

放送大学面接授業8 自己組織化 編

粘菌も自己組織化する

生命や自然界は
なぜこんなに神秘的なのか？



生物にとって自己組織化とは何か—群れ形成のメカニズム—
2009 Scott Camazine (著), 松本 忠夫, 三中 信宏 (翻訳)

粘菌も活躍する新しい科学

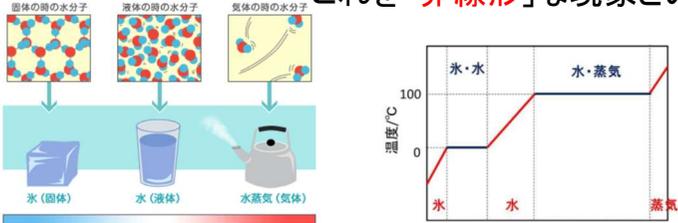
意志を感じざるを得ないような
生き生きとした自然現象
これまでの科学とは異なる視点から
明らかにしようとする

→ **非線形科学**
自己組織化の科学



非線形科学とは

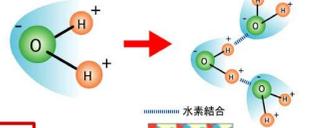
たとえば 水 (氷・水蒸気)
温度や圧力による**相転移**は
直線的 (=線形) でない
これを「**非線形**」な現象という



気圧によって変わる

水の分子は電気力で引き合う

水分子H₂Oの Hが+
Oが-の電気を帯びている



引力 > 分子の運動エネルギー → 氷
引力 ≤ 分子の運動エネルギー → 水
引力 < 分子の運動エネルギー → 水蒸気

= 熱エネルギー

液体の水は 内部からの引力が強い
→ **表面張力**



弱い引力でも 超大量の分子が

水分子一個一個の引き合う力は 弱いけれど...

一滴の水0.05 mL=0.05gには 1.67×10^{21}
=1670000000000000000000分子がある



水の分子が多数あれば 協同現象で **強い力**に

水の分子が地球レベルで
とんでもない行動を



自己組織化とは

システムの下位レベルを構成している多くの要素間の相互作用に基づいて

その全体レベルでのパターンが **創発**する



非線形現象としての **自己組織化**

まるで目的をもって

自律的に形 (**パターン**) を
形成したり

動き (**リズム**) を生成したりする現象



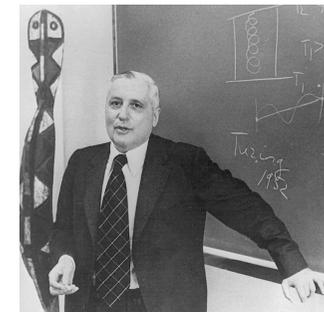
ノーベル化学賞のプリゴジンが

散逸構造理論

非線形科学の **パターン形成** の例として

細胞性粘菌 の生活史を示している

その後も **粘菌** が生物における **自己組織化** の例として盛んに示されるようになる



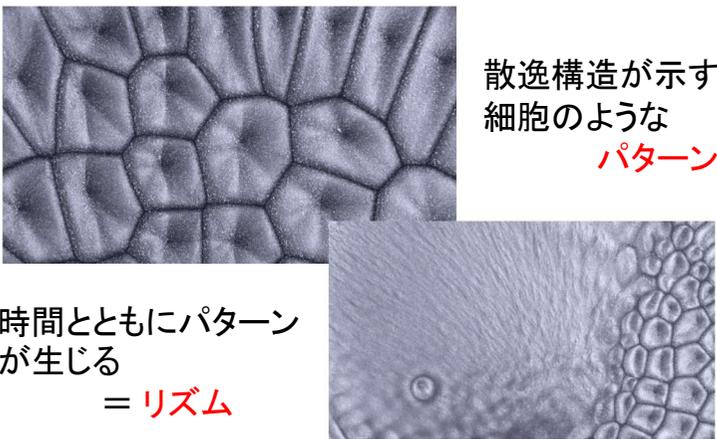
イリヤ・プリゴジン (Ilya Prigogine 1917年1月25日 - 2003年5月28日) は ロシア出身のベルギーの化学者・物理学者。非平衡熱力学の研究で知られ散逸構造の理論で1977年のノーベル化学賞を受賞

みそ汁のベナール対流



散逸構造 → 熱力学的に平衡でない状態にある開放系構造
エネルギーが散逸していく流れの中に
自己組織化のもとで発生する 定常的な構造

油によるベナール・セル

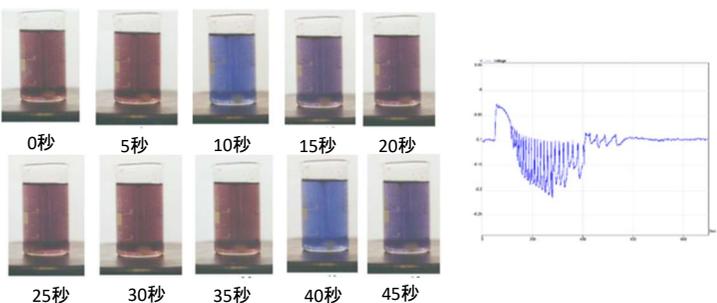


散逸構造が示す
細胞のような
パターン
時間とともにパターン
が生じる
= リズム

ベロウソフ・ジャボチンスキー反応

$$5\text{HOOCCH}_2\text{COOH} + 3\text{BrO}_3^- + 3\text{H}^+ \rightarrow 3\text{HOOCCHBrCOOH} + 2\text{HCOOH} + 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$$

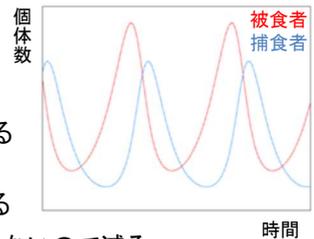
赤と青の化学反応が 周期的に起こる = リズム



生じた化合物が次の化学反応を触媒する → 反応が長く継続

周期的な化学反応を説明

数学者ロトカとヴォルテラは 生物の現象で説明
自然界の被食者と捕食者の個体数の増減が 周期的
であることを方程式で示す



- 草原にウサギとキツネがいる
- ウサギが増えるとそれを食べてキツネが増える
- キツネが増えると多く食べられたウサギは減る
- ウサギが減るとキツネも食べられないので減る

BZ反応も 2つの化学反応 (青くする反応と赤にする反応) が互いに触媒しながら起こっている

BZ反応を平らな皿で見ると

この実験が平らな皿で行われた場合 同心円やらせんの形の周期的なパターンができる



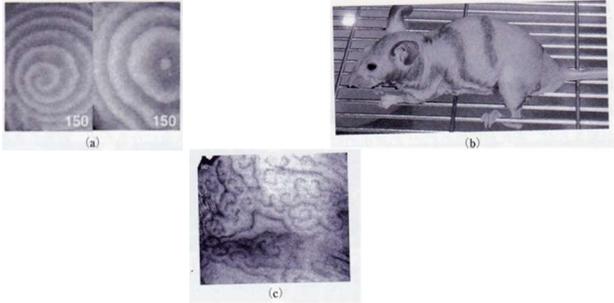
BZ反応はらせん波になる場合も

同心円状の波
↓
らせん状の波

この違いが重要な意味を持つ場合も

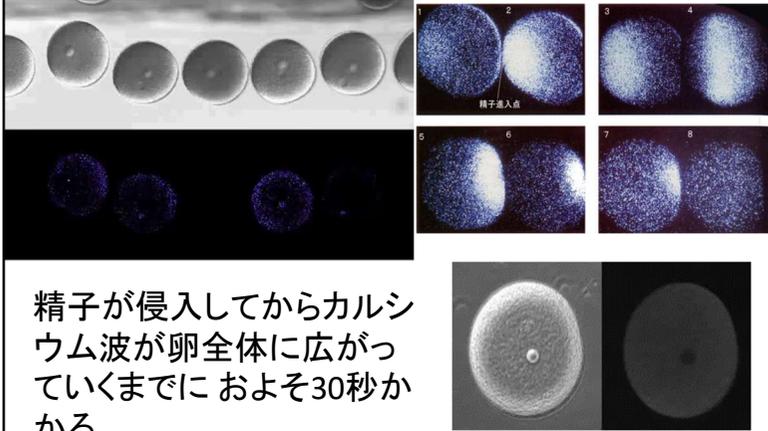


らせん波や同心円波をつくる生命現象



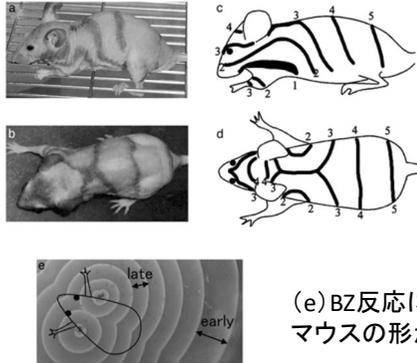
- a. アフリカツメガエルの受精卵に発生するカルシウム波
- b. マウスの毛周期がつくるパターン
- c. 巡回性紅斑によって人の皮膚にできたらせんパターン

受精のカルシウム波の動画



精子が侵入してからカルシウム波が卵全体に広がっていくまでにおよそ30秒かかる

マウスの毛周期がつくるBZ反応パターン



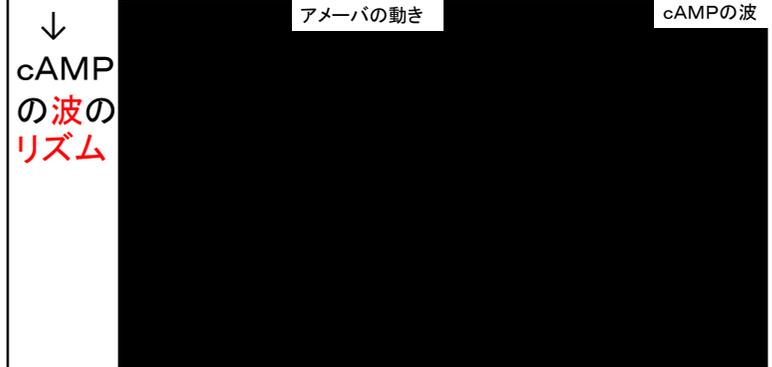
(a, b) 成体マウスの側面図および上面図
 (c, d) 成体マウスにおける典型的な波の動きの略図
 各行の数字は波の時間経過を表す
 数値間の時間間隔は30日
 (e) BZ反応によって形成される進行波
 マウスの形が重なる

Suzuki, N., Hirata, M., & Kondo, S. (2003). Traveling stripes on the skin of a mutant mouse. Proceedings of the National Academy of Sciences, 100(17), 9680-9685.

細胞性粘菌の集合の信号

粘菌アメーバを集合させるcAMPの信号は **らせん波**

→ cAMPという物質の **拡散と分解** が時間差で



映画になった天才数学者 **チューリング**

アカデミー賞®
<作品賞>他 8部門ノミネート

作品賞/主演男優賞 (ベネディクト・カンバーバッチ)
 助演女優賞 (キーラ・ナイトレイ) / 監督賞 / 脚色賞 / 編集賞 / 美術賞 / 作曲賞

映画「イミテーション・ゲーム〜エグニマと天才数学者の秘密」

チューリングは知っていた 🍏

アラン・チューリングは自殺する2年前 1952年に **生物学の唯一の論文** を発表した

→ 生物体の模様などの **形態形成** を
 化学反応で説明



自発的に生じる空間的パターン (**反応拡散系**)
 → でも 当時 は た だ の 理 論

コンピュータの発達でチューリング再評価

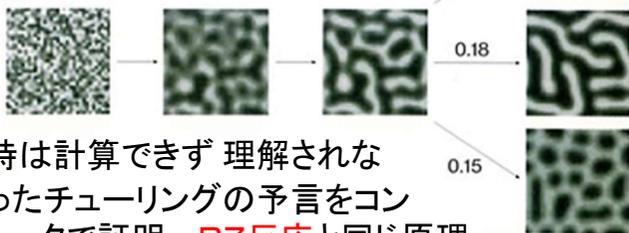
チューリングは反応に対する**自己触媒物質**と**抑制物質**の生成速度の差をパラメーターとした

$$\frac{dA}{dt} = c_1A + c_2I + c_3 + D_A \nabla^2 A - g_A A$$

$$\frac{dI}{dt} = c_4A + c_5 + D_I \nabla^2 I - g_I I$$

$(c_1A + c_2I + c_3)$
の上限

= 0.25



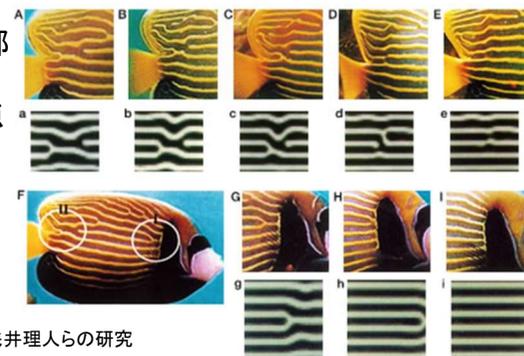
当時は計算できず理解されな
かったチューリングの予言をコン
ピュータで証明 **BZ反応**と同じ原理

チューリングの反応拡散系と生物の形

タテジマキンチャクダイのIIの部分の模様は成長とともに
A→Eのように変化 中央の部分で4本の縞が5本に

a→eは、そのコンピュータ・シミュレーション

GからI (FのIの部
分を観察)では
2本の縞の分岐点
が次第に頭の方
向へ移動



京都大学 近藤滋・浅井理人らの研究

細胞性粘菌カビモドキ属の形態形成

特徴は輪生の枝分かれ

この**パターン**はどのように？

シロカビモドキ
Polysphondylium pallidum

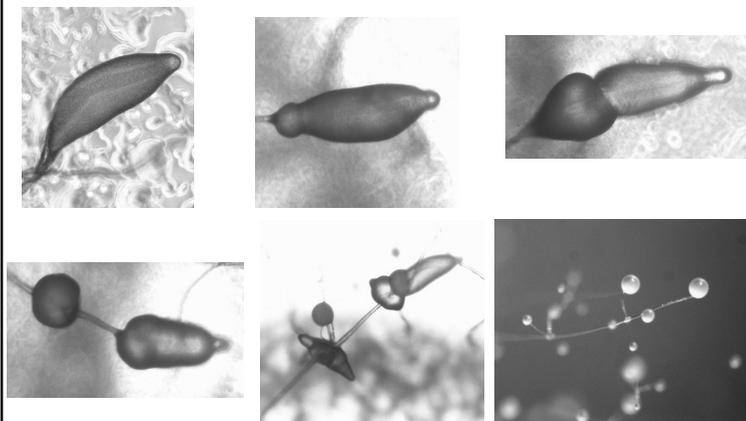


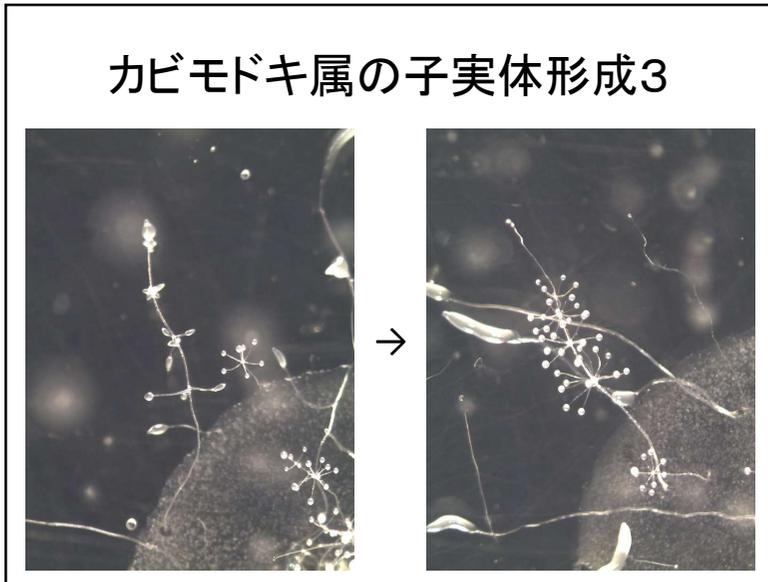
ヤエカビモドキ
Polysphondylium tenuissimum



京都大学 大学院理学研究科植物学教室 形態統御学分子細胞性粘菌グループのHPより

カビモドキ属の子実体形成 連続写真





胞子への促進物質と抑制物質の動き

反応の**促進物質**と**抑制物質**の生成速度の差をパラメーターとした

パラメータの値が下がっていくに従って**ストライプ** → **スポット** → **一様解状態**へと推移

チューリングの**反応拡散系**で説明できる！

生命観の歴史

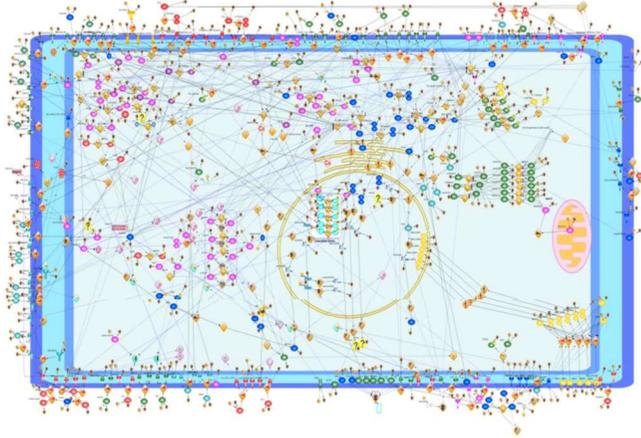
古代～中世の生命観：**生氣論**
生物は非生物にはない神秘的なものをもつ

近代の生命観：**機械論**
生物 特に動物の機能のしくみは機械じかけ

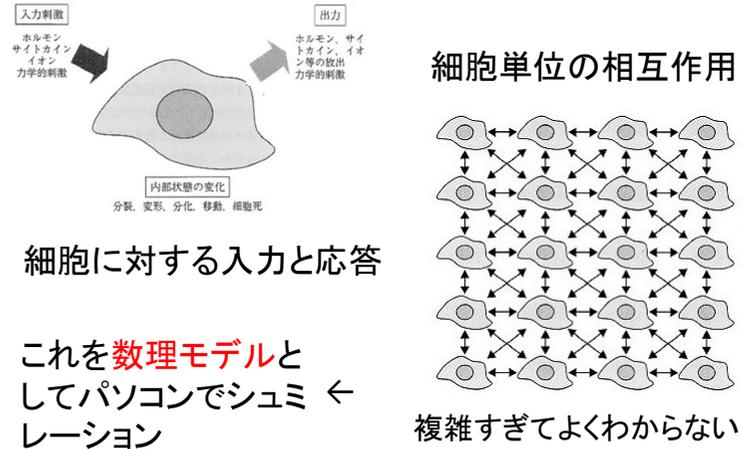
現代の主要な生命観：**システム論**
生物は細胞内の分子の相互作用をさらに細胞 組織 器官の相互作用を通して**システム**として機能している

「反応拡散系」「散逸構造」「オートポイエーシス」

細胞内の化学反応ネットワーク



システム生物学の手法



コンピュータが教えてくれる**生命**とは

現代生物学では 生命は**超複雑な機械じかけ**と考える

超多数の要素が相互作用をすると
足し算では考えられない**非線形**現象を示す

生命や自然は
人の安易な理解を**超えている**

→ やはり**神秘的**！

日本人の宗教観との対比

やおよろず
八百万の神 → 自然界のさまざまなものに神

= **神秘的なもの**が存在する
人格のある神でなく



非線形科学 自己組織化の科学は
生物を含む自然に **生き生きとした現象**の存在を

自然界のさまざまなものに

私たちの**安易な理解を超えたもの**
= **神秘的なもの**が存在する