

シマウマの模様はなぜ

「生物の模様」と「数学」の意外な関係

動物園でシマウマを見て、なぜあんな模様をしているのだろう、と不思議に思ったことはないだろうか。生物の模様はどのようにしてつくられるのか、というなぞに、「数学」という武器を使ってせまる研究が今、注目を集めている。記事では数式は使わずに、理論にもとづいたコンピューター・シミュレーションと実際の生物を比較しながら、模様の不思議にせまっていこう。

協力 **近藤 滋**

大阪大学大学院生命機能研究科教授

$$\frac{\partial a}{\partial t} = X(a, b) + D_a \frac{\partial^2 a}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} = Y(a, b) + D_b \frac{\partial^2 b}{\partial x^2}$$

イラストは、生物の模様と、数学（反応拡散方程式）の関係をイメージしたもの。キリン、シマウマ、タテジマキンチャクダイをえがいた。背景は、理論にもとづいて、コンピューター・シミュレーションで再現した模様（チューリング・パターン）の一例である。

できる？



近縁の3種のナマズ(プレコ)の模様と、それぞれとよく似たチューリング・パターン。これらのナマズの模様は、近縁にもかかわらず、かなりことなっている。左からセイルフィンプレコ、キングタイガーペコルティア、フルスポットロイヤルプレコである。

チューリング・パターンは、コンピューター・シミュレーションで再現したもの。三つとも無秩序な状態(各画像の左上の小さな画像)から、自然に模様が浮き上がってくる。シミュレーションの条件をかえると、ことなる模様が生じる(チューリング・パターン形成の詳細は本文や右ページ上のイラストを参照)。

右の二つは、シミュレーションでつくったチューリング・パターンのそのほかの例である。

シマウマはなぜ縞模様をしているのだろう? あんな目立つ模様では、捕食者にねらわれやすく、生存に不利なのではないだろうか? だとすると、どうやって進化したのだろうか? そんな疑問をもったことのある人も多いだろう。

実はあの模様は、生存に有利だとする説がある。「群れでいると、縞模様が重なり合って個体の境界がはっきりしなくなり、捕食者にねらわれにくくなる」というのだ。しかし、それではなぜ、ほかのウマや草食動物は、ほとんど“無地”なのか、という疑問もわいてくる……。

残念ながら「進化」は実験ができないので、縞模様ができた進化的な理由を、実証することはできない。しかし、「生物の体表で、どのようなしくみで模様ができるのか」という問題なら、調べることができるはずだ。生物の模様や、体の形づくりについて研究している大阪大学大学院生命機能研究科の近藤滋教授は次のように語る。「あなたがもし、シマウマの模様を不思議に感じているとしたら、何か複雑なしくみで模様ができあがっていると暗に考えてしまっているのではないのでしょうか? とくに進化的に有利ではなくても、単一色から何かのきっかけで、簡単に縞模様ができるのかもしれない」。

縞模様をもつ生物は、シマウマに限らずたくさんいる。縞模様はむしろ生物の中で、非常にありふれた模様だといってもいいだろう。「しかも、

多くの場合、縞が生存の役に立っているとは考えにくいのです。たとえば、海中で岩のすき間にひそんでいるゼブラウツボ(ヘビのような細長い体をもつウツボの仲間)は、シマウマそっくりの縞模様をもっています。しかし最強の捕食者であり、襲われる心配はないし、基本的に夜行性なので、模様が何かに役に立つとは、とうてい思えません」(近藤教授)。

生物の模様と数学をむすびつけた人物とは?

哺乳類であるシマウマと、魚類であるゼブラウツボは、進化的には非常に“遠縁”だが、縞模様は細部に至るまでそっくりだ。「これだけ似ていると、模様をつくるしくみも共通と考えるのが普通でしょう」(近藤教授)。

一方、進化的に“近縁”でも、模様が大きくことなる場合もある。ページ下の3枚の写真は、プレコというアマゾン原産のナマズの仲間(同属)である。しかし、左から網目模様(濃い色の斑点模様)、縞模様、淡い色の斑点模様(「濃い色の斑点模様」の正反対)と、模様はまったくちがう。

「近縁なら、体をつくるしくみはほとんど同じだというのが、生物学的な常識です。それぞれの種の体表で、まったくことなる仕組みがはたらいっているとは、非常に考えにくいのです」(近藤教授)。これらの事実を無理なく説明しようとする、「生物の体表模様をつくりだすメカニズムは、

近縁のナマズの模様とチューリング・パターン



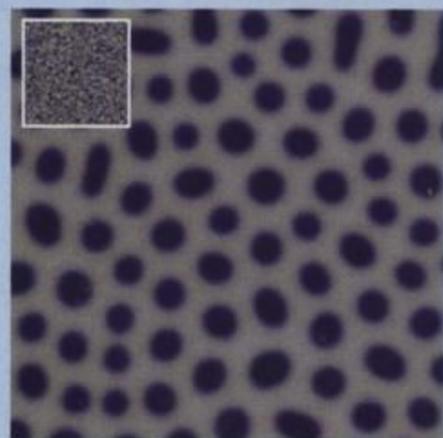
網目模様(濃い色の斑点)



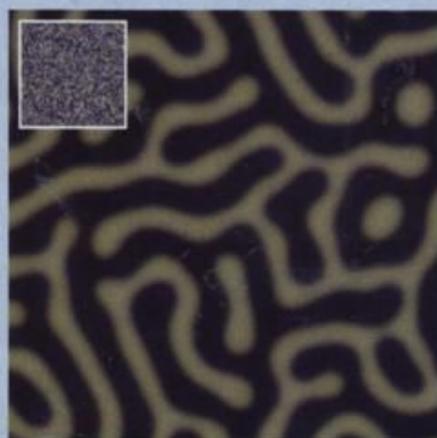
縞模様



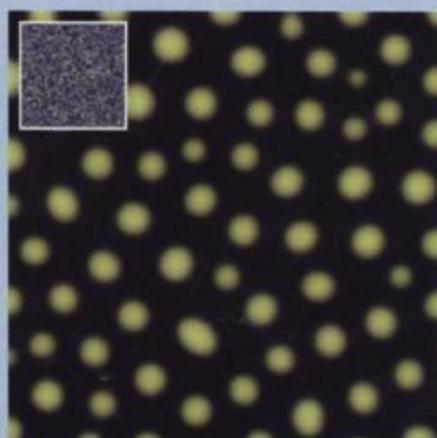
淡い色の斑点



網目模様(青い色の斑点)



縞模様

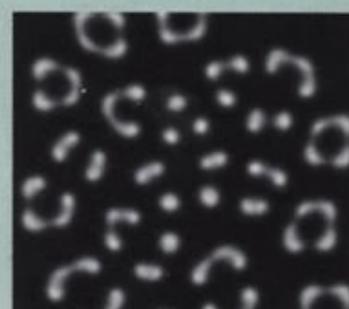


黄色の斑点

そのほかの例



キリンの模様似たチューリング・パターン



ヒョウの模様似たチューリング・パターン

発展内容：反応拡散方程式

$$\frac{\partial a}{\partial t} = X(a, b) + D_a \frac{\partial^2 a}{\partial x^2}$$

aの1秒あたりの変化量 aとbに依存した、化学反応によるaの変化量 aの拡散による変化量

$$\frac{\partial b}{\partial t} = Y(a, b) + D_b \frac{\partial^2 b}{\partial x^2}$$

bの1秒あたりの変化量 aとbに依存した、化学反応によるbの変化量 bの拡散による変化量

※ a, bは物質Aと物質Bの濃度, tは時刻, xは座標(位置), X(a, b)とY(a, b)は化学反応をあらわすaとbの関数, D_a と D_b はaとbの拡散係数(拡散の速さの指標)。

参考までに、生物の模様の形成を説明するチューリングの理論の骨格をなす「反応拡散方程式」を示した(連立偏微分方程式)。簡単に説明すると、物質AとBの濃度(aとb)が、それぞれの合成の促進・抑制の作用や、拡散の作用のもとで、どのように変動するかを示す式だといえる。なお、この式を理解しなくても、記事の内容の理解をさまたげない。

すべての動物で共通であり、しかも、そのしくみは、いろいろな模様をつくりだせる」ということになるだろう。そんな魔法のようなメカニズムが本当にあるのだろうか？ 近藤教授は、「そのなぞを解き明かすために使われる“道具”は、意外かもしれませんが数学です」と語る。

生物の模様と数学をむすびつけた最初の人物は、コンピューター科学の父としても知られるイギリスの数学者アラン・チューリング(1912～1954)だという。1952年、チューリングは、2種類以上の分子がたがいに反応しながら、拡散によって周囲に広がっていくと、縞模様をはじめとする、さまざまな模様が自然に生みだされるということ、数学を使って示したのだ。なお、拡散とは、ある物質が、濃度の高い場所から低い場所へ広がっていく現象のことである。

チューリングの理論の中核をなす方程式は「反応拡散方程式」、生みだされる模様は「チューリング・パターン」とよばれている。チューリング・パターンは等間隔の模様である。実は、等間隔という性質は、模様をはじめとする生物の構造に広く認められる性質でもある。

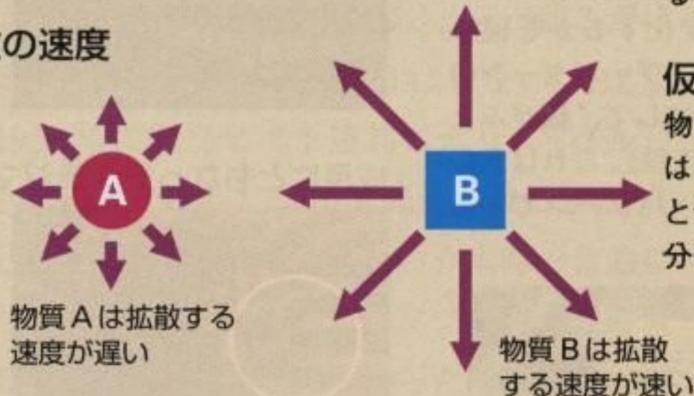
少し複雑だが、理論の概略を紹介しよう。模様が出来る秘密は、2種類の分子が反対の性質を持つことと、周囲に広がっていく速度(拡散速度)がことなることにある。2種類の物質を仮にA、

チューリングの理論の概念図

合成の促進・抑制 AはBの合成を促進



拡散の速度



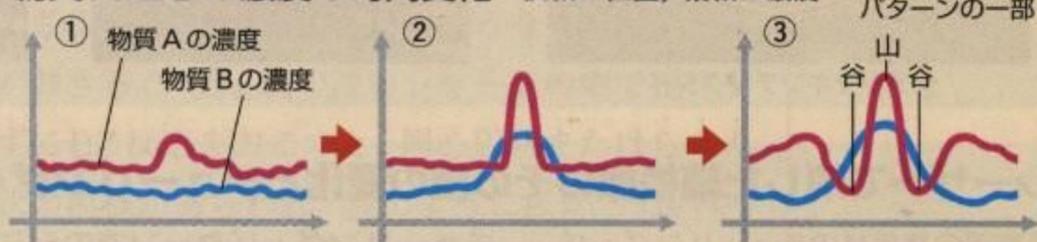
仮定1

物質Aは、自身と物質Bの合成反応を促すと仮定する。物質Bは、物質Aの合成を抑制すると仮定する。

仮定2

物質Aの拡散する速度は、物質Bよりも遅いと仮定する(物質Aの分子の方が大きい)。

物質AとBの濃度の時間変化 横軸は位置、縦軸は濃度 チューリング・パターンの一部



物質Aと物質Bが、上の「仮定1」と「仮定2」を満たしているとする。①Aの濃度にゆらぎがあり、ある場所である瞬間、濃度が少し高まる。②Aがふえると、自身の合成を促進するので、その場所でAの濃度がさらに高まり、鋭い山ができる。Aは、Bの合成も促進するので、Bの濃度も高まる。Bの方が拡散しやすいので、Bの分布の山はAの山よりもなだらかになって左右に広がる。③Bの拡散が速いため、Aの山の左右では、BによるAの合成の抑制作用が効き、Aの濃度が低くなる。このようにしてAの濃度に山と谷のパターン(チューリング・パターンの一部)ができる。

Bとする。Aは自身とBの合成を促進し、BはAの合成を抑制すると仮定する。さらに、AとBの拡散速度を調節して、ある場所ではAの合成が促進される一方で、その周辺では逆にBによるAの合成の抑制が効いてくるようにする。そうすると、合成の促進・抑制のパターンが周囲全体に広がり、AとBの濃度分布が特徴的な模様(チューリング・パターン)をつくりだすのだ(くわしくはページ上の数式の説明や、イラスト参照)。

理論の予測通り、魚の模様が変化した

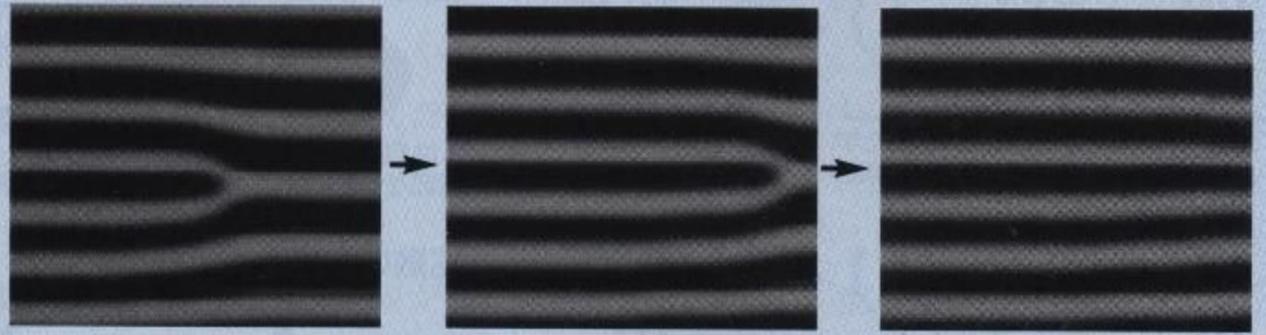
チューリング・パターンには、①模様のない状態から、自然に模様が生みだされる(自己組織化)、②模様を乱しても、自然に元と同じような模様にもどる、③2種類の物質の相互の関係や拡散速度などを微妙にかえることで、縞模様や斑点模様に限らず、さまざまな模様(たとえば、ヒョウ柄など)を生み出せる、という性質がある。

生物の体内でも、何らかの物質がチューリング

タテジマキンチャクダイの模様とチューリング・パターンの変化の一致

等間隔の縞模様のチューリング・パターンにおいて、縞がふえる過程をシミュレーションすると、ジッパーが開いていくようにして、1本が2本になっていく(上段)。一方、近藤教授は、タテジマキンチャクダイの縞模様が成長にともなってどう変化するかを追った。するとチューリング・パターンのふるまいと同じようにして、縞がふえることがわかった(下段)。これは魚の模様がチューリング・パターンであることを示唆している。

チューリング・パターンの縞がふえていくシミュレーション



成長にともなってタテジマキンチャクダイの縞の数がふえていくようす

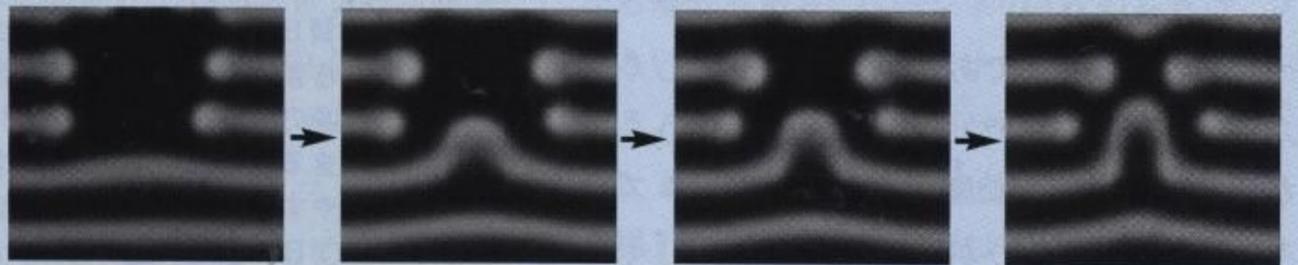


タテジマキンチャクダイ

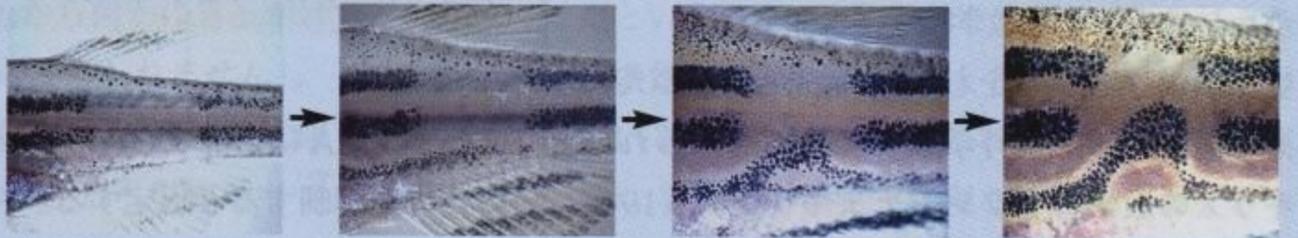
レーザーで消した縞模様のその後の変化とチューリング・パターンの変化の一致

等間隔の縞模様のチューリング・パターンにおいて、縞の一部を消去し、その後の変化をシミュレーションすると、となりの縞が山のように変形しながら、空白を埋めていく(上段)。一方、ゼブラフィッシュの縞模様をレーザー光で消す(熱して色素細胞を死滅させる)と、チューリング・パターンと同じようなふるまいをすることがわかった(下段)。

チューリング・パターンでのシミュレーション



ゼブラフィッシュの縞模様の一部をレーザー光で消去した後の模様の変化



ゼブラフィッシュ

の理論の条件を満たして模様(安定な濃度分布)をつくり、それが何らかの形で体表の実際の模様(色素を生み出す細胞や色素を受け取った毛の分布など)につながっていると考えられている。

100ページのプレコ(ナマズ)の写真の下に示したのは、チューリングの理論にもとづいたコンピューター・シミュレーションで形成されたチューリング・パターンである。模様のない初期状態から、プレコとよく似た模様が形成されている。

生物学者ではないチューリングの理論は発表後、生物学者には、ほとんどかえりみられることなく、長い間、忘れ去られた状態だったという。その状況に風穴を開けたのが、1995年、近藤教授らが科学誌『nature』に発表した論文だった。

近藤教授が目にしたのは、チューリング・パタ

ーンがもつ、「模様を乱しても、元と似た模様にもどろうとする性質」である。生物の模様が本当にチューリング・パターンなら、生物の成長や、外部からの操作によって模様が乱されたときに、元にもどるはずだと考えたのだ。最初に実験に使ったのは、黄色と青色の縞模様をもつタテジマキンチャクダイという魚だった。

チューリングの理論にもとづいて縞模様の数がふえるようすをシミュレーションすると、縞はジッパーが開いていくように枝分かれしていき、最終的に1本が2本になる。近藤教授は、タテジマキンチャクダイの縞の成長過程を観察し、シミュレーションと同じように縞がふえていくことを発見したのだ。タテジマキンチャクダイの縞模様は、死ぬまでこのような変化をつづけ

て、縞の数がふえていくという。

タテジマキンチャクダイはとくにめずらしい魚ではなく、太平洋やインド洋、日本近海にも生息する、スキューバダイバーにはおなじみの魚だ。そんなよく知られた魚に、それまでだれも知らなかった秘密が、かくされていたのである。

近藤教授らは、同じく縞模様をもつゼブラフィッシュを使い、レーザー光を当てて模様の一部を消し、その再生過程を追う実験も行った。すると、縞が消されて“無地”になった部分には、隣の縞が変形しながら侵入してくるようすが観察された。これもチューリングの理論にもとづくシミュレーションの予測と一致する結果だった。

近藤教授によると、現在では、少なくとも魚の模様に関しては、チューリング・パターンであることが、学界でも認められているという。これらの模様を生みだしている細胞レベルや分子レベルでのメカニズムの解明に向けて、現在研究が進みつつある。

チューリングの理論が予測する「移動する模様」

ここまでで紹介してきたチューリング・パターンは、いったん模様ができると、生物が成長したり、人工的に模様を消去したりといったことをしない限り動かない模様である。一方、チューリングの理論が予言する模様（反応拡散方程式の解）には、進行する波のような模様もある。それを化学反応で実現したものとして「BZ反応（ペルーソフ・ジャボチンスキー反応）」が知られている。

BZ反応では、ビーカーの中で、特定の試薬（ページ下のイラストの説明文参照）を複数入れ、

かくはん攪拌しつづけると、溶液が赤色になったり、青色になったりと、交互に変化（振動）するようになる（試薬によって色はことなる）。

化学反応といたら“一方通行”が普通だ。たとえば、紙を燃やすと（酸化反応）、灰が残るだけで、紙がふたたびあらわれたりはしない。BZ反応は1950年に旧ソビエト連邦のボリス・ペルーソフ（1893～1970）によって発見されたが、「化学反応は振動したりしない」という当時の常識に反するものだったため、ペルーソフが亡くなる直前まで、学界では認められなかったそうだ。

ビーカーの中で溶液を攪拌して全体が均一にまざる状態をつくれれば、このような振動する反応がおきる。一方、底の浅いシャーレの中で攪拌せずにBZ反応をおこすと、同心円状またはらせん状の模様があらわれ、波のように広がっていく。シャーレの場所ごとに振動のタイミングがずれて、このような模様があらわれるわけだ。この移動する波を「BZ波」とよぶ。

マウスにあらわれた「移動する模様」

近藤教授らは2003年、マウスの体表にBZ波と似た、移動する波が生じることを示した。次の104ページ下の写真がそのマウスだ。8枚の“顔写真”は一見すると、別々の個体に思えてしまうが、実はすべて同じ個体のものである。日数の経過とともに、黒い模様が波のように体表を移動していくため、このようにさまざまな模様があらわれるのだ。この波の形や変化のしかたは、BZ波とよく似ていた。つまりこの模様も、チューリングの理論（反応拡散方程式）で説明でき

振動したり、移動する波を生みだしたりする化学反応（BZ反応）



臭素酸ナトリウム、硫酸、マロン酸、臭化カリウム（または臭化ナトリウム）、フェロインを混合し、ビーカーの中で攪拌する。すると、赤色の状態（還元状態）と青色の状態（酸化状態）が交互に振動するように入れかわる。



底の浅いシャーレなどの中で、攪拌せずにBZ反応をおこすと、場所によって振動するタイミングがずれて、同心円状の模様や、上のようならせん模様が生じ、波のように広がっていく（①→②→③）。水面上の波紋の場合、波と波がぶつかると、場所によって波が強め合ったり、弱め合ったりして、複雑な模様（干渉模様）をつくる。一方、BZ反応では、波と波がぶつかると、そこで波は消えてしまう。

ると考えられる。チューリングの理論は、魚類にかぎらず、哺乳類を含む生物一般でなりたつことを示唆する結果だといえるだろう。

実験で使われたのは、毛の形成の途中で、毛がすぐに抜けてしまう変異マウスである。このマウスの毛穴(毛包)の中で、毛の形成が始まると、色素細胞が色素(メラニン)をつくり、ではじめの毛に沈着させるので、遠目には皮膚が黒く見える。下のマウスの写真で黒く見えているのは、黒くなった毛包なのだ。

本来なら黒っぽい毛がのびていき、ある長さになったところで止まるのだが、このマウスでは、毛はのびるまもなく色素といっしょに抜けて、皮膚から排出されてしまう。そしてその部分はふたたび色を失うわけだ。「マウスを含むげっ歯類では、毛をつくりはじめた毛包は、となりの毛包にも『毛をつくれ!』と命令を出すことがわかっています。その結果、移動する模様の波ができるのだと考えられます」(近藤教授)。

生物の形づくりもチューリングの理論で?

ここまで生物の体表の模様とチューリングの理論の関係性を紹介してきた。しかしチューリ

ングの理論の適用範囲はもっと広いはずだと考えられている。生物の発生にもチューリングの理論が適用できるというのだ。発生とは、受精卵という1個の細胞から、複雑な構造をもつ個体が形成される過程をさす。つまり「生物の形づくり」のことだ。実は、そもそもチューリングが1952年に発表した、反応拡散方程式に関する論文のタイトルは、「形態形成の化学的基礎」というもので、すでに生物の形づくりとの関係性が論じられているのである。

1個の受精卵は単純な丸い形だ。しかし、細胞分裂をくりかえしていくと、非常に複雑な形態が自然にできあがる。しかもそれはきわめて正確で、頭部に心臓ができたり、胸部に脳ができたりはしない。このような現象がおきるためには、発生過程で、それぞれの細胞は何らかの方法でみずからが体の中のどの位置にいるかを“知り”、場所に応じた機能をもつ細胞に、変化(分化)していく必要がある。

現在までのところ、発生過程で細胞は、「モルフォゲン(形態形成因子)」とよばれる物質の濃度から、みずからの位置情報を得ていると考えられている。単純化していうと、胚(発生初期の個

上段左の写真は、マウスの体表にあらわれたBZ反応とそっくりな模様。毛包に色素が蓄積している部分が黒く見えている。それぞれの縞は、わきの部分から発生し、波のように広がりつつ移動していく。

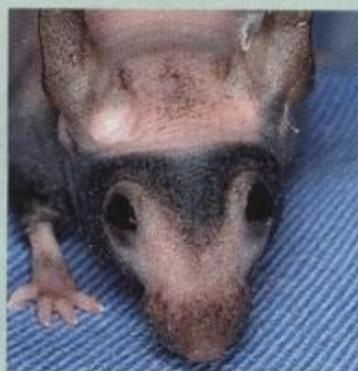
上段右は、マウスの模様とBZ反応の同心円状の模様を比較した模式図。

下の8枚の写真は、このマウスの“顔写真”を1週間おきに撮影したものである。後方と両側のほおから移動してくる波が、顔の中心で衝突するので、毎日顔の模様が変わっていく。

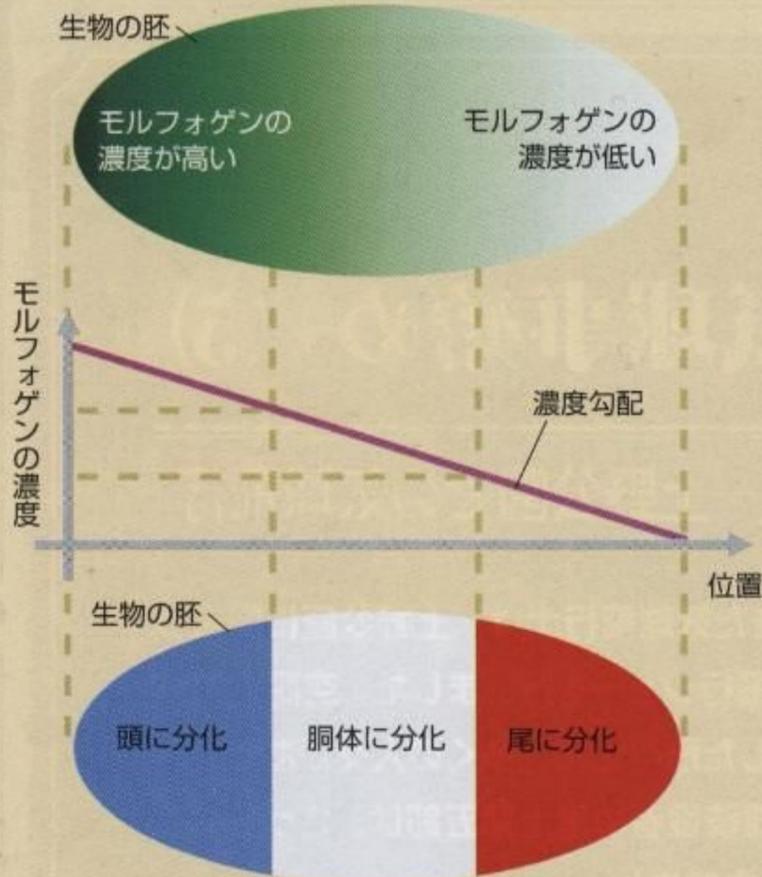
マウスの体表にあらわれた「移動する波」



BZ反応で生じる同心円状の波

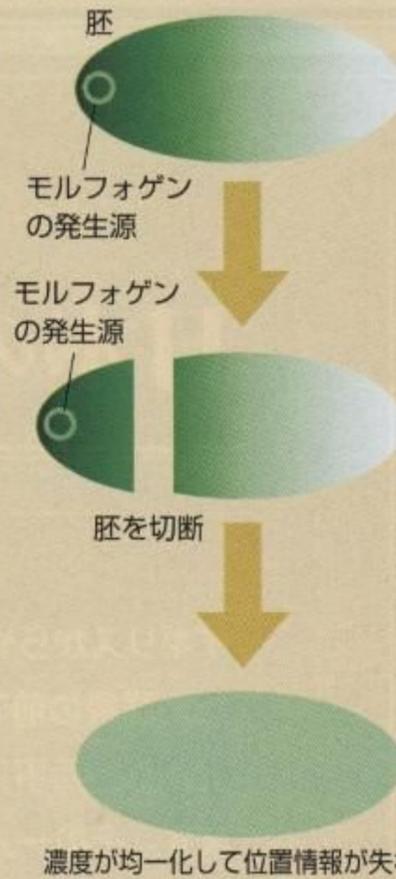


生物の形づくりの基本原則

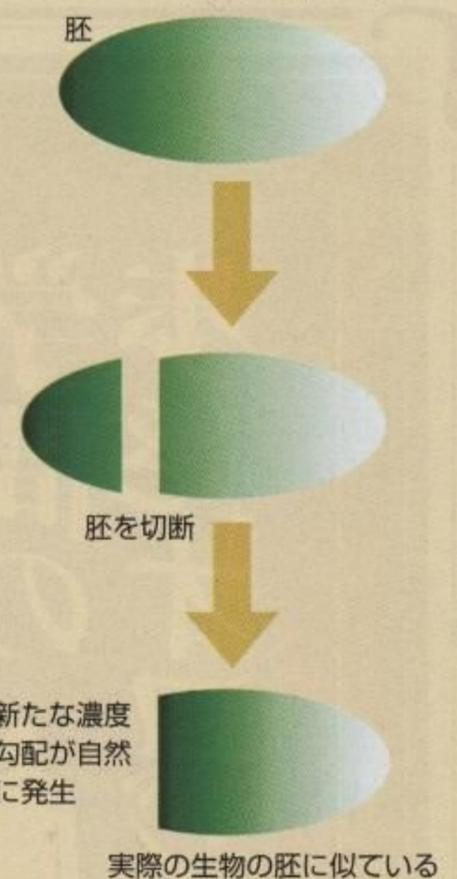


生物の胚（発生初期の個体）において、細胞はそれぞれの存在場所に依りて、たとえば、頭や胴体や尾の細胞に変化（分化）していく。そのためには、それぞれの細胞が「自分がどこにいるのか」という、位置情報を得る必要がある。この位置情報は「モルフォゲン」という物質の濃度がつくっていると考えられている。たとえば、仮にモルフォゲンが上のような濃度勾配をもってしているとすると、濃度が高い領域の細胞たちは頭に、中くらいの領域は胴体に、低い領域は尾に分化するといったぐあいだ。

発生源が一部にかたよったモデル



チューリングの理論のモデル



上は、モルフォゲンの濃度勾配がどのようにしてできるかについての二つのモデル。(左)モルフォゲンの発生源が胚のどこかにあり、発生源に近いところほど濃度が高くなるといった単純なしくみで濃度勾配ができているとする。この場合、発生源を取りのぞいてしまうと、濃度は均一化してしまい、位置情報が失われてしまう。(右)チューリングの理論(反応拡散方程式)では、胚を切断したとしても、新たな濃度勾配(チューリング・パターン)が自然に発生してくる。これは、生物の胚を多少乱してやっても正常に発生がおきるという事実と合っている。

体)の片側でモルフォゲンの濃度が高く、反対側で低い場合、濃度が高い場所では頭の細胞に分化し、濃度が中くらいの場所では胴体の細胞に分化し、濃度が低い場所では尾の細胞に分化するといったぐあいだ。さらに分化した細胞が、別の二次的なモルフォゲンの濃度分布をつくれれば、さらにこまかい構造もつくりだせる。

なお、モルフォゲンは、特定の物質名ではなく、生物の形づくりにかかわる位置情報を生み出す物質の総称である。すでにモルフォゲンのほたらきをもつ、さまざまな物質が見つっている。

しかし、そもそもモルフォゲンの濃度分布はどのようにしてできるのだろうか？ 通常は、「受精卵の一部にモルフォゲンの発生源があって、拡散によって濃度勾配が生じ、遠い場所ほど濃度が低くなっていく」という単純なモデルが研究でも使われている。「しかし、このモデルでは、発生源の位置がはじめから決まってしまうので、位置の情報が『つくられた』わけではありません」(近藤教授)。そのため、このモデルでは、発生源を取りのぞいてしまえば、モル

フォゲンの濃度分布はならされて均一化し、位置情報が失われてしまう。

一方、動物の発生では、途中で人為的に胚が乱されても、元にもどろうとする性質があることが古くから知られている。「たとえば、ウニの胚は二つに分離しても、それぞれが正常な形の個体に成長します。発生のこのような柔軟な性質は、モルフォゲンの発生源を固定したモデルでは説明できません。一方、チューリング・パターンを使って位置情報ができているとすると、自動的に元にもどる性質があるので説明可能です」(近藤教授)。つまり、体表の模様だけでなく、発生段階での生物の形づくりも、チューリングの理論で説明できるかもしれないのだ。現在ではこの方向でも、研究が進んでいる。

「生物の模様はなぜできるのか？」という、だれもが抱くであろう素朴な疑問は、生物の形づくりという、より普遍的ななぞにつながっていた。今後は、生物の模様や形づくりにかかわる分子レベルでのメカニズムの解明が待たれるところだ。

(担当：編集部 高嶋秀行)