

波が生み出す動物の模様と形



研究室紹介

近 藤 滋*

Patterns and shapes made by the reaction-diffusion waves

我々の研究グループでは、反応拡散理論という数理モデルを用いて、動物の体に発生するさまざまな空間パターンを作り出す原理を解明しようとしています。この理論を説明するのはちょっと面倒なのですが、一言で言ってしまうと、動物の形を決める位置の情報は“化学反応の波である”、ということになります。なんだそりゃ?と思われる方がほとんどだと思いますが、以下を読んでいただければ、なるほど、と思っただけだと思います。

生物の反応は振動するのが普通

普段あまり意識されないことですが、動物の体には時間的な周期現象が多くあります。たとえば、全ての動植物には概日リズムという体内時計が備わっており、太陽が出なくても約24時間の周期で、活動状況が変わることは広く知られています。飛行機で海外に移動したときなどに、時差を感じるのは、体内時計のリセットに時間がかかるからです。また、性周期なども、人間の体に時間的な振動現象があることを身近に感じる例です。もっと小さいレベルで、たとえば細胞レベルでも、多くの振動現象が見つかっています。細胞にカルシウムをパルス的に与えると、細胞がカルシウムの放出と吸収の振動をすることは、よく知られています。これはもちろん振動の周期的な鼓動と関係しています。また、皆さんが大

学の生物学の講義で習ったグルコースの分解過程（解糖系）も、簡単に振動が起きる例です。反応系のあるステップで、大量の中間産物が溜まると反応形の進行を止めるスイッチがはたらき、無くなると再び反応が始まるので振動になるのです。（振動はpHの変化で測定できる。）一般に細胞内で起きる反応系には、ほとんどの場合、過剰な反応をとめる安全装置がついており、行き過ぎると元に戻そうという効果が現れます。だから、振動は実はあちこちで起きています。

振動が伝われば波になる

振動が細胞単位で起きるだけなら、特に面白いことはそれほどありません。しかし、個々の細胞は、周囲の多くの細胞との間に、ホルモンや低分子を解した密接な相互依存関係があります。物理的に言えば、共役振動子になっているわけです。ですから、位相の同期や位相の伝播による波が起きることは、むしろ当然といえるのです。心臓の4つの部屋が、うまく順番に収縮していくのは、カルシウムの波が心臓を走り、順番に筋細胞の収縮を刺激するからです。もう1つ、面白い例を紹介しましょう。



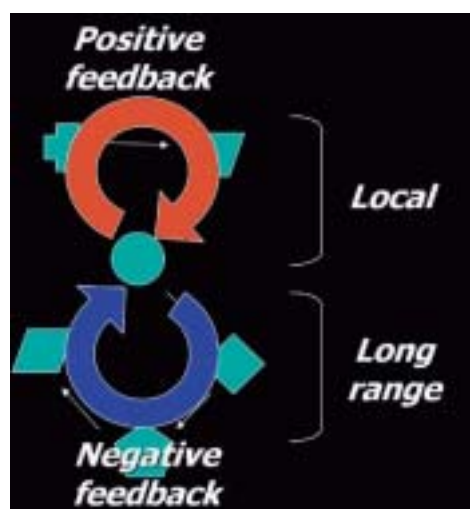
上の図は、マウスの皮膚にできた毛形成の縞模様です。一見非常に奇妙なことに、この縞模様は頭からお尻に向かって、ゆっくり（30日で1 cm くらい）移動していきます。ものすごく不思議な現象ですが、



*Shigeru KONDO

1959年9月生
京都大学大学院 医学研究科 博士課程
修了（1988年）
現在、大阪大学大学院 生命機能研究科
時空生物学講座パターン形成研究室
教授 医科学博士 発生生物学
TEL: 06-6879-7975
FAX: 06-6879-7977
E-mail: skondo@fbs.osaka-u.ac.jp

原理は実に簡単です。哺乳動物の毛根には、実は周期性があります。毛は「育っては抜ける」を繰り返して密度を保っているのです。人などでは、その位相がばらばらなので、特に目立ちません。また、夏と冬で毛が生え変わる動物は、その位相がそろっているのです。毛根の細胞は通常休眠状態にあり、外からのホルモン刺激により活性化し、毛を作り出します。面白いことに活性化した毛根は、周囲を活性化させるホルモンを放出するので、活性化の波が出現することになります。前頁の写真のマウスは、いったん生えた毛が直ぐに抜けてしまうので、何周期もその波が見え続けるという仕掛けになっています。



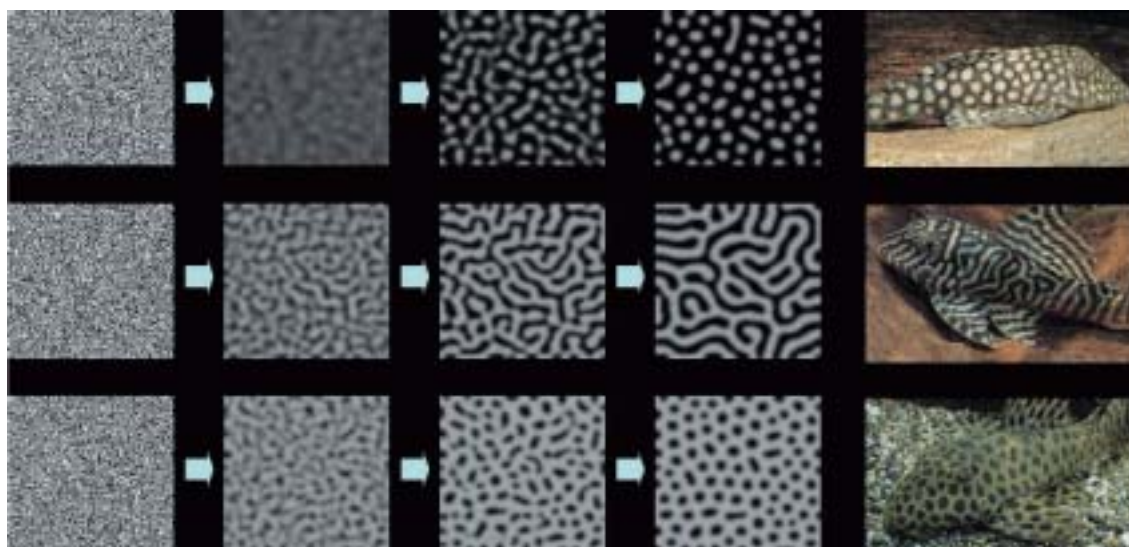
動かない波

化学反応によって起きる波には、もう1つ別の種類の、生物にとっては極めて重要性の高い波、「動かない波（定在波）」があります。そのような波の存在を理論的に予想したのがアラン・チューリング（計算機科学の創始者のチューリングと同一人物）であり、この波のことをチューリング波と呼んでいます。この動かない波を作るのには、ちょっと複雑な反応のネットワークが必要になります。

個々の反応はとりあえず何でも良いのですが、右上の図のように正のフィードバックと負のフィードバックが同時に存在し（これが振動を生み出すため

の必要条件）、さらに正のフィードバックが伝わる距離が、負のフィードバックのそれよりも短いようにするのが、反応の活性化を促すホルモンと抑制を促すホルモンがあり、抑制ホルモンの拡散の方が早い、ということであれば、チューリング波形成の条件を充たします。

このチューリング波には、驚くべき性質があります。ランダムな状態からスタートしても、秩序のあるパターンが自律的に現れるのです。（波なので、当然、当たり前といえばそうなのですが。）しかも、少し計算のパラメータを変えるだけで、さまざまな動物のパターンが出現します。

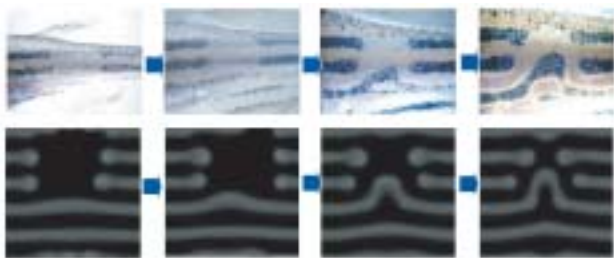


上の図は、皮膚模様の例ですが、他にもいろいろな動物の構造が簡単に作れるのです。チューリング

は、この動かない波が動物の体を作る基本原理であると考えました。

チューリング波が存在する証拠

このチューリングの画期的なアイデアは、斬新過ぎてほとんどの生物学者には信じられていなかったのですが、我々の研究室で、実際にこの波が存在する証拠を見つけています。



上図は、ゼブラフィッシュの縞の一部を消したときに起きる模様変化と、それをチューリングの理論で予想したシミュレーションです。このように、模様は固定したパターンではなく、シミュレーション

で予測されるとおりの動的な性質を持っていることが証明されます。現在我々の研究室では、ゼブラフィッシュを使って模様形成を行っている分子メカニズムの完全な同定を目指しており、それもほぼ完成に近づいてきました。分子が解ると何か良いことがあるのか？と思われる方もおられるかと思いますが、実際良いことがあるのです。実は模様を変化させる遺伝子のいくつかは、体の骨のプロポーションを変化させる遺伝子と同じ種類のものであることがわかっています。ということは、もしかすると体の形を作っているのは「波」ということになるかも知れません。これは、なかなか刺激的なアイデアです。古典力学の時代が終わり量子力学が作られたとき、「万物は波である」という全く新しい真理が存在することがわかりました。それは、生物の体ができる仕組みにも共通しているかも知れないのです。(最後の1文は、眉につばをつけて読んでください。)

