

生物における情報処理*

杉 江 昇**

1. はしがき¹⁻⁵⁾

人工知能の研究は、生物の持つ知的能力を何らかの方法で人工的に実現することを目的とするものである。その研究はいまのところ、多くの分野で、まだ限られた成功を収めているにすぎない。現在の人工知能研究のほとんどは、計算機を道具として使っている。人工知能実現の手段として、現在の計算機に本質的な欠陥があるかどうかは、軽々しくは断定できない。しかし、人間の脳の情報処理の仕組みが計算機のそれとかなり大きく違っていることは間違いない。いまのところ脳の仕組みについての研究は十分進んでいるとはいえない。しかし生物科学者の努力によって、情報処理にたづさわる者からみて、かなり興味深い事実が見出されている。それが直ちに、そのまま人工知能の研究に役立つとは考えにくい、しかし洞察力を働かせることにより、いくつかの有用な示唆を得ることは可能なのではなからうか。以下に、主として生理学の分野でえられた、脳についての研究成果を紹介する。

2. 脳の基本素子⁶⁻¹⁰⁾

よく、人間の脳には約 100 億の脳細胞があるといわれる⁶⁾。脳細胞が、脳の基本構成素子であることは、いまでは、ほぼ確立している。すなわち、脳には、互いに独立し、分離した脳細胞が多数存在しているのである。しかし、一昔前には、脳は全体が網目のようにつながっているとすする説もあったのである⁹⁾。

脳細胞、正確には神経細胞 (neuron) は、脳だけにあるのではない。体の各部分からの情報を処理伝達したり、逆に体の各部分へ指令を送るための神経細胞が

多数存在する。眼の網膜から脳へは、人間の場合、100 万個もの神経細胞からの出力が送られている。また脊髄は、脳と手足とを結ぶ通路であって、その節々には、多数の神経細胞が存在している^{1,2)}。

神経細胞は、情報処理を専業とする特殊の細胞である。その形や大きさは体の各部でいろいろな違いを見せる。しかし、その機能や活動様式は、ほぼ次のようにまとめることができる。ただし、ごく下等動物では、高等動物と若干違っているかも知れない。第 1 図は、種々の形の神経細胞を示したものである。第 2 図に神経細胞の模式図を示す。神経細胞の入端子にあたる部分はシナプスと呼ばれ、樹状突起や細胞体の部分に存在する。外部からの電気的信号は信号線によってシナプスのところまで伝えられるがシナプスの部分は狭いギャップとなっているため、信号はここで行きどまりになってしまう。しかし信号がここへ到着するところのギャップへある種の化学物質が放出されて、それが対岸の樹状突起や細胞体で受けとられ電気的な変化を細胞体内に生じさせるのである。細胞体は、このようにして外から伝えられた信号にもとづき、神経細胞の出力信号を作り出す信号発生装置である。

神経細胞の出力信号を伝える通信線が軸索である。

神経細胞の動作する仕組みの説明のまえに、神経細胞の大きさについて簡単に述べる。大きさは、高等動物の場合、数ミクロン～数ミクロンであるが、下等動物では 1 ミリメートルにも達するものがある。小さなものだと、たとえば高等動物の小脳には 1 立方ミリメートル中に 200 万個もつまっている神経細胞もある。これらの神経細胞の配線は、技術的に非常に困難と思われるが、小脳のある種の神経細胞は 20 万個もシナプスを持っている。神経細胞は電解質の溶液の中につかっいて、液冷されているものと考えがえられる。なお脳には、神経細胞以外にグリア細胞と呼ばれるものがある。その役割はまだはっきりわかってはいないが、神

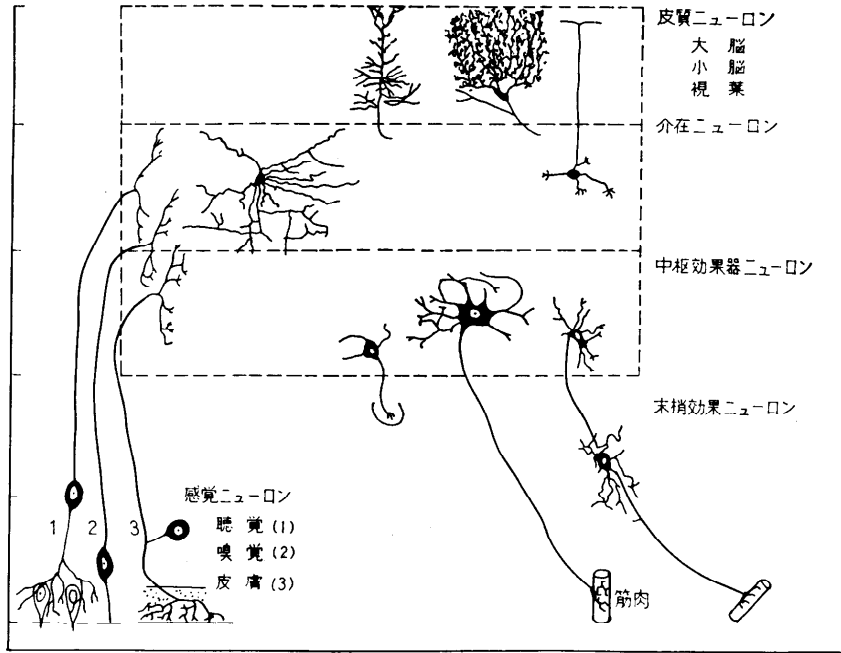
* Information Processing in Animals, by Noboru Sugie (Electro-Technical Laboratory)

** 電子技術総合研究所

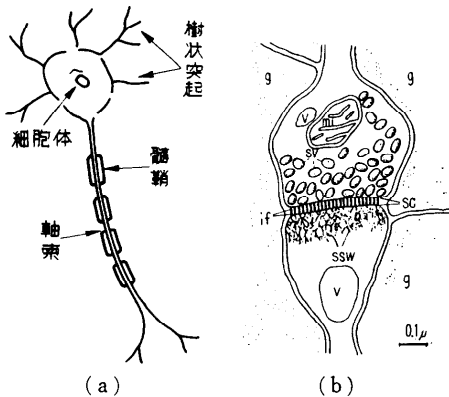
† 脳細胞の数については 26~140 億という数字がでていいる。これは、脳を比較的一様な構造をした、いくつかの領域にわけて考え、各領域の体積と、各領域での単位体積あたりの脳細胞の数とを求めて、算出したものである。

†† 前者は Cajal を代表とする「neuron doctrine」であり、後者は Held らによる「reticularism」である。

† 第 2 図 (b) のシナプス小胞が化学的伝達物質の塊であるとされている。伝達物質としてはアセチルコリンなどが考えられている。シナプスはここで述べる化学シナプスのほか、電気シナプスと呼ばれるものが下等動物で見出されている。



第1図 神経細胞のいろいろ



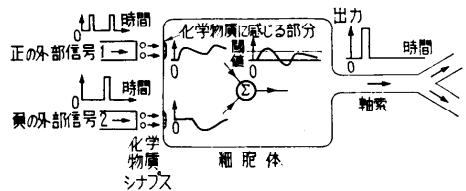
第2図 神経細胞の模式図

- (a) シナプス
- (b) g: グリア, SC: シナプスの間隙, SSV: シナプス小胞

神経細胞とは動作様式がかなり異なっており、情報処理に直接関与しているという確証はない。

3. 神経細胞の仕組

さて、神経細胞から送りだされる信号は第3図に示すように、離散的な時点でおきる電気化学的パルスの列の形をしている。このパルスは電極と呼ばれる細いプローブを神経細胞の内部もしくは、ごく近くに導入



第3図 神経細胞の動作説明図

することにより電氣的に観測することができる。すでに述べたように、電氣的パルスがシナプス部に到着するとパルスはそこで消失するが、ギャップに化学物質が放出され、対岸の神経細胞内に電氣的变化が生じる。その波形は第3図のような形をしていて、シナプス部の伝達特性は、低域濾波的な性質をしているものと考えられる。このシナプス後部に発生する電位変化は、神経細胞によりいろいろ異なり、数百 msec にも及ぶ時定数を持つものもある。

シナプス後部に発生する電位には正のものと負のものがある。これはシナプスの違いにより生じるのではなく、外部信号が、どの神経細胞に由来するかできます。正の電位をシナプス後部に生じさせるような信号源の神経細胞を興奮性と呼び、負の電位を生じさせるものを抑制性と呼ぶ。神経細胞が興奮性であるか抑制性であるかの区別は、神経細胞の出力の出力パルスを

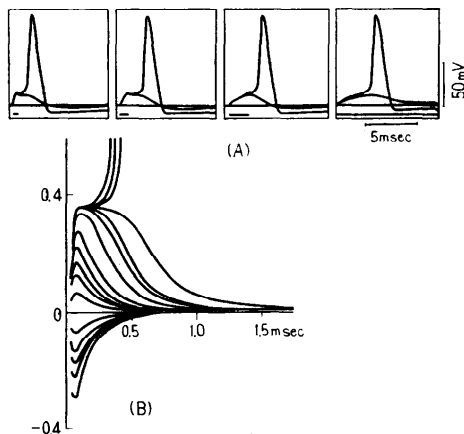
見ても分らない。パルスはすべて同じような形をしている。

このようにして、各シナプスの後部に生じた電位変化が加え合わされて、その総和がある電位よりも高くなると、その神経細胞から、ほぼ一定の形のパルス増1 msec 程度の電氣的パルスが生じる。それより高くなるとパルスが発生する電位のことを閾値という。この閾値よりも高い電位変化が生じた時だけ、出力パルスが生じるのである。以上の動作様式をデジタル化し、抽象化したものが、閾値論理素子である。

閾値よりも高い電位変化が持続して生じている時はどうなるだろうか。その時でもパルスは毎秒1,000回程度以上はおきない。これは一度パルスが発生すると、閾値がある期間極端に大きくなって、どんな大きな電位変化もこの閾値をこえることができずと解釈することができる。閾値が極端に高くなって、神経細胞が反応できない期間のことを不応期という。

閾値やシナプス部の伝達特性は、その神経細胞の過去の履歴によって変化することが知られている。このような性質は学習や記憶と関係があると考えられている。Widrow の Adaline は、シナプス部の伝達特性が可変な神経細胞を抽象化したものと考えがえられる。ニューロンの実態に即したモデルもいろいろある⁹⁾。

軸索は、電気化学的パルスを整形して、信頼性よく目的地へ送る能動線路の働きをする。軸索をパルスの伝わる速さは毎秒1 m 以下のものから50 m くらいのものである。軸索の太さや、髄鞘の有無で速度が違ふ。なお樹状突起は受動線路とみなされている。軸



第4図 軸索の特性⁹⁾

索に種々の大きさと、極性の電流刺激を加えたときの反応を第4図⁹⁾に示す。閾値のあることがわかる。

図(a)では閾値以下と閾値以上の2通りの刺激にたいする反応が重ね書きされている。閾値以下での反応は受動回路的であるが、閾値以上では能動回路として反応し大きなパルス(スパイク)が生じる。図(b)は、正および負の種々の電流刺激にたいする反応を拡大して示したものである。

以上述べたように、神経細胞は、その出力形態はパルスの有無というデジタル的なものであるが、入力情報の処理には、アナログ的な性質がはいつている。また、感覚情報の処理の仕方などでは、光の強さなどの情報をパルス密度の形で伝えていることがわかっている¹¹⁾。抽象的な思考が、脳の内部でどのように表現されているのかは、まだまだまったく分かっていない。

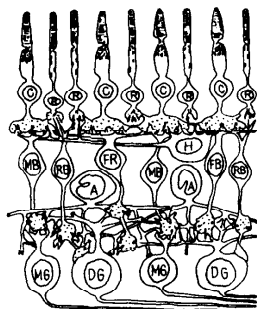
4. 神経細胞の作る回路網

これまでに述べた神経細胞だけで、生物の情報処理のすべてが行なわれているかどうかは、若干疑問であるが、生物の情報処理のかかなりの部分が、神経細胞をベースとして行なわれていることは間違いない。しかし、100億個の人工的な神経細胞を与えられたとしても、人間に匹敵する人工頭脳を作る術をわれわれはまだ知らない。

生物の神経系の中には、神経細胞の集まりで作られた、いくつかのまとまった回路網があり、神経核や神経節などの名で呼ばれている。これらの配線図や動作様式を知ることにより、われわれは脳の作られ方について、さらに進んだ理解をすることができる。以下に若干の代表例をとりあげて説明してみよう。

第5図は、電子顕微鏡を用いて最近になって見出された網膜の配線図である¹²⁾。網膜は大ざっぱに言って、三層構造になっている。第一の層は光を電気に変換する部分で錐体と桿体がある。第二の層は、錐体や桿体の出力を第三の層の神経節細胞へ伝えるため介在する双極細胞からなる。これら3種類の細胞は、その入出力端子があまり広がっていない。しかし、この他に、水平細胞やアマクリン細胞のように各細胞間の横のつながりを助ける細胞があるため、網膜の出力細胞である神経節細胞は、かなり広い領域にある錐体や桿体から情報を受けとっていることになる。一つの神経節細胞へ情報を送っている錐体や桿体は、ほぼ円形の領域内であって、この領域は更に中心部と周辺部の二つの領域(受容野という)に分れる。受容野の中心部

に光をあてたとき、神経節細胞がパルスを出すすると、周辺部に光をあてると、神経節細胞はパルスを出しにくくなるのが知られている。このことは機能的にいうと、明暗の境界に敏感なような情報処理が網膜でなされていることになる。さらに網膜の出力信号は脳で処理され、物体の直線状の稜や角を検出できるようになっている¹¹⁻¹⁴⁾。このような情報処理回路は、計算機で（容易に能率は悪いにしても）シミュレートできるし、図形処理の方式として、それほど驚くべき方式ではないかもしれない。しかし、それが実際に脳



難体 (C), 杆体 (R), 双極細胞 (MB, FB, RB), アマクリン細胞 (A), 神経節細胞 (MG, DG), (Dowling)

第5図 霊長類の網膜の配線図¹²⁾

で行なわれていること、また、その事実が発見されたということは、驚くべきことといってもよいであろう。

手足の個々の筋肉を制御する神経回路は非常によく分っているがここでは述べない^{14,15)}。われわれが複雑な行動をする場合、多数の筋肉の協調が必要である。このとき、小脳が重要な役割を果たすと考えられている。手足を動かす指令は直接には大脳から発せられるが、この大脳の指令と、手足の筋肉や姿勢の状態についての情報とを巧みに処理して、大脳を助けているが小脳であるといわれる¹⁶⁾。小脳の表面には層状に神経細胞がぎっしりならんでいる。この回路網へ外から送られてくる信号は2通りの経路からやってくる。一つを苔状線維、いま一つを登上線維という。まず苔状線維は、グラニュール（顆粒）細胞へ興奮性の信号を送る。グラニュール細胞から出る興奮性の信号線は先端で二股に分れてT字型をしている。このP字の上の水平線にあたる部分は各グラニュール細胞とも同じ方向に平行に走っているので平行線維といわれる。プルキンエ細胞は、平行線と直角方向に入力端子をだしている多数のグラニュール細胞から信号を受けとる。平行

線維はまた、抑制性のバスケット細胞へも信号を送っている。バスケット細胞は平行線維と直角方向へその両側へ信号を送りだしプルキンエ細胞を抑制する。

この神経回路網へのもう一つの入力である登上線維は、プルキンエ細胞へ直接興奮性の信号を送っている。この回路網の動作は、第6図(b)に示すように、苔状線維によって、グラニュール細胞のある集団がそのまわりよりも強く興奮すると、それにつながるプルキンエ細胞が带状に興奮すると同時に、バスケット細胞の活動により、プルキンエ細胞が興奮の帯の両側で抑制されることになる。

小脳の表面には、このような構造の均一な回路網が一樣に広がっている。いわば一樣構造の超大規模集積回路と考えられる。小脳の果している役割りの複雑なことを思うと、この回路網の機能的意義を早急に解き明かしたいものである。

5. 高次機能と脳^{2, 5, 17-21)}

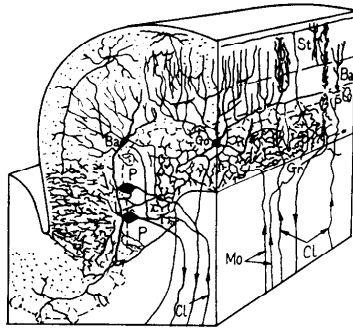
学習、記憶、認識、感情などの高次な機能を動物で調べることは非常にむずかしい。

まず細胞レベルでいえば¹⁹⁾、すでに神経細胞の項でふれたように、神経細胞の活動性が、過去の履歴により時間のオーダーで、あるいは半永久的に変ることが知られている。これは一種の記憶、ないしは学習と考えられる。たとえば、神経細胞にたてつづけに入力を加えると、その after effect として、シナプスの後部に発生する興奮性の電位変化が2時間にわたり増大したという実験がある。あるいは、神経細胞のレベルで条件反射実験に成功したとの報告もある。

あるいは、脳のにる部分の神経細胞は、動物に単調な刺激を繰返し加えると次第に反応しなくなるが、これは疲労によるのではない。単調さを乱せば、活発に反応するのである²¹⁾。このような現象は、記憶とか予測と無関係ではない。

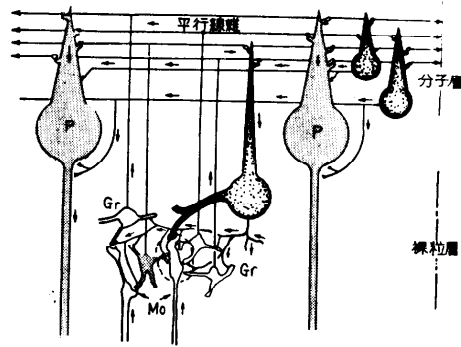
人間の記憶については Penfield らによって次のような興味ある報告がなされている²⁰⁾。

脳に疾患を持つ患者の脳のある部分を電気的に刺激すると、患者は、以前見たり聞いたりしたことのある出来事が、目の前に見えたり聞いたりするのを経験した。たとえば、ある患者の脳を刺激すると、患者は戸外でオーケストラの演奏されるのを聞いたと報告した。このように記憶に関係した脳の部分はある程度分っている。しかもこの例での想起のリアルであることは、われわれの日常行なっている想起の様子とは大い



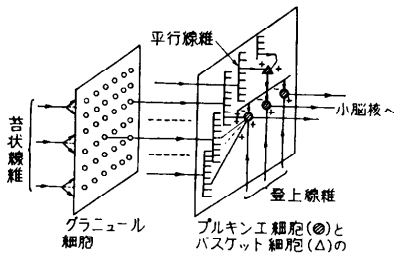
小脳回路の实体配線図 (入力は苔状線維 (Mo) と登場線維 (CL) の2種類。出力はプルキン細胞 (P) から出る。その他ゴルジ細胞 (Go), 星状細胞 (St), バスケット (Ba) 顆粒細胞 (Gr) が見られる (Eccles 他)

(a)



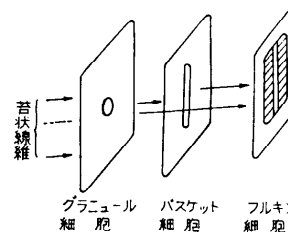
小脳回路の模式図顆粒細胞の出力は先でふた股になっていて平行線維 (Parallel Fibers) と呼ばれる (Eccles 他)

(b)



○は正のニューロン, ●は負のニューロン, ゴルジ細胞は省略

(c)



○はその領域内ニューロンからでる信号の増大を, ●は減少をあらわす
小脳回路の動作原理

(d)

第6図 小脳皮質の神経回路網

に違う。

怒りや喜びのような感情を惹きおこす脳の部分も、ある程度知られている^{5,17)}。

しかし、高次の機能がどのようなからくりで生じるかが分るまでには、まだまだ道は遠いといわなければならない。

6. あとがき

生物における情報処理の仕組みを調べる道はいろいろある。配線図をこまかく調べあげるのは一つの方法であるが、感覚器や筋肉などの入出力部から中枢へ向うにつれ作業は困難になる。脳の各部の神経細胞の活動状態を、種々の条件下で調べる方法もなかなか困難で根気がいる。感覚情報系でいえば、特長抽出のレベルまでは何とか行けるであろうが、その先の認識の領域まで迫るのは極めてむづかしい。脳の一部を刺激したり破壊して、その影響を調べる方法もあるが、その結果と、先に述べた方法による結果とを結びつけるのは

なかなか大変である。

さらには、心理学的方法、分子生物学的方法、化学的方法などがあげられる。今後は、これらの既存の方法を発展させるだけでなく、情報処理の技術や手法をもっと積極的にとり入れるべきであろう。それにより生物における情報処理の姿が次第に明らかになることを期待したい²²⁾。

参考文献

- 1) 真島英信: 生理学, 文光堂。
- 2) 本川弘一: 大脳生理学, 中山書店。
- 3) 南雲仁一篇: バイオニクス, 共立出版。
- 4) Special Issue on Studies of Neurol Elements and Systems; Proc. IEEE June 1968.
- 5) D. E. Woolridge: The machinery of the Brain, McGraw-Hill.
- 6) 伊藤正男: ニューロンの生理学 I, 科学, 40, 325, 1970.
- 7) 伊藤正男: ニューロンの生理学, II, 科学, 40, 372, 1970.

- 8) 伊藤正男: ニューロンの生理学, Ⅲ, 科学, **40**, 439, 1970.
- 9) T. H. Bullock & G. A. Horridge: Structure and Function in the Nervous Systems of Invertebrates, Vol. I, Part I, W. H. Freeman & Company.
- 10) J. C. Eccles: シナプスの生理学, 医学書院.
- 11) R. Granit: Receptors and Sensory Perception Yale University Press, 1955.
- 12) J. E. Dowling and B. B. Boycott: Organization of the Primate Retina: Electron Microscopy, Proc. Roy. Soc. B. **166**, 80, 1966.
- 13) 桑原万寿太郎編: 感覚情報 I, II 共立出版.
- 14) 勝木保次編: 中枢神経系制御 I, II 共立出版.
- 15) J. H. Milsum: Biological Control Systems Analysis, McGraw-Hill.
- 16) J. C. Eccles, M. Ito & J. Szentágothai: the Cerebellum as a Neuronal Machine, Springer, 1967.
- 17) H. W. Magoun: 脳のはたらき, 朝倉書店.
- 18) W. L. Kilmer et al.: Some Mechanisms for a theory of the Reticular Formation, in Systems Theory and Biology, edited by M. D. Mesarović, Springer 1968.
- 19) E. R. Kandell & W. A. Spencer: Cellular Neurophysiological Approaches in the Study of Learning, Physiol. Rev. **48**, 65, 1968.
- 20) W. Penfield: 判断する大脳皮質, 科学, **30**, 79, 1960.
- 21) C. Bell et al.: Sensory Properties of neurons in the mesencephalic reticular formation, J. Neurophysiol. **27**, 961, 1964.
- 22) L. D. Harmon & E. R. Lewis: Neural modelling Physiol. Rev. **46**, 513, 1966.

(昭和45年8月4日受付)