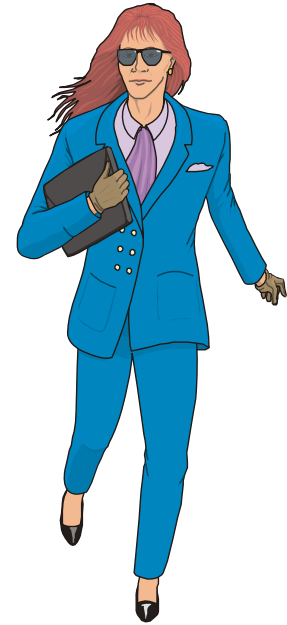
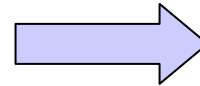
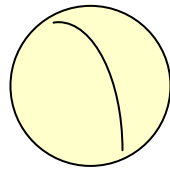


1. 複雑系解析の目的

1. 1 複雑系とは

(1) 生命



胚種あるいは混沌としたもの

秩序化された構造

自発的に形成される現象

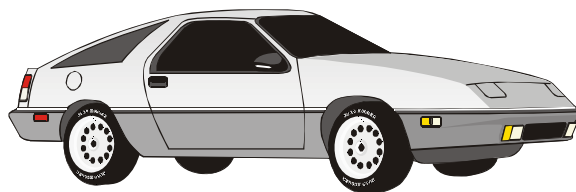
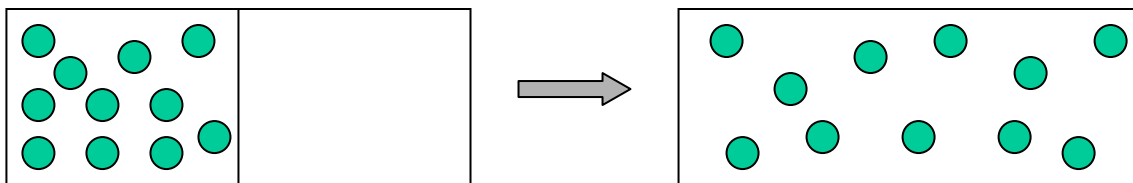
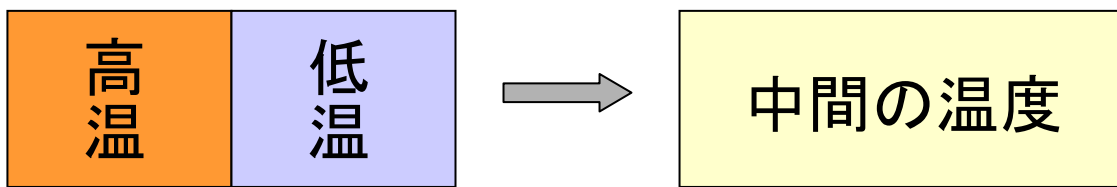
- ・ 長い時間スケール
進化の問題, 生物起源の問題

(2) 従来の科学

閉鎖・熱平衡系

不可逆過程では,

“秩序 → 無秩序” または, エントロピー増大
“宇宙の熱的死”



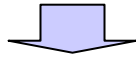
運動エネルギー

ブレーキ

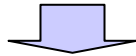


熱エネルギー

古典力学の決定論，統計力学の確率論

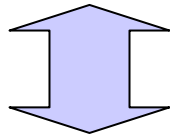


線形，重ね合せ，要素還元主義



“ラプラスの悪魔”

初期条件，支配方程式により結果が自明となる.



ところが，

確率的挙動 (揺動力によるブラウン運動，量子ゆらぎ)，
初期条件の僅かな差が結果として大きな差となる**カオス**
(非線形力学)，無秩序状態からの**自己組織化** (非平衡系
熱力学) など

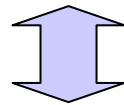
従来の科学に対する反証多い.

(3) 複雑系の定義

- (1) 要素の集まった集合体の系
- (2) 局所相互作用が非線形
- (3) 開放系(物質, エネルギーの流れが開放されている.)
- (4) 非平衡(平衡から遠く離れた状態)

構成している要素の振舞のみを考えていては予想のつかない系全体の状態, 振舞が動的に起こる. ばらばらにすると本質が抜け落ちる. 逆に系全体のこのような振舞は各要素のルール, 要素間の相互作用にも影響を与える.

「存在」に関してでなく, 「発現」[生成]に焦点



従来科学

還元主義的手法: 要素の振舞を理解し, これをシステム全体に拡大するという線形思考

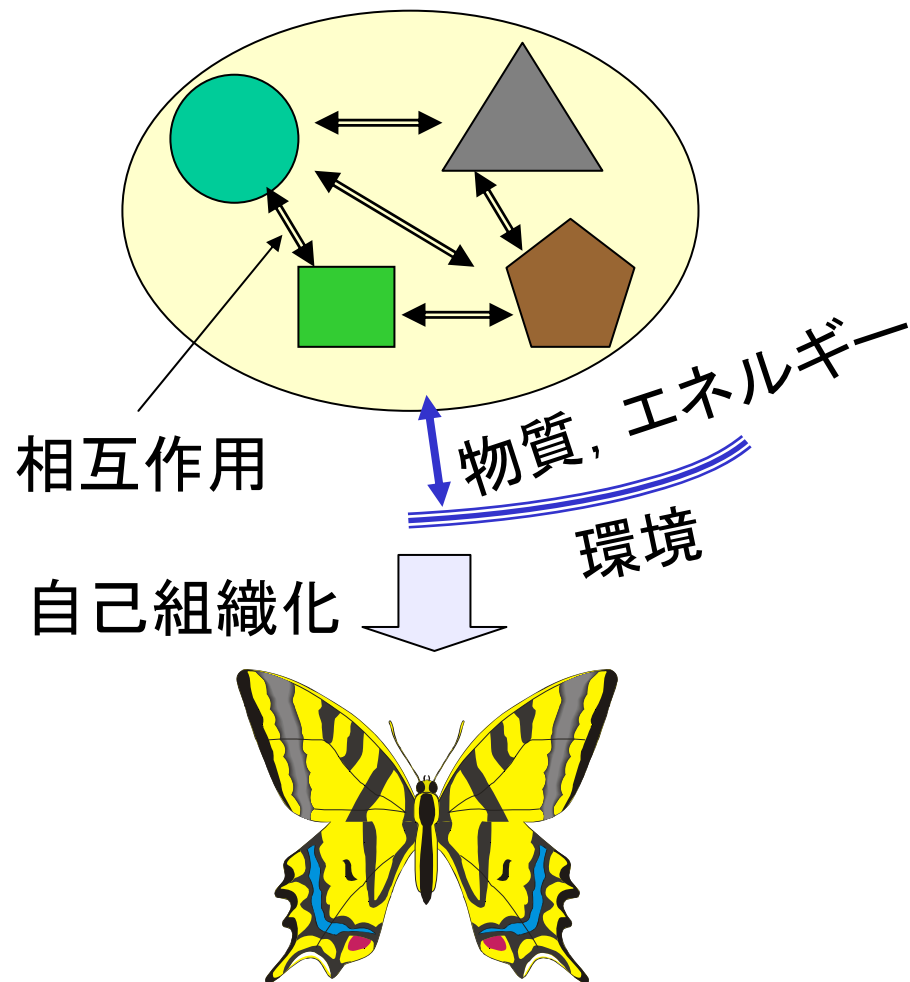
複雑かつ不規則で混沌とした物質状態からいかにして秩序が生まれるのか？

散逸構造：系を貫くエネルギー，物質の流れがある臨界値を越えたとき，非線形相互作用の結果として，新しいタイプの構造，組織が自然発生的に出現

非平衡非線形開放系で，エネルギーの絶えざる散逸のみによって維持されるという際立った特徴

自己組織化：散逸構造が生成されること

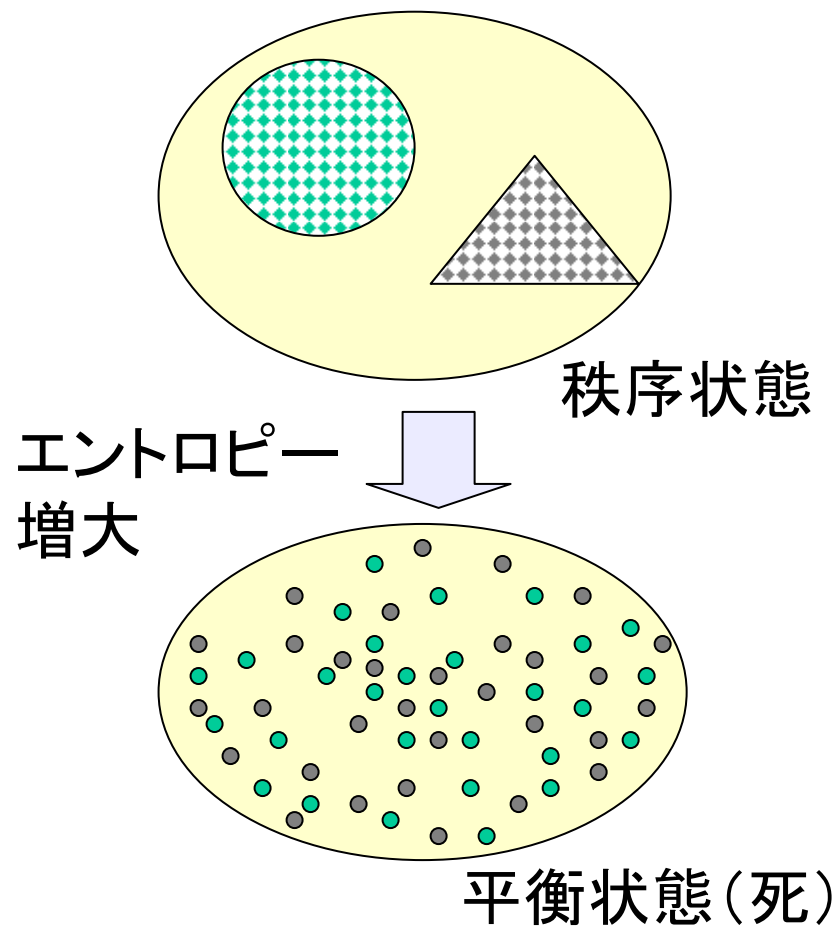
複雑系科学



解析法: アルゴリズム
シミュレーション

対象: 情報, 手続

平衡熱力学



エネルギー, エントロピー原理
微分方程式
もの

(4) 参考: システムとは [システムの4属性]

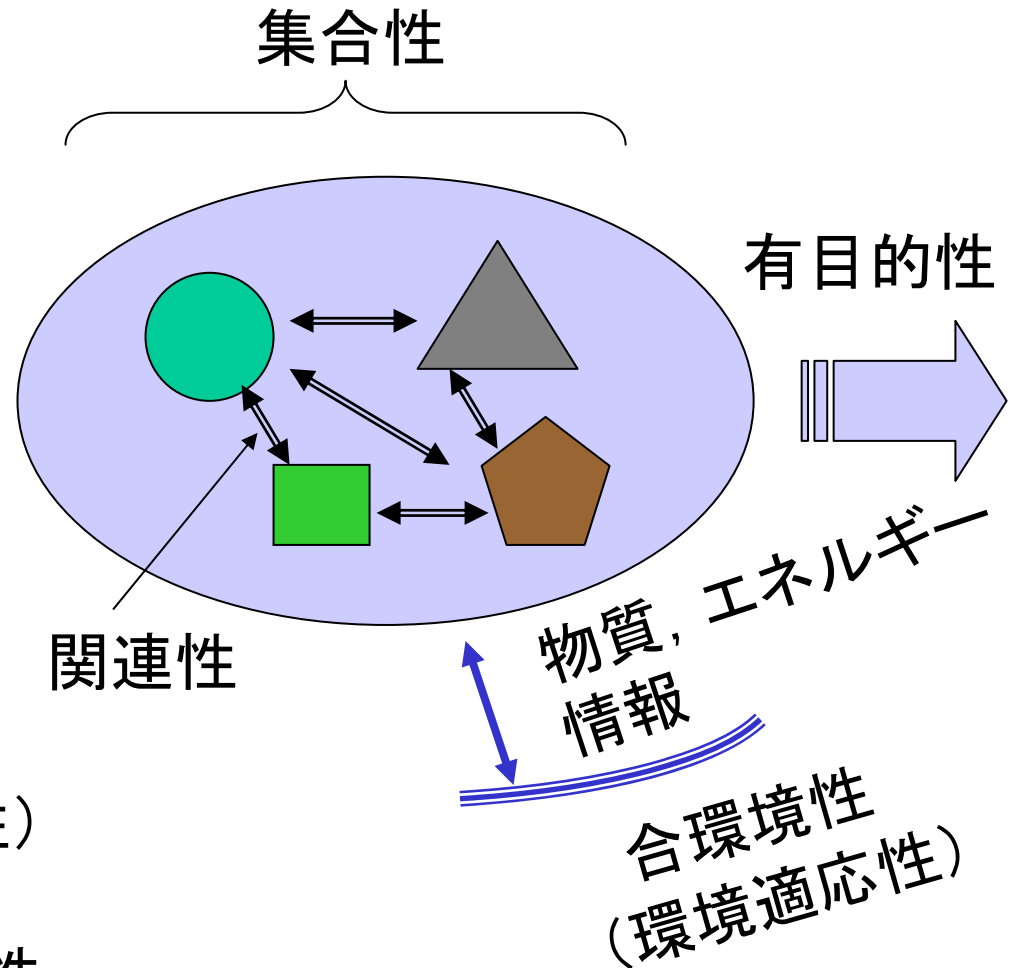
1. 集合性

2. 関連性

3. 有目的性
(目的追求性)
目的 (objective)
目標 (goal/target)

4. 合環境性 (環境適応性)
環境 (environment)
環境特性 $\leftrightarrow$ システム特性

環境変化に対し, システムの存続を保持



適応 (adaptive) システム : 環境変化に対し, 常に最適状態を維持

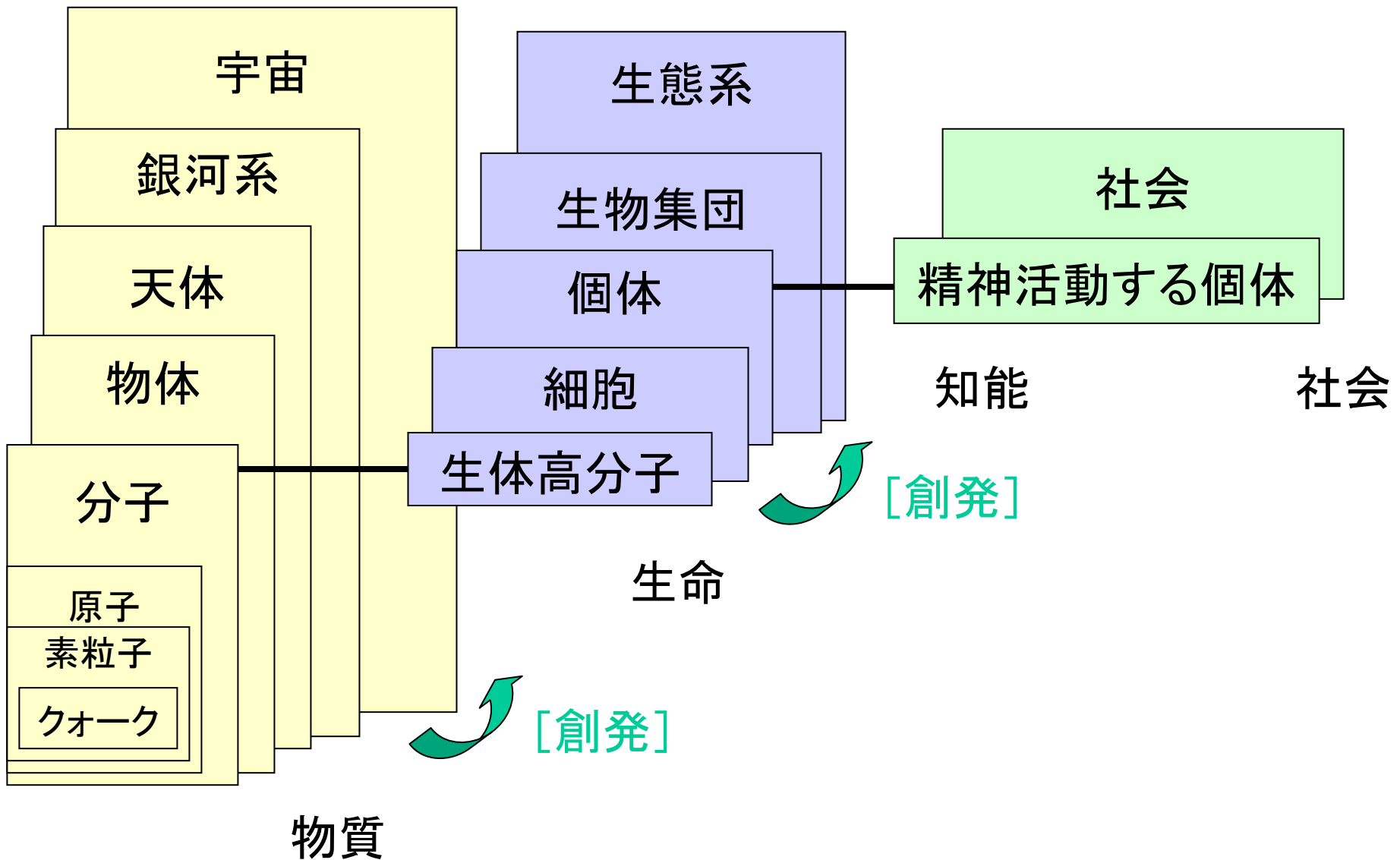
自己組織化 (Self-organizing) システム : 内部構造, 機能をも変化

[システムの本質]

シナジィ (synergy) 効果 : 全体的最適化は部分的最適化の和以上

トータル・システム : 個 (モジュール, ホロン) が自律

(5) 階層構造の複雑系



(6) 複雑系個々の例

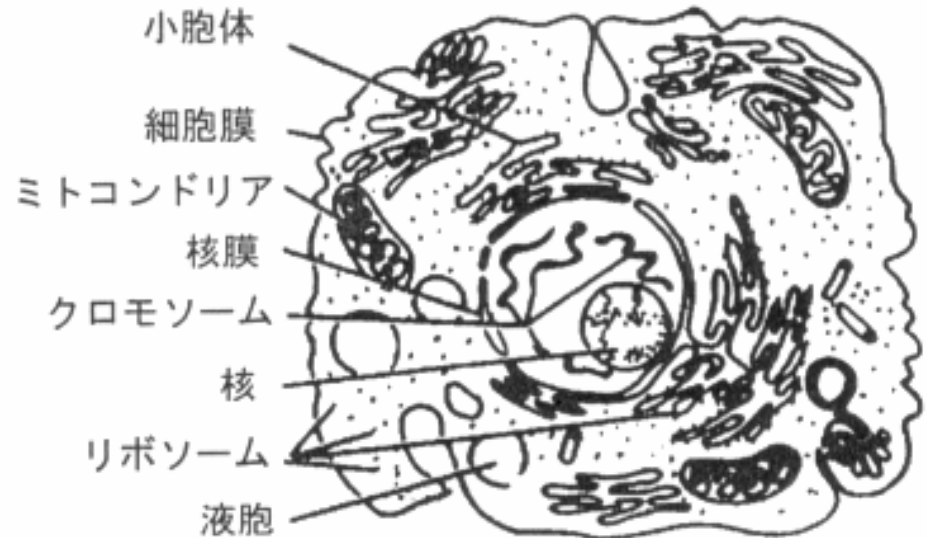
(a) 化学： 化学反応において多数の分子が絡んで**新しい**分子の形成

(b) 生物

細胞は**複雑な**細胞膜, 核, 細胞質からなり, その各々は更にいろいろな成分からなる.

細胞においては, 数十ないし数千の代謝過程がよく**統制**された形で同時進行している.

生体の器官は同様によく統制されて**協力的**に働く多数の器官から成っている. それらの器官はそれぞれ目的にあうように働いて動物の体内で協力し合っている.



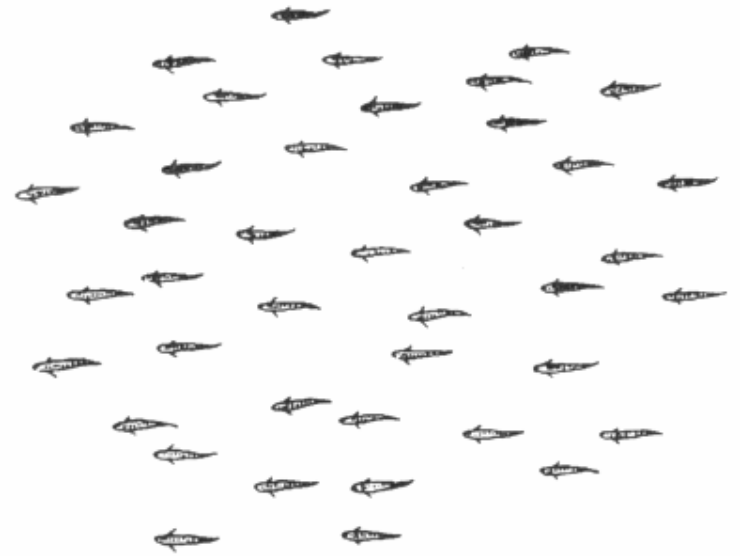
(c) 生態系

動物は多数の個体からな動物社会を形成している.

(d) 神経



人間の脳は 10^{10} 以上の神経細胞からなる世界で最も複雑な系である.



(e) 工学

自動車エンジン, 工場全体, 電力プラント

(d) その他

経済活動, 社会, 計算機

1. 2 自己組織化

散逸性を伴った自己秩序化(自己組織化)とは、熱平衡から遠く離れた不可逆性の構造をした系の相転移であり、ミクロな要素の非線形で複雑な協同現象からマクロな現象のパターンが生じる。その際、外部環境と散逸系との相互作用エネルギーは臨界値に達する。非線形性と散逸性とのバランスによって、このような創造構造の安定性が保たれる。いずれかが多くなりすぎると、この構造は崩壊する。

- ・ 相転移： 変化が狭い温度範囲で急激に起こる
秩序の異なる状態間を急激に移り変わる現象
物質の生成は対称性の破れで生じる。
- ・ 相： 内部で同じ均一な構造を持つ。水の気相，液相，固相

時間的： リズム形成， 空間的： パターン形成

[自己組織化の特徴]

- ・ 自発的, 自律的, 自生的, 自動的, 自然発生の秩序形成
- ・ 内発的ルール形成による自由かつ自制的構造
- ・ 自己統制系, 自己生成秩序, 自己組織的構造

[自己組織化臨界 (self-organized criticality)]

- ・ 相転移の臨界現象のアナロジー = 普遍的役割
- ・ 臨界状態における物質の系の振舞

[創発 (emergence)]

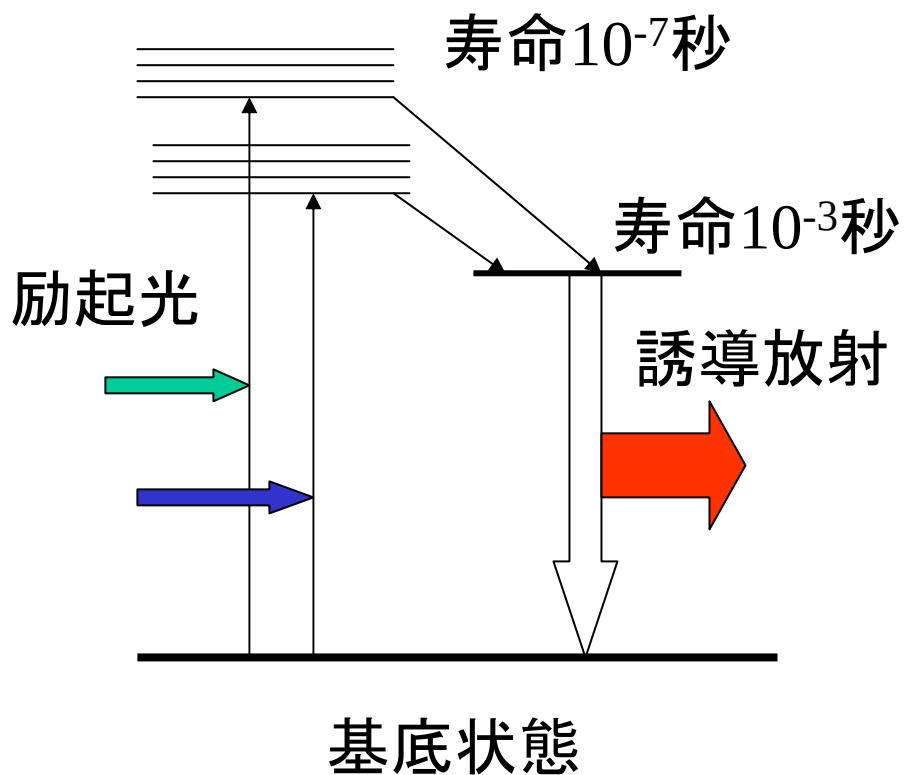
- ・ 下位レベルの構成要素間の局所的相互作用から上位レベルの大域的構造の出現
- ・ 複雑系 (非線形非平衡系) に特有な現象. 予期せぬ組織化, 構造化, パターンの出現

1. 3 自己組織化の例

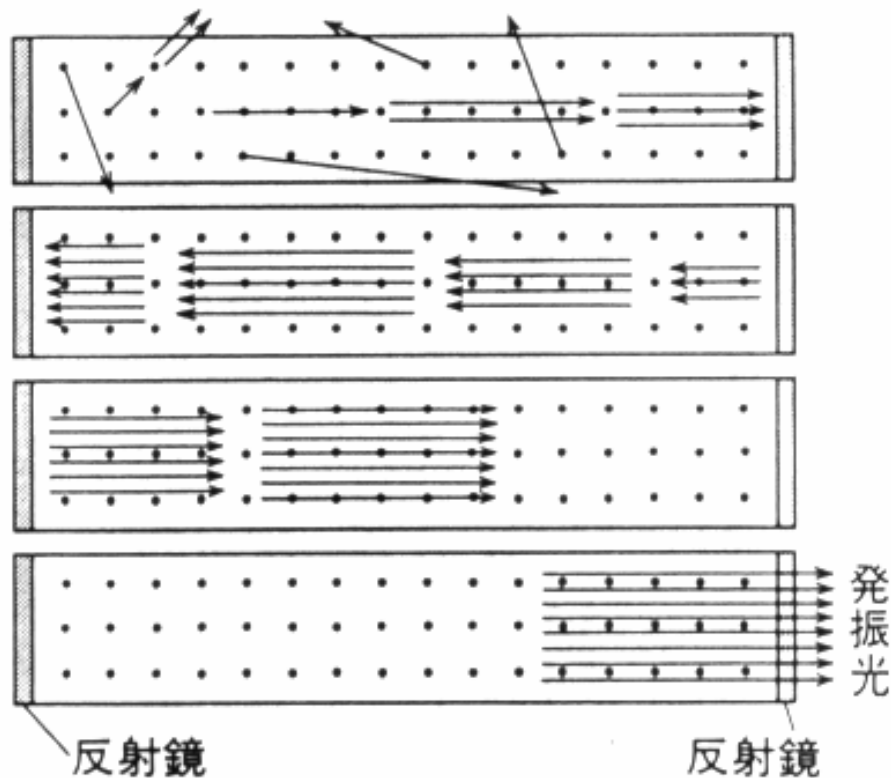
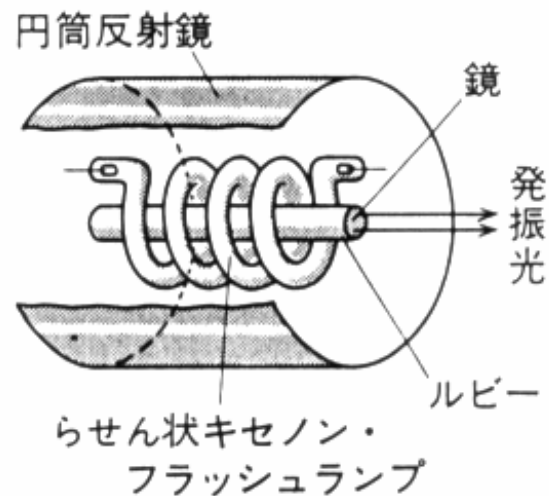
非線形複雑系は学際的で、多方面にわたり、「量子力学, 流体力学, 化学, 生物学, 経済学, 社会学, 神経学, 人工知能など」が挙げられる.

1. 量子物理学: レーザー(光子, 相転移)
2. 流体力学, 気象学, 地質学: テーラー不安定, ベナール不安定(相転移)
3. 化学: BZ反応(相転移)
4. 生物学: 生物分子, 生物細胞, 生物集団(相転移, 成長)
5. 経済学: 経済システム(市場のメカニズム)
6. 社会学: 社会(歴史)
7. 神経学(心理学): 脳(神経細胞, 認知)
8. 人工知能: ニューラルネットワーク(学習アルゴリズム)
9. 固体物理学: ガン発振器(パルス, カオス)
10. 機械, 航空宇宙工学: 座屈パターン, フラッタ
11. 電気, 電子工学: 非線形振動

(1) レーザー



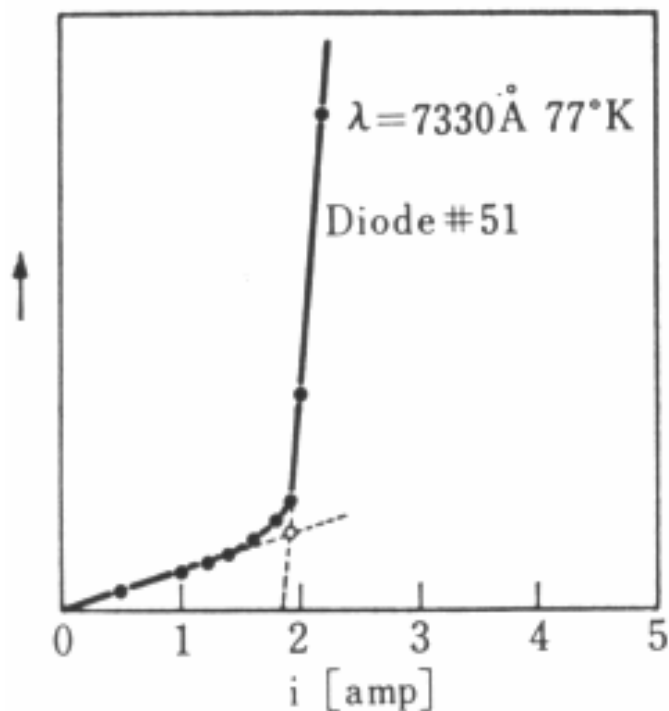
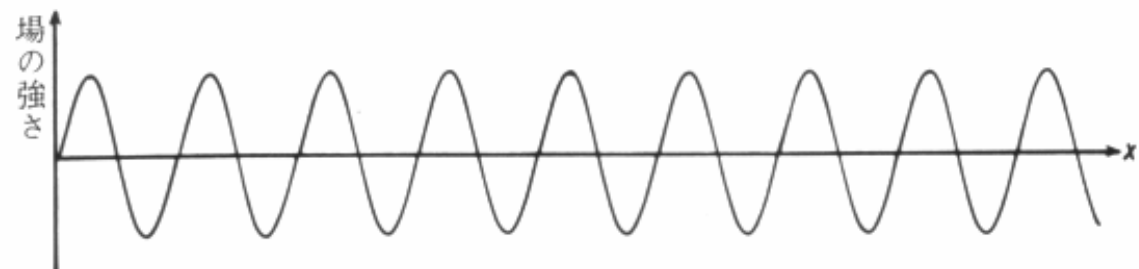
レーザー発振原理



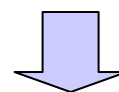
ランプから放出
された波



レーザーからの波

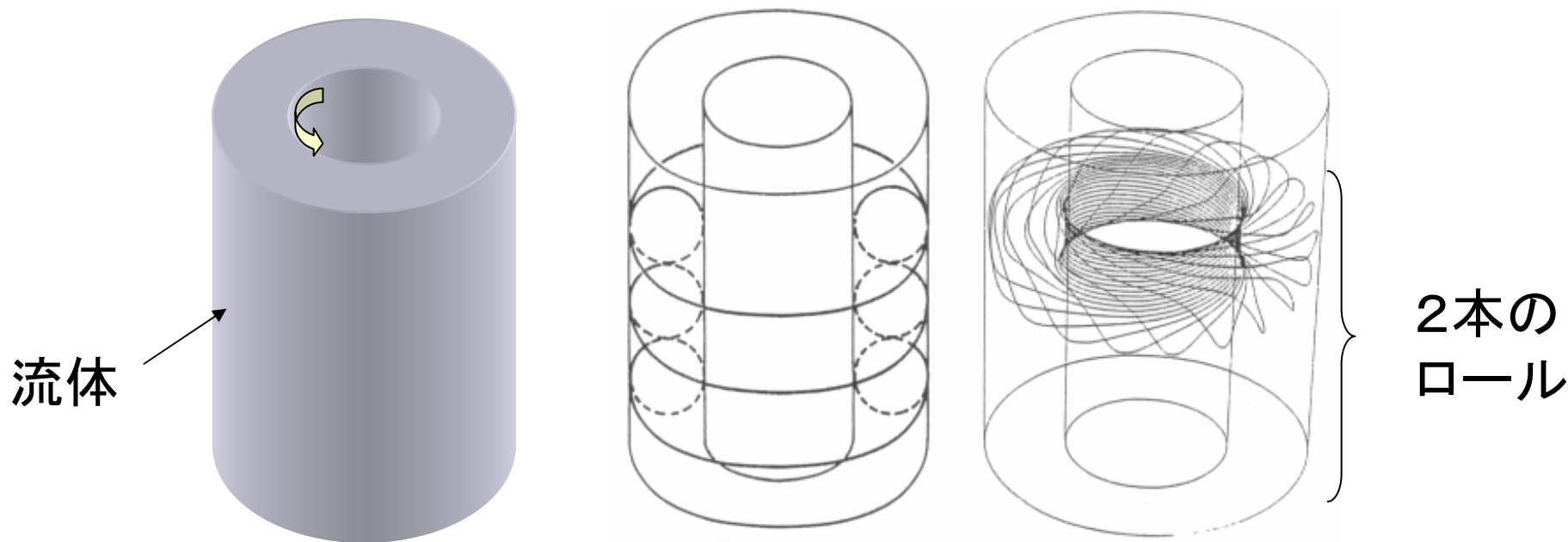


励起光が小さい場合： 光の長さ=3m
(ランプの働き)

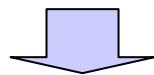


注入エネルギーが敷居値を越えたと
→ 新しい現象
長さ300,000kmの1つの巨大な波
= レーザー

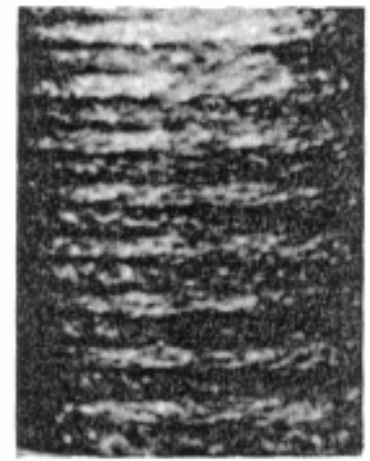
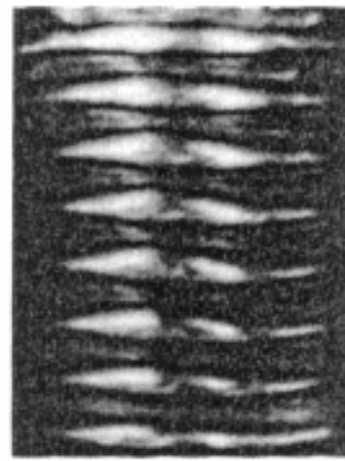
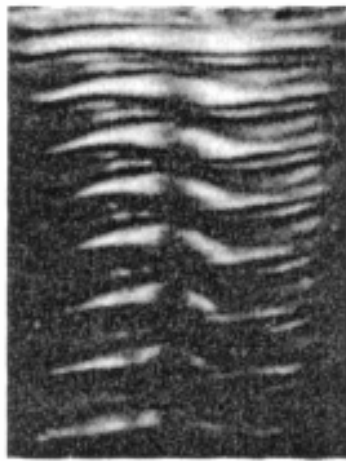
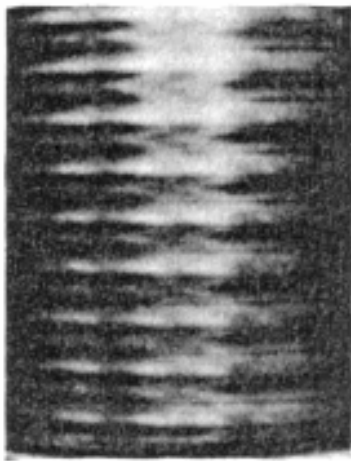
(2) テーラー不安定性 (流体の動的パターンの形成1)



低速回転： 同軸の流線 (摩擦により内側円筒がまわりの流体を流れさせようとする)



回転速度を増す： 新しい種類の運動＝ロール状の形態

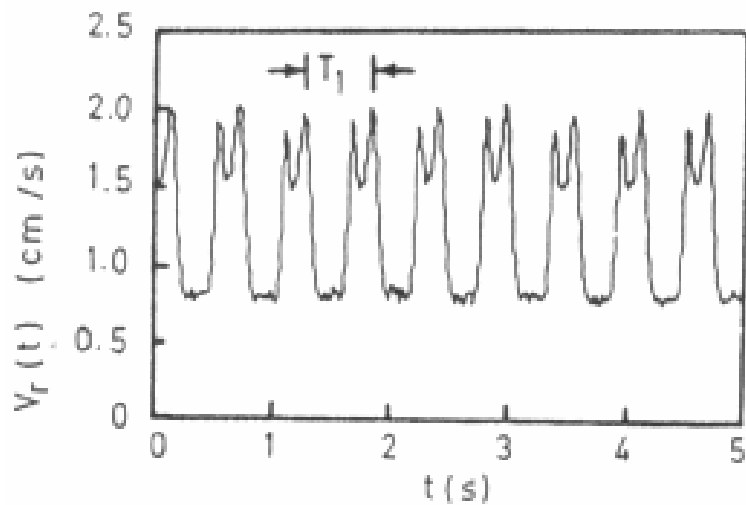


ロールの形成

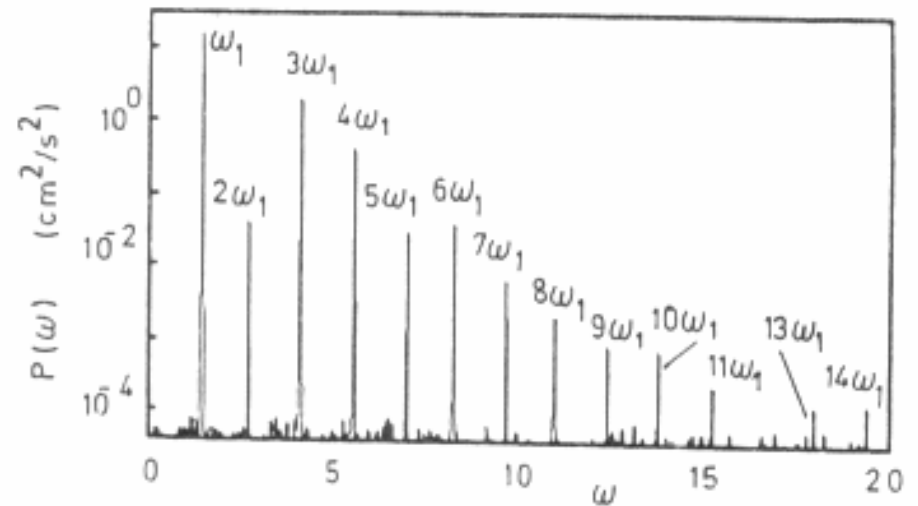
1つの振動

複雑な振動

カオス



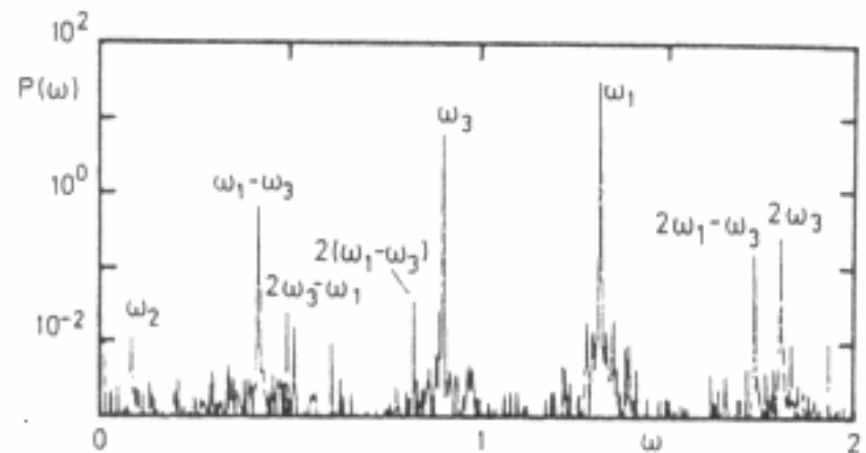
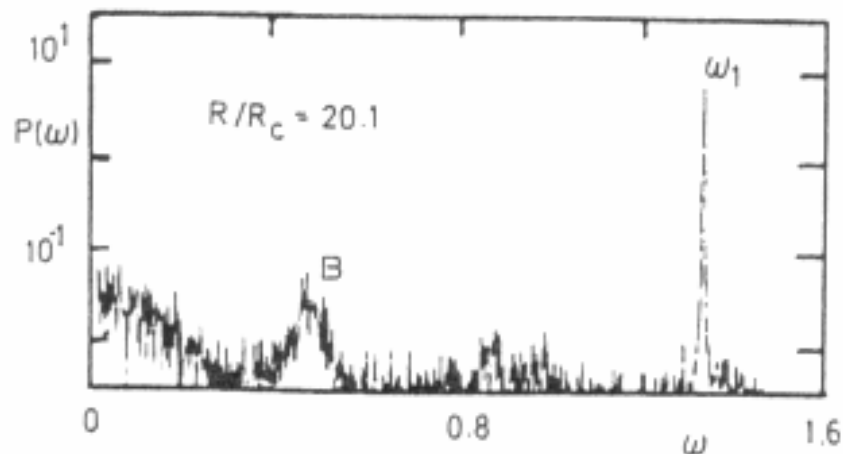
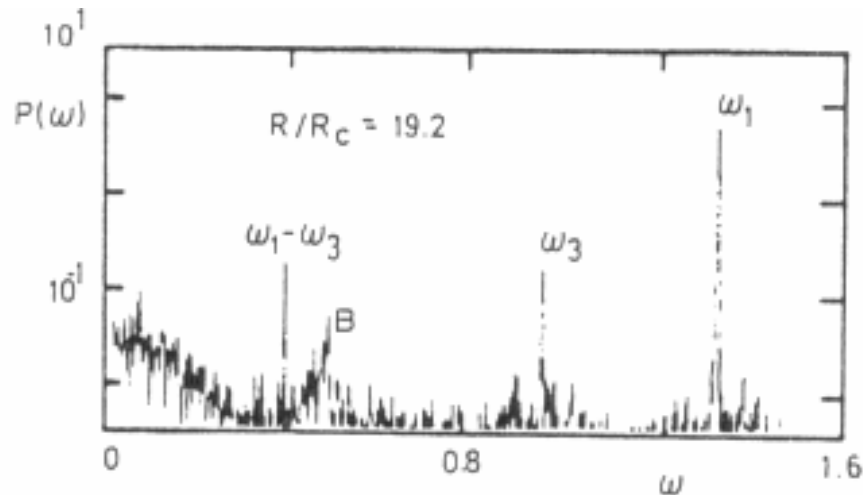
局所速度の半径方向成分
(レーザ・ドップラー流速計で測定)



左図のパワースペクトル
(周期倍増)

半径方向速度のパワースペクトル

基本振動数 ω_1 , ω_2 , ω_3 および
線形結合

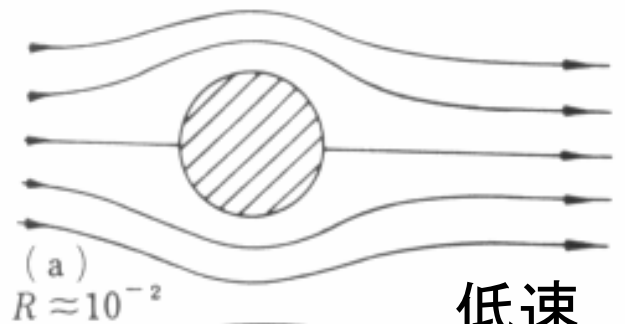


$R/R_c = 19.7 \sim 19.9$ で ω_3 の消滅

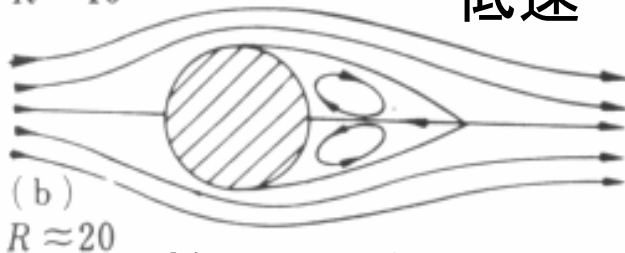
- ・ 自己組織化する系にとって特徴的な性質の出現
- ・ パターンの階層

(3) 円筒まわりの流れ

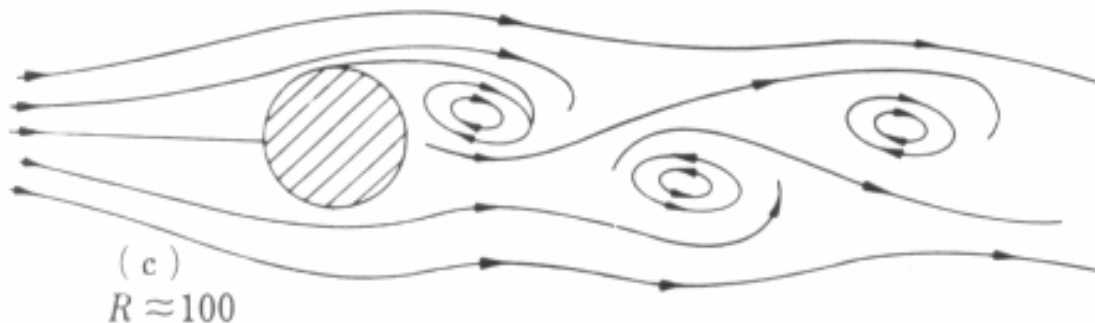
R = レイノルズ数 = 慣性項 / 粘性項



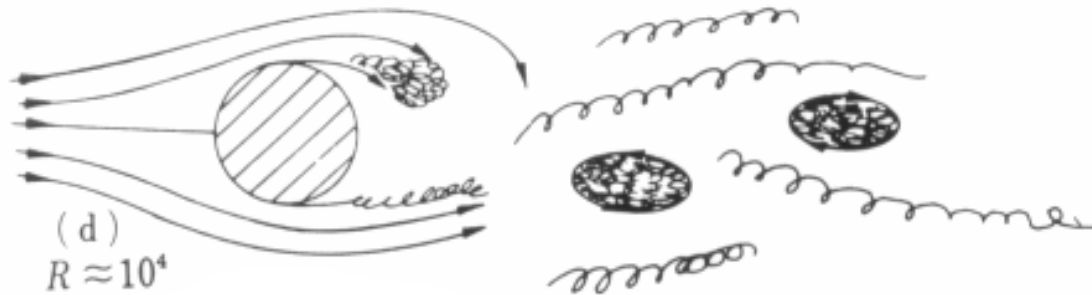
低速



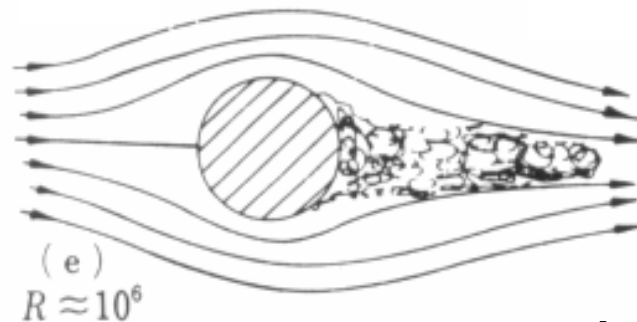
静的なパターン： 一対の渦



動的なパターン： 渦は振動を始める(カルマン渦)

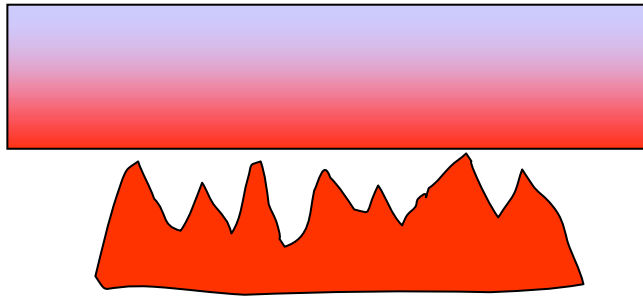


乱れ始める



乱流

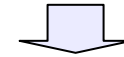
(4) ベナール不安定(対流不安定)



下から加熱

温度勾配が小さいとき

熱は伝導によって伝わり, 流体は静止



温度勾配が臨界値に達する

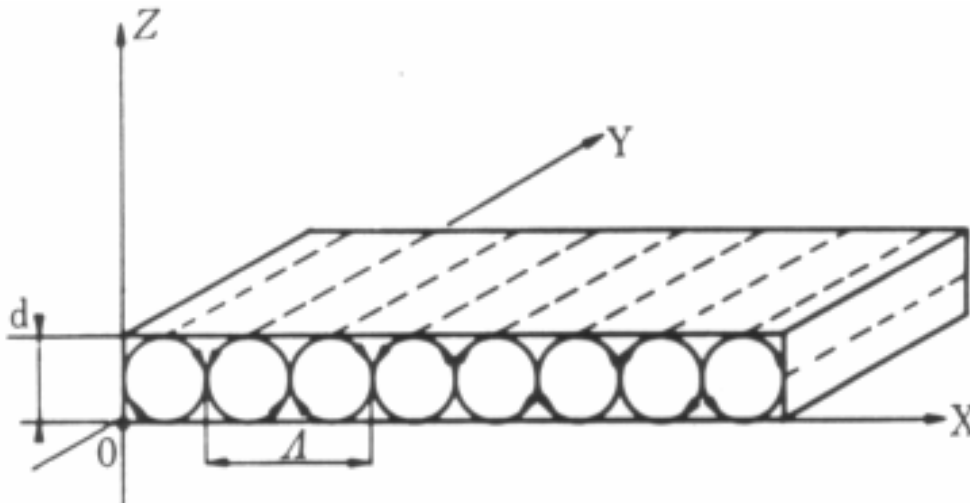
加熱された部分は膨張, 浮び上がり, 冷されて底へ戻る

規則正しい運動: ロール状または六角柱状
すなわち

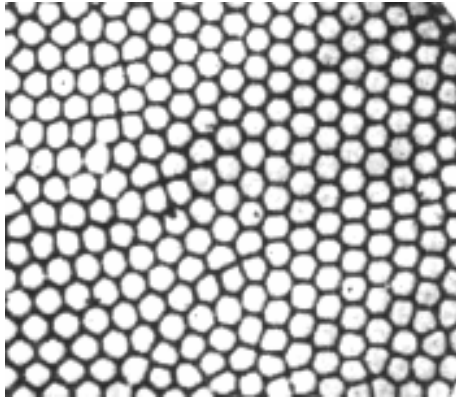
完全に均一状態



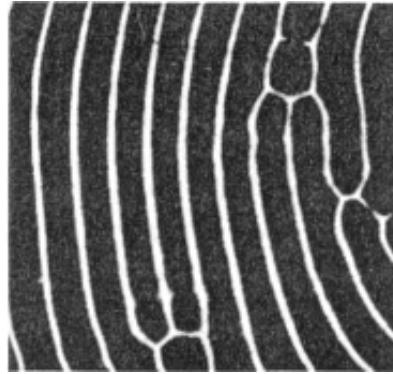
秩序を持った空間パターン



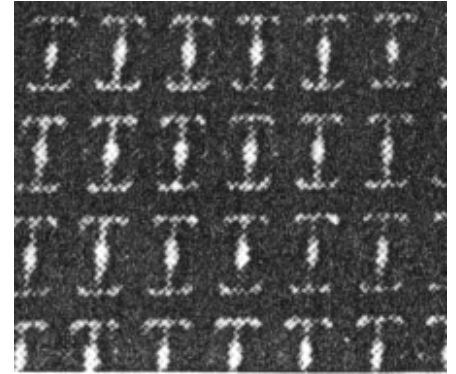
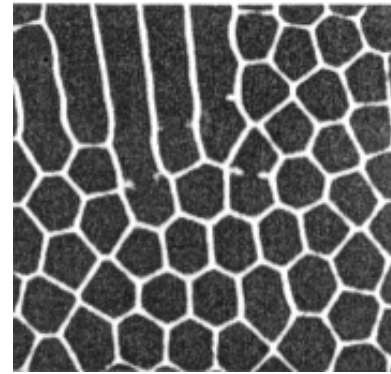
上から見た図



六角柱状



ロール状と六角柱状の混合

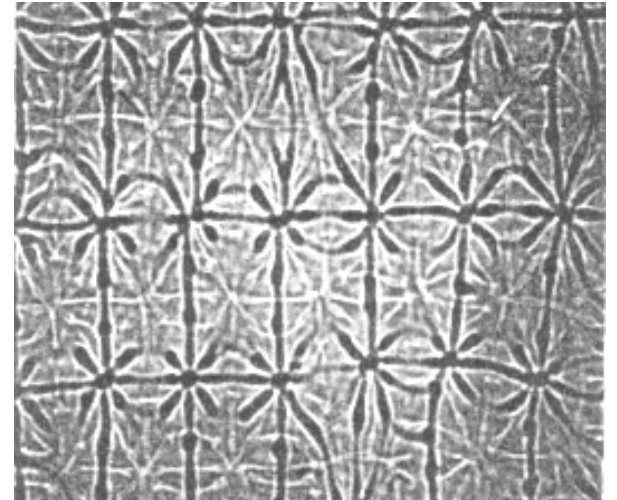


二組のロール

温度勾配がさらに大きくなり, 新しい現象

ロール軸に沿って波状の運動

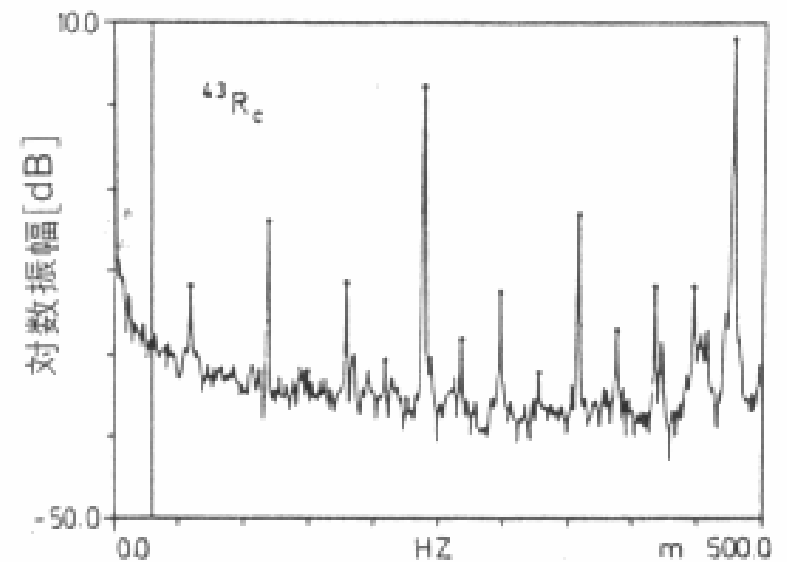
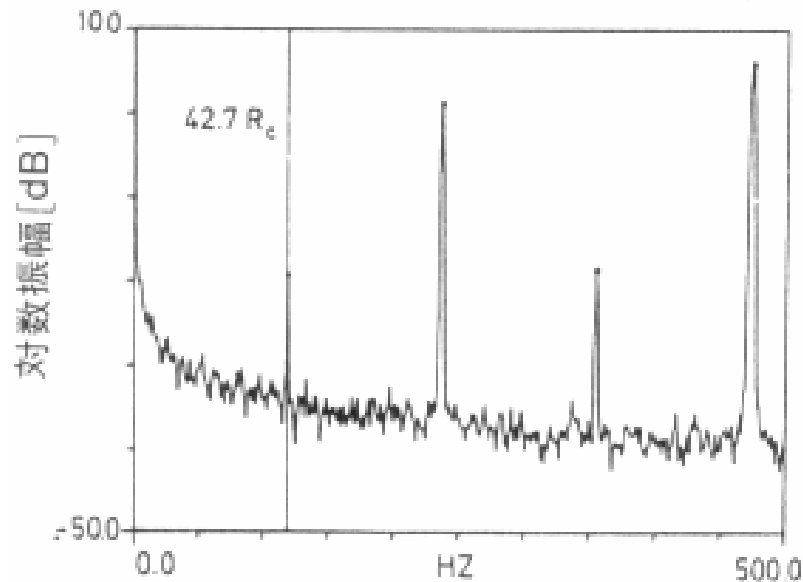
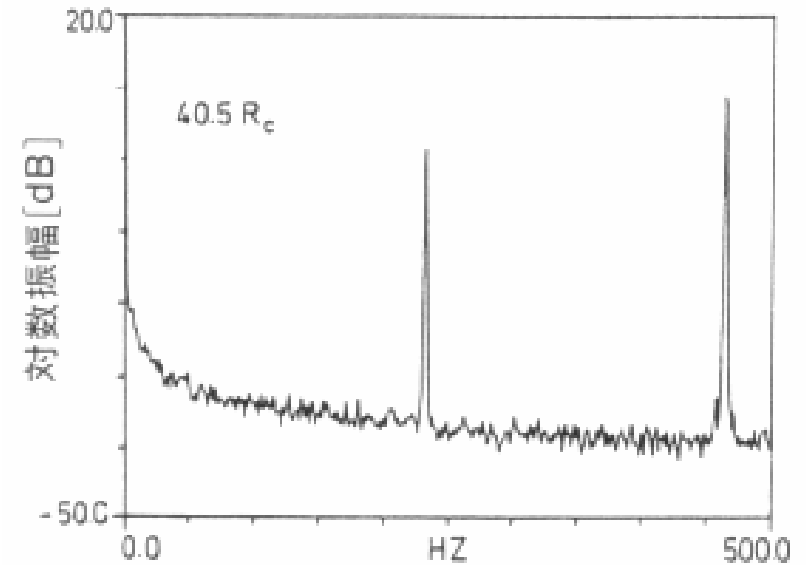
→ スポーク状のパターンが時間的に振動



- 周期倍増

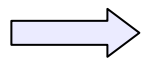
レーリー数(自然対流の尺度)を増すと, 決まったレーリー数で周期が繰返し倍増する.

ついに, 乱流またはカオスに至る



ベナール不安定 → 空気の運動, 雲の発生を決める.

テラー不安定, ベナール不安定
マレンゴ不安定(流体を上から加熱)



自動車, 航空機, 船などの動く物体のまわりの流体,
気体の運動に関連したパターン

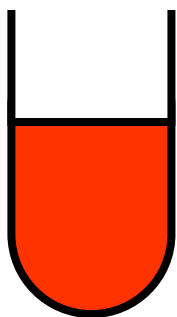


(5) Belousov-Zhabotinsky反応

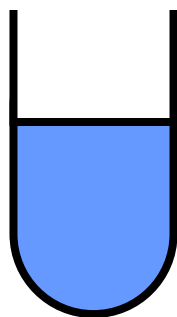
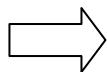
化学反応において、空間的、時間的または空間-時間的パターンが現れる多くの例があるが、その代表例

$\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$, KBrO_3 , $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$, H_2SO_4 にフェロイン (酸化還元指示薬) の2, 3滴を混ぜてよく攪拌する.

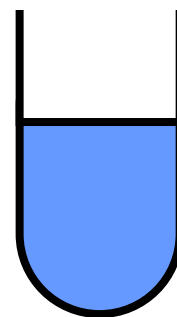
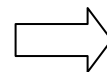
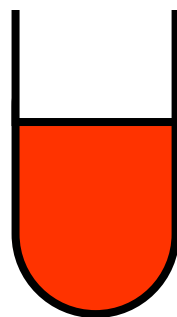
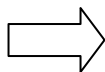
→ 周期的に色が変わ化(時間的パターン)



Ce^{3+} 過剰



Ce^{4+} 過剰



[空間的パターン]

平たいシャーレの中で反応させた場合波のパターンが時間とともに伝播, 最初は一定のリズムで
シャーレ全体で振動 → 最終的に空間パターン形成

- ・ **心臓**は開いた系であり, BZ反応に類似したパターンで拍動する.
不整脈による急死は, 同心円のパターンに類似した状態(定常的な拍動)から渦巻きパターンへの切り替わりが, 心筋において起こることに対応
- ・ 自然のパターン(植物, 動物の成長時にみられる空間パターン形成)について語る.

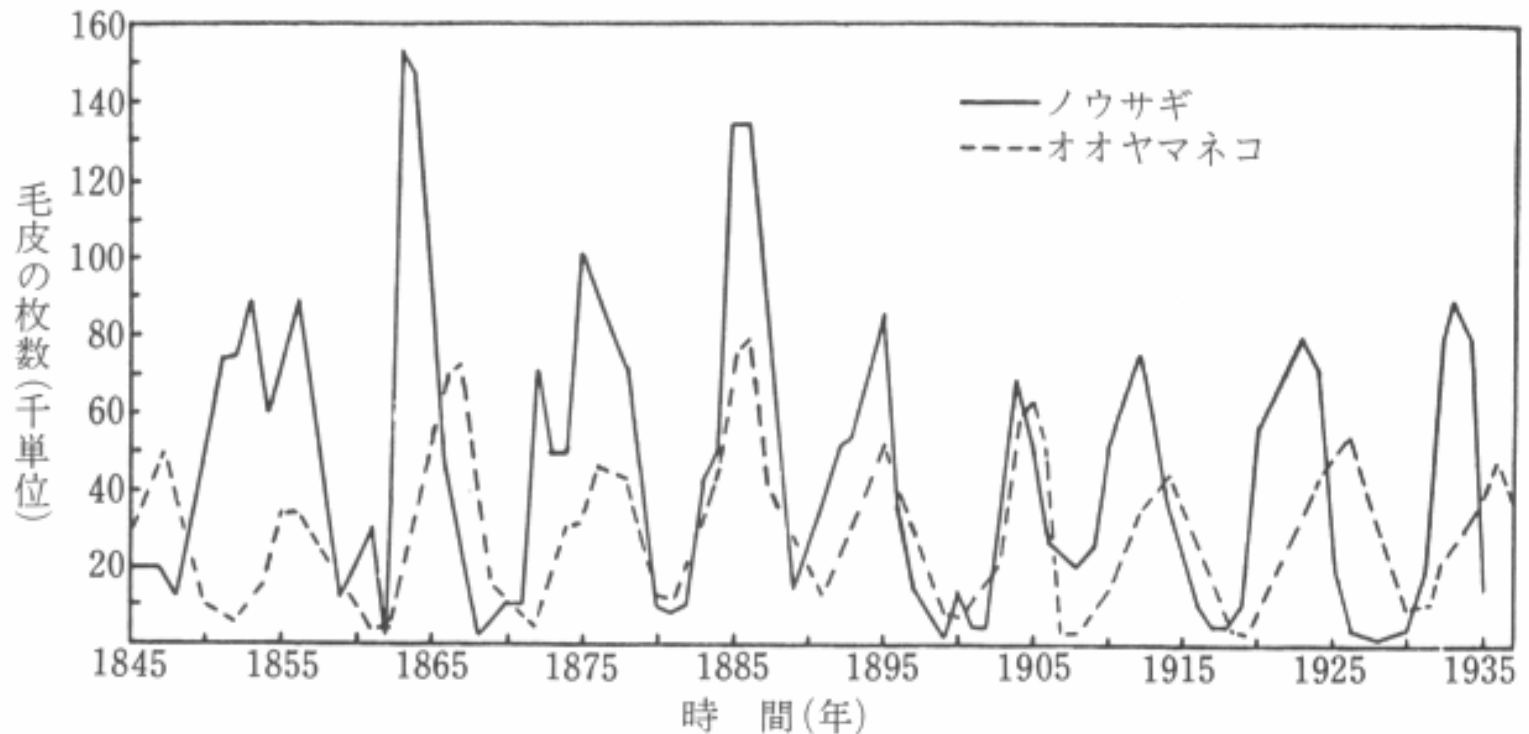
シマウマの模様
貝殻の縞模様



(6) 生態学(個体数動力学)

捕食動物のオオヤマネコと被食動物のノウサギとの間に見られる繁殖状態の時間的变化. アドリア海の漁業でも同様な振動が見られた.

ロトカ・ヴォルテラ方程式 $\Rightarrow$ ①安定なパターンに落ち着く, ②複雑な振動(リミット・サイクル), ③カオス的振舞



(7) 粘菌の生命サイクル

cAMP(cyclic Adenosin 3' 5' Monophosphate)の機構による振動
細胞性の変形菌(Dictyostelium disciodeum, タマホコリカビ目)

2つの異なった状態間の遷移

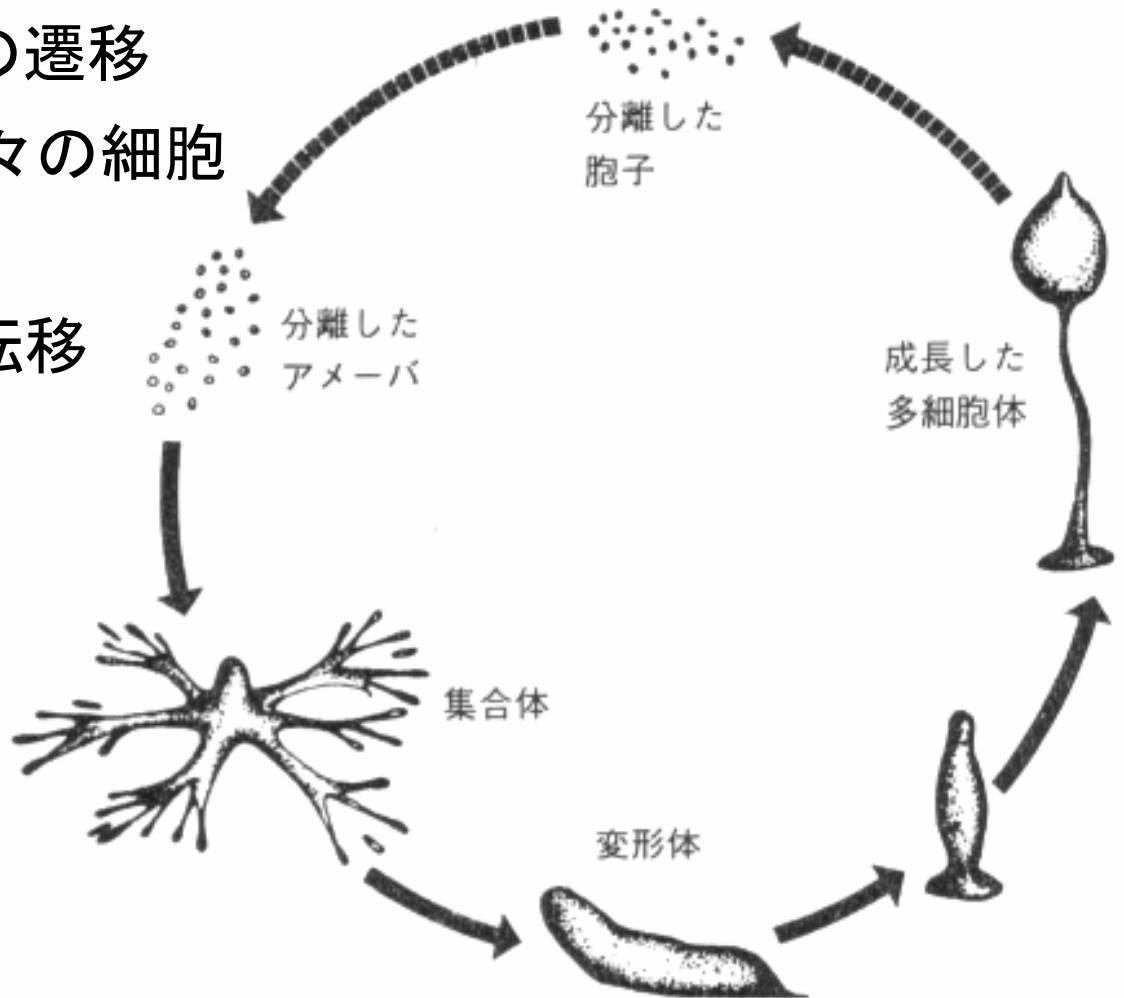
アメーバは独立した個々の細胞



餓死寸前で集合体に転移
→ 多細胞体

細胞凝集体

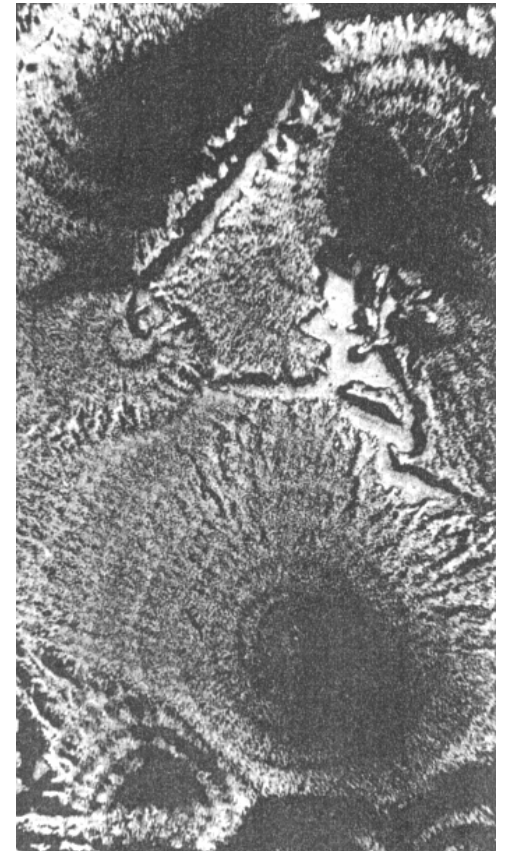
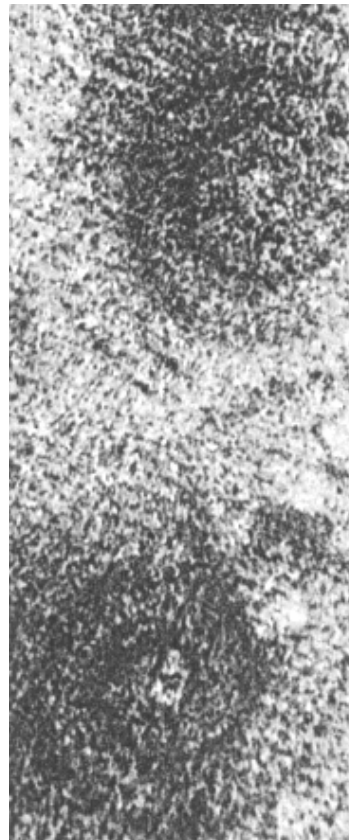
極体を作り, それぞれ
の機能体(孢子, 柄の
細胞)に分化, 協同する.



食物を絶たれたアメーバの個々は中心部から放出されるcAMPへの応答として、同心円状の波紋が集中するように中央部に集まる。

細胞集合プロセス＝不安定状態を経て実現される自己組織化

- ・ 制御パラメータ
餓死の臨界値に合わせた食物の供給



(8) 神経網の成長

知能の差： 脳の自己組織化の程度の差

脳の成長＝ 神経細胞同士の結合が密になる

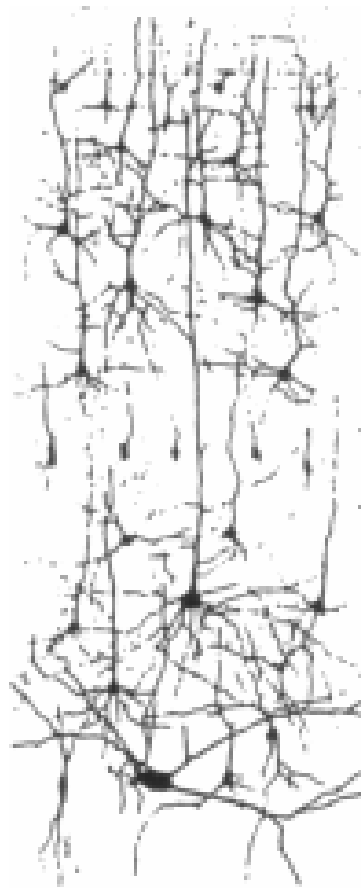
脳の重さ

生後直後 400 gr

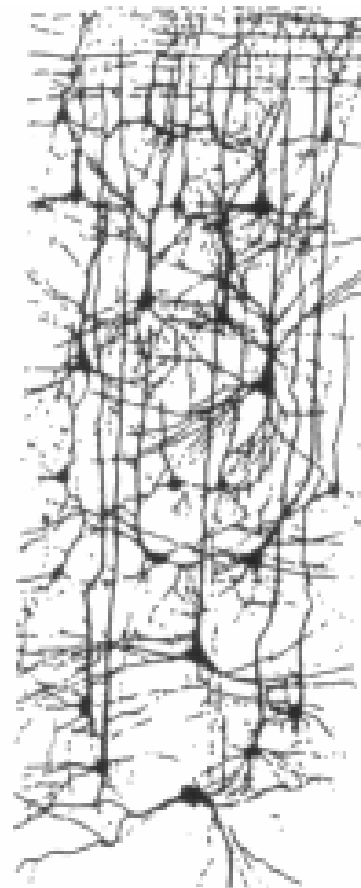
6ヶ月 800 gr

10才 1400 gr

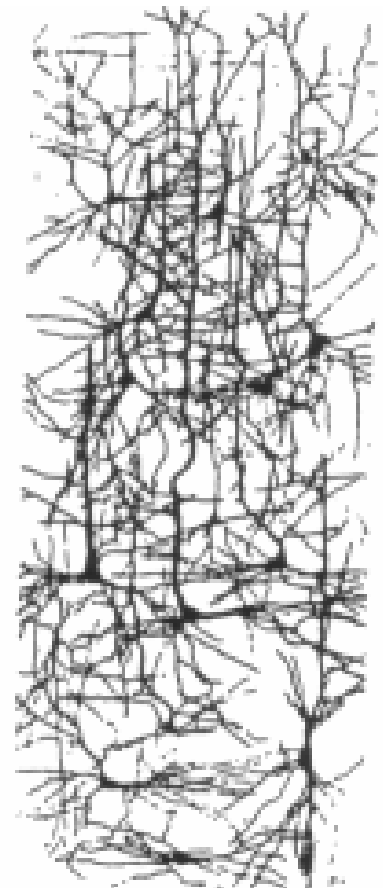
(大人と同じ)



生後3ヶ月



15ヶ月

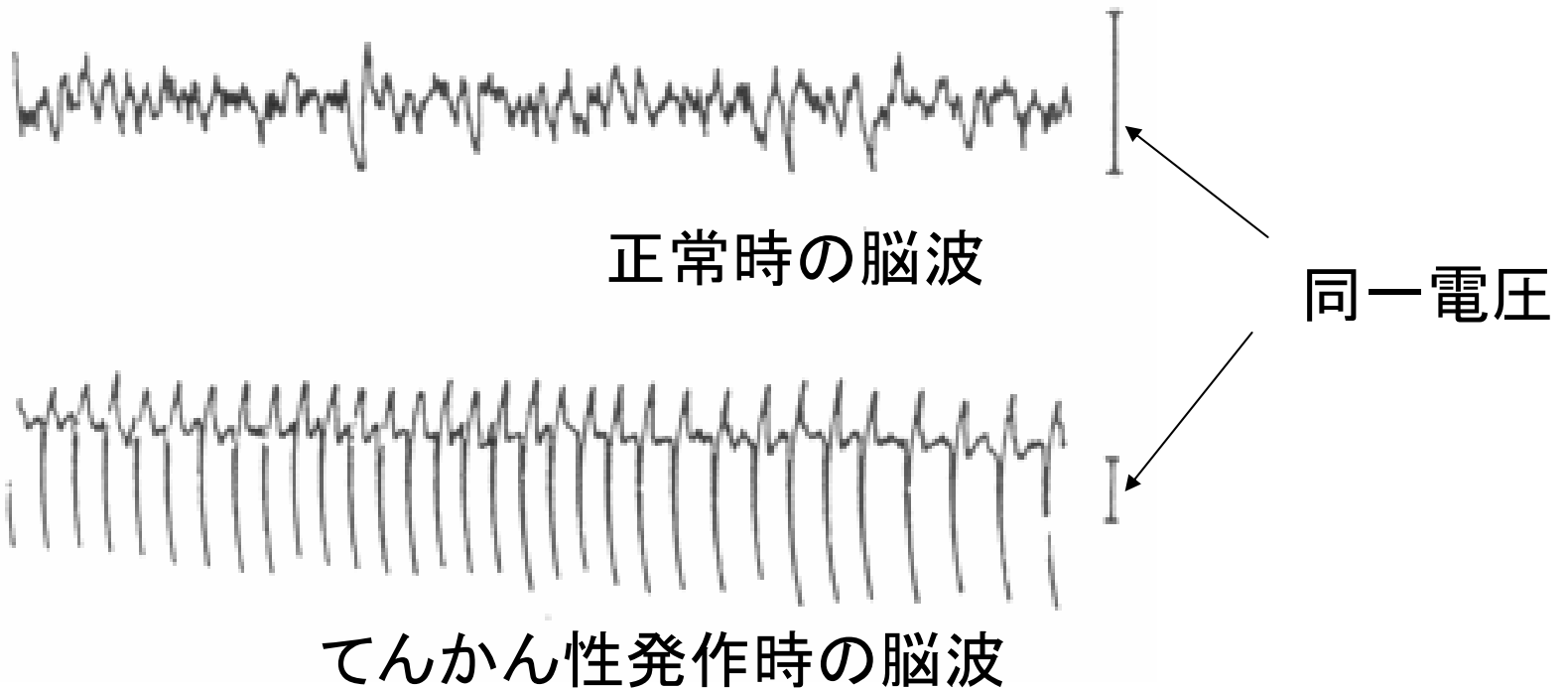


24ヶ月

(9) 脳波(生物における振動)

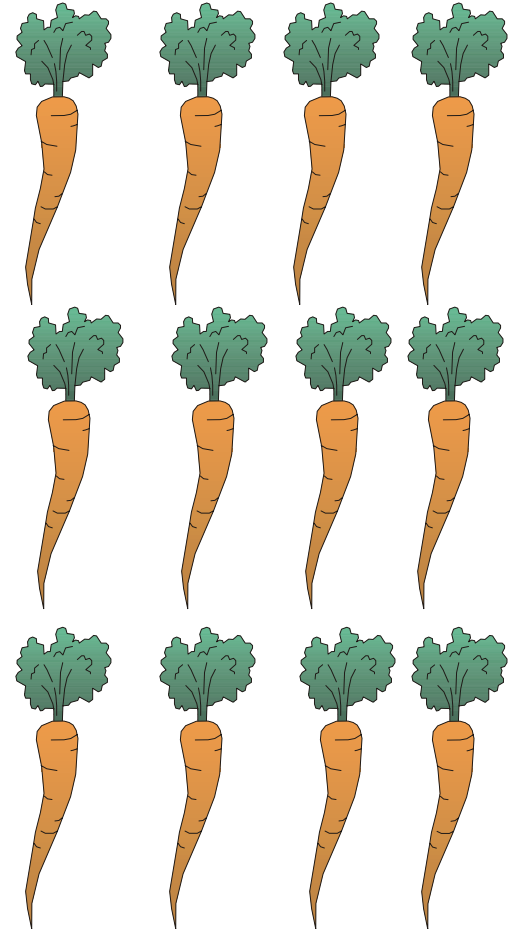
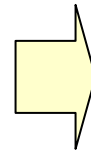
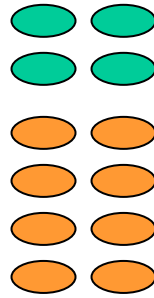
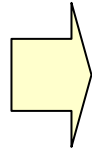
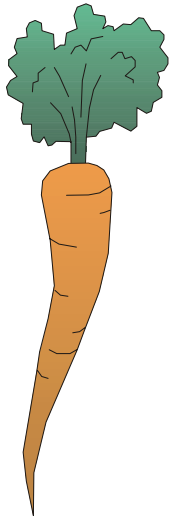
- 生物界は多種多様な高秩序, 高機能の構造
- 個々の部分に高度の協力過程

脳波(脳における電気振動)

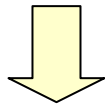


- 筋収縮, 電気魚の電圧の生成, パターン認識, 会話

(10) 形態発生



ニンジンを1つ1つの細胞に分割



どの細胞からも完全なニンジンを再生

- ・ 各細胞は完全な組織体を形成するのに必要な全情報を保持
ほとんど全ての多細胞生物のほとんど**全ての細胞が、同じDNA**
を含んでいる.

[未分化から分化]

分化に関する情報はもともと個々の細胞に与えられているのではなく、組織内の細胞は自分がどの位置で分化すべきについて、周囲のものから情報を得る.

位置の情報は、化学的な前駆パターンによりもたらされる. 局所濃度が十分高くなると、形質遺伝子が働き始め、細胞を分化させる.

細胞がそれぞれ異なっているのは、活性化される遺伝子が違うため

(11) 生物(生命)

生物学における大きな謎は、生命が生まれてきたことである。

生物の特徴の1つは生命圏を形成していることであり、その他として以下が挙げられる。

- ①入れ物を持ち、自他の区別が明示される。
- ②エネルギー、物質の交換という代謝を行い、自己維持を可能としている。
- ③自己が非自己を生成するという、自己複製を行い、成長し、子孫を残す。それは遺伝子、細胞、個体の各レベルで起こる。
- ④環境との相互作用の下に、変異と適応をし、進化する。

結局、多数の相互作用によって結合されたネットワークをつくり、生存を維持している。生命の本質は素材でなく、組織化のあり方にある。

分子の多様性が増加し、その複雑さがある閾値を越えた際に、生命現象が創発する。

生命は互いに相互作用している分子系の集団的な性質の上に成り立ち、全体として創発し、常に全体として存在し、全体の集団的・創発的性質の上に成り立つ。

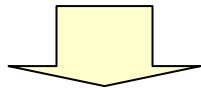
ゲノムのシステムは化学物質からなる複雑なコンピュータであり、それは逐次処理型のコンピュータでなく、多くの遺伝子や生成物が同時に活動する並列処理型の化学コンピュータである。

(12) 並列処理型化学コンピュータ(脳, 軸索)

[脳]

脳で思考するとき, インパルスで神経の信号が出される. それは, パルス状の活動電位の発生である興奮で起こり, 1つ1つの神経細胞が1個の発振器, すなわち, CPUとなっている.

神経パルスの固有周期は1m秒～数m秒で, コンピュータのクロック・ジェネレータ(1GHz)の1n秒～数n秒に比べ, はるかに遅いのであるが, コンピュータのCPU1個に対し, 脳ではCPUの数は 10^{10} 個である.



演算量は

コンピュータで $1/10^{-9} = 10^9$ /秒

一方, 脳では $10^{10}/10^{-3} = 10^{13}$ /秒

[軸索]

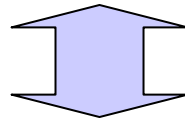
神経細胞の表面全体の至るところが発振器

↳ インパルスを歪めることなく、減衰もせずに伝える.

すなわち,

非線形発振器が結合

↳ 発振器同士が結合すると互いに同調しあい共同歩調



電気信号はR, C, Lにより歪み, 減衰する.

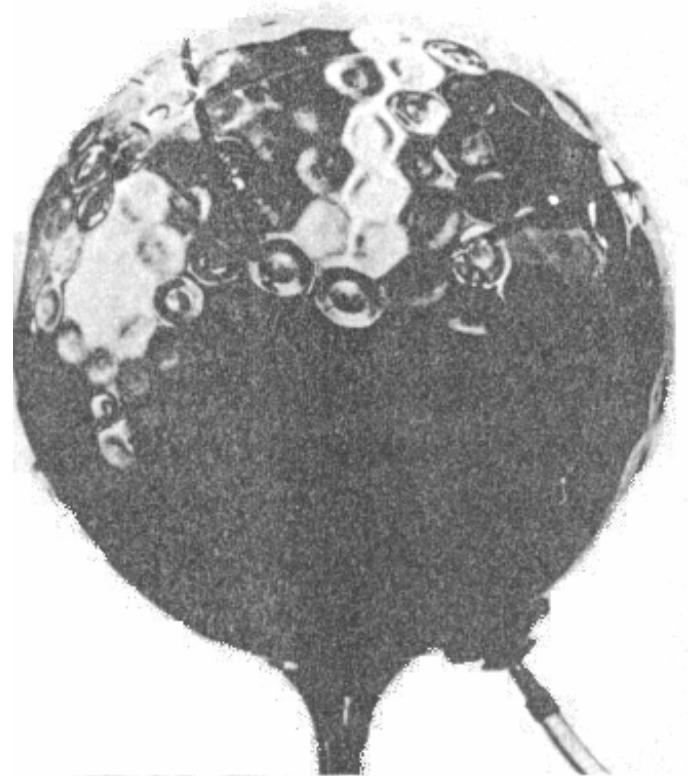
(13)座屈(機械工学)

外部パラメータの変化によって系に劇的な巨視的变化

内部が減圧された薄肉の
金属球殻にできる座屈パタ
ーン

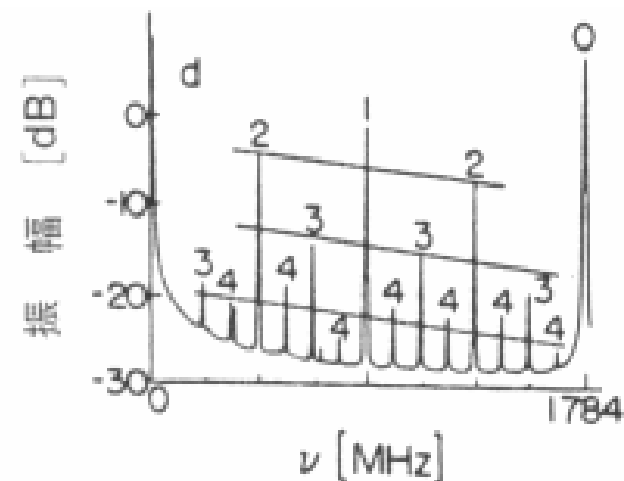
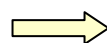
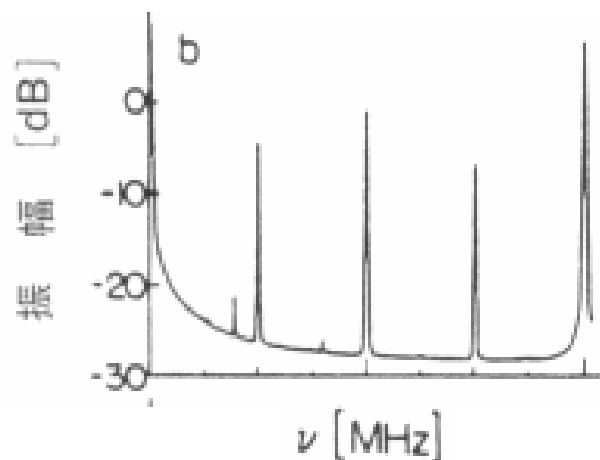
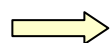
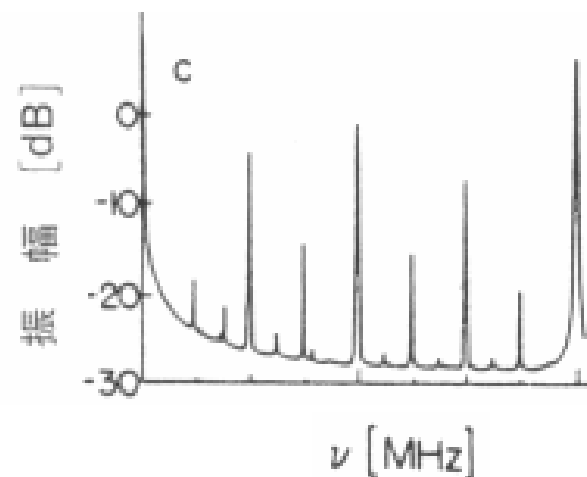
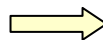
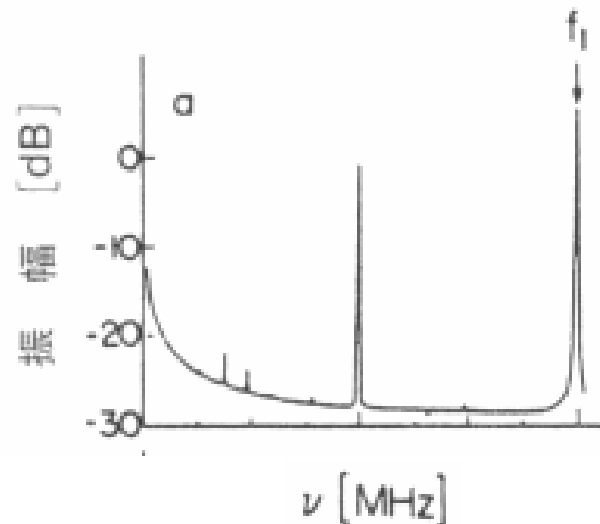
- 曲げ, 臨界荷重を超えた
橋梁の破壊

動的
航空機の翼のフラッタ



(14) 電子回路における非線形振動

- 幾つかの発振器を互いに結合 → 周期倍増の系列
- 非線形キャパシタンスをもつ電子回路のパワースペクトル



(15) 自己組織化に共通する特徴

- ・ 多数の部分系
- ・ 条件(制御)を変えると、系は巨視的スケールの新しい種類のパターンを獲得する.

[時間]

準周期振動, 単一の振動数, 多種の振動数, カオス

[空間]

蜂の巣構造, 波型, らせん型

質的に新しい巨視的構造をとるに至る自己組織化過程

1. 4 カオスの縁 (edge of chaos)

これまで示した自己組織化の例で分かるように、自己組織化のためには次の条件が課せられなければならない。

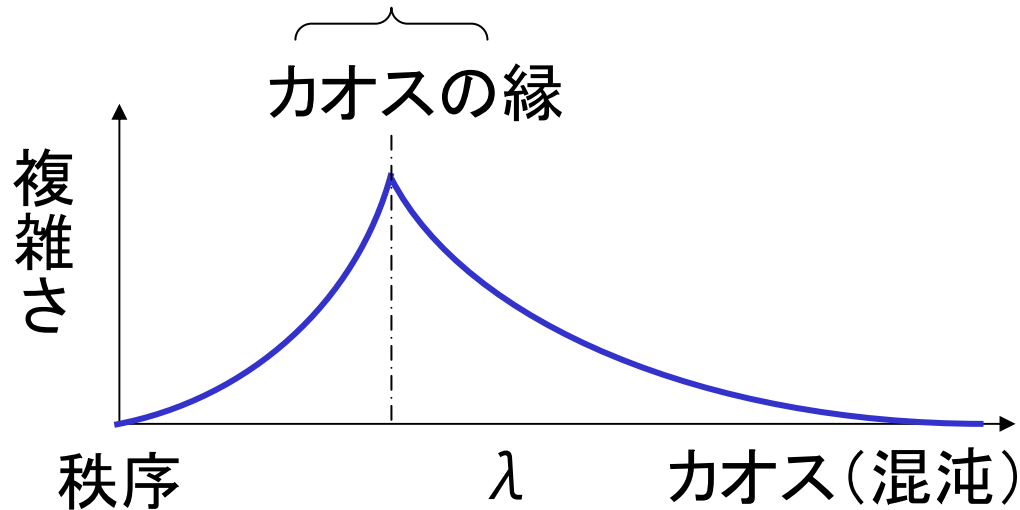
(1) 系の多様性が増加し、その複雑さがある閾値を越えた際に創発する。

(2) 一方、多様化が進みすぎて、流体における乱流のようにカオス(混沌)に至れば、構造化は不可能である。

カオス： 決定論的方程式から生じる不規則運動

カオスが着目されたのはローレンツが大気の大域的変動を定性的にシミュレーションしようとした時に見つけた現象に始まる。大気の熱対流運動を示す極度に簡略化した非線形連立微分方程式の初期値に始め0.506127と入力したが、次に出力桁数を考慮して0.506と入力した。両者の結果は非常に大きな差が現れた。バタフライ効果

複雑系科学が対象とする



λ : コントロール・パラメータ
オーダー・パラメータ
(振舞をコントロールする変数)

[カオスの縁]

あまりに静的な状態では情報が凍結

あまりに動的であると情報は途中で壊れてしまう

静的すぎず動的すぎず“カオスの縁”でのみ適度に保持され、
安定性と適度に伝達される流動性とが絶妙なバランスを保てる。

一步間違えばカオスの海原に飲み込まれ、反対では、凍結の地が待ち構えている。

ゲノムのシステムはカオスへ相転移する直前の秩序状態にある.

①凍結した秩序状態に深くはまりすぎると柔軟性が足りなくなり, 成長に必要な遺伝的活動の複雑な連鎖が調和的に働かなくなる.

②カオス状態に系が深くはまりすぎると, 十分に秩序化することができない.

→ カオスの縁

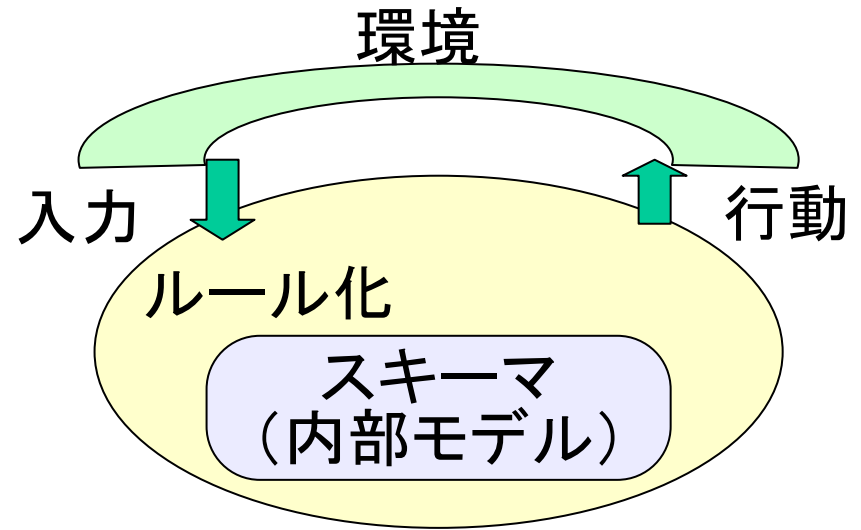
- 最良の探索を行うのは, 秩序と無秩序の相転移状態にある集団
- 革新性を宿しつつ安定性を維持する場所
- 生物のような高度に構造化された複雑な存在が, 混沌と安定の狭間にある危うい領域のみで成立

生命的な分子群: よく調整された情報処理の仕組を自然に獲得

生命の本質: 境界の部分, 必死にバランス

1. 5 複雑適応系

入ってきた情報からルールを抽出し, スキーマと呼ばれる内部モデルへ圧縮して, そのスキーマのもとに行動するシステム



生命性を排除し, 情報の入出力から生物を眺め, 進化, 学習するシステムや免疫システムなどを指す包括的概念

スキーマ: 情報から具体性を省いた一般的なルールだけを圧縮して保存. 遺伝子の集合, 結合の強さの組合せ

数値と*で構成された文字列

長さLのスキーマ(2進数)

$$(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_L) \quad a_i \in 0, 1, *$$

適応: スキーマの改善

1. 6 複雑系解析の概要

(1) 目的

すべての複雑な現象の根底にあり、その複雑性を生成しているメカニズムの解明により、複雑系を制御するための理論、技術の確立しようとする。すなわち、複雑系の基礎研究～複雑系の制御と応用を図る。

(1) すべての複雑な現象には何らかの共通な特性

(2) コンピュータでモデル化できる程度の単純な系から生成

複雑系科学はものでなく、手続き、仕組を対象とし、一方、数学的対象も関係の中のみで機能する。

コンピュータの中に抽象的モデルを構成し、そこにおのずと出現するパターンをもって複雑な現象の再現らしいと解釈する。

対象の仕組を知りたいのであり、対象そのものを知りたいわけではない。

対象の抽象的なモデル化＋コンピュータによるシミュレーション
現実の複雑な諸現象を読み解こうとするアナログカルな解釈
複雑系科学はアプローチの仕方も同時に研究することとなる.

(2) 複雑系科学解析の2つのアプローチ

複雑系解析のアプローチは大きく次の2つに分けられるが、
方法によっては両者を含む場合もある.

(1) 構成的方法

複雑系をコンピュータシミュレーションし、諸現象を解釈する.
ノイマン以来行われてきた各方法

(2) 非平衡非線形問題に対する相転移

秩序-無秩序相転移などを非平衡非線形系の分岐、安定性問題として扱う. ハーケンなどが行ってきた.

1. 7 構成的方法

ある対象を理解しようとするとき、その対象から抽出した特徴をもとにコンピュータ上に基本的なモデルを構成し、その全体の振舞を観察して構成モデルを修正し、理解を深めていく方法

工学的に用いられてきた手法であるが、科学的な理解の方法としても用いられるようになってきた。

世界の創造性を説明する単純なモデルを見つけ出し、コンピュータ・モデルで複雑さの創発を証明する。

複雑系科学に適用する場合、ノイマンらには“表面的な複雑さは深部の単純さから生まれる”の信念があった。

(1) 単純な数学的規則の組から、コンピュータは驚くほど複雑なパターンを生み出す。

(2) 世界は驚くほど複雑なパターン(=複雑系)に満ちている。

(3) 複雑な現象は、コンピュータの助けを借りれば、見つけることができる。

大問題(生命の起源, 多細胞生物の起源)に適し, 人工生命の戦略とも共鳴し, コンピュータ・シミュレーションは“遊び”に似てくる.

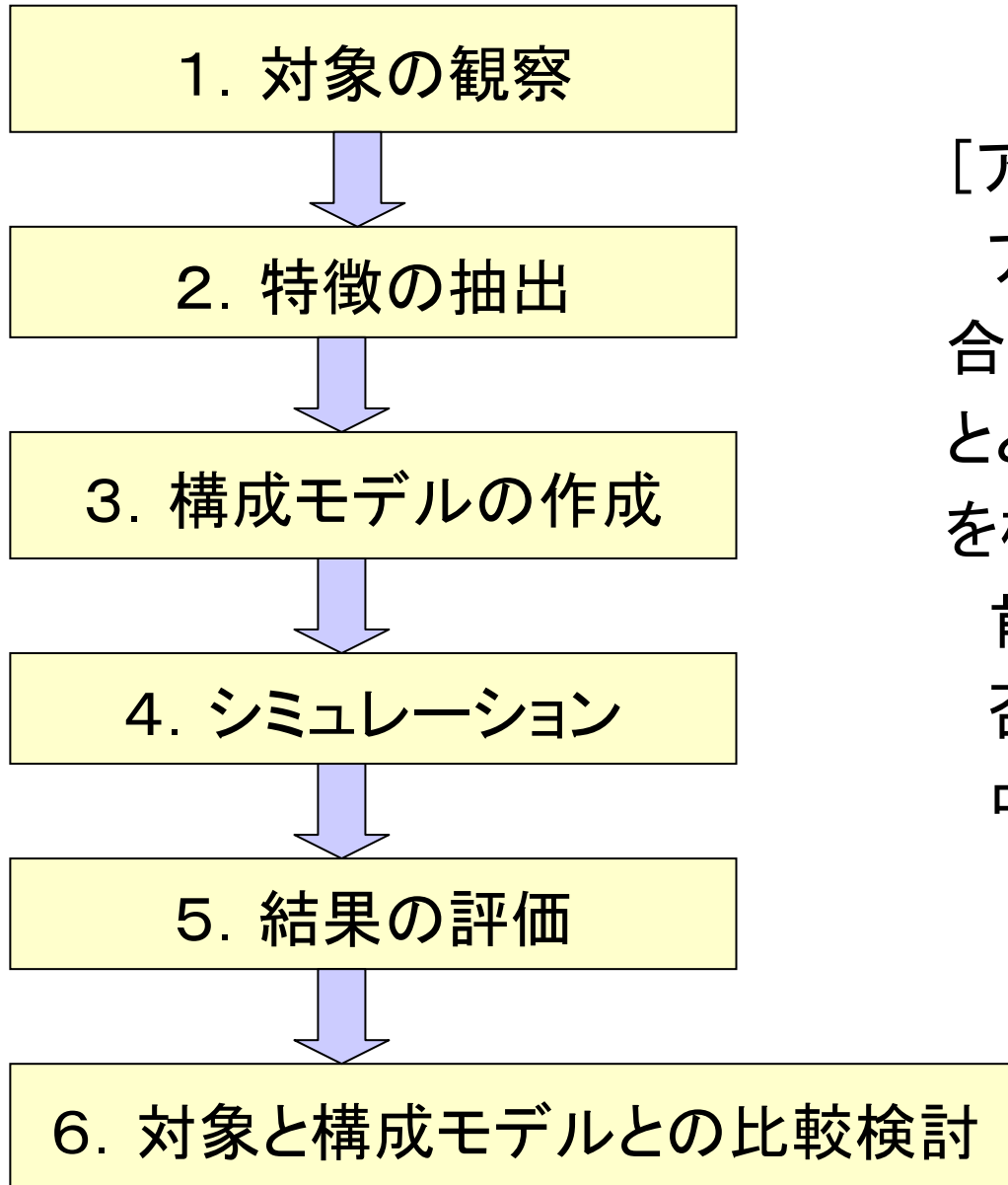
構成的方法＝「シミュレーション」＋「アナロジー」

構成モデル: 実際の対象がよくわからないとき, 構造を想像して組み立てられたモデルであり, 仮設的モデルであり, 実際の対象を完全にモデル化したものである保証はない.

したがって, シミュレーションを通してモデルの妥当性を検討する.

モデルの修正 ⇒ シミュレーションによる同定

[シミュレーションによる同定の手順]



[アナロジー]

アナロジーを適用する場合には、対象のどのレベルとどのレベルを比較するかを検討する。

肯定的(類似性)

否定的(異なる部分)

中立的

1. 8 非平衡非線形問題に対する相転移

(1) 解を具体的に見る方法

相空間における軌道, 流線

アトラクタ, 結節点, 焦点, リミット・サイクル, 3次元多様体
ストレンジ・アトラクタ(カオス的アトラクタ), 分岐

(2) 分岐

①結節点→結節点, ②焦点→リミット・サイクル(ホップ分岐),
③リミット・サイクル→リミット・サイクル, ④トーラス→トーラス

(3) 非平衡相転移(ゆらぎの効果)

(4) 空間的パターンの発達

(5) 離散写像(ポアンカレ写像), ノイズを含んだ離散写像

(6) 自己組織化: 制御パラメタ, 要素数, 過渡現象

(7) 非線形確率微分方程式