

書 評

脳と電子計算機(前編)

—F. H. George 著: The Brain as a
computer in cyberspace—

三 谷 恵 一

本書「電子計算機としての脳」は、「純粹及び応用生物学の国際モノグラフィ叢書(International Series of Monographs on Pure and Applied Biology)」の中の「17」として、一九六一年に英国において Pergamon Press より出版されたが、ちなみに本書は次の五部門に分かれている。即ち、動物学、生化学、植物学、生理学的科学における現代の趨勢、及び植物生理学部門であり、本書は動物学部門の第八巻を占めている。著者のジョージ(F. H. George)は、ロンドン西方約百七十キロのブリストル大学(University of Bristol)の心理学科の教授であるが、その専門分野は広く、本書の参考文献として掲げられている著者自身の論文二十編より推察すれば、知覚を中心に、学習、行動、思考、認知、社会にまで及んでいる。但し、著者の関心は常に、上記の諸心理学的分野を網羅する一般的法則を抽出し、それに近代の確率論を中心とする数学、論理式を發展させた論理網(Logical networks)、自動機械(automaton)を發展させ

た電子計算機(electronic computer)理論、サイバネティックス(cybernetics)、及び哲学等を適用することによって、その有効性の故に心理学の諸分野で今後發展の可能性の大きいモデルないしは理論を作ることにある様であり、本書もその例外ではない。以下にその概要を紹介し、専門的であるが故に記述の省略してある部分を補い、注目すべき記述を特記し、問題点並びに疑問・不明点をも指摘し、更に出来れば本書を越えて心理学における脳と電子計算機との関係の問題を追求することによって、本書の詳細な書評としたい。

さて、本書は四一三頁という大著であるが、その構成は以下の十二章に分かれている。第一章「序論」、第二章「サイバネティックス」、第三章「哲学、方法論及びサイバネティックス」、第四章「有限自動機械類(finite automata)」、第五章「論理網」、第六章「電子計算機が学習する様にするプログラミング」、第七章「学習の心理学的理論」、第八章「行動と神経系」、第九章「神経系の理論とモデル」、第十章「知覚」、第十一章「知覚とその他の認知的機能」及び第十二章「要約」である。本前編で紹介するのは第五章迄であって、以下は後編にまとめる予定である。

第一章 序 論

原語は「The Argument」となっていて、本書の大筋を述べていると思われる。本書の目的を、「実験心理学と神経生理学の両者の立場より、サイバネティックスの原理の梗概を明らか

にし、それを現在分かっている行動法則と結びつけること」とし、「脳を電子計算機と同じ様な制御系 (computer-type control system) と考え、これまで生物系科学に於て暗黙の内 (implicit) にこざれていたものを判然と (explicit) させる」ことを意図している。

サイバネティックスの詳しい紹介は第二章にあるが、著者は次の三者がサイバネティックスの主目的であるとしている。第一に、「人間という有機体の主要な諸機能を実現出来る効果的理論 (effective theory) を、現実の金物モデル (hardware model) の有無にかかわらず作ること」であるが、ここで金物、即ちハードウェアとは、手で扱える物理的・化学的な物で出来た機械又は計算機を意味し、一般に真空管や継電器 (relay) の様なイレクトロニクス (electronics) の部分を意味し、これの反対語はソフトウェア (software) と呼ばれ、これは紙と鉛筆で行なわれる計算機の論理的設計やプログラミングを意味している。第二に、人間と同じ様な論理的方法 (logical mean) により、人間行動の機能を実現するモデルや理論を作ることであり、これはハードウェアであれソフトウェアであれ、機械により人間の働きをまねること、即ちシミュレーション (simulation) を意味する」である。第三に、「人間と同じ何かコロイド状化学的組織 (colloidal chemical fabrics) からモデルを作ること」であり、この三者が主目的である。ここで、第一と第二の区別がやや曖昧であるが、要は理論とシミュレーションの二者を分けて述べているのではなからうか。

次に、以上のサイバネティックスの三つの目的は、次の様な方法により達成されるとしている。即ち、情報理論 (information theory)、有限個の要素又は細胞と呼ばれる部分より成る有限自動機械類、後述のチューリングの機械 (Turing Machine) の様に、状態や部分の数を無限にした無限自動機械類 (infinite automata)、紙と鉛筆による青写真である論理網、汎用計数型電子計算機 (general purpose digital computer) のプログラミング、及びいかなる組織 (fabric) によらにせよ、総称して特殊目的電子計算機 (special purpose computers) と呼ばれる凡てのモデルを作ることである。但し、最後の場合は、離散量を処理する計数型、即ちディジタル (digital) でも良いし、オシロスコープに見られる様な電圧や電流の様な物理的変数の連続量で処理する相似型、即ちアナログ (analogue) であっても良い。更に、配線の決まったもの (prewired) でも、成長過程 (growth process) を含むものでも、又両者でも良いとしている。

更に、ハル (Hull) 等に対する批判にもかかわらず、仮説演繹法 (hypothetico-deductive method) を見なさず必要を説き、サイバネティックスの多くのアイディアは公理体系の周辺で作られていることを指摘し、電子計算機時代には、「一見、完全且つ絶望的に不明確で複雑な体系で、しかも論理的結果を出すものが、最も利用価値の高いものである場合がある」としている。そして、「行動を真に説明しようとする如何なるモデルも、ハルの仮説のセットよりも、もっと複雑になることは当然であろう」としているのは妥当な見解であると思われる。最後に、

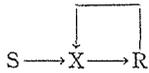


図 1 フィード・バック

に対して行なった反応(R)の結果を知り、それが前の反応を制御する様に働く場合である。例えば、沖の島をめざして発動機船を進ませる人は、自分が取っている舵により船の進行していく方向を知り、目標との関係を正常に戻すために常に舵を取り直す必要に迫られる

本書の主眼は事実の列挙ではなく方法論の問題であり、哲学、論理学、科学等の何であれ利用出来るものを使って機械の類似物(machine analogue)により、行動の高次形態である概念(concept)の世界までを作り上げることであるとしている。

第二章 サイバネティックス

サイバネティックスという言葉は、ギリシア語の舵手より作られたものであるが、一九四八年にウィナー(Wiener, N.)により最初に使用され、以後、制御(control)と通信(communi-cation)の科学的研究を現わすものとなり、無生物系(inanimate system)にも生活体(living system)にも同様に応用されている。ウィナーの基本的な考え方は、人間も含めた有機体は、他の制御と通信の系と本質的相違はないという点にあり、有機体及び閉回路制御系(closed-loop control system)の一般的特性は負帰還、即ちネガティブ・フィードバック(negative feedback)であるとす。このことは、負帰還により制御される電子回路を組むことにより、有機体の機能を本質的に模倣しうることを示唆している。ここで負帰還とは、ある系(X)が刺激(S)

である。この様な負帰還による誤差の修正(error correction)により人は車を運転し、自転車で行るのであり、その特徴は図一の様(XとRとの間に論理的には環状線(loop)を作ることである。以上から帰還、即ちフィード・バックは元へ返すという意味であり、それが負帰還であることは元を制御する様に返ることを指し、生活体の適応行動はこれに支配されている。これと反対の正帰還(positive feedback)という場合は、反応が一方向的に増幅される場合で、これに支配された生活体は破壊に追いやられることになるのではなからうか。

著者はここで、サイバネティックスと関係深い数学にふれ、それは数学自体と計算機的设计という二つの目的にそって発達して来たことを述べ、特に電子計算機の発展を支えたものとして、パスカル(Pascal)やカーマー(Catmar)の計算機の外に、バベージ(Babbage, C.)がパンチ・カード技術を分類に用いたことを示し、大規模な自動計算の父としている。又、統計力学や統計熱力学等の応用数学、ルベーク積分、群論を中心とする抽象代数学等がサイバネティックスに寄与している。

さて、サイバネティックス及び電子計算機の突然の発展の直接動機は第二次世界大戦に於ける航空機の高速度であった。対空高射砲の操作に必要なものは、敵機を追跡、即ちトラッキング(tracking)し、その方向、高さ、速度を予言し、高射砲の位置・方向を決め、砲弾の爆発範囲を決める(range finding)のであるが、従来人間による計算や位置選定では高速機には間に合わなくなっていた。当時、ブッシュ(Bush, V.)やウィナー

により電子計算機が設計され、あるものは組立てられ、量産に正に入ろうとしていた。これに天才的な数学者のフォン・ノイマン (von Neumann)、『シャノン (Shannon)』、『ビッグロー (Bigelow)』らも加わって、人間の介在なしに動く電子技術による機械が上記の対航空機戦に適しているという見解を持っていた。更にテレビジョンで使用されている走査 (scanning) の過程が入れられ、十進法 (decimal notation) よりも二進法 (binary notation) を使用した方が良い、という新案が採用された。こうして世界最初の電子計算機マーク一号 (Mark I) が一九四四年にハーバード大学に於て完成したが、その能力は乗算に五秒かかり、七十語 (即ち七十個の情報) を記憶するものであった。しかしその後のイレクトロニクスの発達により、現在開発中の電子計算機は、乗算をナノセコンド (nanosecond) 即ち十億分の一秒単位で表わす時間で行ない、二十六万語以上を記憶する能力を持つと言われている。一方、追跡の問題は、機械が負荷還という人間 (有機体) 特有の活動を模倣することを要求し、人間の手足の様に「従順な機械 (docile machine)」の製作が必要となって来た。こうした機械の簡単な例の一つに整温器 (thermostat) があるが、重要なことは温度の変化を制御するものは温度自身であり、従つてこの種の機械は自動制御機械 (self-controlling machine) 又は自動制御装置 (servomechanism) と呼ばれている。

次に、電子計算機の一般形態、使用される言語 (language of computers)、『入力 (input)』、『出力 (output)』、『回路 (circuit)』、『ブ

ログラミング (programming)、『計数型と相似型等について一応触れているが、難解な電子回路の図はあつても説明は非常に簡単であり、「詳細なことは他のテキストを参照すること」と明記している。この様な著者の処理に対して、筆者は感服すると同時に疑問をも投げかけざるを得ない。今、手回し計算機や電動計算機をも含めて電子計算機に対する全くの素人が、簡単なプログラミングが出来る迄学習するには最低三、四日は必要であり、そのテキストは百頁近くを要すると思われるが、それにほとんど触れておらず、しかもその理解と学習のない読者には本書は極めて難解である様な構成になっている。このことは、本書の対象である生物科学の分野の学者や学生が、電子計算機をマスターしていることを前提又は要求していることであり、翻つて我々心理学を専攻する者は感服し、又奮起せざるを得ない。思うに、ダイジェスト的知識によるただ漫然たる電子計算機の理解は、行動科学の進歩にほとんど貢献する所はないであらう。

一方、脳と電子計算機の対応の問題としている本書が、計算機の巨視的性質、即ち情報の流れ方の論理的メカニズム、及び微視的性質、即ち回路や部分の電子工学的説明の両者を省略することがはたして妥当であらうか。これもプログラミングと同様常識に待つべきだと著者は考えていると思われるが、その常識に対する心理学の立場からの新しい見解や整理の仕方をも我々は期待しているのである。仮に有機体のある機能がシミュレートされたとしても、その結果が同じであることと過程が同じ

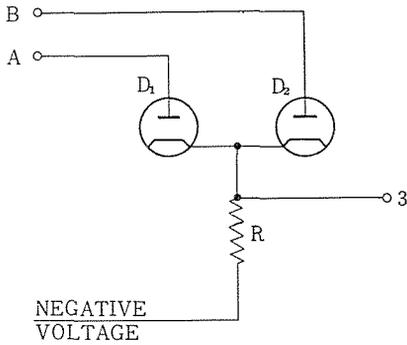
であることが両立する保障はないのであって、特に過程を問題とする心理学が生理学的研究に深い関心を寄せる時、同時に電子頭脳の内部構造や機能に同様の関心を寄せる事が急務であると思われる。このことにより、電子工学の発達が、対象が複雑であるが故に進歩が徐々であらざるを得ない心理学の理論化やモデル化を逆に促進することが十分に考えられるのである。

さて前に述べた二進法に於て用いられる数字は「0」と「1」であり、この二進法の数字 (binary digit) としう英語を短くして新しく作られたビット (bit) としう言葉が、二進法の数字の数、即ち桁数を表わしてゐる。この0と1は、そのまま論理的には「偽 (false)」と「真 (true)」を現わし、電気的には電流の「OFF」と「ON」を現わし、電圧の「低い」と「高い」を意味づけることが可能である。さらに神経におけるシナプス (synapse) を越えての神経二元、即ちニューロン (neuron) 間の伝達 (transmission) には部位的加重 (spatial summation) と時間的加重 (temporal summation) が生じるから問題は別として、神経細胞 (nerve cell) 及び軸索 (axon) の伝導 (conductance) における悉無律 (all-or-none law) としう二進法はうましく対応するのである。又、0 から9迄の十進法の数字十個とアルファベット二十六文字の合計三十六の情報 (information) の処理が最低必要である所から、二進法で動く電子計算機の入力 (input) 用のテープは六列 (即ち六ビット) 以上の穴を開け得る様になつていて、2⁶個、即六十四個の情報処理し得る。この穿孔されたテープ (punched tape) を光電式テープ読取器 (photoelectric

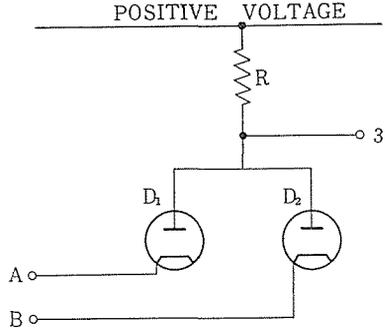
tape reader) にかければ、各列で1を示す穿孔部分の通過した光トランジスタは ON に、無穿孔部は OFF に変わり、かくてビットに変換された情報が電子計算機の中に入つて行く。

次に、こうして本体中に入ったビットは次の三つの回路により処理される。即ち、AND 回路、OR 回路及び NOT 回路で、それぞれ論理学では論理積 (conjunction)、論理和 (disjunction) 及び否定 (negation) と呼ばれている論理的処理を行なう電子回路であり、著者は図二を掲げている。それらの動きは論理学やブール代数 (Boolean Algebra) では AND を AB 、OR を $A+B$ 、NOT を \bar{A} で現わすが、今、二値論理学 (two-valued logic) で取りうる二種の結果である「真」と「偽」を「1」と「0」に置きかえて真理表 (truth-table) をそれぞれの回路に作ると、図三の通りである。ここで例えば OR 回路を見れば、入力 A、B の両者又は一方が ON になれば、二極真空管 D_1 、 D_2 のフィラメントの両者又は一方から熱電子がそれぞれのプレートに向けて飛び、従つて正電圧部から電流が流れ、出力 3 が ON になることが分かる。ここで R は抵抗であり、 $\bar{1}$ は接続、 $\bar{0}$ 又は $\bar{1}$ は無接続を示してゐる。

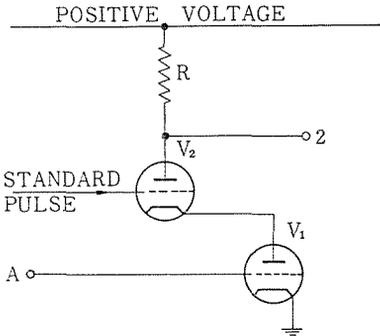
さて、AND、OR、NOT の三種の回路で、我々の計算には論理的には十分であることが今後分かるであろう」と著者は述べているが、我々には簡単に納得のいく問題ではないと思われ、この点でも著者の説明は不十分であり又不明瞭でもある。ここで参考の為に「X プラス Y」という加算を上記三種の回路で行なわせている森口繁一博士の説明の要旨を紹介してみよう。今



AND回路



OR回路



NOT回路

図2 AND, OR 及び NOT 回路の電子工学的図。前二者では、A, Bが入力、3が出力を指し、NOT回路では、Aが入力、2が出力を意味している。

A	B	$A \cap B$	$A \cup B$
1	1	1	1
1	0	0	1
0	1	0	1
0	0	0	0

A	$\sim A$
1	0
0	1

図3 AND, OR 及び NOT 回路の真理表

と同じものが出て行き、逆に一方が OFF の場合は他方に何が入っても何も出て行かないという様にドアの様に利用出来るので、一般にこうしたものを門 (GATE) と呼んでいる。

以上の三種の回路により、計算機内部でビットが処理され、

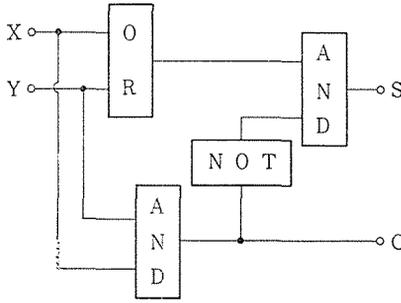


図4 半加算機の回路

この半加算機を二つ使用し、更に OR 回路及び遅延回路を加えることにより、一桁以上の加算が可能な全加算器が出来るのである。以上のように、NOT 回路はビットを反転し、OR 回路は一方だけで話は通じ、AND 回路は一方が ON

の場合は他方に入ったもの

の状態を維持する。かくて 1 と 0 の状態、つまりビットが保持されるのである。ここで横道にそれるが、著者の図五には 2、4 等の記号が入っていて、しかもそれらの意味については図でも本文でも全く触れられていない。このことは本書の図のかなりの部分に見られ、更に図の誤りも多少見られることは本書の問題点の一つとしてよいであろう。

従って情報が処理されながら流れ移動させ得ることが分ったが、もう一つ計算機で大切なことは、長い場合は半永久的に情報を保持・記憶するための貯蔵の仕方 (method of storage) である。その為にはフリップフロップ回路 (Flip-Flop circuit) というものが使用され、著者は図5を掲げている。フリップフロップはシーソーの様一方が上になれば他方は必ず下になる様なもので、しかも明確な作動が働かない限りその状態が変化しないものを意味している。図五は二つの入力 (Set 及び Reset) を持つていて、例

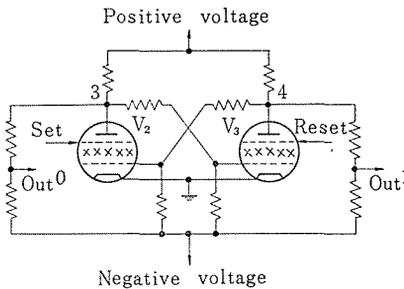


図5 フリップフロップ回路

例えば Set 入力があれば一方の out 電圧が正になり ON の状態になり、他方の out はその後 Reset 入力がか来ない限り OFF の状態を維持する。

かゝる状態、つまりビットが保持されるのである。かくて 1 と 0 の状態、つまりビットが保持されるのである。ここで横道にそれるが、著者の図五には 2、4 等の記号が入っていて、しかもそれらの意味については図でも本文でも全く触れられていない。このことは本書の図のかなりの部分に見られ、更に図の誤りも多少見られることは本書の問題点の一つとしてよいであろう。

従って情報が処理されながら流れ移動させ得ることが分ったが、もう一つ計算機で大切なことは、長い場合は半永久的に情報を保持・記憶するための貯蔵の仕方 (method of storage) である。その為にはフリップフロップ回路 (Flip-Flop circuit) というものが使用され、著者は図5を掲げている。フリップフロップはシーソーの様一方が上になれば他方は必ず下になる様なもので、しかも明確な作動が働かない限りその状態が変化しないものを意味している。図五は二つの入力 (Set 及び Reset) を持つていて、例

二進法の一桁の数字 X と Y の加算を行なう場合を考えると、答えは最大二桁となる。答えの一桁目を S、二桁目を C で表わすと、C は X と Y の両者が共に 1 の時のみ 1 であり、従って、 $C = XY$ であり、同様に $S = (X \cup Y) \cap \sim(X \cup Y)$ である。

これで、論理的には AND、OR、NOT の三種の回路で十分ことが明らかであるが、電子工学的にも例の三種の回路で十分であることが図四より明らかであり、この様な回路網を半加算機と呼んでいる。

この半加算機を二つ使用し、更に OR 回路及び遅延回路を加えることにより、一桁以上の加算が可能な全加算器が出来るのである。以上のように、NOT 回路はビットを反転し、OR 回路は一方だけで話は通じ、AND 回路は一方が ON

こうしたフリップフロップを数個並べることにより、またま
 りのある情報を保持する記録器又は置数器 (register) を作るこ
 とが出来来る。例えばフリップフロップを三つ使用して三ビット
 の記録器を作り、その出力が上の桁から「101」であったとする
 と、これは

$$1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 5$$

で、五という数字を保持していると考えることが出来よう。そ
 して、今もっと多くのフリップフロップを持った記録器を考え
 あるビットの配列は「加えよ」とか「割れ」という命令を意味
 する様にすれば、数値と同様命令 (order, instruction) をも保
 持出来ることになる。

以上著者から離れてかなり詳しく電子計算機の初歩的構造を
 述べたが、それが行動科学に少しでも役立てば幸である。更に、
 記録器から記録器への数値及び命令転送 (shift)、解読器 (de-
 coder)、符号器 (coder)、補数器、番地 (location) 及び宛先
 (address)、指標 (index)、ジャンプ (jump) 命令、繰返し計
 算、サブルティン (subroutine)、プログラミング一般、流れ図
 (flow chart)、磁気コア、磁気ドラム、磁気ディスク、磁気テ
 ープ、それに出力のラインプリンター等の基礎的説明は必要で
 あり、その理解は我々の行動科学を進歩させるであろうが、紙
 面の関係で著者同様筆者も触れることが出来ないことは残念で
 ある。但し、巨視的には電子計算機は入力装置、人間にとって
 常識的には頭の働きにあたる制御装置 (control system)、ノー
 トにあたる記憶装置 (storage system)、ソロンンにあたる演算

装置 (arithmetic system)、出力装置の五者により構成され、
 例えば京都大学の電子計算機 KDC-1 は図六の様な構成になっ
 ている。即ち、数値も命令もまず記憶装置に入り、命令群はジ
 ャンプ命令がない限り一つずつ順番に制御装置に転送され、そ
 の命令の内容に応じた必要な数値を記憶装置が演算装置に転送
 し、ここで前から入っていたものとの間で加、減、乗、除の四
 則演算、左右の桁移動、大小等のある種の判断又は決定等のい
 ずれか一つのみ実行
 してその結果を記憶
 装置に転送してくる
 から、その結果が必
 要な場合は出力装置
 により数字又は文字
 に紙に高速タイプラ
 イターで打たせれば
 よいのである。この
 様の一つ一つは単純
 な作業を何度も繰返
 し高速で行なうこと
 によって電子計算機

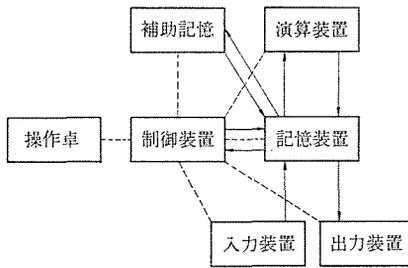


図 6 電子計算機の原理的構成 (実線は情
 報の流れを示し、点線は制御
 信号を示す)

は始めて複雑な計算を完成するのである。この様に計算の過程
 を命令語の組合わせの形でまず記憶装置の中に入れてしまい、
 あとは原則として人間の介在なしに結果が出力されるのでこの
 ことをプログラム内蔵 (modulo operand) と呼び、しかも命令語

は見かけの上では数値と全く区別がつかない。これらの着想はフォン・ノイマンによるもので、電子計算機の発達に画期的な貢献をしたとされている。彼は又、各単位を論理的に二重にして (multiplexing) 同一単位同士が量子化されたともいうべき短時間に同時に故障する確率は非常に小さいことを利用して、故障の発見及びそれに耐えることをも考案している。

なお、図六の補助記憶 (auxiliary memory) とするのは記憶装置の容量を越えるデータを一時本体から外れた磁気テープ等に記憶しておくもので外部記憶装置とか永久記憶装置 (Permanent memory) 等とも呼ぶことが出来る。また操作卓 (operator's console) は人間が手動により電子計算機を制御する部分で、次の様な機能が与えられている。即ち、各種の記録器 (register) の内容をランプの配列 (lamp array) により表示し、停止 (halt) やビットの和が奇数又は偶数であることを利用して故障を発見するパリティ・チェック (parity check) 等の計算機の状態をランプにより表示し、又ボタン操作により計算を開始 (start) させたり記録器の桁がはみ出る (overflow) のを止めたりすることが出来る。

この様な構造を持った電子計算機という機械に学習 (learning) をせよ、思考 (thinking) をさせる可能性が出来て来たのはサイバネティックスの決定的な収穫であるが、著者はここで疑問を投げかけ「我々は本当に機械は思考すると言い得るであろうか。また人間はある意味では機械にすぎないとは本当であろうか」と問い、これらは哲学的、心理学的に興味がある問題であ

るとしている。その答えは、サイバネティックスは行動主義 (behaviorism) にのっとっていることを前提にして、サイバネティシアンは次の二者のうちどちらかであろうと考えている。第一は「機械は考える。人間が思考すると同じ様に機械に思考させることが可能である」であり、第二は「人間の機械的な面のみを扱う限りに於て、第一の答えが、たといそれが正しくなくても、あたかも正しいかの様に振舞うことが出来る」であり、著者は第二の答えが妥当であろうとしている。

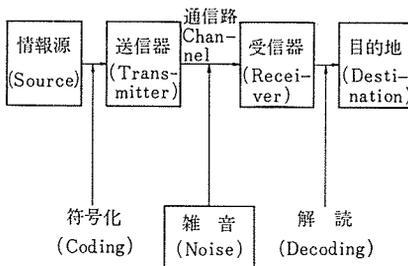


図7 通信系のブロック図

最後に情報理論又は通信理論 (communication theory) と呼ばれるものに触れている。通信系の模型はブ

ロック図 (block diagram) によれば図七の様に表現することが出来る。この様に我々は情報を音声や文字という符号に変えて電話や手紙を利用して目的地へ到達させるのであるが、受信者はその際特に解読しているという意識がないのは我々が幼少時よりその符号を学習しているからであって、外国語や聴き取りにくい電話は明らかに解読作業が必要なことを意識化させるであろう。聴き取りにくい電話から分かるように、必要な信号

(signal) を妨害する雑音 (noise) を出来るだけ少なくすることが必要であり、従って各々の頭文字を取った S/N 比を最大にすることが要求される。

次に情報量の定義の問題であるが、今同等な可能性を有する不確定な n 個 (n は整数) の事象の内いずれか一つに確定する場合、得られる情報量は n が大きい程大きい、つまりその一つが起る確率 $1/n$ が小さい程情報量は大きいと考えられ、これは情報量の公理である。さて、イロハ四十八文字のみによる電報を考えた場合、一字は (48) \equiv 48 の中から選ばれ、二字は (48)² \equiv 2304 の可能性の中から選ばれるが、一方では二字の電文は一字の電文の二倍の情報量を運ぶと考えられるべきである。このことは情報量は可能性の個数の対数に比例していることを示し、その底を2にすることにより、 $\log_2 2 \equiv 1$ 即ちビットを情報量の単位にすることが出来る。従って、「或る事象が生ずる確率が P であるとき、この事象が生じたことによって生ずる情報量は $\log_2 \frac{1}{P} \equiv -\log_2 P$ ビットである」と定義する。更に、 m 個の事象が独立にそれぞれ生ずる確率を一般に P_i とすると (但し $\sum_{i=1}^m P_i \equiv 1$)、この情報源から生ずる一事象あたりの平均情報量 (エントロピー [entropy]) H は

$$H = - \sum_{i=1}^m P_i \log_2 P_i$$

で表現出来、これは個々の情報ではなく、それらを発する源の性質を規定している。

更に独立試行ではなく、長さ m 個の事象の系列 ($E_1, E_2, \dots,$

E_m) が起り、その次に事象 E_{n+1} が生ずる条件確率 (conditional probability) $P(E_{n+1} | (E_1, E_2, \dots, E_n))$ が n 個前の事象の系列 (E_{n-1}, E_n, \dots, E_1) のみによって定まる時、この確率過程 (stochastic process) を n 重マルコフ過程 (Markov process of order n) 又は n 重マルコフの鎖 (Markov chain) と呼ぶ。又上記の条件確率は、ある状態からある状態への遷移に際して事象 E_{n+1} が生ずるとも考えられるので遷移確率 (transitional probability) とも呼ぶ。マルコフの過程はブラウン運動や酔歩 (random walk) の問題として古くから取りあげられたが、極端な零重マルコフ過程 (即ち独立事象) を除いて最も簡単な単一又は単純マルコフ過程 (simple Markov process) を例に、遷移確率 p_{ij} の二つの表現方法を紹介しておこう。一つは図八の様な遷移確率行列 (transitional probability matrix) であり、これは事象数 n 行事象数 n 列の正方行列で、各行の元

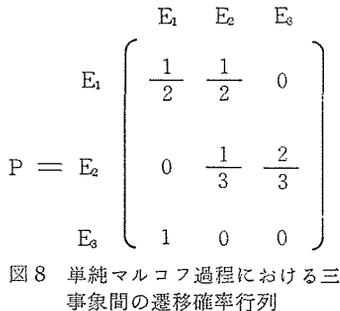


図 8 三行におけるマルコフ過程の遷移確率行列

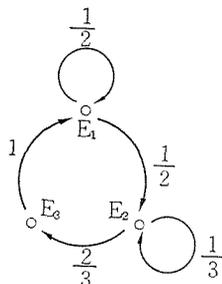


図 9 のノ線ヤシンの図

素の和は1であり、且つあらゆる元素は負ではない。他方 Shannon (Shannon) はこれを図示する方法を考え、図九の様なものを Shannon 線図と云う。

以上の通り著者から離れて情報理論の基礎的説明を記したが、これをかなり省略しているのも本書の問題であろう。但し、著者は行動科学における条件確率の重要性を力説し、単純マルコフ過程で満足することなく有限個の n 重マルコフ過程の重要性を説き、その統計的同質性、即ちエルゴード過程 (ergodic process) 等に迄言及してゐるのは注目し値しよう。そのあと自動制御を表現する非線型微分方程式 (non-linear differential equation)、『文章構成法 (syntax)』、『意味論 (semantics)』等に簡単に触れた後、次の結びで本章を終わらしてゐる。「サイバネティックスは通信の技術的問題に関係する人々を、問題を明確にすることにより助けたのみならず、それ以上に生理学者や心理学者を助けたのである。例えば長い間神経生理学者は反射弓 (reflex arc) の概念により導かれて来たが、現在ではホメオスタシス (homeostasis) 型の制御組織のアイディアに変化してゐる (これはプリブラム [Pribram] の TOTE 等を指してゐると思われる)。この発展は生物学的理解を広げるのみならず、数学の応用と記述の正確さの増大をももたらしてくれる」。

等三章 哲学、方法論及びサイバネティックス

前章はそれ以後に述べられていることも含めてかなり詳しく紹介したので、今後は重複を避けよう少し簡単にする。この章

は哲学の問題と論理学とに大きく分けられるが、第一に哲学的科学と記述の科学との区別は程度の問題にすぎず、哲学的ないしは言語的分析 (linguistic analysis) は科学的過程の予備的なものと見なしうると考えてゐる。そして心理学者は言語とその使用方法にもっと熟達 (sophisticated) しなければならず、言語的困難性をよりよく認知してゐると思われる哲学者の書いた哲学上の問題の概要を心理学者が読むことをすすめている。例えばいかなる理論も言語も、他の次元の理論や言語で表現出来るという高等 (二次的) 理論 (meta-theory) や高等論理言語、即ちメタ言語 (meta-language) の存在に触れてゐる。例えば「山は高い」の「山」は山そのもの自体に対して述べてゐるので対象言語 (object-language) であるが「山は名詞である」の「山」は山という日本語について説明してゐるのでメタ言語である。又心理学の理論形成の過程は三つの段階に分けられて、第一に観察による資料の収集、第二に帰納的汎化 (inductive generalization)、『第三に演繹的推理 (deductive inferences)』、『最初は仮説 (hypothesis) であるが強く確証やルール法則 (law) となる』と整理してゐる。

次に論理学の紹介とその意義を説き、結論的には、「論理計算 (logical calculi) は科学的理論の記述目的のために明確な解釈 (explicit interpretation) を与えることが出来ること、それはモデルとして使用されハードウェア (金物) で再生出来ること、及びその操作と解釈とは科学理論の様に人間行動の最も複雑で微妙なものであり、従つて心理学的興味がかなりある」と

述べている。まず客観的事象について情報を与える表現であるところのいわゆる叙述文を命題 (proposition) 又は表述 (statement) といい、これを分解して述語 (predicate) と名辭 (term) とし、命題の論理学的関係を研究するものが命題計算 (propositional calculus) であり、述語に関する論理学が述語計算 (predicate calculus) 又は函数計算 (functional calculus) である。命題計算は接続詞、即ち連辭 (connector) を中心に公式化するところであるが、チャーチ (Church) による公式表示法 (formulation) ににより、原始記号 (primitive symbols)、公式規則 (formulation rule)、推理規則 (rules of inference)、公理 (axioms)、定理 (theorem)、恒真式 (tautology) 等に触れているが、記述が簡単である上に筆者に予備知識がないためかなり難解な部分があり、本書の外に論理学一般の学習の必要性が痛感される。記号は \cup 、 \cap 、この外に、内含又は含意「 \supset 」(inclusion)、推理「 \rightarrow 」(implication)、同一又は同値「 \equiv 」(an equivalence relation)、括弧「 \square 」(brackets)、括弧「 \bullet 」(dot) 等が新しく出現するが、著者が論理積を「 \odot 」で示しているのは括弧とまぎらわしく、論理和も「 \cup 」を使っているのはいずれも \cap と \cup に統一した方が工学的発展を行なう場合にはより明晰になると思われる。これらを使って三段論法 (syllogism) を表現すると

$$[A \subset B] \cap [B \subset C] \rightarrow A \subset C \quad \text{となす。}$$

また対象を個体 (individual) とクラス (class) に分けた場合、凡てのクラスが命題又は文章の型にされたのがブール代数であ

る。

一方、函数計算に関しては一次の函数計算 F_1 に於て、「凡ての x に對して $F_1(x)$ である」とか「 $F_1(x)$ の様な x が少なくとも一つ存在する」の様に述語の機能を分析することが出来るが、前者の「凡ての x に…」は全称限量詞 (Universal quantifier) と呼び (x) 又は ($\forall x$) で記し、後者の「ある x に…」は存在限量詞 (Existential quantifier) と呼び (E_x) 又は ($\exists x$) で記している。従つて上記の二つの文章は各々「 $(\forall x) F_1(x)$ 」と「 $(E_x) F_1(x)$ 」等と表現出来る。更に真理表、二値論理学、多値論理学 (many-valued logic)、様相論理学 (modal logic) 等を紹介した後、「心理学者の理論は一般に不正確で散漫という意味において曖昧であり、それを避けるために方法論者や論理学者の言語的熟達が必要である」と述べ「サイバネティックスは応用論理学の一つと見なすことが出来る」として紙で出来た機械 (paper machine) とあるチューリングの機械 (Turing machine) を取り上げつゝ、著者は「我々に時間と金があり、その書き方が決定手続 (decision procedure) である限り、設計図の型になつたいかなる機械も金物にすることが出来る。但し計り知れない程複雑になる可能性があるため、理論の妥当性検討に紙機械が使用される」と述べ、チューリング自身も「凡ての機械は自分の機械に還元出来る」と考え、万能チューリング機械 (Universal Turing Machine) と呼んだ。これは一つの記号が記入されている正方形 (square) を連れたテープ、それを一つずつ走査する走査器 (scanner)、あらかじめ定められた教

示 (instruction) に従い走査した正方形を抹消したり、テープを左か右か停止かのいずれを取るかを決定する制御器 (control) より構成されている。教示は一般に

$$q_i S_j S_k q_l$$

という四つの記号のセット (quadruple) で定義出来るが、ここで q_i は「機械の現在の状態」、 S_j は「走査された記号」、 S_k は「機械の次の動作」、 q_l は「機械の次の状態」を指し、例えば $q_1 S_2 q_3 S_4$ は、 q_1 で S_2 を走査し、次に左へ一正方形分だけテープを動かし、 q_4 に入るを意味している。又十進数 (decimal number) は「1」の集合で表現する。この様にチューリングの機械そのものは非常に時間のかかるものであるが、今我々が問題にしているのは機械は原則として (in principle) 何をすることが出来るかであって、最近のダイオード、トランジスタ、集積回路等の発明による電子工学の発達は時間の問題を次々と解決していることを認識するにつれ、問題は時間や金銭ではなく論理であるとしたチューリングの偉大さが再認識される。

第四章 有限自動機械類

本章は第五章とかなり重複するが、前半は有限自動機械作製のための基礎を述べ、後半は実際のハードウェアによるモデルを紹介している。マッカロとピッツ (McCulloch & Pitts, 1943) やクリーン (Kleene, 1951) の努力により神経の活動を論理的に表現する方法が考えられた。彼等は神経の活動を理想化 (idealization) することによりアプローチを進め、例えば有

機体の神経元に対応するものとして論理的に次の様な原理に従い○印で現われる人工的な要素 (element) を考察した。それは、入力と出力の二つの繊維を持つこと、不応期 (refractory phase) 及び発火 (firing) 時間は各々同じ時間であること、閾値 (threshold) h を有しその値は○の中へ記入すること、入力には↑印で現われる興奮繊維 (excitatory fiber) e と↓印で表わせる抑制繊維 (inhibitory fiber) i の二種があること等を仮定し、スイッチ回路や論理式に関連出来る様にした。

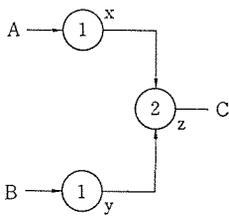


図10 三要素 (x, y, z) 間の神経網の例

あるとすると、z の出力 C は

$$C = A \cdot B \cdot z$$

で表現出来る。ここで \cdot は必要十分条件を示している。この様な神経網 (neural net) に於ける論理性的な表現法をもっと巨視的な全体的行動 (molar behavior) に応用し、例えば条件反射 (conditioned reflex) の本質である連合 (association) 又はサインの姿を著者が論理網 (logical net) にしてみたのが図十一で

式に前後関係を強調する際には、 $(t-1)$ 時から t 時に進むという様に時間に関する添字 (suffix) をつける。今三要素 (即ち三つの神経元) x 、 y 、 z が図十の様な関係に

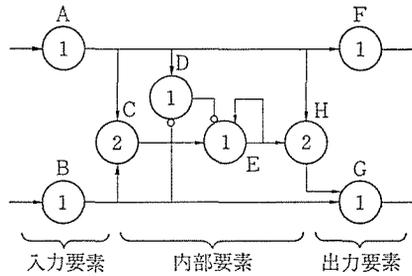


図11 連合を示す論理網

なる。しかし一回のCRにより消去 (extinction) してしまうのは大きな欠点であるが、著者は第五章で消去を防ぐ方法を工夫している。なお、著者がこの様な論理網を「トールマン (Tolman) 流の信念 (Belief) 又は Belief work と呼んでいるのは、論旨をスマートにしようとする著者にしては奇異な感じの用語である。一般に著者の用語や文章にはこの様なヨーロッパ的な古さが感ぜられて、それが本書の内容を広く深く執着性の強いものにしてている一方、文章が極めて難解でありその結果読者には不明瞭な部分が多くなり出てくるを得ない様に思われるのは残念である。

次に、ある自動機械にk個の要素があり、それが現在Pを含

ある。即ち、条件刺激(CS)はAに入力し、無条件刺激(UCS)はBに入力するとし、無条件反射(UCR)はGより出力すると考えると、今CSとUCSの同時生起により、フィードバックによる環状要素(loop element)であるとこのEは発火を保持する様になる。その後、CSのみが生じてもGは出力し、従って条件反射(CR)が形成されたこと

	N_1	N_2	----	N_k
P	1	0	----	1
P-1	0	1	----	0
P-2	1	1	----	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
P-r+1	0	0	----	1

図12 入力行列

ラー (error) の役割についても研究し、「決定的ロボット (deterministic robot) が信頼の出来ない要素 (unreliable element) によって如何に構成されるか」という問いの下に確率論理学 (probabilistic logic) を中心にエラーの制御 (control of error) という重要な課題を解決したといわれる。彼の考案したソフトラウエアーの要素の Shaffer stroke, Majority organ, Multiple line trick はいずれも斬新なアイディアに満ちている。

最後に、ハードウェアとしてウォルター (Walter, 1953) の電気により動く亀 (the tortoise) として知られざる考えの模型 (Machina Specularis) マッシュュー (Ashby, 1948) の超安定 (ultrastability) の過程をモデル化したホメオスタート (Homeostat) シヤノン (1951) の迷路走行器 (Maze Runner) 等を紹介している。例えばウォルターの考える模型では「受容器 (receptor) には光電管 (photoelectric cell) を殻 (shell) に

ついた断続スイッチ (ring-and-stick limit switch) を使用し、中枢神経には増幅器 (amplifier) を、効果器 (effector) は単一駆動車 (single front driving wheel) 及び操舵モーター (steering motor) を使っていて、それにより障害物を避けて動くことが出来る。しかし著者は、以上の研究者達が金物により具体的には有機体の模型を作る努力をしたのに対して、アトリー (Utley, 1954, 1955) の分類系 (classifying system) のモデル

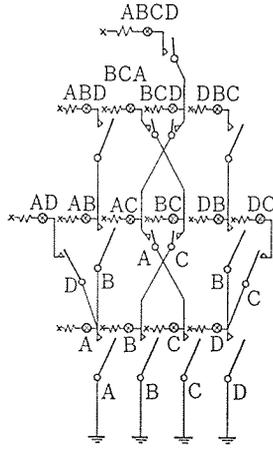


図13 アトリーの分類系
 金物のモデル
 による
 (四十三) は有機体
 行動する
 がいかにか
 行動する
 原理を扱
 っている
 点で興味
 深いとい

ている。アトリーは四つの入力 A, B, C, D があるとき、これを凡ての可能な結合 (AD, AB, AC, BC, DB, DC, ABD, ABCA, BCD, DBC, ABCD) に分類するモデルを考え、後には条件確率の概念をも折り込んだ。著者は「感覚は分類系の働きである」というハイイク (Hayek, 1955) の考え方を強く支持している様であり、それをモデル化したアトリーの分類系の金物に影響されるころ大であったと思われる。なお、図十三で「 \sim 」はスイッチ、「 \cdot 」はアース、「 \otimes 」は出力ジャックを示していると思

われる。

第五章 論理網

本章では著者は第四章で明らかとなった論理網が、知覚 (perception)、『条件づけ (conditioning)』、『動機づけ (motivation)』、『強化 (reinforcement)』、『記憶 (memory)』、『感情 (emotion)』等の心理学上の理論の予言価を高め、その改訂を容易にする効果的方法であることに興味を持ち、それを自ら試み多くの例を上げている。但しこの際は行動をマッカロとピッツの様に神経元の活動という様な分子行動 (molecular behavior) からアブローチするのではなく、当分全体的行動の段階 (molar level) でのみ適用している。

まず図十一の連合の論理網は一度の CR で消去してしまうという欠点を持っていたが、これを克服するために著者が考案した新しい論理網が図十四であり、著者の表現によればこれも B-net work である。但し図の点線以下はこれを動機づけにも結合しているのでしばらく除外して考えてみる。ここでは図十一に比して環状要素 C が増大し、しかも相互間のフィードバックを作っているのが特徴であろう。今 a を CS, b を UCS, b' を UCR とし、(ab)' を一種の出力とすれば、

$$(ab)' = (a_{t-1} \cap b_{t-1} \cap c_{t-1})$$

$$U(a_{t-1} \cap b_{t-1}) \cup (a_{t-1} \cap c_{t-1})$$

$$U[(b_{t-1} \cap c_{t-1}) \cap \sim d_{t-1}] \dots (1)$$

となり、この論理式中 (ab)' = $a_{t-1} \cap c_{t-1}$ は CR (条件反射)

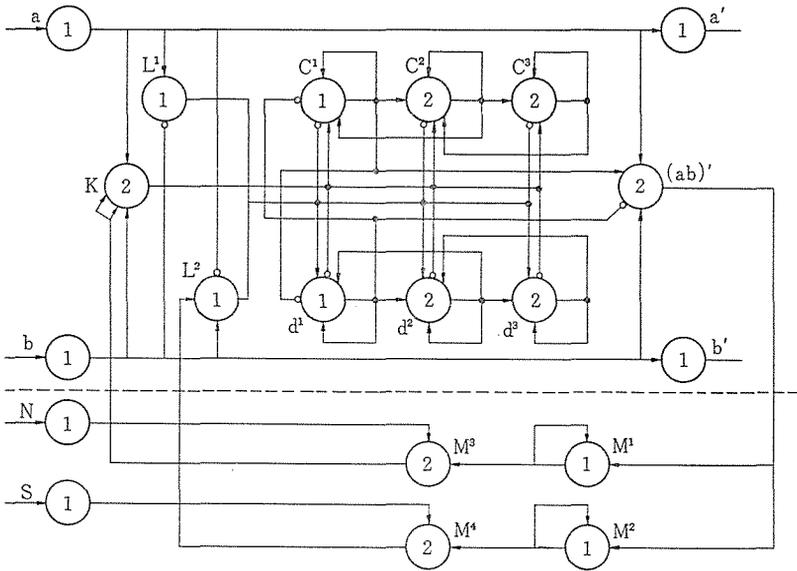


図14 図11を發展させた Belief (信念) 網に動機づけの系を結合させたもの。

を現わしていると考えられる。ここで重要なことは記憶の役割をはたしているCⁱが消えてしまわないことであり、従ってCSの提示されることにCRは消去することなく反応し続ける。ここで参考のため

$$C^i = [(K_{i-1} \sim d_{i-1}) \cup (C^2_{i-1} \cdot (Ed) C^1_{i-1} \sim (L_{i-1} \cup (L^2_{i-1} \dots (2) \cdot a_{i-1}))$$

この様な改良された論理網にも欠点がない訳ではない。例えば「1回CSとUCSの結合によりCRが完成する」とは一般的な条件づけの姿ではない」とか「(1)式に於て(ab) = a_{i-1} ∩ b_{i-1}」であることは、UCRと異なる厳密なCRの表現ではない」等の色々の批判が我々の頭に浮かぶ。これに答えるかの様に著者は「意図は方法論や原理であって、本当のものは非常に複雑でおそらく電子計算機を必要とし、それも自動符号化(automatic coding)の助けによらねばならないであろう」と述べている。また「信念(Belief) 又は B-net work の定義をようやく述べよう」と「信念とはクレチェフスキー(Krechevsky)の仮説やトールマンの期待(expectancy)と極めて関連深く純粋に理論的な用語であり、覚醒された信念(activated belief)を期待と呼ぶ」とか「信念とは入力と出力を結合理論的用語である」と述べていて、体制化された反応を示している様である。例えば、同じ著者により一九六二年に出版された「認知(cognition)」という著書の一九六頁によると、「水中に立っている棒は曲って見えるが、それは真直な棒の半分が水に没している」と信せられる(believed)と述べている。}}

図十四の点線から下は動機づけの系 (Motivational system) 即ち M-system である。信念との結合を試みよう。今 N を要求刺激 (need stimulus) 又は強化刺激 (reinforcing stimulus) とし、S を要求を完全に満足せしめてしまう刺激 (stimulus that satisfy need) とし、M¹ 及び M² のループを動機づけの鎖 (motivation chain) とすれば、(ab)¹ の出力が M¹ を経て N に遭遇した場合、M³ が発火して K に入力する。ところが K の出力の条件は

$$K_i = a_{i-1} \cap b_{i-1}$$

でもあり、更にこれは (1) 式の (ab)¹ の出力の条件でもあるので信念は同一反応 (ab)¹ を示し続けることになる。同様にして S に遭遇した場合は、(ab)¹ は出力せずしかも C¹ や M¹、M² のループが消えてしまわないことが理解出来よう。但しこれも動機づけを論理網で表現する原理の可能性を示しているのであって、例えば「M¹ と M² の最初の発動は何かの外的刺激 (external stimulus) によって開始する様にする」とか「M¹ と M² のループは満足すればいつかは消える様にする」等の改良は必要であり、又可能でもあることは図十五より明らかであろう。即ち、ある外的刺激 E が存在する時出力要素 R が発火し、それにより同時に外的環境が変化し要求刺激 N が発火すると、内部で K は制止が来る迄発動し続ける。これを強化網 (reinforcing net) と呼び、この様な考え方がドイツ (Deutsch) の学習理論に見られる。

次に分類系 (classifying system) であるが、著者は次の様に述べている。「我々の感覚系 (sensory system) は入力にあた

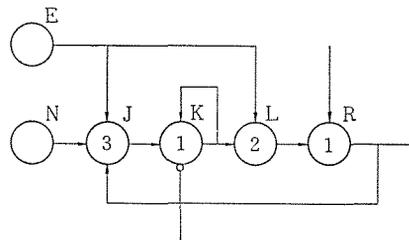


図15 強化網

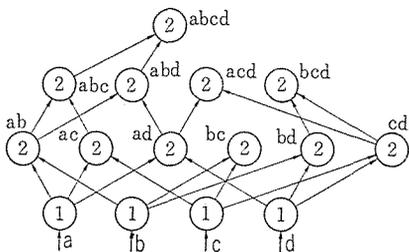


図16 分類系のソフトウェア

り、それはある意味では分類系である。つまり我々の世界で弁別 (discrimination) 出来る最も小さい要素 (element) を原始入力 (primitive input) と考え、その多数集合を考へる。要素は a, b, ..., n と考へても良いし、 $\{a_i, b_j, \dots, etc.\}$ の様にして各セットは視覚、聴覚等の異なる感覚様相 (sensory modality) を現わしていると考えても良い。この分類系のメカニズムを簡単な金物にしたのが図十三のオートリーのモデルであるが、その論理網は図十六で与えられる。ここで更に分類される事象の時間を考慮に入れ、長さ (length) の概念を導入する。図十六の分類は凡て長さが 1 (length 1) であるが、AB/AB

は長さ2 (length 2) の事象を示し、これは第一に $A \cup B$ が生じ、次に $\sim A \cup B$ が生じたという全体事象を示している。

ここで入力の種類系により記憶又は貯蔵 (storage) に入ってしまったものが新しい事象 (new event) に再分類されることがあり、それを図十七の様な拡張分類系 (extended classifying system) で例示している。ここで例えば

$$A/B \cup B/D \rightarrow A/D$$

であり、高次の論理的連合 (logical association) を行なっており、「冗したメカニズム

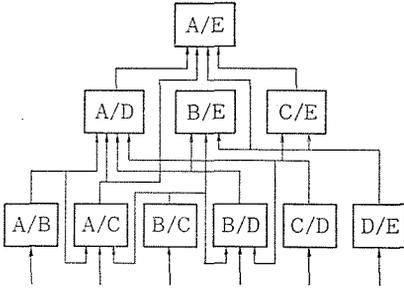


図17 拡張分類系

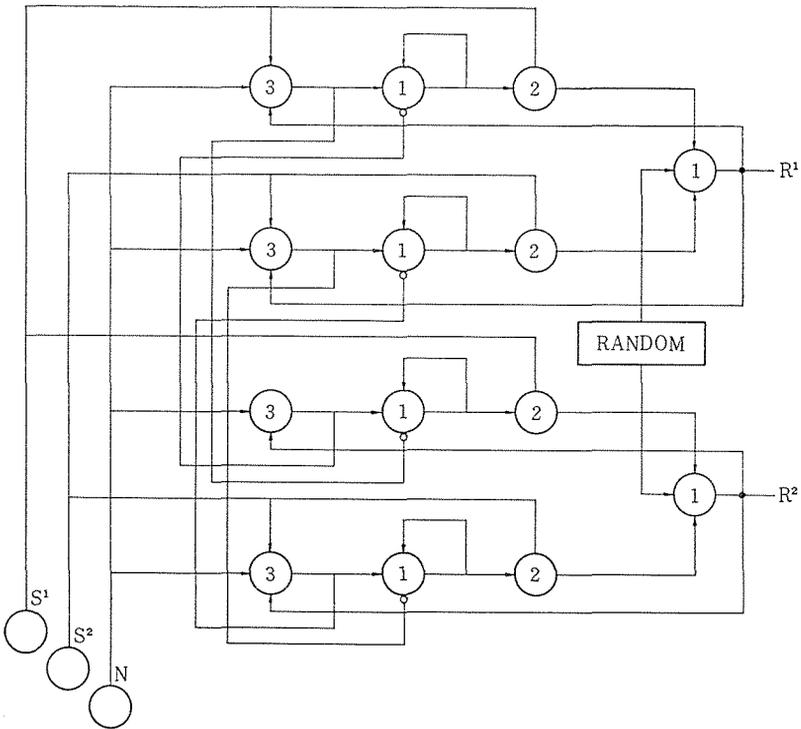


図18 T迷路等の二者択一事態の学習の論理網

により有機体の認知 (cognition) のみならず推理 (reasoning) まだが生ずるのである」と考えている。

こうした論理網により「迷路 (T-maze) の様な単純な学習の姿を現わしてみたのが図十八である。ここで二つの刺激を S_1 と S_2 で示し、 N を要求刺激とすれば、RANDOM 要素より始まり

$S_1 \rightarrow R_1$ であれば、
 $S_1 \rightarrow R_2$ とはならず、
 一方 $S_2 \rightarrow R_1$ であれば、
 $S_2 \rightarrow R_2$ とはならない。

しかも各々は図十五の強化網に支えられているから、二者択一事態での正反応が継続することになる。図十八の場合でも著者はこの様な説明を省略しているが、これはやや不親切である様に思われる。それにしても、以上の様な論理網は極めて興味深く示唆に富んでいて、心理学の前途に有力な方法論を提供していくくれる。同一論理網が時間と部位を変えることにより、もっと複雑な機能を表現することは図十二の様な入力行列の適用により可能である。翻ってこれ迄の心理学者により図示されたモデルを反省してみると、使用されているのは一般に要素と入出力線及びループのみであって、正確な閾値の導入による門 (GATE) としての要素や論理式が使用されることは少なく、その説明は主に文章に依存していた。従って著者の指摘通り内容は曖昧であらざるを得ず、その説明図は熱心であればある程

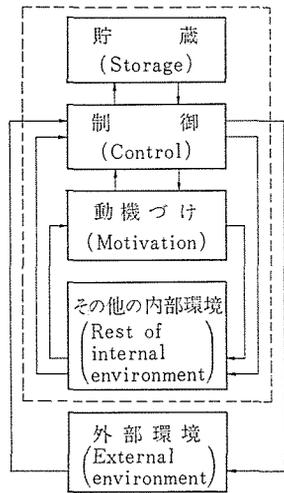


図19 著者の行動モデルのブロック図 (点線の中は有機体を示す)

ソウリ虫の変態の様に奇怪であり、時間関係の全く分からない直線・曲線が錯綜した複雑なものにならざるを得なかった。こうした心理学の一般状態に、著者が本書で強く推している論理式及び論理網は新風を送り込み、それを少しでも改善することは疑いの余地のないものと思われる。

最後に著者自身の行動モデルのブロック図を示すと図十九の通りである。まず制御 (control) とは認知系 (cognitive system ≡ system) とも呼び、いわば人間の脳皮質にあたり、知覚つまり入力分類 (input classification) と体制化された反応なしは信念を含む出力分類 (output classification) を行なう。但し高速記憶部分 (high-speed memory store) も加えられている。貯蔵 (storage) は永久記憶部分 (permanent memory store) であり、動機づけ (motivation) は M-system と略され、その他の内部環境 (rest of internal environment) の一部に情緒系 (emotional system ≡ E-system) が含まれる。この様

なブロック図と心理学的・生理学的脳の構造との対応は本稿の後編で考察することにするが、ただ一つ図十九の行動モデルでは外界より貯蔵(記憶)に入出力するには必ず制御に媒介されねばならなくなっているが、図六の電子計算機の原理的構成ではその必要はなく一見入出力は記憶装置より直接行なわれているように見える。しかし実際の電子計算機の入出力は制御装置の制御により行なわれ、それは図六の点線で示されている。従ってその機構を図十九の行動モデルの様に記述するのは妥当であろうと思われる。(未完)

参考文献

- 一 磯部 孝・杉本正雄・南沢宣郎・和田 弘編集 情報理論
共立出版株式会社 一九六〇
- 二 ノバート・ウィーナー著 池原止戈夫訳 人間機械論―サイバネティックスと社会― みすず書房 一九五四
- 三 ノバート・ウィーナー著 池原止戈夫・弥永昌吉・室賀三郎・戸田 巖共訳 サイバネティックス―動物と機械における制御と通信― 第二版 岩波書店 一九六二
- 四 清野 武・西原 宏編 KDC-1 のプログラミング 京都大学電子計算機室 一九六〇
- 五 George, F. H. Cognition, Methuen & CO LTD, London, 1962
- 六 杉原丈夫著 近代論理学 山喜房出版部 一九六〇

- 七 関 英男著 エレクトロニックスの話 ―ラジオから電子計算機まで― 岩波書店 一九五九
- 八 当麻喜弘著 デジタル回路の論理設計入門 丸善株式会社 一九六一
- 九 中川一郎・岡田 勇共著 電子計算機入門 日刊工業新聞社 一九六〇
- 十 森口繁一著 電子頭脳 日本放送出版協会 一九六四
- 十一 ケメニーJ・G、スネルJ・L、トンブソンG・L共著 矢野健太郎訳 新しい数学―その方法と応用― 共立出版株式会社 一九五九

本稿は、京都大学心理学教室の園原教授と本吉助教授の絶えざる御指導と激励に負うところが多い。また岡山大学の 大羽助教授には、著者ジョージと同じ知覚専攻の心理学者として有益な助言をいただいた。

(筆者 岡山大学法文学部〔心理学〕助教授)