

生物物理とは何か

Physics Lab. 2020 生物物理班

20020/09/20, 21

1 生物物理学とは何か

物理学とは、システムの普遍的な論理を抽出することで自然現象を理解しようとする試みです。システム(系)というのは、観察する対象のことです。たとえば、地球が太陽の周りを公転する現象を観察する場合は、地球と太陽とそれがある空間をシステムと呼びます。シリンダの中の気体の圧力や温度を調べたい場合は、シリンダと中の気体をまとめてシステムと呼びます。場合によって外から冷たいものを使って気体を冷やすかもしれません。そのときはその外の冷たいものもシステムに含まれます。

こういった物理学の中でもとりわけ細胞集団や生態系などといった生命システムをとりあげるのが生物物理学です。

物理学では、システムを適度に簡略化して物事を考えます。簡略化されたシステムはモデルと呼ばれます。たとえば先の地球と太陽からなるシステムなら、それぞれの天体は質量を持った大きさのない点(質点モデル)として扱うと便利です。質点に働く力は万有引力の法則、その力が働く時の質点の運動はニュートンの運動方程式を使って方程式で書き表すことができます。あとはこの方程式を見てやるだけで地球と太陽の運動がわかることになります。

それでは、生命システムについてはどうでしょうか。この場合、簡略化の手続きは地球と太陽の時のように簡単ではありません。もちろん生き物は物質によって構成されているので、生き物の体の中で起きている化学反応を全て書き出して計算すれば生き物の行動や寿命が計算で導けるかもしれません。しかし容易に想像できるように、生き物の持つ化学反応は複雑すぎて到底書き下せるものではありません。その上もし仮に書き下せてそれをひたすら計算して結果が得られたとして、それは生き物の振る舞いを理解したと言えるでしょうか。おそらくそうは言えないでしょう。ということは生命システムの理解には適切な簡略化が必要だということです。そもそもそれは物理学全般についても言えることでもあります。

とは言え地球と太陽を質点とみなすのはまだ幾分自然に思えるかもしれません。一方で気体についてはどうでしょうか。気体というのは分子が飛び回ってできています。しかし私たちは気体の性質を表すのに分子そのものではなく気圧や温度などの物理量を使います。気圧や温度というのは飛び回っている大量の分子がぶつかる力や持っているエネルギーを私たちが扱いやすいように簡略化したものです。このような扱いやすい形で生命システムを表現できればきっとその振る舞いや原理をさらに理解することができるでしょう。これが生物物理学の方法です。

2 細胞性粘菌で見る生物物理学

今回の私たちの展示は実物とモデルを比較して現象を理解していくという物理学の方法論を細胞性粘菌の観察を通して実際に体験する流れになっています。

この次の細胞性粘菌のポスターは、対象とする生物がどのようなものか知るところから始まります。さらに細胞性粘菌の飢餓集合という不思議な現象があることを知ることになります。

単細胞であった細胞性粘菌たちが集合して多細胞生物の形になるには、皆がうまく集合しなければいけません。細胞性粘菌はそのために合図となる化学物質の波を、まるで観客席のウェーブのようにうま

く伝えていきます。次のポスターではその波がどのようにしてできるのか、細胞の振る舞いを3状態モデルと呼ばれるものでモデル化して説明しています。

次のポスターでは実際に細胞性粘菌を色々な条件で観察し、合図となる化学物質であるcAMPの波を観察、計測します。そこから見えてくるcAMPの波の特徴を、細胞間のcAMPの受け渡しに注目したリレーのモデルを作ることで説明します。また、リレーのモデルから予測されることを追実験で確認します。

さらに次のポスターではリレーのモデルや実験で見た事実から予測されることを計算機のシミュレーションを用いて確かめます。シミュレーションとは現象を表した数式を実際に計算して予測することです。ここでは、3状態モデルと拡散方程式を用いてリレーのモデルよりも複雑で現実的であると考えられる形で計算し現象を予測します。シミュレーションでは実物を用いた実験より簡単に速く手軽にあらゆる条件を試せます。

ある時は実物を用いて実験して観察して分かった事実からモデルを作り、ある時はモデルや物理法則や数式を用いて推論して現象を予測し実験して確かめる、あるいはモデルから出てくる数式をシミュレーションして実際の現象と比較できる形にする。このように、現象と理論をお互いに比較することで物理学は世界の仕組みを理解しようとしています。生命システムをこのような方法で理解しようとする学問が生物物理学だと言えるでしょう。

3 普遍性

シミュレーション以降のポスターは普遍性に着目したものになっています。

現象を単純化した時、異なる現象が似たようなモデルで扱えることがあります。というよりも、異なる現象が一つの同じモデルに属すると考えることができます。

例えば、地球が太陽の周りを回っているのも、月が地球の周りを回っているのも、私たちが地球の上に住んでいられるのもすべて万有引力の法則で説明がつけます。それどころか、力を受けて動く現象はどれも質点モデルで説明できます。

今回、cAMPの波のメカニズムを説明する際に用いた3状態モデルというのも、細胞性粘菌以外に様々な場面で伝播する波を説明する時に用いられています。3状態モデルを用いて説明される、cAMPの波と似た現象を示すものとして代表的な現象に2次元のBZ反応というものがあります。BZ反応とは、いくつかの薬品を混ぜるとある物質が増えたり減ったりを繰り返す化学反応のことです。この振動パターンは3状態モデルでうまく説明でき、BZ反応を起こす薬品をシャーレに薄く広げて静かにおいておくとさながら細胞性粘菌が寒天培地の上に薄く広げられた時と同じ様に螺旋パターンやターゲットパターンの波模様が広がっていく様子が観察できます(図1)。他にも、同様のパターンが心筋やアフリカツメガエルの卵細胞の中などで確認されています²。これらもやはり3状態モデルで説明されるでしょう。このように、モデルは普遍性を持ち一見異なる様々な現象を説明することがあります。ということはより実験しやすいものでも同じモデルが適用できるかもしれません。そうして実験がたくさん行われるようになればモデルの理解度が上がり、モデルが適用できる現象全体の理解が進むことになるのです。

モデルを作る際にはある程度現象に基づかなければいけないでしょう。その時役に立つのが物理や数学の理論です。残りのポスターは力学系という数学の理論と、情報熱力学という物理の理論を説明した



図 1: BZ 反応で観察される波¹

¹画像を提供して下さった東京大学サイエンスコミュニケーションサークル CAST 様でも五月祭企画を行なっております。URL: <https://ut-cast.net/mayfes2020/>

²Pálsson E, Cox EC. Origin and evolution of circular waves and spirals in *Dictyostelium discoideum* territories. Proc Natl Acad Sci U S A. 1996;93(3):1151-1155. doi:10.1073/pnas.93.3.1151

ものです。力学系とは微分方程式の解の性質を調べる理論であり、微分方程式をよく扱う物理学や化学反応の速度を考える際に役に立ちます。情報熱力学とは情報の概念を熱力学に取り入れた分野で、粒子がどこにある、などといった情報処理が行われる系で成り立つ熱力学を考えるものです。

力学系のポスターでは、化学反応から考えられる微分方程式を解析することで3状態モデルの振る舞いが現れることを最後に説明しています。情報熱力学については、今回細胞性粘菌と結びつく内容はないですが、現在生物内の情報処理と結びつけるような研究が行われている分野です。どちらも普遍的な理論であり、様々な場面に応用されることが期待されています。

4 生物物理学と呼ばれる実際のところ...

生物物理学というのは定義が非常に曖昧で意味の広い用語です。大まかな見方でいえば上に書いたようなものではあると思うのですが、その実態は非常に多様です。生物に関わることならなんでもよく、分子モーターなどのタンパク質のような非常に小さいものから細胞、筋肉や骨などの組織、個体の発生、生態系、さらに進化など、空間的にも時間的にも数的にも非常に広い範囲を対象にします。また、理論的に生物を考えるというのは、理論生物学や数理生物学と呼ばれる分野にも当てはまります。どちらかという上での説明は理論生物学よりかもしれません。

個人的な印象としては、数理生物学、物理生物学は理論生物学の名前で橋渡しされており、数式を淡々と解析するか、物理的な解釈を入れて考えるかでどちら寄りかが決まる気がしています。例として、分子モーターが動く原理を調べたいときは、運動やエネルギーといった物理的な概念が頻繁に出てくるので生物物理学と言えるでしょう。逆に、例えば生態系や感染症などで個体数や患者数の変化を微分方程式を用いて考えるようなものは、数理生物学寄りだと思います。

それだけではなくて、例えば生き物の持つ色素が吸収する光について量子力学的に考えると、理論生物学とは少し離れて、かなり生物物理学感が強いと思います。生物を観察するための顕微鏡を作るとなると、もはや生物物理学です³。

³とにかく多様だということです