

エンゼルフィッシュの縞模様の研究

—科学を楽しむということ

近藤 滋

私たち科学者にとって、科学をすることは仕事です。仕事を楽しければ最高ですが、なかなかそうはいきません。実験は重労働ですし、生活もかかっています。何か大発見が、目の前に転がっていたりすれば楽しいのですが、そんなことはあるはずもないと思っていました。ところが、なんとあったのです、金魚屋の水槽の中に！！というわけで、本稿は私の経験した「楽しい」科学の物語です。

▶ はじめに

「科学を楽しむということ」について、自分の経験や日頃考えていることなどを書かせていただくことにしました。ほかの人の参考になるかどうか分かりませんが、もしそうなれば幸いです。

本論に入る前にすこし横道にそれまして、そもそも「科学は楽しむものなのか？」ということについて、少々考えてみたいと思います。

19世紀ころまでの科学者、例えば生物学の神様の1人であるC. Darwinにとって科学は楽しむものであったのでしょうか。Darwinはもともと貴族で金持ちで、生涯に一度も生活費を稼ぐということをする必要がなかったという、大変幸せな人でした。研究にかかる費用も自分で出してしまうのですから、楽しくないことをする必然性は全くありません。きっとDarwinなら「楽しむものにきまっとる」と断言してくれるのではないのでしょうか。しかしながら、20世紀の終わりに生きる私たちにとってはどうでしょう。今日、研究にはかなりの費用、時間、労力がかかり、個人の負担で賄えるようなものではありません。国から研究費をもらっている以上、なにかの役に立つことが望まれるのが当然です。ですから、あまり実用性のなさそうな

ことを研究する場合に「俺は楽しいからやってるんだ」とは、大きな声ではいいにくいので、少々理論武装する必要が生じます。私はこう言う（考える）ことにしています。「科学はエンタテインメントだ」と。新しい発見やアイデアは、常に人の知的好奇心を興奮させ、満足を与えることができるのだから、それだけでも十分に税金を使う価値があるのだといい切ってしまうでしょう。自分が楽しめないようなことを、他人が楽しんでもくれるはずはないので、「本人が楽しい」ことが非常に重要です。さあみんな（小さな声で）唱えましょう。「ザッツエンタテインメント！！」。

▶ 1 研究テーマを選ぶ

科学の楽しみとは、パズルを解くようなものだと思います。解答を得たときの快感が大きくあるためには、問題自身に魅力がなければなりません。「自分」がどのくらい魅力を感じるかです。だから、「とりあえず論文が書けそうだ」とか「この分野がこれからホットだろう」とかでは思い込みが足りません。それから具体的な実験系（研究対象）を選ぶときも、よく考えてください。その研究を完成させたとき、自分は本当に「解答を得た」と思えるようなものを選ぶことが必要でしょう。

私の場合、高校生のころから“発生”が好きでした。

Stripe patterns on the Angelfish

Shigeru Kondo : Department of Medical Chemistry, Kyoto University, Faculty of Medicine (京都大学医学部医化学第1講座)

小さい卵から、限りなく複雑で精巧な動物の体ができることは、まさに驚異の一言です。発生の不思議さの原点は、卵の単純さと成体の複雑さとの間にある巨大なギャップです。生物界以外では、現象は常に乱雑さが増す方向に向かうのに対し、発生では逆に、秩序だった方向へ進むかにみえます。しかしながら、生物においても、物理化学の法則はゆるぎなく成立しているはずなのです。私にとっての発生の魅力は、まさにこの発生現象と物理化学との矛盾でした。だから、私にとっての発生の研究は、この矛盾に対して何らかの解答を与えるものでなければならなかったのです。

私がバーゼル大学のGehring教授のところに留学したときは、1995年のノーベル賞を受賞したVolhardなどによる、ショウジョウバエの分節遺伝子の研究が一段落したところで、発生（形態形成）に対するセントラルドグマのようなものが、ほぼコンセンサスとしてできあがっていました。すなわち、「受精卵にもともと存在する位置情報（分化因子の濃度勾配）を読みとって、それぞれの細胞が位置特異的に細胞分化し、その後分化した細胞の一部が新たな分化因子を出すことにより、分化誘導のカスケードが起き、細部の発生

（形態形成）が進む」という仮説です。もしこの仮説だけで本当に発生のすべてが理解でき、私たちは単にまだすべての分子（遺伝子）を特定できていないだけなのであれば、私にとって発生は興味の対象ではなくなってしまいます。もう不思議な現象ではなくなってしまうからです。しかし、このドグマは全く私を満足させてくれません。なぜなら、この仮説では分化誘導のカスケードが起きるとき、新たにできる位置情報が常に前段階の位置情報に依存することになり、結局すべてが卵の位置情報に依存することになってしまうからです。卵の単純さと成体の複雑さ精巧さや、イモリの足や尾の再生現象を思い浮かべれば、どう考えても卵にすべての位置情報があるとは思えません。ともかく、発生のような驚異的な現象が、こんな当たりまえの原理で起きるとはとうてい思えなかったのです。

驚異的な現象を理解するためには、あっと驚く原理がなくてはなりません。となれば、やるべきことはそれをなんとか探してくるか、なければ自分で創るかです。

●プロフィール●

経歴：1982年東京大学理学部生物化学科卒業、'82～'84年大阪大学医学研究科医科学修士過程、'84～'88年京都大学医学研究科博士課程、'88～'90年東京大学医学部第1生化学（ポスドク）、'90～'92年バーゼル大学バイオセンター（ポスドク）、'92～'94年京都大学遺伝子実験施設、'95年～、京都大学医学部医化学第1講座

趣味：当然、熱帯魚。魚は食うのも、みるのも、研究するのもだいすき。山口智子の大ファン。ロンバケはいちども欠かさずに見た。休みのときは掃除洗濯。たまに西宮でヨット。
生物に興味をもったきっかけ：大学に入ったころは、数学がやりたかったが、解析学であつという間に落ち



こぼれたため、生物に転身。今だに数学には未練とあこがれがたっぷり。研究における希望：形態形成や神経系など、個々の細胞が1個単位で互

いにコントロールしあって変化していくような系では、複雑さが大きくなりすぎ、個々の生体分子や遺伝子の解析では完全な理解が得られないことが、いずれわかってくると思う。どんなに1個のトランジスタを完璧に調べても、コンピューターのことを理解できないのと同じである。そのときには、分子以外の何かを生物を理解するための言葉として使わなければならなくなるだろう。分子生物学の次にくるのは何だろうか？それを知る最初の人間になりたい。もし知ってる人がいたら私にメールを送るように。

それから、本稿を読んだ感想、ご意見、そのほかがあればぜひお聞かせください。

連絡先 〒606 京都府京都市左京区吉田 京都大学医学部医化学第1講座
Fax: 075-753-4388, E-mail: skondo@mfour.med.kyoto-u.ac.jp

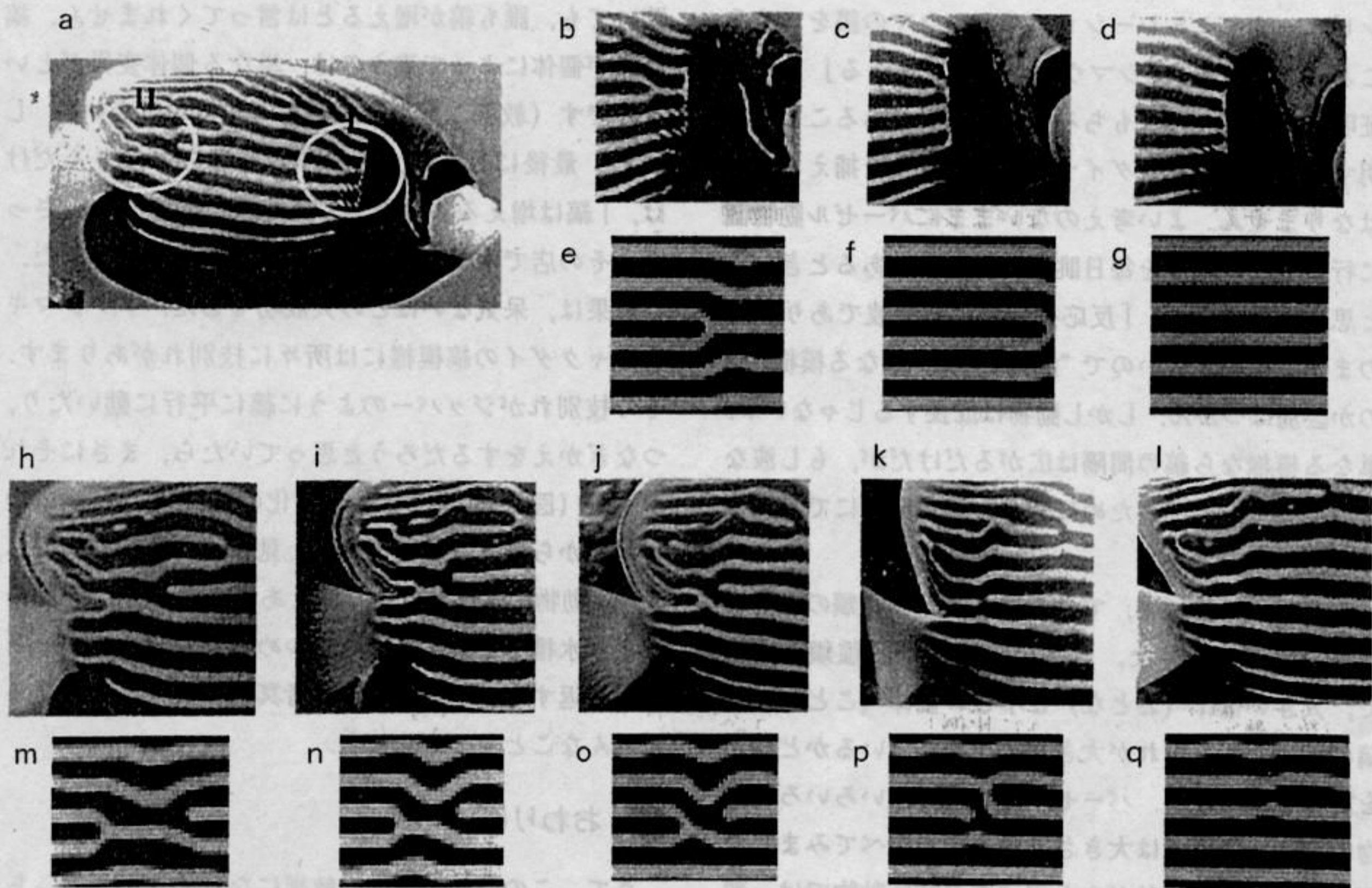


図1 タテジマキンチャクダイの縞模様の変化とそのコンピュータシミュレーション (文献3より転載)
 タテジマキンチャクダイのIの部分の模様は、成長とともにb→c→dのように変化した。縞の分岐点が右に移動し、ストライプの乱れが解消されている。e→f→gは反応拡散波に基づくシミュレーション。実際の魚で起きた変化と全く同じ変化が起きている。h→i→j→k→lはIIの部分に起きた模様の変化。分岐点と断端が融合してストライプの乱れが解消されている。この変化もシミュレーションによる予測 (m→n→o→p→q) とぴったりあう

2 Turingの反応拡散波は位置情報をつくりだす

幸運にも、私の欲する理論はすぐに見つかりました。師匠のGehringが、「自分はよく理解してはいないのだが、こんな論文がある」といって教えてくれたのが、Turingの反応拡散波理論¹⁾でした。反応拡散波とは、2つ以上の物質がある特定の条件を満たしてお互いの合成を制御しあうとき場に生じる、安定な繰り返しパターン(物質の濃度による定常波)のことです。Turingは、それが動物の胚に正確な位置情報を与えると考えたのでした。波が生じることにより、それまで陰も形もなかった(波長という)位置情報がかってにできあがるのですから、これはまさに発生の神秘を解決する可能性があるかと直感しました。しかし、反応拡散波は、数学的に導き出された単なる仮説にすぎず、実例

が化学の分野でも生物学の分野でも見つからなかったため、40年以上ほとんどの生物学者に知られずにいたのでした。

ところが、'91年に2つのグループが実際に反応拡散波を化学的につくることに成功し、Turingの予言はついに現実のものになりました。“Stripes from Dreams”と題された解説文²⁾で理論生物学者Winfreeは「次は生物だ」と生物学者を煽りました。このようなことを言われれば「見つけてやろうじゃないか」という気になりますよね。

3 動く模様をもつ生物はいないか？

'70年代に数人の理論生物学者が、コンピュータシミュレーションでできるパターンとの相似から、動物の皮膚の模様が反応拡散波であろうという指摘をしてはいましたが、決定的な証拠がありませんでした。コ

コンピュータシミュレーションでシマウマの縞をつくる
ことができても、「シマウマの縞が波である」という
証明にならないのはもちろんです。波であることを証
明するには、なにかダイナミックな変化を捕えなくて
はなりません。よい考えのないままにバーゼル動物園
に行ってシマウマを毎日眺めていたら、あるとき、ふ
と思いつきました。「反応拡散波は定常波であり、そ
のままでは動かないので“波”なのか“単なる模様”な
のか区別はつかん。しかし動物は成長するじゃないか。
単なる模様なら縞の間隔は広がるだけだが、もし波な
ら間隔を一定に保つために新しい縞が徐々にできてく
るに違いない!!」

この考えに基づき、できる限り多くの種類の生物の
模様を検索しました。具体的には、同じ種類の動物
で、大きい個体（おとな）と小さい個体（こども）の
縞の数を数え、それが大きさに比例しているかどうか
を計算するのです。バーゼル動物園で、いろいろな動
物の模様を眺めては大きさと縞の数を比べてみまし
たが、残念なことに私がみたすべての哺乳動物では、親
も仔も同じ数の縞（あるいは斑点）をもっており、成
長に伴って単に幅が広がっているだけでした。がっかり
しましたが、まだまだあきらめません。バーゼル動物
園にはかなり立派な水族館もあったので、今度は魚
に望みをかけました。珊瑚礁に棲む熱帯魚の模様は哺
乳動物よりも、非常にバラエティに富んでおり、かな
り期待がもてそうでしたが、たいていの水族館の場合、
1つの種類は1匹しかおらず、比較は結構めんどろ
うでした。それでも、図鑑に載っている写真なども利用
することによって、なんとかいくつもの有力な候補を選
び出すことができ、その1つが *Pomacanthus imperator*
(タテジマキンチャクダイ) でした。しかし、い
ずれにしろ飼ってみて、実際に模様の変化を記録しな
いことには話しになりません。

4 ▶ タテジマキンチャクダイ

バーゼル大学から京都大学に戻ってきてから、関西
中の熱帯魚屋と水族館を回り、縞の数と大きさを数え
続け、タテジマキンチャクダイの縞の数が体長に比例
して増えることに確信をもちましたが、魚の専門家の
誰に聞いても、また毎日熱帯魚をみているお店の人に

聞いても、誰も縞が増えるとは言ってくれません。縞
の数が個体によって違うのは、単なる個体変異だとい
うのです（教訓：専門家を信用してはいけない）。し
かし、最後に行った大阪の熱帯魚屋のおばさんだけ
は、「縞は増える」と断言してくれたのでした。さっ
そくその店で水槽と魚を買い、観察を開始しました。

結果は、呆気ないほどの大成功でした。タテジマキ
ンチャクダイの縞模様には所々に枝別れがあります。
その枝別れがジッパーのように縞に平行に動いたり、
つなぎかえをするだろうと思っていたら、まさにそれ
が起き（図1）、そしてその変化の過程は、Turingの
方程式から計算される予測と、見事に一致したのでし
た³⁾。動物の体に波はちゃんとあったのです。感動の
あまり水槽をアホのように見つめながらガッツポーズ
を繰り返す毎日でした。科学者冥利につきるとはまさ
にこんなことなのでしょう。

▶ おわりに

さて、この話しが何かの教訓になるのかというと、ち
よっと考えこんでしまいます。読んでいて感じたと思
いますが、よっぽどの幸運がないとこうはいかないで
しょうし、奇蹟みたいなものかもしれません。しかし
まあ「こういうこともある」のですよ。この研究に関
しては、水槽も魚も自腹で買って、アパートで魚を飼
い、ホームビデオでデータをとったという究極の貧乏
研究でした（だって魚の縞が動く、なんていきなり書
いても科学研究費がもらえるはずないですから）。高
価な機械も、試薬も、場所も使っていません。だから
アイデアさえあれば、誰にだって（学部学生だろうと、
高校生だろうと）この程度のことはできないことはな
いのです。自分のアイデアで自分の好きなことをやる
楽しさは、こたえられないものです。教授になってか
らなんて思わずに、考えるだけでも明日からはじめて
みてはどうですか？

文献

- 1) Turing, A. M.: Phil. Trans. Res. Soc., B237: 37-72, 1952
- 2) Winfree, A.: Nature, 352: 568-569, 1991
- 3) Kondo, S. & Asai, R.: Nature, 376: 765-768, 1996