

生物とはなにか

“大気・海洋・地殻・生命などを含めた地球システムは、宇宙空間とエネルギーをやり取りする散逸系であり、その中で、生じる渦運動・リズム運動・ゆらぎ運動に、物理現象、生物現象の枠を超えて、類似性・共通性が認められるのは、不思議なことではないのです”

人間を含め、全ての生物・非生物が、自然の大循環の構成要素であることを述べました。次に、その自然の構成要素の中における生物の特徴について考察しましょう。生物は、人間（ヒト）のような多くの細胞から構成された複雑なものから、我々の腸内に生息する大腸菌のような単純なものまで多種多様であります。その共通性質を理解することが人間（ヒト）を理解する上で重要です。人間を知ろうとすると、人間特有の現象ばかりに目を向けがちになりますが、まずはその前に、人間は生物の部分集合であることを認識する必要があります。

まずは、生物の定義について考えましょう。一般的には、(1)細胞を有すること、(2)自律的にエネルギー代謝を行うこと（摂取・排出・貯蓄）、(3)自己複製を行うこと、が生物の3大要件です。成長や刺激反応などが追加されることもあります。本質的に重要なのはこの3つです。1つ目の要件である細胞は、外界と生命を隔てる物理的な境界です。隔てると言っても、細胞膜を介して、エネルギー・水・空気・物質の4大自然要素が、間断なく細胞の内外で交換されています。このような系（システム）を、開放系と言います。4つの大循環は細胞と外界で分断されておらず、連続しているのです。2つ目の要件である自律的なエネルギー代謝は、生物が自己を保存し維持するために必要なものです。生物は存在しているだけでエネルギーを消費していくので、個体を維持していくには、その分のエネルギーを産出しなければならず、そのエネルギーを生み出す一連のプロセスが代謝です。エネルギーあるいはその源となる物質を細胞内に摂取し、エネルギー源からそれぞれの生物のやり方でエネルギーを取り出し、それを個体維持のために使用して、余剰分があれば貯蓄に回し、利用不可能なエネルギー源は不必要な副産物とともに、細胞外に排出します。生物の代謝を、自動車と比較してみましょう。自動車は、ガソリンというエネルギー源を摂取し、そこから動力を得て、不必要なエネルギーを熱として、排ガスなどの副産物と一緒に排出します。非生物である自動車に細胞はなく、自律的にガソリンを摂取できませんが、摂取・利用・排出の流れは同じです。自動車の部品は、自律的な再生（リモデリング）機能をもちません。時間とともに劣化していきだけです。劣化した車体を再生させるためには、他律的に部品の修繕・交換を行いメンテナンスしてやらなければなりません。生物はこの修繕・交換のメンテナンスを自律的に行うことができるのです。生物およびその部品である細胞も時間劣化しますが、細胞を構成する物質（アミノ酸など）を代謝の過程で少しずつ入れ替えることによって、再生さらには成長することすらできます。生物の自律的なエネルギー代謝機能とは、単に個体維持にとどまらず、自己再生（リモデリング）機能と言い換えることもできます。3つ目の要件である自己複製（子孫を残す）とは、まさに生物体丸ごとの再生（リモデリング）です。西原^[1]は、全生物共通の定義は、代謝（部品交換）と複製（個体丸ごとの交換）の2つを総称した自己再生（リモデリング）そのものであると述べています。以上より、生物の基本構造は、入力（摂取）、出力（排出）、自己再生（貯留）から構成される単純なモデルで表せます（図2）。これは、単細胞生物から、植物、動物、人間に至るまで全て共通です。

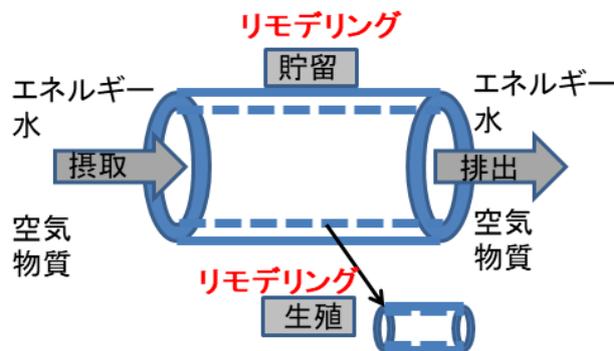


図2 生物の概念モデル: 入力(摂取)と出力(排出)その差引としての貯留・更新(=リモデリング)で簡単にモデル化される。動物の本質は、円筒状の消化管で、円筒の内部、すなわち、口から肛門につながる一つながりの消化管の内側は、体外と考えることもできる。消化管の内側に腸内細菌が生態系を生成している。三木成夫^[4]は、脊椎動物の場合、消化管の外側に、体壁としてもう1つの円筒、すなわち2重の円筒で単純化できるとしている。

ところで、全ての生物が共通で単純な基本構造を持ちながらも、なぜ、多様な生物が誕生し、進化してきたのでしょうか？その鍵を握るヒントがまさに図2に隠されています。図2は、ある系(システム)にエネルギー・物質が流入し、それが系内部の活動を維持し、系で消費されたエネルギー・物質が系外に流出していることを示していますが、このような系(システム)は、実は、生物の専売特許ではなく、広く自然現象の中に見出されるのです。それらは総称して、「散逸系」あるいは「開放系における熱力学的非平衡状態」と呼ばれています(注1)。散逸とは、系内部でエネルギーが消費され、最終的には熱となって失われること、を意味します。開放系とは、1つの系(システム)に、熱・エネルギーが流入したり、流出したり、している状況で、系の外部と内部でエネルギーの交換があることを意味します。熱的非平衡状態とは、系(システム)の内部で、温度や速度や圧力などが時間と共に移り変わっていることを意味しています。身近な散逸系の物理現象に、ベナール対流があります。シャーレの中に水を入れて下から熱すると、下の熱くて軽い流体の浮力が粘性の抵抗力に打ち勝って、やがて対流が生じます。下から熱として入力されるエネルギーによって、系=シャーレの内部でベナール対流が駆動されるのです。流体の粘性摩擦によって運動エネルギーが消費され、熱エネルギーに変化します。その熱エネルギーは、使用されなかった余剰の熱エネルギーとともに、水面を介して系外へと流出していきます。お味噌汁の表面も注意深く見ると、細胞上のパターンが観察されるはずですが、お椀=系の中の味噌汁は、あらかじめ与えられたエネルギーによって対流を生じていますが、系外からのエネルギー流入がなく、味噌汁表面からエネルギーが流出していき、どんどん冷えていき、やがては、熱的平衡状態になって静止するでしょう。地球の大気も典型的な散逸系です。太陽からのエネルギーは、まず地面を熱し、その熱が地面から大気=系へと伝達・入力されます。そのエネルギーによって、大気中では活発な対流活動が生じます。水蒸気の相変化を伴えば、積乱雲として巨大な対流に発達することもあります。対流の粘性摩擦によって損失したエネルギーと使用されなかった余剰の熱エネルギーは、大気圏の上面から赤外線として宇宙空間へと流出していきます(放射冷却と言います)。地球の内部も、お椀のお

味噌汁と同じようなものです。地球の誕生時に得た熱量と地球内部の放射性元素の崩壊によって生じる熱量を少しずつ失っています。その量は、太陽と地球でやり取りされるエネルギーに比べて微々たるものなので、地球温暖化などの気候学では無視されますが、お椀の味噌汁同様、確実にエネルギーを失いながら冷えているのです。地球内部のマンテル対流や、プレート移動による地殻変動などは、系=地球内部における運動の現れなのです。

図3は、生物の細胞（生物現象）、シャーレ内の水の対流（物理現象）、大気中の対流（気象現象）を比較したものです。亀の甲羅のように、組織化された空間パターンは、そのスケールや現象の違いに依らず、何と似通っていることではありませんか！ 散逸系の大きな特徴の1つに、「自己組織化」があります。壮大なエネルギー循環の輪の中に、生物、お椀の味噌汁、大気、マンテル、のような開放系が介在し、散逸系として内部運動が駆動される時、その運動は、自律的に美しい秩序構造を生み出すのです。それが自己組織化です。この散逸系における自己組織化による秩序構造は、亀の甲羅のような周期運動・リズム運動であるとは限らず、様々な形態をとり得ます。その度合いは、散逸系の「非線形性」に依存しています（注2）。生物や自然の造形の多様性と秩序性は、一言で言えば、まさに、散逸系の非線形性に内在しています。非線形性が弱いと、ベナール対流のように、規則的な渦運動・リズム運動が生じますが、非線形性が強くなってくると、規則的な運動が次第にくずれ「ゆらぎ」が生じます。「ゆらぎ」が大きくなると、渦運動・リズム運動も次第に複雑化し、やがてカオスという現象が生じます。カオスとは混沌という意味ですが、出鱈目という意味ではありません。一見混沌に見える現象の中に美しい秩序性が存在しています（注3）。また、そのような非線形性の強い散逸系にカオスが生じると、空間パターンには、階層構造が現れることがあります（注4）。1つ1つの細胞セルや対流セルが、自己組織化して、個々のセルよりもスケールの大きな秩序構造（例えば、臓器）を生み出し、その秩序構造が自己組織化して、さらにスケールの大きな秩序構造（例えば、人体）を、階層的に生み出していく、ということです。生物の体は、階層的に自己組織化した秩序構造によって成り立っている、ということが出来るかも知れません。

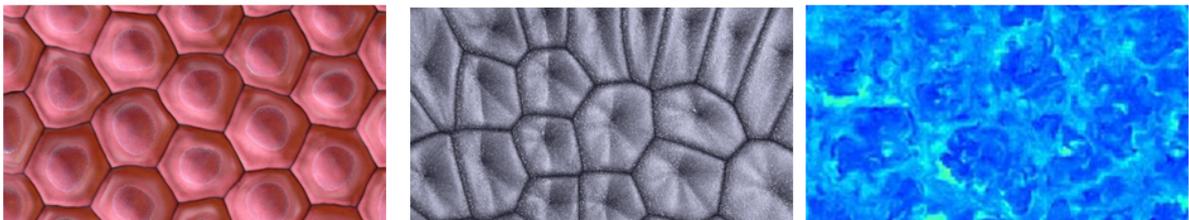


図3 細胞セル(生物)、対流セル(物理・気象)の相似性

左が生物の細胞セル(生物現象)、
中央がシャーレ内の水の対流セル(物理現象)
右が大気中の対流セル(気象現象)

左図 Getty Image (生物の細胞構造)より引用 <https://www.gettyimages.co.jp>

中央図 橋本麦 ベナール・セルを撮るより引用 <https://baku89.com/tips/benard-cell>

右図 神田研究室、スーパーコンピュータによる大気中の対流(助教の稲垣厚至氏提供)

大気・海洋・地殻・生命などを含めた地球システムは、宇宙空間とエネルギーをやり取りする散逸系であり、その中で、生じる渦運動・リズム運動・ゆらぎ運動に、物理現象、生物現象の枠を超えて、類似性・共通性が認められるのは、不思議なことではないのです。

(注1)「散逸系」は、イリヤ・プリコジンという科学者が、提唱した概念で、1997年ノーベル化学賞を受賞しました。

(注2)線形システムでは、運動の性質・形態は変化せずに、その大きさだけが変化します。非線形システムでは、運動の大きさはもちろん、運動の性質・形態そのものも変化します。例えば、1つの渦運動・リズム運動を考えましょう。線形システムでは、1つの渦運動は1つのままで、周期(リズム)や形は変わらず、その渦の大きさだけが拡大・縮小します。ステレオのアンプのようなイメージです。アンプは、音の大きさだけが変化しますよね。非線形システムでは、1つの渦運動から別の周期の渦運動が次々と分裂したり、誕生したり、逆に異なる渦同士が合体したりします。そのため、渦運動やその結果としての秩序構造・空間パターンは、極めて多様なものになり得ます。非線形アンプがあったら、音の周波数も変わってしまうので、めっちゃめっちゃな音楽になってしまうでしょう。非線形性は、入出力するエネルギーの量および、系の内部構造(流体の種類、化学反応の種類、系の大きさや形状)によってその度合いが大きく変化します。

(注3)カオス運動を「見える化」すると、ストレンジアトラクター(奇妙な軌道)が現れます。後述する3種の生物の食物連鎖で生じる時間変化がカオスであり、その位相図(2-2節 図9参照)が、ストレンジアトラクターです。円運動とは異なる奇妙な軌道を描いています。一周は、どれも似たような軌道ですが、ピッタリと同じ軌道ではなく、ゆらぎながら動いています。また、地球を巡る偏西風の蛇行も円運動からの「ゆらぎ」の典型的な一例です(2-2節 図7参照)。円運動に近い軌道を描きますが、ゆらゆらと時空間的に変動し、ピッタリと同じ軌道を描くことは無いのです。

(注4)カオス現象が作り出す、空間的な階層構造にフラクタルと呼ばれるものがあります。ロシアの人形マトリョーシカのように、同じような相似な空間構造が、階層的に作り出される現象です。

参考文献

- [1] 西原克成、内臓が生みだすところ、NHKブックス 948
- [2] Getty Image (生物の細胞構造) <https://www.gettyimages.co.jp>
- [3] 橋本麦 ベナール・セルを撮る <https://baku89.com/tips/benard-cell>