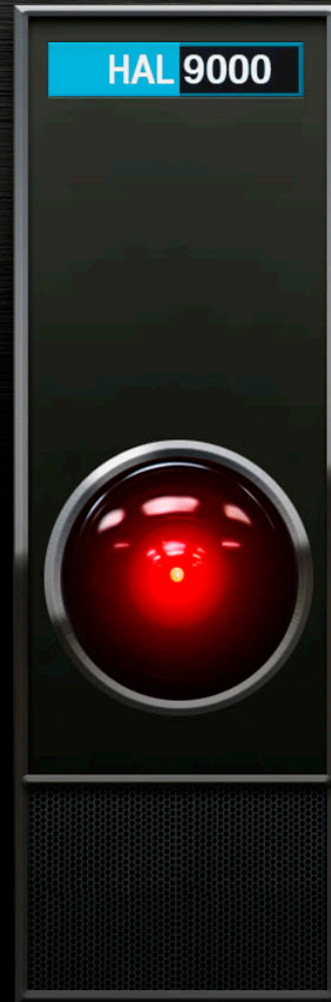


人工知能とカオス

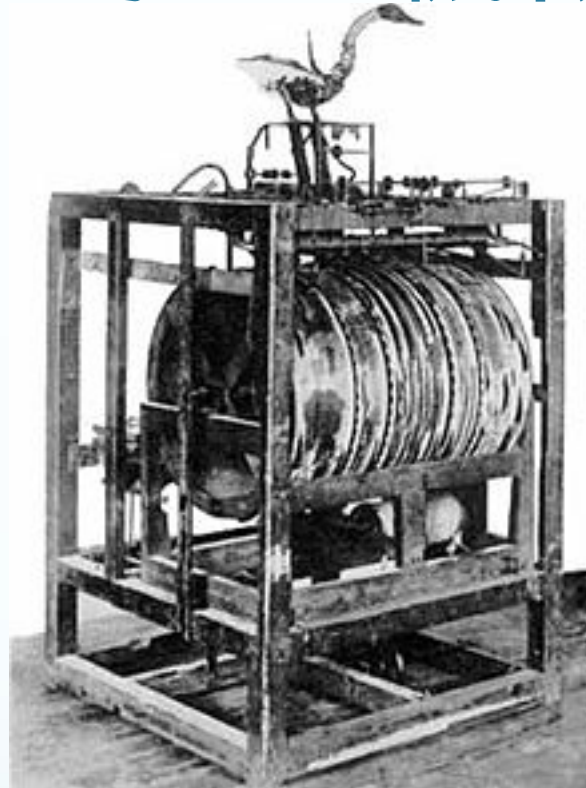


機械に知性は宿るのか？

考える機械



Talos (BC1600?)
クレタ島のミノス王が
ゼウスからもらい受けた
動く青銅像



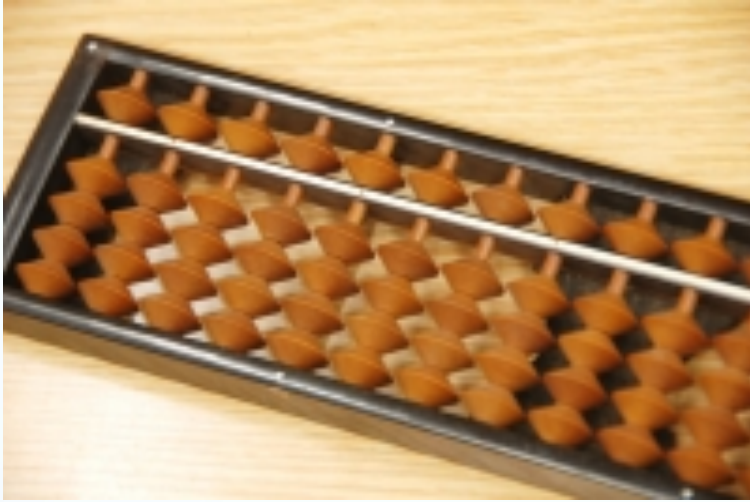
ヴォーカンソンのアヒル
(1738) フランスの発明家
ヴォーカンソンが作ったア
ヒルロボット。餌をついば
み、消化した。



2001年宇宙の旅 (1968)
アーサーCクラークのSF
木星調査の宇宙船内で人
工知能コンピュータ
HAL9000が反乱を起こす。

本当に意思を持った機械を作ることはできるのか？

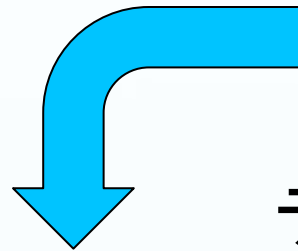
計算機から



コンピュータへ

ヒトが作った
命令の集合

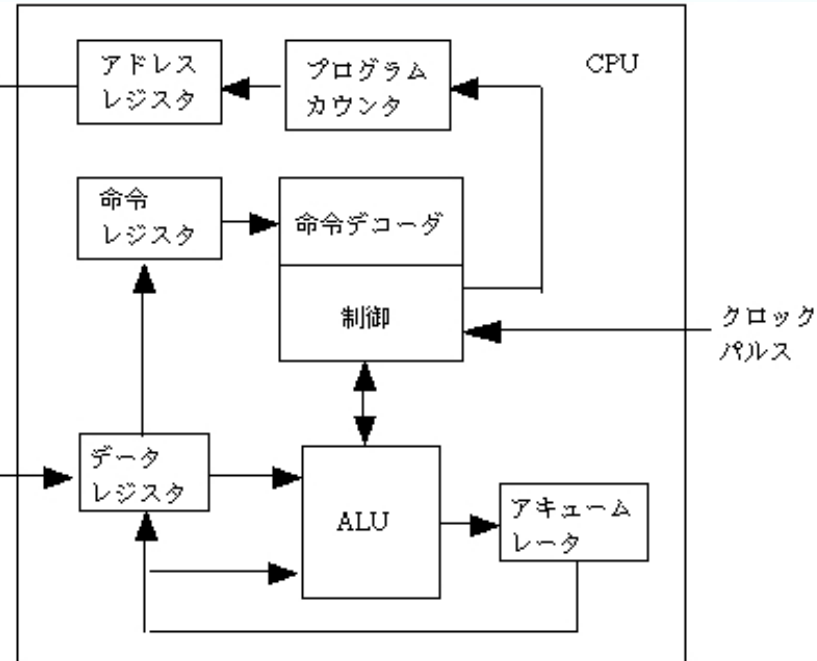
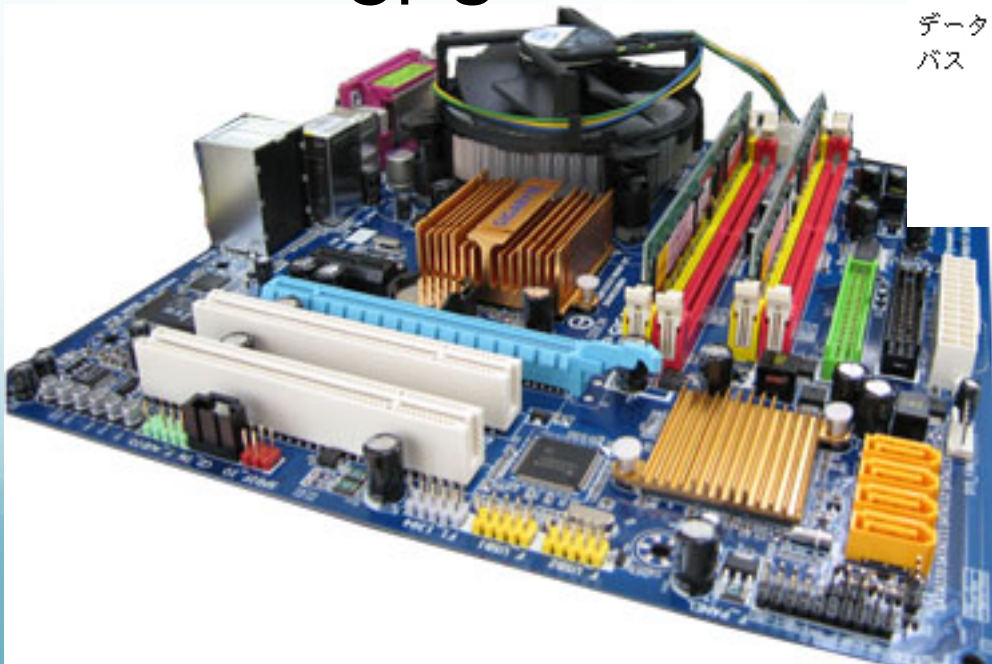
プログラム



CPU

データ

データ
バス



考える機械、と言っても、
実際はプログラムに従
ってデータを計算処理
するだけの装置。

2つの壁

1、規模の壁

ヒトの脳にはおよそ1000億(10^{11})個の神経細胞がある。その一つ一つがマイクロプロセッサのような情報処理能力を持つ。

2、自我の壁

ヒトは自ら考える意識を持っている。一方コンピュータは自ら考えるのではなく、ヒトが作ったプログラムに従って計算処理をしているに過ぎない。

コンピュータの性能と数

2013年度、世界に広がるコンピュータの数
コンピュータの台数は10億台。

携帯電話の台数は60億台。

冷蔵庫・エアコン・洗濯機22億台。

自動車10億台

...

全世界のマイクロコンピュータの数は100億を超える。
速度比を考えれば、全世界の情報処理能力は
人の脳を超えるだろう。

知能をプログラムできるか？

人工知能プログラムの例

ELIZA(言語解析)

セルオートマトン(自己組織化)

ファジーシステム(曖昧データ)

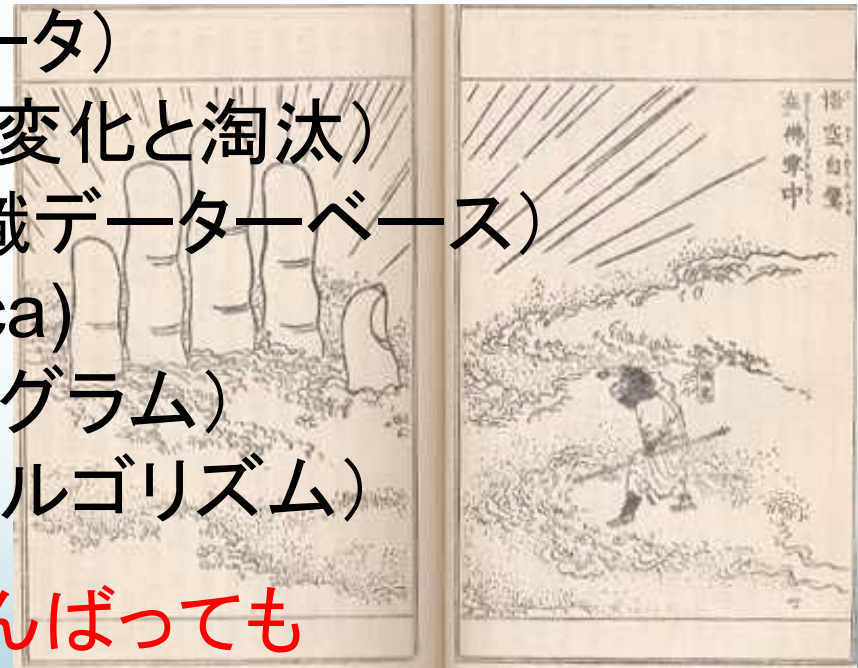
進化的アルゴリズム(偶発変化と淘汰)

エキスパートシステム(知識データベース)

推論エンジン(Mathematica)

ニューラルネット(学習プログラム)

カオス(疑似非決定論的アルゴリズム)



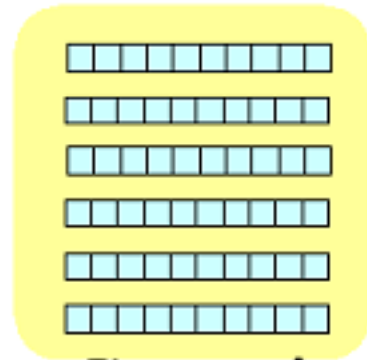
コンピューターがどんなにがんばっても
所詮プログラマーの掌の上？

Genetic Algorithms

進化的アルゴリズム

個体の特徴を遺伝子で表す

初期個体群を生成



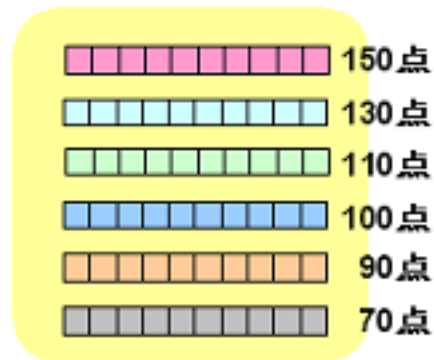
Start!

最終世代に達したら...

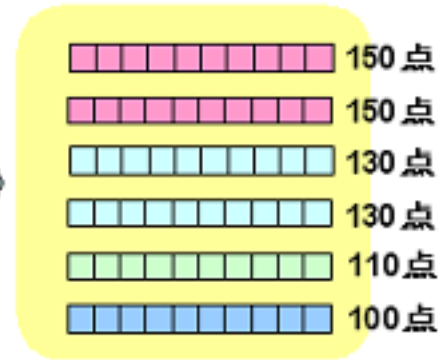
End!

各世代最高点のエリート(ピンク)
の1つは変化させない

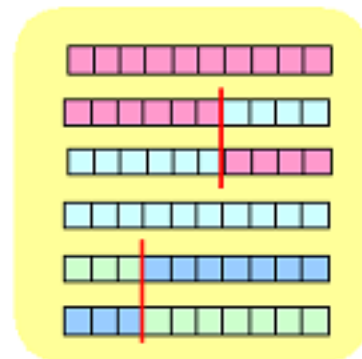
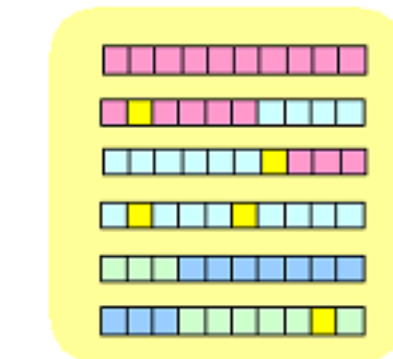
個体群の成績評価



弱い個体を淘汰する
選択淘汰により次世代生成



1世代のサイクル



突然変異(黄に乱数代入)

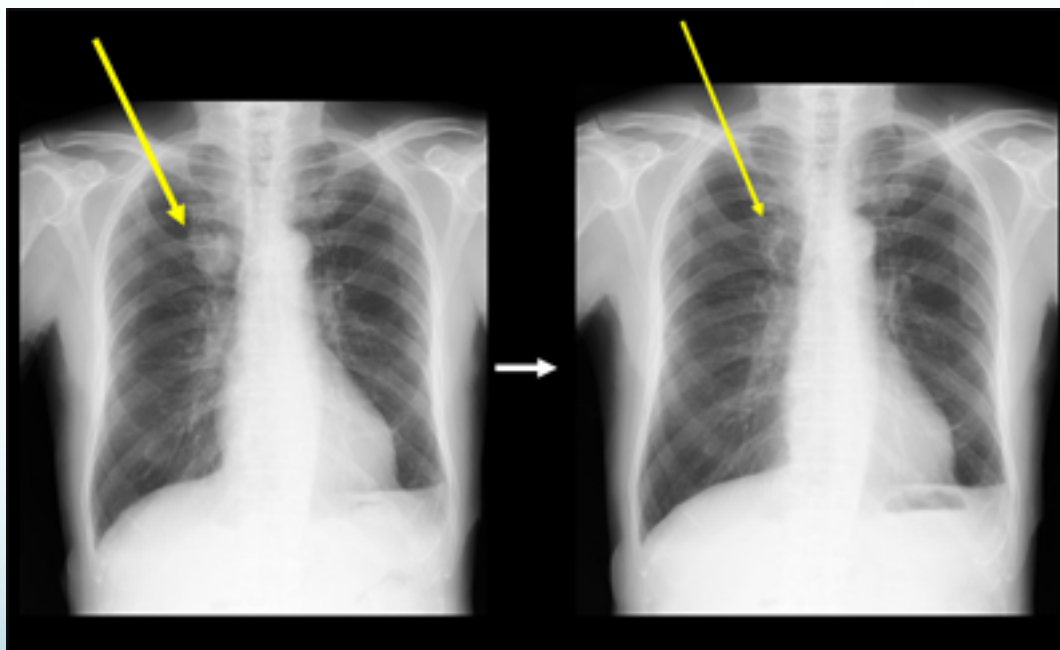
交叉(赤線より右を入替)

並列処理と確率プロセスが特徴

遺伝子を変化させる

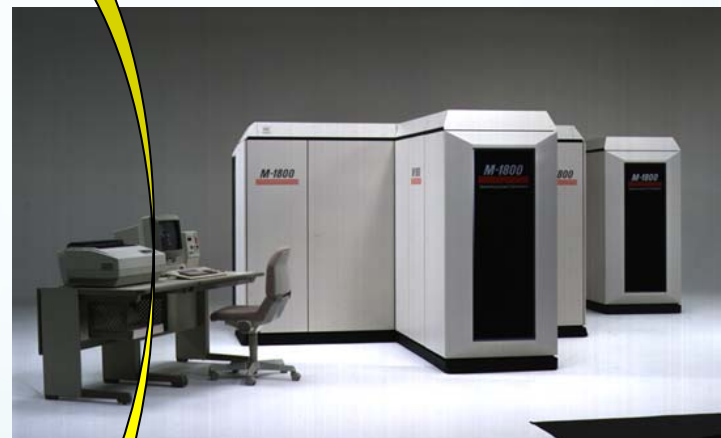
エキスパートシステム

X線画像、どこがガンですか？
機械には分からないが医者には分かる。



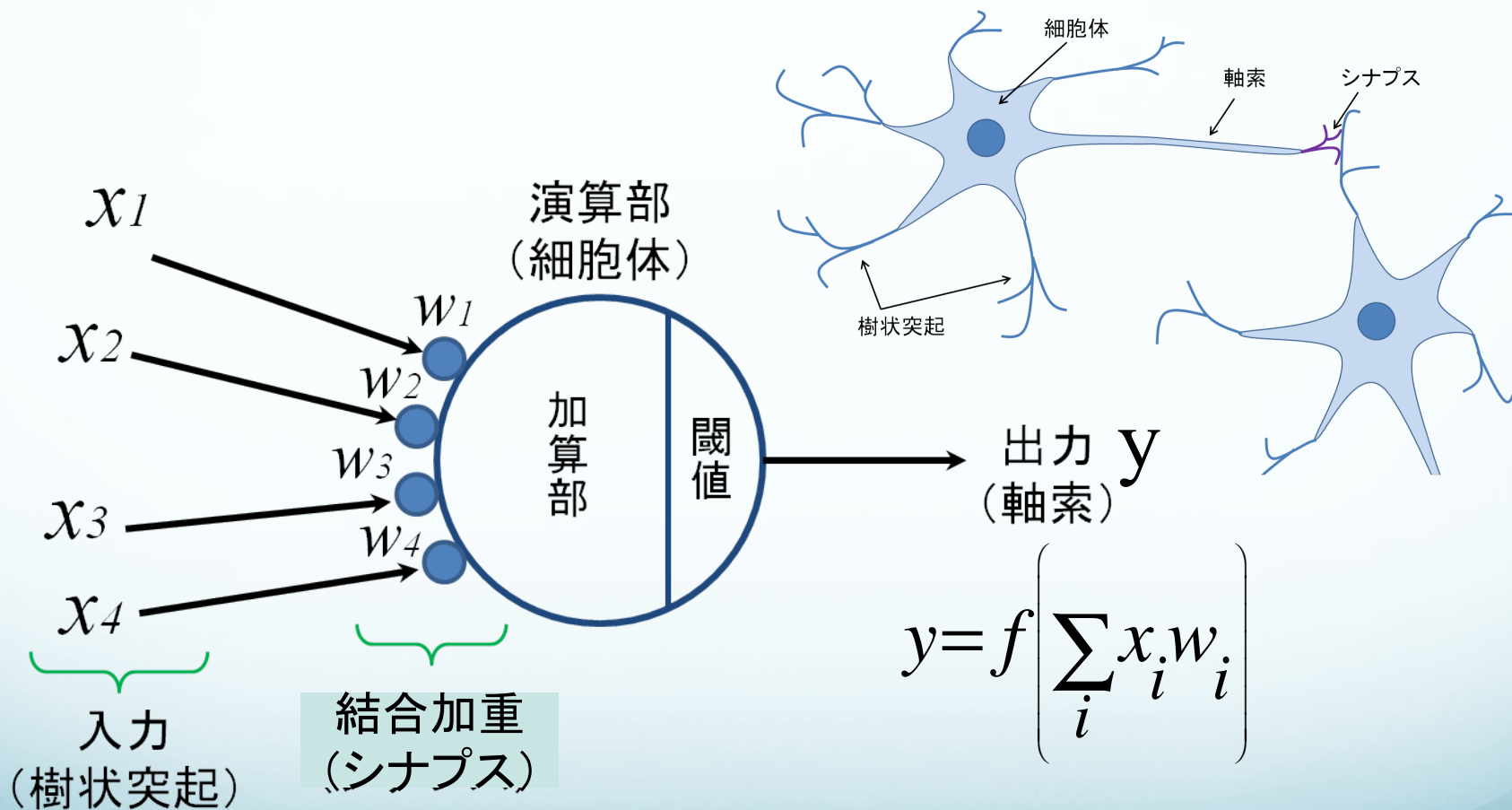
コンピューターによる自動診断

ヒトは膨大な経験の積み重ねを元に判断している。



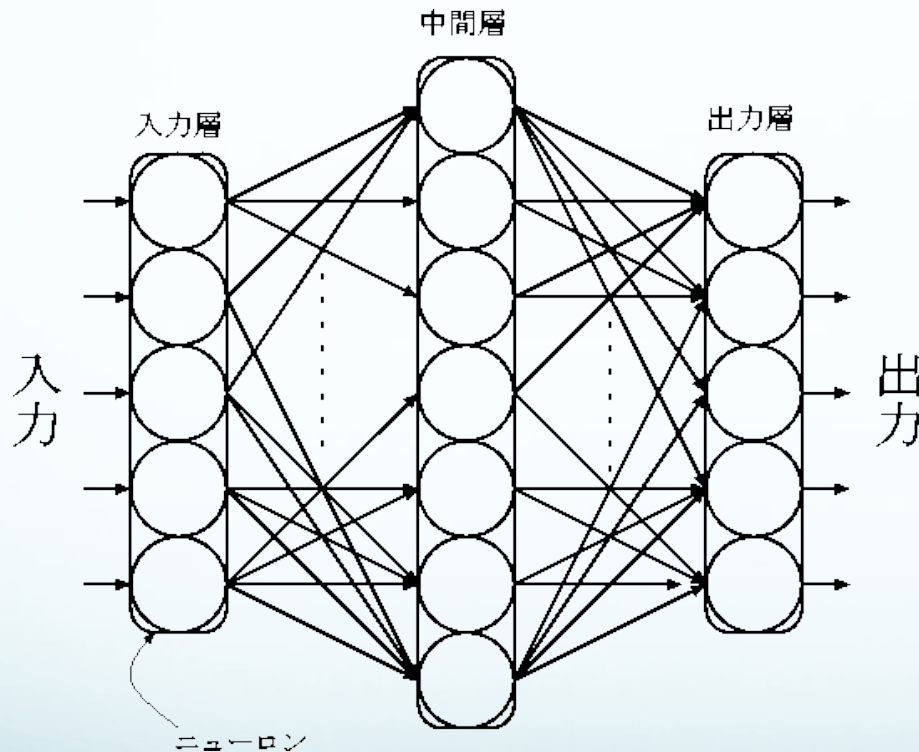
コンピューターにデータベースを作り、比較することで最適な判断を行う。

ニューラルネット



神経細胞モデル

ネットワークモデル

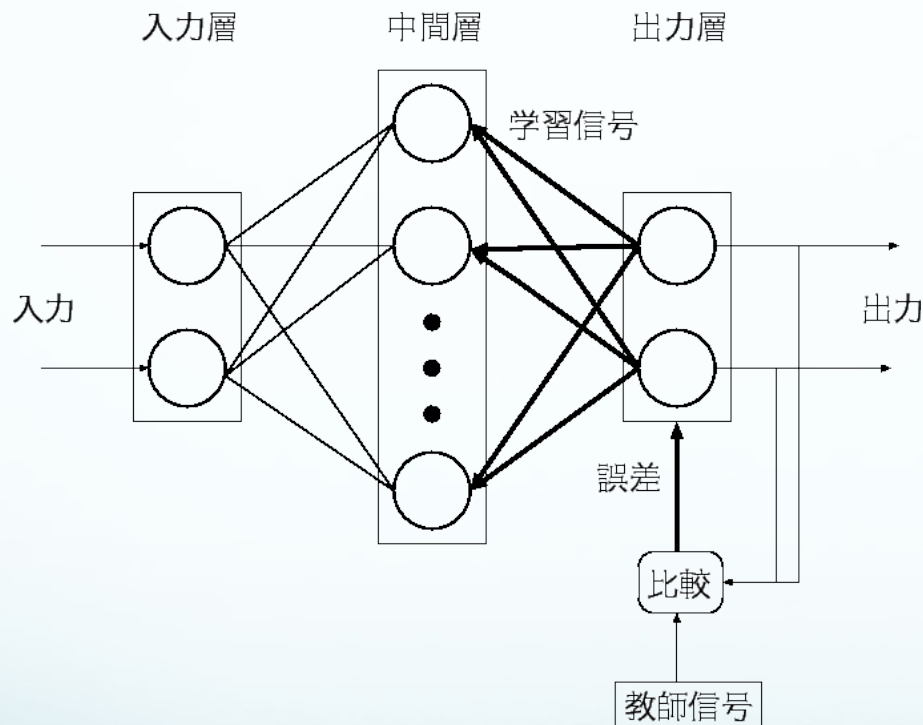


教師信号あり学習の例
(パーセプトロン)

出力と教師信号(正解)の誤差を求め、それを減らすように出力段の細胞の加重 w_i を変える。実はXOR動作ができないため、一般的なデータ処理が不可能。

パーセプトロン＝網膜モデル

バックプロパゲーション

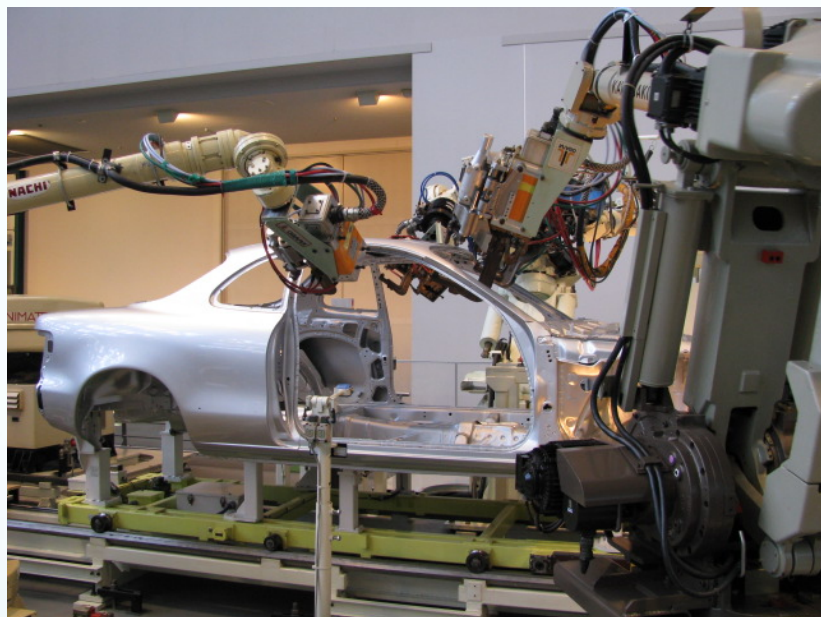


ニューラルネットでは、誤差修正を前の段にも伝える。(バックプロパゲーション=誤差逆伝搬)

誤差逆伝搬は、教師信号と出力信号の差を減らすように、結合加重 w を修正する学習法。それにより、あらゆるロジック動作が可能となる。つまり、並列処理コンピューターとなる。

ニューラルネット
= 大脳皮質モデル

ニューラルネットによる学習



溶接ロボット
自動車工場を無人化
ヒトの技術をロボットに
学習させる。

fMRI信号から心の中
のイメージを再構成。
ヒトの心を覗くことが
できるようになる？

Presented clip



Clip reconstructed
from brain activity



カオスと神経活動

ニューラルネットが神経ネットワークと同じ能力を持つとしても、そこに自発的意志や判断能力は生まれるのか？単純に規模を大きくしても、それは難しいだろう。

そこで、新たなメカニズムとしてカオスに注目する。

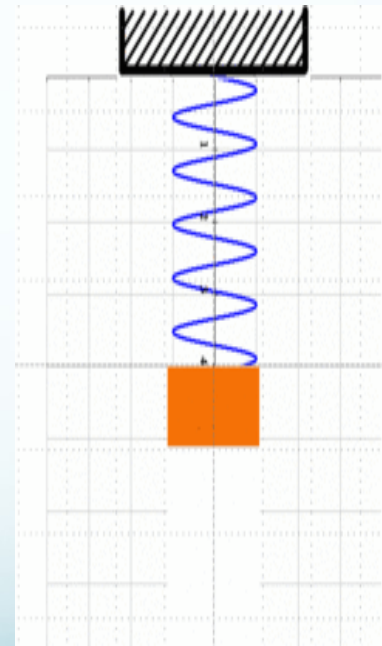
カオスとは、本来決定論的であるべき微分方程式や差分方程式の解として現れる、一見非決定論的な解軌道である。神経細胞や神経ネットワークは非線形な微分方程式に従い、その活動にカオスが現れることが知られている。この神経活動におけるカオスは、ヒトが意志を形成する際に重要な役割を果たす可能性がある。

線形微分方程式

微分方程式は微分演算を含む方程式で、その解は方程式と初期条件によって一意に、すなわち決定論的に決まる。たとえばよく知られている斉次2階の線形微分方程式

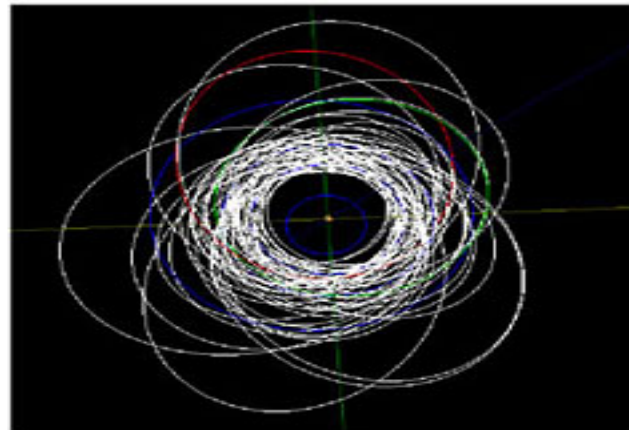
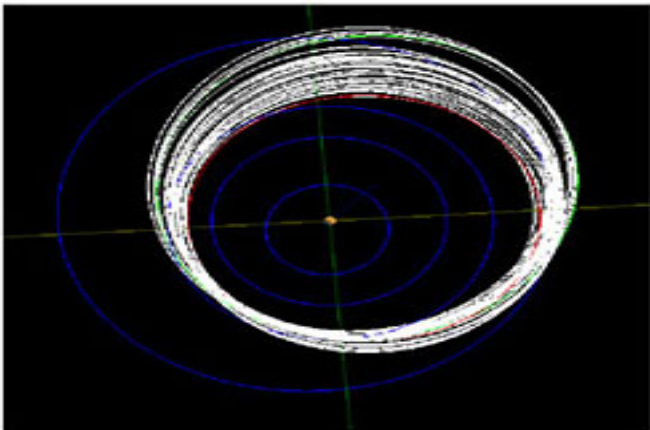
$$a \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = 0$$

の解は、振動解 (sin, cos) と減衰・発散解 (exp) の線形結合で表される。



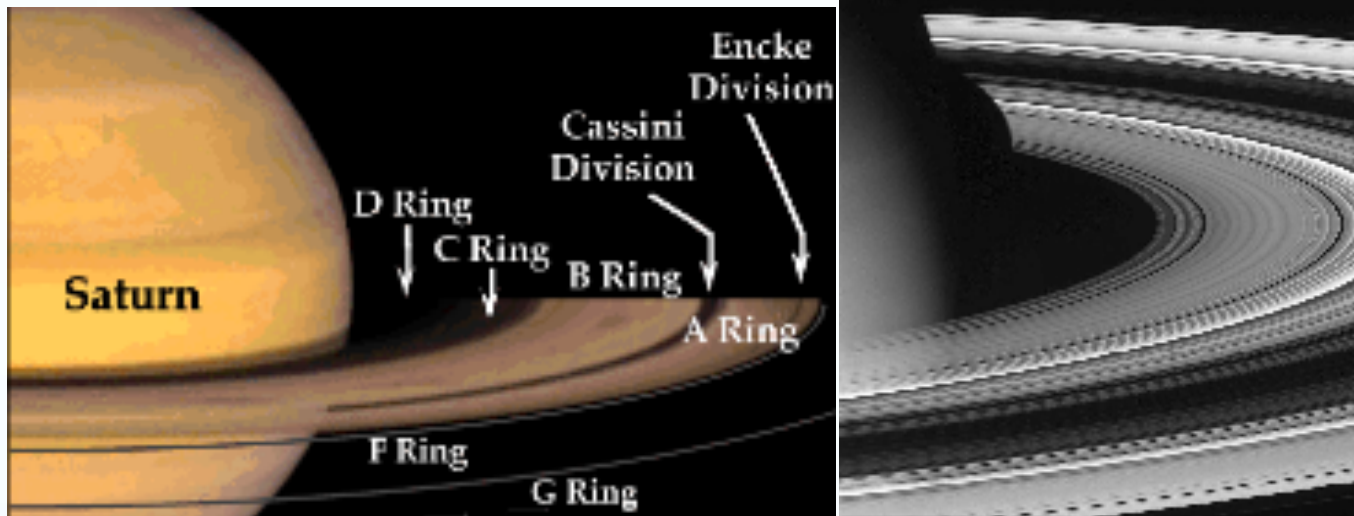
非線形微分方程式

非線形な微分方程式では、メカニズムが決定論的であるにもかかわらずその解曲線が複雑で、物理系の動作を予測することが困難な場合がある。たとえば天体の運動は一見周期的な楕円軌道に見えるが、実際には他の天体からの摂動を受けて細かく変化し、決して周期的な軌道を描くことはない。月や地球のように、相対的に摂動が小さい大型天体の運動は近似計算によりある程度高い精度で予測できるが、小天体の軌道を正確に予測することは困難である。このような決定論的でありながら予測不可能な現象をカオスと呼んでいる。



小惑星イトカワの軌道進化シミュレーション。火星と地球の引力で大きく軌道が変化する。

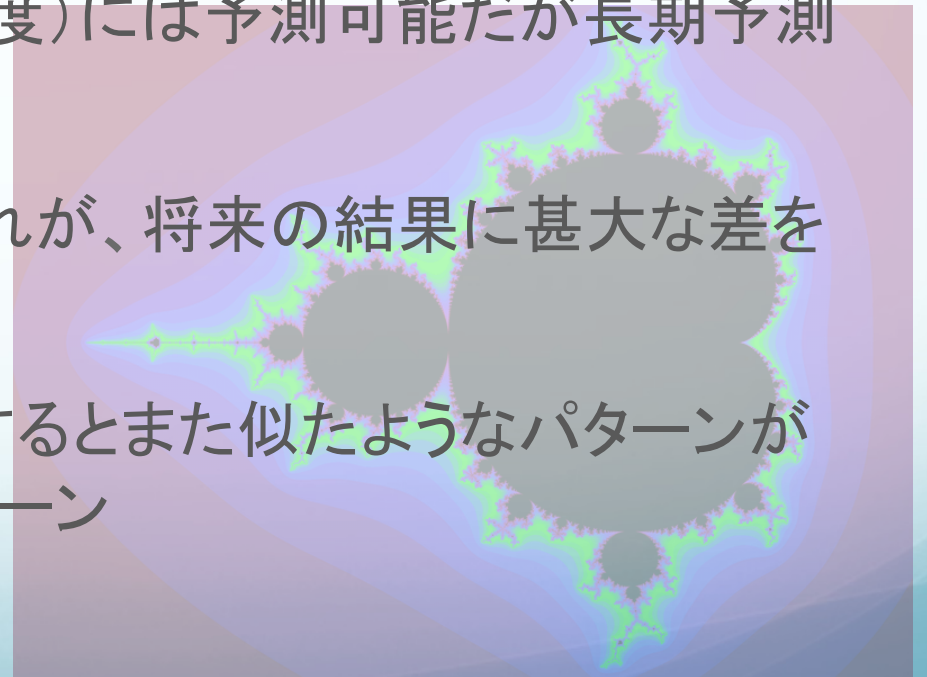
土星の輪



たとえば土星の輪を作る氷の塊の軌道はカオスをつくり、予測することはできない。しかし、本来予測不可能なカオスの軌道にも、何らかの規則的なパターンがあるように見える。これは自己相似性(フラクタル)を持っている。

カオスの特徴

- 簡単な数式から、ランダムに見える複雑な振る舞いが発生する
- 短期的(リアプノフ時間程度)には予測可能だが長期予測が困難。
- 初期値のごくわずかなずれが、将来の結果に甚大な差を生み出す(**バタフライ効果**)
- 自己相似(解軌道を拡大するとまた似たようなパターンが現れる。) = **フラクタル**パターン



マンデルブロ集合

ロジスティック方程式

ロジスティック方程式(補給方程式)は、ある生物種の個体数 x が自然環境下でどのように変化するかを示す微分方程。 p が個体数の増殖率、 q がその環境下で安定に存続し得る最大の個体数。

$$\frac{dx}{dt} = px(q - x)$$

増殖速度は、個体数 x が0に近いときには生殖が困難で遅く、個体数に比例して上がっていく。しかし、逆に生きられる上限の数に近づくと食料の取り合いで増殖速度も低下する。

ロジスティック方程式の解

この方程式の解は、初期条件によって決まる時間定数を t_0 として、

$$x = \frac{q}{1 + \exp\{pq(t_0 - t)\}}$$

で与えられる。そのグラフは q に収束するシグモイドカーブとなる。

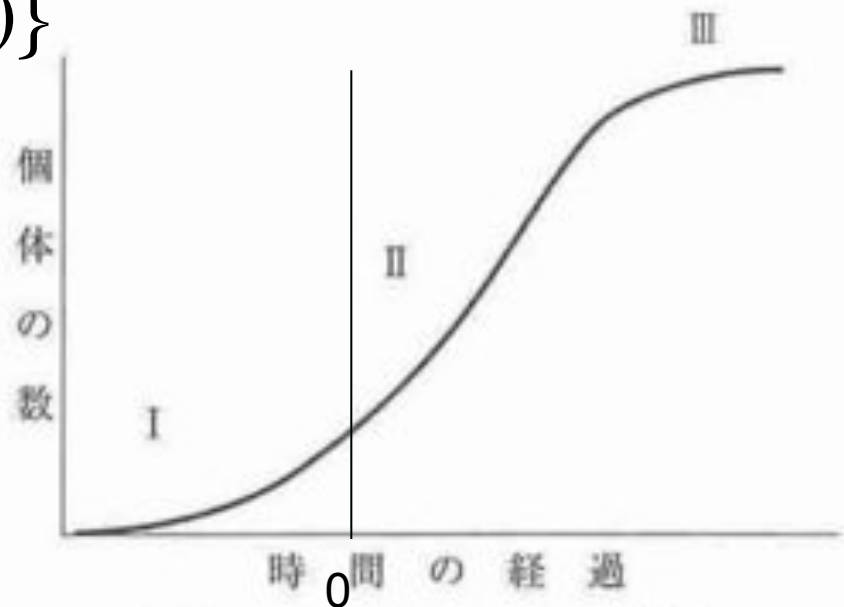


図1a ロジスティックス曲線

離散的差分方程式

ロジスティック方程式の解を離散的な近似計算で求めると結果は違ってくる。 x の値を Δt 毎に変化する離散値として、以下のような差分方程式に置き換える。

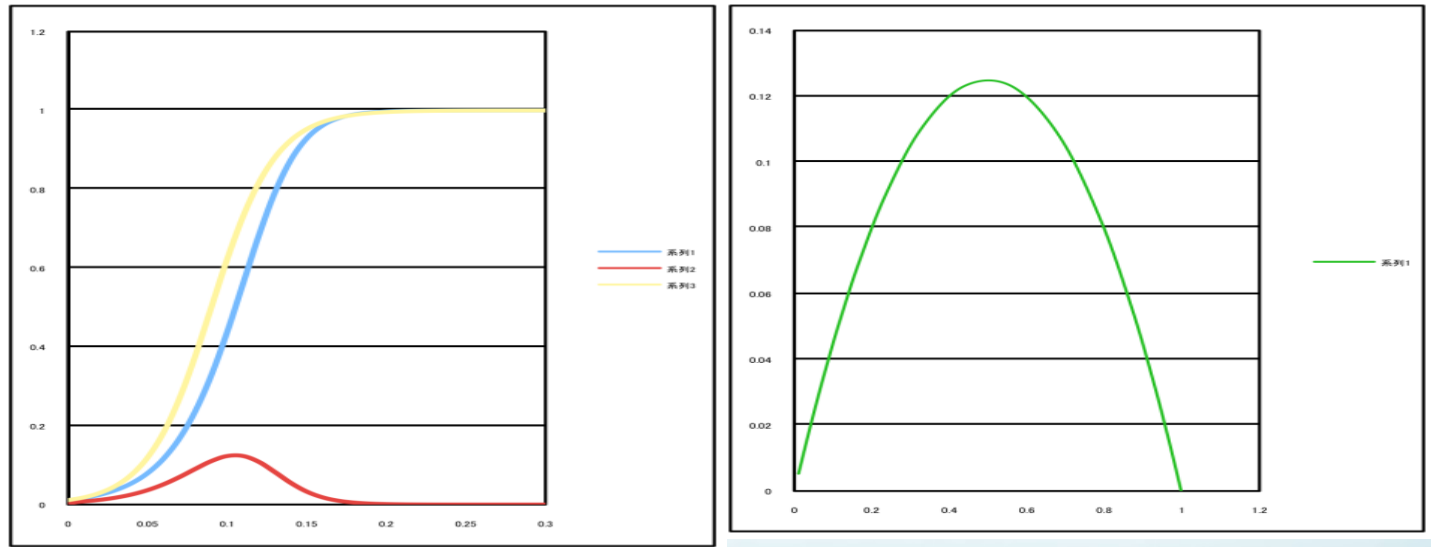
$$x_{i+1} - x_i = \{px(q - x)\} \Delta t$$

ここで Δt は時間ステップである。現実の生物はたとえば1年で世代交代があるため、離散的な増加をする。

Phase Diagram1

増殖速度の定数 $p=50, 200, 300$ について解を計算した結果。左側が増加グラフで、右が相図(phase diagram)。黄色が連続解、青が個体数、赤が個体数の時間変化。

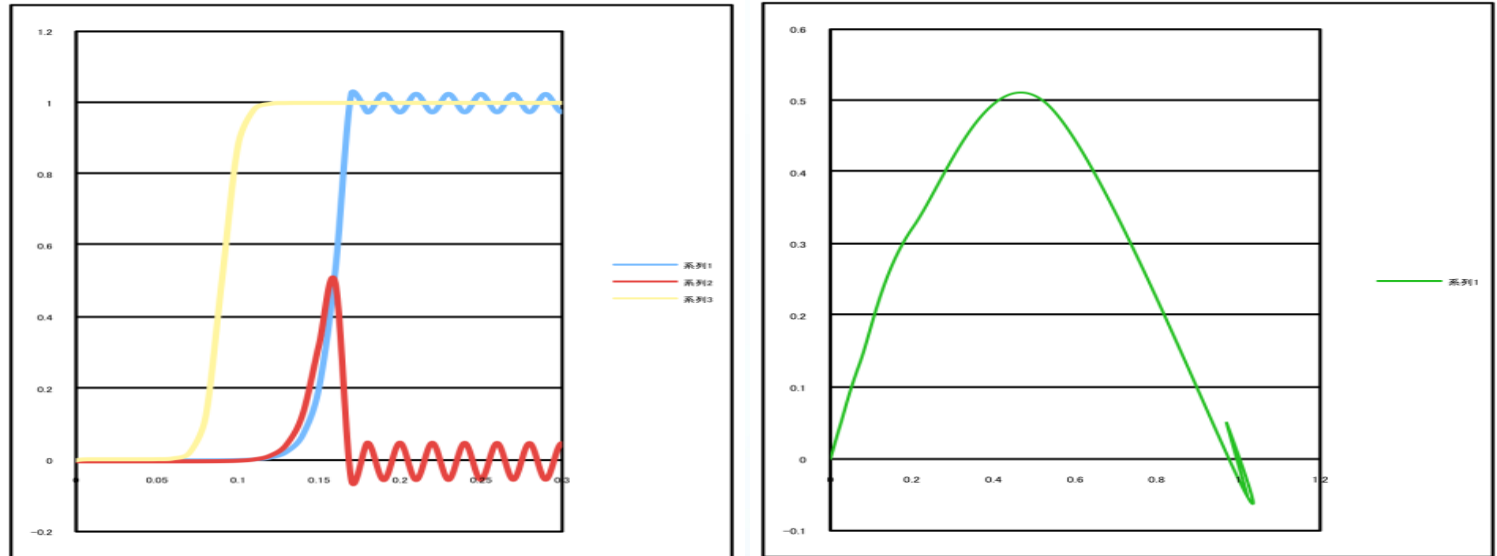
$p = 50$



カオスの軌道を分かりやすくするため、 x と x の時間微分を両軸とする平面上に解曲線(緑)を描いたものが相図(Phase Diagram)である。

Phase Daigram2

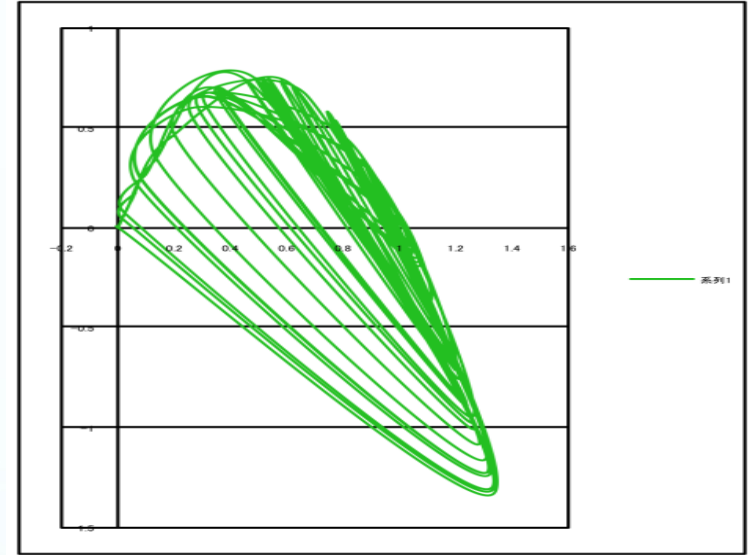
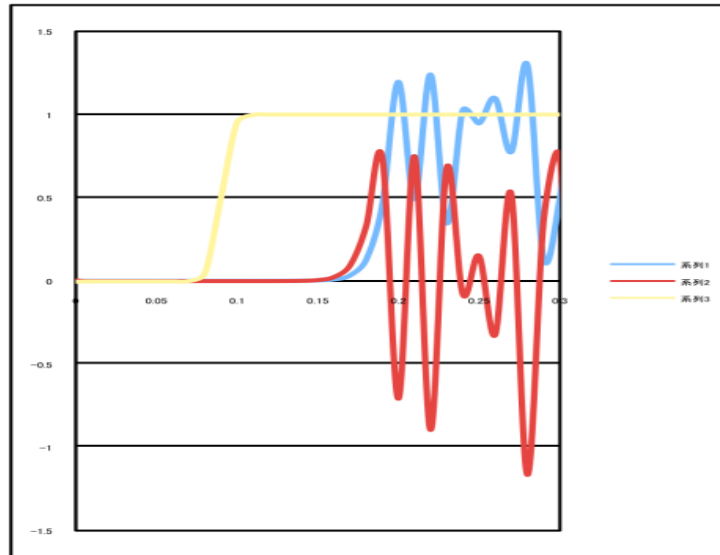
$p = 200$



増殖速度が速くなると連続解と同じように増加・収束していたグラフがある点から減少に移り、やがて周期的な振動に変わっていく。

Phase Diagram3

$p = 300$



さらに増殖速度が増すと不規則な振動が起きる。このときの相図はカオスを示している。右の解曲線の軌道は周期的なようで同じ軌跡を繰り返すことはない。非常に細かい曲線の集まりで、フラクタルな構造を持っている。現実の環境では生物の個体数はこのグラフのように増減を繰り返し、個体数が0を切ると絶滅することもある。この変化は実際には予測不可能である。

ローレンツの式

カオスが生成する解軌道は、**非周期的でありながら一定の範囲内を周回する**、疑似周期軌道を示す。このような軌道のアトラクターと呼ぶ。

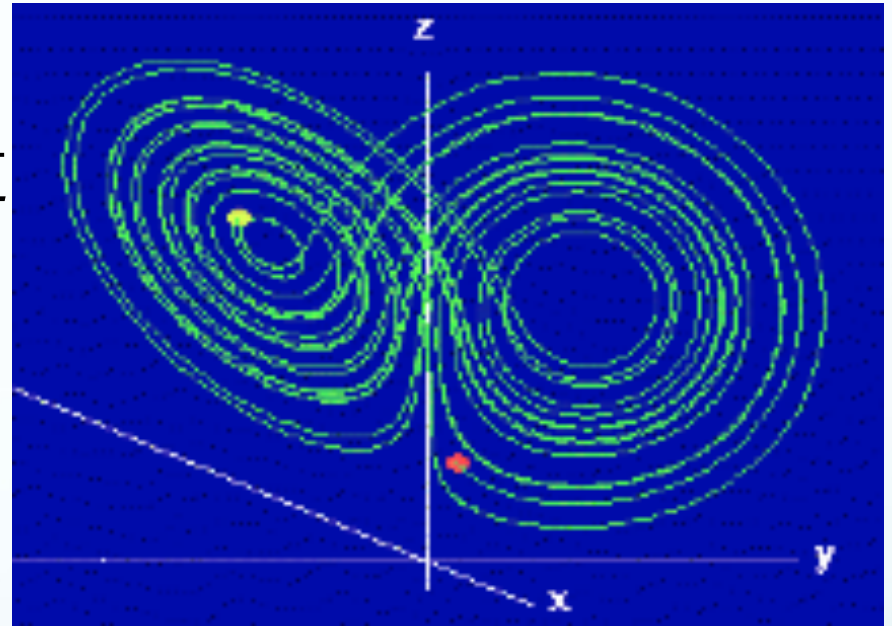
ローレンツが作った大気の運動を表す方程式が作り出すアトラクターはローレンツ・アトラクターと呼ばれる。

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= -s(X - Y) \\ \frac{dY}{dt} &= -XZ + rZ - Y \\ \frac{dZ}{dt} &= XY - bZ\end{aligned}$$

大気運動の方程式。天候を決める微分方程式は非線形で、その解はカオスを作る場合がある。このため、北京で蝶が羽ばたくとニューヨークが嵐になる、などというたとえがある。

ローレンツ・アトラクター

ローレンツアトラクタの軌道は二つの蝶の羽のような形で、各羽の上では疑似周期的軌道を取りながら、時折一方の羽からもう一方の羽へ軌道が移る。カオスでは、わずかの初期条件の変化に対して敏感に軌道が変化し、長期的には大きな結果の違いを生む。



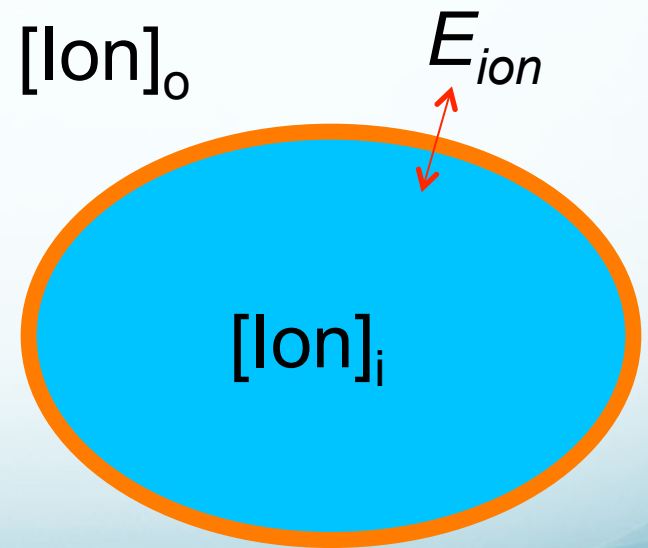
これが、たとえば流れの中に落としたインクの動きや、気象あ予測困難である理由である。このため、熱運動などのランダムな擾乱が加わる系にカオスが現れた場合、その結果は予測不可能な統計的振る舞いをする。これが決定論的な物理系に非決定論的現象が現れる原因となっている。

神経のカオス

神経細胞の発火(刺激に対する膜電位の脱分極)は、膜内外のイオン濃度と膜電位に関するホジキン・ハクスレーの方程式に従う。あるイオン種の作る膜電位 E_{ion} はネルンストの式により、膜内外のイオン濃度 $[Ion]_o$ と $[Ion]_i$ で表せる。

Rは気体定数、Tは絶対温度、zはイオンの価数、Fはファラデー定数。

$$E_{ion} = \frac{RT}{zF} \log \left(\frac{[Ion]_o}{[Ion]_i} \right)$$

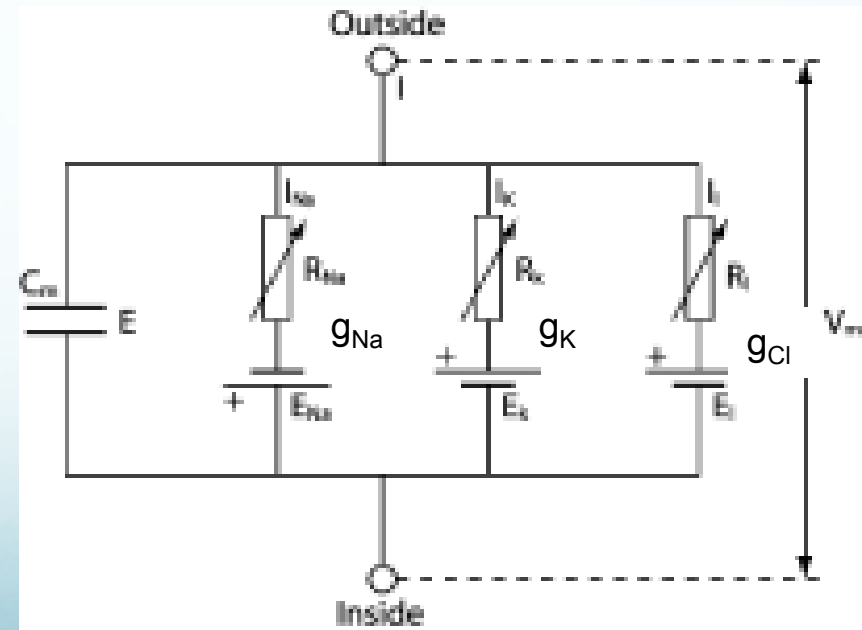


イオンチャンネルの伝導

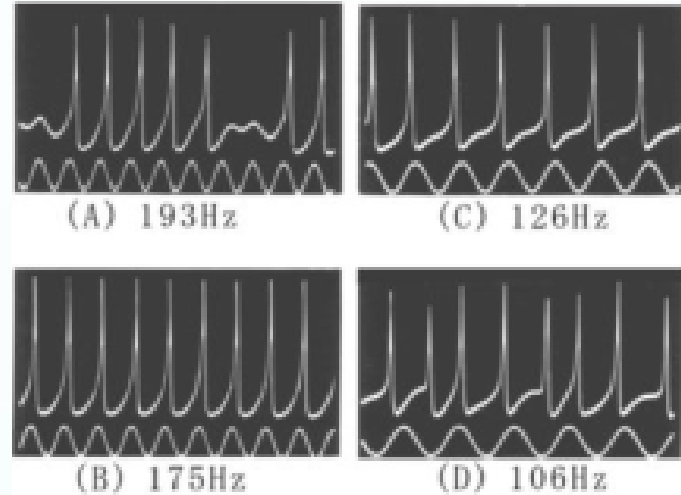
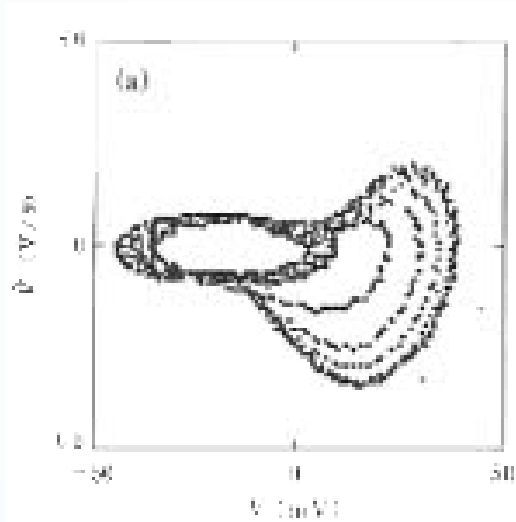
神経細胞の膜電位を決めるイオンは主にNa, K, Clで、膜電位 V_m は、イオン電流が0の定常状態であるとする、各イオンの電位とコンダクタンス g_{Na} 、 g_K 、 g_{Cl} によって、

$$V_m = \frac{g_{Na} E_{Na} + g_K E_K + g_{Cl} E_{Cl}}{g_{Na} + g_K + g_{Cl}}$$

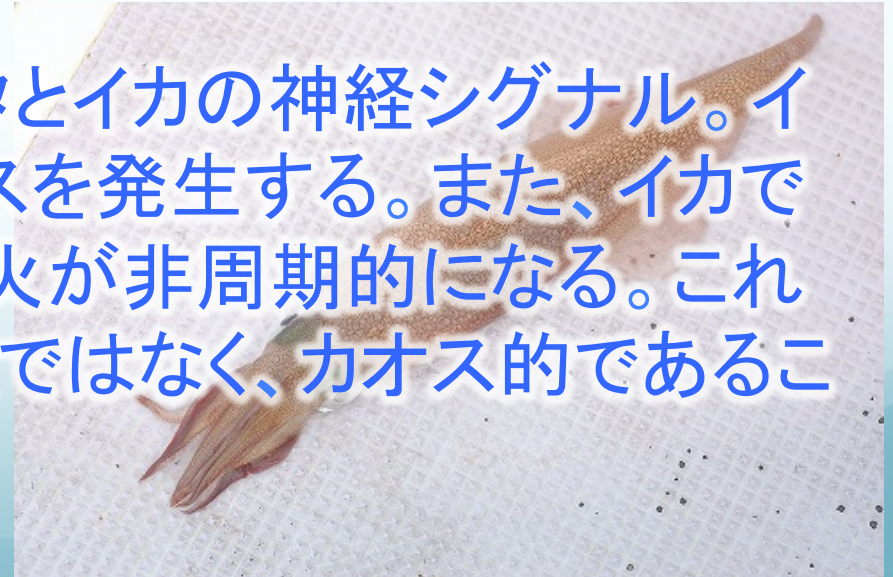
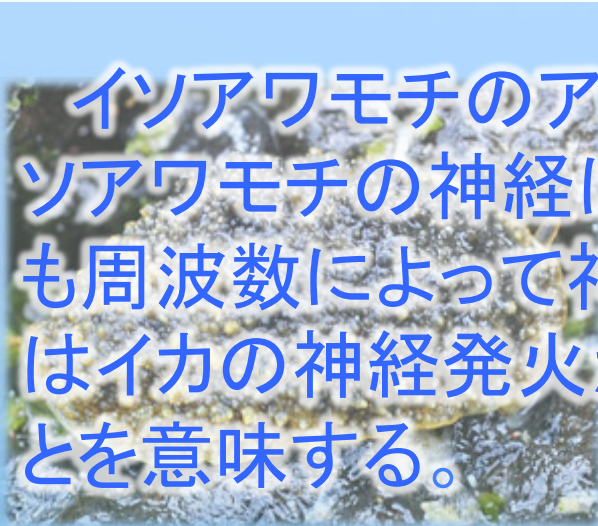
で表される。Na、Kのコンダクタンスはイオンゲートの開閉により変化する。イオンチャンネルの応答によって、神経細胞は非線形な電位応答をする。このため神経ネットワークにはカオスが発生する可能性がある。実際に神経系にカオスが起きている。[イソアワモチ(林)、イカ(松本)]



イソアワモチの神経カオス



イソアワモチのアトラクタとイカの神経シグナル。イソアワモチの神経はカオスを発生する。また、イカでも周波数によって神経発火が非周期的になる。これはイカの神経発火が共振ではなく、カオス的であることを意味する。



人の判断をカオスで作れるか

コンピューターが決定論的に動作するとしても、カオスをプログラムすればその動作は予測不可能になる。その出力は自由意思に見える。(???)
コンピューターが今日の夕飯のおかずを自分の意思で決めるようになるかもしれない。



カレー？ハンバーグ？

知の創出

コンピューターが脳以上の処理能力を持ち、判断力を持ち、学習するようになったら、そのコンピューターは知性を持つだろうか？

あまり知られていないが、コンピューターにはある絶対的な制限がかけられている。この軛を外したとき、コンピューターはどのように振る舞うのか？

知の危険性についても考えておく必要はあるかもしれない。