

人工知能への二三のアプローチ*

南雲仁一** 中野 馨** 吉沢修治**
小林欣吾** 西村千秋**

1. はしがき

その働きやふるまいがいかに知的 (intelligent) に見えるような機械を作ることが、人工知能 (Artificial Intelligence) あるいは機械知能 (Machine Intelligence) と呼ばれる研究の目的である。

ある機械のふるまいがはたして知的に見えるかどうかは、時代により、また人によってさまざまであるから、人工知能と呼ばれる分野の境界は明確なものではないし、その内容も流動的である。江戸時代には「茶くみ人形」¹⁾の動作はおそらく知的に見えたであろうが、当今では情報処理技術の発達に対応して、人工知能といえば知的な情報処理機能を意味するのが普通になっている。

情報処理機械の旗頭はいまでもなく電子計算機であるが、その出現により、考えのすじみちが明確なものならば、それがどんなものであってもこれを正確、かつ迅速にたどっていくということが少なくとも原理的には可能になった。

その当初は電子計算機そのものの機能が人工知能と見えた時代もあったが、現在では、上記のような仕事はむしろ非知的な仕事とみなされている。そして人間はわりあい楽にやってしまうが、そのアルゴリズムは明確でない——したがってこれを機械化することが困難な——情報処理、たとえばいわゆるパターン認識などの機能が知的な機能とみなされている。また、片っ端からしらみつぶしに調べてゆけば原理的にはできるような仕事でも、その量が多過ぎて実際問題として不可能な種類の問題も少なくない。このような問題を人間は短時間でうまく処理することがあるが、これも基本的にはパターン認識の働きといえよう。

これらの仕事は現在のところ知的と見られているが、やがてそのアルゴリズムが明確になれば非知的

な仕事になってしまうであろうから、その意味で人工知能の内容は流動的である。

さて、人間の情報処理は脳および感覚系によって行なわれている。したがってそのアルゴリズムをはっきりさせるには、脳や感覚の生理学の成果にまところが多い。生体の持つすぐれた機能を生理学に基づいて、工学的に実現し活用することを目指す分野はバイオニクス (Bionics) と呼ばれているが、人工知能の研究も生理学をベースとする限りではバイオニクスのそれと同じものである。

ところで、脳や感覚器の働きは、これを工学的に実現するのに十分なほどよくわかってはいないのが現状である。そこで生理学的事実に若干の工学的仮定を加えて、脳や感覚器のモデルが計算機シミュレーションにより、また金物として作られている。

一方、人間がある状況においてどのようなふるまいをするかという問題は、心理学あるいは行動科学の分野でいろいろ研究されている。ここでは人間をひとつの暗箱としてその働きやふるまいを調べるので、生理学に基礎をおくミクロなアプローチに対して、マクロなアプローチといえるものである。前にも述べたように人工知能の目的は知的な働きやふるまいを作り出すことにあるから、これは心理学や行動科学に対して、心理工学とか行動工学 (Behavioral Engineering) とも呼ばれるべきものであろう。

人工知能に対するマクロなアプローチは、そのほとんどが計算機のプログラミングによって行なわれており、現在人工知能といえばそのような研究を意味することが多い^{2), 3)}。マクロな方法は心理学的であるとはいっても、その“人間くささ”にはいろいろな程度のものである。最も人間くさい方に属する研究には人間行動のモデルを開発することをその目的とするものがあり、A. Newell や H. A. Simon らによって代表される。これに対して人間行動との直接的な関係を表に出さず、いわばより computer oriented なアプローチも盛んに行なわれており、J. McCarthy や M. Minsky らはこの流れに属するといえよう。

* Some Approaches to Artificial Intelligence Jin-ichi Nagumo, Kaoru Nakano, Shuji Yoshizawa, Kingo Kobayashi and Chiaki Nishimura, (Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo)

** 東京大学工学部計数工学科

人工知能に対するミクロな方法とマクロな方法はそれぞれの得失を持っている。ミクロな方法は手堅いが、生理学的事実からあまり離れてしまうわけにはいかないという限定がある。一方、マクロな方法は、いわば見掛けだけが問題だから、かなり思いきったことができるという利点がある。これら二つのアプローチは互いに他を相補って発展してゆくものと思われる。

さて、この小文の目的は、最近われわれの研究室で行なわれている人工知能に関連した研究のあらましを紹介することにある。

以下に述べる2節はある神経回路網モデルにおける興奮の波の運動を調べて、その法則性を追求するものである。3節は連想記憶の生理学的なモデルを構成して、その特性をさまざまな角度から検討したものであり、4節は同じく連想を中心とした記憶の心理学的モデルを計算機プログラムによって構成したものである。5節はゲームによって人間の発見的思考やそれに基づく行動の糸口をつかもうとするものである。6節ではひとつの知的な人間-機械系の設計・製作を通して、ミクロな素子とマクロな行動の関連を追求しようとするものである。

ページ数の関係で中途半端なものになってしまったが、詳細は引用した文献を参照していただきたい。

2. 神経回路網モデル

生体の情報処理の中枢は、きわめて多数の神経細胞が複雑にからみ合っていてきている神経回路網である。この神経回路網は、そこに発生した興奮の波の運動 (reverberation と呼ぶ) によって神経細胞相互間の結合が次第に変化してゆく自己組織系である。この神経回路網の機能は生理学的にもまだ明確にされてはいないが、それでもほぼ確実に考えられる若干の知見が得られている。そこで、ここでは神経細胞の特性や結合の方法を適当に仮定し、それによって構成される系の動作を生理学的知見と比較しながら神経回路網の動きを研究してゆく“構成的な方法”をとることにする。

これまでに作られた自己組織系 (「学習する機械」で代表される) では、入口からはいった情報はただ一度だけ使われて出口から出るといった形式であったが、より有効に入力情報を利用するためには reverberation を用いることが考えられる。

この方向の研究の第一歩は、興奮の波の運動法則を調べることである。つぎの問題は、このような reverberation が脳の情報処理においてどのような役割を果

たしているかということをはっきりさせることである。後者に関連してはつぎの2点が重要であろう。

- (i) 似たような興奮の波が繰り返しておくと、それらの波が通りやすい道が定着される (記憶)。
- (ii) 二つの興奮の波がほぼ同時に繰り返しておくと、それぞれに対応する二つの道を結び新しい道が次第に定着される (連合)。

これに関しては Beurle⁴⁾ や Caianiello⁵⁾ によるいろいろな推論があるが、まだ実証的な研究は行なわれていない。

この節では、初めの問題、すなわち神経回路網に対してどのような刺激を加えると興奮の波が発生するか、発生した波はどのように振る舞うか、とくに、長い時間持続する興奮の波を発生させるにはどうしたらよいかということについて、ひとつのモデルを用いて調べることにする⁶⁾。後の問題に関しては次節参照。

ところで神経回路網モデルは、その神経細胞相互の結合の仕方によって特徴づけられ、結合が遠いか近いか、また、結合係数が変化するか否かによってさまざまな特質を示す^{7)~10)}。ここでは、近い結合を持つ神経回路網モデルのひとつとして、平面状に単安定能動素子が一様に分布し、隣接した素子の間に一定の結合がある“能動面路”に関して、その上での興奮の伝搬の性質について紹介する。この種の研究としては図式法による研究⁹⁾、電気化学モデルを用いた研究¹¹⁾、数値計算による研究^{8), 10), 12)}がすでに行なわれている。

2.1 能動素子と基礎方程式

神経細胞に相当する単安定素子としてはいろいろな回路が考えられるが¹³⁾、この種のシミュレーションでは素子の興奮状態を直視できることが本質的に重要であるので、時定数が大きく取れる図 2.1 の回路を用いる。この単安定回路を用いて4方向への興奮の伝搬を実現するために①~②間を2端子素子として使用する

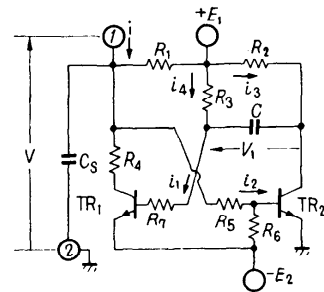


図 2.1 神経素子のシミュレーション回路

る。この2端子素子を抵抗 (r) を介して、図 2.2 のように格子状に接続して得られる回路網の極限として分布定数系を考える。この能動面路の信号伝搬を記述する基礎方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left(\frac{\partial z}{\partial t} + \gamma z \right) \\ &= \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \mu(1-z + \epsilon z^2) \frac{\partial z}{\partial t} + z, \\ & \gamma > 0, \mu > 0, \frac{3}{16} > \epsilon > 0 \end{aligned}$$

ここに z は①~②間の電圧に相当する。この基礎方程式は、神経線維における興奮の伝搬を記述する方程式を2次元化したつぎの方程式：

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial^2}{\gamma x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \mu(1-z + \epsilon z^2) \frac{\partial z}{\partial t} + z, \\ & \mu > 0, \frac{3}{16} > \epsilon > 0 \end{aligned}$$

とほとんど同じ性質を持つものと思われる。

2.2 シミュレーション

能動面路における興奮波を直視できるようにするために、図 2.1 の TR_2 の負荷に電球をつけて動作状態を表示した。これを図 2.2 のように格子状に接続し、縦30横30の2次元の回路網を構成した。

(A) 持続する興奮波の発生

この能動面路の任意の1点にひとつの刺激を与えると、興奮波は円周状にひろがって周辺に到達する。興

奮波のすぐ後には不応状態が付随しているため、境界での反射はなく、1回だけの刺激では持続する興奮波は発生しない。つぎに2回刺激を与えてみよう。まず、図 2.3 の P 点 (23, 10) に刺激を与える。 P 点から発生した興奮波が Q 点 (12, 15) を通過した適当なタイミングに Q 点に第2の刺激を与えると、同図に見るように Q から新しい興奮波が発生する。しかしこの興奮波は、 P からの興奮波による不応状態のために、円周状にはならないで円弧状の波となる。この円弧状興奮波は端が内側に巻き込んで行き、両端が衝突したところからつぎの新しい興奮波が発生し、周期的な reverberation が起こる。

(B) 回路のパラツキの影響

このようにして発生した reverberation は、もし回路網が完全に一樣であれば周期的な動作を持続するであろう。しかし、実際の場合には外乱、回路のパラツキ、境界などの影響を受けて、次第にパターンが変化してゆく。たとえば、回路網の1部分に興奮しにくい部分 (障害物) があると、reverberation は障害物をめぐるかなり安定なパターンに落ち込む。刺激の順序と位置によっていくつかの異なるパターンが発生するので、回路の興奮性を変えることによって発生する reverberation のパターンを制御することができる。

(C) 全活動レベル

Farley⁸⁾ は強い結合を持つ回路網に関して、その全

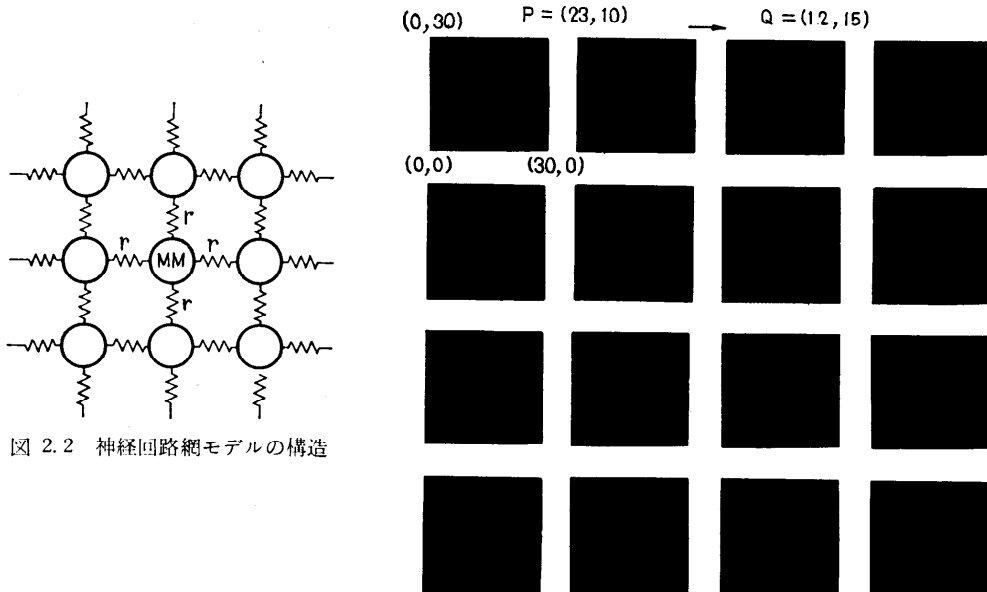


図 2.2 神経回路網モデルの構造

図 2.3 持続する興奮の波の運動 (reverberation)

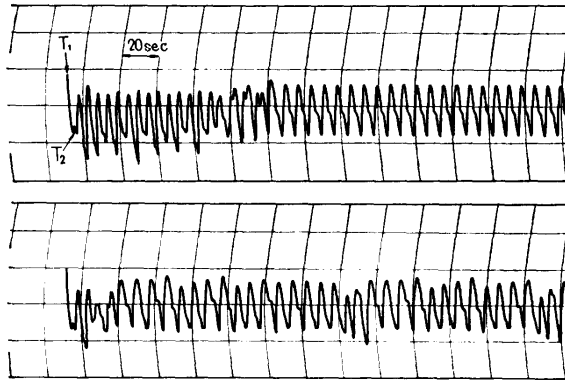


図 2.4 平均的な活動レベルの時間的経過

活動レベルと脳波との対応について、興味ある現象を報告している。上に述べた回路網は近い結合であるので脳波との対応はないが、平均的な活動レベルの時間的経過を調べると、周期性などが見やすくなる。図 2.4 は TR₂ のコレクタ電流の和を示したものであるが、(b)の方がはるかに長い(約 4 倍)周期を持っていることが容易にわかる。

上述のように、この神経回路網モデルの上に reverberation が発生することはわかったが、回路網が小さいため興奮の波の相互作用の仕方についてはまだ調べられていない。さらに神経回路網の自己組織化の過程を調べるためには、安定で安価な学習素子を作ることが最も重要な問題である。

3. 連想記憶装置——アソシアトロン——

人間の知的能力がすぐれている大きな原因として、その情報処理が連想記憶方式に基づいていることがあげられる。新しい記憶は過去の記憶との関係によって記憶され、その関係をたどって想起されるので、計算機の記憶装置のような蓄積場所を番地で指定するようなものではない。さらに脳の中では、記憶内容を局所的に保持しているのではなく、広い範囲の神経細胞が少しずつ分担しているような分散型の記憶になっていると思われる。したがって神経細胞の一部が破壊されても、ある記憶内容が全く失われるということではなく、ただ少し不正確になるだけである。似た内容については混同が起こるが、これは、その程度が適当ならば、全く同じものでないかぎり違っているとみなす計算機的な情報処理に対して、未知のものへの接近という点ではむしろ長所となる。

連想の構造や性質については意味論的な面からの研

究があって、次節にはその 1 例を述べるが、ここでは、どちらかといえば生理学的な連想記憶を行なう神経回路網モデル^{14), 15)}について述べる。“アソシアトロン”と名付けられたこのモデルにおいて、神経細胞(ニューロン)は -1, 0, 1 の三つの状態を持つ。そして 1 と -1 のパターンで表わされた記憶事項を、同じ場所にいくつでも積み重ねて記憶することができる。その後任意の記憶事項の一部分のパターンを見せると、その全体を想起するのである。その方法はつぎのとおりである。

記憶パターンを横ベクトル

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

で表わす。ここで x_i は -1, 0, 1 の 3 値をとる。

x を転置して得られるベクトルを x^t として、記憶装置の内部状態を $n \times n$ 行列で

$$M = x^{(1)t} x^{(1)} + x^{(2)t} x^{(2)} + \dots + x^{(k)t} x^{(k)}$$

と表わす。ここで k は記憶事項の数である。想起するにはまず量子化関数 ϕ を

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \text{ のとき} \\ 0 & t = 0 \text{ のとき} \\ -1 & t < 0 \text{ のとき} \end{cases}$$

と定義し、さらに ϕ は行列 $A = (a_{ij})$ に対しても

$$\phi(A) = \{\phi(a_{ij})\}$$

のように拡張して用いるものとするとき、 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ から想起されるパターンは

$$Z = \phi\{y\phi(M)\}$$

で表わされる。すなわち図 3.1 に示すような任意の二つのニューロンが記憶素子(シナプス)を介してつながっている神経回路網において、記憶素子は記憶時には両端の細胞の状態の積を加え込み、想起に際しては、一端の興奮状態を自分自身の符号が正ならばそのまま、負ならば反転して他端につたえる。そしてそのような刺激を受けた細胞は、多数決によって -1 または 1 の状態をとるのである。

分散的な記憶の他のモデルとして Post のもの¹⁶⁾があるが、これは神経回路網的な構造をしていない。ア

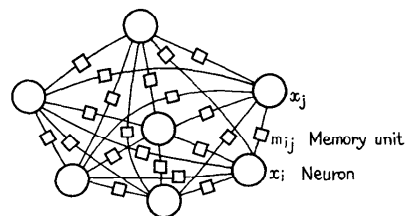


図 3.1 連想記憶を行なう神経回路網モデル

ソシアトロンはむしろ学習機械パーセプトロン¹⁷⁾に近いのであるが、パーセプトロンのように入力部分と出力部分とを分離せず、より一般的な形態をしているため、連想をくりかえすことによって、神経回路網上の興奮の波の伝搬と思考とを結びつける可能性を持っている。

ところで、この記憶装置はその構造からいってパターンとの混同が起こるが、その度合は確率的に計算される。たとえば、20個の記憶事項が積み重なっているとき、想起入力となるパターンのビット数が100ならば、想起するパターンの正確度は約70%である。ニューロンの数180個の回路網を計算機でシミュレートし、つぎの実験を行なった。神経回路網上にニューロン40個ずつ三つの場所をとり、場所1にはリング、スイカ、レナガなど六つの品名、場所2には三つの形状、場所3には三つの色をあらかじめランダム・コーディングして与え得るようしておく。記憶事項はリング-球-赤といった三つ組である。六つの記憶事項を記憶したのち品名から形と色を想起させる実験では正確度100%、形と色から品名を思いださせる実験では、平均93%を示した。つぎにニューロンの個数20個の場所を加えて、ことば赤、ことば球などを符号化して与え、品名、形状にかかわらず赤いものをみせては赤と教えてゆくと、赤の概念を示すパターンと赤ということばが連合することが示された。

ゲームへの応用では、つぎのようなものを用いた。 n 個のチップから2人のプレイヤーが交互に1個ないし3個のチップをとり、最後をとらされた方が負けとする。ただし、相手がすぐ前の手番でとった手をとってはならない。“読み”までいれると複雑なので、瞬時的評価のみで手を選ぶことにする。神経回路網上に、局面、手、手と局面の交互作用、勝敗のイメージなどを与える場所を割りあてる。そして局面と手を入力とし‘勝’のイメージが思いだされる手を選ぶ。どの手に対しても同じイメージならばランダムに選ぶ。試合が終わると、現われた局面と実際にとった手にその試合の勝ち負けを合わせて記憶する。相手の手も勝ち負けを逆にして記憶する。試合数を重ねると個々の記憶は混同してしまっても、局面や手のうち勝敗に関係の深いパターンが勝ち負けのイメージと連合し、うまい手を打つようになることが期待される。事実6個のチップから始めるゲームで、16試合後にランダム・プレイヤーに対する勝率が70%になる程度の学習が行なわれた。

以上は連想記憶の静的な性質を述べたわけだが、想起したパターンを再び入力にもどすということを作り返せば、連想の鎖がたどられる。この鎖は経験を通じて断片的な記憶が積み重ねられて構成されたものであるから、これは単に記憶したことを想起しているのではなく、思考のモデルともいうべきものである。シナプスにおける時間遅れと神経細胞の興奮の不応期を導入すれば、神経回路網上に移り変わっていく興奮の波を発生させることができ、これが上記の連想のくりかえしに相当する。このようにして連想とreverberationとを関連づけることによって、人間の脳で行なわれていると考えられる動的ともいえる情報処理が可能になるかも知れない。この辺の研究は現在進行中である。

なお、ニューロン25個、シナプス325個を持つ小型記憶装置が現在試作されつつある。

4. 記憶の意味論的モデル

前節で述べたように、記憶作用は人間の知的活動において重要な意味を持っている。記憶作用は記憶すべき事柄の記録、保持および想起の三つを総称したものである¹⁸⁾。これら記憶作用が具体的には、どのように行なわれているのか、そして知的活動にどのような形で寄与しているのかを知ることは、人工知能の研究にひとつの手掛りを与えることになるであろう。しかし現在のところ、脳の記憶作用や記憶内容を直接知る方法はまずないといってよい。そこで、想起された内容から逆に記憶内容や記憶機構を間接的に知るという方法がとられることがある。これが心理学における連想試験であり、本節ではこれをもとにして構成されたひとつの記憶モデルについて述べる。

4.1 連想の分析

連想試験を大規模に実施し、その結果を表としてまとめたのが「連想基準表」である。記憶のモデル構成にあたり、まずこの連想基準表¹⁹⁾により記憶内容の分析が行なわれた。

連想試験は、刺激語を呈示し自由連想により反応語を求めるという方法で行なわれた。ここに現われる刺激語と反応語の対応を注意深く調べてみると、対応のしかた(結合)には大きく分けてつぎのような6項目のパターンがあることがわかる。

① 文法的結合 形容詞や動詞からその名詞を連想するというような場合である。

【例】遊ぶ—遊び

② 感覚的結合 刺激語が及ぼす感覚を反応語と

したものである。

〔例〕 使所——きたない

③ 強い意味的結合 刺激語と反応語の意味の間に必然的関係の認められるものである。

〔例〕 犬——動物

④ 弱い意味的結合 刺激語と反応語の意味の間に必然的関係は認められないが、日常の話しことばによく使われたり、経験による影響を受けたりして結びつくものである。たとえば、足——長い という連想は、足というものは必ずしも長いものばかりとは限らないけれども、日常よく「足が長い」とか「長い足」という表現を使うことにより、足そのものに固有な性質より優先されて出てくるものと考えられる。

⑤ 強い動機づけによる結合 本来その意味の間には全く関係のない2語が、キャンペーンなどの外からの強い動機づけによって結びついたと考えられるものである。人間の非論理的側面を表わしているともいえる。

〔例〕 赤い——共産党

⑥ 以上①～⑤によって直接的な結合はほとんど含まれるが、このほかこれを組合せ、他のことばを媒介として起こったと思われる連想がある。

〔例〕 白い——看護婦

これは、「白い」に対して「白い服」を連想し、それから「看護婦」の連想が起こったものと考えられる。

このように連想を分析してみると、連想の一つの単位は「刺激語——反応語（関係）」という図式であり、「関係」の種類は言語構造の複雑さにもかかわらず比較的少ないことがわかる。一方、こんどはある刺激語について得られた反応語群から逆にその刺激語を類推させる実験を行なってみると、つぎのような示唆が得られる。

記憶内のある語が刺激されると、それと特別な関係にあることばが連想として浮かんでくる。これらのことばの全体を刺激語に対する「連想雲」と呼べば、刺激語はその連想雲によってかなり正確に特徴づけられる。

以上、連想表の分析から得られた結果をもとにして、記憶の意味論的モデル*を構成する。

4.2 モデルの構成

まず、記憶内容の一単位は、当然のことながらひとつのことばである。そしてAということばが刺激され

ると、関係RによってBということばを反応語として連想するという状態を(A, B, R)の順序づけられた三つ組で表わす。そして記憶内容をつぎのような構造としてモデル化する。

(i) ひとつのことばは、それ自身で記憶内容の1単位である。

(ii) 二つのことばA, Bの間に結合があれば、これらの二つのことばと結合の種類Rとの順序づけられた三つ組(A, B, R)により、この二つのことばの間の特殊状態が表現される。

(iii) 三つ組は、記憶内容の1単位となることができ、(i), (ii)における「ことば」と全く同等に扱われる。この三つ組を「連想単位」と呼ぶ。

(iv) そして、記憶内容を「ことば」と「連想単位」の集合と定義する。

〔例〕 「雨が降る日に学校へ行くのはいやだ」という様子は、記憶の内容としてつぎのように表現される。

((((雨, 降る, r_1), 日, r_2), (学校, 行く, r_3), r_4), いやだ, r_5)

(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 は適当な結合コード)

4.3 電子計算機によるモデルの実現

以上に述べたモデルを電子計算機 MC-1**を用いて実現した。この記憶モデルのシステムは、二つの部分に分かれており、ひとつは種々の連想の存在を三つ組の形式で提示して教育する部分、もうひとつは刺激語を与えて連想をめぐらさせる部分である。

図4.1は後者の例である。刺激語クツ(靴)に対し2行目は同音異義語チェックである。3行目から連想が始まる。まずクツから(クツ オ ハク)という動作、さらに具体的に(アシ ニ (クツ オ ハク))という動作全体が想起されている。(ピリオド)は視点の変更を意味する。すなわち(アシ ニ (クツ オ ハク))という状況から、アシそのものに視点が移り、(アシ キタナイ)の連想へすすんでいる。以下同様にして連想が続いていく。

このモデルによる連想の特徴は、刺激語に対してそれを含む具体的な状況を想起できるという点である。このような特徴を利用すれば、二つのモデルが対話により、それぞれどのような連想の変化を起こすかとい

*「意味論的」とは、言語の文法性ばかりでなく、個々のことばの意味にまで立ち入ってモデルを構成していることを示す。

**日本電気株式会社製、機種名 NEAC-3100。主記憶容量は4K語(1語は18ビット)、周辺機器として、磁気テープ装置(2台)、入出力タイプライタ(1台)、紙テープ読取装置(1台)が接続されている。

KEY WORD	クツ
クツ (NN)	- ハク チエツク O.K.
01	(クツ オ ハク)
02	(アシ ニ (クツ オ ハク))
02	アシ
03	(アシ キタナイ)

図 4.1 自由連想のシミュレーション

う問題への応用もひらけてくるものと期待されるが、現在のところはまだ教育も不十分であり、この種のアプローチはやっと緒についたばかりの状態である。

5. 行動工学におけるゲーム

社会における人間の思考や行動は茫漠としていて捕えにくいので、これを研究する際しばしばゲームが用いられる。ゲームは場合によっては、社会の状況を簡略化した数学的モデルとみなしうるからである。ゲームは零和と非零和の二つに大別され、それぞれ競技者の人数を頭につけて、2人零和ゲーム、 n 人非零和ゲームなどと呼ばれる。零和ゲームは競技者の利得の和が0になるもの、非零和ゲームはそれが0にならないものである。ゲームはその利得の与え方によって、バトル・オブ・セックス、バーゲニング・ゲーム、プリズナース・ディレンマなどと呼ばれるいろいろな場合に分れ、それによって、たとえば、売買契約、同業者の競争、政治的折衝などの現実社会の問題を単純化して表現することができる。

たとえば、プリズナース・ディレンマの1例は、**図 5.1**のような利得表で表わされ、両者が戦略1をとるのは協力を意味し、利得はともに1であるが、片方が裏切るとその人の利得は10、裏切られた人は-10になる。そして両方が裏切りの戦略2をとると、利得はともに-1となる。このような状況では裏切りへの誘惑が強く、最適戦略は何かというのはむずかしい問題であるが、人間は利得表以外にもいろいろな要因を加えて考えた結果、何らかの戦略をとることになるであろう。バーゲニング・ゲームでは、競技者の利害が一致する要因が含まれていて、戦略を競技者間で相談して決めることになるが、妥協点をみいだす話し合いに個人個人の異なった思考が現われて興味深い。

人間の思考が複雑多岐であることは、**図 5.2**に示すような簡単なゲームを考えてみるとよくわかる、 A ま

		Player B	
		1	2
Player A	1	(1, 1)	(10, 10)
	2	(10, -10)	(-1, -1)
		Aの利得	Bの利得

図 5.1 プリズナース・ディレンマの利得表

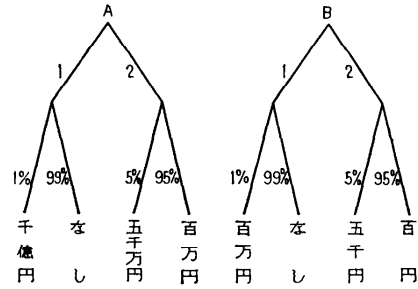


図 5.2 人間の思考を説明するための簡単なゲーム

たは B という点において、1か2を選ぶとあとは確率的に円に書き込んであるように利得がきまる。多くの人は A においては2、 B においては1を選ぶであろうが、それは一見首尾一貫していないように思われる。これを理論的に説明するには、各利得金額の個人に対する有用度を表わす関数を導入する。そして有用度の期待値が大きい方をとればよいのだが、実はその関数は個人の生活水準、過去の経験、現在の希望、その他いろいろなものを考慮した結果得られる複雑なものである。

零和ゲームについては、von Neumann および Morgenstern²⁰⁾ に始まるゲームの理論によって、決まった手をとる純粋戦略、またはいくつかの手を特定の確率でまぜてとる混合戦略の形で理論的に最適戦略を求めることができる。それでは零和ゲームについてはもうすべてがわかってしまったのかといえばそうではないのであって、零和ゲームのひとつである碁、将棋、チェス、チェッカーなどを考えると、それらには最適戦略が確かに存在するのであるが、それを求めることは実際問題として不可能である。しかし人間は“ゲームの木”のすべては知らなくても、そのゲームをうまく遂行する。その際、理論的に最適戦略を求めているのではなく、“発見的方法 (heuristics)” と呼ばれるやり方を用いる。これについては、この節の後半で述べる。

さて、たいていのゲームは一定のルールをもとにして、演繹的に遂行されるのであるが、一方、“帰納的ゲーム”ともいべきものが考えられる。これはトランプ・カードを使ってでもできる。数人の競技者のうち1人を親とし、親はカードの出し方のルールを決める。たとえば、「赤い札と黒い札を交互に出すこと」というようなものでよい。子はそのルールは知らないで、あらかじめ配られた札を順次に出してゆく。親は出された札が自分の決めたルールに違反しているときはもどすように命令してつぎの競技者に移る。早くルールに気がついた子は自分のカードを早く出し終わるのであろう。誰か1人が出し終わったときゲームは終了し、出した数に比例した得点を得る。一方親は、カードを一番多く出した子と、一番少なく出した子の枚数の差に比例した得点を得る。すなわち、適度にむずかしいルールを作ると得点が高いわけである。このゲームは親と子を、先生と生徒、あるいは自然界と科学者にたとえることができる。人間にやらせてみて考え方を解析するにも、シミュレーションによる研究をする上からも興味深いゲームである。

つぎに“発見的方法”であるが、これについては一般的に考察した文献²¹⁾があるが、ここでは五目並べにおける思考過程のシミュレーション²²⁾について述べる。このゲームのルールはよく知られているとおりである。ある盤面において人間は、まずどの手が有効かについて、ある程度の判断をする、これを手の瞬時的評価と名付ける。しかし本当に有効かどうかかわからないので、その手を打ったと仮定して現われる局面に対し同様のことをくりかえして、“読み”すなわち、ゲームの木の探索を行なう。人間は局面の瞬時的評価関数も持っていて、探索中に現われる味方の局面が非常に高いまたは低い評価を得たらその先は打ち切って別の枝を探索する。そしてその範囲でもっとも有利な手を選ぶことになる。

五目並べでは、局面 S において i 行 j 列の格子点に石をおく手の評価を $P_i(i, j)$ で表わす。そしてこの関数を合理的と思われる形に決める。詳細は文献²²⁾にゆずるが、点 (i, j) を中心にしてひとつの方向の石の並び具合に点数をつけ、4方向に関する点数を適当な方法で結合する。局面の瞬時的評価関数 $V(S)$ もその点数から決める。手の決定過程にはいろいろな変化が考えられるが、ひとつの方法として定数 l, k を与え、局面 S において $P_i(i, j) \geq l$ なるすべての手に対して読みを行ない、その最中に現われる局面 S について

$$V(S) - k < V(S) < V(S) + k$$

が成り立たないときはその先は読まない。すなわち、範囲を高い方に越えたときは現在より局面が十分改善され、逆の場合は悪くなることを意味する。別に、読みを永久に続けることがないように、その最大手数も決めておく。読みを終わったら最小の手数で有利に導かれる道筋に沿って手を選ぶ。どの手をとっても明らかに有利にならないときは、明らかに不利にならない手からランダムに選ぶ。これで必勝法を知らなくてもゲームがある程度うまくできるわけである。この方法で計算機に4追勝や2珠で4-3勝のある詰連珠を解かせたところ、非常に少ない読みで正解に達した。

人間の場合はこれにさらに学習能力が加わっている。評価関数の形や定数、さらに読みの範囲や打ち切り方法を過去の経験によって決めるようにすれば、学習し上達するプログラムを作ることができる。ゲームの学習に関する研究では Samuel のチェッカーのプログラム^{23), 24)} がよく知られており、きわめてすぐれたものである。これは、プログラムされた2人のプレイヤーの試合を通じても上達するが、専門的プレイヤーの記録を利用してさらに速く上達する興味深いものである。しかし局面の分類のようなことは人間が教えてやる必要があり、その点でルールを教えられただけで上達できる人間の脳とはまだ本質的なへだたりがあるといわなければならない。

6. 知能的な人間・機械系

従来の人間・機械系はいわゆる知能的な活動を要求されていなかったし、人間と機械の間で用いられる言語は自然言語のように時代とともに変化するということもなかった。以下で議論する人間・機械系とは知的活動（たとえばゲーム・プレイング、パターン認識、概念形成などの情報処理活動）をとおして人間と機械が結合されたシステムを指す。このシステムは人間と機械との相互作用によっておのおのの内部の情報構造を変化させ、さらに外部の情報構造（言語、環境など）になっている構造）を変化させていく。これまで心理学の分野においては主としてこれらのマクロな知的活動の分析に注意が集中され、それらを保証する物質的構造的基礎はすべて無視されてきた。一方これらの基礎を確立すべく生理学は著しい進歩をとげたが、対象があまりに複雑であるためにシステムを行動と結びつけてとらえるにはまだ程遠い。この漸層をうめること、すなわちミクロな素子の機能がどのようにマクロ

な行動に関連づけられているかを知ることがこの目的である。

上に述べたシステムの1例を構成するにはどのようなことが必要だろうか。できるだけ柔軟性に富んだ知的活動をひきだすためには、高度な情報処理を行なえる機械と、それと人間との間に単純な表現形式をもって情報を交換することができる入出力装置が必要である。ここではそのような情報処理機械として電子計算機 MC-1 を用い、パターン入出力装置を設計・製作した。また知的活動はすべてソフトウェア・システムで行なうためにシミュレーション言語 UCAS を開発した。以下それらの概略を述べよう。

中心的な情報の処理を普通の電子計算機に依存したために、入出力装置の設計がほとんど規定されてしまった。ここで製作されたパターン入出力装置(図 6.1)はインターフェースを介して MC-1 と結ばれ、その基本構成は図 6.2 に示されている。入力および出力情報はともに1か0が 6×6 の格子状に並んだパターンで表わされる。これは機械と人間との間で利用できる語を 6×6 のパターンに限定することを意味している。このパターンをどのように解釈して実験に利用するかは利用者の自由である。すなわち人間と機械があらかじめ決められた言語に従って活動するのではなく、相互作用を通して新しい言語を獲得してゆく可能性を与

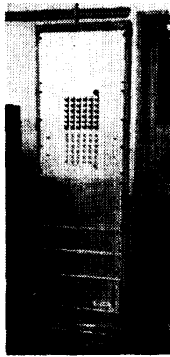


図 6.1 パターン入出力装置の外観

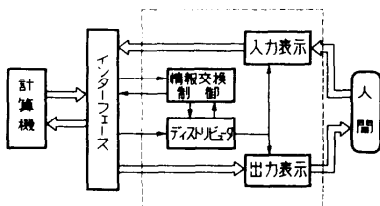


図 6.2 パターン入出力装置の基本構成

えている。

つぎに、シミュレーション言語 UCAS (Uniform Cell Array Simulator) は人間・機械系の機械の部分をシミュレートし、全体の活動を問題に応じて規定するためのプログラミング言語である。機械の部分は有限オートマトン(以下セルと呼ぶ)が n 次元 ($n=1, 2, 3, 4$) の格子点上に配列されており、各セルは近傍のセル群からの情報と外部(パターン入出力装置)からの入力を受けとってつぎの時刻での自分の状態を決めるといった一様セル構造をしている。シミュレートされる機械を一様な構造のものとした理由はつぎの通りである。自然界、工学系などには広く一様な構造をした情報処理システムがみられるが、それらは知的活動の基本的な骨格をなしており、かつ一様な構造の中から特殊な機能が形成される過程が人工知能の中心的な課題であると考えられるからである^{25), 26)}。ただし本来並列処理を必要とする一様構造機械を逐次処理の現在の計算機でシミュレートするのは多少無理があって、そのことはソフトウェア・システムにしわ寄せがきたり、人間と機械の応答のサイクルが長くなったりするというような欠陥になって現われてくる。

プログラムの構成は、一様セル構造機械の幾何学的構造と境界条件、入出力領域を指定する NETWORK, セルの近傍を指定する NEIGHBOR, セルの状態変換を与えミクロな行動を記述するための TRANSITION-L, さらに高い階層のマクロな制約を規定するための TRANSITION-G, 用いる関数を定義するための FUNCTION, セルの状態に出力を対応させる S-OUTPUT, ... などから成り立っている。NETWORK によって決められた構造においてセルの間を流れる信号は NEIGHBOR によって指定される。さらに TRANSITION-G によって決定された各セルの動作様式に従って TRANSITION-L で指定されたつぎの状態に移りて出力を決定する。

以上のようなシステムを用いてミクロなセルの行動が人間との相互作用を通じていかにマクロな行動に結びつくかについて研究しているが、まだ結論を得るに至っていない。

参考文献

- 1) 立川昭二：からくり——ものとの文化史，法政大学出版局（1969）。
- 2) E. A. Feigenbaum, J. Feldman (ed.): Computers and Thought, McGraw-Hill (1963). コンピューターと思考，好学社（1969）。

- 3) M. Minsky: *Artificial Intelligence, Information*, W. H. Freeman and Co. (1966). 情報の世界—コンピュータのすべて, 共立出版 (1969).
- 4) R. L. Beurle: *Storage and Manipulation of Information in Random Networks, Aspects of the Theory of Artificial Intelligence*, Plenum Press (1962).
- 5) E. R. Caianiello: *Outline of a Theory of a of Thought Processes and Thinking Machines*, *J. Theoretical Biology*, 1, 2, p. 204 (April 1961).
- 6) 吉沢修治, 南雲仁一: 一様な神経回路網モデルにおける興奮の伝搬について, 信学会医用電子・生体工学研究会資料 MBE 69-14 (1969-11).
- 7) B. G. Farley, W. A. Clark: *Activity in Networks of Neuron-like Elements*, 4th London Symposium on Information Theory, Butterworths (1960).
- 8) B. G. Farley: *Some Similarities between the Behavior of a Neural Network Model and Electro-Physiological Experiments, Self-Organizing Systems*, 1962, Spartan Books (1962).
- 9) N. Wiener, A. Rosenbluth: *The Mathematical Formulation of the Problem of Conduction of Impulses in a Network of Connected Excitable Elements, Specifically in Cardiac Muscle*, *Sobretiro de Archivos del Instituto de Cardiología de México*, 16, 3-4, (1946).
- 10) R. L. Beurle: *Functional Organization in Random Networks, Principles of Self-Organization*, Pergamon Press (1960).
- 11) 南雲仁一, 佐藤俊輔, 鈴木良次: 電気化学的能動回路—神経回路網のシミュレーション, 信学会非直線理論研究会資料 (1962-02).
- 12) 佐藤俊輔: 神経回路網のシミュレーション, 信学会非直線理論研究会資料 (1964-10).
- 13) J. Nagumo, S. Arimoto and S. Yoshizawa: *An Active Pulse Transmission Line Simulating Nerve Axon*, *Proc. IRE*, 50, 10, p. 2061 (Oct. 1962).
- 14) 中野繁: アソシアトロンとその応用—連想記憶装置に関する研究, 信学会インホメーション理論研究会資料 IT 69-27 (1963-03).
- 15) 中野繁, 南雲仁一: 神経回路網モデルによる連想記憶の研究, 信学会医用電子・生体工学研究会資料 MBE 70-6 (1970-06).
- 16) P. B. Post: *A Lifelike Model for Association Relevance*, *Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence* (1963).
- 17) H. D. Block: *The Perceptron: A Model for Brain Functioning I*, *Reviews of Modern Physics*, 34, 1, p. 123 (Jan. 1962).
H. D. Block, B. W. Knight, Jr. and F. Rosenblatt: *Analysis of Four-layer Series-coupled Perceptron II*, *Reviews of Modern Physics*, 34, 1, p. 135 (Jan. 1962).
- 18) 時実利彦: 脳の話, 岩波新書 岩波書店(1962).
- 19) 梅本亮夫: 連想基準表, 東京大学出版会(1969).
- 20) J. von Neumann, O. Morgenstern: *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press (1953).
- 21) 中村嘉平, 織田守矢: Heuristics と制御について, 計測と制御, 8, 6, p. 388 (1969).
- 22) 中野繁, 渡辺福德: ゲームにおける思考過程のシミュレーション, 信学会オートマトン研究会資料 A 68-21 (1968-07).
- 23) A. Samuel: *Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers*, *IBM J. Res. Develop.* 3, 3, p. 210 (July, 1950).
- 24) A. Samuel: *Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers II—Recent Progress*, *IBM J. Res. Develop.* 11, 6, p. 601 (Nov. 1967).
- 25) A. M. Turing: *The Chemical Basis of Morphogenesis*, *Phil. Trans. Roy. Soc., B*, 237, p. 37 (Aug. 1952).
- 26) W. L. Kilmer, W. S. McCulloch and J. Blum: *Some Mechanisms for a Theory of the Reticular Formation*, *Systems Theory and Biology*, Springer (1968).