

10.6 散逸構造、生物、複雑物性

甲斐昌一 kaitap@mbox.nc.kyushu-u.ac.jp 九州大学

10.6.1 はじめに

生物のもつ最も魅力的な性質はその自己再生、自律性、そして自己組織化であろう。これらの理解にはまだかなり長い道のりが必要と考えられるが、自己組織化については非平衡・非線形現象の物理という立場からかなりの理解がなされてきている[1]。体系が熱力学的に十分平衡状態から離れると、多くの物理系で特有の構造が形成される。その最も身近な例が、水層を下から熱した場合に見られる対流構造で、何らの拘束条件を与えることなく自発的にある定まった構造となる。このような構造はエネルギーを散逸しつつ形成されているために、散逸構造と呼ばれている。それは典型的な自己組織化現象で、エネルギーの散逸と注入輸送の絶妙なバランスから不安定構造が維持されている。この構造が生まれると特徴的なスケールがマクロになり、分子レベルのミクロな特性長との二つの異なった空間スケールが発生する[1]。これを階層と呼ぶ。

階層性は生物を構成する超マクロな分子、例えばタンパク質などにも見られる。タンパク質は多数の塩基で構成され、それらはさらに個別のより小さい分子が特有な形で集まって構成されている。このように生物では塩基、タンパク質からオルガネラ、細胞、個体まで、階層が幾重にも有り、多重階層構造となっている。

ところで、そもそも物理学は運動の法則を基本としており、ものごとの起こる可能性と予測を与える。これはニュートンの法則も量子力学もしかりである。生物を研究するにあたって重要な点は運動の法則以外の法則が必要に思えることである。それは、生物の仕組みを支配する法則であり、機能を生み出す法則である。それらは運動の法則などの物理法則を遠い背景としているだろうが、単純なそれらの組み合わせからはほど遠い概念になっていると考えられる。例えば、物理法則1と物理法則2から生物の法則が構成されるとすると、その法則から逆に物理法則1と2を推測することはできない。これを「構成的（創発的）法則」と呼ぶ。それは、あたかも無限の異なった周期の単純総和がカオスにはならないことと同等である。

我々がよく利用する「物性」は、この運動の法則をベースに、階層の存在にそくして統計的に特徴づけられたものである。私は常々次のように自問している。生物には上に述べたように、多くの階層（単に時空サイズの階層だけでなく機能的な階層もある）が存在するが、なぜこのように多くの階層が存在しなければならないのか。それは、生物の機能（物性）出現、ひいては生物そのものに実に必然かつ重要な役割を担っているからではなからうか。あるいは多重階層は冗長度を増し、予測を不可能とするためなのか。その解明こそが生物という「もの」の解明に繋がるのではないだろうか。そのためには生物の法則を知る必要がある。そこで、このような考えを背景に、ここでは科学的な厳密さを離れて、生物の振る舞いや特徴を散逸構造の物理という点からどう眺める得るのか、また物性という側面からどう捉えるのかを述べていく。

10.6.2 階層と複雑性

昨今、頻繁に複雑系という言葉が聞かれる。この複雑系あるいは複雑物性の定義は何か？一部の人を除いて明確な定義をもって呼称している人は少ない。多くの場合、単に理解できない複雑な振る舞いをする体系や奇妙な物性が現れる場合に使うことが多い。また、明確な定義で使っている人もそれぞれ個別の異なった定義で使っているように見受けられる。そこで、ここでも筆者固有の定義

を中心に述べていく。

私は複雑系を次の三つに大別している。(1)多重階層性（並列多重性も含む）をもつ系。(2)少数のサブ・マクロエレメントからなる系、あるいは階層と階層の狭間の挙動が全体の性質を支配する系。(3)階層で明確に分けられながら、階層間に相互作用がある系。すなわち、マクロな性質によってそのマクロな系を構成するミクロな要素の性質が変えられる系。言い換えれば、ミクロ要素に内部状態の自由度が存在しそれが上の階層の性質に依存する系。

(1)は、例えば流体系のような逐次転移をして新しいマクロ構造を次々と形成する系を意味し、最終的に生まれる構造は乱流に代表されるように複雑である。乱流にしても一種類ではない。(2)では十分な統計平均が難しく、いわゆる大数の法則が破れている。例えば粉体の運動など。また、二相間の界面の挙動や欠陥の挙動が全体の物性に大きく影響する場合もある。これらは散漫転移、高分子系やスピングラスなどのスローモードに代表される。3番目の例は、生物などに代表され、周囲の環境によって要素の性質が変化する系である。例えば、周りの細胞の種類と数によってその細胞自身の種類が変わる。

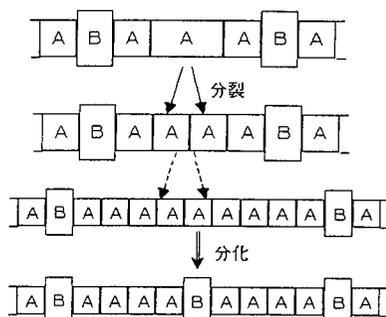


図 1: ラン藻類の細胞分裂

その一例を図 1 に示した[2]。図ではある種の藍藻類に見られる細胞分化を模式的に記述した。ここではたった二種の異なった細胞 A と B があり、A は栄養細胞で大量に存在し、これは分裂機能をもつ。一方、少数派の B の細胞は細胞分裂はしないが、光合成を行い窒素固定を行う。A 細胞は内部状態をもっており、通常の状態では A から B 細胞への分化を行う。しかし分化して B 細胞ができるとその B 細胞からは分化を抑える化学物質(ある種のホルモン)が分泌され、すぐ近くの A 細胞の分化を阻害する。しかし、遠くになるとそれが効かないので、A が分裂を続けて行くと、中央付近の A 細胞はそのホルモン濃度が低下し、B へと分化することができる。こうしてある一定間隔ごとに異なった細胞が生まれ、成長を続ける。これは一つの例である。

このような性質を実現するためには、要素それ自体が比較的マクロで弱い相互作用で構成されていなければならない。しかし弱すぎると熱雑音が支配的になり内部状態が全て平均化され、異なった複数の内部状態の存在が失われてしまう故に、適度の強さの相互作用が必要である。つまり要素があまりミクロであると熱雑音の効果が強く、平均化され複数の内部状態を取り得ない。それは、例えば、平衡系では自由エネルギー最小の原理によってエネルギー最小の構造が実現されることに相当する。それが、タンパク質程度に巨視的な要素になると、同じ比率で構成される塩基群から生まれる一つのタンパク質の構造は多くの多重安定構造（しかし、比較的弱い力に敏感に応答し構造変化する）をもつことができ、それらは熱揺らぎではもはや壊すことができない。そして、その逐次取りうる構造によって、タンパク質の機能が各々異なる。（例えば狂牛病の病原性タンパクで知られるプリオンは、非病原性のタンパク質の α -ヘリックス部分が β -シートに構造

変化することによって、それ自身近くの正常タンパクをプリオン構造に変えて増殖し、牛の脳・神経障害を引き起こすことが知られている。だが化学組成はあくまで変化していない。)

さらに、生物では遺伝子情報を通して要素の内部状態の変化を成し遂げる。例えば全能細胞は、環境によって任意の役割の細胞に分化することができる。つまり周囲の環境情報は遺伝子に作用し細胞の性質を変え、ひいては細胞から成る器官や個体を変質させる。これは植物の環境ストレスに対する防衛反応や形質変化でよく知られている。

10.6.3 パターン形成と物性

散逸系の研究者はよく「この体系はカオスになる。」とか「これは極限軌道（リミットサイクル）をもつ。」などと言い、「それはこういう機構あるいは理由で生まれる。」と説明する。そして多くはこれで話や研究発表を締めくくってしまう。しかし、私達、物性研究を主体とする者にはそのような成果にはあまり興味がない。それは、カオスやリミットサイクルが生まれるのも、非線形であることが普通の自然界では至極当然だからである。前節でも述べたように我々が興味があるのは、パターンやカオスの発生よりもそれらが生まれたことによって「もの」（敢えて”物質”とは呼ばない）の性質をどの様に変え、それが体系の挙動にどのような役割を果たしているかを知ることである。

このように凝縮系の物性研究者が興味があるのは、自己組織化が起こりパターンが生まれたことが、体系の静的また動的性質とどの様に関わっているかを知ることであり、それを定義する手法や手段を見つけることである。これを物理では通常「物性を調べる」といい、性質は物性係数で特徴づけられる。ただ物性と言う言葉は慣習的に単純物質に対して使われる静的な言葉で、カオスや極限軌道をもつ系や複雑系・生物のように動的な性質で特徴づけられる場合には機能と拡張して呼ぶ方が良くであろう。いずれにしても、我々は物性（機能）に対するパターン（リズムや空間構造）の果たす役割を理解し記述したい。それをどの様に考えれば良いか。ここでは簡単な例を取り上げて考えてみよう。

そこで、例として有名な振動化学反応であるペルーゾフ・ジャボンチンスキー（BZ）反応を取り上げる。触媒としてルテニウム錯体を使うと振動を光でもって制御でき、ある強度以上の光を入れると振動は停止する。この触媒をイオン交換樹脂の粒子（ビーズ）に吸着させて、反応溶液の中に入れると、ビーズ一つ一つが振動子として働く（図2）。今、異なった周期の二つのビーズを取り上げる。これは二つの発電機と考えるても良い。

まず、一つ一つのビーズ振動子では、秩序度(Br⁻濃度)Xの振動変化を、例えば簡単なため単純リミットサイクルとしよう。すると、図3に示すようにリミットサイクルの単位面積Sが1周期当たりのエントロピー生成率σに比例する。

$$S = \frac{1}{T_0} \int \dot{X} dX \quad (1)$$

$$\sim \sigma = LX^2 \quad (2)$$

ここでT₀はリミットサイクルの周期、Lは輸送係数（有効反応速度定数）である。従って、独立の二つのビーズ振動子では、その和がこれら振動子が単位時間に生み出すエントロピー生成に相当する。この二つのビーズ振動子が一つの体系を構成するが、その振動が引き込まれていない場合には、その和に加えて全体から見るとその振動の差に相当する位相振動分が空間的に生まれ、この成分によって単位時間当たりに余剰のエントロピー生成がある（図2 a）。すなわち、同じ周期や位相で反応していないために、全体で見ると物質拡散や反応が変化する。それらの総和を最小にするように条件づけると、d一定で振動数の差が小さい場合には通常同じ周期に引き込みが起これば

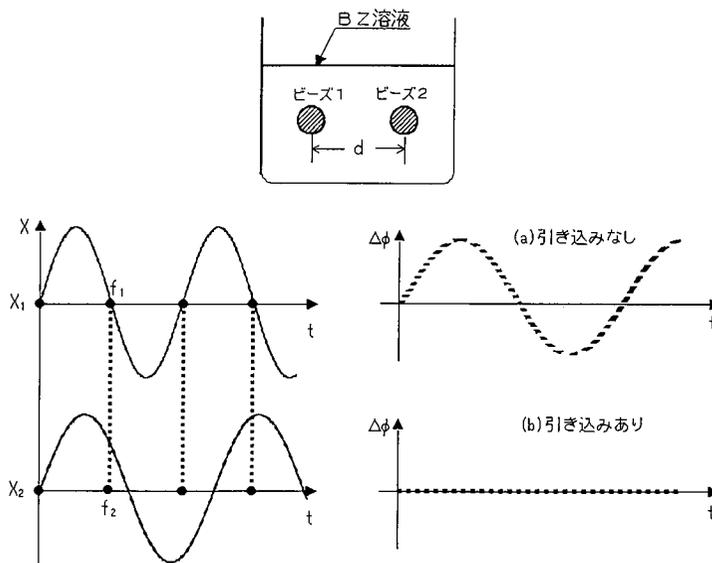


図 2: 2つのビーズの振動周期とその位相差 $\Delta\Phi$ ($\Delta\Phi$: 位相の単調増加分は差し引いている。) (a) 引き込みなし (b) 引き込みあり (位相差がなくなるときに引き込みが起こる)

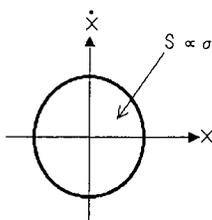


図 3: リミットサイクルとエントロピー生成率 (ビーズ1の Br^- 濃度: X)

ならない (図4)。すなわち引き込みはエントロピー生成率最小の法則に従って起こるといえる (図2 b)。引き込まれていない場合にはみかけの余剰エントロピーの生成率 σ は、線形で考えれば、

$$S_\phi = \frac{1}{T_\phi} \int \Delta\dot{\phi} d\Delta\phi \sim \sigma_0 \sim L_\phi \Delta\phi^2 \sim |\lambda_{\min}|$$

と直ちに新しい余剰輸送係数 L_ϕ と繋がり、引き込み現象に特有の輸送係数 (この系の場合余剰有効反応速度定数) が定義できる。ここで T_ϕ は位相差がつくる新しい周期、 λ_{\min} はこのリミットサイクルの平均最小リアプノフ数である。このように物性量 (輸送係数) と散逸構造の形成 (引き込みリズム) との関係が得られる。

話をもう一歩進めると、この引き込み現象に光ノイズを照射すると、引き込まれていなかった振動子同士が引き込まれ、さらにノイズの強度を増加すると再び引き込みから外れる現象が観測される。すなわち、引き込み領域の幅 (E. W.) がノイズ強度の変化に対して極大をもつ (図5)。これをノイズ・シンクロナイゼーションと呼ぶ。反応系は引き込みが起こった状態と引き込んでいない状態とは明らかに異なった状態である。エントロピーの生成率も異なる。これ自体、非

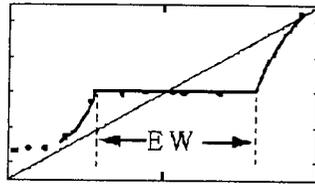
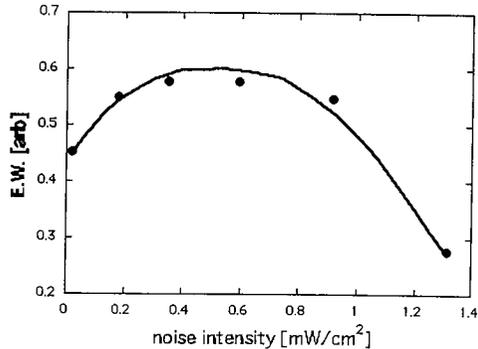
図 4: 引き込み現象($f_1/f_2 \sim 1$ の近傍で引き込まれている)

図 5: 引き込み領域(EW)のノイズ強度依存性

線形現象として興味深いものであるが、物性として見たときこの現象をどのような物性値（応答関数）で表せばよいのであろうか。さらに少数の場合はまだ直接的な表現で良いが、無数の振動子をまとめて記述する場合にどう特徴づけるか。（例えば個別の心筋細胞と1個の心臓（要素と全体）。一体、物性として何が双方で違うのか（単位体積あたりエネルギー散逸量？単位エントロピー生成率？単位体積あたりATP消費量？輸送係数？）。特徴を表す定数は何か。心臓リズムとして1つの心筋細胞にはない性質があるのか。それとも同一か。）

10.6.4 揺らぎと階層の役割

前節で非平衡散逸構造における輸送係数とエントロピー生成の間の関係のマクロな記述を述べた。マクロな体系は揺らがないが、代わりに非可逆となる。そしてそこから輸送係数が生まれる。しかし、一方で私達は既に臨界現象でマクロな系が揺らぎで満たされてしまうことを知っている。揺らぎは下の階層の自由度からくるもので、相転移点や臨界点から遠い通常の平衡物質では大数の法則（中心極限定理）が成り立ち、系がマクロなほど揺らぎが小さく決定的である。ところが臨界現象では、系が大きくなるほど揺らぎは大きく、大数の法則が破れている。これを異常揺動領域と呼ぶ（図6）。従ってそれに伴う異常な輸送係数を生む。このとき揺らぎは臨界点を超えれば再び正常化し、最終的にその中のあるモードが選択されマクロな秩序を生み、新しい物性が現れる。つまり物性の起源はミクロとマクロの階層の存在、それに伴う揺らぎの繰り込みの結果である。

では生物のような複雑なシステムではこれをどのように考えればよいのだろうか。例えば、生物では遺伝子等に生まれる情報の小さな揺らぎが、階層を経るにつれてカスケード的に増幅され、大きく異なった機能として実現されるのではないか。

その場合、ある情報の揺らぎが階層をあげるにつれて大きくなる場合（異常揺動）と小さくなる

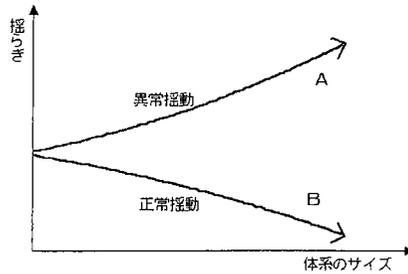


図 6: 物質の異常揺動と体系のサイズ

場合(正常揺動)があり、異常の場合には細胞あるいは個体全体の機能に変化を与え、正常の場合には最初の情報の変動は最終的な機能に何の寄与もしない(図7)。こうして最終的な機能が決まる。このような階層の存在、すなわち情報の揺らぎを増幅させる階層や減衰させる階層の存在が、生物の複雑さや機能、いわゆる生物らしさを生みだしているのではないか。このために生物は多重階層を持つのではないか。

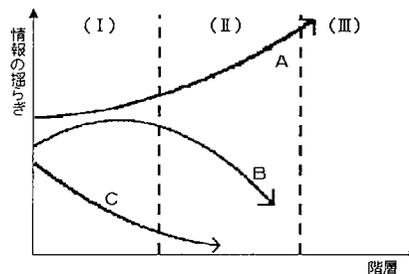


図 7: 情報の揺らぎと階層

例えば図7の情報A、Bが異常を示すIの階層での機能と、さらに階層が進んだAのみが異常を示すIIの階層では観測される機能が異なる。それではこれをどの様に捉えればいいのか。上に述べた物質での階層ごとに物性を定義する方法では生物の機能(物性)の表現は難しい。このあたりの議論は私の頭の中で煮詰まっておらず抽象的な議論で終始してしまったが、いつか明確に記述できればと思っている。

10.6.5 おわりに

生物が揺らぎをうまく利用していることは、筋肉やべん毛などの運動系で知られている。この両者ともエネルギー源が不明であるが、どうやら熱揺動として知られるブラウン運動を利用しているようである。本来ブラウン運動は方向性を持たない乱雑な運動で、これを利用することは人工的な機関では成功していない。ところが、このブラウン運動を非対称にする機能を利用して一方向の運動を生み出すことをやっているのがべん毛や筋肉であると考えられている。このとき非対称にさせる作用のみ生物はエネルギーを消費するために極めて少ないエネルギーで大きな運動のエネルギーを生み出すと考えられている。これが正しいとすると物性研究者の観点から、このように本来等方

的な揺らぎを非対称化して利用するような特性を表す「物性」係数の定義とその測定手段が囑望される。この問題は、前述のリズムの引き込みで述べた議論の延長線にある。なお、類似の雑音現象は実は確率共鳴現象として散逸構造に最初に見出された(図8) [3,6]。現在では確率共鳴現象の拡張から、非線形系ではこのような雑音が信号として様々な役に立つことが分かっているし、それを主に生物が利用していることも推測されるようになってきている[4-7]。散逸構造における新しい発見とその機構の解明は、物理の観点から着実に生物の謎を解き明かしつつあると思う。

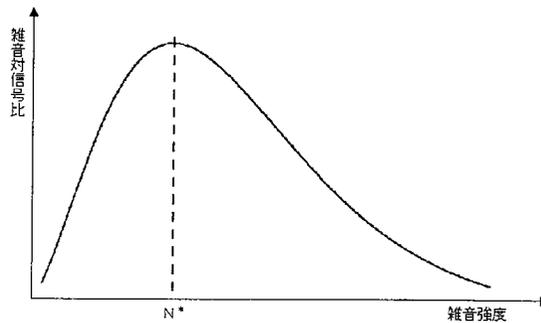


図8: 確率共鳴現象 (ある雑音強度 N^* で信号性が強くなる)

文献

- [1] 甲斐昌一 数理科学 第418号 特集「自然が生み出す多様な散逸構造」(サイエンス社 1998年4月)
- [2] 清水浩 「生命を捉えなおす」中公新書(1990)
- [3] 甲斐昌一 地球科学 第17巻4号 (1995)
- [4] J.K.Douglass, L.Wilkins, E.Pantazelou and F.Moss, Nature 365(1993)337
- [5] L.Gammaitoni, P.Hanggi and F.Marchesoni, Rev.Mod.Phys. 70(1998)223
- [6] S.Fauve and F.Heslot, Phys.Lett., 97A(1983)5
- [7] B.McNamara and K.Wiesenfeld, Phys.Rev. A39(1989)4854