

生命現象の謎を探る：物理学と生命科学のキャッチボール

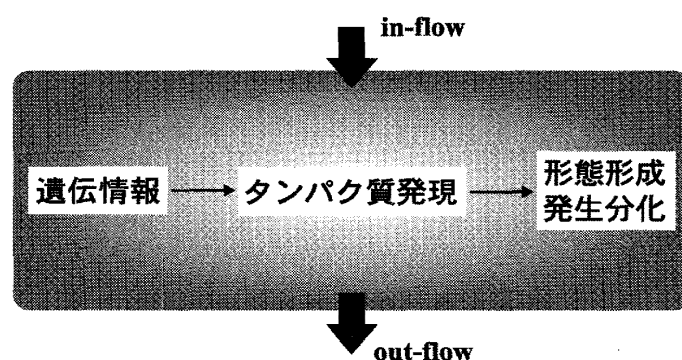
吉川 研一

京都大学理学研究科

1. これからの学問的課題

物理学はあらゆる自然現象について、その基本原理を探る学問である。近年の生命科学の急激な発展は、主として要素還元論的な方法論の発展に支えられてきた。しかしながら、“一次元の紐に蓄えられた離散的な情報（塩基配列）から、どのようなしくみにより、時空間4次元の構造が自発的に形成されるのか”、といったような、生命科学の基本的な問題は、壮大な謎として残されている。本講義では、“What is life?”の課題に迫るための、物理学と生命科学的の双方に立脚した研究の方法論について論じてみたい。

非線形開放系としての生命



生命現象の特徴	現時点での教科書的説明
(1) 遺伝子発現の自己制御	多数の“鍵”と“鍵穴”
(2) 形態形成・発生分化	シグナル分子の濃度勾配、ON/OFF制御 (チューリング・パターン)
(3) 多入力非同期演算	ニューラルネットのモデル
(4) 等温でのエネルギー変換	爪車モデル

2. DNA の不思議

ヒトのDNAには2万個の遺伝子があるといわれている。遺伝子にはアミノ酸の配列情報が刻まれているが、生物の形を直接記憶しているわけではない。個々の細胞は、生物の発生・分化にともない、2万個の遺伝子のうち必要な情報のみを選択的に読み出している。遺伝子発現のネットワークの複雑さでもって語られてきたが、それでは、実際の現象を説明できな

いことが多い。ここでは、ゲノム DNA の高次構造変化が、遺伝子情報の自己制御に直接かかわっているとの仮説を検討したい。長鎖 DNA は、その高次構造を不連続に変化させる（一次相転移）ことが、最近明らかになっている。DNA の高次構造の簡単な理論（高分子物理学）を紹介し、一般的に on/off 型の転移が起きること説明する。さらに、DNA の高次構造転移により、遺伝子機能がスイッチングされることを、実際の実験結果により示す。このような、理論的考察およびモデル実験の結果に基づき、細胞における遺伝子発現制御の機構を論じたい。

3. 時空間の自己秩序形成

生きていることの特徴は、リズムに代表されるような時間軸上の現象であろう。自発呼吸、心臓の拍動、脳波、細胞の卵割、等々。生物のリズムには、次のような特質がある。すなわち、リズムが安定（摂動があっても元に戻る）、変化が不連続、エネルギーの消費を伴う、リズムの同期がおこる（引き込み同調）。これらは、いずれも非線形の振動子の特質である。非線形の振動子の同調現象は、それを偏微分方程式に書き換えると、時空間の自己秩序形成を記述するモデルとなる。生物の形態形成と関連させて議論したい。

4. 非同期超並列演算

現在用いられているコンピュータは、ノイマン型であり、チューリングの提案した、モデルを用いている。このことを、まず説明し、それが生物の計算方式と如何に異なるかを論じる。神経の興奮が、生物の計算の基礎となっているが、興奮現象の本質は、非線形の微分方程式で記述することができる。五感による外部情報の受容には、時間依存性の情報の取り込みと、時間軸上の演算処理に、重要な特徴があることを指摘する。実空間上のモデル実験系を紹介し、時間演算(coincidence detection, time-difference detection など)が cpu やクロックなしでも可能であることを示す。

5. 巧妙なエネルギー変換

熱力学第二法則によると、高熱源と低熱源の温度差が熱効率を決定する。言い換えると、等温系では、エネルギー変換効率はゼロとなるはずである。それに対して、生物の分子機械は、等温条件下にあるにもかかわらず、高い変換効率で仕事をしている。この謎を、非平衡散逸条件下での非線形ダイナミクスの視点で解き明かしたい。非平衡条件下では、大自由度は集団運動を始め、遅い少数の自由度に運動のモードが縮約される。このことを、非線形の微分方程式を用いて、簡単に説明する。実際のモデル実験系を示し、揺らぎながら、等温条件下運動する分子機械が実現可能であることを示したい。