

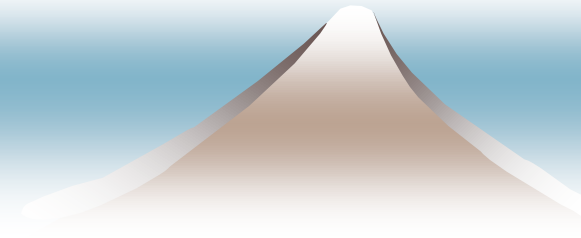
脳と情報の数学を創る

(2) 脳の仕組み:

脳内情報の表現、記憶、学習の数理

理化学研究所
脳科学総合研究センター

甘利俊一



脳の宇宙誌

ビッグバン:環境エネルギー、物質、天体、分子(秩序)
(137億年) **物理、化学** エネルギーとエントロピー

生命:自己を複製し次世代に伝える物質の一形態
(36億年) **生命科学** 遺伝、分子機構、自己保存

脳・神経系:環境の情報を利用、記憶、学習、判断、行動
(5億年) **神経科学**

人間:心を持ち社会に生きる生命;文化と社会
(20万年) **脳科学、情報科学、人間科学**



From NASA

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:NGC_4414_\(NASA-med\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:NGC_4414_(NASA-med).jpg)

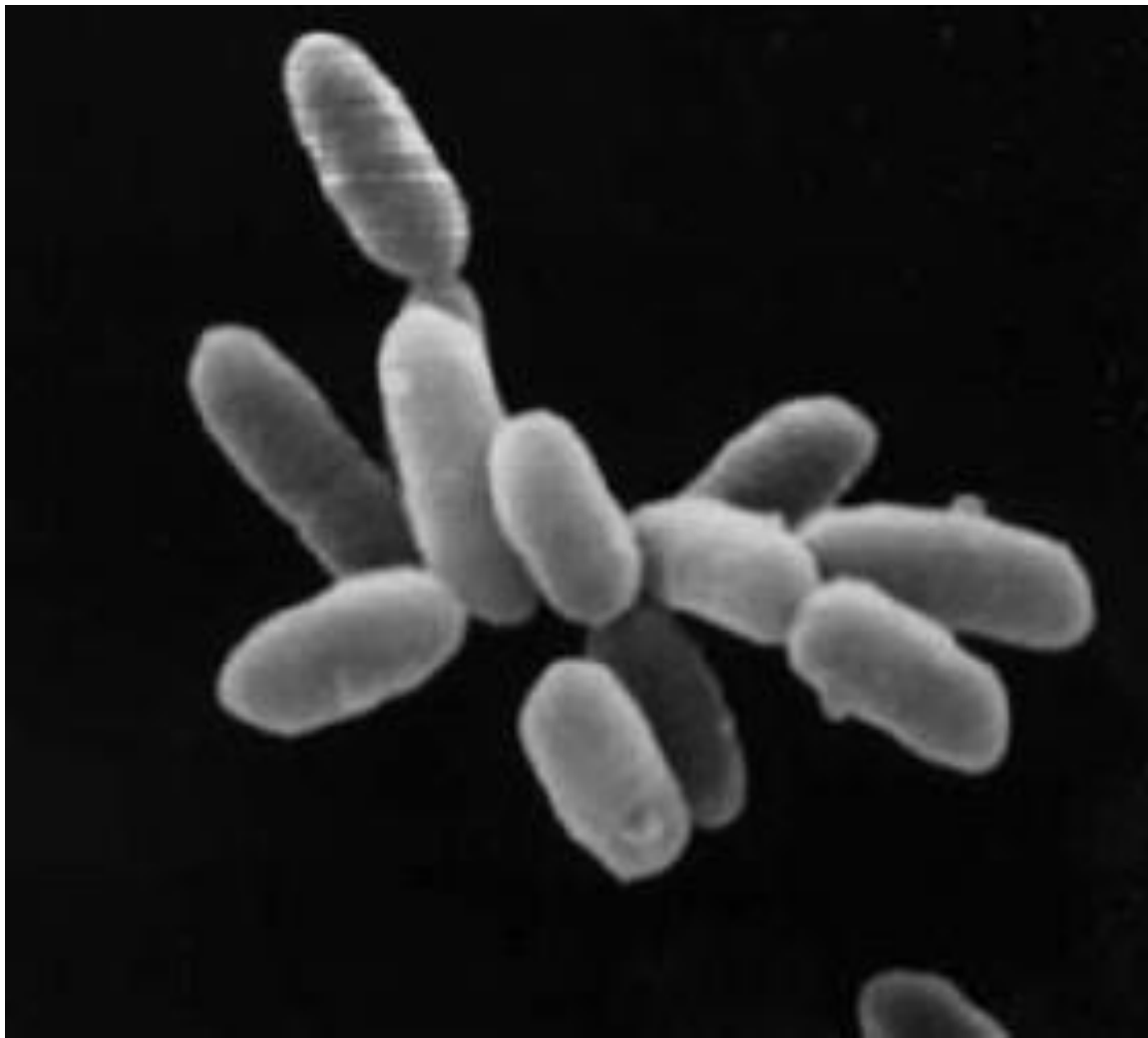
ビッグバン: エネルギー・物質—天体—分子(秩序)
(137億年) 物理学、化学 エネルギーと
エントロピー



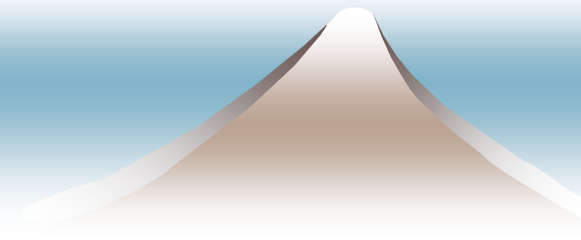
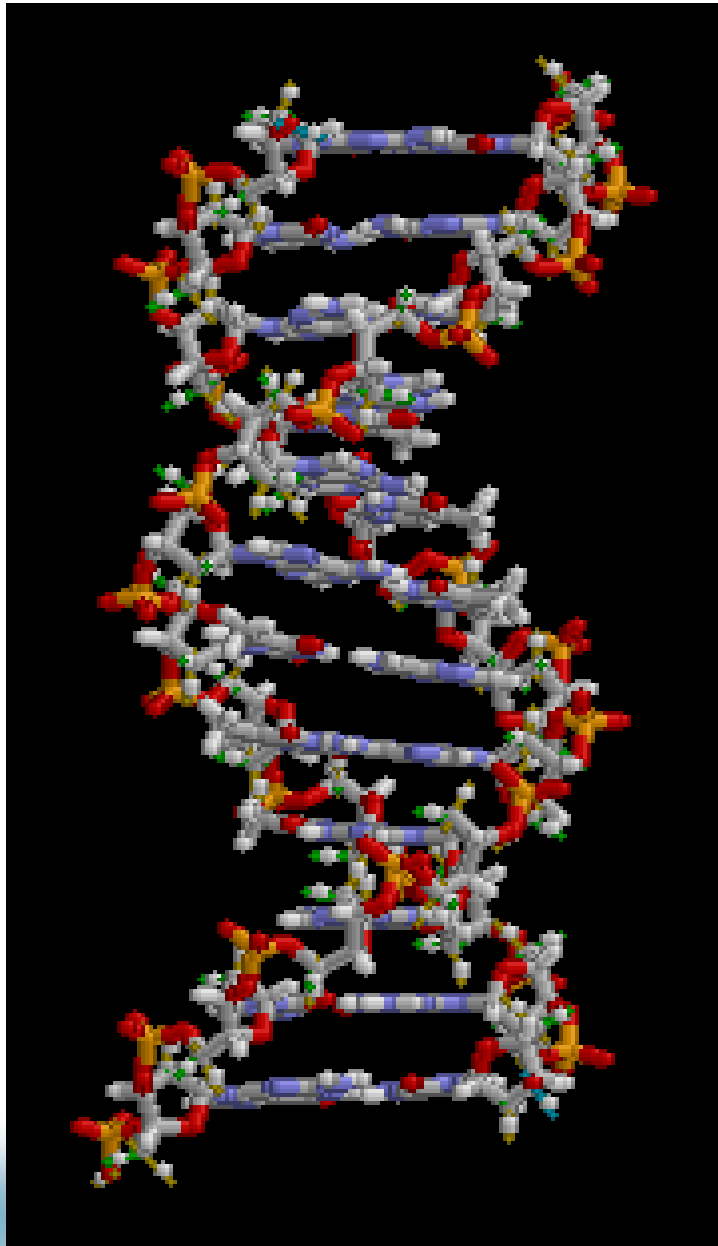
46億年前： 地球の誕生

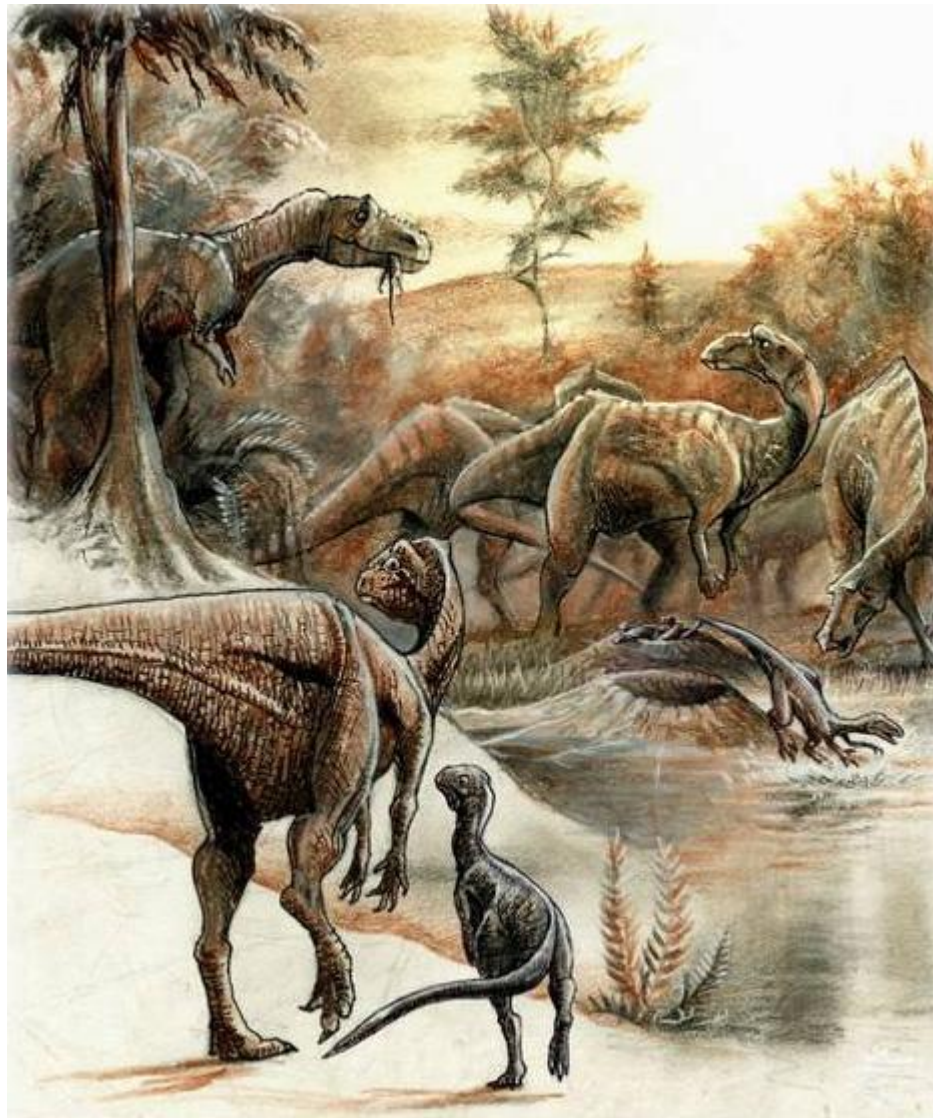
From NASA

http://en.wikipedia.org/wiki/File:The_Earth_seen_from_Apollo_17.jpg



生命: 自己を複製し次世代に伝える物質の一形態
(36億年) **生命科学** 遺伝、分子機構、自己保存





http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Egg_Mountain.jpg

多細胞生物

脳・神経系：環境の情報を利用、記憶、学習、判断、行動

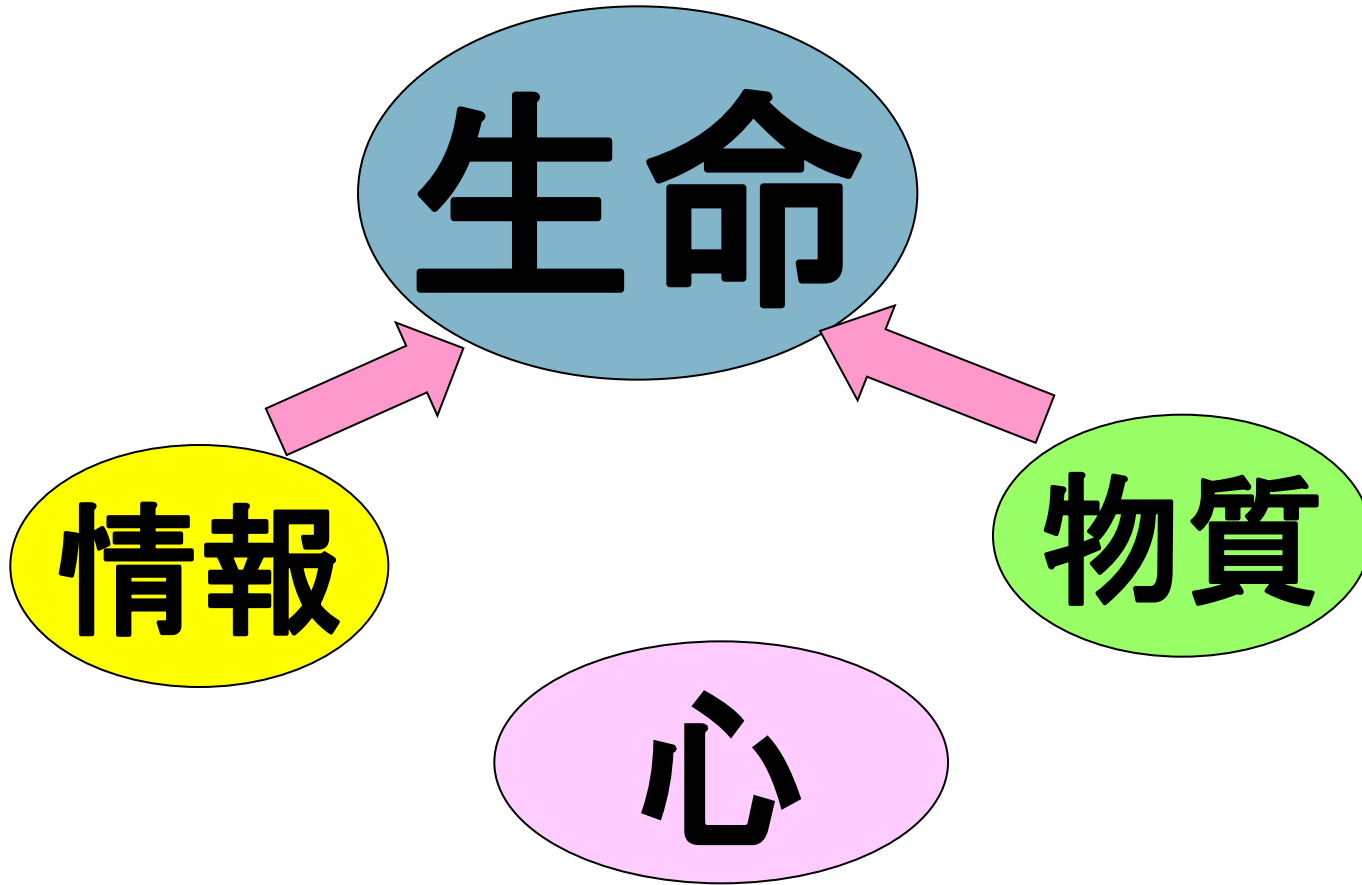
(6億年)

神経科学

類人猿、そして人間

人間:心と社会に生きる生命;文化と社会
(10万年) 脳科学、情報科学、人間科学





物質の法則；生命と情報；脳；心と文明

心の理論 ロボットに意識はあるか



高速コンピュータ
脳のシミュレーション

ヒトの脳は約1400gである。豆腐のようにやわらかい脳は、かたい頭蓋骨と、硬膜、くも膜、軟膜で覆われて保護されている。さらにもくも膜と軟膜の間にあるくも膜下腔には脳脊髄液が満たされ、衝撃から脳を守るクッションの役目をしている。

脳は大脳、小脳、脳幹に分けられる。大脳は1000gほどで、右半球の右脳と左半球の左脳に分かれている。思考や記憶などの高度な精神活動や、感覚の中核である。大脳半球は、表面のしわ「脳溝」に沿って、大きく四つの領域に分けられる。「前頭葉」「頭頂葉」「側頭葉」「後頭葉」である。前頭葉は高等な動物ほど面積が大きい。ヒトでは、大脳の表面積の3分の1を占める。右脳と左脳は「脳梁」と呼ばれる神経線維の束でつながっている。

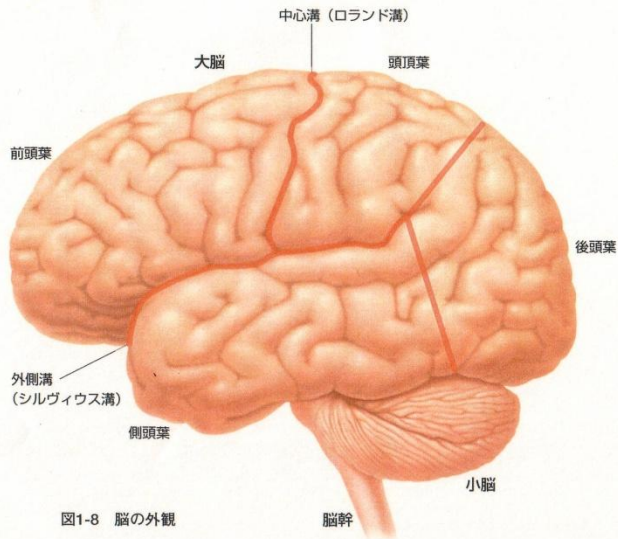


図1-8 脳の外観

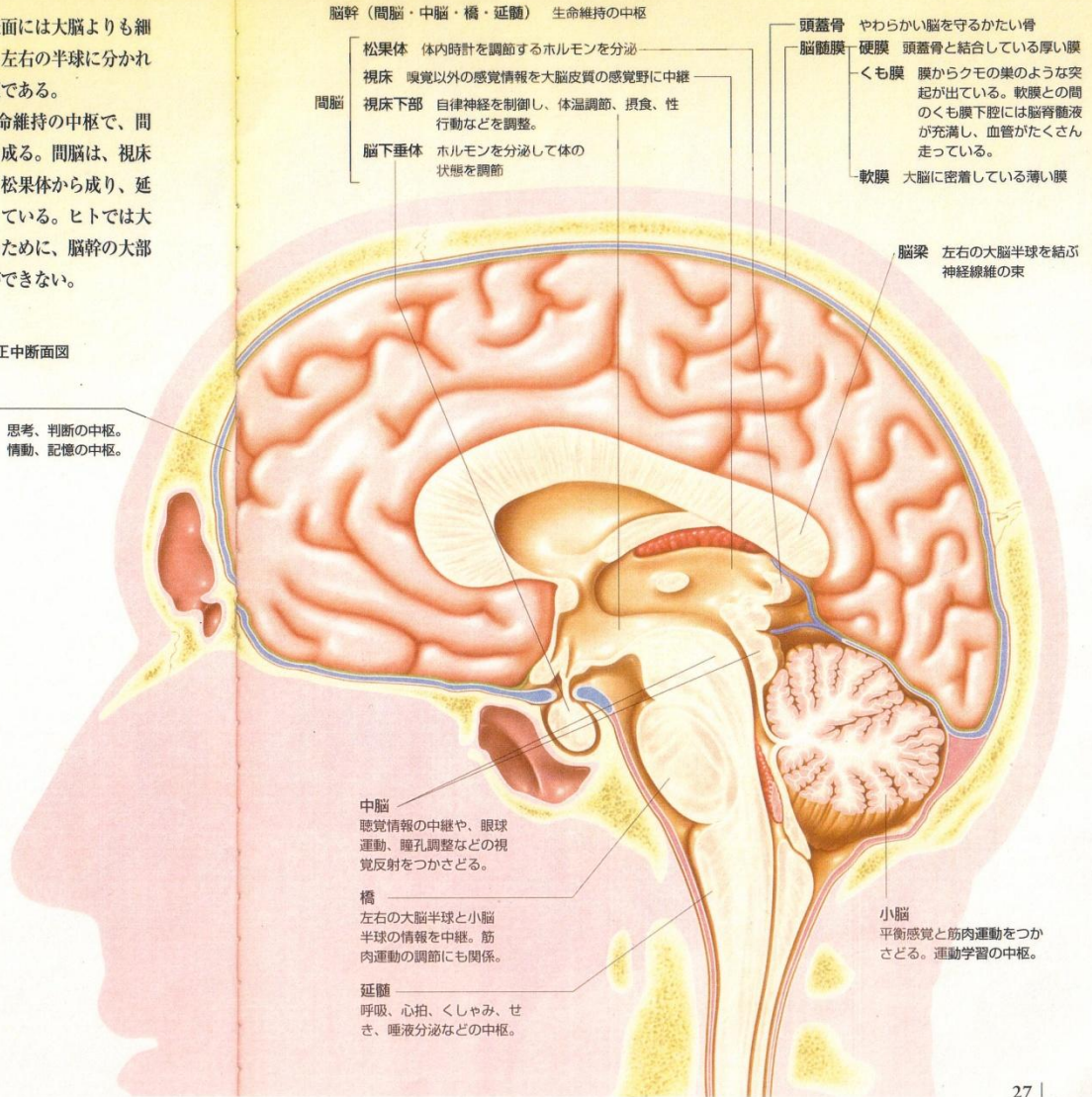
ヒトでは発達した 大脳皮質が脳幹を覆っている

小脳は130gほどで、表面には大脳よりも細かいしわがある。小脳も左右の半球に分かれており、運動学習の中核である。

脳幹は220gほどの生命維持の中核で、間脳、中脳、橋、延髄から成る。間脳は、視床と視床下部、脳下垂体、松果体から成り、延髄の先は脊髄につながっている。ヒトでは大脳が大きく発達しているために、脳幹の大部分は外からは見ることができない。

図1-9 脳の正中断面図

大脳
新皮質は感覚、思考、判断の中核。
古皮質は本能、情動、記憶の中核。



大脳には数百億もの神経細胞があり、それぞれ平均数万個のシナプスを持っている。複雑で巨大なネットワークであるが、神経回路は無秩序に張り巡らされているのではない。

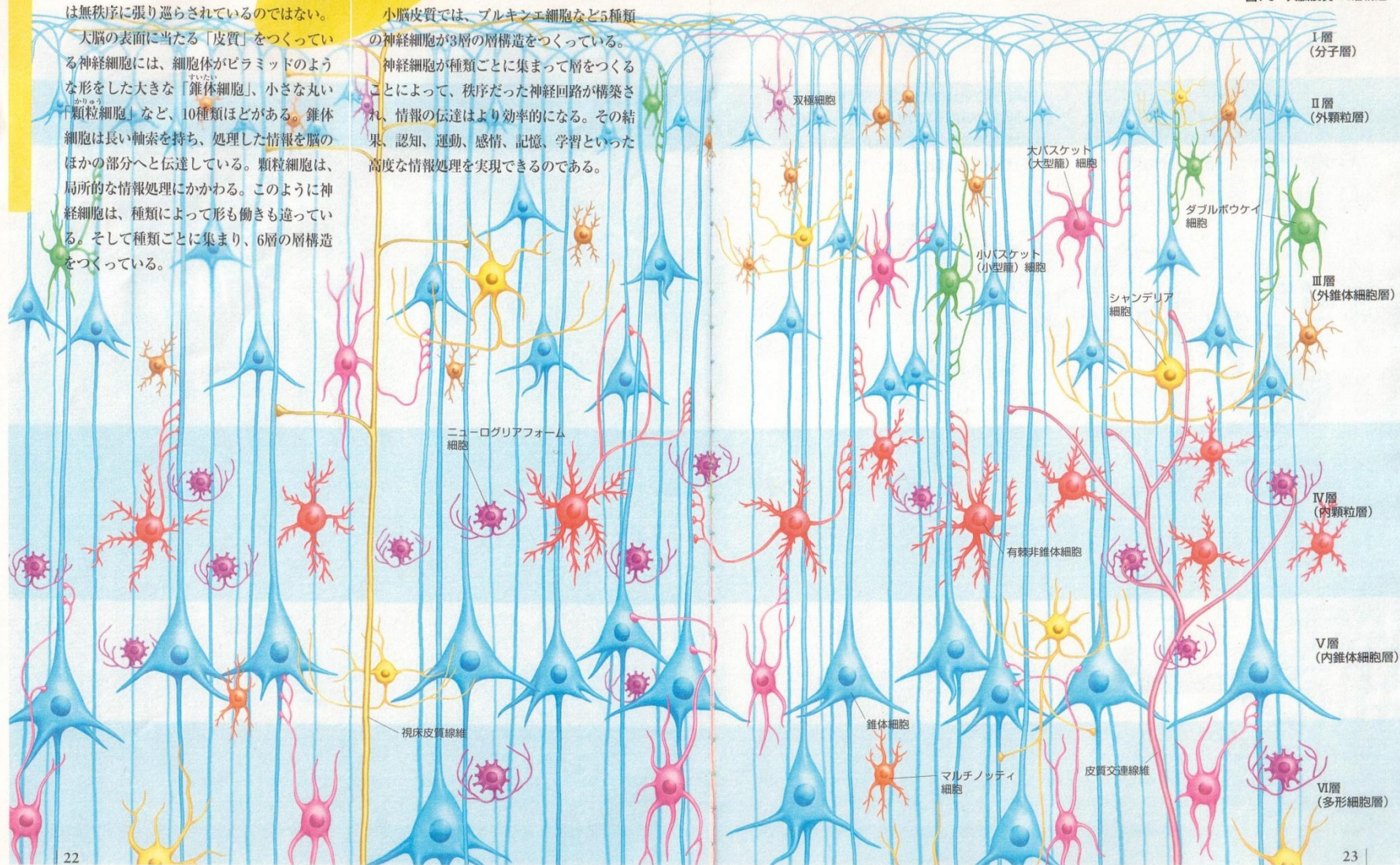
大脳の表面に当たる「皮質」をつくっている神経細胞には、細胞体がピラミッドのような形をした大きな「錐体細胞」、小さな丸い「顆粒細胞」など、10種類ほどがある。錐体細胞は長い軸索を持ち、処理した情報を脳のほかの部分へと伝達している。顆粒細胞は、局所的な情報処理にかかわる。このように神経細胞は、種類によって形も働きも違っている。そして種類ごとに集まり、6層の層構造をつくっている。

神経細胞の層構造

小脳皮質では、プルキンエ細胞など5種類の神経細胞が3層の層構造をつくっている。神経細胞が種類ごとに集まって層をつくることによって、秩序だった神経回路が構築され、情報の伝達はより効率的になる。その結果、認知、運動、感情、記憶、学習といった高度な情報処理を実現できるのである。

が高度な情報処理を実現する

図1-6 大脳皮質の6層構造



神経細胞の細胞体の構造は、ほかの細胞と変わらない。遺伝情報が書かれたDNAを含む「核」、エネルギーをつくり出す「ミトコンドリア」などで構成されている。ほかの細胞との大きな違いは、細胞体から突起が出ていることである。

細胞体から出て複雑に枝分かれしている「樹状突起」は、ほかの神経細胞から電気信号の情報を受け取る「入力アンテナ」である。樹状突起が受け取った電気信号は、「出力装置」である「軸索」を通して、次の神経細胞に伝達される。細胞体から出ている軸索は普通1本で、軸索の先端はいくつにも枝分かれしている。

軸索は「髄鞘（ミエリン鞘）」と呼ばれる、絶縁体の鞘で覆われている。脳の中では軸索が密集しているが、電気信号が混ざってしまうことがないのは、髄鞘のおかげだ。髄鞘は、一つごとに少しのすき間があり、軸索がむき出しになっている。このくびれを「ランビエ絞輪」と呼ぶ。電気信号は、くびれからくびれへと絶縁体である髄鞘をジャンプしながら伝わっていく（跳躍伝導）。伝導速度は、速いものでは秒速120mにもなる。

神経細胞は細胞体、軸索、樹状突起からなる。

神経細胞とともに脳を構成しているもう一つの細胞が「グリア細胞」である。ヒトのグリア細胞の数は、神経細胞の10倍もある。グリア細胞は、神経細胞を支えたり、栄養を供給したりして神経細胞の働きを助けている。最近、グリア細胞は神経成長因子や栄養因子などを分泌しており、神経細胞の維持さらには再生にとって非常に重要であることがわかってきた。

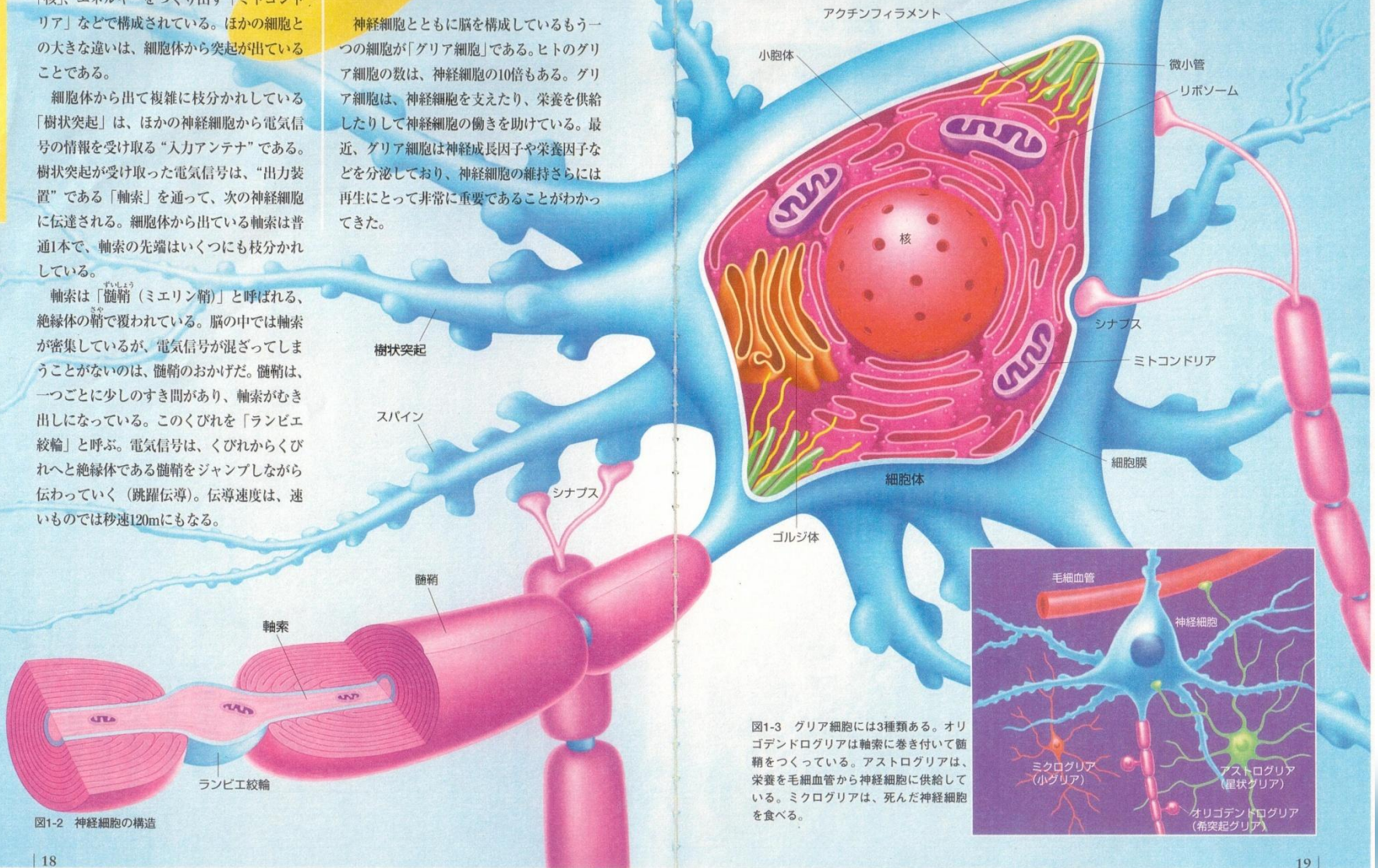


図1-2 神経細胞の構造

図1-3 グリア細胞には3種類ある。オリゴデンドログリアは軸索に巻き付いて髄鞘をつくっている。アストログリアは、栄養を毛細血管から神経細胞に供給している。ミクログリアは、死んだ神経細胞を食べる。

脳

分子機械—情報機械

分子機械

分子

10^{-9} m

細胞

10^{-5} m

情報機械

回路モジュール

10^{-3} m

システム

10^{-2} m

個体

10^0 m

社会

$10 \square 10^7$ m

人間・社会

脳研究

- *脳を知る領域* 人間とは何か
人間から社会へ
- *脳を守る領域* 脳疾患・老化
精神障害
- *脳を創る領域* 脳の理解
脳型情報技術
- *脳を育む領域* 教育・学習

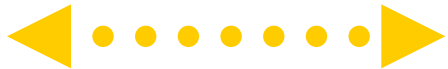
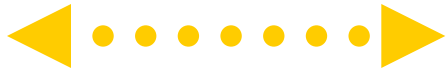
人間の思考

論 理

シンボル
(言語)

逐次直列

アルゴリズム
(プログラム)



直 観

パターン
(ニューロンの興奮)

並列相互作用

学習・自己組織

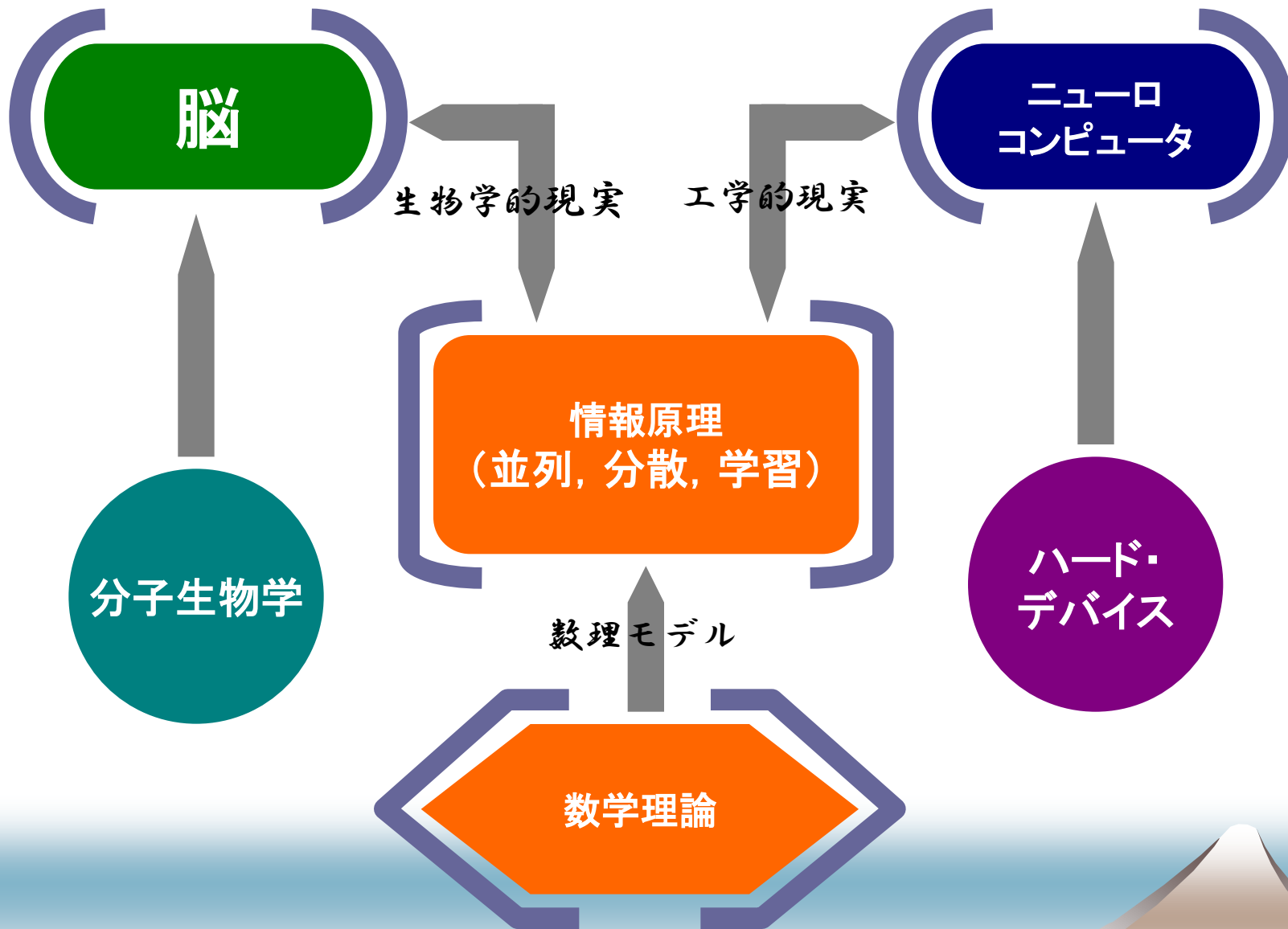


コンピュータ
人工知能

ニューロコンピュータ
脳のモデル

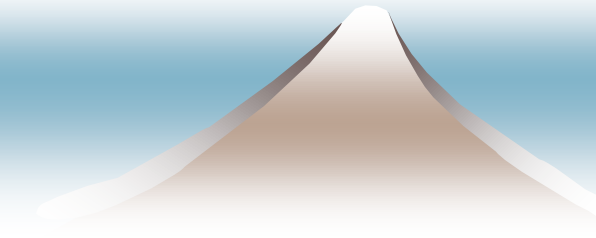
融 合

脳の情報原理解明への道

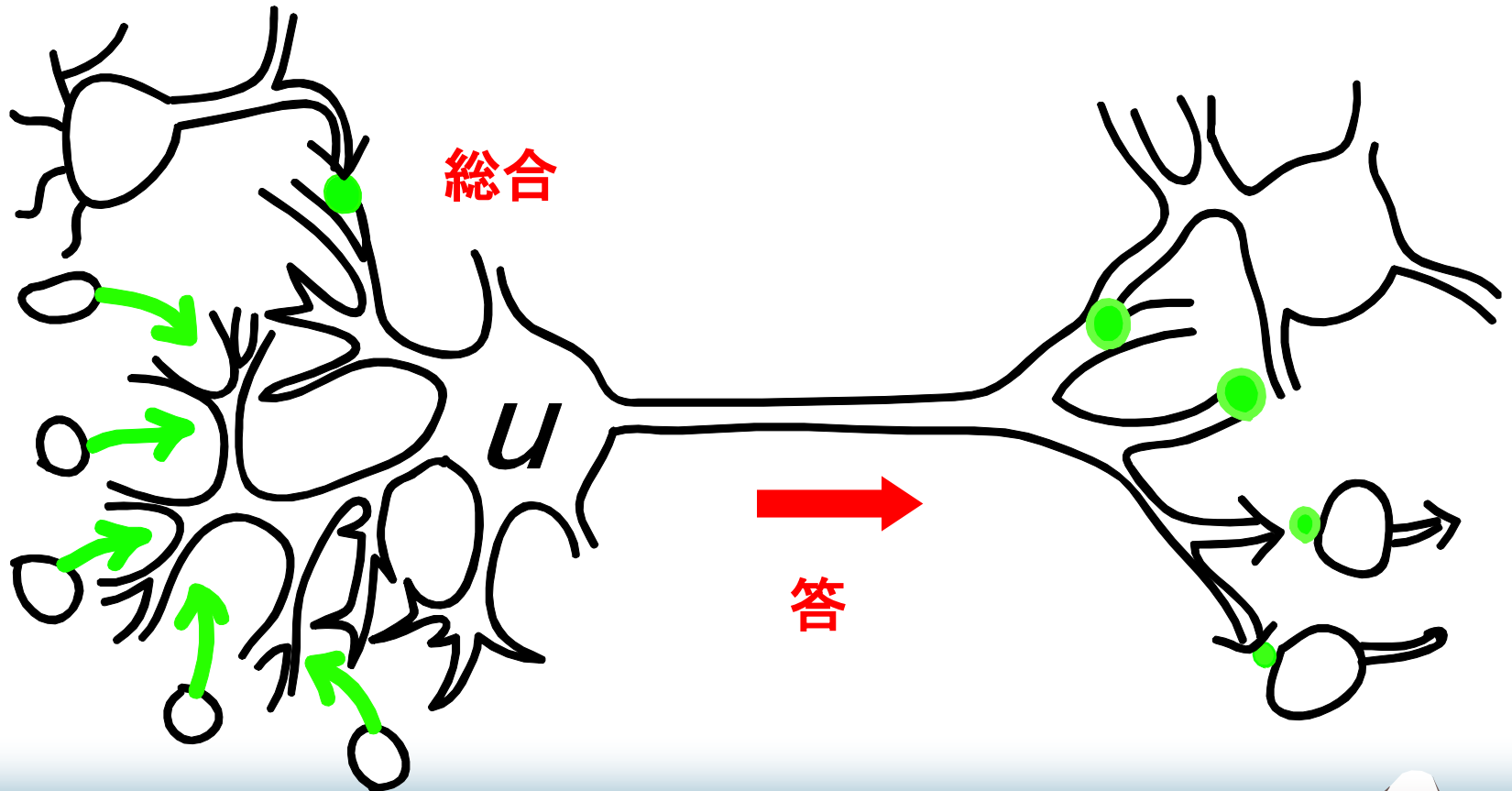


数理脳科学

脳情報処理の基本原理
進化による実現

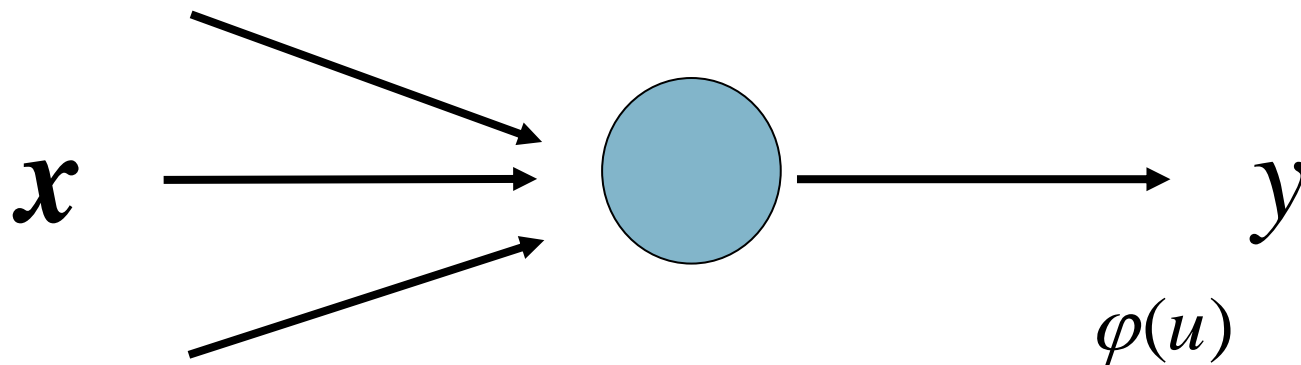


神経細胞のモデル

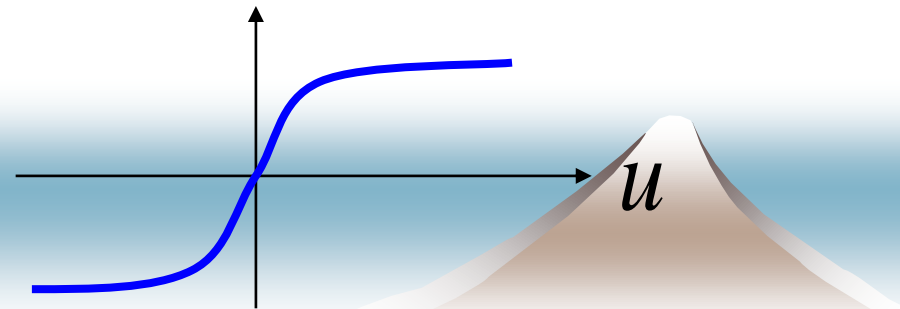


ニューロンの数理モデル

$$y = \varphi(\sum w_i x_i - h) = \varphi(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x})$$

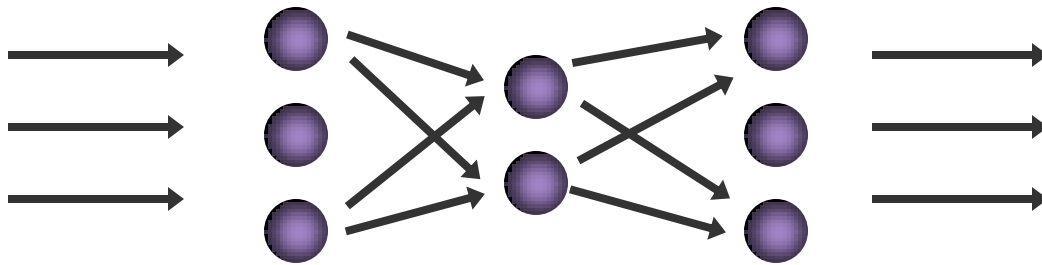


多数決素子
興奮・抑制



脳理論・脳モデルとは

認知モデルパーセプトロン

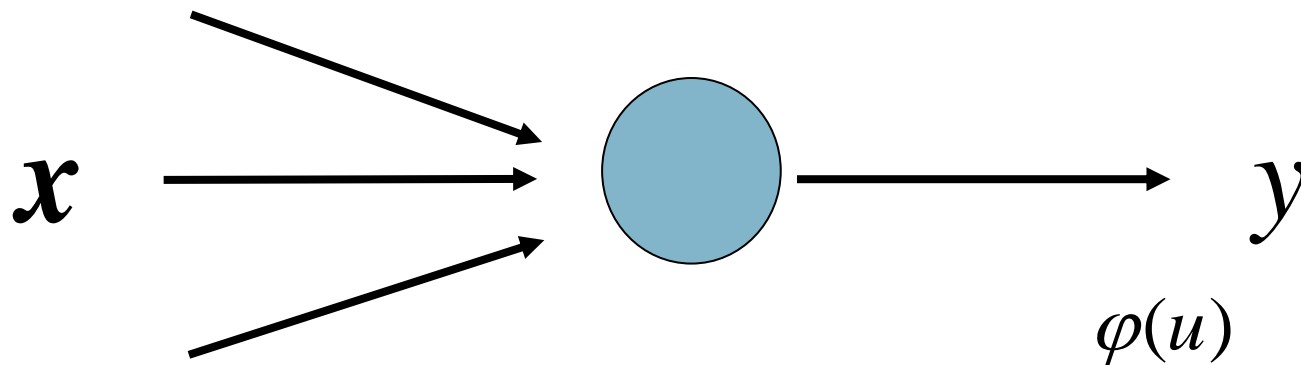


分散表現
学習・情報幾何
次元の呪

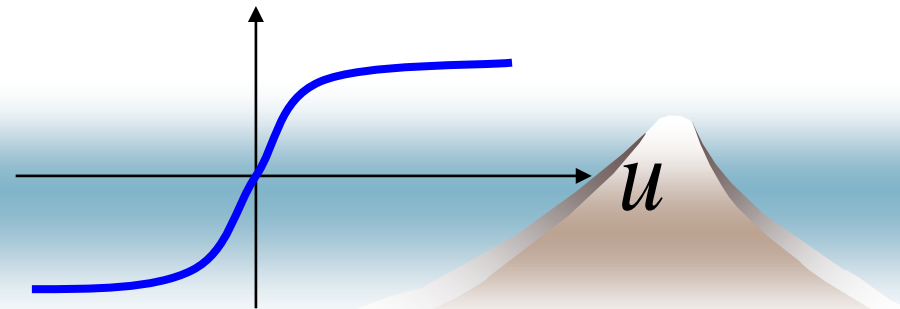
$$y = \sum v_i \varphi(w_i \cdot x)$$

ニューロンの数理モデル

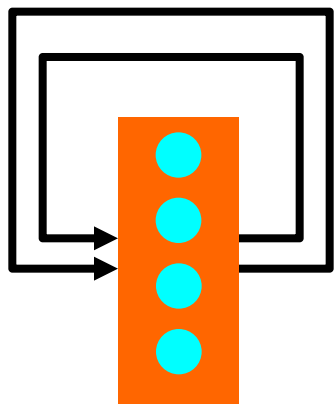
$$y = \varphi(\sum w_i x_i - h) = \varphi(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x})$$



多数決素子
興奮・抑制



ダイナミクスと決定



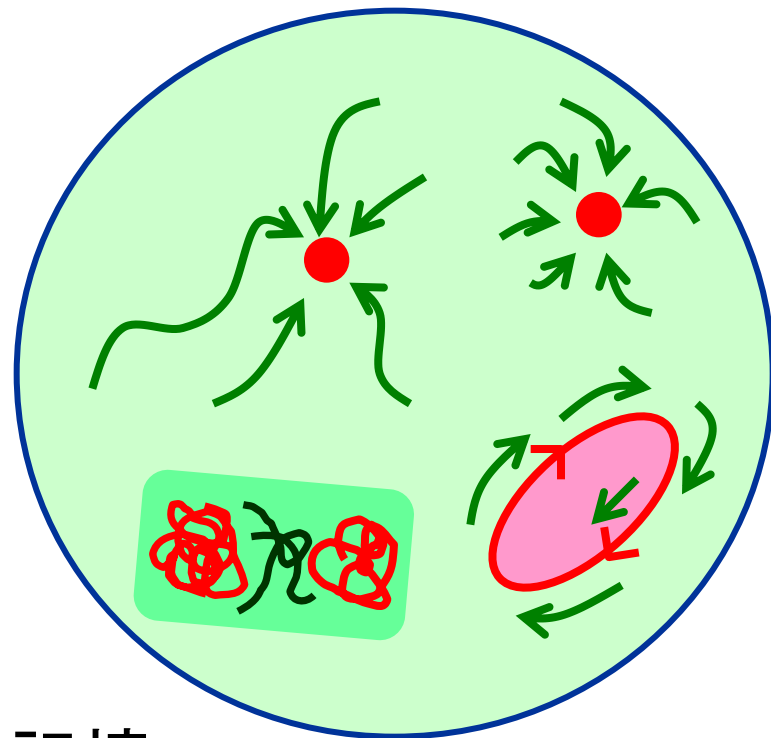
x :

$$x_{t+1} = f(x_t; \theta)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x; \theta)$$

アトラクター

- 安定点
- 安定軌道
- カオス

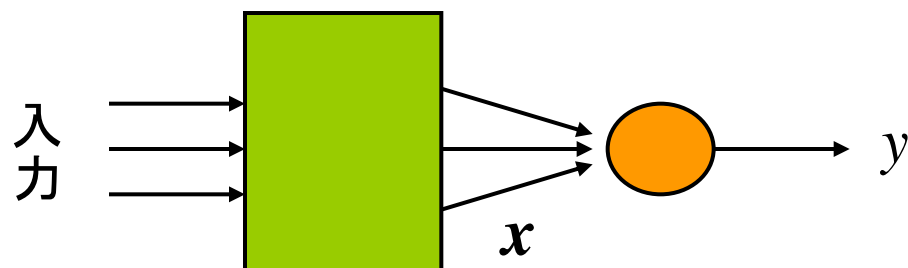


記憶
決定



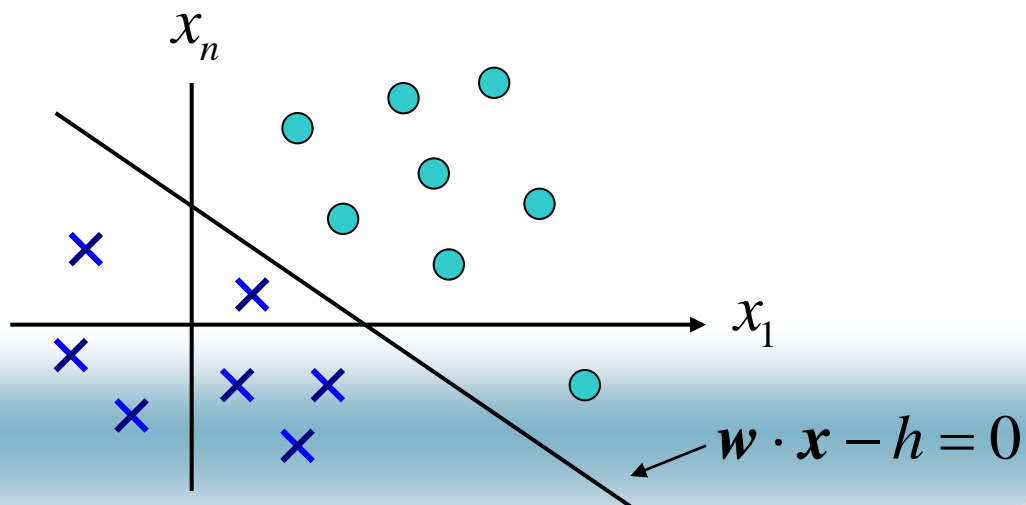
実数計算
パルス計算

単純パーセプトロン

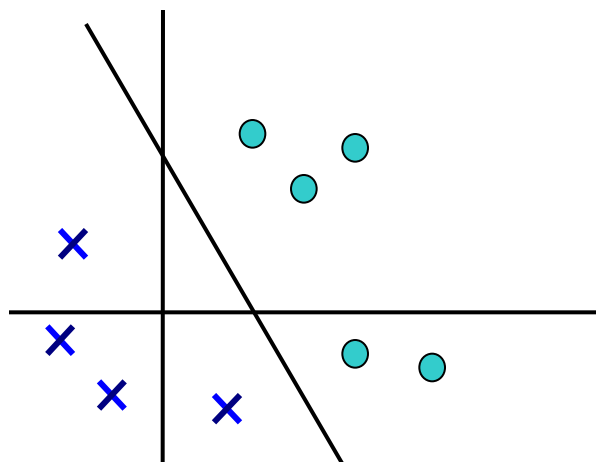
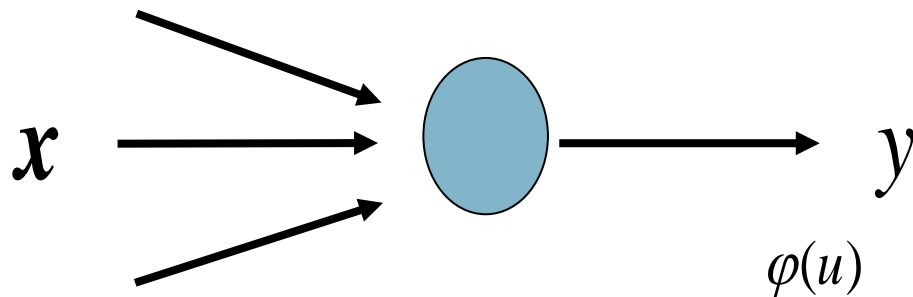


$$y = \text{sgn}(w \cdot x - h)$$

$$w \cdot x = \sum w_i x_i$$



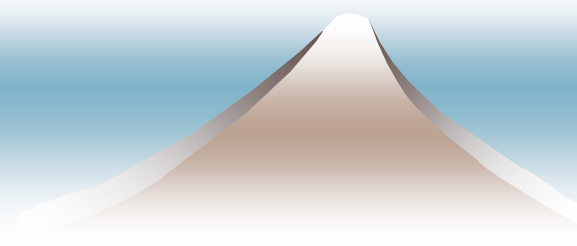
誤り訂正学習



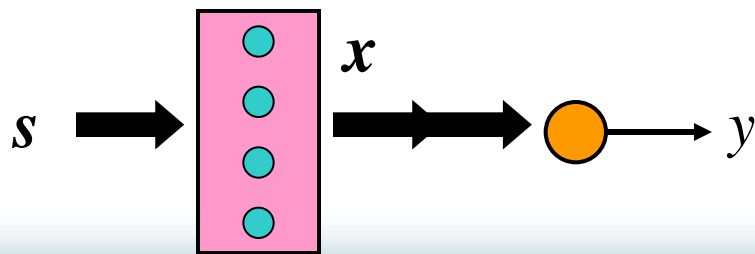
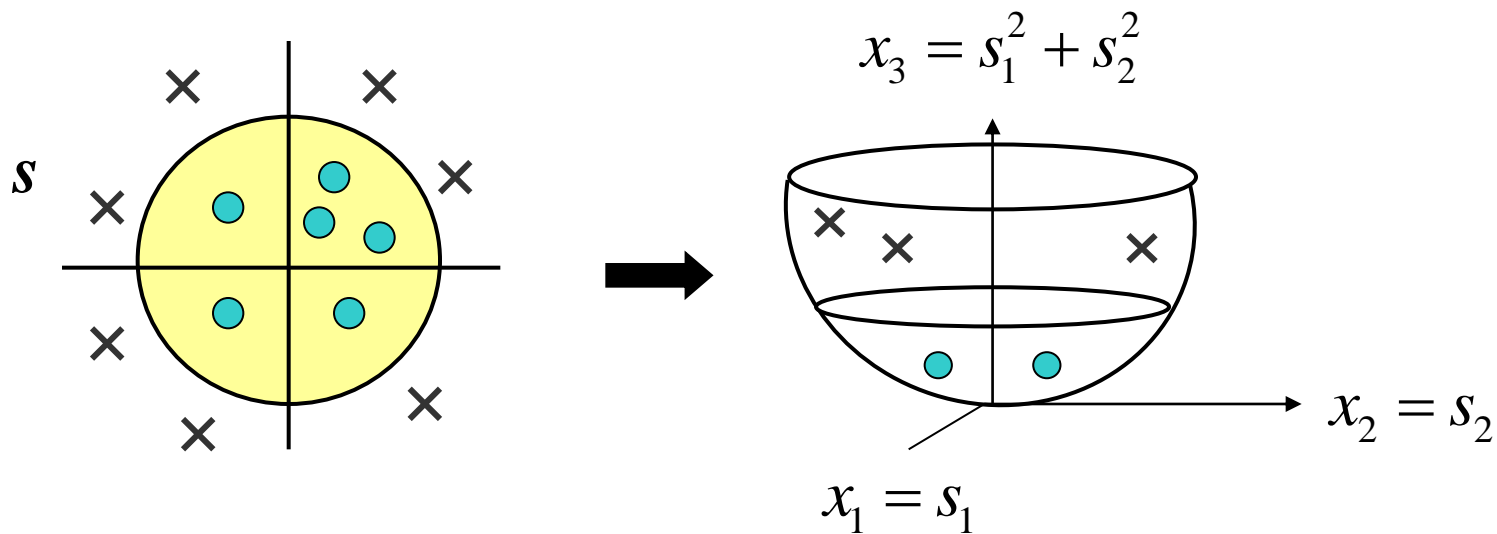
$$w \rightarrow w' = w + ex$$

$$e = \begin{cases} 1 & x \text{の} x \text{を間違い} \\ 0 & x \text{を正解} \\ -1 & 0 \text{の} x \text{を正解} \end{cases}$$

パーセプトロンの収束定理



線形識別



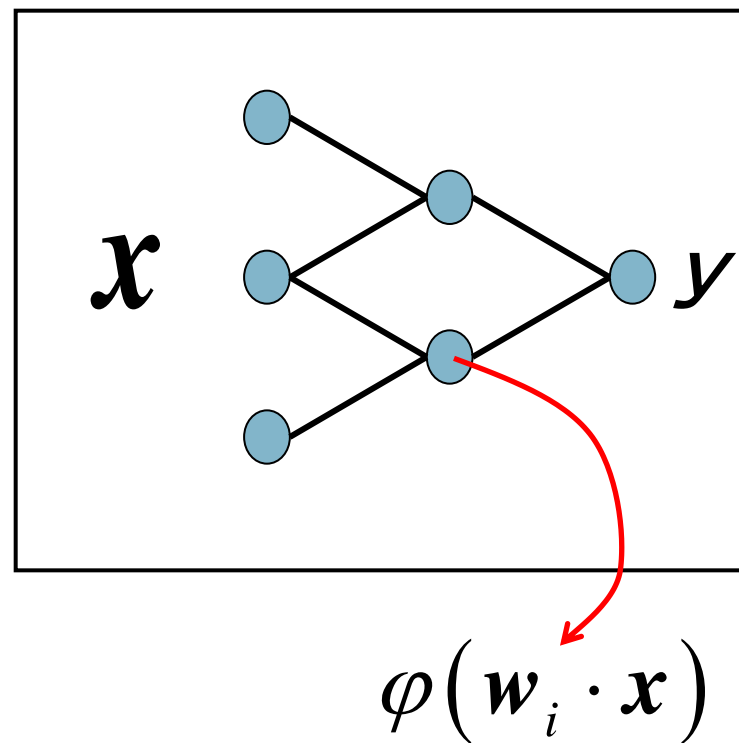
多次元化

小脳パーセプトロン説

多層パーセプトロン

$$y = \sum v_i \varphi(\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{x}) + n$$

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

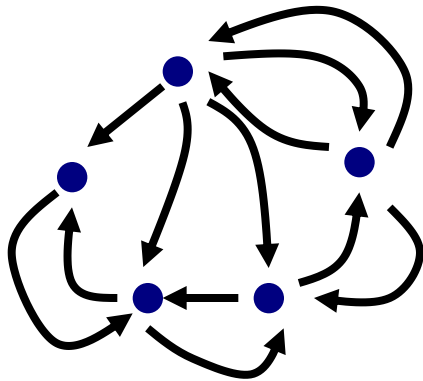


$$f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \sum v_i \varphi(\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{x})$$

$$\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m; v_1, \dots, v_m)$$

神経力学

多数決の力学: デルファイ法
多安定



$$\dot{x}_i = \text{sgn} \left(\sum w_{ij} x_j \right)$$

$$\mathbf{x}(t+1) = T\mathbf{x}(t)$$

神経経済学

アルティメータム・ゲーム

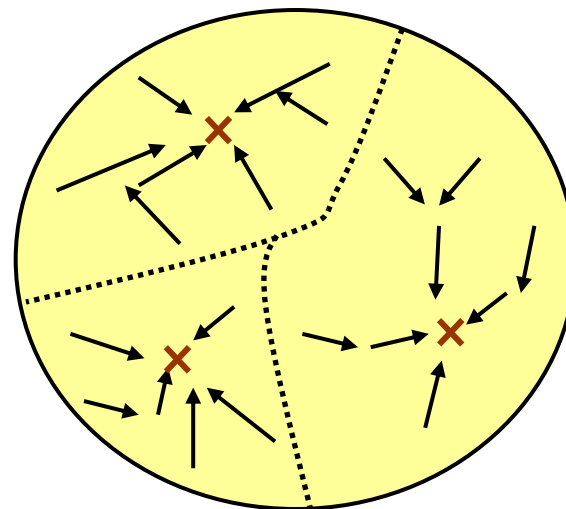
連想記憶と海馬

$$\mathbf{x}_1 = (10110)$$

$$\mathbf{x}_2 = (01001)$$

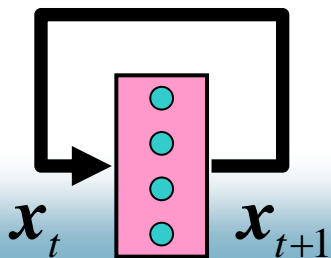
M

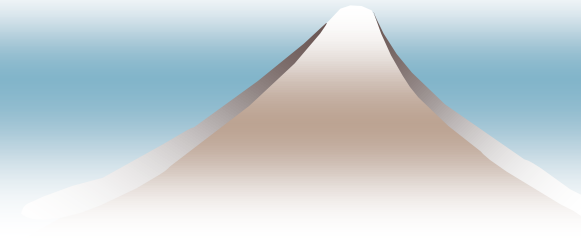
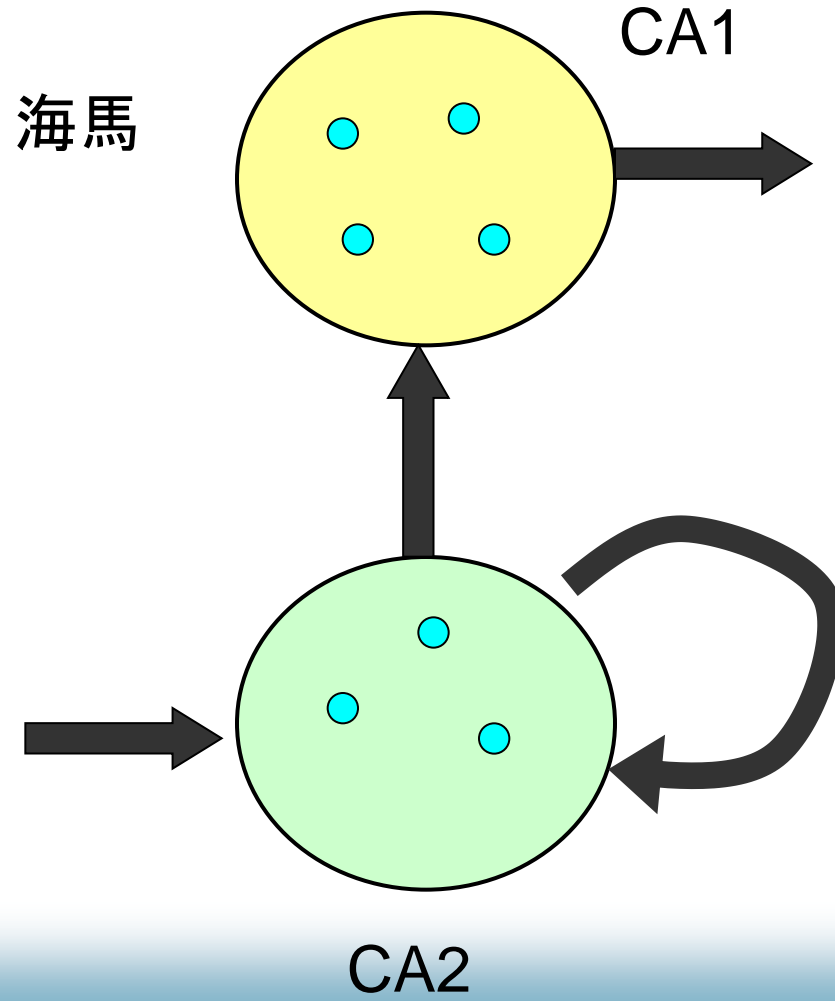
$$\mathbf{x}_k = (11100)$$



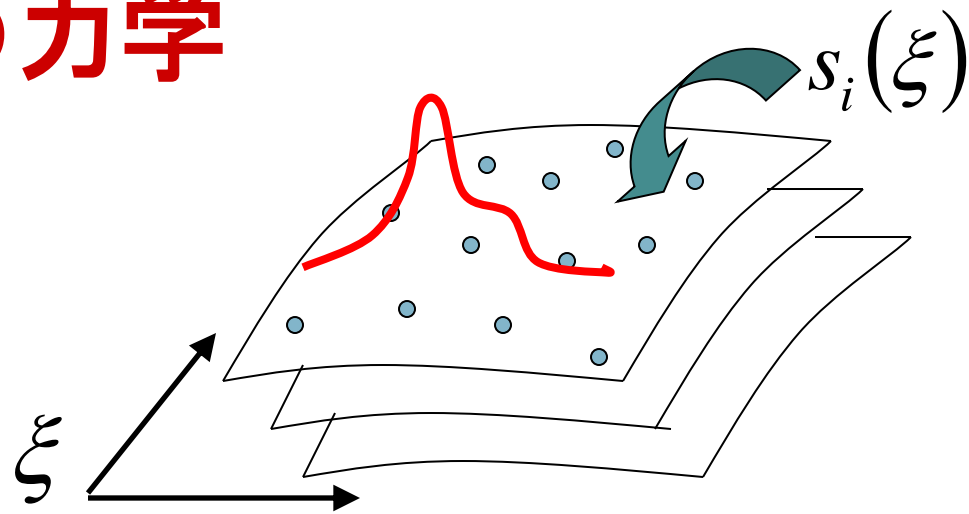
ダイナミクス

$$\mathbf{x}(t+1) = T\mathbf{x}(t)$$





III 神経場の力学



$$\tau \frac{\partial u_i(\xi, t)}{\partial t} = -u_i(\xi, t) + \sum_j \int w_{ij}(\xi - \xi') f[u_j(\xi', t)] d\xi' + s_i(\xi, t)$$

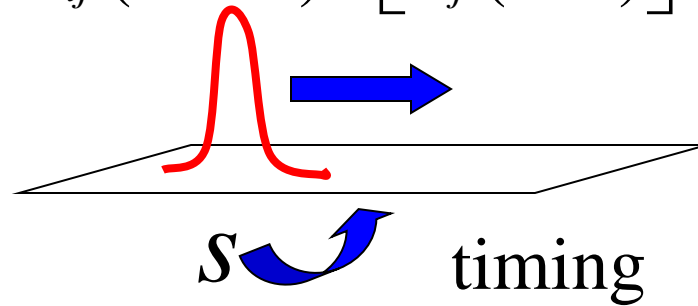
local excitations:

travelling wave:

oscillatory:

memory

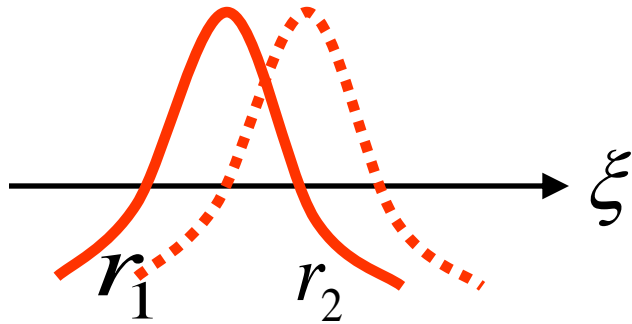
decision



Amari, Biol. Cybern, 1978

Wilson & Cowan, 1972

$$\frac{\partial u(\xi, t)}{\partial t} = -u(\xi, t) + \int w(\xi - \xi') f[u(\xi', t)] d\xi' + a$$



$$u(r_i, t) = 0 \quad u(r_i + \Delta r_i, t + \Delta t) = 0$$

$$\frac{\partial u(r_i, t)}{\partial t} + \frac{\partial u(r_i, t)}{\partial \xi} \frac{\partial r_i}{\partial t} = 0$$

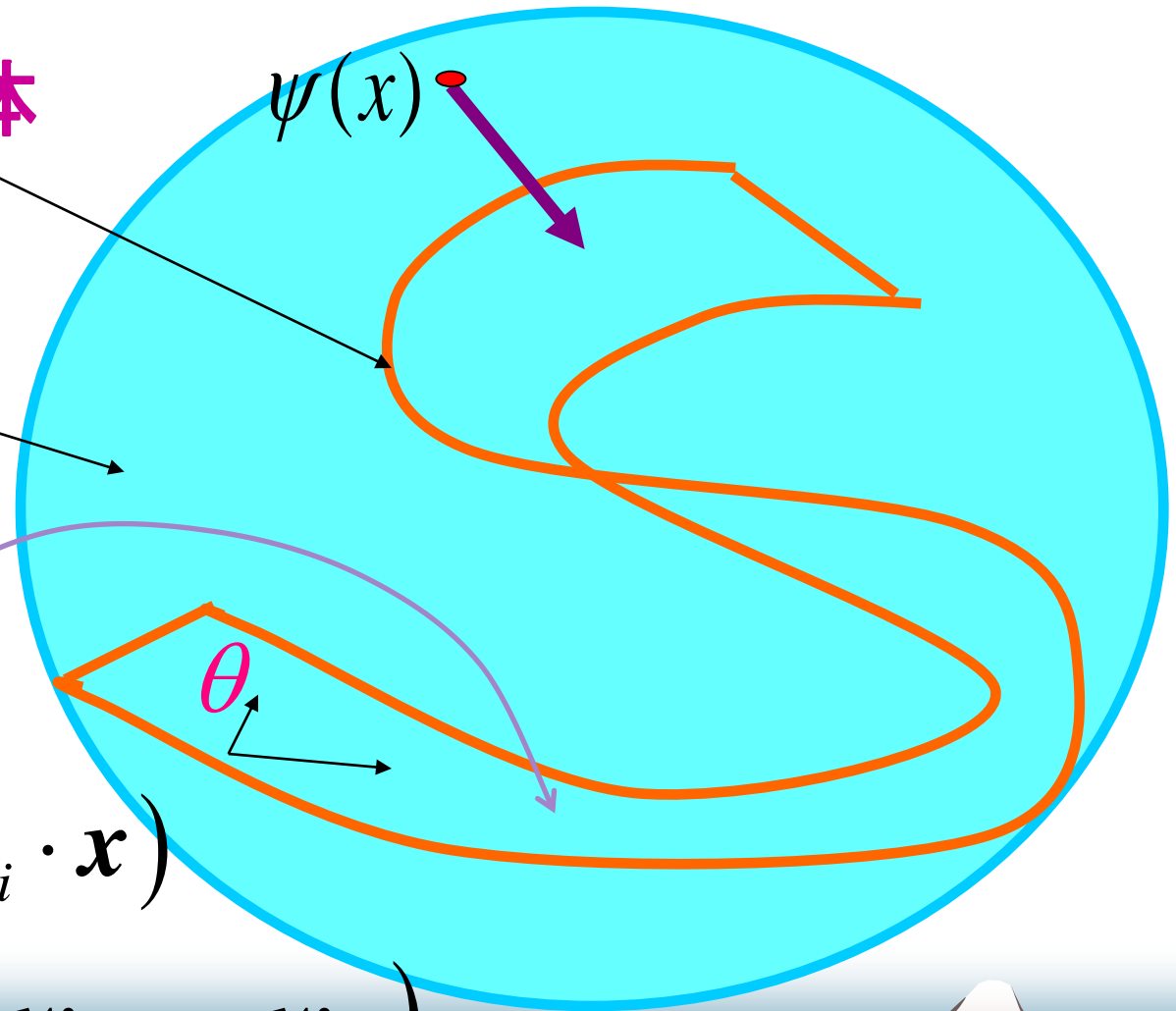
$$\alpha_i \frac{\partial r_i}{\partial t} = -\frac{\partial u(r_i, t)}{\partial t} = \int_{r_1}^{r_2} w(r_i - \xi') d\xi' = \pm W(r_2 - r_1)$$

$$W(\xi) = \int_0^{\xi} w(\xi) d\xi$$

Multilayer Perceptron

神経多様体

関数空間



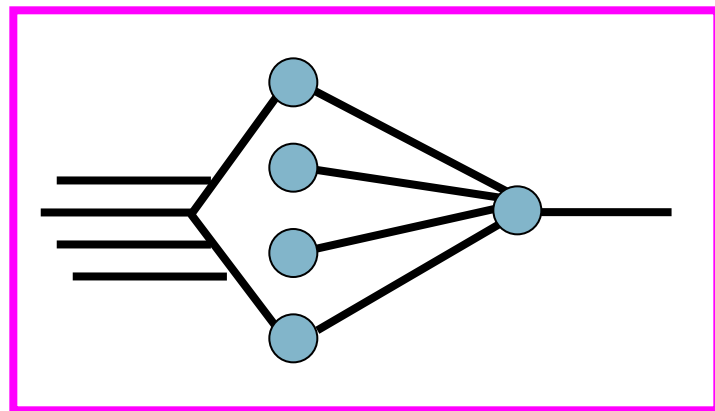
$$y = f(x, \theta)$$

$$= \sum v_i \varphi(\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{x})$$

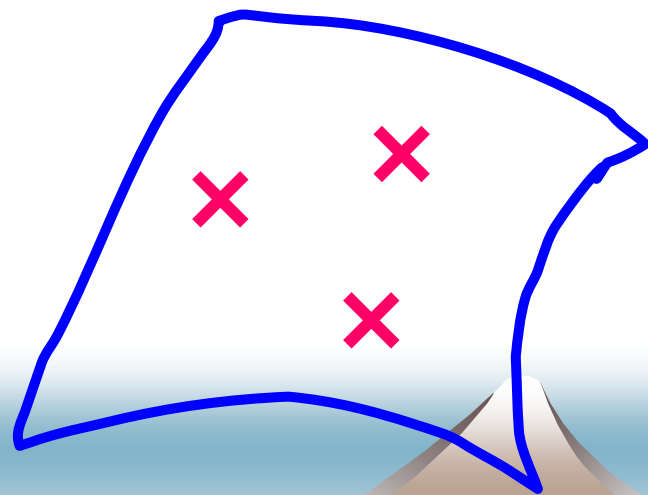
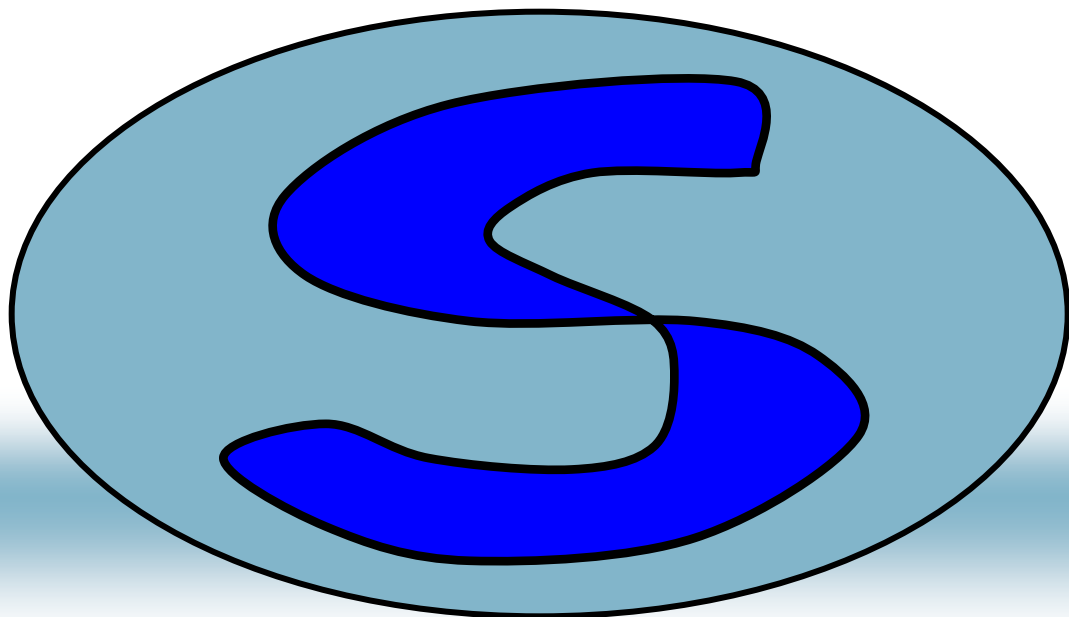
$$\theta = (v_1 \cdots, v_m ; \mathbf{w}_1, \cdots, \mathbf{w}_m)$$

神經多樣體

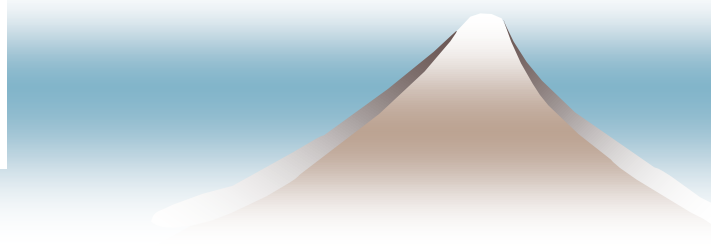
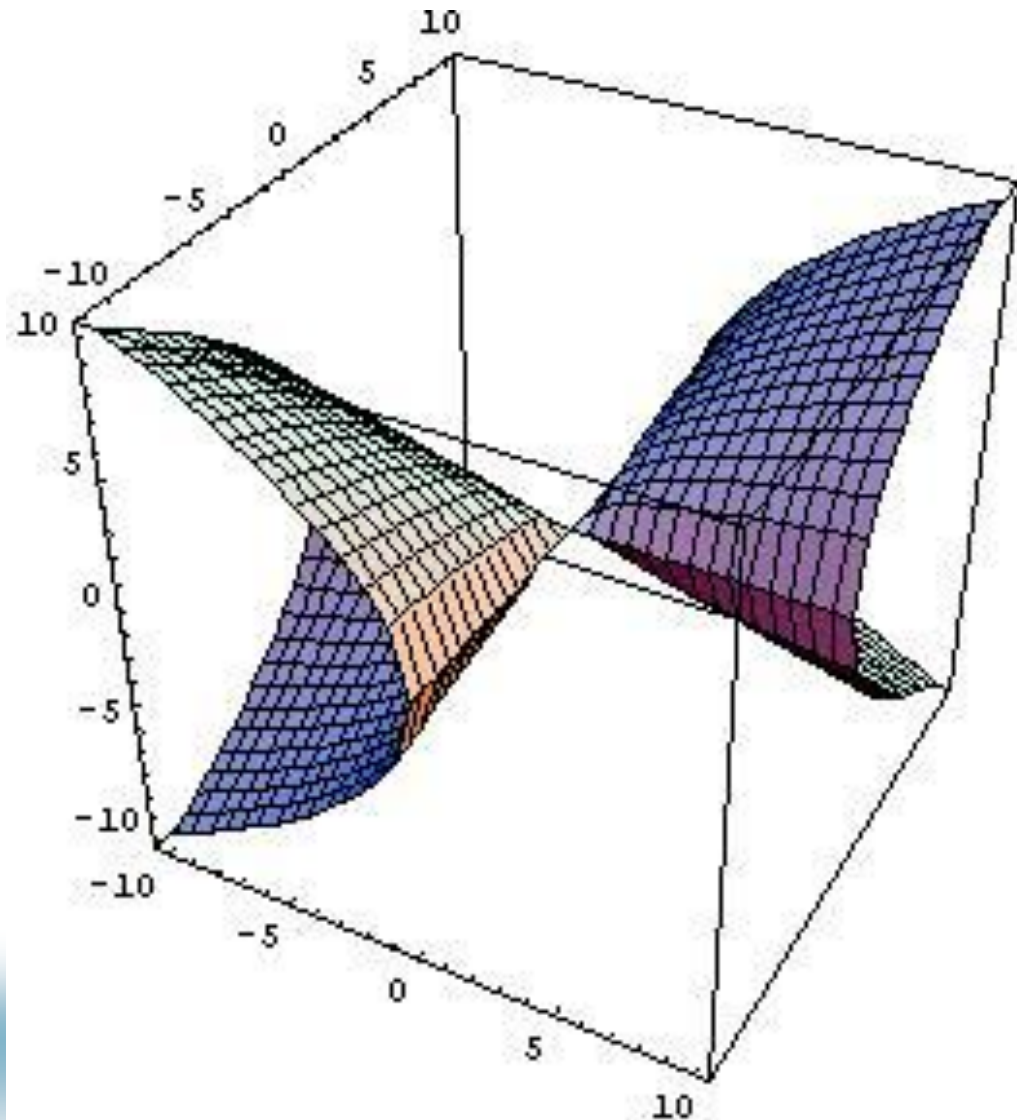
- ◆ 計量構造
- ◆ 位相構造



θ

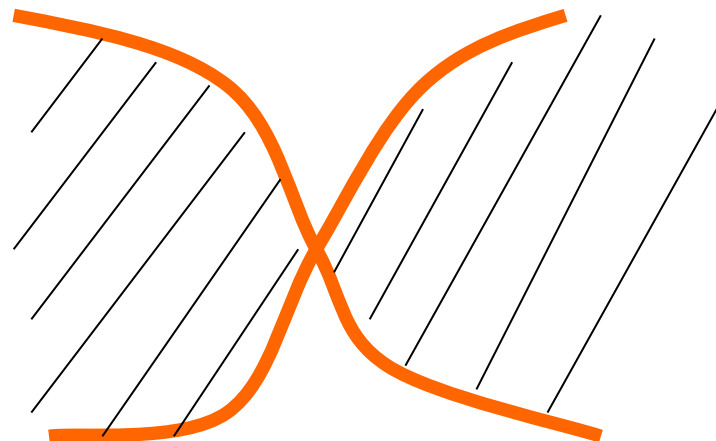
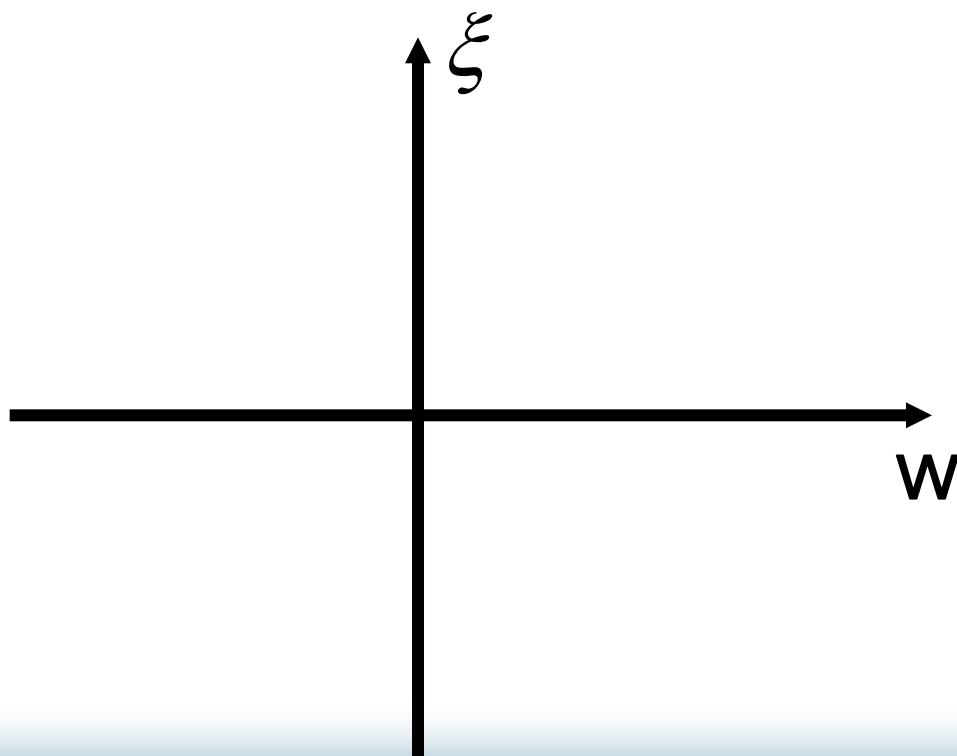


MLP の特異点---example

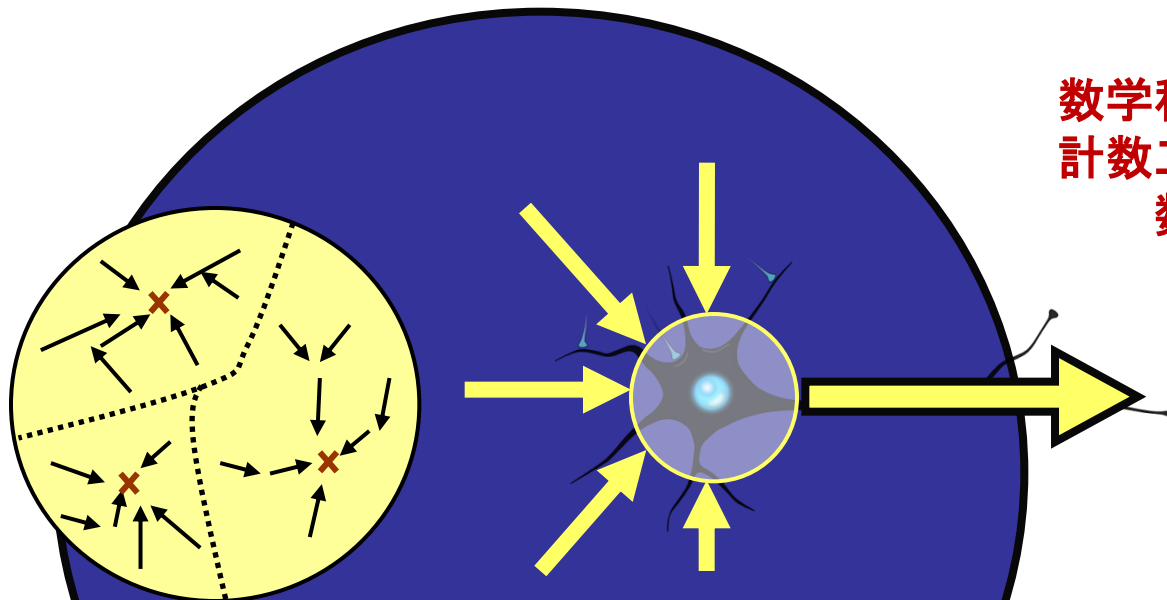


特異モデルの例

$$y = v\varphi(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + n \quad \xi \mid \|\mathbf{w}\| = 0$$



脳の数学に興味を持ったら



連想記憶

パーセプトロン

統計神経力学

数学科—数理科学研究科
計数工学科—情報理工研究科、
数理情報専攻

東京大学
新領域創成科学研究科
複雑理工学専攻
岡田研究室