

卒業論文

題目: 条件反射の生体工学的解析

1969年 5月 12日 提出

指導教官 斎藤正男助教授

東京大学工学部電子工学科

中所武司

序

文

我々、人間の肉体に似ていて、道徳的にも可能な限り、我々の行為をまねる機械があるとして、我々はやはりこれらの機械か。だからといって真の人間ではないことを認識する二つの極めて確かな方法を持っている。

(1637 デカルト)

人間は極めて複雑な機械である。一挙一動に明白な観念をもつては不可能であり、従ってこれを認識することは不可能である。最も偉大な哲学者達がアッリオリに、すなわち、いわば精神の翼の力を借りんとして、おしずべての探求がむなしかったのは正しくこのためである。かくしてアッリオリに、すなわち、いわば、人体の諸器官を通じて、実験の筆を動かすことと試みることはともに始めて、人間の性質そのものを明確に察見できるとは言えなかつたが、この点に関して可能な限り、最高度の蓋然性に到達しているのである。

(1747 ドラ・メトリ)

手と言語器官と脳との協同作業によって、各人それぞれが、社会の中でも、人間はお互に複雑になってゆく諸機能を遂行し、いよいよ高い諸々の目標を自らに課し、ゆえに互に達成されていくようにした。

(1876 エンゲルス)

今年、1969年である。

今から約300年前、動物は機械であると言ったデカルトも、人間の脳を前にしては、神の助けを借りないわけにはいかなかった。

今から約200年前、フランスの医師、ドラ・メトリは人間は機械であると考えたが、それを裏証しようとするには、あまりに絶望的になっていった。彼は結論を急ぎすぎたのだ。

今から約100年前、かのエンゲルスも、人間を外からしか見ようとはしなかった。

それでは、現在、我々は脳についてどれだけのことを知っているであろうか。

脳生理学は、確かに100年前とは比べるべくもないが、まだまだ幼児期であり、今は、学問としての確立期のように思われる。脳に対するアプローチの仕方は、まだ暗中摸索であり、それだけに学者間の考えの差は著しく、欧米系とソ連系の間でも、大きな対立があるような状況である。現在、電気生理学、条件反射学、解剖学など、あらゆる分野で多くの実験が行なわれ、幾多の事実が明るみに出されている段階で、それをもとにした、まじまた理論的考察は皆無に等しい。

一方、生体の持つ、情報処理、学習機能についての工学分野からの興味は大きい。

それで私は、動物の持つ学習機能、特に、その最も単純化されたもの、或いは最も基本的なものと思われる条件反射を取り上げて脳の機能を探ってみようと思う。

目

次

序 文

第1章 条件反射の生理学

1.1 条件反射	1
1.2 脳の働き	4
1.3 神経系と神経細胞	8

第2章 条件反射の生体工学的解析

2.1 条件反射の学習性	10
2.2 記憶	11
2.3 シナプス結合による条件反射の解析	13
2.4 この方法論の限界と克服	15

第3章 学習機械としての、条件反射を行う脳のモデル

3.1 神経回路網の機能の分解と合成	18
3.2 組合せモデル	19
3.3 集積回路化について	23
3.4 学習機械としての評価	25

第4章 結 言

文 献

第 1 章 条件反射の生理学

1.1 条件反射

動物は生まれながらに幾多の能力を備えている。そのうち、あるものは、無条件反射と呼ばれる。それはある入力信号に対しては決って、それに対応する、ある出力を出す反応であり、食餌を口に入れると唾液を分泌したり、或いは肢に電気刺激を与えると、その肢を屈曲せしめたりする反応のことである。動物たちは、これら無条件反射を基礎として、その上に、生活の中でいろいろな経験を積み重ねていくのであり、それは条件反射の積み重ねである。初めて肉を見た犬は、それだけでは唾液を分泌しなかつたが、それが、おいしい食餌であることを知ると、その後は肉の臭いだけで唾液を分泌するようになる。このように自然に経験したものは自然条件反射という。またバヴロフの実験で有名だが、犬に食餌を与える前にベルを鳴らすことを繰り返すと犬はベルの音を聞いただけで唾液を分泌するようになる。このような反応を人工条件反射という。

かたが、ベルで食餌条件反射を形成した犬は、いつまでも、ベルさえ鳴れば、唾液を分泌することを繰り返すかという。そうではない。ベルの音の後で、食餌を与えて強化しないと、条件反射は消えてしまうのである。この起こるべき条件反射が起こらないという抑制作用が、動物の生存に、重要な働きをしている。そこで次に条件反射の抑制作用について述べる。

抑制には、大きく分けて外抑制(無条件抑制)と内抑制(条件抑制)とがあり、前者は外部的要因によるもので、危険を感じたときに起こる、防御反射のためにおこる抑制(恒常抑制)や、新奇的信号に対して起こる定位反射(詮索反射ともいう)のためにおこる抑制(減衰抑制)などがあり、内抑制では主なものは4つで、その1つは先に述べたように、強化しなければ、徐々に条件反射反応が弱まっていって消去抑制である。これは、条件反射の完全な消滅ではないので、消去後に、再び強化すれば、すぐに回復するのである。この抑制は訓練されるのであり、もし条件反射の消去と反射を繰返せば、最後には、1度、強化なしの条件刺激を与えただけで条件反射は消去されるようになる。おとしには、分化抑制があり、これは、外刺激を条件刺激に使って、60秒/分のときな食餌

を与え、120回/分のときは与えないようにして、何度か訓練すると、信号の分化が起る。60回/分では唾液を分泌するが、120回/分では分泌しなくなるような反応である。この場合、陽性信号(興奮を引起す信号)に近い陰性信号(抑制を引起す信号)に対する分化抑制は困難である。Xトームで60回/分と120回/分の分化は40~50回の訓練で完成するが60回/分と70回/分のときは100~200回必要で、それでも分化できない犬もいる。訓練をするとき陽性信号と陰性信号を交互に与えてやると早く分化が形成され、また60回/分と120回/分の分化を形成させた後に、陰性信号を120回/分より70回/分まで徐々に変化させてやると、はじめは分化できないが、た犬でも分化ができるようになる。オオには付加抑制があり、これはXトームで食餌条件反射を形成後、Xトームと同時に水泡音を付加したときには食餌を与えないことを繰返すと、Xトームだけのときは唾液を分泌するがそれに水泡音が加れると唾液を分泌しなくなる反応である。この抑制の形成には、付加刺激と条件刺激との強さの相対的な関係が重要な要因となっており、付加信号が強いほど、また陽性信号が弱いほど形成が容易である。最後に延滞抑制があり、これはベルを鳴らした後、5分間経過すると食餌を与えることを繰返すと、ベルの音を聞いてから、5分後に唾液が分泌されるようになる反応である。この抑制では時間が1つの信号になっており、陽性信号の強いほど、また反射の強さの大きいほど形成が困難である。以上のような多様な抑制作用が、動物のより複雑な行動を可能にしているのである。

この抑制作用には相互作用があり、この作用による新たな反応も、また重要である。それはある抑制過程が他の抑制過程を弱めたり、消したりする、条件反射の脱抑制すなわち、抑制が解けて条件反応を起したり、逆に一方が他方を強めようとする抑制の加重であったりする。たとえば、Xトームで形成した食餌条件反射を完全に消去した後、Xトームと同時に口笛を付加すると、脱抑制して、唾液を分泌するようになったり、ある音を陽性信号、別の音を陰性信号として分化抑制を完成させた後、その音と同時に水泡音を付加すると脱抑制して、唾液を分泌するようになる。また、延滞抑制の条件反射を形成後の消去は、普通の条件反射(陽性信号と強化の間、が1~2秒)の消去よりも速やかに形成されるという抑制の加重が見られる。

以上、動物の、特に犬を例にしたが、正常状態での条件反射及び条件抑制について概観してみたが、その他に病的条件反射と言われているもの

がある。例えば 0.05% ユーニチン 1ml の投与で不整脈を伴う頻脈を生じるという無条件反射を使って、これと条件刺激の音とを組合せると音だけで頻脈を生じる。大量のカルボユリで狭心症を起こさせ、これと音とを組合せると音だけで発作が起こる。ある指揮者がある曲で失敗して発作が起こるという事件のあと、その曲のときはいつも発作を起こしてはうという例はこの場合にあたる。これと同じようなことは日常生活でもよくあることである。これら病的条件反射の特徴は、正常な条件反射では、例えば食餌条件反射性唾液分泌は無条件反射性分泌の半分以下であるのに、病的条件反射では、ほとんど無条件反射に近い強さで反応があらわれることである。

今までに述べてきた条件反射の形成法は古典的条件づけとか、応答的条件づけとか呼ばれ、ハヴロフによって導入され、それ以来使われている方法であるが、それに対するものとして、道具的条件づけとか、操作的条件づけとか言われるものがある。例えばレバーを押せば食餌が与えられる仕掛けのスキナー箱の中にネズミを入れると、ネズミは食餌を得るために、連続的に速く、レバーを押すようになるというような報酬訓練とか、1つの部屋を2つに分け、一方は壁を白く塗って、床から電気刺激を与えて、もう一方は壁を黒く塗って木の床にしておく、白い部屋に入れたネズミは全速力で黒い方へ逃げようになるという逃避訓練とか、モルモットを回転籠に入れ、ブザーを鳴らして2秒後に回転籠に電気刺激を与えるようにし、もし回転籠をある角度以上回せば、このショックを回避できるようにしておく、モルモットはブザーが鳴るや否や、回転籠を回すようになるという回避訓練などがあり、この操作的条件づけの例である。その他、条件づけの一種と考えられるものに図1-1のようなT字迷路を用いて音刺激のあるときは左、ないときは右へいけば「食餌が与えられるようにして、音信号の有無で左右を弁別させる弁別学習とか、正しい道を行けば食餌にありつけるような迷路で、正しい道を見つけてやる迷路学習などもある。

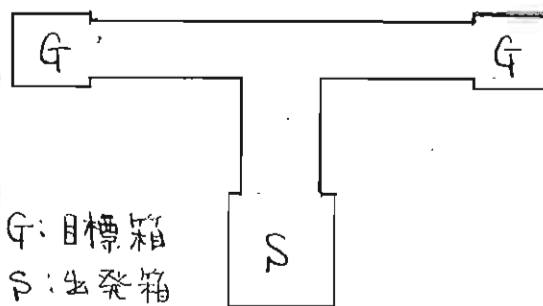


図 1-1

迷路学習が古典的条件づけと本質的に異なるものか否かについての考察は後章に譲ることにする。

なおこれら操作的条件づけ、弁別学習

1.2 脳の働き

前節では、条件反射の現象面を概観してきたのであろうが、これでは、いったい、この脳が、大いに入力と出力をもち、複雑な反応を示す、アニマルといわれる black box の中は、どうなっているのだろうか。

犬がベルの音を聞いて、唾液を分泌するという条件反射反応を考えると、環境の変化を感じとる受容器の一つである耳が、ベルの音を感じたことと、唾液分泌腺という、外界へ働きかける効果器の一つが働いたことは明白である。だから、この受容器と効果器の間で、何らかの情報伝達が行なわれたわけであるが、これには、二つの型が考えられる。受容器の電気信号すなわち、インパルスは、そのまま効果器へ伝える型式と、受容器のインパルスが一度、沢山の神経細胞の集団の中に送られ、複雑な処理をされた後、効果器へ適当な信号が送られるものとがある。前者の場合には、神経細胞は単なる伝導路の働きをしており、単純な無条件反射は、この場合である。後者は神経回路網が統合作用を行っており、犬の食餌条件反射はこれにあたる。

さて、受容器と効果器について簡単に述べておくと、受容器はいろいろな形で吸収される外界の energy を電気 energy に変える。トランスデューサーの役割を果しており、それには機械-電気系、熱-電気系、化学-電気系、光-電気系などがある。効果器には筋肉と分泌腺がある。受容器の感覚信号としてのインパルスは、2~5m の中継核で中継された後、新皮質のそれぞれの感覚野へ投射している。そしてこの新皮質の運動野から出たインパルスはそれぞれの運動神経を通して、筋活動を行う。しかし、情報は決して、一方向性ではなく、常にフード・バック路があることがわかっており、そのために感覚器、効果器が適切な働きをするのである。

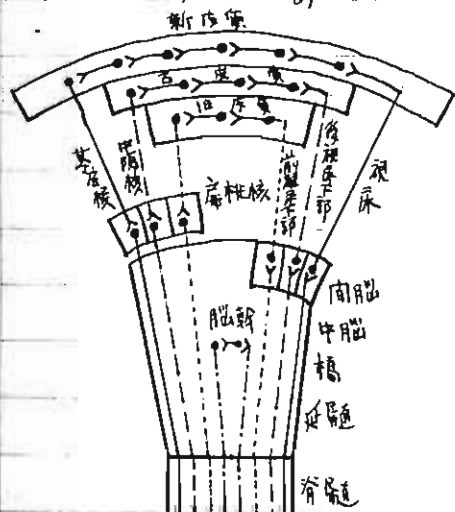


図 1-2 (時空らによる)

次に条件反射活動の中継部にあたる脳の働きについて述べる。脳で統合作用を受け持つものには、新皮質系、古皮質系、旧皮質系、脳幹系などがあり、前の三つの求心性神経路が最後に中継する部位はそれぞれ視床、視床下部後部、視床下部前部であり、遠心性神経路が最初に中継する部位はそれぞれ基底核、中隔核、扁桃核である。なお、新皮質からの遠心性神経路には、基底核で中継されるもの他に、直接脊髄へ直行するものがあり、前者を錐体外路

後者を、錐体路という。これらの統合系の間での役割の分担は決っており、新皮質系へ行く情報は外部環境の変化であり、光、音の感覚や、皮膚感覚、味覚(糖、塩)であり、大脳辺縁系(古皮質と旧皮質)へは、内部環境の変化と嗅覚、温覚、圧覚、味覚(苦、酸、塩)であり、統合作用のうち最も単純な脳幹脊髓系では、視床下部以外の体内の受容器でうけとめられる内部環境の変化と痛覚、平衡感覚、筋肉の張力の感覚である。図1-2は、この統合系を模型的に示したものである。

ここで脳の行う反射活動を考えれば、無条件反射を司っているのは、大脳半球に最も近い皮質下であり、条件反射は大脳皮質であると考えられている。これは、条件反射の開拓者 Pavlov 以来の考えであり、彼は、条件反射の形成は、新皮質(大脳皮質)においての一時的結合であると考えていた。そして、条件反射は常に、無条件反射を基礎にして行われることから、皮質下構造と、新皮質との相互関係の問題は、脳生理学の一つの大きな基本問題である。これに關しての興味深い一つの事実は、条件反射の形成過程で、無条件反射が変化することである。食餌条件反射の実験を繰返し行っていると、唾液分泌の無条件反射が增強されるのである。この現象は、病的条件において、いっそう明確である。毎日、系統的に犬にモルヒネを注射していくと、はたかうかは嘔吐は8分後に起こったが、8回目の実験では、それが2分後にまで早められていた。これについてのソビエトの学者達の考えは、任意の無条件反射が皮質下の準位ではありではなく、新皮質においても行われるようになる、そのために皮質性ホルムスが皮質下性ホルムスに加重されるようになるので、無条件反射が改造され、皮質性機能の色あゝをだんだん持てくるというものである。そして、この無条件反射は、前述のような皮質化現象のために、より不安定で易動的なものとなる。

これらの新皮質の作用を探るために、これを実験的に損傷して、それによる高次神経活動の障害を研究するという解剖学的方法がとられている。その結果、新皮質を除去すると無条件反射の機能が低下するということがわかった。この事実は、先の無条件反射の皮質化現象という推論とよく合う。また玄脳太は、すべての自然及び人工条件反射を忘れ、何度訓練しても新たに条件反射を形成しなかったというソ連の学者の報告があるが、これは、後に、皮質を除去しても、基本的な条件反射は形成されるという実験データがだされて、修正をうけた。また側頭葉や後頭葉を切除すると、音は聞こえるが、理解することはできない、精神驚き、見えけれども、それと認識することはできない、精神盲も引き起こすというように、皮質分析器の除去は、刺激体の要素的

な。分析と統合とは手術後、しばらくすると回復するが、組織的な分析や統合の障害を起す。このことからある分析器に属する神経細胞は、下部分の基本的な核のまわりにあるが、一部は全体に散在していることもわかった。その後、右側の皮質分析器の肉を切断した後でも、それに対する刺激で条件反射が形成されたことにより、いろいろな皮質分析器 相互間の結合は、皮質下構造を通じて行われることがわかった。

以上、主にソ連の文献を参考にしながら述べてきたが、欧米には、ソ連系の考え方に批判的見方をする学者も少なくない。それは、皮質を除き、単純な条件反射は形成されるという、今では通説になっている事実や、欧米で特によく研究されている網様体は、非常に重要な機能を果たしていることから、学習機能は皮質下にあるとする学者がおり、極端な例では、ソ連では皮質の機能と考えられているものを網様体の機能であると主張する者もいる。これらの意見の差は、その時、脳生理学がまだまだ初歩の段階にあることを如実に示すものと言えよう。

この網様体の研究は、そのある部位を刺激すると脳波が睡眠パターンから覚醒パターンに移行し、他のある部位を刺激するとその逆の現象が起るという実験に始まり、睡眠や意識、覚醒の機序の手掛りを得るべく行われてきており、この問題においても、意識の生理学的機序として、今述べたような網様体調節系を挙げる Magoun や Moruzzi の他に視床下部調節系を挙げる Gellhorn などがおり、また、時度によって、この二つの考えを統一的に見ようとする者もあり、まだはっきりとはわかっていないが、ここでは、条件反射との関連で網様体の働きを述べる。

以前は、後容器の興奮伝達路はその対応する皮質感覚野へいく一本だけと考えられていたが、実はもう一本網様体へいく側枝の存在がわかった。前者を特殊感覚系、後者を非特殊賦活系という。この網様体は、皮質の全面と通路をもち、後容器の感覚入力にはこの網様体経由でも、皮質へ伝わるのであって、その時間的遅れは、特殊路に比べて約 10 msec 位である。また皮質から網様体への働きかけも、その逆の場合に劣る重要な働きである。この網様体は脳幹部と視床部で働きを異にしており、前者は皮質全体にわたって、徐波の広汎な抑制、すなわち皮質の特異的賦活作用をもち、大脳皮質の活動を全面的に統制しているが、後者は感覚入力と調節して大脳皮質に局所的に働きかけであり、これは、意識の集中や慣れの現象と関連があると思われる。

ここで先刺激の場合を例として、網様体の働きを述べて見よう。

先刺激のインパルスは、はじめ、特殊路と非特殊路の両方に伝わり、前者は瞳孔収縮という順応反射を引き起こし、後者は脳幹網様体と興奮して、皮質のメーリズムの広範囲抑制を行い、同時に、視床部の網様体によって、視覚分析器の皮質投領域に強く作用する。このような効果は、皮質と分析器の可動性の増大を伴い、その結果、興奮の特殊路を通して、到来する情報と適切に処理し、その後の知覚過程を保障する。そして、先刺激が再び、はじめに可動性の定位反射に対応する脳幹網様体が働いて止め、次に局在的定位反射の対応に、視床部網様体はその働きを止める。その後、先刺激の続いている間は、視床部網様体を通して、刺激インパルスは、非心性皮質作用の水準を高く保ち、視覚系の興奮性を保持する。この場合、先刺激の与えられた初期段階で、定位反射に因るものと思われる。これらのことからわかるように、定位反射及びその消去は網様体と皮質間の相互作用に関連するものであると思う。実際、皮質を除去すると定位反射は消えなものである。一方、条件反射の形成時に条件刺激に対する定位反射が消えていくと条件反射の形成は困難になり、条件刺激に対する定位反射が強ければ条件反射の形成は容易であり、この場合、条件反射の形成と定位反射の消去が同時に起こることなどの事実は、この皮質-網様系の相互作用の重要性を示すものと言える。結局、皮質の状態を制御する網様体の賦活作用は、それ自身が皮質の状態に依存しているのである。

ここで以上の脳の働きを、反射活動に限定してブロック図に表してみると図1-3のようになる。番号は各ルートを表し、それぞれのブロックの機能をもつ。脳の部位も、その横に記しておいた。この図を用いて、定位反射、順応反射、防衛反射の3つの無条件反射及び条件反射をまとめてみる。

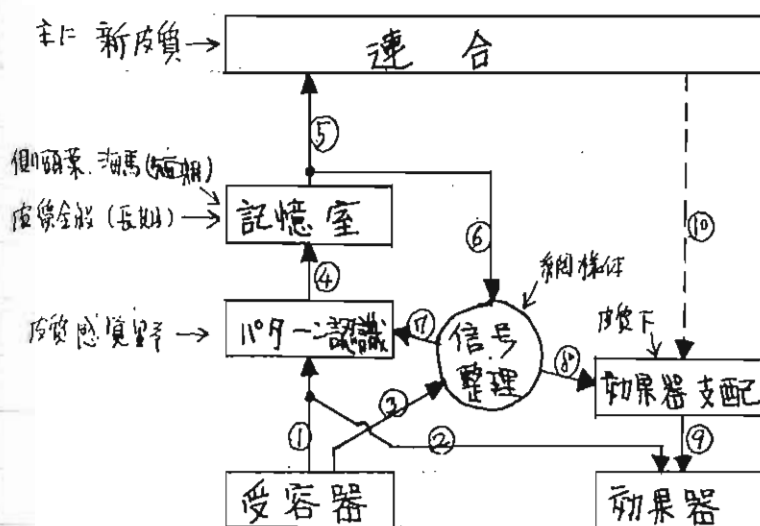


図 1-3

1) 定位反射

刺激信号は①の特殊路を通じて認識され、④を通じて、この信号が記憶の中にあるかどうかを調べ、これが新奇な信号のときは、⑤及び①に信号が出ない。一方、③の非特殊路を通じてきた信号は、信号整理部で⑧からの

信号がなにより、⑩へ信号を送って認識能力も高める。

ii) 条件反射及び防御反射

簡単なものは、②の特殊路から、すぐ効果器へ信号を送る。複雑な反射の場合は、③を通り、信号整理部では無条件通過で⑤を通って効果器支配部へ行き⑨を通じて効果器に入る。

iii) 条件反射

①、④を通じてきた信号は、以前に記憶おいてるので⑤、⑥に信号を送り⑥を通る信号は、③からきた信号を抑制して定価反射を抑制し、一方、⑥を通った信号は連合野に送られ、対応する信号も効果器支配部へ⑩を通じて送り、⑨で効果器へ信号が送られる。なお、このルート⑩は条件反射形式によって作られているので、先に述べた無条件反射の性質化を意味する。

以上、条件反射に關する脳の働きを見てきたが、脳の各部位は、black-box として扱ってきた。次の節では、これを神経系を構成している神経細胞について述べよう。

1.3 神経系と神経細胞

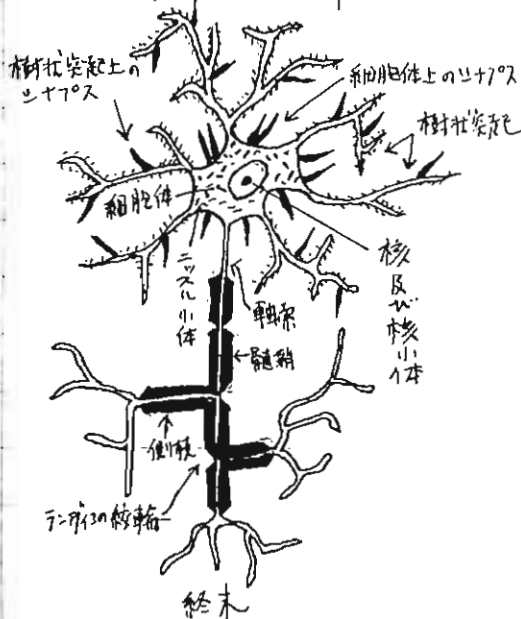


図 1-4

他にも多く、これが、他の神経細胞の軸索終端とシナプスをつくる。軸索は長いものは1~2m あり、1本であるが、ところどころで枝別れして側枝を出す。髄鞘は大部分の神経細胞についており、絶縁体の役割をしている。これにより電気信号の伝わりはラングレンの線軸輪で、軸索の物質代謝をすることが出来る。軸索終末は他の神経細胞の細胞体や樹状突起とシナプスをつくる。末梢

神経系を形づくるものは脳膜や、豊富な血管網を除けば、神経細胞とグリア細胞である。グリア細胞は神経細胞の支柱で、その物質代謝にたずねるもので、本質的に神経機能は神経細胞が行う。この神経細胞は生後一年で、分裂能力を失い、数は以後一定である。新皮質だけで約140億、と言われている。グリア細胞の方は一生、分裂し、数も神経細胞に比べて圧倒的に多い。神経細胞の構造を図1-4に示す。細胞体の径は20~100μm で形は多様；樹状突起は細胞体から数本~数十本であるが、枝別

神経の末端は筋肉細胞、感覚細胞、腺細胞と接触するが、これら三種のシナプスである。そして、これらのシナプスを通じて、神経細胞間の興奮の伝達が行われるのである。

神経系の情報伝達はインパルスによっておこなわれ、インパルスの伝導は軸索を通じて行われる。軸索を伝導するインパルスを興奮過程と呼び、その本質はイオンである。インパルスは「全か無かの法則」によって伝導し、軸索の径

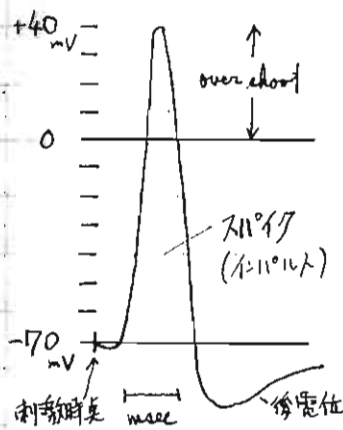


図 1-5

が同じならば、等速度で無損失である。軸索の膜の内側は外側に比べて、静止状態では 50~70 mV 位低電位になっているが、神経細胞が興奮すると図 1-5 に示すような 100~120 mV のインパルスが発生し、膜の内側は外側に比べて 40~50 mV 高電位になる。このインパルスの持続時間は約 1 msec で、これをスパイク電位といい、つづいて後電位と言われるものがくる。この軸索を通つたインパルスは終末のシナプス小頭部に達する。シナプスには興奮性シナプスと抑制性

シナプスがあり、前者にインパルスが到着すると、細胞膜(シナプス後膜)の電位は膜分極の方向、即ち正方向に動く、後者の場合は膜電位は逆分極の方向、即ち、負方向に動く。これらのインパルスによる膜電位の变化が、ある値を越えると、この細胞体は興奮し、スパイクを放出する。この時間は約 1 msec で、この間は他のインパルスが入ってもいささか反応しないので絶対不応期と呼ばれ、その後、強い刺激に対してだけ反応する相対不応期があり、つづいて、比較的ゆるやかな膜分極の時期 (10 数 msec) と長い過分極の時期 (約 100 msec) とがある。

なお、これら神経細胞のシナプス結合を介しての神経系の働きは後章に譲る。

第2章 条件反射の生体工学的解析

2.1 条件反射の学習性

条件反射の形成において、用いられる入力信号としての条件刺激は多種多様であるが、これらの一つ一つを比べて分析してみると、どんな入力信号も、組合せ、順序、時間の3つの基本的要素によって構成されていることがわかる。条件反射及びその分化抑制、付加抑制に用いられる入力信号はその多くが単純な1つの信号か、或いは、幾つかの単純な信号の組合せである。また、犬は音-カサカサ-光と光-カサカサ-音とをその順序の違いによって分化できるが、これは、入力信号が組合せと順序でできている。時間の例としては、延滞抑制や、その他に「トロム」で100 μ s/分と96 μ s/分とを犬は聞き分けて分化することができるとなっている。但し、ここで考えている時間というのは延滞抑制の場合で数分、トロムなどの場合で1秒前後の時間々隔である。結局、条件反射活動は、上に述べた3つの基本的要素から成る入力信号の一つに対して、ある特定の出力を対応づけることと考えていいだろう。

これがそのまゝ条件反射の学習機能であると考えても不都合はないが、もう少し詳しく分析してみる。私は序文で条件反射は学習の最も単純なもの或いは最も基本的なものであると述べたけれども、それでは条件反射の過程のどこを学習と考えるべきであろうか。ここで、前章で示した反射活動のブロック図(図1-3)を見てみると、条件反射活動の過程を示す①→④→⑤→⑩→⑨というルートの中で行なわれるいろいろな操作のうち、条件反射に特有なものは、連合操作だけであり、その他の、ヒヤーン認識とか、そのヒヤーンの記憶などは、一般的なものである。従って条件反射の学習性というものを最も単純化すれば「ある特定の伝導路と他の特定の伝導路とを結びつけることである」と考えられる。

さて、ここで上述で述べた道具的條件づけ、弁別学習、迷路学習などの学習過程を、古典的條件づけとの比較で検討しておく。これら3つの学習過程に共通することは、古典的條件づけと違って環境に対する積極的な働きかけのあることである。これらの働きかけは定位反射であたり防衛反射であたりするが、これらの働きかけを行なわせるためには、探索、飢え、恐怖などの動因を必要とし、結局これらの学習も、無条件反射を基礎としていっていることがわかる。さて、それを基礎として、行うことは、例えば「レバー押しと食餌

とのように、2つの信号の関連づけであり、古典的条件づけとの違いは、ただ、後者が関連づけを反射的に行うのに対し、前者は能動的に行うこととなる。後者の場合は教師が与えるが、前者の場合は教師が与えないという点である。だから、2つの差違は、人工条件反射と自然条件反射の違いでありと考えていいと思う。

先ほど入力信号は3つの基幹的要素から成るといったが、これらの学習の場合にはどうであろうか。例えば弁別学習で、T字型迷路の分岐の直前に抑留室を設け、50秒抑留すれば右に、10秒周抑留すれば左に餌があるようにして学習せよと、これは、時間の信号と左右機状の組合せであるし、迷路学習で、例えば右右左左右右と進めば食餌にありつけるようにして訓練すると、これは順序の信号である。このように、これらの学習も、基本的には入力又は入力に相当する信号はこの3つから成ると考えて良い。結局、古典的条件反射も、道具的条件づけなども、学習過程の本質は同じである。

2.2 記憶

2.1 からわかるように条件反射の形成において、必要とする記憶は2種類ある。一つは入力信号の記憶であり、もう一つは、ある入力とある出力との対応の記憶である。入力信号が記憶されなければ、それを与えられ、毎に、条件反射を起し、条件反射は形成されない。入力信号は記憶されて、はじめて信号としての意味を持つるのである。従って、新奇な信号に対する条件反射が時間経過と共に消えていく過程は、同時に、その信号が記憶されていく過程でもある。このことを図1-3で説明すると、新奇な信号は記憶室に記憶されているため、信号整理部に⑥から信号が来るので、③からまた入力信号は条件反射を起し、⑦を通じて認識力を高めるが、だんだん信号が記憶されると、⑧を通じて信号がくるため、③からの入力信号は抑制されて条件反射は消えてしまうということになる。こうして、入力信号が記憶されると、次に入力信号と入力信号、或いは入力信号と出力の連結が行われて、はじめて、条件反射の形成が完成するのである。この場合、1-2で述べたように条件反射の強い刺激も条件刺激に用いると条件反射は形成しやすくなるのであるが、これは、入力信号の記憶と、連結の記憶を別々に行うよりも、同時に行う方が記憶が容易であるということであり、これは、条件反射中は網様体を通じて、皮質の神経系が活動的になっているためである。

さて、この記憶を司る脳の部位は、一部は、新皮質の側頭葉、古

皮質の海馬であることがわかってゐる。この側頭葉や海馬を除去したサル
やラットでは強い記憶障害があり、学習の形成が極めて悪くなり、
定位反射はいつまでも消えない。しかし以前に形成された学習はそのまま
残っている。またラットの両側の海馬に拡張性抑制をなくさせると、条件
反射はほとんど完全に消失した。また精神病の治療のために、側頭葉を
外科的に切除した患者は新しい経験と記憶でなく、手術前2〜4年
の記憶は忘れるが古い記憶は十分想起できるのである。これらのこと
から、海馬及び側頭葉は記憶の導入、定着及び初期の想起に関係
しているが古い記憶は皮質全体で受け持っていることがわかる。この記憶
過程の時間的変化についてはシロネズミの回避訓練の実験において、
訓練後一定時間経ると電気ショックを与えるようにし、この一定時間はグル
ープ別に20秒、40秒、... 14時間とした。この結果、訓練後15分以内
のグループは学習不可能で、4時間以上のグループは学習は全く支障がな
いことがわかった。

とにかく、記憶もどの部位が受け持つにせよ、記憶の前後で何らか
の变化が起るはずだが、それは何であろうか。古くからの考えとしては、
神経回路の形成があり、何か刺激があるとそのインパルスによって神経の
回路網ができて、インパルスが保持されるというような反響回路を考へて
これを一時的記憶として、一方、このインパルスの持続過程でシナプスに構造的
変化が起ることによって長期記憶であるとする考えがある。このような考えは
今でも健在であり、学習過程における生体内の変化は、シナプスにおける何ら
かの変化であるとして、具体的には、シナプスにおける抵抗の減少、即ち、
インパルスが伝えやすくなることが学習の本質であるとする。この機構につ
いては、主な考えに三つあり、一つには、インパルスがシナプスを何度か通るとシ
ナプス様状体が膨大になり、伝導度が高くなるという解剖学的考え、
二つには、シナプスにおける伝導物質としてのアセチルコリンが増大して、
伝導度が高くなるという考え、三つには、グリヤ細胞との関連で説明しよう
とする試みなどであるが明らかなのはない。前の二つについては、一応の
実験的裏づけがある。

しかし、最近、学習による変化をシナプス以外に求めることが試みられてゐる。
それは、生化学的変化を考へて、学習における変化は細胞質を組立てている蛋白質の
構造的変化とする。即ち、RNA(核酸)と記憶との関連を主張するのであ
るが、それに関するデータとしては、神経細胞を刺激するとそのRNAが増加
し、厚くてよく減少することや、RNAを補給すると老人の記憶力の回復、

或いは、脳の学習能力の向上があること、先に対して体を曲げる反応を学習したフナナリと頭部と尾部に切半して、その再生すれば、共に、学習を保持しているが、RNA分解酵素のリボヌクレアーゼの中で再生させて尾部の再生学習が消えたこと、或いは、学習したフナナリを食べたフナナリは学習を受け継ぐことなどがある。しかし、一方、RNAと学習機能との関連に否定的な実験結果もあり、今は明らかではない。

2.3 シナプス結合による条件反射の解析

ここでは、従来の一つの有力な考えである、シナプス結合による神経細胞間の伝導度の増加を学習の初果とする考えを検討してみよう。既に幾多のモデルが考えられているが、本質的に異なるものはあまりない。

まず、McCulloch-Pitts の神経回路網のモデルは図2-1のようなものである。大きい円は細胞体、 θ は閾値、●印は興奮性シナプス、○印

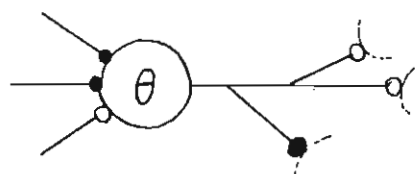


図2-1

は抑制性シナプスである。この各細胞の状態変化は時間 t の整数倍の時刻に変化するとすれば、 i 番目の神経細胞の時刻 $(t+\tau)$ における状態 $x_i(t+\tau)$ は

$$x_i(t+\tau) = 1 \left[\sum_j a_{ij} x_j(t) - \theta_i \right]$$

と表せる。 a_{ij} は神経細胞 j から神経細胞 i への結合係数、 θ_i は神経細胞 i の閾値であり、また

$$1[x] = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

である。ある神経系の細胞数を n とすると、 n 個の状態はバイトで表すと

$$X(t+\tau) = 1[A \cdot X(t) - \Theta]$$

となる。この場合、神経細胞は多数決論理素子であり、 a_{ij} 及び θ_i の値を適当にすれば、線形分離の可能な入力パターン群の二分化は可能である。この種のモデルの欠点として、不応期や学習効果が考慮されていない。またシナプスをすべて細胞体にくっつけたため、樹状突起による部分的演算が無視されている。なお、このモデルでは一つの神経細胞のどのタイプに興奮性と抑制性の二つがあると考えているが、これは誤りで、それぞれの神経細胞はいずれか一方だけの性質をもつ。

次にCaianielloのモデルを考えると、彼は神経細胞の状態が過去の履歴にも影響されるとして、次のような式を表した。

$$x_i(t+1) = 1 \left[\sum_j \sum_k a_{ij}^{(k)} x_j(t-k) - \theta_i \right]$$

$a_{ij}^{(k)}$ は細胞 j から細胞 i への結合の過去の履歴の影響の重みを表し、この $a_{ij}^{(k)}$ により、不応期が導入されるわけである。また彼は、学習効果として、 $a_{ij}^{(k)}$ の、三つの要素から成る変化を考えた。一つは時刻 $t-k$ に細胞 j が興奮し、時刻 t に細胞 i が興奮すれば $a_{ij}^{(k)}$ は一定割合だけ増加する。二つには、 $a_{ij}^{(k)}$ はその初期値 $a_{ij}^{(k)}(0)$ より大きければ一定割合で減少する。三つには、各 $a_{ij}^{(k)}$ に上限 $A_{ij}^{(k)}$ を設ける。このような神経細胞の制作は、 $a_{ij}^{(k)}$ は時刻 $t-k$ に j が興奮し、時刻 t に i が興奮するとその値は増加し、その後、徐々に減少する。それを果てしなく $A_{ij}^{(k)}$ 以上の値になると、そこに固定される。

これとよく似た学習効果を持たせたものに Harth のモデルがある。彼は、時間の履歴を考慮せずに、結合マトリックスというものを考えた。それを図 2-2 に

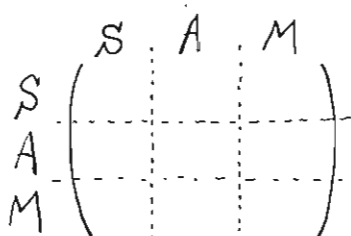


図 2-2

示す。S は感覚神経系、A は連合野の神経系、M は効果器の神経系を表し、マトリックスの点線で区切られた部分は、それぞれ対応する神経系の神経細胞間の結合係数から成る行列である。

学習効果はこの結合係数の変化で表され、神経細胞 i と j が同時に興奮すれば結合係数 a_{ij} は a_{ij}

だけ変化すると考えた。Harth はこのモデルを使って、計算機による条件反射学習のシミュレーションを試みている。その結果は、以下、無条件刺激は U_i 、それに対応する反応は R_i 、条件刺激は B_i 、 C_i 等で表すことにし、信号 x と y を同時に与えることを (x, y) と記すことにすると、 (U_1, C) と (U_2, C) の訓練で $C \rightarrow R_1$ と R_2 を形成すると、 (U_1, U_2) の訓練で $U_1 \rightarrow R_2, U_2 \rightarrow R_1$ を形成すると、 B が $(U_1, B_1, C), (U_2, B_2, C)$ の訓練で $(B_1, C) \rightarrow R_1, (B_2, C) \rightarrow R_2$ を形成することはできたけれども $(U_1, B_1, C_1), (U_1, B_2, C_2), (U_2, B_1, C_2), (U_2, B_2, C_1)$ の訓練で、 $(B_1, C_1) \text{ or } (B_2, C_2) \rightarrow R_1, (B_1, C_2) \text{ or } (B_2, C_1) \rightarrow R_2$ を形成することはできなかった。

そこでこの Harth や Cairniello のモデルの限界を考えてみると、彼らが考えた神経細胞の学習効果は i と j の神経細胞が興奮すれば、その間の結合係数が増加するというものであったが、この場合には、もし、神経系の中に、あるいは他の神経細胞との結合係数が 0 であるような神経細胞があっても、これは、永久に孤立したまま使用されることになる。このような神経細胞を、以後は、自由な神経細胞と呼びこことにする。こういう状態が起るという事は、先に考えれば、学習効果は、既に、入力から出力までのルートで完結している神経細胞と、入力の神経細胞の間にか、現れないことになり、Harth のモデルで、最後の

形の条件反射が形成不可能であったのはこのためである。やはり、このような条件反射即ち、非線形なものの分離をなすためには、自己組織系の中に既に述べた自由な神経細胞の加わってくる必要があると思われる。なお、この理論的考察は次節に譲る。

2.4 この方法論の限界と克服

前節で少し述べたが、シナプス結合による条件反射の学習性の解析における限界を検討してみよう。

先の結合マトリクスを圧行列で表示すると図2-3のようになる。

$$\begin{array}{c} S \quad A \quad M \\ \begin{array}{c} S \\ A \\ M \end{array} \begin{pmatrix} \pi_{SS} & \pi_{SA} & \pi_{SM} \\ \pi_{AS} & \pi_{AA} & \pi_{AM} \\ \pi_{MS} & \pi_{MA} & \pi_{MM} \end{pmatrix} \end{array}$$

S, A, M はそれぞれ 感覚器, 連合野, 効果器の神経細胞, x_i, a_j, m_k の集合で $S = (x_1, x_2, \dots, x_s)$, $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$, $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ とする。
 x_i, a_j, m_k は その細胞の状態を表し、興奮の場合は 1 その他は 0 とする。また、 $C^T = (c_1, c_2, \dots, c_p)$
 $B^T = (b_1, b_2, \dots, b_q)$, $\Pi = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \dots & \pi_{1q} \\ \vdots & & \vdots \\ \pi_{p1} & \dots & \pi_{pq} \end{pmatrix}$ とすると

$C = [\Pi \cdot B]$ は $c_i = 1 \left[\sum_j \pi_{ij} \cdot b_j - \theta_i \right]$ の演算を表すものとする。

Wirth や Caianiello のモデルでは、前述したように、全然、他の神経細胞と結合していない自由な細胞は永久に使用されないことになるので、あらかじめ π_{AS} 及び π_{AA} の結合係数には ランダムに数値を与えておいて、それに基づいて、学習させていくわけである。ところがこのようにすると、あらゆる神経細胞は生まれながらに、ある程度の運命を決定されており、脳の柔軟性即ち、学習機能に限界がある。Caianiello は初期値 $a_{ij}(0)$ を遺伝結合係数と呼び、これによって本能が説明されるとしているが、このことと、彼のモデルが学習機能ももっているというところが、実は矛盾していると言わなくても、両立しがたりものである。即ち、結合係数の初期値を、比較的大きくすると、神経系の機能がほとんど固定的なものになり、学習の余地が小さくなり、それを避けようとして、結合係数の初期値を比較的小さくすると、前述したように永久に働かぬ神経細胞が増加して、やはり学習がうまくいなくなる。これは彼らのモデルが背負っている不可避のジレンマである。

それでは、一体、実際の連合野における学習の効果はどんなものであろうか？
 生理学に沿って考えれば無条件反射は $M = [\pi_{MS} \cdot S]$ であり、条件反射は $A_1 = [\pi_{AS} \cdot S]$, $A_2 = [\pi_{AA} \cdot A_1]$, $\dots$, $A_t = [\pi_{AA} \cdot A_{t-1}]$, $M = [\pi_{MA} \cdot A_t]$ と、考え

ことができる。このように連合野の神経細胞を多く中継に使用すれば、それだけ複雑な条件反射の形成が可能なのである。先の Hart 社のモデルで形成できなかった条件反射などは $r=2$ で可能になる。

(4) 無条件反射の式を見ればわかるように、この演算には π_{AA} の結合係数は関与していないので、条件反射の学習過程があまりにもなってしまう。これについては、無条件反射のルートが二本あると考えれば良い。即ち、一つは $M = [\pi_{AA} \cdot S]$ もう一つは $A = [\pi_{AS} \cdot S]$, $M = [\pi_{MA} \cdot A]$ である。例えば、電気刺激で足を屈曲させる行為は前のルートで行なわれるけれども、大抵、その反射運動直後に腹筋刺激と、足の屈曲とを知覚するのであり、その知覚は皮質で行なわれることから、条件反射の形成は、この後者のルートも基礎にして行なわれると考えられるし、1.2 で述べたような無条件反射の皮質化現象、即ち条件反射の形成過程で無条件反射が皮質性反射の様相をかびてくることからこの二ルート説は、単なる仮説ではなく、十分な妥当性をもつ。

今更、学習効果を π_{AA} にだけ考えてきたのだが、ここで生理学から一つの問題が提出される。皮質を際立っても基礎的な条件反射が形成されるという事実は、この結合マトリックスにおいては、どう表現されるであろうか。この場合には、 π_{AA} の自由な神経細胞はなくなるので、すべての神経細胞は入力細胞や、出力細胞と、ある結合係数をもっていることになり、これは Hart 社のモデルでの前提条件と同じであり、彼のモデルで下段、基礎的な条件反射の形成が可能であったことと、同じ結果になっているのは理にかなっていて興味深い。これらのことについては生理学的根拠をもつのであり、それは、新皮質の神経細胞のシナプス結合が出生時には形成されていないこと、新皮質の各部位の中でも、より高等な統合作用をする部位ほどシナプス結合の形成が遅いということ、これに対し、大脳辺縁系では出生時にかなりシナプス結合ができており、このことから、多くの自由な神経細胞を持つ部位ほど、高い学習機能を持ち、Hart 氏や Caianiello が考えたように、初めにある程度のシナプス結合を与えた場合は学習機能が劣るのは当然の結果と言える。

従って、従来のように学習効果をシナプス結合に求める立場を貫くならば、興奮した神経細胞相互間の結合度が高まるという方法の限界を克服するのは、唯一、「自由な神経細胞を除いては他にない」のであり、それ故に、この自由な神経細胞におけるシナプス結合の形成過程、即ち、この神経細胞と興奮した神経細胞の相互作用が最大の問題となるのである。

ここでは、私は、一つの仮説として、自由な神経細胞は、同時に興奮した神経細胞の間の関連づけにたずねられる神経細胞であると考えます。

もっと具体的にこの自由な神経細胞の学習効果を設定するならば、この細胞は、同時に興奮した一組の神経細胞群のすべてとシナプス結合を形成し、以後は、この一組の神経細胞以外とはシナプス結合をつくらない。そして、このシナプス結合は、同じ組に属する神経細胞がすべて興奮したときに強化され、そうでないときは、徐々に弱くなっていく。そのうち消失した場合は、この神経細胞は再び、自由な神経細胞となって、同様のことを繰り返す。一方、同じ組に属する神経細胞がすべて興奮したときは、この神経細胞も興奮するように、なるまで強化されると、このシナプス結合は固定化される。一応この節では、この程度の仮定をしておき、次章で、もう少し単純にして、モデルを考えることにする。

第3章 学習機械としての、条件反射をする脳のモデル

3.1 神経回路網の機能の分解と合成

いま、一つの神経細胞に注目してみよう。この神経細胞についているシナプスの数を a_k とし、このうち、ある特定の r_k の組合せにおいて、 r_k のシナプスがすべて興奮を伝えたときは、この神経細胞は興奮するとすれば、このようなシナプス組合の組合せの数だけ、神経細胞を興奮に導く、入力の種類があることになる。この数を b_k とすると、この神経細胞は論理素子としては、 a_k の入力からなる b_k の AND 回路と、その出力 b_k を入力とする OR 回路であると言える。(図3-1(a)参照)。これは直観的には、樹状突起で AND 演算、細胞体で OR 演算をしていると考えてよい。なぜなら、興奮性シナプスは樹状突起に、抑制性シナプスは細胞体に付くということがあるし、また樹状突起にある特定の興奮性シナプスにだけ抑制作用を持つようなシナプスもあることから考えて、そう不都合ではない。その様子を図3-1(b)に示す。そして

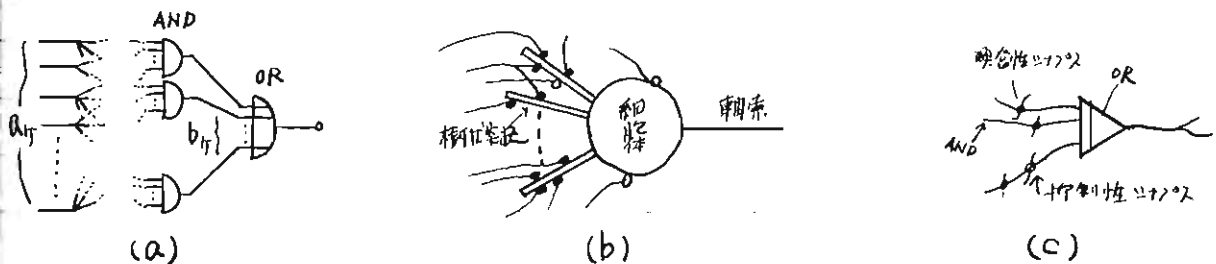


図 3-1

そういう機能だけ取りあげて分解・合成を行えば、神経細胞を図3-1(c)のように図式化できる。

この記号を使って、神経回路網の一群を表すと図3-2のようになる。

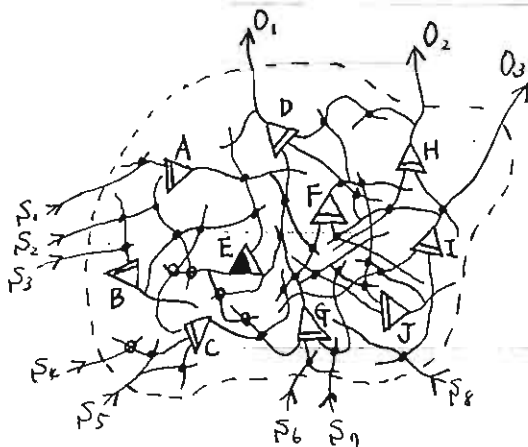


図 3-2

この神経系に入ってくる軸索の数は $a_1, \dots, a_8$ の8であり、出ていく軸索の数は o_1, o_2, o_3 の3であり、細胞 E, F, J の3つは、この神経系の外とは直接の接続はないので、この神経系の7つまでは自由な神経細胞であったことになる。ここで一例として細胞 D に着目してみよう。この論理演算を論理記号を使って表すと

$$D = F \cdot H + F \cdot I + A \cdot G \cdot \bar{E}$$

となる。

結局、この神経系は入カ、出カの論理演算回路ということになる。

さて、図1で条件反射における入力信号は、組合せ、順序、時間の3つの基本的要素から成ることを述べたけれども、その後、シナプス結合を考える段階では、組合せだけを考えるような形になってしまった。それは、シナプス結合にあり、順序、時間の要素がなにもに依るのだが、神経細胞には軸索、細胞体におけるイオン伝達の時間遅れという時間の要素があり、不応期というような順序の要素もあるので、これらだけを使っても説明できな...わけではない。

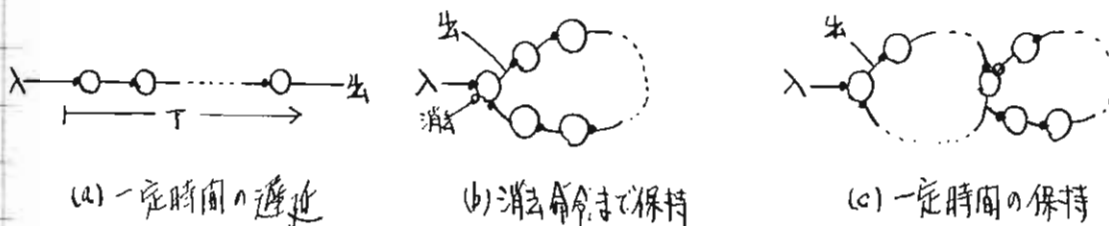
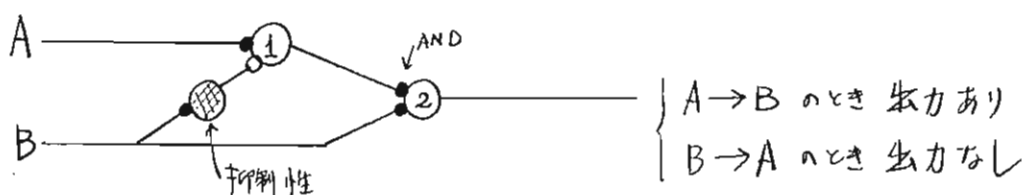


図3-3

例えば神経細胞を直列に接続すれば図3-3のように時間の信号も種々つくれる。また興奮性インヒビタがあり、神経細胞が興奮した後では、抑制性インヒビタは効力がないが、その逆の順のときは効力をもつというようなことを利用すれば図3-4のように順序の信号をつくることはできる。そして、それをも拡大していけば、先の3要素から成る入力信号に対する条件づけは可能になるのだが、その生理学的根拠がまだ少ないため、以後は組合せだけに限って検討しようと思う。



3.2 組合せモデル

前節の神経細胞の図式化に沿って、具体的に実現可能な電気回路を考えることにする。

現実の回路を考えるにあたり、最も大切なことは、学習機能をいかに形で与えるかということである。生体においては、極めて高度のいろいろな活動が、実は、単なる神経細胞の塊りによって行なわれていることからわかるように、我々が、学習機械に複雑な動作を要求するなり、それだけ、学習効果を単純な

ものにはなけいばならないと思う。それと同時に、前節に述べたように、自由な神経細胞の機能もどのような形で取り入れるか重要な問題である。上の二つの問題については、現実的なものという制約もあって、結局学習効果としては、旧来からの伝導度の増減という考えを単純化して、電位の高さを同志の短絡を考え、また自由な神経細胞の持つ機能としては、その短絡されたものをすべてを入力とする AND 回路の集合からなる OR 回路ということにした。

まず AND 回路としては、図 3-5 (a) を考える。今、3 入力の場合を考え、 P_1, P_2, P_3 に同時に入力 (電流 i_0) があれば、学習端子 L を介してすべて短絡される。その後 3 入力のうち 1 個が ON になったとき

$$V_L = \frac{r}{3} \times n i_0 = \frac{n}{3} \times r i_0$$

となる。ここでスイッチ素子のスイッチ電圧 V_p を $r i_0$ にしておけば $n=3$ のとき、RPS 3 入力すべて ON のときだけスイッチ素子は ON になり出力端子 O に出力がでる。

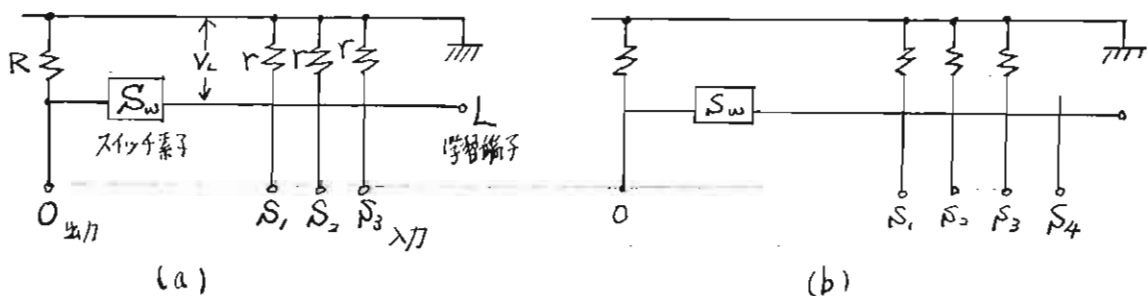


図 3-5

これは一般的には、 m 入力で構成した AND 回路で n 入力すべて ON のときは

$$V_L = \frac{n}{m} r i_0 = \frac{n}{m} V_p$$

であり、 $n < m$ のときは $V_L < V_p$ で $n = m$ のとき $V_L = V_p$ となり出力が出るようになっている。

また図 3-5 (b) のように P_4 のような入力端子を短絡するリループを加えておくと、 P_4 が開放のときは (a) と同じ動作をするが P_4 を接地したときには、 $P_1 \sim P_3$ の 3 入力すべて ON になっても $V_L = 0$ で出力はでない。即ち、この P_4 は抑制の働きがあり、 $P_1 \sim P_3$ が興奮性ツナプスとすれば P_4 は抑制性ツナプスである。

次に短絡動作は、絶縁破壊を利用することもできる。入力線と学習線の間に絶縁物を設け、この絶縁破壊電圧を適当にして、入力線が ON になり、かつ学習線に負の電位が加わったときだけ絶縁が破壊して短絡するようにしておく。

次にスイッチ素子としては、OFF のときは高抵抗、ON のときは低抵抗になるようなものを使用すれば良い。

結局、以上のおおな AND 回路を基礎とした、条件射を行う脳のモデルとして 図 3-6 を考えた。この回路の学習のさせ方は例を掲げて説明する。

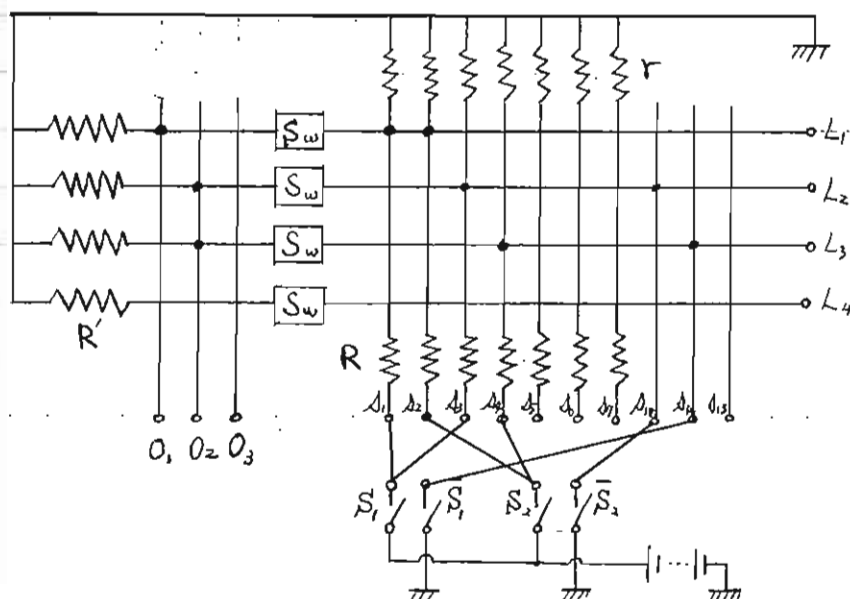


図 3-6

を与え、交点が短絡すると、 L_1 を開放にして、 O_1 に $-V_0$ の電圧を加え、出力側の交点を短絡する。その後、 O_1, A_1, A_2 を開放にし、 A_1 と S_1 , A_2 と S_2 を接続する。
 ii) A_3 と A_{11} に $+V_0$, L_2 に $-V_0$ を加え、交点短絡後、 L_2 開放して、 O_2 に $-V_0$ を加え、交点短絡後、 O_2, A_3, A_{11} を開放して、 A_3 と S_1 , A_{11} と S_2 を接続する。
 iii) A_4 と A_{12} に $+V_0$, L_3 に $-V_0$ を加え、交点短絡後、 L_3 開放して、 O_3 に $-V_0$ を加え、交点短絡後、 O_3, A_4, A_{12} を開放後、 A_4 と S_2 , A_{12} と S_1 を接続する。
 以上で学習は終了である。なお、 S_i と S_i のスイッチは、 S_i に入力のあったとき ON になるとする。

この回路の評価は後節に譲り、ここで二つほど具体例を掲げておく。

[例題 1] 2 out of 5 符号 $\leftrightarrow$ 進符号変換回路 (図 3-7)

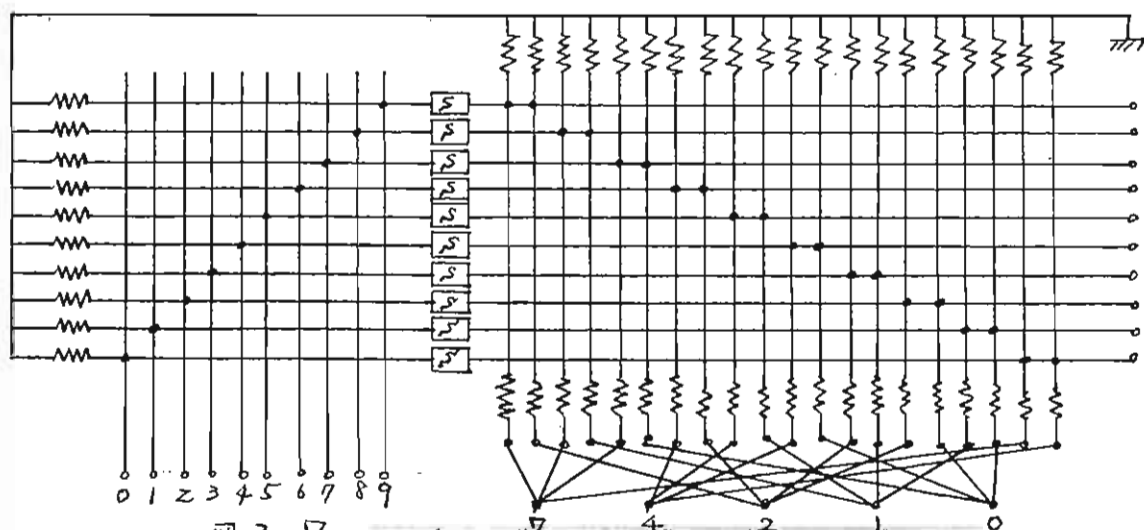


図 3-7

この場合は、2 out of 5 符号 $\rightarrow$ 10 進符号変換 のときは 普通通りに 入力側に、ON のときは正電位を用いるが、10 進符号 $\rightarrow$ 2 out of 5 符号変換 のときは、特別に出力側を入力とし、入力側を出力とするため、入力 ON のときは負電位を用いる。

〔例題 2〕 加算器 (図 3-8)

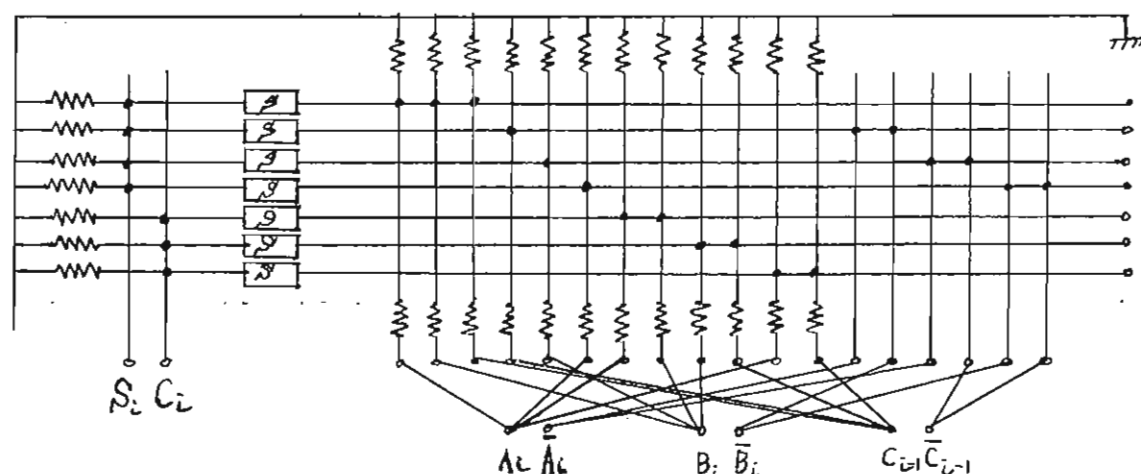


図 3-8

加数 B が被加数の i 桁目の数字を A_i, B_i で表し、 $i-1$ 桁目からの桁上りを C_{i-1} で表すと、この桁に残る数 S_i 、 $i+1$ 桁への桁上りを C_i とすると

$$S_i = A_i B_i C_{i-1} + \bar{A}_i \bar{B}_i C_{i-1} + \bar{A}_i B_i \bar{C}_{i-1} + A_i \bar{B}_i \bar{C}_{i-1}$$

$$C_i = A_i B_i + B_i C_{i-1} + A_i C_{i-1}$$

図 3-6 に示した回路を少し工夫すればいいこともできるので、そのうち 2.3 を以下に示しておく。

(応用 1) 入力端子数対入力数の比による動作

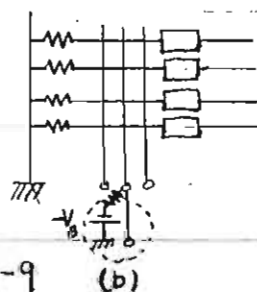
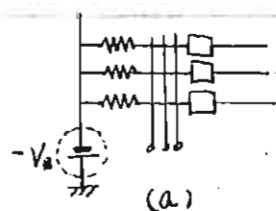


図 3-9 (b)

図 3-9 (a) に示したように、図 3-6 での出力側の接地点に、負バイアスをかけるとスイッチ電圧は $V_s - V_B$ に降下する。従って、ある一つの AND 回路で、それが m 入力構成され、そのうち n 個が ON になったときを考えると、出力が“1”になる条件は、

$$V_L = \frac{n}{m} r_{i0} = \frac{n}{m} V_s \geq V_s - V_B$$

$$\text{従って } \frac{n}{m} \geq \frac{V_s - V_B}{V_s}$$

だから例えば $V_B = \frac{1}{2} V_s$ にすれば、ある組合せを構成している n の 5 の半数以上が ON になれば出力が“1”なる。

回路がでるわけである。

また、たくさんある出力のうち、特定の出力だけ、上のように（たゞとまには図3-9(b)のようにすれば良い。

(応用2)

いまだでは入力側で、一つの入力が二つ以上の組合せに用いられる場合は、配線もすうようにしていたが、学習通棒を一段、増やせば、図3-10のようにして前と同様に、絶縁破壊による短絡を利用して、混み入った配線も避けることが出来る。

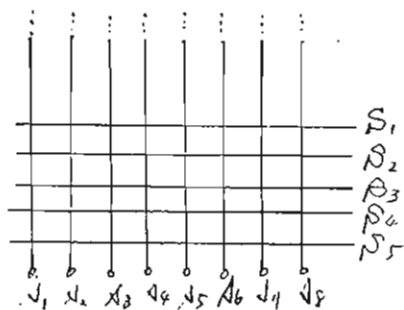


図3-10

3.3 集積回路化について

前節で述べた回路の集積回路化を考えてみる。この回路で使われる素子は抵抗とスイッチ素子の二つであり他に、重要な要素として、導線の交点における絶縁破壊がある。

まず抵抗については、一般には拡散抵抗が用いられている。誤差は普通 $\pm 20\%$ ぐらいで、 $100\Omega \sim 30k\Omega$ の範囲の値である。抵抗値はこれで十分であるが、誤差 $\pm 20\%$ では、論外である。この回路では素子の値の誤差が大まかで、それだけ、組合せの最大数が大まかに制限を受けてしまうのである。この対策の一つとしては、図3-6における抵抗 r と R を同一層-11でつくるようにすれば、比の誤差は3%なので、この両端に定電圧をかければ、この電圧を R と r が割合精度よく分けることが出来る。しかし現在のICの大きさは $1mm^2$ ぐらいであるため、高抵抗の R を多く組み入れることは不可能である。そこでもう一つの対策としては、薄膜抵抗を使うことである。これだと誤差は5%ぐらいである。

次にスイッチ素子であるが、これには、PNPNダイオード、ユニジャクツェントラニズトリヤが考えられるが、後者は、別に電源がいるので、前者の方が使い易いようである。この場合の回路、及び動作を図3-11に示す。この時出力は

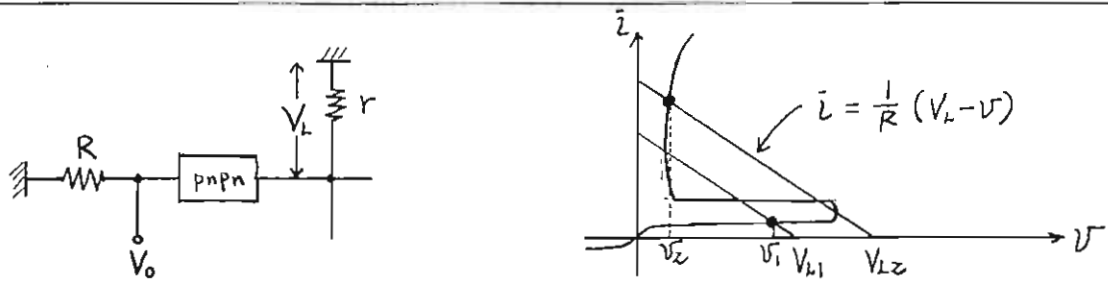


図 3-11

$$V_L \geq V_{L2} \text{ のとき } V_0 = V_L - V_{L2} \approx V_L$$

$$V_L < V_{L2} \text{ のとき } V_0 = V_L - V_1 \approx 0$$

となる。

最後に絶縁破壊に用いる絶縁物についてであるが、普通、 SiO_2 が使用されており、厚さ $1000 \text{ \AA}$ くらいである。この厚さは、数百 $\text{\AA}$ くらいなら割合精度よく蒸着できている。一方、 SiO_2 の絶縁破壊電界は数 10^6 V/cm であるので、絶縁破壊電圧は数十 V になる。この破壊電圧では、絶対的精度よりも

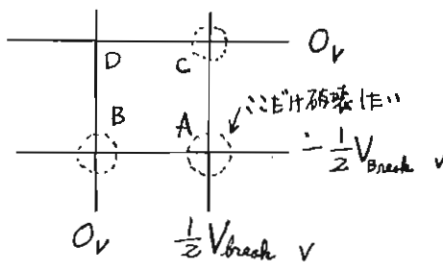


図 3-12

線CDの電位を 0_V から $+\frac{1}{6}V_{\text{break}}$ にして、線BDの電位を 0_V から $-\frac{1}{8}V_{\text{break}}$ にすればよい。

相対的な精度が重要である。即ち、図3-12を見ればわかるように、B、C点にはA点の半分の電圧が加わっており、いま、電圧を増していくとき、A点よりもB点、C点の方が早く破壊（な）という保障を必要とする。

なお、もう少し余裕を持たせる方法として、

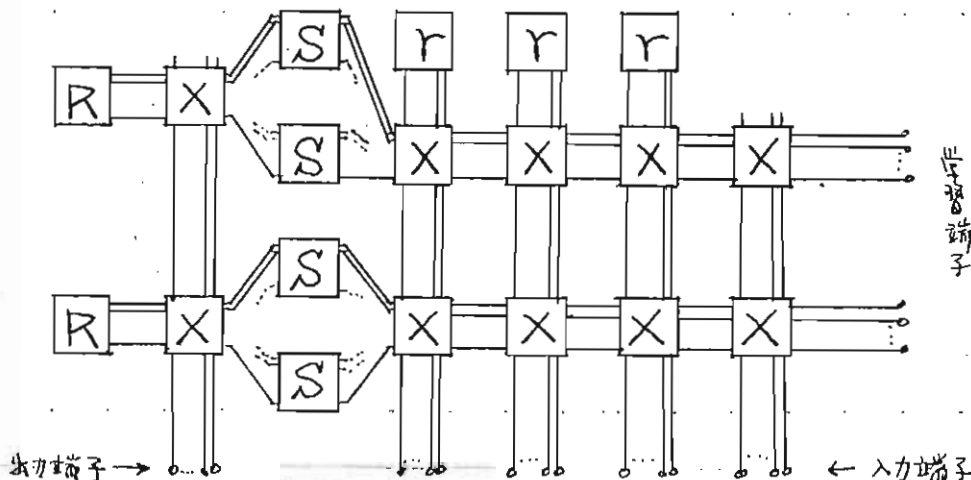
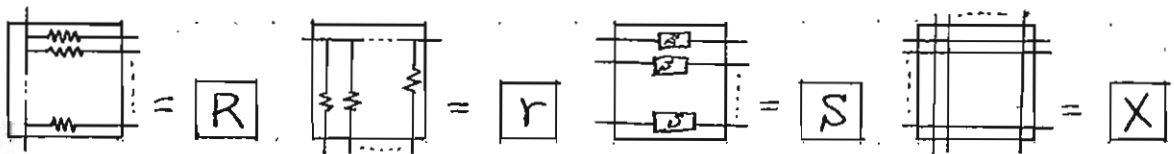


図 3-13

なお、後で試みる設計でもわかるように、この回路も集積回路1枚で実現し
 ようとすると、素子の数が限られてしまって、複雑な学習をさせることができないので
 その対策として、LSIなどの技術がもとに進歩すれば、図3-13のように、あらか
 いめ、高抵抗、低抵抗、スイッチ素子、絶縁破壊用交点、をそれぞれ単独にIC化
 しておいて、組合せるようにすれば、大抵の容量のものが得られる。

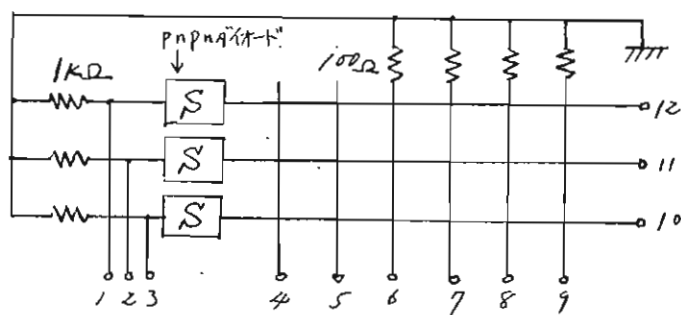
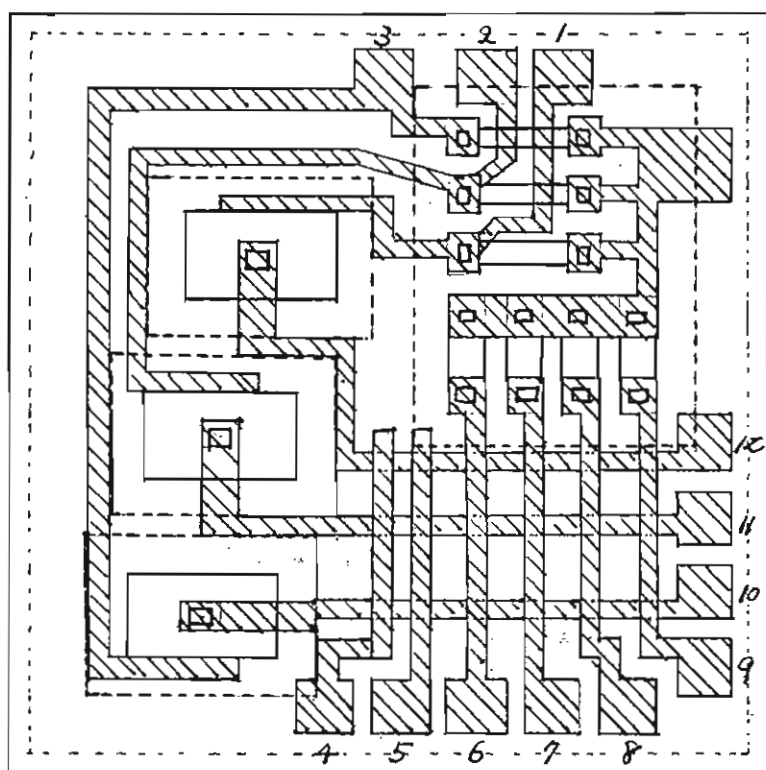


図3-14

ここで、一応抵抗の誤
 差は無視して、この回路も
 半導体集積回路で設計
 してみた。それを図3-14に
 示す。エポキシ樹脂層の
 抵抗率 $0.5\Omega\text{-cm}$ 、厚さ 25μ
 とし、パレット寸法は $1\text{mm} \times 1\text{mm}$
 とする。またアルミ蒸着膜の
 交差点の SiO_2 の厚さは
 数 μA (例えば $500\text{\AA}$) になってお
 ると、絶縁破壊を起こせ
 るためには、入力端子、学習端
 子にそれぞれ、正、負の
 数十V (例えば20V) の
 インパルス電圧を加えて
 やれば良い。ここでイン
 パルス波形にするのは、
 発熱効果を避けたため
 ある。

3-4 学習機械としての評価

このモデルを一つの学習機械と見たとき、どんな特徴を備えて
 いるか検討してみよう。

主な長所としては、このモデルに学習させるにあたっては、人間の論理操作
 を必要とせず、教師はただ、ある学習させた入力パターンとそれに対応する

出力パターン、いわば問題と答えを与えてだけで良い。そしてこの学習は一度で完成し、容量さえ十分に大きくすれば、組合せの入力パターンである限り、必ず学習は可能である。従って、図3-15のような線形機械が、重み調整に、

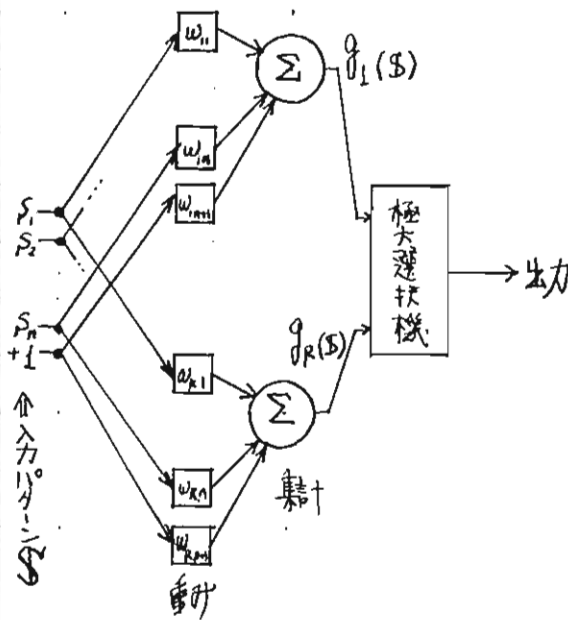


図 3-15

時間も費し、また、入力パターンが線形分離可能なものが学習できないのに比べてはるかに優秀である。

一方、欠点としては、過去の経験はすべて記憶にしているけれど、未経験の入力パターンが来ると、それが過去の記憶の一つにどこかに似ていても出力をたずないというように、確率的な働きを持たない。また、一度記憶すると、忘却とか消去の働きを持たないことがあげられる。

次に、この欠点の克服を考えてみる。

まず確率的な動作のさせ方であるが

ここでは同じことなので一般的に論じる

10入力2値(1,0)の場合を考える。実際に1024入力になる。さて、可能な入力数は $2^{10} = 1024$ であるが、これを104の入力パターンに分ける場合を考える。いま訓練用サンプルとして各出力パターンに24個ずつサンプルが与えられたとすると、このサンプル総数2048をまず学習させる。その後、ある入力があったとき、それに最も近いサンプルの属する出力が出るようにすることを考える。この時、距離としては、入力パターンのハミング距離を用いるとよい。

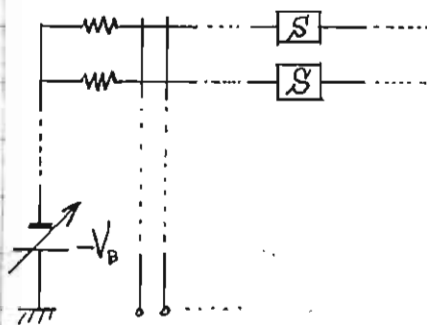


図 3-16

これは、3.3の(応用1)の異なる応用であるが、図3-16のように出力側の接地点に負バイアス $-V_B$ をかけると、スイッチ素子のスイッチ電圧が $V_F - V_B$ となる。これを利用して、ある入力があったとき、 V_B を $0V$ からだんだん大きくしていき、最初に忘れたあつた出力を、その入力の出力とすれば、このモデルは、ハミング距離を使った極小距離分類機として動作していることになる。即ち、極大選択機機能を持つ。

次に次の欠点である忘却及び消去についてであるが、記憶に絶縁破壊を用いているので忘却は困難である。(しかし忘却が記憶の消滅であるのに比べ、消去は(記憶+その抑制)であり、これは可能である。即ちある消去したい記憶を構成している組合せに、図3-17のように抑制性の

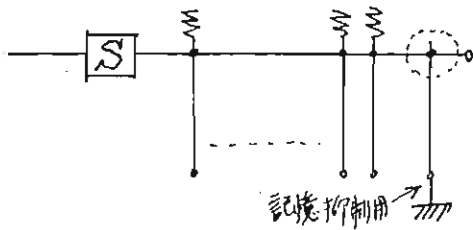


図 3-17

接地入力端子を付加すればよい。この場合、記憶の跡は残っているのでこの接地端子が開放にすれば、いつでも復活する。これは、丁度、第一章で述べた条件反射の消去抑制とその脱抑制に対応している。

第4章 結 言

この論文では、オ1章では、条件反射の解析ということも、念頭におきながら、それに役立つと思われる生理学的な資料を再編成してみた。その過程で、巨視的な事実としての条件反射活動と微視的な事実としての神経細胞の働きとを如何にして、一直線上に捕えることができるかということ、即ち、そこで考えた反射活動における脳のシステム(図1-3)を神経細胞がどのようにして構成していくかということが、非常に大きな問題として残った。特に、条件反射の形成過程で、神経細胞が如何なる機能を果たしているかという問題は、そこに学習機能の本質が横たわっていると思われるので、117そう重大である。

そこでオ2章では、生理学的事実の助けを借りながら、且つ、それに制約されながら、その問題の解析を試みた。この分野では、Hartle, Caianiello 等の試みがあり、まず彼等のモデルの検討から始めた。その結果、学習効果として、興奮した神経細胞の間の結合係数の増加を考える方法は、結合係数に初期値を与える必要のあることから、出発点の影響が大きく、丁度、皮質を除いた動物のような学習性を持って(言うことが)あつた。そこで私は、「自由な神経細胞」を提起し、これを新皮質における条件反射形成の主役と考え、条件反射のモデルにはこの自由な神経細胞の機能を持たせる必要があるという結論に至した。

次にオ3章では、その結論に従って、条件反射をする脳のモデルを考えた。ここで最も大きな問題は、この自由な神経細胞にどのような学習効果を与えるかということである。これについては、3-1で述べたように、神経細胞の機能を従来のように閾値素子と考えず、AND回路のOR回路として考えたことに関連して、ひとつの試みとして、2-4の終りに示したように、自由な神経細胞は同時に興奮したすべての神経細胞と結合してAND回路を形成すると仮定した。その結果、図3-6に示すような、条件反射を行う脳のモデルが出来上がった。

このモデルを学習機械として考えたとき、記憶に絶縁破壊を用いたため、応用面での柔軟性に欠けるような印象を受け

やすいが、3・4でも示したように、例えば出力側の接地点に負のバイアスをかけるといったような工夫をすればいろいろな機能を備えるので、入力パターンがエッジ論理パターンである限り、幅広い応用の可能性を秘めている。ただ、時間的制約があって、ほとんどその方面の研究を怠れなかったため、工学的応用分野の研究や、他の学習機械との比較検討は、今後の課題として残されている。

謝 辞

最後に 末筆ながら、親切に御指導下さった斎藤正男先生をはじめ、有意義な討論をされた斎藤研究所の方々、そして、二度にわたり、快く御意見を下さった医学部の谷島助手に感謝します。

また、同じ分野を志し、常に良き相談相手であった友人伊藤憲治君に感謝する。

文

献

〔生理学・生体工学関係〕

1. 時実 他 : 「脳と神経系」, 岩波講座, 現代の生物学 6, 1966
2. 島崎 他 : 「脳のはたらき」, 共立出版, 1966
3. A.B. コーガン : 「脳生理学の基礎」, 川村 訳, 岩波書店, 1963 (原 1959)
4. イ・トラウゴット, エリ・ハローフ & フ・リーチコ : 「人間の脳活動」, 樺島 他 訳
世界書院, 1962 (原 1957)
5. 任・イ・ソコロフ : 「知覚と条件反射」, 金子 他 訳, 世界書院 1965 (原 1958)
6. フ・オ・ドーリン : 「ヒトの生理学」, 岡田 訳, 世界書院 1966 (原 1962)
7. 梅岡 他 : 「学習心理学」, 誠信書房, 1966
8. E.M. Harth : "Brain Models and Thought Process", Automata Theory,
Academic Press, 1966
9. E.M. Harth & S.L. Edger : "Association by Synaptic Facilitation in
Highly Damped Neural Nets", Biophysical Journal, 7, PP687-717, 1967
10. E.R. Caianiello : "Outline of a Theory of Thought-Process and Thinking
Machine", J. Theoretical Biology, 2, PP204-235, 1961
11. S. Deutch : "Models of the Nervous System", John Wiley & Sons, Inc.,
1967
12. K.S. Abuladze : "Central Inhibition of Reflexes and the Problem of
the Coupled Activity of Cerebral Hemispheres" Brain Reflexes,
Progress in Brain Research, volume 22, Elsevier Publishing Company, 1967
13. E.A. Akratyan : "Some Peculiarities of Formation, Functioning and
Inhibition of Conditioned Reflexes with two-way Connections",
Brain Reflexes, Progress in Brain Research, volume 22, Elsevier
Publishing Company, 1967
14. S.A. Sarkisov : "The Structure and Functions of the Brain",
Indiana University Press, 1966
15. D.O. Hebb : "A Textbook of Psychology", W.B. Saunders Company, 1958
(自註他訳「行動学入門」紀伊国屋)
16. 山口 登 : 「思考過程のモデル」, 東大大学院電子論文輪講資料, 1968
17. 浜 他 : 「神経の生物物理」, 生物物理学講座, 吉岡書店, 1966
18. L.D. Harmon & E.R. Lewis : "Neural Modeling", 1966. Physiol. Rev. 46:513

19. Magoun, H.W. : "The Waking Brain", 2nd ed., C. Thomas, Illinois, 1962
(時実訳「脳の働き」改定新版, 朝倉書店, 1967)
20. N. Wiener : "Cybernetics, 2nd ed., The MIT Press, Mass, 1961
(池原他訳「サイバネティクス」, オス版, 岩波書店, 1962)
21. ナカルト : 「方法序説」, 小堀瀨訳, 角川文庫, 1963 (原, 1637)
22. ドラホトリ : 「人間機械論」, 杉訳, 岩波文庫, 1932 (原, 1747)
23. エングルス : 「自然の弁証法」, 池田訳, 岩波文庫, 1956 (原, 1876)

【オートマトン・学習機械関係】

24. 電通学会誌, オートマトン特集号, 1963年11月, 46巻11号
25. N.T. Nilsson, "Learning Machines", Mc-Graw Hill, 1965
26. A.M. Uttley : "Conditional Probability Machines and Conditioned Reflexes", Automata Studies, Princeton Univ. Press, 1956
27. W.A. Ainsworth : "On the Efficiency of Learning Machines",
IEEE Trans., SSC-3, 2, PP. 111~116, Nov. 1967
28. 坂井利え : 「パターン認識の理論」, 共立出版, 1967
29. 室賀三郎 : 「オートマトン入門」, 共立出版, 1960
30. 喜屋善市 : 「ディジタル回路の数学」, 共立出版, 1960
31. 北川敏男 : 「学習実験」, 共立出版, 1966
32. 北川敏男 : 「学習制御及び学習制御機械」, 共立出版, 1966
33. 大照, 加藤, 竹谷 : "Stochastic Learning Machine", 信学会オートマトン
研資 A_{IT} 68-4, 1968-04
34. 木村, 石井, 本多 : 「閾素子によるパターン認識」, 信学会オートマトン研資, 1964, 6
35. 磯道, 堀股, 飯島 : 「パターンの識別理論」, 信学会オートマトン研資, 1966, 1
36. 北橋, 手塚, 笠原 : 「多数決論理回路における入力集合の Separability について」, 信学会, オートマトン研資, 1966, 1
37. 藤崎, 第田 : 「パターン認識における評価及びパターン選択に関する一考察」, 信学会オートマトン研資, 1964, 5
38. 戸田, 伊藤 : 「多数決素子の適応的構成」, 信学会オートマトン研資, 1964, 5
39. 鈴木, 糸田 : 「パターン認識におけるパターン評価」, 信学会オートマトン
研資, 1964, 5
40. 玄中, 森 : 「従属性を考慮した特徴評価法」, 信学会オートマトン
研資, 1964, 5
41. 宮本友義 : 「記憶」, 信学会研資 A_{IT} 68-32, 1968-09

[集積回路関係]

42. 小田川, 中川, 垂井: 「集積回路とその応用」, 日刊工業新聞社, 1968

43. 「集積回路ハンドブック」, 集積回路ハンドブック編集委員会, 丸善, 1968

44. R. M. Warner: "Integrated Circuits", Motorola Inc., 1965

(小田川他訳, 「集積回路」, 近代科学社)

45. P. Richman: "Characteristics and Operation of Mos Field-Effect Device", Mc-Graw Hill Inc. 1967 (斎藤他訳「Mos電界効果素子」近代科学社, 1968)