

SNU-UT Exchange Lecture Courses (2009 Fall)

(2) Oct. 14, 2009

Information processing in the brain

Akira Hirose (Bioelectronics) <http://www.eis.t.u-tokyo.ac.jp/>

Outline

1 Neuron

2 Networking, Layer, and Column

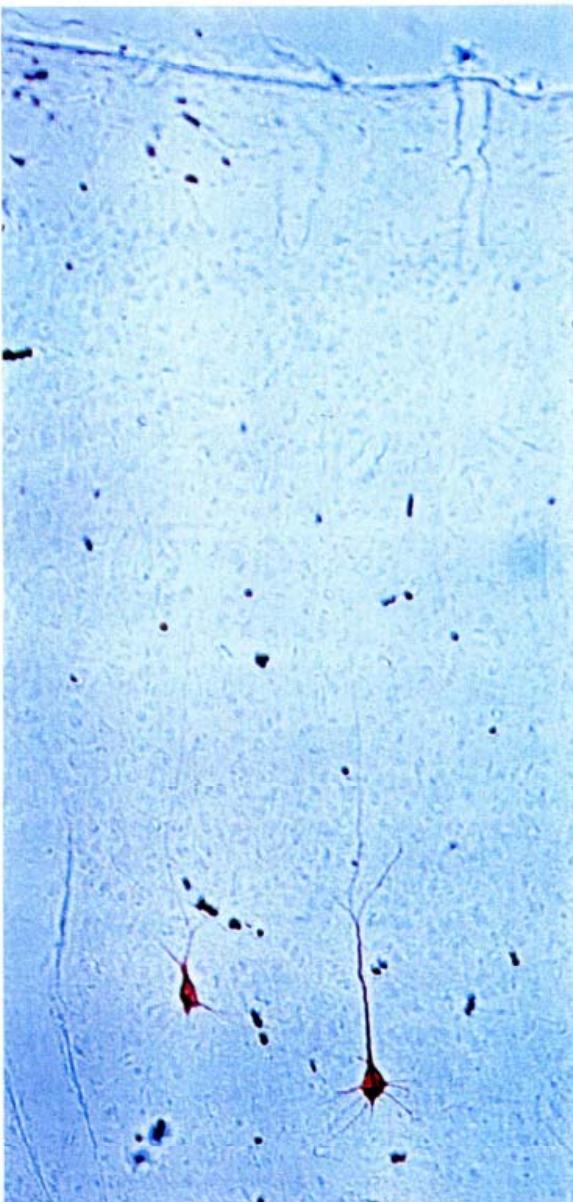
3 Topology, Retinotopy

4 What is the signal?

5 McCulloch-Pitz model

6 Associative memory

1 Neuron



視覚と筋運動　皮質一橋細胞（大脳の視覚皮質にあって脇後に軸索を投射している細胞。視覚情報を筋に伝える）がホースラディッシュ過酸化酵素を用いる方法によって選択的に赤褐色に染色されている。この顕微鏡写真はネコの視覚皮質の一剖片で表層から深さ約1.5mmまでの部分を示してある（上方の横に走る線が脳の表面）。2個の染色された細胞の細胞体から伸びるいくつかの繊維がはっきり見えるが、これらは樹状突起の一部であり、脳橋の細胞に結合している軸索は細すぎてこの拡大率では見ることができない。皮質一橋細胞は数が少なく、下位脳へ繊維を投射する細胞が主に存在するといわれる皮質深層に居局している。

134 Tokizane, 「自己記述」(1969) 東京大学出版会 71と72の図版

2 Networking, Layer, and Column

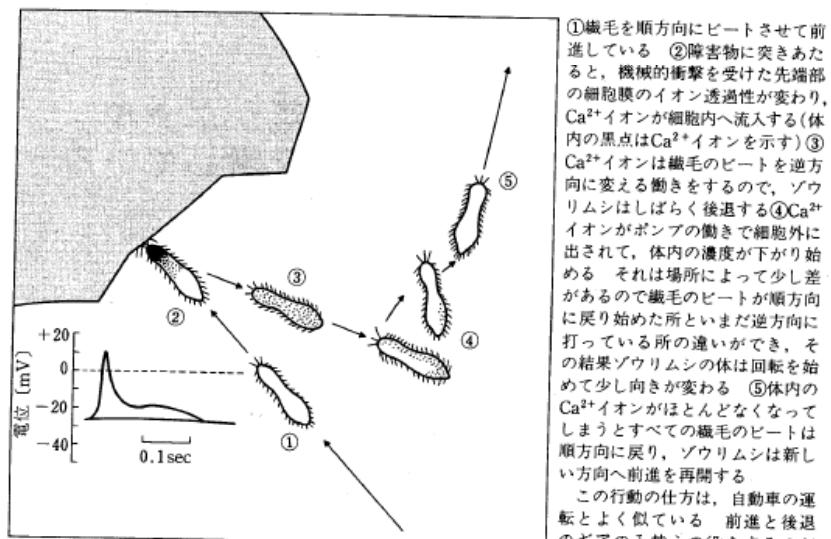


図 1・1 ゾウリムシの逃避行動と電気信号 (Takagi, M., 1989)

①纖毛を順方向にビートさせて前進している ②障害物に突きあたると、機械的衝撃を受けた先端部の細胞膜のイオン透過性が変わり、 Ca^{2+} イオンが細胞内へ流入する(体内の黒点は Ca^{2+} イオンを示す) ③ Ca^{2+} イオンは纖毛のビートを逆方向に変える働きをするので、ゾウリムシはしばらく後退する ④ Ca^{2+} イオンがポンプの働きで細胞外に出て、体内的濃度が下がり始める。それは場所によって少し差があるので纖毛のビートが順方向に戻り始めた所といまだ逆方向に打っている所の違いができる。その結果ゾウリムシの体は回転を始めて少し向きが変わる ⑤体内的 Ca^{2+} イオンがほとんどなくなってしまうとすべての纖毛のビートは順方向に戻り、ゾウリムシは新しい方向へ前進を再開する
この行動の仕方は、自動車の運転とよく似ている。前進と後退のギアの入替えの役をするのが Ca^{2+} イオンである ②の下の図は、先端部に衝撃を受けた時、 Ca^{2+} イオンによって瞬間に運ばれる電気信号を記録したものである(2・1・8参照)

先に述べた簡単な体制の生物においては、特定の刺激に対する応答の仕方は極めて単純で、思考や判断によって幾つかの応答形式の中から選ぶというような複雑さはみられず、特定の刺激に対して決まった形の逃避行動とかのただ一種の応答を機械的に生ずるにすぎない。ところが、人間を含む高等な生物になると応答の仕方は極めて複雑になり、過去の経験を蓄積した記憶という情報も加わり、込みいった思考や判断がなされて応答形式が決定される。刺激から応答に至る間のこのような複雑さは、もちろんその間をつなぐ神経細胞の集団である神経系(nervous system)の構築の複雑な発達を伴っている。しかし神經

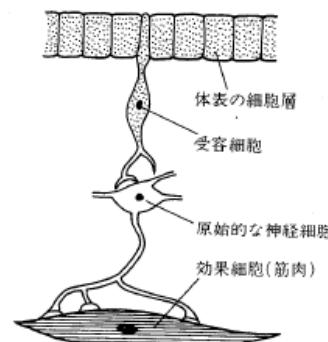
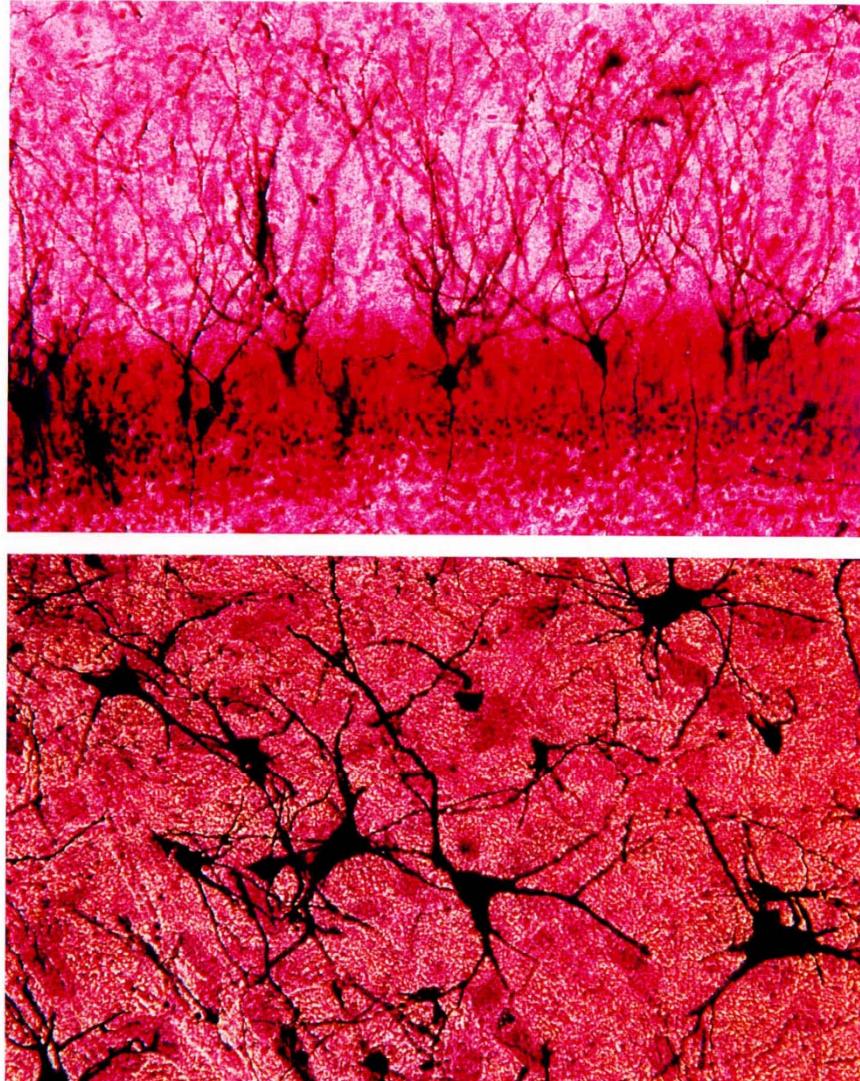


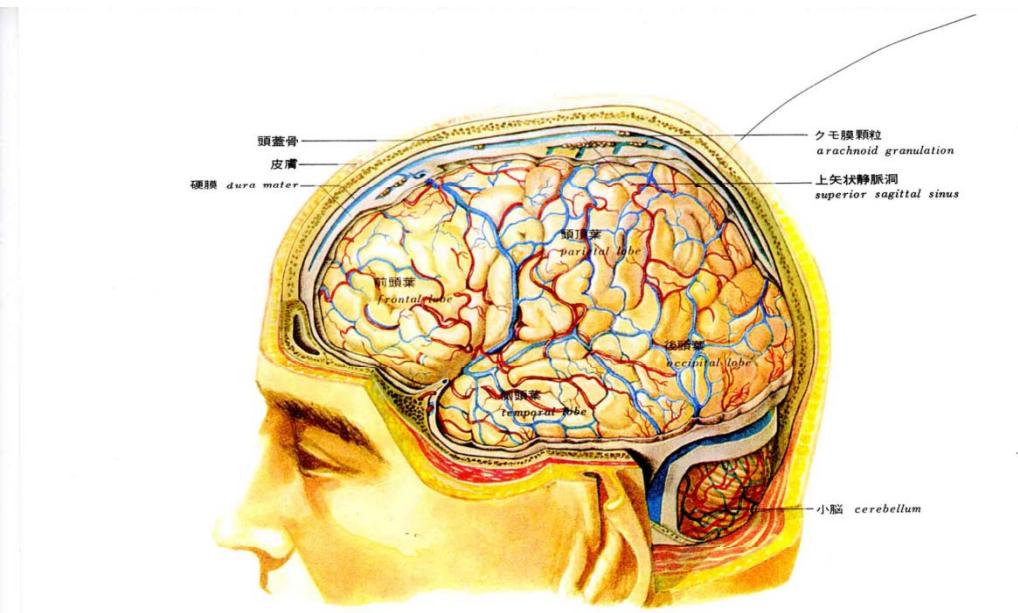
図 1・2 原始的な刺激応答系
(Tokizane, T., 1962)

3 Topology, Retinotopy

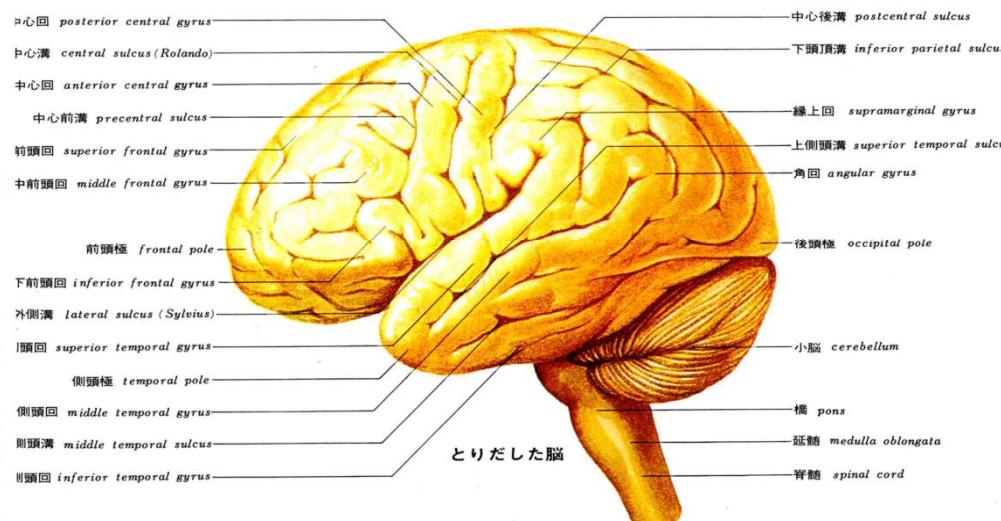


脳の細胞構成 脳はニューロンのかたまりといえる。しかし、その細胞構成は整然としてもいれば乱雑でもある。脳の細胞構成の整然さと乱雑さを示すものがこの2枚のネコの脳の薄切片の顕微鏡写真によく出ている。上の写真は、海馬の歯状回で、細胞を青く染めるニッスル染色で染めたもの。二

ユーロンの細胞体は椭円状の錐体細胞で、列をなし、軸索を平行にしている。下の写真は網様体の大型細胞である細胞とその突起全部を黒のシルエットにして浮かび上がらせるゴルジ染色で染めたもの。ニューロンは不規則な網状構造となっている。拡大率はともに48倍である。



頭蓋骨の中の脳



頭蓋骨のなかに、三重の膜で包まれておられる。軟膜 pia mater は脳の表面に密着しており、外側のクモ膜 arachnoid との間に髄液がみたされており、血管がここを走っている。クモ膜の外側は強膜硬膜 dura mater が包んでいる。

大脳 cerebrum と小脳 cerebellum に大別され、小脳は脳全体の 11% である。大脳は左右の大脳半球 hemisphere とその間にはさまざまな棒状の脳幹 brain stem で構成されている。大脳半球の表面には、たくさんのが溝 sulcus があって、溝にかこまれた部分を大

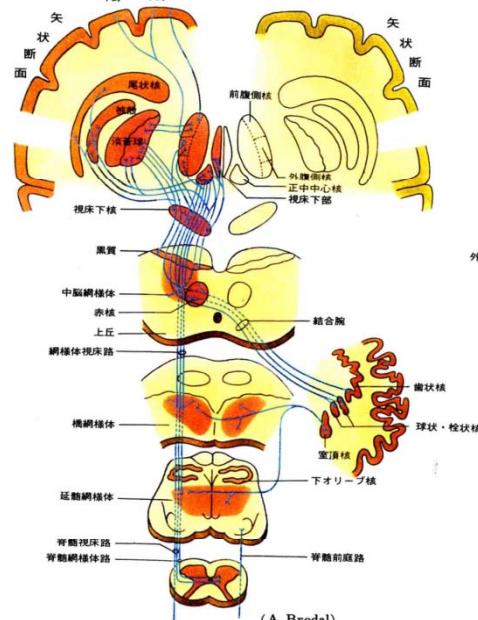
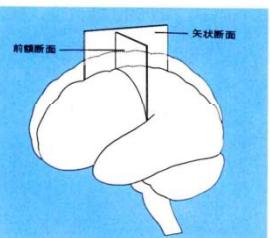
脳回 gyrus という。中心溝と外側溝があり。下図に示してあるように、中心溝と外側溝の前方の領域を前頭葉、後方の領域は更に頭頂葉と後頭葉と側頭葉に区画されている。

新皮質系の機能=3 運動系

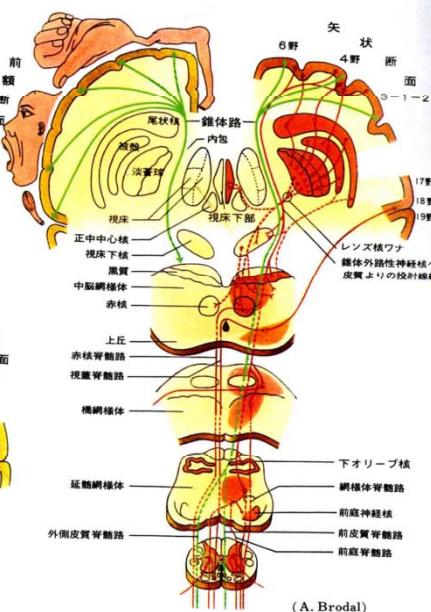
「うまく」そして「よく」生きてゆくための行動はすべて、骨格筋の組織化された収縮と弛緩によって実現されている。新皮質や大脳核と筋肉を連結する遠心性の運動神経系と、求心性の感覺神経系との協調によって、随意性が保障されている。運動神経系には、錐体を下行する錐体路 pyramidal tract と、それ以外の錐体外路 extrapyramidal tract と、それ以外の錐体外路 extrapyramidal tract に区別されている。

錐体路は、主として新皮質の運動野 motor area (4野) の神経細胞からでおり、そのほか、運動前野 premotor area (6野) や体性感覚野 somatic sensory area (3-1-2野) からもでている。大部分は、延髓で交叉して外側皮質脊髄路 lateral corticospinal tract として下行す

るが、一部は交叉しないで、前皮質脊髄路 anterior corticospinal tract として下行している。なお、運動野には、前額断面に示してあるような機能局在がみられ、手指や顎や口の運動が繊細、敏捷にできるようになっている。



41 Tokizane, 「自己形態」(1969) 東京大学出版会



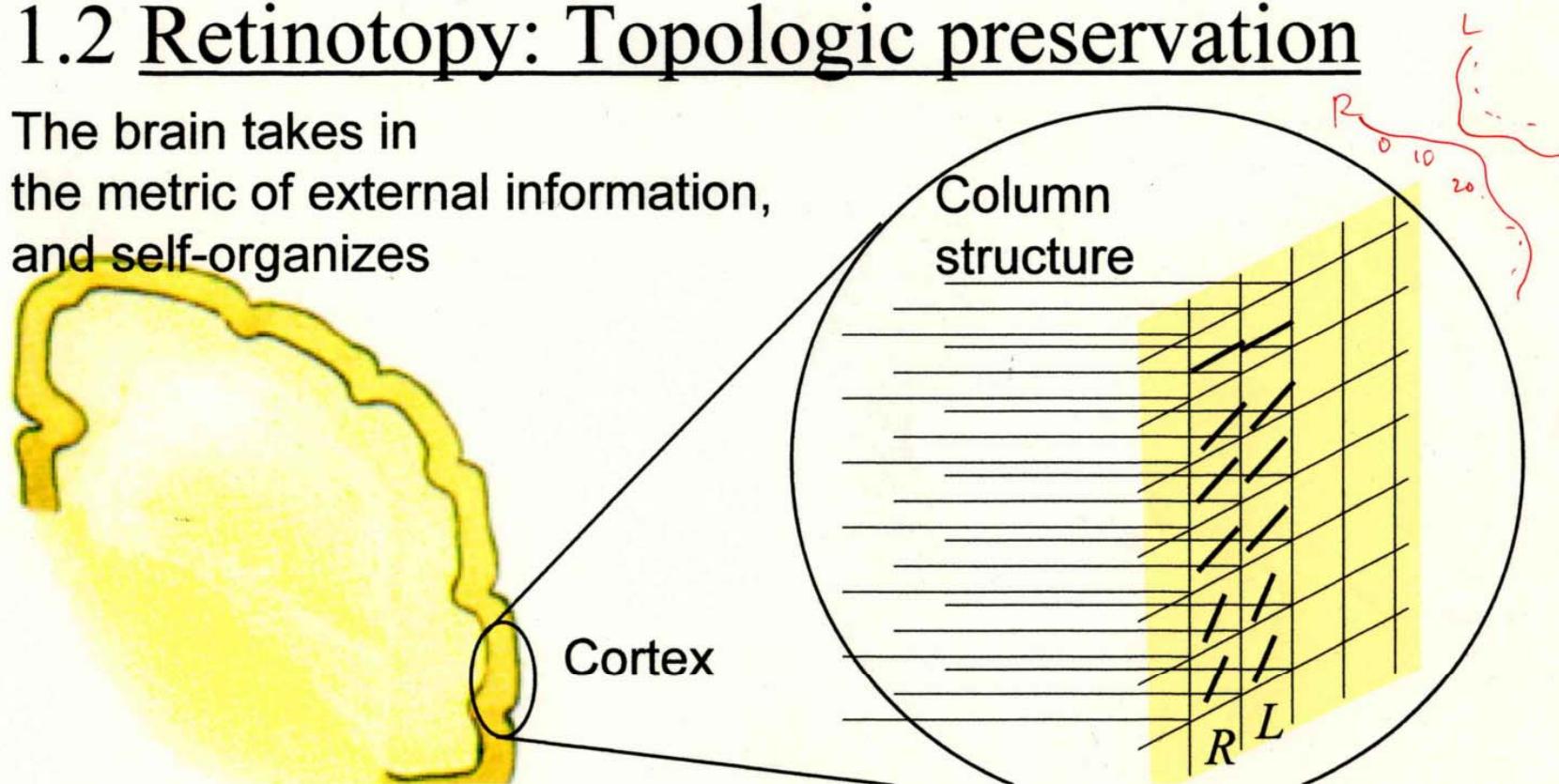
(A. Brodal)

錐体外路系は、主として運動前野の神経細胞からでているが、そのほかに、図に示すように運動に関係のあるいろいろの部位からでている。新皮質からでる線維は、大脳核や中脳の核で中継された後に脊髄へ下りる。主な経路は、赤核脊髓路 rubrospinal tract、視蓋脊髓路 tectospinal tract、網様脊髓路 reticulospinal tract、前庭脊髓路 vestibulospinal tract である。錐体外路系による筋肉の緊張や運動動作にも、合目的性が要求されるので、左図に示してあるよう複雑な求心性感覺神経路の協力によってその実現が保障されている。

1 Super Brain Electronics

1.2 Retinotopy: Topologic preservation

The brain takes in
the metric of external information,
and self-organizes



**The topology / metric of the information is preserved
..... or Information is constructed in the brain.**

The neuron position in the brain is very important
because it determines the basic processing dynamics.

4 What is the signal?

ールを使って交信している

$$e = \frac{RT}{ZF} \log_e \frac{C_1}{C_0}$$

くの実験例によ
的な電気化学の
理を思い出して
えば亜鉛, Zn)
たとえば硫酸亜
て図1・9のよう
er)を取り付け
オン(Zn^{2+})にな
そのときに正
で、後に残った
になる。そして
したとき、金属

て図に示した
大きさは（原理
これは電池の基
(half cell)と呼ばれるが、半電池の起電力(e)

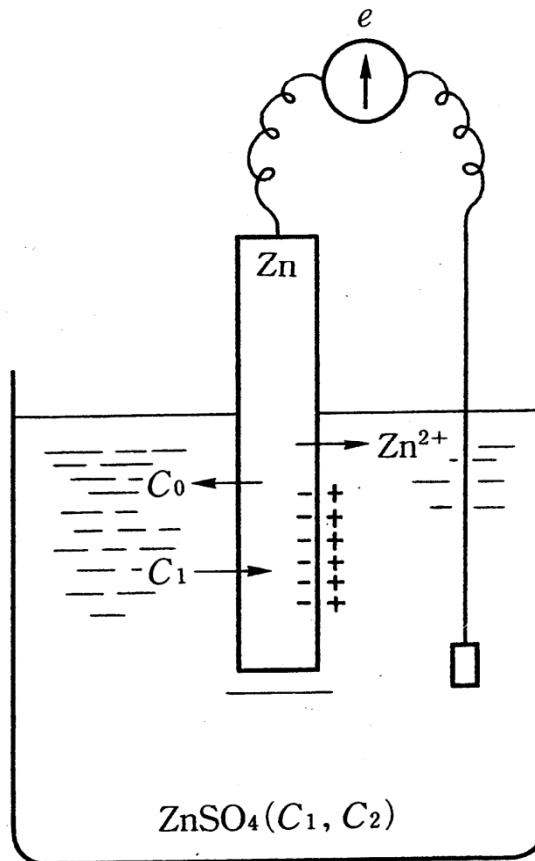


図 1・9 半電池

C₀はイオン化傾向 C₁, C₂は溶液
のモル濃度

小林他「神経情報生物学入門」木山社(1990)

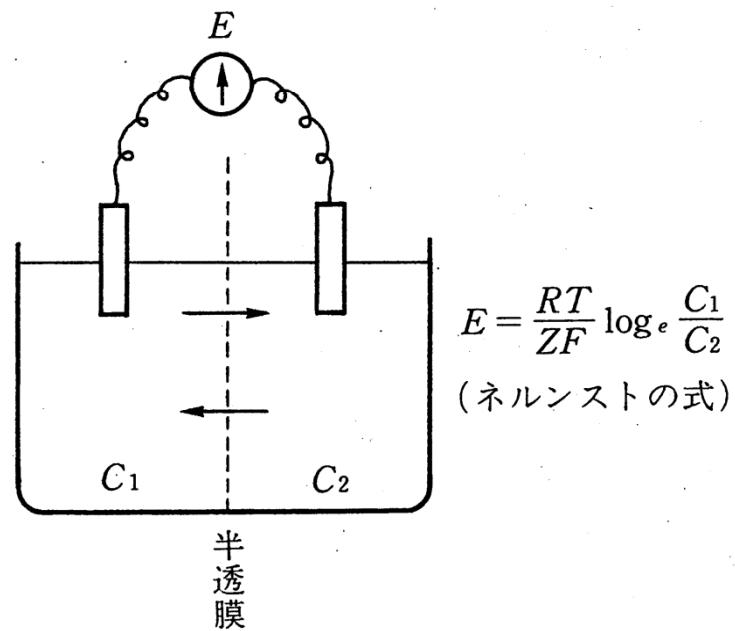


図 1・11 濃淡電池
 (膜電位の模型)



 Spear squid
表 1・4 ヤリイカ巨大神経軸索内外でのイオン濃度 [mM]

	海水 Sea Water	体液 Body fluid	(膜) Membrane	軸索原形質 Plasma
K	10	20		400
Na	460	440		50
Cl	540	560		40~150
Ca	10	10		0.3×10^{-3} *

[Baker, P. F. et al., 1962a, b]

*Caは原形質中では各種の細胞内構造物にとらえられているのでイオンになっている濃度はもっと少ないはずである

れ込めない。ところが活動時にはその透過性が急に2 000倍も高まり、N

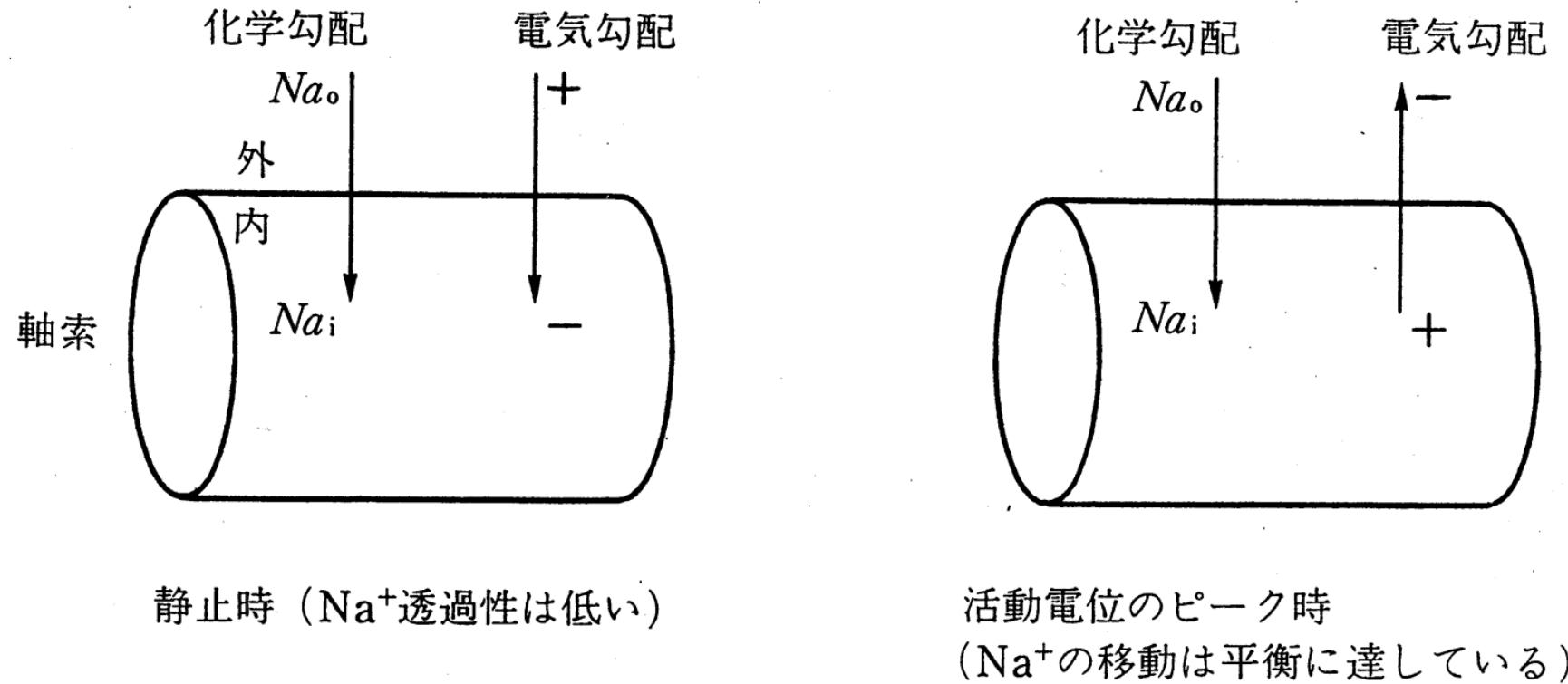


図 1・17 Na イオンの移動の平衡

1・2 ニューロンはどのようにして電気を作るか

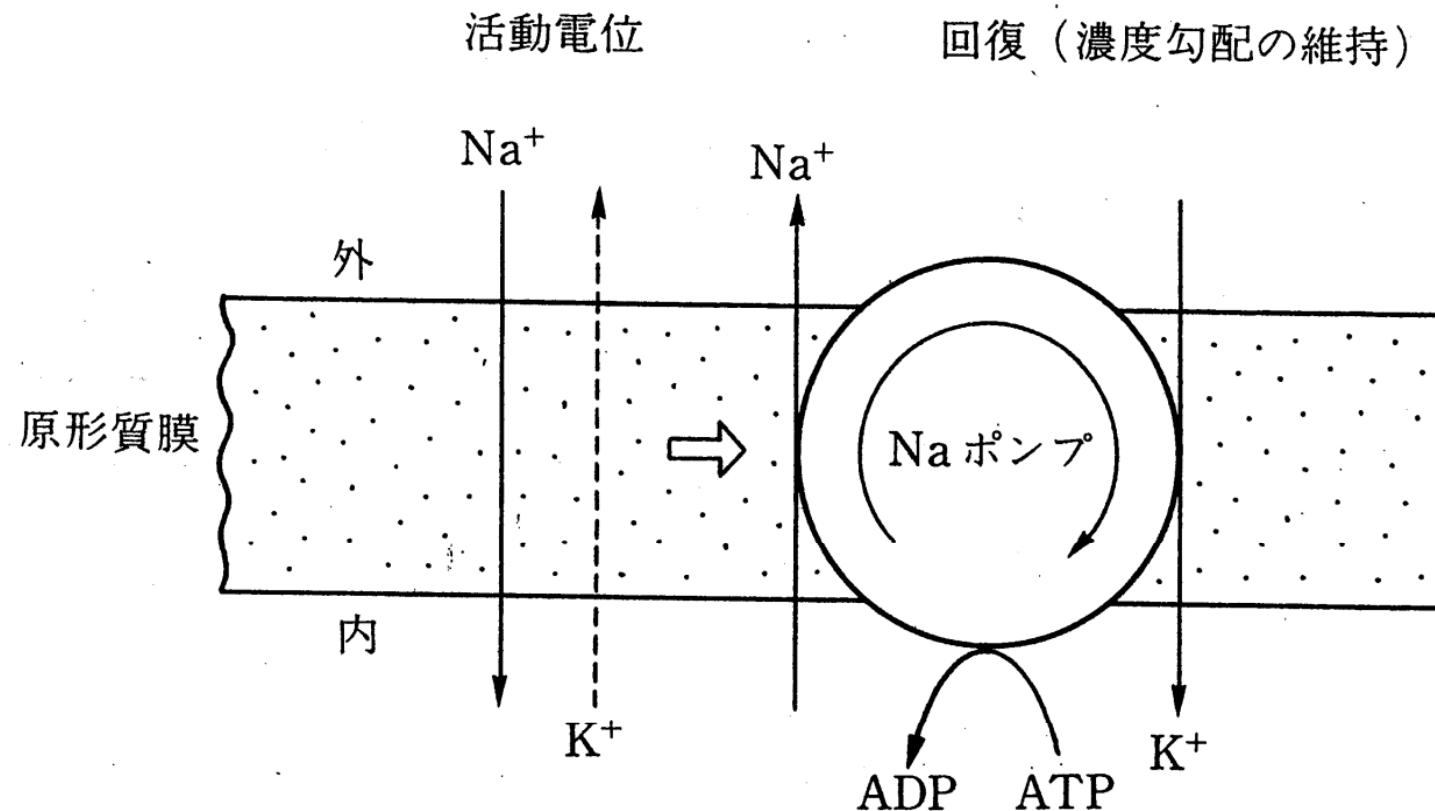
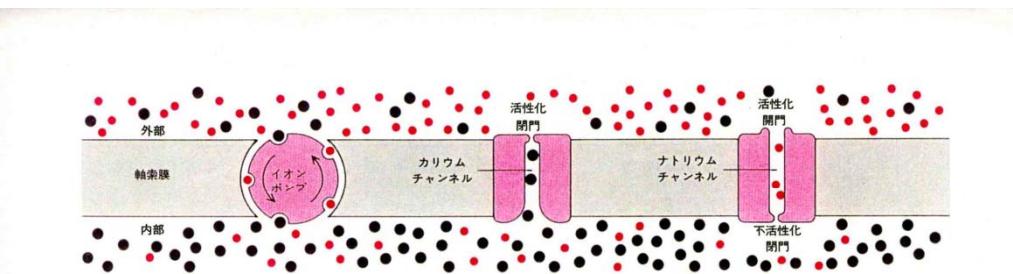
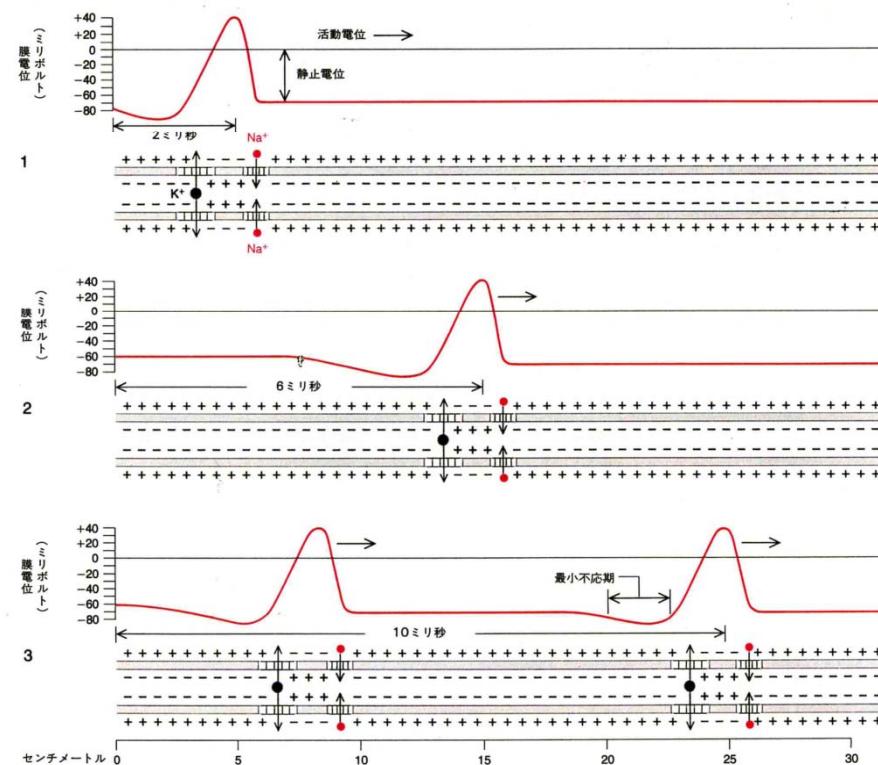


図 1・19 Na⁺ポンプによるイオン濃度勾配の維持



膜のイオンポンプ 軸索膜はナトリウムイオン(着色点)とカリウムイオン(黒点)の、濃度が異なる液をもっている。すなわち、外部液はナトリウムイオンがカリウムイオンの約10倍多く、内部液ではこの比率が逆である。どちらかのイオンをおもに通す選択性のチャンネルとして働くタンパク質が、膜を貫通している。神経インパルスが伝達されていない静止状態では、2つのチャンネルはともに閉じておらず、イオンポンプがナトリウムイオンを

汲み出し、カリウムイオンをとり込んでイオンの分布の不均一性を維持している。軸索内部は外部に対し正常で約70ミリボルトだけ負となる。この電位差が神経インパルスの到達によって減少すると、ナトリウムチャンネルが開き、ナトリウムイオンが軸索内へ流入する。次の瞬間、ナトリウムチャンネルは閉じ、カリウムチャンネルが開き、カリウムイオンを流出させる。2種類のチャンネルが次々に開閉することで、神経インパルスは伝播する。



神経インパルスの伝播 軸索に沿って神経インパルスの伝播が起きるのは、軸索膜をはさんで起こる電位変化で“開閉”されるチャンネルを通して、局所的にナトリウムイオン(Na^+)が流入し、引き続いてカリウムイオン(K^+)が流出することと一致している。神経インパルスは軸索下方へと送る電気現象が生じるのは、通常、細胞体である。インパルスは、細胞体から出る軸索の基部の膜での軽い脱分極すなわち負電位の減少で始まる。軽い電位の変化

はナトリウムチャンネルの一部を開き、その結果、さらに脱分極させる。ナトリウムイオンの流入は、膜の内部が正電位になるとまで増進する。電位の逆転はナトリウムチャンネルを閉じ、カリウムチャンネルを開く。カリウムイオンの流出は、負電位をしばらく回復する。電位の逆転は活動電位として知られ、それ自身軸索に沿って伝播する(1, 2)。短い不応期の後に、第2のインパルスが続くことができる(3)。これらはイカの巨大軸索で測定された。

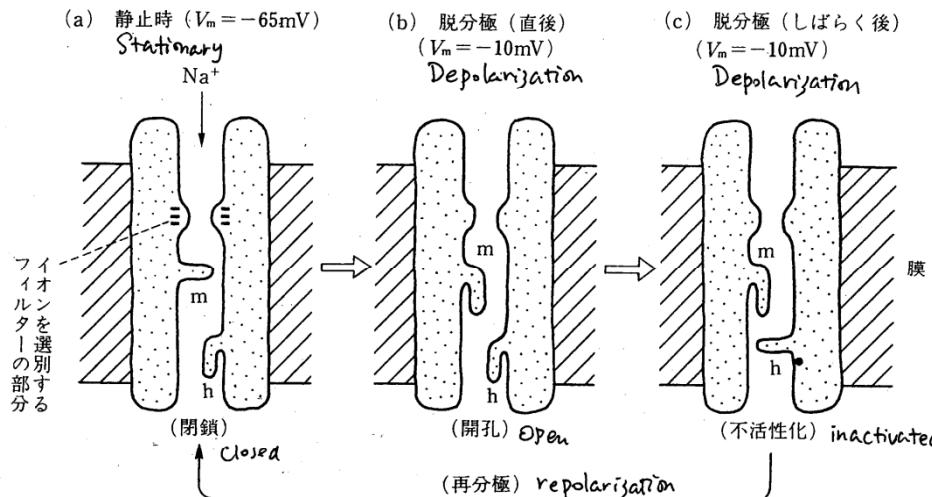


図 2・8 Naチャネルの開閉

Hodgkin - Huxley equations (1952)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{C_m} \left\{ i - \bar{g}_{\text{Na}} m^3 h (V - V_{\text{Na}}) \right. \\ \quad \left. - \bar{g}_K n^4 (V - V_K) \right. \\ \quad \left. - g_L (V - V_L) \right\} \\ \frac{dm}{dt} = \alpha_m (1-m) - \beta_m m \\ \frac{dn}{dt} = \alpha_n (1-n) - \beta_n n \\ \frac{dh}{dt} = \alpha_h (1-h) - \beta_h h \end{array} \right.$$

C_m : Membrane capacitance

V : Membrane potential

i : Synaptic current, etc.

\bar{g}_{Na} : Maximum Na-channel conductance

\bar{g}_K : Max K-channel conductance

g_L : leak conductance

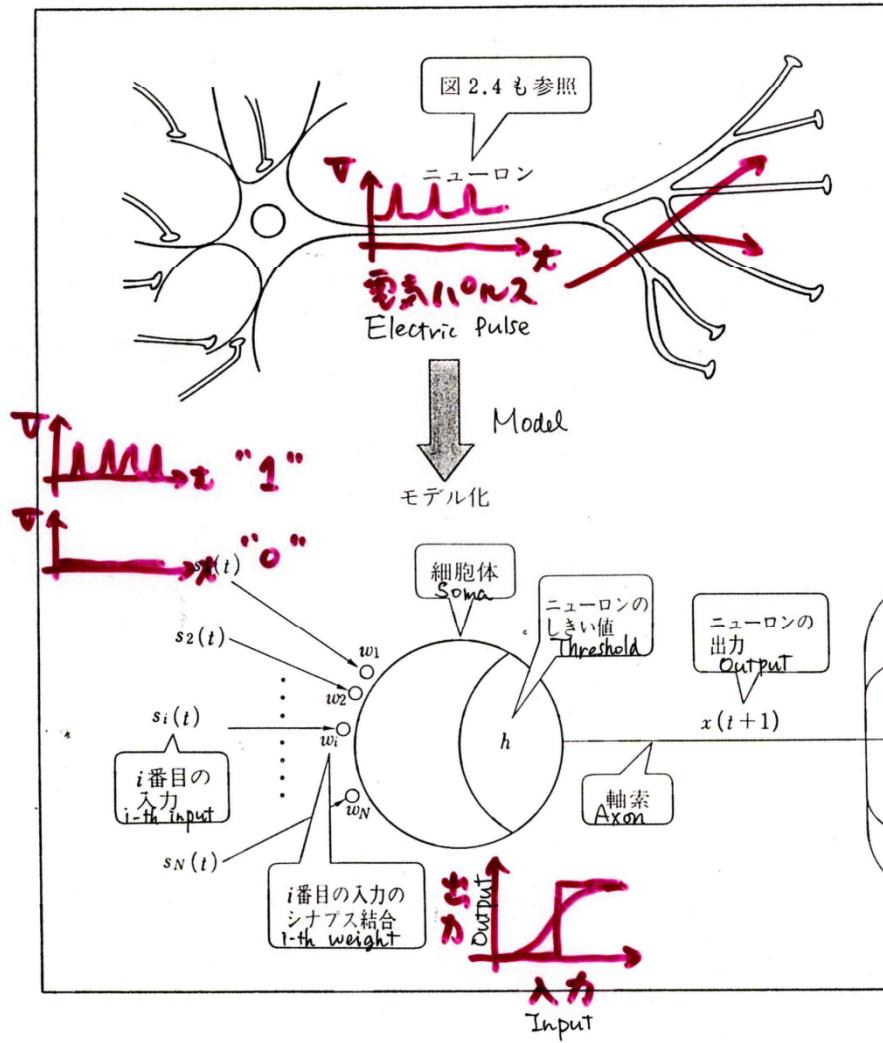
m, n, h : Activation rates

determined empirically

5 McCulloch-Pitz model

ニューロンは、多大な凹凸の形様を示す
一つの最も単純で、かつ興味深いモデルは
McCulloch と Pitts が提案した形式ニューロン
る (図 3.2). (1943)

Formal Neuron model
●図 3.2 形式ニューロンモデル



McCulloch-Pitz Model

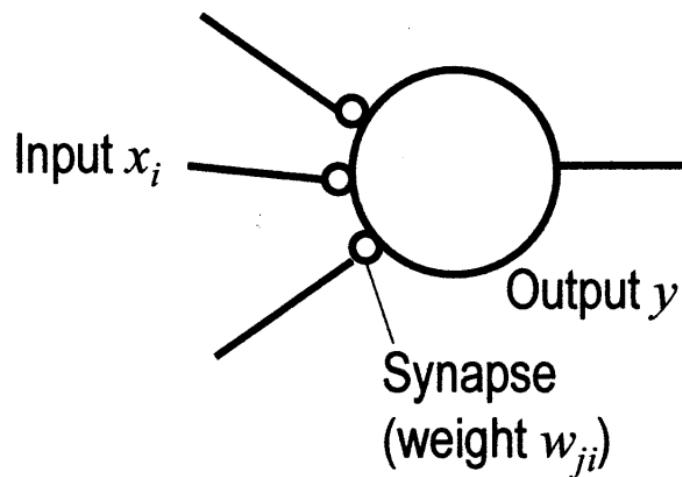
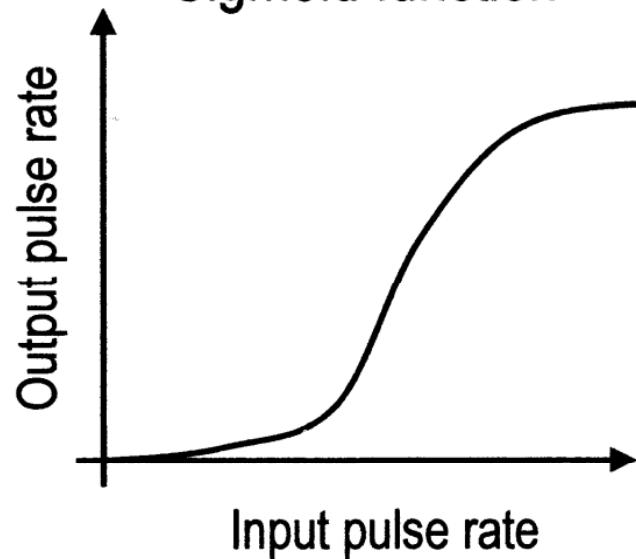
Features:

(1) Information

= pulse rate (average)

(2) Nonlinearity:

Sigmoid function

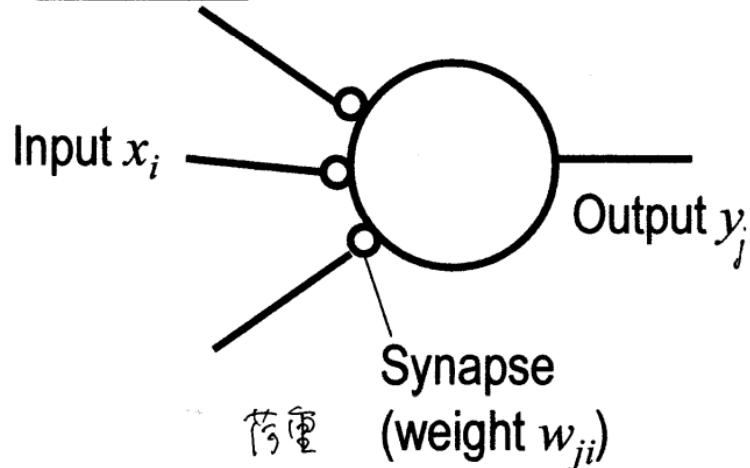


$$y = f\left(\sum_i w_i x_i - \theta\right)$$

f : Activation function
(e.g., sigmoid function)
 θ : threshold

Comparison: Circuits / Devices

Neural



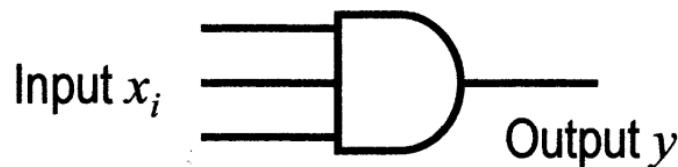
Function: weighting, summation,
thresholding, nonlinear transform

$$y = f\left(\sum w_i x_i - \theta\right)$$

f : Activation function
(e.g., sigmoid function)
 θ : threshold

Conventional Logic

(AND circuit, etc.)



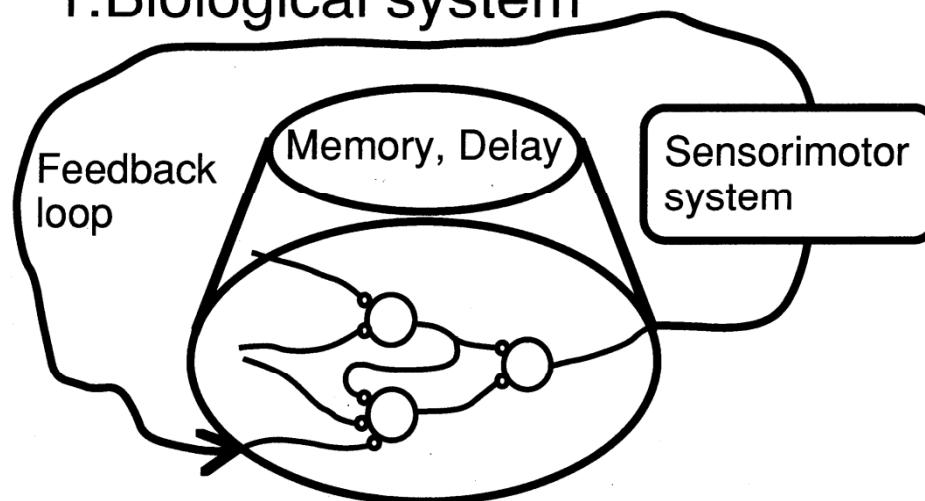
Function: summation,
thresholding, nonlinear transform

$$y = I\left(\sum x_i - \theta\right)$$

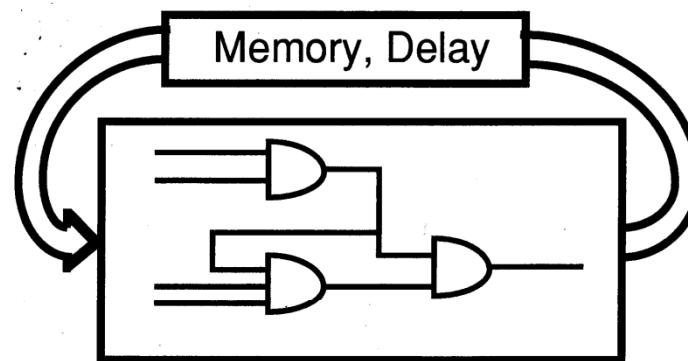
I : Step function
 θ : threshold (AND, OR, ...)

Sequential Circuits

1. Biological system

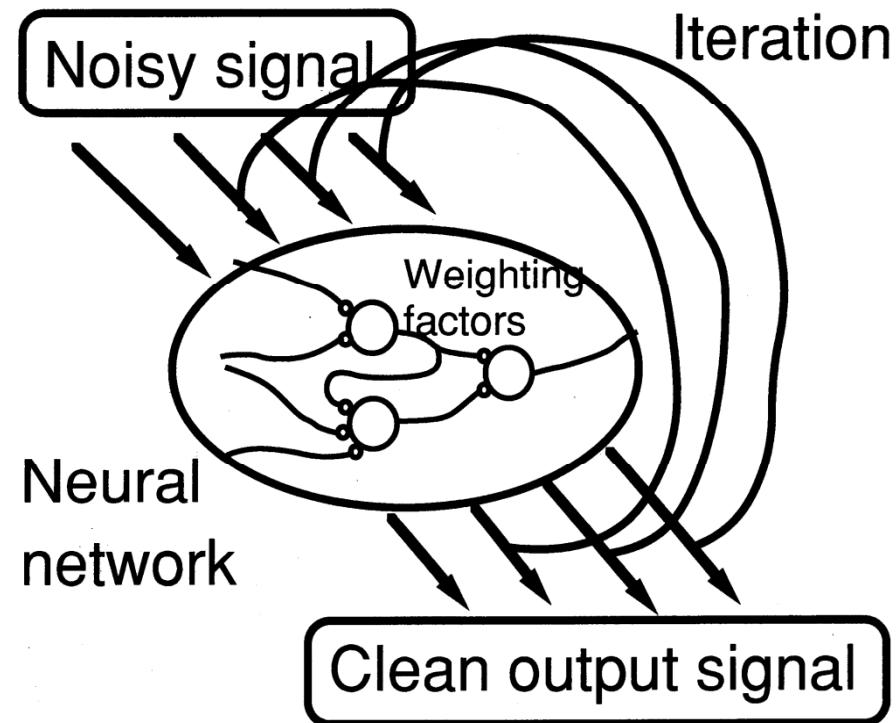


2. Electron system



6 Associative memory

Associative Memories: Function

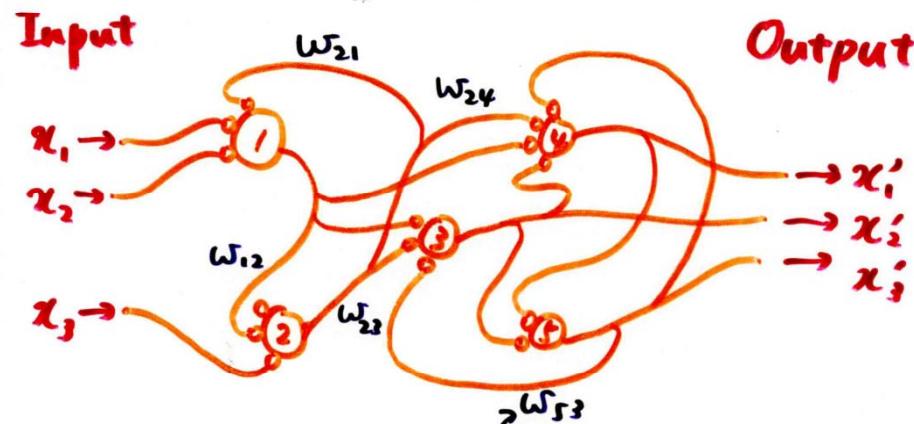


Retrieval (Recalling) process

c.f. Hippocampus

Associative Memories: Construction(1)

Distributed operation



Autocorrelation Matrix Weighting factor

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ \vdots \\ x'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & w_{n3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

Associative Memories: Construction(2)

Autocorrelation Matrix \bar{W} :

$$\bar{W} = \begin{bmatrix} 1, & \alpha_1, & \alpha_2 \\ \alpha_1, & 1, & \alpha_3 \\ \alpha_2, & \alpha_3, & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1, \\ A_2, \\ A_3 \end{bmatrix}$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Eigenvalues} = \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \\ \text{Eigenstates} = A_1, A_2, A_3 \end{array} \right.$$

$$\bar{W} A_1 = \lambda_1 A_1$$

A_1 : Stable and attracting

Dynamics (Operation)

input

$$x = \Delta I_1 + n$$

Weight

$$W = \begin{bmatrix} \Delta I_1, \Delta I_2, \Delta I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_1^T \\ \Delta I_2^T \\ \Delta I_3^T \end{bmatrix}$$

Weighting and Summation

Wx

$$= \begin{bmatrix} \Delta I_1, \Delta I_2, \Delta I_3 \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta I_1^T \\ \Delta I_2^T \\ \Delta I_3^T \end{bmatrix}}_{\left[\begin{array}{c} |\Delta I_1|^2 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right]} \begin{bmatrix} \Delta I_1 + n \end{bmatrix}$$

$$\approx \begin{bmatrix} |\Delta I_1|^2 \Delta I_1 + 0 + 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\Delta I_1|^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Analogy between Associative Memories and Quantum Theory

e.g., Observation of Photon Number

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Destruction Operator} & \hat{a} \\ \text{Creation Operator} & \hat{a}^+ \\ \rightarrow \text{Number Operator} & \hat{n} = \hat{a}^+ \hat{a} \end{array} \right\} \text{(Hermite)}$$

↑
Observable

In the case of number state :

$$\langle n | \hat{n} | n \rangle = n \quad (\text{Photon number})$$

n : Eigenvalue

$E = h\nu$: Energy of Light

"Energy" of the Associative Memory

$$E \equiv \mathbf{x}^* \mathbf{W} \mathbf{x}$$

$$= [x_1 \dots x_n] \begin{bmatrix} & \\ & w_{ij} \\ & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

$$E(t) = \mathbf{x}_{(t)}^* \mathbf{W} \mathbf{x}_{(t)}$$

$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{W} : \text{constant} \\ \mathbf{x} : \text{changing through iteration} \end{array} \right.$

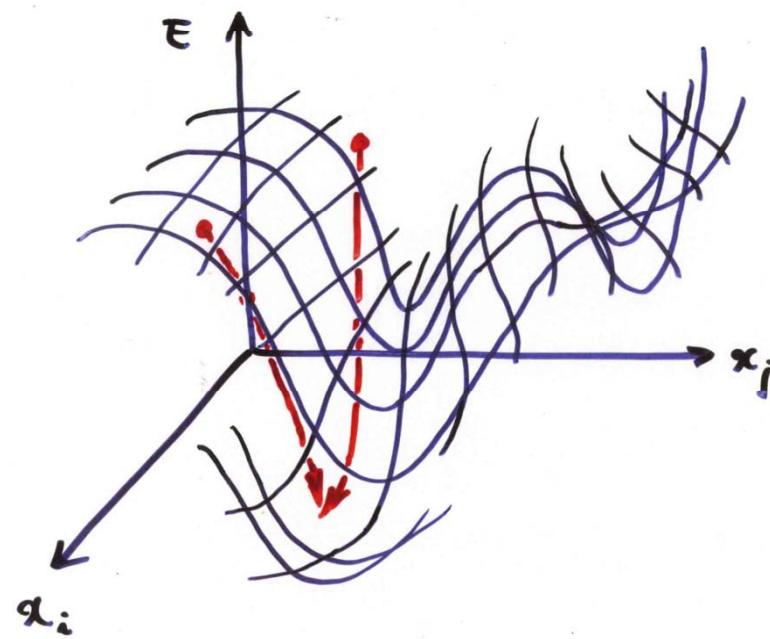


$$\frac{dE}{dt} \leq 0, \text{ monotonous decrease}$$

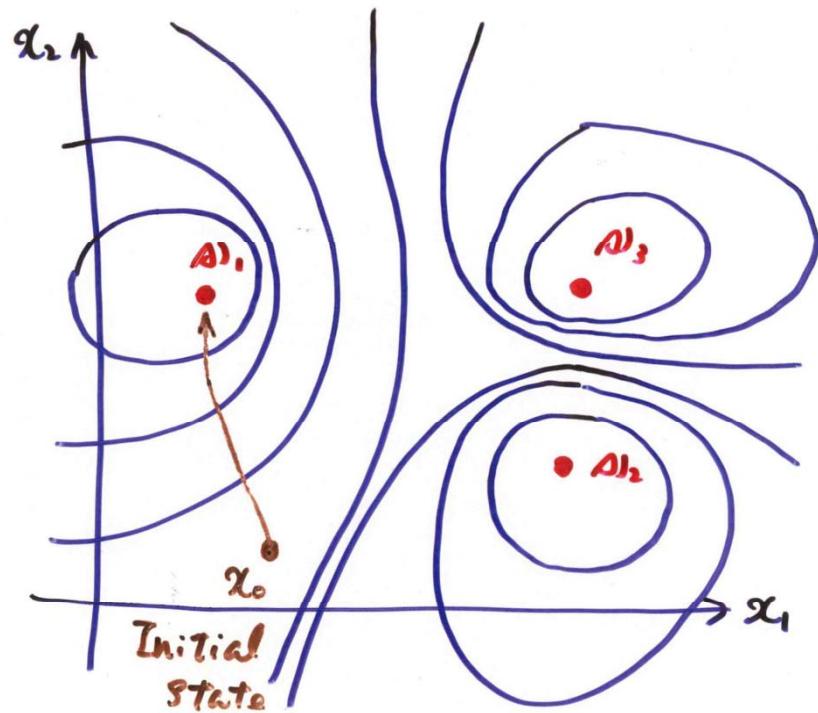
$$\left(\frac{dE}{dt} = 0 \text{ when } \mathbf{x} = \mathbf{o}_\mu \right)$$

"Energy" in Topological Space

Energy $E(\mathbf{x})$ in n-dimensional topological Space .



Attractors & Basins



Local transition



Global variation

Centralized, Symbolic processing

Processing base: Bit

- (Artificially constructed information space)
*Serial /time-sequential program
*Symbolic processing (AI)
*Turing-machine modelled processing concept
*Conscious processing

von Neumann

Developped elementalistically,
separate info, principle, existence

Physical realization:

- Specialized for bit processing
*Bit memory, Logic circuit
*Bit-based transparent system
*Time-sequential, procedural circuit

Complementary

Distributed, Pattern processing

Processing base: Metric

- (Natural small-law-set infomation space)
*Continuous /holistic parallelism
*Pattern processing
*Info space reflecting environment
*Unconscious / mood processing
("Right brain", "Intuition", "Sixth sense")

Neural

To develop synthetically,
close info, principle, existence

Physical realization:

- Variable depending on purposes
*Linear/Nonlinear continuous processing corresponding to environment
*Unified processor, memory, interface, etc.
*Parallel, synthetic circuit

A. Hirose , " Complex - Valued Neural Networks." Springer (2006)

Comparison: System constructions and functions

1. Plasticity(可塑性)

(a) Learning ability(学習能力)

(b) Self-organization ability(自己組織化能力)

→ Adaptability(適応性、未知の状況に対応する)
Generalization(汎化)

2. Distributiveness(分散性)

(a) Parallel Operation(並列動作)

(b) Cooperation & Competition(協調と競合)

→ High Reliability(高い信頼性)

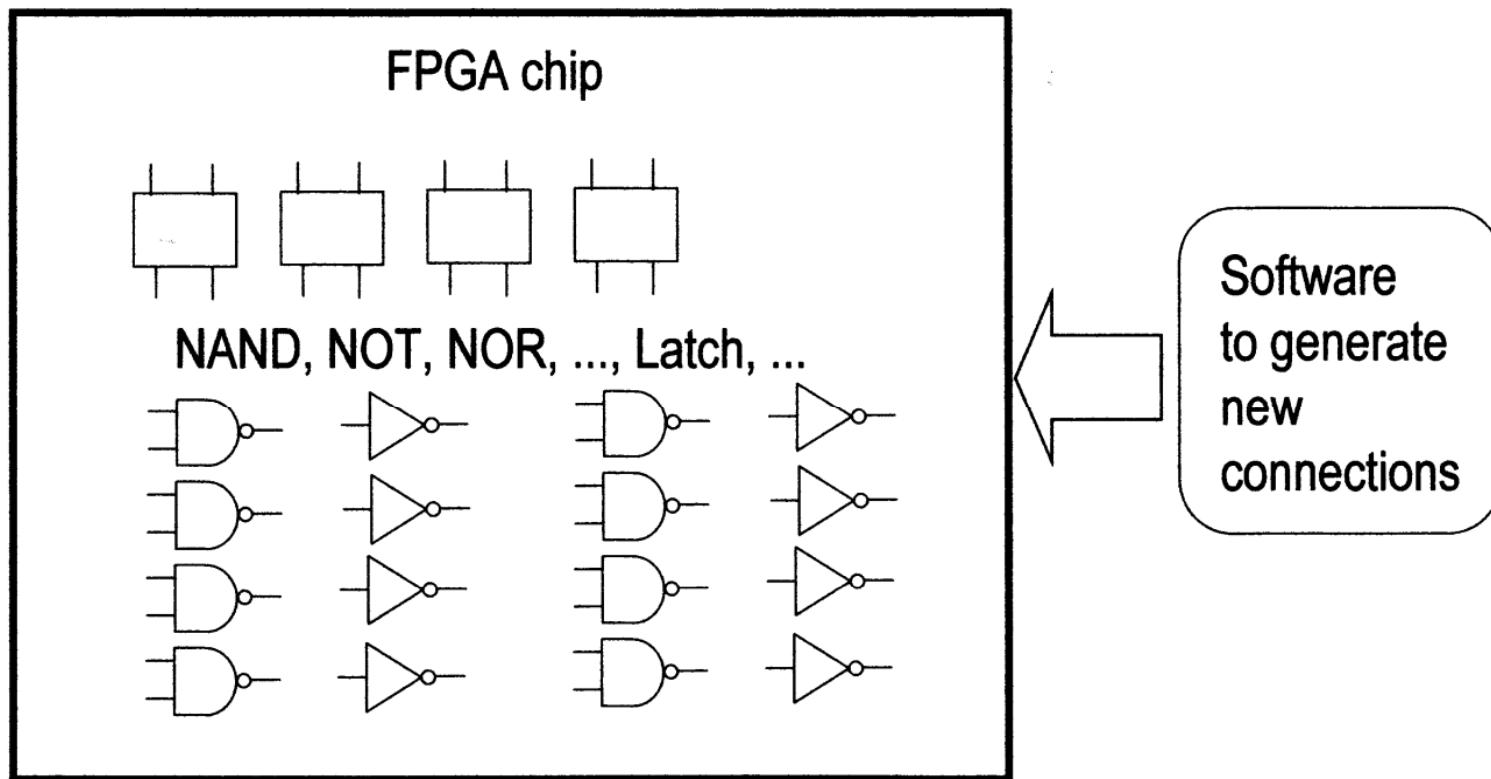
→ Large Noise Margin(高い耐雑音性)

~ Graceful Degradation(上品な劣化)

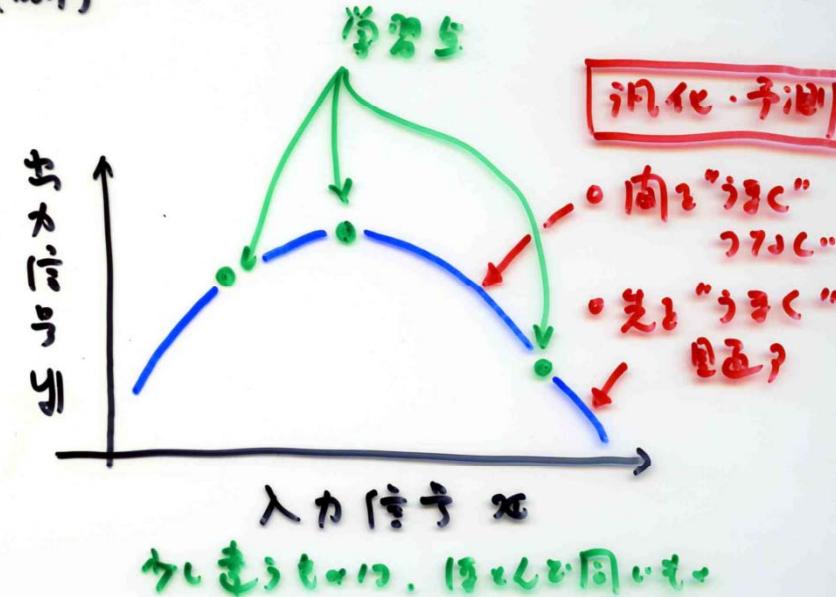
3. Randomness(乱雑さ、確率的・統計的な要素)

cf. FPGA (Field Programmable Gate Array)

FPGA: Plasticity in Logic LSI
(Processing algorithm is conventional.)



(例)



4. 2進/112進型(ビット処理)

	二進数	十進数	
LDA	addr1	1110010	addr1
LDB	addr2	1110011	addr2
ADDB		<u>1000110</u>	
STA	addr3	<u>1100010</u>	addr3
<hr/>			
1ビット	:	:	:
進112	SUBB		
重2	:	<u>1000010</u>	:
(合計進32)			