

生物の模様と形

近藤 滋 (大阪大学)

要旨

Turing モデルは、動物の自律的形態形成を説明する理論としては、はじめて数学的に定式化されたものである。一般的には、「反応拡散理論」と呼ばれるように、2 種類の化学物質の反応と拡散のパラメータを操作するだけで、様々な空間パターンを作ることができ、その考え方は、Turing による論文の発表後 50 年を経て、漸く、生命科学者の間に浸透してきた。それと同時に、現実の生物系に於いては、オリジナルの Turing モデルの想定とは異なる素過程が機能していることも解ってきている。近藤は、動物の模様形成が、Turing の原理に従って起きる、と言う作業仮説を建てて、約 20 年間研究を行ってきた結果、ゼブラフィッシュの模様形成原理を細胞の相互作用のレベルではほぼ理解することに成功した。ゼブラフィッシュの模様形成は 2 種類の色素細胞（メラノフォア、ザンソフォア）の相互作用によってつくられる。それぞれの細胞の挙動を詳しく解析したところ、全体として Turing の理論から導かれる縞模様形成の必要条件を満たすことが解った。しかし、オリジナルの Turing のモデルとは重要な点で違いがあった。遠距離のシグナル伝達は、モデルで想定されていたリガンドの拡散ではなく、細胞から伸びる突起を介して起きる。それらを数式化すると、確かに Turing Pattern の形成条件（近距離の活性化+長距離の抑制）を満たしていたため、Turing モデルの変形、と解釈することは可能であるが、拡散を使った定式化がそのままでは当てはまらない。現在、多くの実験研究者が、反応拡散モデルを作業仮説に研究を進めているが、皮膚模様の場合と同様、細胞が拡散以外のシグナル伝達法を採用することで、オリジナルの Turing モデルは当てはまらない状況が多数あるはずである。反応拡散にこだわると、存在しない「拡散リガンド」を探し続けることになる可能性もあり、モデルの方の手直しが求められている。講演では、実験サイドからの要請を入れて、より一般化した Turing モデルを提案し、会場の皆さんと一緒に議論したい。モデルから実験系への一方通行でなく、実験事実に基づいたモデルの進化が起こることが、生命科学と数学の融合につながると考えている。

形態進化の研究における化石記録の役割

森田利仁 (千葉県立中央博物館)

化石は過去に生きた生物の記録であり、一般に生物進化の重要な証拠であると言われる。しかし化石を扱う学問である古生物学と、生物進化を扱う進化学はこれまで疎遠な関係にあったのである。なぜなら、化石記録が示す形態進化のパターンが、進化学の主流派の予想と相いれなかったからである。

戦後の進化学をリードしてきたのは、ダーウィンの進化説とそれを継承発展させた進化総合説であったが、その学説では、大進化は小進化よりもより長い時間をかけ、多くの中間段階を経て漸進的に進化してきたはずであった。しかし化石記録は、その逆の進化パターンを示していたのである。形態の大きな変化は、小さな変化と比べてもはるかに急激に、しかも祖先型との関係を示す中間形を伴わず不連続に起きたことを示していたのである。このためダーウィンは、化石記録を進化の不完全な証拠であると切り捨てたのである。

1970年代以降、化石記録が再び進化学の中に復活してくるが、それには、グールド、ラウプ、そしてザイラッハーの3人の古生物学者の功績が大きかったと言ってよい。グールドは、大進化が急激で不連続であるのは決して、化石記録が不完全であるためではなく、記録が膨大でしかも増加している分類群において、顕著な進化パターンであることを明確にした。またラウプは、膨大な化石記録を残している貝類の巻き方を、コンピューターを用いて規則的に描くことにより、過去においても現在においても実在しない巻き方が存在することを示した。形態進化の不連続性をはじめて視覚的に明示したと言っていい。さらにザイラッハーは、生物の形態がその形づくりに関わる様々な物理法則に支配されているため、供給される形態変異が連続的で無限であることはないことを示した。彼らの努力により、古生物学は再び進化学に参画するようになるが、しかし化石記録を含む形態進化の現象を真に科学的に説明するためには、発生や形態形成に関する学問の進展を待たなければならなかった。

21世紀に入り発生遺伝学などは大きく進展し、発生学的視点からの進化研究も盛んとなってきた。その中で化石記録が示す形態の進化パターンはどのように扱われていくのか、注目されるところである。

葉序パターン形成機構の理解のための数理解析

田中吉太郎¹，三村昌泰^{2,3}，二宮広和³

(¹ 北海道大学大学院，² 武蔵野大学，³ 明治大学)

植物の茎に見られる葉や花，種の並びは葉序と呼ばれ，様々な分野の研究者によって古くから研究されている．葉序の中には，螺旋のパターンを表すものがあり，例えば，ひまわりの花序には，隣り合う花同士を結ぶことで右回りと左回りの2種類の違う方向の螺旋を見出すことができる．90%以上のひまわりで，その右回りと左回りの螺旋の本数は連続するフィボナッチ数になることが報告され，黄金比に関係していることが知られている [1]．

原基（花や葉の元となる器官）のいわゆる抑制効果を用いたモデルによって，原基の配置が最適化され葉序パターンができることが経験則的に理解されている．これを元に，存在する原基の位置から距離が離れるように新しい原基を配置する数理モデルが複数提案された．中でも Douady 氏と Couder 氏の磁性流体の反発力を用いた物理モデルが葉序の観察結果を十分に再現することが示されている [2]．しかしながら，近年の分子生物学からの実験結果である，活性因子の働きをもつ植物ホルモン，オーキシンとの関係性は不明であり，植物がどのようにして存在する原基の位置の情報を把握しているのか，もしくはどのような仕組みで新しい原基を存在する原基から離れるように配置しているのかは不明である．そこでこの問題点を明らかにするために，我々は現在知られている茎の先端の構造とオーキシンの極性輸送 ([3]) を考慮して，モデル方程式を構築することから研究を進めた．縮約された我々のモデル方程式の特異極限問題を考えることにより，植物ホルモンの濃度分布と Douady 氏と Couder 氏の物理モデルとの関係を繋ぐ結果を得た [4]．

参考文献

- [1] 早坂靖士，らせん葉序植物における黄金角の有効性について，広島大学修士論文，2004年
- [2] S. Douady, Y. Couder, *Phyllotaxis as a Dynamical Self Organizing Process Part I: The Spiral Modes Resulting from Time-Periodic Iterations*, J. Theor. Biol., **178**, pp 255-274 (1996)
- [3] M. Furutani, Y. Nakano, M. Tasaka, *MAB4-induced auxin sink generates local auxin gradients in Arabidopsis organ formation*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **111**, pp 1198-1203 (2014)
- [4] Y. Tanaka, M. Mimura, H. Ninomiya, *A reaction diffusion model for understanding phyllotactic formation*, Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Springer, **33**, pp183-205 (2016)

エージェントベースシミュレーションによるミツバチ造巣過程の研究

鳴海 孝之¹, 上道 賢太², 本多 久夫³, 大崎 浩一²

1. 山口大学 創成科学研究科, 2. 関西学院大学 理工学部, 3. 神戸大学 医学研究科

集団で行動し人間と似た社会的構造を備える昆虫を社会性昆虫と呼ぶ。社会性昆虫の代表例としてミツバチが挙げられる。ミツバチは、自ら分泌する蜜蝋を材料として、共同で生活するための巣を作る。造巣過程では、まず蜜蝋の薄片を天井に付着し、その薄片に次々と蜜蝋の薄片を付着させていくことで巣を大きくする。こうして完成したハチの巣は、鉛直方向に伸びた平板構造をしており、平板の両面には六角形の枠を持つ穴が規則的に並んでいる。ハチの巣に見られる極めて精緻な構造は古くから研究者の関心を引いてきたが、その造巣メカニズムは未だ明らかにされていない。

我々は、ハチの巣の穴が規則的に並ぶ理由について明らかにすることを目的とし、造巣過程でのミツバチの動きを模擬するエージェントモデルを提案する。ミツバチの群れには女王蜂が存在するが、巣の造巣は女王蜂の指揮下で行われるわけではない。また、働きバチの脳は小さく、寿命も短いため、規則正しい穴を作る方法を学習しているとは考えられない。これらの事実を踏まえて、ミツバチを模するエージェントはできるだけ単純な規則かつ独立に運動するものとしてモデルを構築した。造巣過程でのミツバチの主要な役割は蜜蝋の付着であるが、我々は、ミツバチの造巣過程の観察結果に基づいて、蜜蝋を削り取るという過程が重要な役割を果たすという仮説を立て、これをエージェントモデルに取り込んでいる。

エージェントモデルをシミュレーションに実装することで、ハチの巣における基本構造を再現することができている (図1)。我々は、この基本構造が組み合わさることで規則正しい穴の配列が生まれるものと考えている。蜜蝋の付着が系への蜜蝋の供給、蜜蝋の削り取りが系からの蜜蝋の排出と対応しているため、本エージェントモデルにより構造が現れたことは、ハチの巣が自己組織化によって得られる構造とみなせることを示唆している。発表では、我々が提案するエージェントモデルの詳細を紹介し、数値シミュレーションにより得られたパターンについて議論したい。

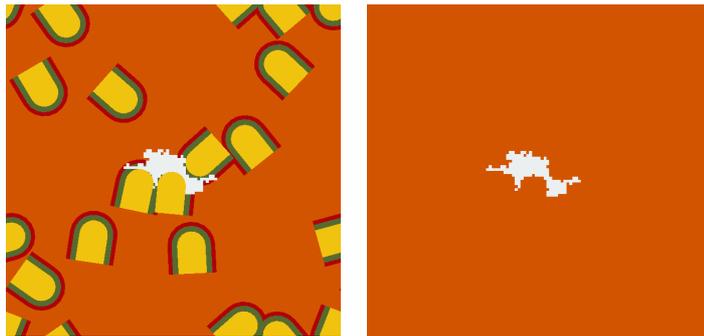


図1: エージェントベースシミュレーションのスナップショット (左) と、蜜蝋のパターンのみを表示したもの (右)

分子遺伝学的視点からみた蝶の斑紋パターンの形成メカニズム

藤原晴彦 (東京大学)

蝶やその幼虫には様々な色の斑紋パターンが見られる。150年以上前に、ダーウィンやウォレスはその美しい斑紋の意味や進化について頻繁に議論し、その後も多くの研究者が蝶の斑紋に興味を持って研究を続けてきた。昆虫の斑紋の基本的なパターンの多くは遺伝学的に決まっている。つまり、斑紋パターンは遺伝子の働きにより生じ、環境によって大きく変化するものは少ない(ただし体色などはホルモンによって変わる場合もある)。斑紋パターンの生物学的意味については、生態学的、行動学的なアプローチから数多くの成果があげられてきたが、斑紋がどのように生じ、進化してきたかについては不明な点が多い。

日本では沖縄などに生息するシロオビアゲハは、一部の雌(擬態型)だけが毒蝶のベニモンアゲハに擬態することで知られる。その雄と非擬態型の雌は擬態型雌とは全く異なる斑紋パターンを持ち、遺伝学的な解析から擬態型と非擬態型を生じさせる原因領域(*H* 遺伝子座)は1箇所限定されていた。(1)何故雌だけが擬態する(できる)のか、(2)何故擬態型と非擬態型の雌が野生集団にいる(維持される)のか、(3)擬態型をコントロールする遺伝子は何なのか、といった疑問は50年以上前から示されていたが、それに対する遺伝学的な解答は得られていなかった。最近私たちは、シロオビアゲハや近縁種のゲノム構造の解明と遺伝子の機能解析により、*H* 遺伝子座を明らかにした。その原因領域には、性分化を制御する *doublesex (dsx)* という遺伝子に加えて2つの遺伝子が含まれていた。また、この領域では染色体の向きが逆転する「染色体逆位」が生じていた。これらの発見は、これまでの遺伝学的な常識とはかなり異なるコンセプトを提示した。染色体の逆位がある領域では組換えが抑制されるために、擬態型と非擬態型の配列の違いは進化の過程で保持、拡大され、擬態型の形質はより洗練されてきたと推測される。一方、*H* 遺伝子座には複数の遺伝子が含まれ、「超遺伝子」と呼ばれる構造をとっていた。原核細胞では、機能的に関連した遺伝子群が「オペロン」として存在することが古くから知られるが、真核細胞の「超遺伝子」の構造や機能についてはほとんど知られておらず、シロオビアゲハはその解明に向けて格好の素材となりうる。3つの遺伝子で最も重要と考えられるのは *dsx* だが、擬態型では擬態型の *dsx (H-dsx)* が、非擬態型では非擬態型の *dsx (h-dsx)* がコードされていた。分子遺伝学的な手法により、擬態型雌の翅で擬態型 *dsx* の機能を抑制したところ、擬態型の翅が非擬態型の翅に変化した。これは予想外の結果で、擬態型パターンと非擬態型パターンの両者が幼虫時から準備されており、蛹になった後に *dsx* によって選択されている可能性が示唆された。本集会では、主にシロオビアゲハの斑紋パターンの遺伝的制御に関して主に話す予定だが、時間が許せば、幼虫の斑紋パターンやそれ以外のトピックについてもご紹介したい。

蝶の翅の斑紋パターン形成モデル

中部大学 関村利朗

E-mail: sekimura@isc.chubu.ac.jp

要旨

蝶の翅は表裏二枚の細胞シートからなり、中間の細胞外物質がそれらを完全に隔てている。翅には二種類のパターン：(i) 鱗粉の配列パターンと (ii) 斑紋パターン(カラーパターン)がある。翅を顕微鏡の下において観察すると、鱗粉が翅の基部から外縁方向に向かって平行に並んでいるのが見える。これが鱗粉の配列パターンであり、全ての鱗翅目昆虫で観察されるものである。一方、斑紋パターンは、平行に配列した数十から数百の色付き鱗粉からなるモザイク模様である。なお、鱗粉は各々が固有の色彩を持った細胞である。

本講演の主題は、複雑で多様に見える斑紋パターンの形成である。この問題は、一言でいえば、『どのような仕組みによって、固有の色素を持つ鱗粉が翅の決まった位置に配置するのか?』ということである。しかし、問題はそう簡単ではない。翅の元となる翅原基(wing disc)の発生と成長を調べる必要がある。その際、斑紋パターンを制御する遺伝子の特定など多くの課題がある。斑紋パターンの多様性を真に理解するには、遺伝子、物理化学、生態学など解明の鍵となる複数の要因の究明とその統合的研究を行う必要がある。

斑紋パターン研究は大きく二つに分かれる。一つは、目玉模様など翅の一部に局在する局所パターン(local pattern)の研究であり、もう一つは、翅全体に広がるグローバルパターン(global pattern)の研究である。グローバルパターンは種の特長などにも使われており、蝶の斑紋パターンの多様性や進化を研究するためには避けて通れないものである。本講演では、斑紋パターン形成に関して提出された局所パターンとグローバルパターン形成の数理モデルを概観し、今後の研究の動向について議論する。

参考文献

- Beldade P., Koops K., and Brakefield P. M. (2002). Developmental constraints versus flexibility in morphological evolution. *Nature*, 416(6883), 844-847.
- Nijhout, H. F. (1991). *The Development and Evolution of Butterfly Wing Patterns*. Smithsonian Institution Press, Washington and London.
- Nijhout, H. F. (1994). Gene on the wing. *Science*, 265(5168), 44-45.
- Sekimura T., Maini, P. K., Nardi J. B., Zhu M. and Murray J. D. (1998). Pattern formation in lepidopteran wings, *Comments Theor. Biol.* Vol.5, No.2-4, 69-87.
- Sekimura T., Madzvamuse, A., Wathen, A. J. and Maini, P. K. (2000). A model for colour pattern formation in the butterfly wing of *Papilio dardanus*. *Proc. Roy. Soc. London*, B 267,851-859.
- 関村利朗 (2005) 蝶の翅のカラーパターン形成と進化, 「非線形・非平衡の数理 4 生物パターンと多様性の数理」(松下貢編) 東京大学出版会、東京、第2章 pp.49-110.
- 関村利朗 (2009) 蝶の羽のカラーパターンとその多様性の生成「数理生物学要論シリーズ 第2巻 空間の数理生物学」(日本数理生物学会編)、共立出版、東京、第7章 pp.113-133.
- 関村利朗 (2015) 斑紋形成の数理モデル解析、「チョウの斑紋形成の生物学」、八木孝司編著、大阪公立大学共同出版会、大阪、第2章 pp.67-92.
- Sekimura T., Venkataraman C., and Madzvamuse A. (2015). A model for selection of eyespots on butterfly wings. *PLoS ONE* 10(11): e0141434. Doi:10.1371/journal.pone.0141434
- Sekimura T. and Venkataraman C. (2017). Spatial variation in boundary conditions can govern selection and location of eyespots in butterfly wings. in book: *Diversity and Evolution of Butterfly Wing Patterns –An integrative approach*, T.Sekimura, H. F. Nijhout (eds). Springer Singapore, Chapter 6 pp.107-118. DOI:10.1007/978-981-10-4956-9_6

魚類網膜の成長による錐体モザイクパターン形成のモデル化と解析

理化学研究所 理論科学連携研究推進グループ 小川軌明*1*2

ゼブラフィッシュなど硬骨魚類の網膜上では、4種の錐体細胞（赤、緑、青、UV）が複雑かつ規則的なパターンを作って並んでおり、網膜錐体モザイクと呼ばれている（図1）。このパターンを形成する機構については、細胞膜上の接着タンパク質の作用による隣接細胞間の結合力を基礎とするモデルが以前より提案されていた [Tohya, et.al., 1998]。しかしこのモデルでは図1(b)のような方向の異なるパターンが排除されず、実際の網膜で一意的なパターン方向が実現されていることとは合致しない。

このモデルで考慮されなかった点として、網膜は外縁で前駆細胞が分裂・付加することによって成長するという事実がある。本研究ではこの効果に着目し、揺らぎを加えて成長過程を確率的に記述する新たな数理モデルを作成した。モデルの基本は、細胞の各列を単位とするマルコフ連鎖である。図2に、我々のモデルによるシミュレーションの一例を示す。ここでは野生型と向き異なる（エネルギー的には等価な）パターンを網膜内側に与え、そこからの成長過程をシミュレートした。図からわかるように、外側に成長するに従ってもとのパターンは崩壊し、新たに野生型のパターンが現れてくる。野生型のパターンに収束する結果自体は初期状態によらず一意である。これらの結果は数学的解析からも裏付けられる。

本系は、形成されるパターンがその過程に依存していて最終状態のエネルギーだけでは定められないものの一例であり、ここではそのことが発生の安定性に繋がっていると考えられる。

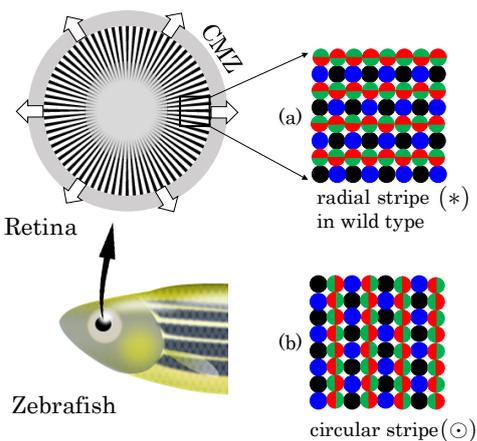


図1 網膜錐体モザイク

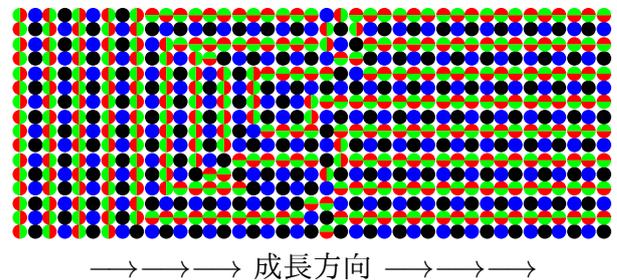


図2 シミュレーション結果例

*1 noriaki@riken.jp

*2 初田哲男氏、望月敦史氏、立川正志氏（いずれも理研）との共同研究。

対称性破壊分岐現象による断層と沈み込み帯のパターン形成

菊地和平^{1*}、長濱裕幸²

1 京都大学防災研究所附属地震予知研究センター *kikuchi.kazuhei.2w@kyoto-u.ac.jp

2 東北大学大学院理学研究科地学専攻

同じ対称性を持つ構造物が、力を受けて変形した際に複数の形態を示す分岐現象は、対称性破壊分岐現象と呼ばれる。例えば、球における座屈（球殻座屈）では、その力に対応した様々な変形（パターン）が表れる。この対称性破壊分岐現象では、初期の高い対称性を持つ構造から鏡像や回転等の対称性を失った（対称性の低下した）パターンが表れる。海洋プレートの沈み込みは、対称性の低下をもたらす球殻座屈現象の一つの例である（Kikuchi and Nagahama 2016）。また高次歪みを伴う座屈のメカニズムを記述する方程式の一般化が、リーマン幾何学を用いて行われている（Kikuchi and Nagahama 2017）。一方、断層帯（剪断帯）の変形岩には、主断層面と斜交する方向にリーデル剪断面（地殻に応力を与えた場合、変形がその応力と斜交した方向に一定間隔で集中して発生する面）が見られる。リーデル剪断面の形成も、座屈現象による対称性の低下に対応している。このような亀裂の成長過程は非線形現象であり断層の一形態であるエシュロン断層（雁行配列した断層パターン）出現のメカニズムを群論的分岐理論（e.g., Chiba and Nagahama, 2001）により説明することが可能である。例えば、Murota et al. (1999) は、土壌試料の三軸圧縮試験における亀裂のエシュロン配列の出現が、非線形方程式の群論的分岐理論に基づくパターン分岐により説明できることを示した。また、Kaneko et al. (2017) は地質試料を変形させた時に、塑性指数の違いによりダイヤモンドやバルジ等の剪断パターンが発生することをCam-clayモデルに基づく分岐理論で説明している。このような非線形現象に対する釣り合いの式において、直接現象に関連しない変数と関連する変数を分離することにより、パターン形成に関わる分岐方程式を導出することができる（池田 ほか, 1998）。そこで、本講演では海洋リソスフェアの沈み込みや断層帯でのリーデル剪断面の形成に対する座屈方程式を導出し、その方程式の対称性破壊分岐解を検討することにより、対称性の低下を通して地球科学にみられるパターン形成が統一的に扱える事を紹介する。

引用文献

Chiba, T. and H. Nagahama, *FORMA*, Vol. 16, pp. 225-231, 2001.

Kaneko, N., J. Muto, and H. Nagahama, *International Journal of GEOMATE*, Vol. 13, pp. 19-35, 2017.

Kikuchi, K. and H. Nagahama, *Abstract of Asia Oceania Geosciences Society 2016*, SE18-D4-PM2-P-022, Beijing, China, July 31-August 5, 2016.

Kikuchi, K. and H. Nagahama, *Proceedings of GEOMATE-Mie 2017*, Tsu, Mie, November 21-23, 2017. (Accepted)

Murota, K., K. Ikeda, and K. Terada, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 170, pp. 423-448, 1999.

池田清宏, 中沢正利, 水木麻雄, *構造工学論文集*, Vol. 44, pp. 275-284, 1998.

3次元的な形態の多様性の力学的基盤 ～細胞の力学の理論的な推定に基づく解析～

小山 宏史*^{1,2}, 藤森 俊彦^{1,2}

Hiroshi Koyama and Toshihiko Fujimori

¹基礎生物学研究所 初期発生研究部門, ²総合研究大学院大学

動物の発生においては、細胞集団は3次元的に多様な形態を提示する。形態を決める直接的な要因は機械的な力である。しかし、どのような力によって多様な形態が実現されているのかは十分には理解されていない。本研究では、細胞集団の動きの顕微鏡ライブイメージングのデータと、ベイズ統計/データ同化の方法を組み合わせることで、細胞が発揮する力を統計的に推定する方法を構築した。この方法を、MDCK培養細胞のシスト (= 中空構造を持った細胞集団)、線虫初期胚やマウス初期胚等に適用し、力の時空間的变化を推定した。推定された力を統計的に解析したところ、細胞が発揮する力の値を予測できる数学的なルールを発見した。さらに、このルールに基づいた数理シミュレーションを行うと、実際の細胞集団が示す形態を再現できた。このルールを簡単な数式としてモデリングし、形態に対するパラメータの影響をシステムティックに解析した結果、密集構造、中空構造、2次元シート、管腔構造、カップ構造など、多様な形態が出現することが分かった。面白いことに、パラメータを変えるだけで、2次元と3次元の両方の形態を説明できた。以上の結果は、上記の数学的なルールが、形態の多様性を説明する原理になりうることを示唆する。また、本方法は、今回扱った細胞塊や上皮細胞集団のみならず、間質系細胞集団や自己推進型細胞 (self-propelling cells) に対しても応用できる可能性がある。実際の発生においては、上皮細胞と間質系細胞が混在することも多く、こうした現象への応用を考えている。

マウス胚心臓のヘリックスループ形成

本多久夫 (神戸大学大学院医学研究科)

生物の形のつくられ方を知りたく思っている。生物は多彩な形を提示するが、生物であってもそれは物質からできているのだから physico-chemical や mechano-physical な原理に基づいているはずである。作り手がいてその意志によって形ができるのではなく、物質科学で知られている自己組織化・自己構築がはたらいっているに違いない。これは数理モデルで記述されるものである。生物ではこれに加えて遺伝子のはたらきがある。生物の形づくりはこれらの総合である。

このようなことを考えながら、多細胞動物の形が細胞の集まりとして形成されるありさまを記述する方法を考えた。細胞は遺伝子の働きで特有の性質を発現している。この細胞の集まりが組織となって初期胚や器官の形を形成する。多面体の集まりの形は、多面体の頂点 (vertex) とそのつながり (edge) で表すことができる。Vertex dynamics とよばれる運動方程式系をつかえば、頂点の座標が計算でき、多面体集合が取りうるさまざまな形の中で安定な形を知ることができる。条件を与えればひとりでに形ができあがるのだ。

このシステムをつかって、単なる細胞の塊であったものの中に空所ができ、胚盤胞とよばれる哺乳動物の発生過程の初期が再現できた。また細胞塊が外からの力なしに自ら細長く伸張していく不思議な現象 (cell intercalation) を理解することができた。

今回はマウスやトリの初期胚の心臓でみられる、はじめは心筋細胞でできた単純なチューブであったものが成長と共にねじれて、左ねじ方向のヘリックスループをつくる現象を調べた。チューブの異所的な成長の違いだけでは、チューブは曲がるがヘリックスループにはならない。そこでヘリックスがキラルな構造である事を考えて、心筋細胞の位置が細胞分裂の際に少し左回転するというキラルな性質を仮定した。チューブはうまくループした。つづいてのマウスの観察で心筋細胞はほんとうに少し左回転することを確認することができた。これは阿部高也博士 (理化学研究所・ライフサイエンス技術基盤研究センター・生命機能動的イメージング部門) および藤森俊彦教授 (基礎生物学研究所・岡崎) との共同研究である。モデルが理論的に示唆したことがその後実験室で確かめられるという研究例になった。

半乾燥地域に現れる植生パターンと砂漠化

出原 浩史*

宮崎大学 工学教育研究部

近年、様々な環境の変化による砂漠化の進行が深刻な問題となっている。この砂漠化には、気候変動による雨量の変化といった自然環境の変化から、過放牧による植物の減少や不適切な方法による灌漑といった人為的なものまで様々な要因があると言われている。一旦砂漠になってしまうと元の環境に戻すことは非常に困難であるので、砂漠化の進行を阻止することが必要となっている。

一方、砂漠化が進行しつつあるような半乾燥地域では、植物が一様に生えているのではなく、パターンをつくるのが昔から知られている。つまり植物がパターンをつくることは砂漠化へのシグナルとして認識されているが、そのパターン形成メカニズムはよくわかっていない。そのため、数理モデルを用いた理論的なアプローチが行われてきた ([1])。特に、半乾燥地域における植生パターンはチューリングパターンに類似していることから反応拡散系に基づく数理モデルが数多く提唱されてきた ([1, 2])。しかしながら、植物の密度を拡散で記述することは適切ではないという理由から Pueyo らは拡散項の代わりに非局所項を導入した数理モデルを提唱した ([3])。本講演では、Pueyo らの数理モデルの特徴を説明し、そのモデルの解析結果を紹介する。また、その結果に基づいて砂漠化と植生パターンとの関係を明らかにしたい。

参考文献

- [1] F. Borgogno, P. D’Odorico, F. Laio and L. Ridolfi, *Mathematical models of vegetation pattern formation in ecohydrology*, *Reviews of Geophysics* **47** (2009) 2007RG000256.
- [2] R. HilleRisLambers, M. Rietkerk, F. van den Bosch, H. H. T. Prins and H. de Kroon, *Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems*, *Ecology* **82** (2001) 50–61.
- [3] Y. Pueyo, S. Kéfi, C. L. Alados and M. Rietkerk, *Dispersal strategies and spatial organization of vegetation in arid ecosystems*, *Oikos* **117** (2008) 1522–1532.

*Email: izuhara@cc.miyazaki-u.ac.jp 〒 889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1

砂丘のパターン形成とダイナミクスの数理モデリング

西森 拓 (広島大学大学院理学研究科)

大規模な砂丘は、その美しさで多くの旅行者を魅了するが、一方で、周辺の集落や農地を浸食し、また、道路や石油パイプラインを寸断するなど、人々の生活に負の影響をもたらしてきた。砂丘の動きを予測・制御し、砂丘と人間が共生するためには、その基本的な性質を理解することが欠かせない[1][2]。近年になって、航空写真や衛星による広範な画像データが取得できるようになり、砂丘のダイナミクスを定量的に扱うための土台が整ってきた。また、計算機で砂丘の形成過程や運動をシミュレートする「計算砂丘学」も発展しつつある。ただし、計算機による「現象の再現」は、必ずしも、「現象の理解」や「予測・制御」につながるわけではない。(これは様々な現象に関しての数理モデリングを行う際の共通の問題とも言える。)

「再現」と「理解」の距離を埋める試みの1つとして、筆者らは、異なった4種類の砂丘--バルハン、横列砂丘、線状砂丘、星形砂丘--の形状選択のしくみ、および、バルハンの衝突過程を、それぞれ、きわめて単純な理論的枠組みで扱う方法を提案した[2]-[4]。

本研究会で我々は、砂丘の複雑なパターン形成とダイナミクスをできるだけ平明なロジックで理解するために我々が行ってきた試みを紹介する。

参考文献

- [1]A.Warren: “Dunes”, John Willey & Sons Ltd.(2016).
- [2]坪田誠,西森拓:”超流動渦のダイナミクス／砂丘と風紋の動力学”,培風館 (2008) .
- [3]西森拓(分担執筆): 「キリンの斑論争と寺田寅彦, 岩波科学ライブラリー,分担分「風紋と砂丘」 80-96(2014).
- [4]L.Guignier, H.Niiya, H. Nishimori, D. Lague, A. Valance, “Sand dunes as migrating strings”, Phys. Rev.E, 87, 052206 (2013).