Caianiello, J. Theor. Biol. 1, 204(1961).