

赤い色素をもつ藻類が繁殖することで雪の表面が赤く見える赤雪は、「雪上の赤潮現象」とも呼ばれる。北極や南極、積雪が残る高山など世界各地で観察される。【Researchより】

撮影：瀬川高弘 撮影地：南極半島、リビングストン島

今号テーマ

## 地球というわたしたち

生命の性質は、地球と密接に関わっています。宇宙から降り注ぐ光、地球の内側から溢れるエネルギー、地球に生まれた生きものはこの舞台の上で、変化をし続けて現在に至ります。パースペクティブでは陀安一郎先生が元素の同位体という解像度から生命と地球の物質循環を見つめます。北極から南極へ移動する藻類、太古の海は一体どんな色だったのでしょうか。原始の多細胞動物から生きものの進化を探求する研究者は今何を思うのか、アカデミアで語り合います。サイエンティストライブラリーは、プラナリアから再生の可能性を広げた阿形清和先生です。謎解きの楽しさを語り合うのは近藤滋先生と永田館長。最後のピンタゾウガメの声に耳を傾け、今こそ共に地球に生きる道を考える時です。

もくじ

### LECTURE & TALK

#### 生命科学から味わう謎解きの楽しさ

近藤 滋 国立遺伝学研究所所長

永田和宏 JT生命誌研究館館長

### RESEARCH & PERSPECTIVE

#### 地球というわたしたち

### RESEARCH

#### 太古の海を漂うシアノバクテリア

緑の光環境と生命の進化

松尾太郎 大阪大学 大学院理学研究科

#### 世界を旅する赤い藻類

極限環境微生物の地理的分布

瀬川高弘 山梨大学 総合分析実験センター

### ACADEMIA

#### 原始多細胞動物の世界

〈ゲノムと実験研究から迫る未踏の知〉

### SCIENTIST LIBRARY

#### 阿形清和

基礎生物学研究所・京都大学 名誉教授

再生研究に魅せられて

青年は京都をめざす

### PAPER CRAFT

絶やすのはたやすい消えた動物

ピンタゾウガメ JT生命誌研究館

### BRH NEWS

「細胞がからだを建築するしくみを探るラボ」  
企画展準備中!



LECTURE & TALK

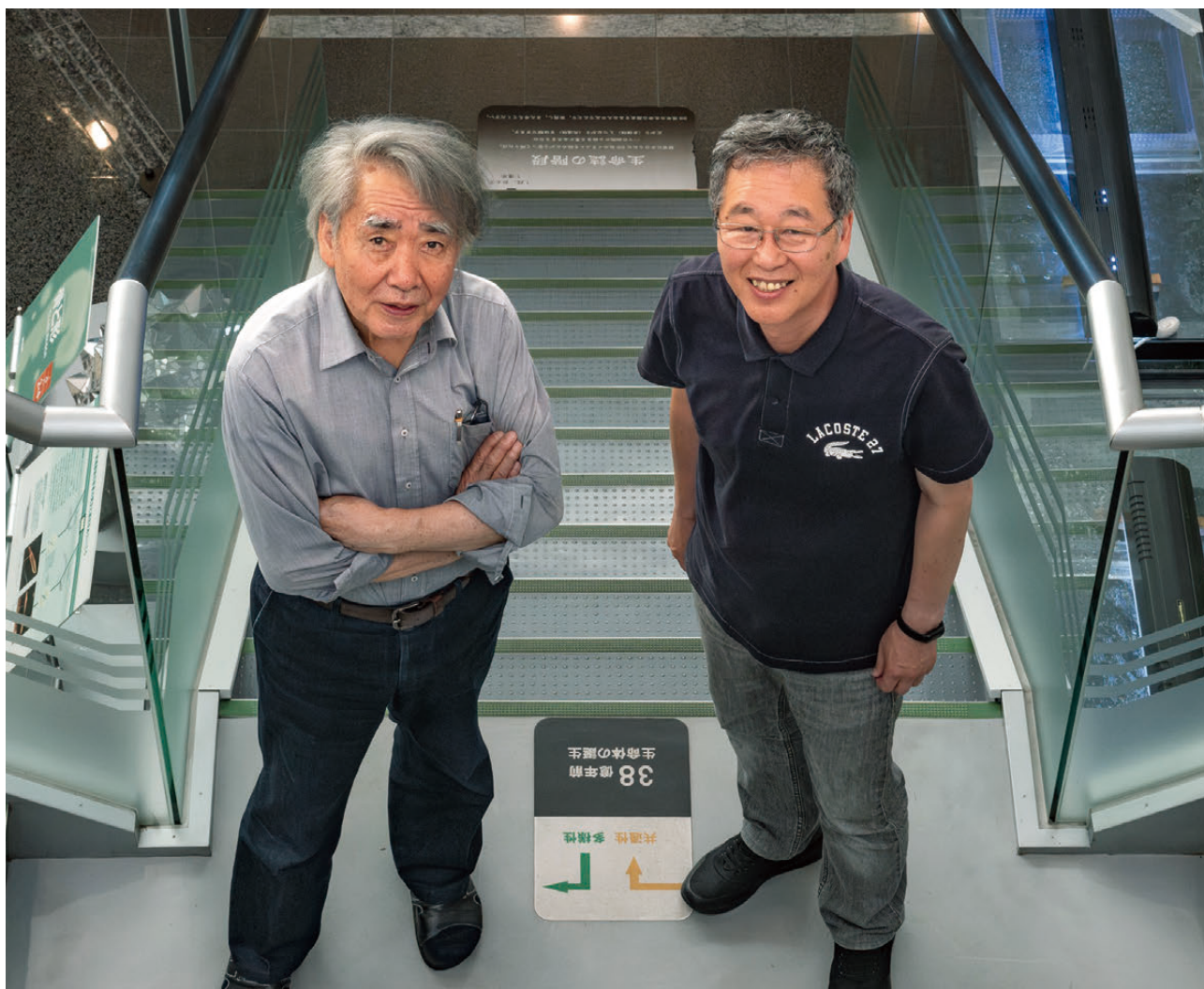
# 生命科学から味わう謎解きの楽しさ —面白い「問い」に出会うには—

近藤 滋

国立遺伝学研究所所長

永田和宏

JT生命誌研究館館長



撮影：コジマスタジオ



# LECTURE & TALK

生命科学から味わう  
謎解きの楽しさ

講演

近藤 滋

国立遺伝学研究所所長



## CHAPTER

1. はじめに

2. 生命現象のほとんどは「謎」

3. 貝の形

4. 貝殻はどうしてこの形?

5. 熱帯魚の模様

## 1. はじめに

生命科学は謎を解いているという感覚が好きでやっていました。パズル、ミステリーなどは謎があるから楽しい。謎解きは楽しむための重要な要素です。サイエンスもその謎解きの範疇で語れるのではないのでしょうか。

なぜ謎解きは楽しいのでしょうか? 謎を解くために頭を悩ませ、あるとき閃いて謎が解けるとすっきりする。この悩んで解決する過程が楽しいわけです。ではどんな謎が魅力的だと思いますか?

人類史上最も魅力的で最も人を不幸にしたパズルは『フェルマーの最終定理』だと思います。1637年ごろにフェルマーが考案し、証明されたのは約360年後。その間この問題に取り組んで結局解けなかった、人生を棒に振った数学者は約5万人いると言われています。

誰にも解けなかった謎というのは魅力的ですよね。でも難し過ぎて人生を棒に振るのは嫌だし、そうでなくとも難し過ぎて解けなかったら腹が立ったりもします。

簡単過ぎても解き甲斐がない。そこで僕は生命科学をおすすめします。



## 2. 生命現象のほとんどは「謎」

生命科学には非常に魅力的な謎に対して鮮やかに回答した例というのがいくつかあります。

一つの例として、抗体遺伝子を紹介します。

人の体には日夜いろんな病原菌、異物が侵入してきます。それに対して、人間の体は抗体を作ります。新しい病原菌が入ってきたら新しくそれにピッタリ合う抗体を作る必要がある。この抗体というのは遺伝子から作られます。でも、遺伝子の数は全部で2万個ほど。なのに、そこから何億通りもの抗体を作ることができます。

どんな抗体が必要になるかわからないし、未知のウイルスもあるはずなのに、我々の体はちゃんと対応できる。それはなぜなのか、長年科学者たちの頭を悩ませた大きな謎でした。

実は、抗体を作る遺伝子の一部が、一つの完成した塊ではなく、バラバラに分かれた状態になっていて、それらを組み合わせると約1万個のパターンの抗体遺伝子を作ることができます。抗体は抗体遺伝子を2個組み合わせて作るので、1万×1万で1億個のパターンを作り出すことができるのです。

これは長年の謎が、構造一つですっきり解かれたわけで、みんな度肝を抜かれました。ちなみに、解明した研究者はノーベル賞を取りました。

このように綺麗に謎が解けると非常に楽しいわけです。

でも、ほとんどの科学本やセミナーでは、謎や疑問とそれに対する答えしかわからず、肝心の「謎解きの仮定」が説明されないの、科学者が味わっている楽しさを味わえないんですよね。今回の講演では、その楽しい謎解きの過程の部分を強調して話していきます。みなさん楽しんで聞いていただければ幸いです。

## 3. 貝の形

貝にはいろんな種類があります。形は様々あるのに、とても規則的で、どこか共通性がありそうですね。どうすればこんな形が作れるのか、どうしてこの形なのか、見ただけではわからない。これからご紹介する「どうして貝はこんな形が作れるのか?」というお話は、僕ではなく主に愛媛大学の岡本隆先生が行われた研究です。

まず、貝殻の成分の性質を考える必要があります。

貝殻は炭酸カルシウムという、硬くて変形しない性質のものでできています。この硬い殻は体の防御のために必要です。

でも、硬い構造だと貝にとって困ることがあります。それは体が成長した時です。

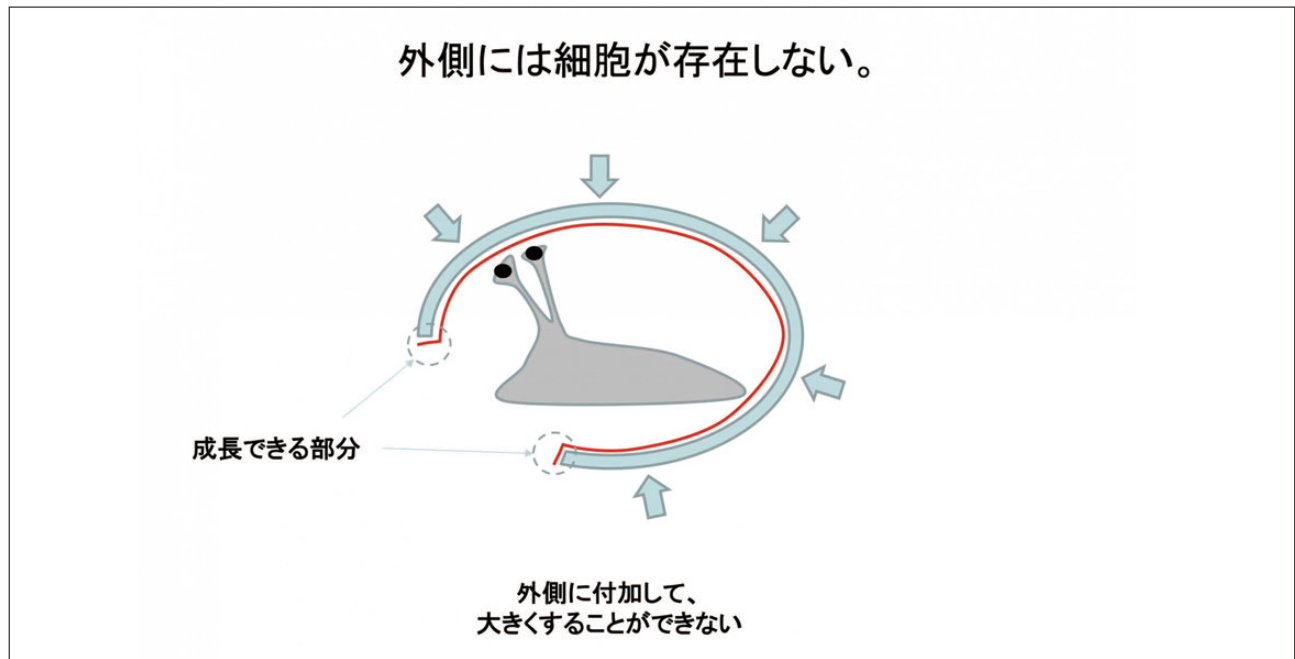
人間などの脊椎動物は、体の成長に合わせて骨を大きくします。骨は内側を削って外側を足していくという技が使えます。内側に骨を削る細胞と、外側に骨を足す細胞があるからです。

では貝ではどうかというと、骨とは違って貝殻の外側に細胞が存在しません。内側に足したらどんどん



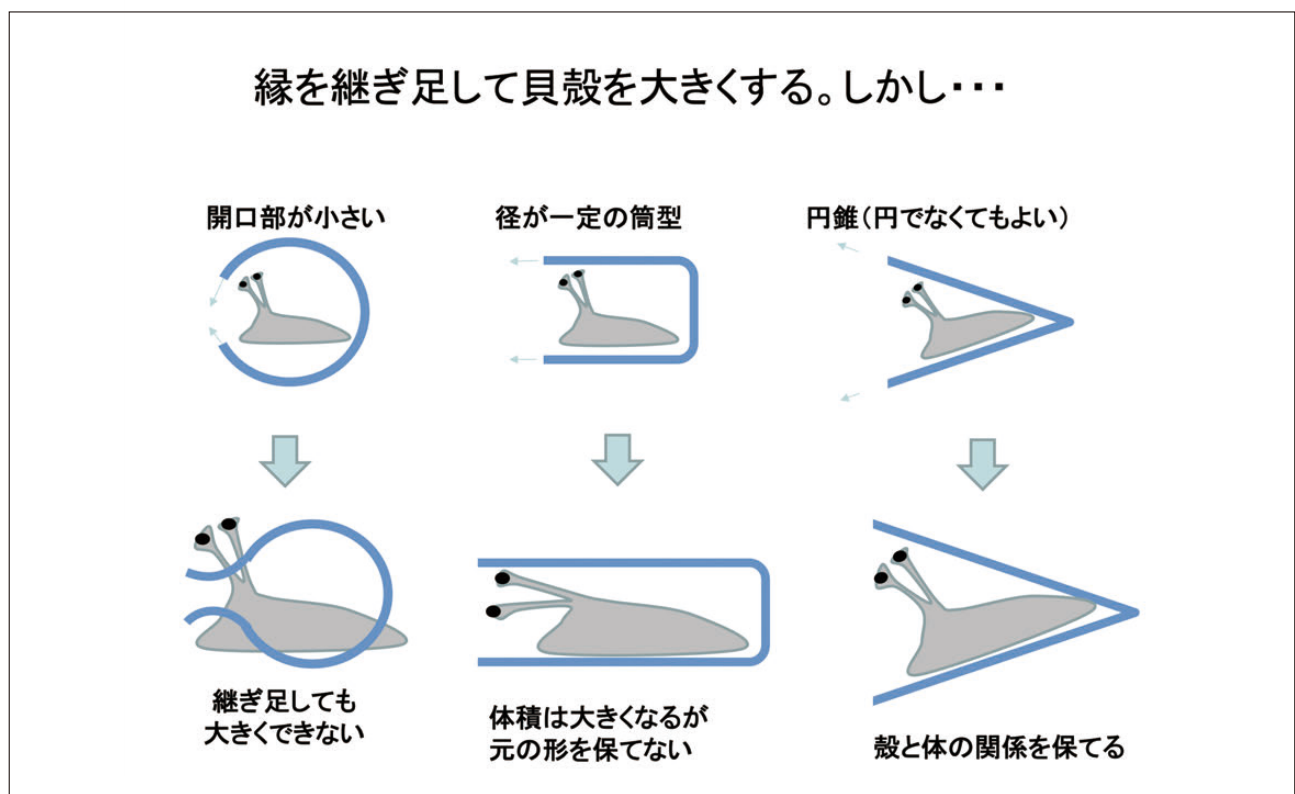
窮屈になってしまう。これでは困ってしまいますね。

この図の青い部分が貝殻で、赤い部分が細胞のある部分です。殻を足そうと思ったらこの破線で囲んだ部分にしかできません。だからフチを伸ばすという方法で解決しました。



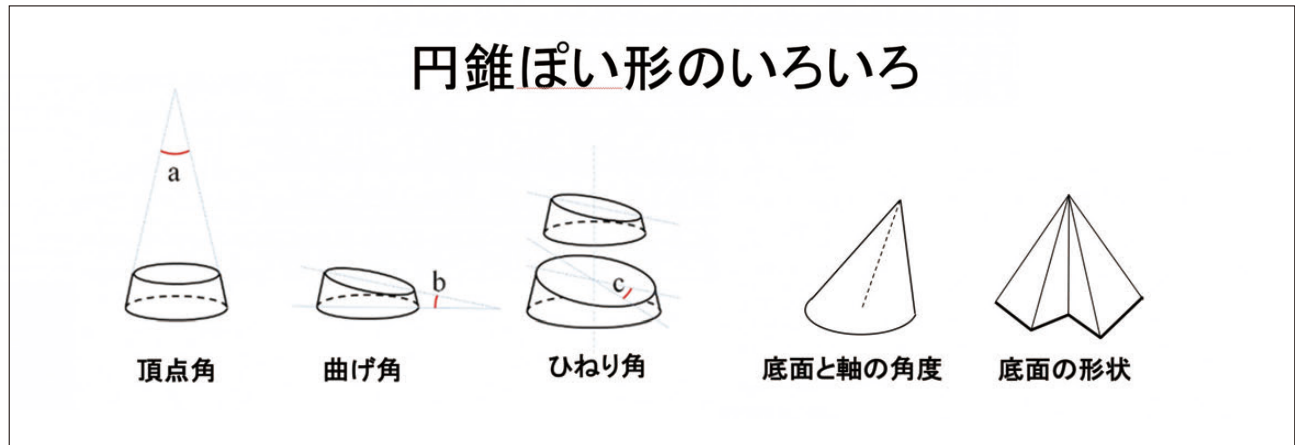
でも、ただフチを伸ばすだけではうまくいきません。軟体動物といえど体の形は変えずに大きくなりたいのです。でも形によっては、フチを伸ばした場合殻の形の縦横比が変わってしまう、つまり体の比率も変わってしまう。どんな形なら都合がいいのでしょうか？

それは円錐のような形なのです。



貝の基本形は円錐です。でも世の中にはいろんな形の貝殻がありますよね。円錐を基本形に、バリエーションを出すためにはどうしたら良いのか。

フチを伸ばすときに、たくさん伸ばす部分とちょっとしか伸ばさない部分を作る。すると少し傾きます。さらに、伸びる角度を少し捻ることもできます。他にも軸の角度を変えたり、底面の形状を変えることもできます。ここは頭の中で考えるのは難しい部分ですね。でもこの5つが円錐っぽい形で体の形を変えずに大きくできる変異のパターンです。



これを組み合わせるとどんな形ができるのでしょうか。それを計算して数理モデルを作ったのが岡本先生です。その数理モデルを基にシミュレーターを作りました。先ほど紹介した5つのパラメーターを変化させることで、このようにあらゆる貝殻の形を再現できるものです。

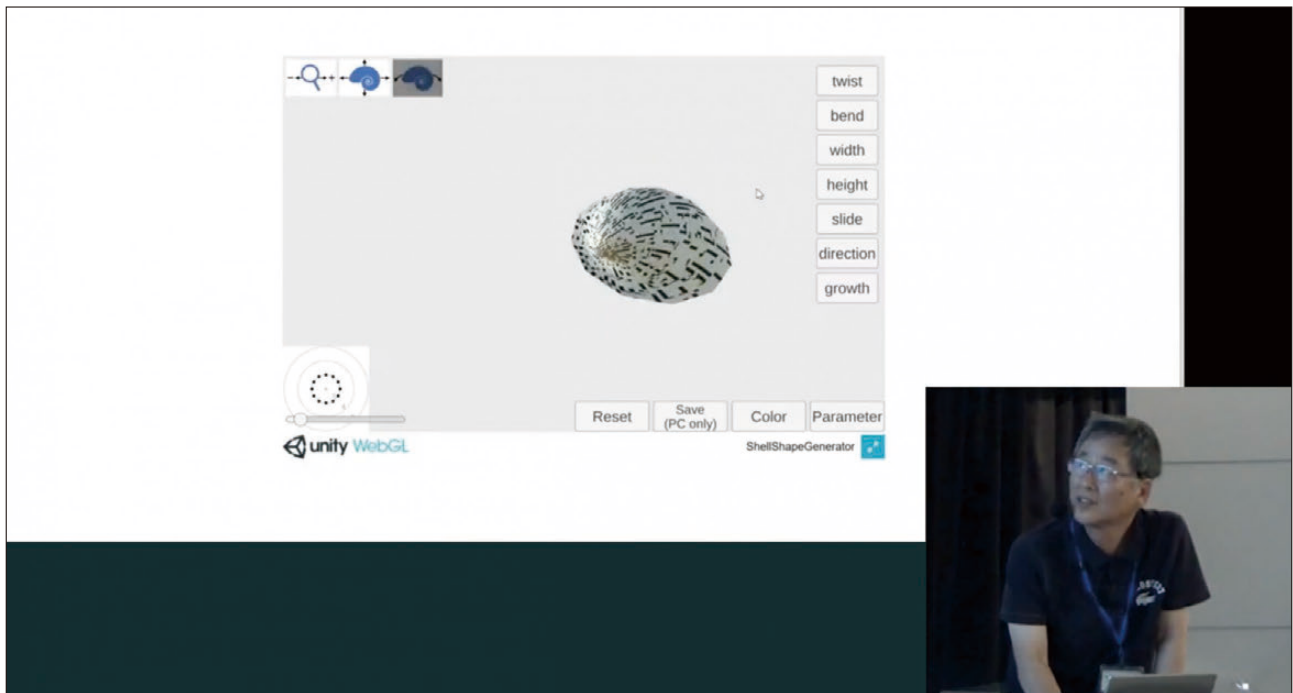


このシミュレーターは誰でも自由に使うことができるので、ぜひパラメーターをいじって遊んでみてください。



講演の記録動画では、近藤先生が様々な貝の形を再現する実演をご覧ください。



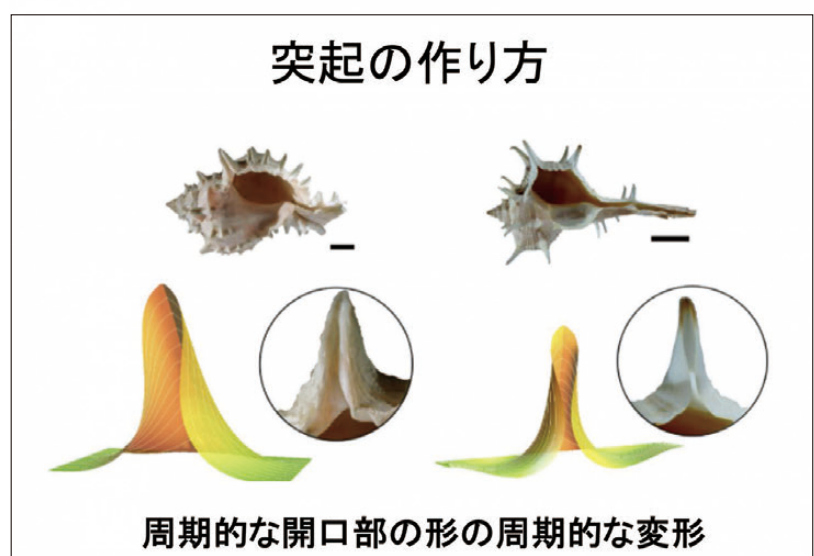


どうでしょうか。ハマグリっぽい形になりましたね。

このシミュレーターの凄いところは、巻貝はもちろん、二枚貝も作れるところです。みなさんは二枚貝と巻貝は全然違う形だと思っていたのではないのでしょうか。実は体の形を変えずに成長するには5つのパラメーターしかいじれなくて、どの貝にも共通している、というのがこのシミュレーターでわかってもらえたと思います。なかなかすっきりしませんか？

僕が初めてこれを聞いた時は本当にびっくりしました。

さて、これでほとんどの貝は説明できたように思えます。では、サザエのような突起のある貝はどのようなになっているのでしょうか。



実は成長するときに、一瞬だけフチの一部をピュンと変えているんですね。

いつもは丸い開口部を、たまに尖らせる、それを周期的に行うということで説明できます。



それでは、一度わかったことをまとめましょう。

貝殻の材質は硬いカルシウムの結晶でできています。それは物理的な制約のため、形態は錐体を基にして、そこから貝は5つのパラメーターをいじることができます。どの貝もそのルールの中で殻を作っているの、1つの数理モデルで再現が可能、ということです。

## 4. 貝殻はどうしてこの形？

では、ここからは貝の形の意味を考えてみましょう。

二枚貝は砂の中に潜って生活しているので、砂が入り込まないようにピッタリ蓋をしているわけです。カサガイは、岩に張り付いて生活しているので弱点である体が見えないようになっています。巻貝と違ってひねりのない平面的な殻を持つオウムガイ。あの独特な形は海を自由に泳ぎ回る浮遊生活をするのに適しています。

では、サザエのような巻貝はなぜ、ひねりが必要なのでしょう？

それは、見比べてみると一目瞭然です。

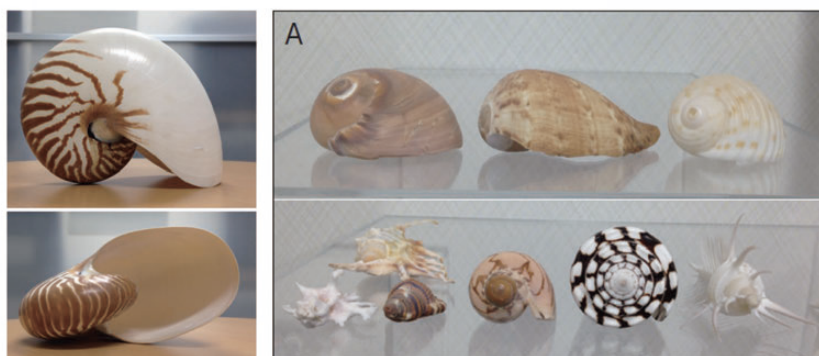
巻貝というのは海の底や岩場にくっついて生活しています。オウムガイの殻を机に置いてみると、どう工夫しても必ず殻と机の間に隙間ができてしまいます。貝殻というのは外敵から身を守るために必要なものなので、隙間があると困るわけです。オウムガイ自身は泳いで逃げられるから困りません。でも這って進む貝は足が遅いので襲われてしまったら逃げられない。

ではどうすればいいのか？

貝殻をひねればいいのです。

オウムガイと巻き貝を比べると、巻貝は開口部が見事にピッタリと地面にくっつく形になっているのがわかります。

### 底棲の巻貝に、何故ひねりが必要か？

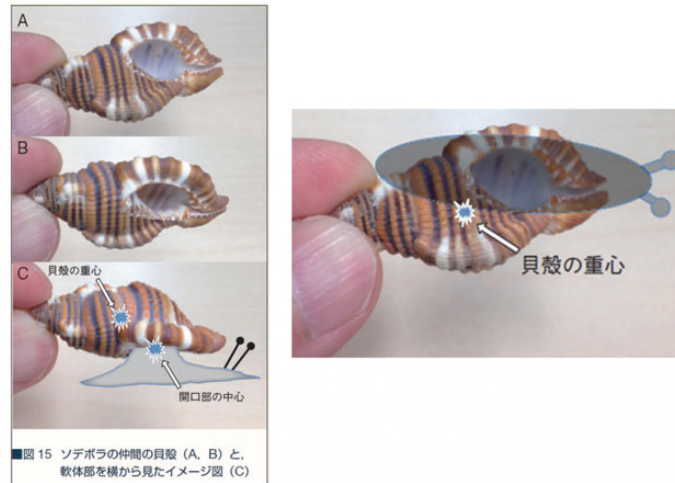


防御のため、開口部を海底に密着させるがある

でもひねると困ることもあります。

貝殻の形が左右非対称になってしまう。そうすると重心がズレるわけです。

## ひねりには代償がある

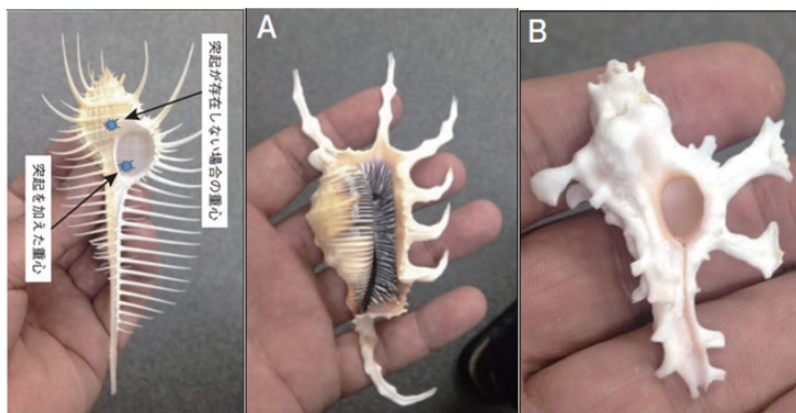


■図 15 ソデボラの仲間の貝殻 (A, B) と、軟体部を横から見たイメージ図 (C)

こういった貝の場合、移動するときは貝殻を持ち上げて歩くわけですが、貝殻の重心が前後にも左右にもズレています。これがどういうことかということ、片側だけめちゃくちゃ重いランドセルを背負うような感じです。それではバランスが悪いし背負いにくいと思いませんか？ ではどうすればいいのでしょうか。

やじろべえみたいに重さでバランスが取れたらいいのです。貝殻の重心が真ん中に来るようにするために、あのトゲがあるわけなんですね。

## 開口部の外側に突起を伸ばすと、 左右のバランスも緩和

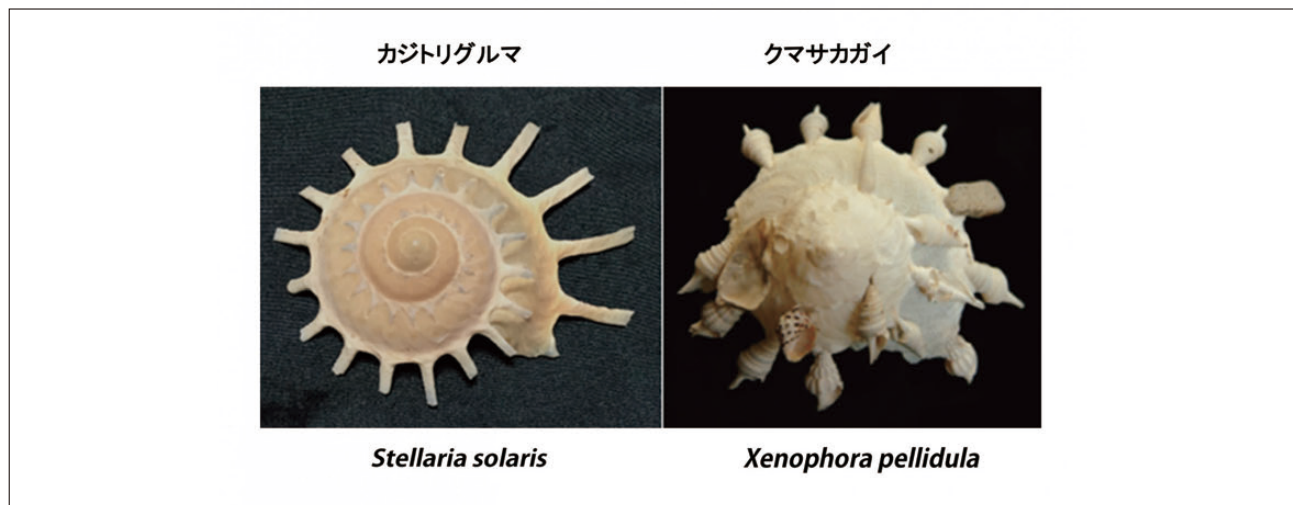


では次に、どうやってトゲを作っているのか、見てみましょう。

殻を作っているのは外套膜(がいとまく)という部分です。ホタテガイで言うとヒモの部分です。

珍味として食べますよね。ここは筋肉で、貝が自分の意思で自由にぐにやぐにや動かせるのです。だから人で言うと手で粘土をこねて陶器を作るようなものだと言えます。

面白い例をご紹介します。カジトリグルマとクマサカガイです。似たようなトゲのあるシルエットですが、クマサカガイの方はただのトゲではなく、別の小さな貝がくっついていきます。



これは人工的に作られたものではありません。クマサカガイ自身が周りに落ちている手頃な貝殻を使って、角度を調整してくっつけているんです。

結合部分をみると、非常に見事にくっついているので、これが人の手による物ではないことがわかります。

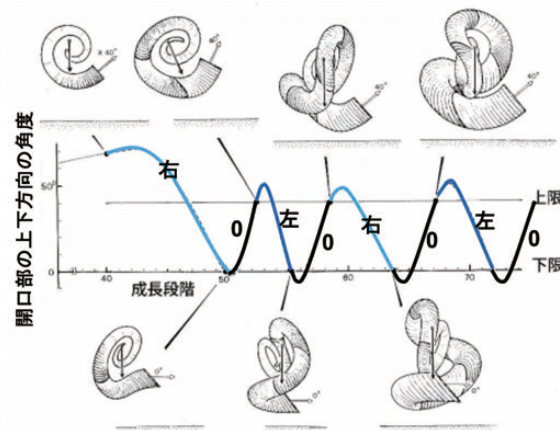
面白いことに、カジトリグルマとクマサカガイは近縁種なんです。クマサカガイがどう考えても意図的にトゲを作り出しているので、トゲを作る方法は違えどカジトリグルマも意図的にトゲを伸ばしていると考えて良さそうです。

貝殻のトゲが意図的に作られたことはわかりましたが、ではひねりについてはどうでしょうか？

みなさんは、異常巻きアンモナイトというアンモナイトをご存知でしょうか？ アンモナイトというと、ひねりのない貝殻を持つものが一般的ですが、異常巻きアンモナイトはこんがらがったような貝殻を持ちます。あまりにも複雑な形なので、見つかった当初はただぐちゃぐちゃに巻かれているのだと思われていました。しかしその後、何個も同じ形の貝殻が見つかったので、これはちゃんと規則性があるということがわかりました。そのルールを調べてみるとひねりの規則性が見えてきました。右にひねって、左にひねって、また右にひねって……これを交互に繰り返しながら巻いていくと、正確にあの形になります。そして、そのひねりを行ったことで、海中を泳ぐ時に体の水平のバランスがうまくキープできるのです。ここから体の成長に合わせてひねりのパラメーターをいじっているということがわかりました。この研究も岡本隆先生によるものです。



## 開口部の角度とひねり角の関係



Okamoto, T. (1988) Developmental regulation and morphological saltation in the heteromorph ammonite *Nipponites*. *Paleobiology* 14: 272–286.

アンモナイトは絶滅してしまいましたが、現代にも面白いひねり方をする貝は存在しています。ここからわかることは、成長に合わせてそのつど貝自身が調整してトゲを伸ばしたりひねったりしているということです。遺伝子情報に組み込まれていて自動的に成長しているわけでは無いのです。

ということで、それを証明するための実験を行いました。

正常な貝に無理やりサンゴをくっつけて、強制的に殻の重心をずらしました。バランスを崩した貝の多くは死んでしまいましたが、一部生き残ったものもあります。

それらの貝殻を観察してみると、巻きが上向きになっていたり、下向きになっていたり、変な角度になっていました。まだデータが少ししか無いので、結果は出せませんが、やはり意図して貝殻を形成していそうですね。

### 実験

貝は意図的に巻きを変えられるか？



### 結果

少し巻きが上向きに



巻きが下向きに



残念ながら、95%以上が成長せずに死亡(+\_+)

結果はまだ出ていない.....

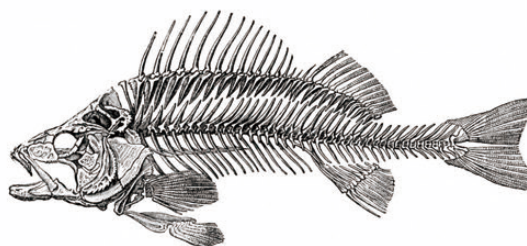
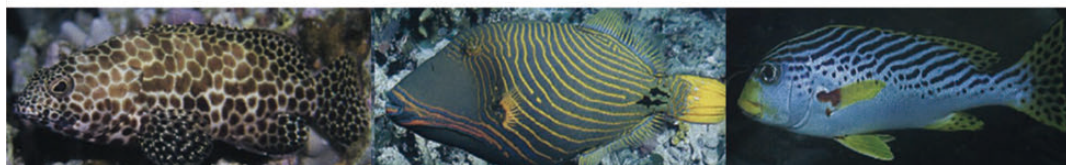
結論。貝殻の形は、明確な意思を持って外套膜が作る、手作業の工作物。貝殻の形を決めるのは、個体のバランス。というお話でした。

## 5. 熱帯魚の模様

もう一つ、細胞は模様をどう作るのかというお話です。

熱帯魚は派手な模様を持つイメージがありますよね。近縁種の魚でそれぞれ違った派手な模様を持っていても、体の構造を見てみると骨の形や内臓などの体の仕組みにはあまり差がなく、大体同じようなものです。

皮膚模様は種ごとに異なる  
しかし、内部構造はほぼ同じ



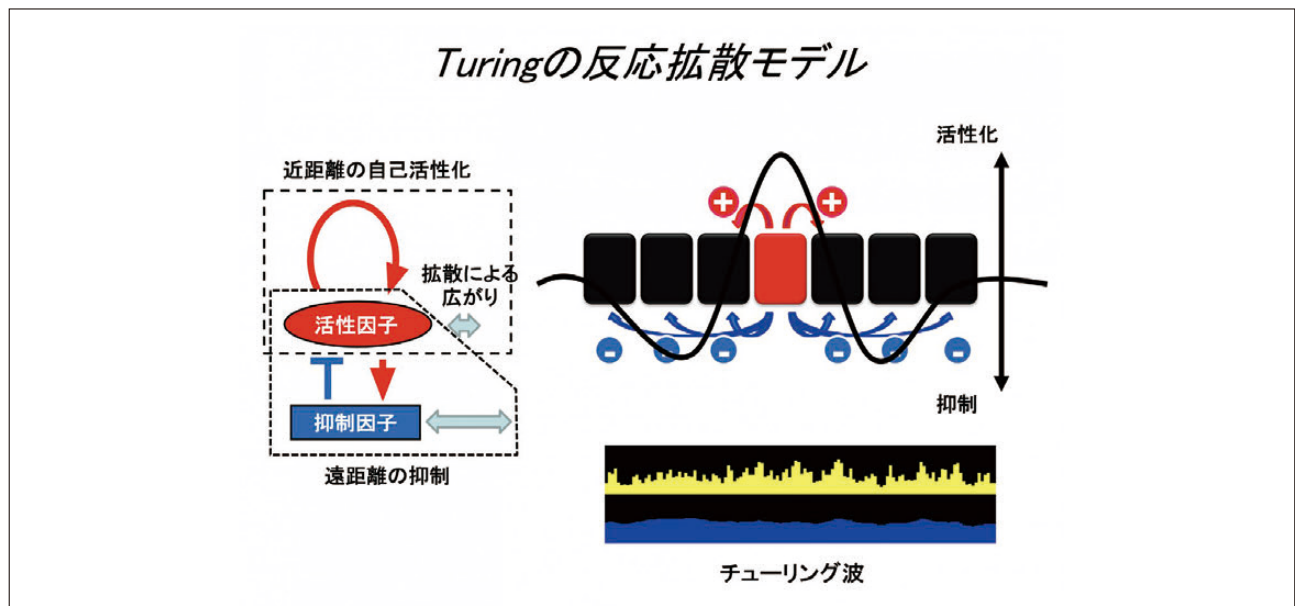
だから模様というのは皮膚の上で勝手に現れるものだと推測できます。さらに、模様に注目してみると様々な模様がありますが、これは点や線などの等間隔の並びであることに気が付きませんか？

等間隔のパターンが自然にできる現象。生きものから離れて考えてみると、身近にたくさんあります。それは「波」です。

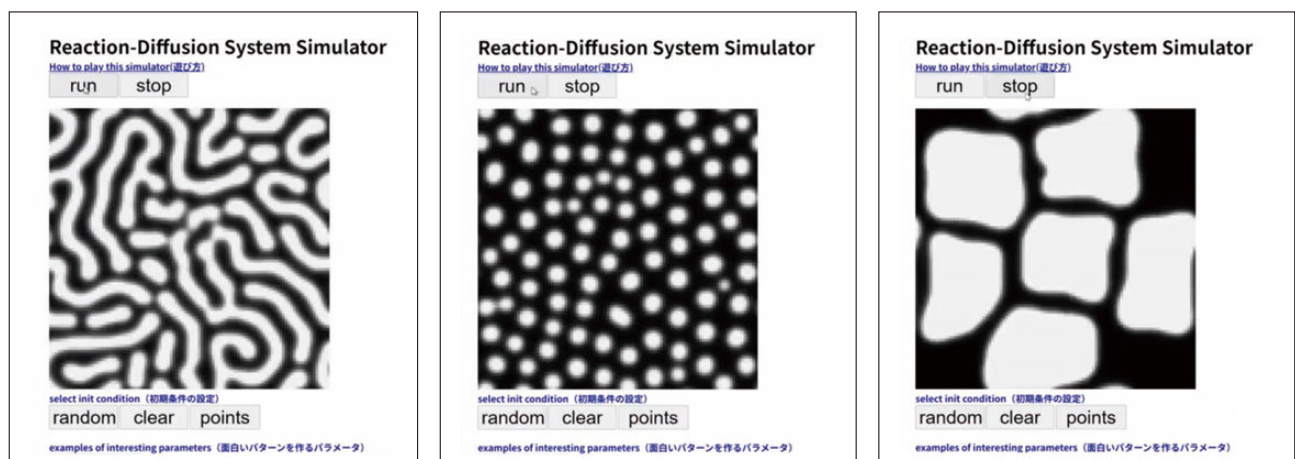
等間隔パターンを作る自然現象



こうして並べてみると、そっくりですよ。だから模様も体の中で波のような現象が起きているのかもしれない、という仮説です。この仮説はアラン・チューリングという天才数学者が約70年前に書いた難しい論文によるものです。二種類の化学分子が互いに干渉しながら作ったり壊したりする時、ある条件下で波ができると、チューリングは考えました。この反応による波のことを、「チューリング波」と言います。



チューリングが考えた数理モデル「反応拡散モデル」からシミュレーションを作ってみました。試しに動かしてみると面白いことに、何も無いところから動物の模様ができます。模様を壊しても自然と治るし、いろいろなパターンを作ることができます。



講演の記録動画では、近藤先生が様々な模様を再現する実演をご覧いただけます。

このシミュレーターも誰でも自由に使うことができるので、ぜひ遊んでみてください。



と、いうわけで、このチューリングの理論を使うと、我々が知っているすべての動物の模様が再現できます。先ほどお見せした貝殻のように、一つの原理ですべての説明ができる。とても興味深いですよ。



しかし、チューリングが発表した当時は生物学者のほとんどがこの理論を信じませんでした。なぜなら、「体の中に波ができる」という聞いたことのないアイデアで、シミュレーションのみ。誰も実験で証明していない、つまり証拠が無いので疑われてしまったのです。

僕としてはあまりに美しく楽しかったので、証明したくなりました。

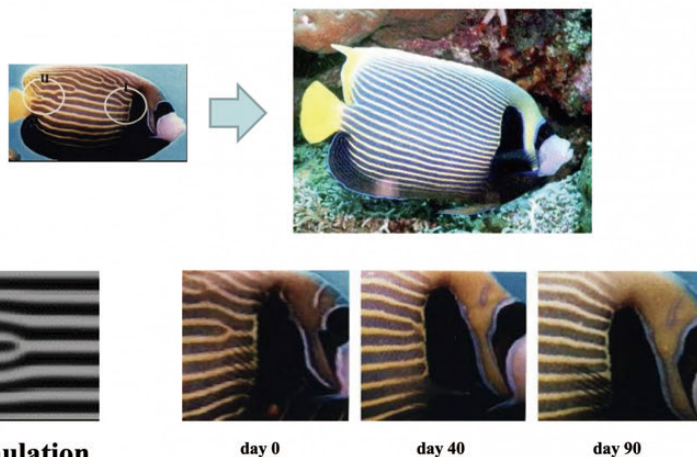
じゃあどうしたら証明になるのだろう？ どうしたら信じてもらえるのだろう？ と考えました。波というのは動きですよ。水があれば波になるわけではなく、水の表面が動くから波になる。だから「動き」を見つけたらいいのではないかと思います。

タテジマキンチャクダイという魚の模様を見ているうちに、模様の変化に気がつきました。小さい時には縞模様に枝分かれがあるけれど、大人になると無くなります。それに気がついた時に「あ、やっぱり模様は動いているな」と思いました。

縞模様の間隔を変えずに縞の数を増やしている。波とは等間隔を刻むことなので、やはり関係がありそうです。

シミュレーションしてみると、まるでジッパーが開くような動きで枝分かれの分岐点がスライドし、一本の線が二本に分かれました。タテジマキンチャクダイを育てて観察すると、まさにシミュレーションの通り、枝分かれが動いていきました！僕の生涯で最も美しい実験結果だと思います。この実験によって、無事チューリングの理論を実証することができました。

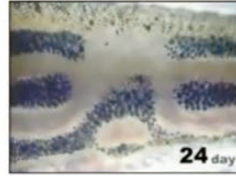
### 模様パターンのダイナミックな変化



Nature 1995; Kondo

このシミュレーターは模様の予測もできます。縞模様の一部の縞を繋がらないように操作すると、下の縞が上に引っ張られると予測されました。実際にゼブラフィッシュという魚で実験してみると、予想されていた通りの模様になりました。

## 模様パターンのダイナミックな変化



**experiment**



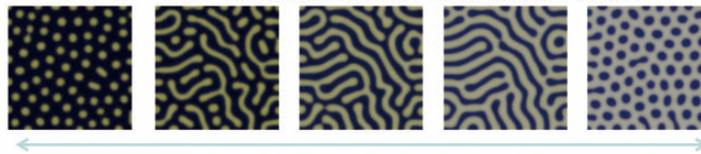
**simulation**

PNAS 2007, Yamaguchi and Kondo

また、シミュレーションによって、暗い斑点と明るい斑点は中間に迷路模様を挟んでこのようにグラデーションしていることがわかりました。それが本当なのか、同じ魚で模様が暗い斑点のものと明るい斑点のものを掛け合わせると、予測通りに迷路模様の子供が産まれました。

## 模様の予測

シミュレーションで変数を徐々に変えていくと、模様が変わる

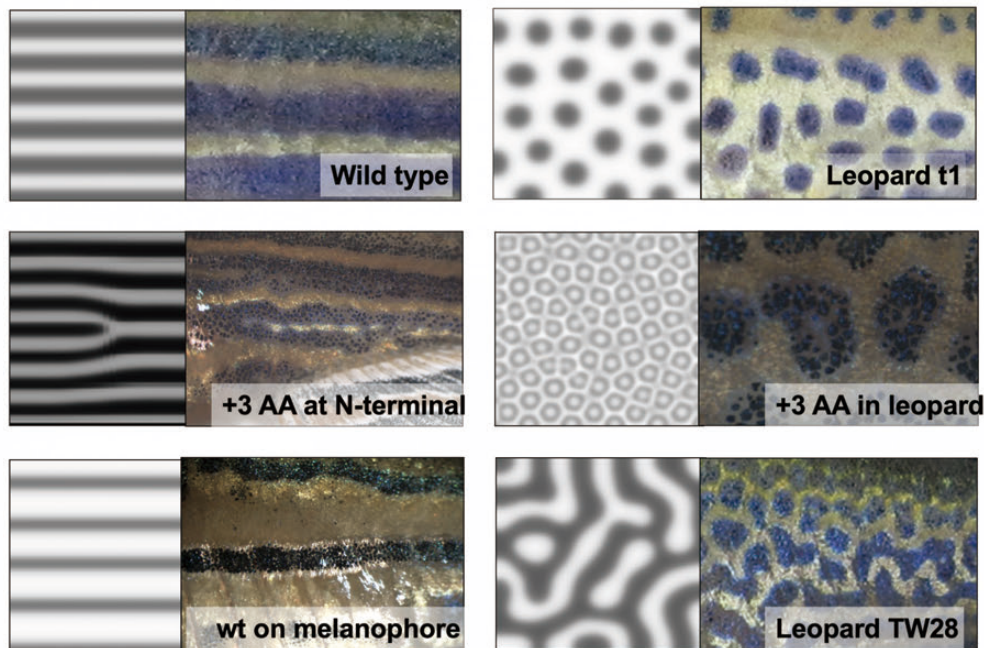


Nature communication 2010; Miyazawa and Kondo

このように、ありとあらゆる模様の予測ができましたが、その後は15年ほどかけて様々な実験を泥臭く行いました。僕のところのラボメンバーに力を尽くしてもらって、最終的に模様を作る分子的原理の発見に至りました。そのおかげでゼブラフィッシュの黄色と黒色の色素細胞がチューリングの言っていた分子の波を生む関係と一致していることが解明できました。

チューリングの理論によって説明できる模様なら、自由に動物の模様を変化させることも理論上可能なので、やってみました。左上 (wild type) が本来のゼブラフィッシュの模様です。それをこのように斑点模様やヒョウ柄など様々な模様に変化させることができました。

全ての模様が、一つの遺伝子の操作で作れる



*Pigment cell melanoma Res.. 2012 Watanabe et al.*

現在は非常に多くの学者がチューリングの理論を認めています。

例えば、マウスの指を使った実験。従来、指は一本いっぽん個別に作られていると考えられていました。しかし、手ができる範囲を大きくするとなぜか指の数が増えることがわかりました。これは従来の考え方では説明できなかったのですが、「波ができる範囲が広がったから指の数が増えた」とすれば説明がつきます。つまり指の形成は波によって引き起こされていたのです。そのほかにも鳥の羽根ができる間隔が等間隔であることも波の理論だし、指の関節の間隔も波だし、脊椎が等間隔なのも波。指紋だって波。今の発生学者のほとんどは体の中に見つかる等間隔の構造は全部波によるものだと考えています。

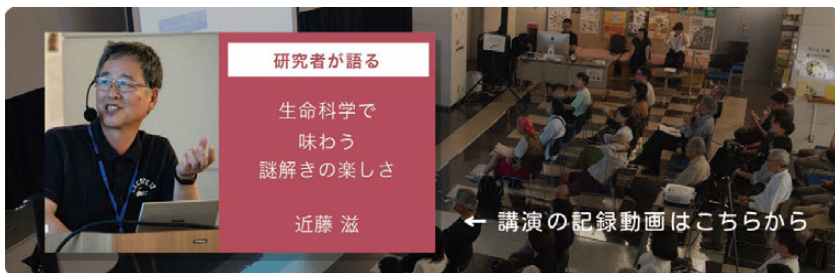
結論。模様は波が作ると考えると、すべての種類の模様を同じ原理で説明することができる。観察してみると、魚の模様はシミュレーションの通りに変形し、模様の予測もできる。実験してみると、ゼブラフィッシュの模様を自在に変えることができました。

パズルを解いたような快感がありましたが、実験がこんなにうまくいくことはそうそう無いです。たまたまうまく行ったのだと思います。

これまでに研究を一緒に行なってくださった皆様には心より感謝しております。

ご清聴ありがとうございました。





公演の記録動画はこちらから



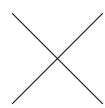
#### 近藤 滋 (こんどう・しげる)

1959年東京都生まれ。1982年東京大学理学部を卒業。1988年京都大学大学院 医学研究科博士課程修了。2001年理化学研究所発生・再生科学総合研究センター チームリーダー。2003年名古屋大学大学院理学研究科生命理学専攻教授。2008年大阪大学大学院 生命機能研究科教授を経て、2024年に国立遺伝学研究所 所長就任。主書に『波紋と螺旋とフィボナッチ』(学研メディカル秀潤社)

## 対談

近藤 滋

国立遺伝学研究所所長



永田和宏

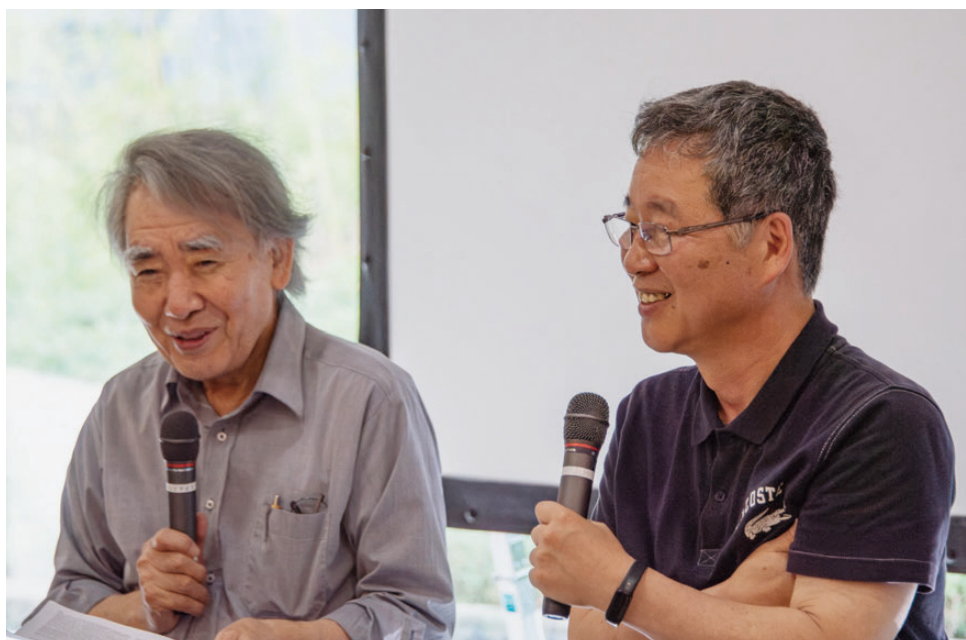
JT生命誌研究館館長



### CHAPTER

1. 物理の世界から生き物を見る
3. 「サイエンティストの使命の一つ
5. 秘密の研究
- 質問タイム

2. 天才物理学者 アラン・チューリング
4. 面白い「問い」に出会うには
6. 生命科学に数学は必要か



## 1. 物理の世界から生き物を見る

永田

僕は今、生命科学の研究をやっていますが、実は近藤さんと同じでもともと物理を研究していました。だから一見複雑な現象を単純な原理で説明できると、パズルを解いた時のような快感を覚えます。今日の近藤さんの講演内容はまさにそういう内容でした。生き物の体にある複雑な構造を見ていると、なぜこんな物が作れるのかと不思議に思います。でも実は原理自体は非常にシンプル。それがわかると改めて美しいと感じます。

まず今日話された魚の模様の原理はアラン・チューリングの簡単な偏微分方程式から来ていますね。近藤さんが出された論文がこれです。1995年の『Nature』に載った

ものですが、すごく単純な論文で、たったの4ページ。どのくらいの文字数で書かれたか、わかりますか？

近藤 1000ワードちょっとぐらいじゃないですかね。

永田 よく知ってるなあ。僕、あんまり単純な論文だからつい、よせばいいのに文字数を数えました。(笑) 1053ワード。多分ワトソン、クリックの書いた有名なDNAの論文よりも文字数が少ないですね。

近藤 絵が多いですから、文字はいらないです。だって、魚の模様がジッパーが開くように変化していくという写真があれば誰にでも言いたいことが伝わるので、文字で説明しなくていい。

永田 われわれ研究者っていうのは生涯1度か2度は『Nature』、『Science』という雑誌に論文を載せてみたいと思うもので、文字数が少なければ少ないほどインパクトが高くてより良いという感覚があるんです。これはまさにそういう論文になっていると思っています。

## 2. 天才物理学者 アラン・チューリング

永田 それで、この研究にはアラン・チューリングの研究が関わっていますね。チューリングって非常に不思議な人ですよ。

近藤 アラン・チューリングはコンピューターの生みの親として有名な人です。コンピューターという概念を生み出したのがチューリング。とにかく天才でした。中学生の時に自分のお母さんに、「アインシュタインの論文を読んだんだけどこの論文のこの辺りの説明がよろしくなくて、俺だったら修正してこういうふうを書く」という手紙を書いています。お母さんも困ったでしょうね。

永田 実は私も大学の4回生の時にチューリングマシンを作ろうとしたんです。うちのラボは物理の理論の部屋だったので、卒業研究として。

近藤 作ろうとしたんですか。

永田 万能チューリングマシンっていうモデルのプログラムを研究室の福留秀雄が書いて。それを本当に実現できていたら世界最初の電子計算機になっていたけれど、われわれの知識では実現できませんでした。結局ステレオデッキ1台買ってもらって、分解しただけで終わりましたね。だから僕にとってもチューリングは、思い入れのある人物です。



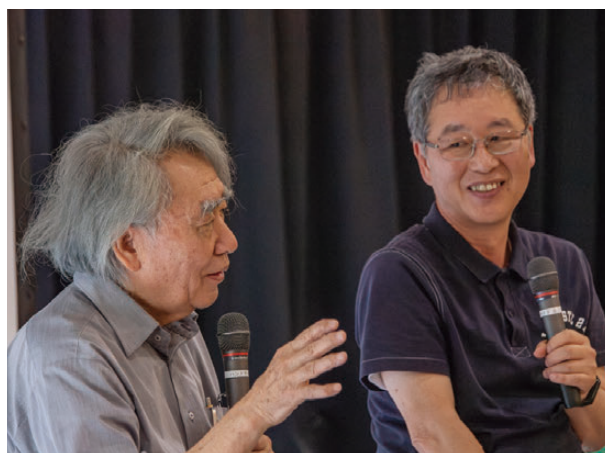
### 3. サイエнтиストの使命の一つ

**永田** 近藤さんには惚れた学者が2人いますよね。チューリングはその1人。もう1人は講演で話に出た岡本隆先生。実は、あまり知られてない方なんです。愛媛大学の准教授を務められているんですよね。

**近藤** そうです。

**永田** 一般には知られてないけど、研究に惚れたからこの方をなんとか残したいっていう気持ちが近藤さんの活動から伝わってきますね。

**近藤** 講演でお見せした貝のシミュレーターの基となった岡本先生の論文は1988年に発表されましたが、僕がそれを知ったのは2010年ごろでした。彼の作ったモデルだけで、あらゆる貝の構造を説明できる。最初は理解できていませんでしたが、自分でプログラムを書いて初めてその凄さに気がつきました。



**永田** 研究には時の運があると感じさせられますね。個人がコンピューターを自由に使えるようになって初めて岡本さんの研究が日の目を浴びたわけで。

**近藤** チューリングの方程式で全ての生き物の模様を表せるのと同じような感動がありましたね。こりゃすごいと。こんなに凄いのに当時はまだ誰もその凄さに気がついていませんでした。そこもチューリングの時と似ていますよね。それじゃあ僕はどうしたらいいのか。つまり岡本先生の作ったモデルがどれだけ素晴らしいのかってことをなんとか世間に知らしめたかった。

本当にすごい人が正当に評価されれば良いのですが、意外と見過ごされてしまい、そうでもない人が偉くなったりしますから。

**永田** こんなこと言って大丈夫かな。(笑)

**近藤** 本当に素晴らしい発見した人は有名になってほしい。だから僕はいろんな場所で貝の話をしています。

**永田** われわれサイエンティストは問題を解くことも非常に大事だけれど、自分がやっている研究にはどういう歴史があるのかを意識する必要があると思います。若い研究者にはそういった意識があまりないのではないのでしょうか。

以前ある講演で私の専門分野のタンパク質研究について話す機会がありました。そこでタンパク質研究の経緯や歴史を全部しゃべりました。これだけの歴史がある上に、今、皆さんがやっている研究あるということを知ってもらいたかった。若い研究者を中心に好評でしたよ。

近藤さんが気にしているように、学者や研究が埋もれないようにすること、過去の研究があったから今このことがわかっているんだ、ということを言い続けていくのもサイエンティストの1つの大きな使命だと思います。

**近藤** 歳を取ってくると、そういうこともしなきゃいけないなって思います。あんまり若いうちからそういったことに打ち込む必要もないと思いますけどね。

## 4. 面白い「問い」に出会うには

**永田** 岡本さんの話があったから貝に興味を持ったのですか。

**近藤** そうですね。

**永田** では、チューリングについては？

**近藤** 魚の模様に興味を持ったのは、水族館でナポレオンフィッシュの模様を見て、不思議だと思ったのがきっかけでした。どうやったら、こんなへんてこな模様が描けるのかずっと考えていたんですよ。でもひと月ぐらい思いつかなくて。諦めそうなタイミングで、チューリングが既に答えを出していることを知りました。負けたって思いましたね。でも、生物学者の誰も信じていなかった。じゃあ信じられるようにしようと思ったのが僕の研究の始まりです。

**永田** 講演で一番初めに、謎があるから楽しい、面白いって言っていましたね。だけれど、一般には謎を見つけることって難しいんですよ。

**近藤** 自分の中で漠然とした疑問を抱いていないと、目の前に面白い謎があつて



も気がつけないんですよね。水族館で同じ魚を見る人は何百万人といる。でもそこで、この模様はどうやってできるんだろう? と、不思議に感じられないと多分駄目で。



永田

本当にそのとおりで。近藤さんは「謎」と言いますが、私は「問い」ということをよく言います。この生命

誌研究館で大事なことは、一つでも問いを持って帰ってもらうことです。来館者が、展示を見て、「わかった」と満足するだけでなく、そこで自分だけの「問い」や「謎」、「なぜ」に出会えるきっかけになるような場でなくてはなりません。でも、なかなか謎に興味を持ったり問いを見つけたりするのは難しい。

近藤

道筋を作り過ぎると、それから外れて考えられない。するとその人の科学がなくなるんですよね。その辺りは多分、見る人が疑問を持って面白さに気づく経験をしないとイケないと思うんです。

永田

これは学校教育にも同じことが言えると思っています。近藤さんはどうお考えでしょうか。

近藤

興味がなければそもそも始まらない。例えば、なんでシカは速く走れるのだろう? という疑問を持てたら理由を探することができますが、足が速いのは当たり前のことと見ていたらもうそこから発展しませんよね。当たり前ですが、その「なぜか?」という疑問を持つことによって初めて見えてくるはずですよ。

永田

なるほど。では疑問を持つにはどうすれば良いのでしょうか。

近藤

その辺りは多分、経験をしないとイケないと思います。やったことない人には想像もつかないと思いますが、考えたら答えが見付かるぞという経験を沢山すると考えるのが楽しくなるんですよ。

答えが見つからなくてモヤモヤする時間というのはきっと苦痛ですが、ゴールがあると思えば諦めずに考え続けられる。そのゴールまでたどり着いた経験がどのくらいあるかで、どこまで息を止められるのかが決まるのかなと思っていますね。

永田

どうすれば若い人に「問い」を持つことに興味を持ってもらえるのか、これは大事なことです。初等、中等教育でもそうですが、若い研究者に対しても言えます。近藤研究室に入ってくる若い人たち、大学院生も含めて、学生に対してどういう態度でその研究をサ



ポートしているのでしょうか。

近藤

僕自身が何も言われたくない人なので、学生の研究にはあまり自分から口を出しません。なので初めの頃は見守っているだけでしたが、それだと何もできずに終わってしまうか、よその道に逸れてしまう人が続出してしまいました。

それで考え直して、ちゃんと分子生物学の基礎を身に付けられるような研究を最初にやってもらうことにしました。

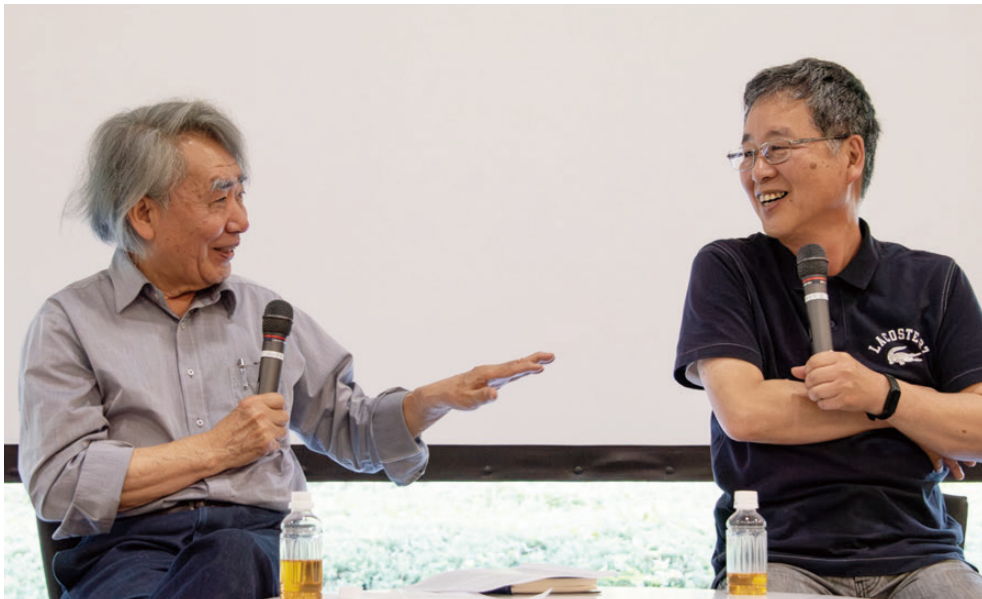
その頃には黒田純平くん（現形態発生研究室 室長）をはじめとして、ちゃんと自分の考えで遺伝子を使って研究をしているスタッフがいたので、学生には彼らから基礎を学んでもらうようにしました。

永田

スタンダードな研究をするためのノウハウや考え方が身に付かないと、ユニークな研究なんて急には出来ないのでからね。

近藤

そうです。もっと変わった研究をしたいという人がいれば、僕と組んでやってもらいます。その時には、「ほんとうにそれでいいのか？」って問いただして。それでもやりたいという人にだけやってもらいました。



## 5. 秘密の研究

永田

近藤さんは、ノーベル賞を取られた本庶佑さんの元で研究していましたね。本庶さんというと、偉いのはもちろんですが、われわれの間では非常に怖い先生として有名です。近藤さんはこの本庶さんのラボにしながら全くの内緒で研究をして、まさにその論文が『Nature』に載ったんです。尊敬しますが、度胸がありますね。結局、バレて追い出されてしまいましたね。（笑）

近藤 普通はしないですよ、そんなこと。

永田 普通はしないよな、あそこにいたら。(笑)

私は学生たちに「1つでいいから俺に内緒でなんかやれ」と言っています。わざわざボスには言わなくてもいい。でもなんか1つは自分でやりたい研究を見つけてやっておくと。

近藤 それはこういった意図で？

永田 研究というのは上手いかなかつたりつまづくことがありますよね。その時1つの研究しかしていない状態だと、逃げ道がなくて何カ月か暗黒世界に閉じこもっちゃう。実際、私に知らせないで隠れて研究をしていたおかげで、うまく軌道修正できて成功した奴もいます。彼は新しい遺伝子の一つ見つけて、その機能を明らかにしました。

近藤さんのところにも「ボスに隠れて好きな研究をする」というような学生がいましたか。

近藤 僕は変なことをやったら喜ぶので、学生は隠す必要が全くないです。でも論文が仕上がってから持ってきた学生も1人だけいました。カブトムシの幼虫が穴を掘る時に大車輪回転をしながら掘るっていう内容。そんな面白い研究を隠れてしていたなんて知らなかったです。論文が書けましたので読んでくださいって、研究が全部終わってから持ってきたんですよ。面白いし、びっくりしました。論文はNatureとは行きませんでした、Scientific Reportsという雑誌に載りましたよ。

永田 それはすごいですね。

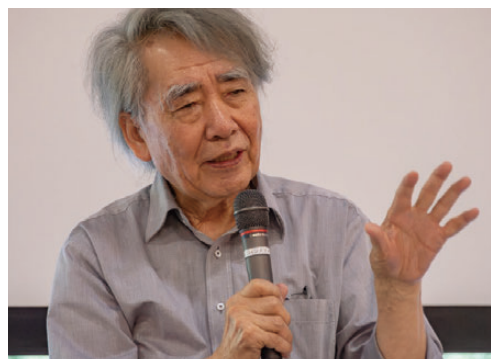
近藤 本庶先生から僕、僕からその学生。「教授の知らない研究をやった」ことが2代続いたことについて、NHKで特集されました。番組内では本庶先生がそのことについてどう思っているのかのインタビューもありましたよ。実は、その放映を本庶先生と一緒に見ました。

永田 それはいいな。その場面をカメラで撮るべきだな。

近藤 恐ろしかったですけどね。

## 6. 生命科学に数学は必要か

永田 「数学ができないと理系に行けない」という思い込みをしている方は非常に多いと思います。例えば子どもが理系に進みたいと



言った時に、親が「でもあんた数学苦手じゃない」と言ったりする。でも実際には、生命科学の研究で数学を使う場面ってほとんどないんですよ。近藤さんは、数学が分かってないとチューリング・パターンを理解できないので例外です。

近藤

僕は微分方程式の意味が分かってそれを計算できるぐらいなものですよ。

永田

この例外である近藤さんから、生命科学と数学の関係について聞かせてください。

近藤

実際、生命科学で使う数学なんてほぼありません。でも数学を学ぶ、問題を解くというのはやるといいです。

数学っていうのはパズルだと思っています。問題、つまり謎ですよ。解けたらうれしい。数学の問題を解いているうちに、日常で分からないことがあった時に自分で考えてみたら解けるかもしれないと思うようになる。頭を使うことがあんまり苦痛でなくなる。その訓練のためにやるのだと僕は思ってます。

永田

プロセスをいかに楽しめるかということは大事ですね。高校までの数学は大学入試を見据えて学ぶので、楽しむよりもいかに正解にたどり着くかにかたよってしまう。

近藤

入試のための数学は、ある程度解き方を覚えちゃえばいいんですよ。プロセスは意識されない。

永田

解き方を理解しただけでわかった気になる人がいますが、解き方を知ることと自力で解いて理解することは全くの別物だと知ってもらいたいです。

近藤

自分でちゃんと解いた時しか楽しくないですよ。

永田

ただ、私自身このプロセスが楽しいと言えるようになるまでには随分時間がかかりました。近藤さんは、問題を解くことの楽しさが実感できる話を中学生にする場合はどんな話をしますか。

近藤

一番適しているのは貝の話です。

僕が中学、高校生相手に講演するときはまず、紙粘土を渡します。次に、この粘土を使ってなるべく楽に巻貝の形を作るにはどうやったらいいか問いかけます。大抵の人は円錐を作って巻こうとしますが、上手くできません。巻く時にひねりながら巻かないといけないんです。それが実際に作ってみるとよくわかります。そこから貝のシミュレーションにひねりのパラメーターが必要なことを理解してもらう。自分の手で、その発見をしてもらいたい。



永田

すごくいい方法ですね。だけど、それを実感してもらえるまでこちらが待てるかという問題もあります。

近藤

そこは教え方ですかね。本当は自分でプログラムを一から組めるのが理想ですが、それもなかなかできないので、難しいですね。

永田

今日一番印象的だったのは、「この研究をすることで社会にどう貢献する」という話をしないことでした。文科省の科学研究費の配り方は「この研究によって社会にどんなメリットをもたらすのか」を大事にしているので、真逆です。

最後にメッセージとして、役に立つ研究とはどういうことだと考えておられるのか、近藤さん自身のお考えを聞かせてください。

近藤

なかなか国立遺伝学研究所の所長としては言いづらい話題ですね。(笑)



永田

でも言わないといけないことのはずですから。

近藤

その研究は何に役に立つのかと言われたら僕は、「人類の英知を広げるのに役立つ」と答えます。

天文学者の方に、宇宙を理解する研究の場合、科研費の申請をする時にどう書くんですか?と聞いたことがあります。その方は「宇宙を理解することは人類の夢であると書く」と。その言葉にすごく共感しましたね。この研究してなんか文句あるのかっていうことです。

永田

物理的な豊かさに貢献するような研究もちろん大切ですが、精神生活を豊かにする研究も大事だと思います。ものごとの理(ことわり)や、純粹に「なぜ?」を問い続ける研究がいかに有意義かを多くの人に実感してほしいです。

## 質問タイム

会場の参加者との語り合い

**Q1** アラン・チューリングが1952年に提唱し、近藤先生が実証した1995年まで、約40年ものブランクがあったことに驚きです。その間に他の研究者が誰も実証できなかったのはなぜでしょうか？



近藤

いろいろな要因が考えられますが、最も大きいのはパソコンがなかったことでしょう。最初の20年間はパソコンがありませんでした。パソコンが使えるようになって1970年代に再発見され学会で発表されましたが、当時は実証が伴っていなかったため「そんなわけあるか」と、あまり受け入れられませんでした。信じていたのは数学者と物理学者ぐらいで、生物学者は実証のない研究について理解しなかったし、見向きもしなかった。そういう不幸な時代があったためにそれだけの期間が空いたのだと思います。

**Q2** お二人は科学研究とは関係のない分野にも広く興味を持たれているからこそ発見があるのかなと思いました。若い人に向けて、専門分野の他に興味を持ったり学びを得ることで、プラスに働くというお話があれば聞きたいです。



近藤

僕はそんなに多趣味じゃないと思っています。趣味といったら釣りぐらいで、魚の研究と似たような物だし。美術についても、エッシャー以外は詳しくない。強いて言えば、推理小説とかミステリーを読むのが好きで、パズルとか謎が好きなんだと思います。だから本庶先生のところで免疫の研究をしていた時に趣味で魚の模様の謎を追ったのかもしれないですね。

永田

私は研究を始めるより前に短歌を始めました。日本には「この道一筋」の美学があると思うのですが、1つのことに没頭していないことを長いこと後ろめたく思っていました。どちらにも手を抜かずにやってよかったと思えるようになったのは50代半ばを過ぎてからです。

両方やりたいと思ったわけではなく、たまたま2つのことに興味を持ち、どちらも捨てられなかっただけです。私の場合は偶然どちらも上手くいったということだと思っています。私の研究室でも「僕も先生みたいに2つのことをやりたいです」という学生がいましたが、全く勧めませんでした。

**Q3** 生き物の模様の話が非常に面白かったです。  
近藤先生が動物、例えばヒョウやトラを見た時、先生が開発したシミュレーターになぞらえて「この模様はこうなっている」とわかるのでしょうか？



近藤

一番研究に没頭していたときはどんな模様を見ても「これはあのパラメーターが0.342ぐらいだな」とかがわかりました。生き物に限らず、何か模様を見たときにパッと考えてしまう時期があって、そこまで行くともう狂氣的なので自分でもやばいと思いました。(笑)



# 太古の海を漂うシアノバクテリア 緑の光環境と生命の進化



松尾太郎 大阪大学 大学院理学研究科

地球誕生から46億年、生命誕生からは40億年。この間、海はずっと青色だったわけではありません。太古の海に現れたのは、光合成生物であるシアノバクテリア。小さな体で大きな海全体を酸化していきます。そして、数億年をかけて海の色は変化し、新しい地球の景色が広がっていくのです。シアノバクテリアの進化から、地球と生命のつながりを見ていきましょう。

## CHAPTER

1. 生命とは何か? を問い直す

2. 光一波長と色の見え方

3. 緑の海仮説

4. 地球と生命の共進化

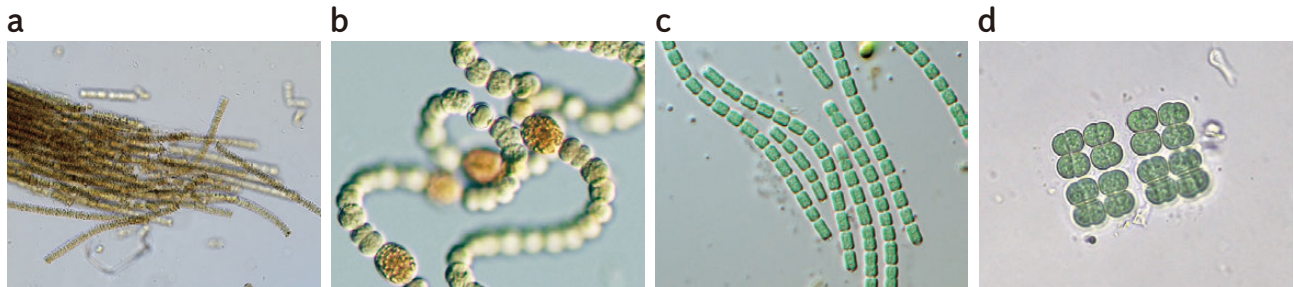
5. 地球生命と宇宙生命

## 1. 生命とは何か? を問い直す

宇宙にも生命がいるかもしれない! 将来は調べられるようになるかもしれない! —初めて宇宙の魅力に触れた小学生のころから、私にとって宇宙と生命はひとつながりの切り離せないものでした。専門は天文学ですが、子供時代は夜空の星よりも、カメやメダカ、カブトムシなどの生きものを眺めることの方が多かったのです。大学で「宇宙と生命」の講義を受け、直感的に惹かれたのにも、「ヘビと触れ合っていた」(両親談) 記憶が少なからず影響していたのでしょうか。1995年に太陽系の外で惑星が発見されると、生命を育む環境は地球の他にもあるのではないかという期待が高まっていきます。私も大学卒業後に10年以上、その“サイン”を探すための宇宙望遠鏡の開発に尽力してきました。しかし、開発が進むにつれて、私たち地球生命が地球外生命(宇宙生命)を見つけることにはどんな意味があるのか? そもそも見つけ出そうとしている生命とは何なのか? わからなくなってしまったのです。

そこで私は、生命が誕生した頃の地球環境を想像し、生きものの進化の歴史を自分なりにたどってみることにしました。まずは中学生以来の生物学を学び直すところからのスタートです。生物の先生たちに声をかけ、話を聞き、そこに自分のアイデアを展開していく。その中で出会ったのがシアノバクテリアです(図1a-d)。核を持たない単細胞生物の一群で、約30億年前に太古の海に現れます。光合成によって水から酸素を発生させ、現在につながる生態系の基礎をつくった生きもの(真正細菌)です。典型的な体の大きさは、1mmの1000分の1ほどしかありません。10億年以上前に真核生物の細胞内に取り込まれ、葉緑体として植物の祖先となったと考えられています。現在では3000種以上が記載され、海や川をはじめ、南極の氷の中から塩湖、温泉まで、あらゆる場所に生

息しています。私は長年学んできた物理を使って、このシアノバクテリアの進化のメカニズムをとらえようと考え、“ある仮説”にたどり着いたのです。この仮説を検証するための培養実験や野外調査などは、異分野の生物学的な手法です。専門分野を超えて個々の結果がつながり、30億年前の地球の風景が見えてきたのです。そこには、今のような青い海はありませんでした。生命を育んだ太古の海は何色だったのでしょうか?この仮説を理解するためには、光と色の関係性をおさえておく必要があります。



(図1) 現生する様々なシアノバクテリア

a : *Trichodesmium erythraeum* (一部改変)

©Peter Kamen, CC BY-NC 4.0, iNaturalist: <https://www.inaturalist.org/photos/441622906>

b : *Dolichospermum crissum* (一部改変)

©Glenn McGregor, CC BY-NC 4.0, iNaturalist: <https://www.inaturalist.org/photos/422168413>

c : *Pseudanabaena galeata* (一部改変)

©Glenn McGregor, CC BY-NC 4.0, iNaturalist: <https://www.inaturalist.org/photos/434214601>

d : *Merismopedia* sp. (一部改変)

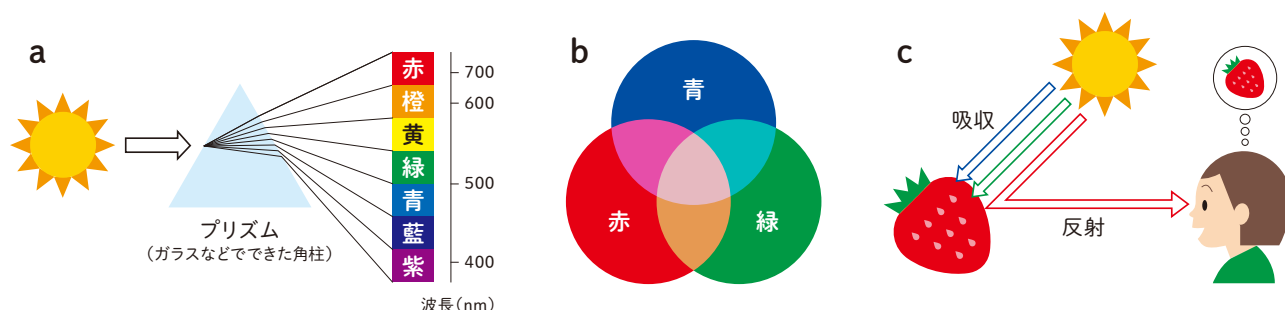
©MikeN, CC BY-NC 4.0, iNaturalist: <https://www.inaturalist.org/photos/110052396>

## 2. 光一波長と色の見え方

太陽の光は一般的に白色光とも言われますが、光が白い色をしているのではなく、複数の色の光が均等に混じっているために白く見えるのです。このことを最初に証明してみせたのが、アイザック・ニュートンで、1666年のことです。暗い部屋の中で太陽の光をプリズムに通すと、様々な色の光の帯が壁に映し出されたのです。これが光のスペクトルです(図2a)。その後、光は波であることが発見され、波の山から山の長さを波長と呼び、ナノメートル(nm)という単位で表すようになりました。1nmは1mの10億分の1の長さです。ヒトの目に見える可視光の範囲は、およそ380nmから700nmで、波長の短い方から、紫・藍・青・緑・黄・橙・赤の7つに区分されます。“紫”の“外”側にある、より短い波長をもつのが紫外線です。一方で、ヒトが網膜で受容できるのは、赤・緑・青の3つの波長領域で「光の三原色」と言います(図2b)。この3色の組み合わせで、私たちは紫から赤までの色を認識しているのです。

では、赤を赤と感じるしくみはどのようなものなのでしょうか?例えば、一粒のイチゴがあるとします。光源から出た3色の光がイチゴに当たると、緑と青の光を「吸収」し、赤の光を「反射」します。「吸収」というのは化学的な言い回しですが、イチゴが光エネルギーを受け取る反応であることをふまえる

とイメージしやすいのではないのでしょうか。そして、「反射」した光は目の奥にある網膜に届くと、視細胞を刺激し、電気信号として視神経を通じて脳に伝わります。こうして私たちは、「赤いイチゴ」を知覚するのです(図2c)。この視細胞には3種類あり、それぞれが光の三原色の波長に対応し、電気信号の強さと混ざり具合によって様々な色を作り出すことができます。以降本稿では、「赤の光」は「赤い波長の光」、「赤色」は「赤く見えること」を表すことにします。

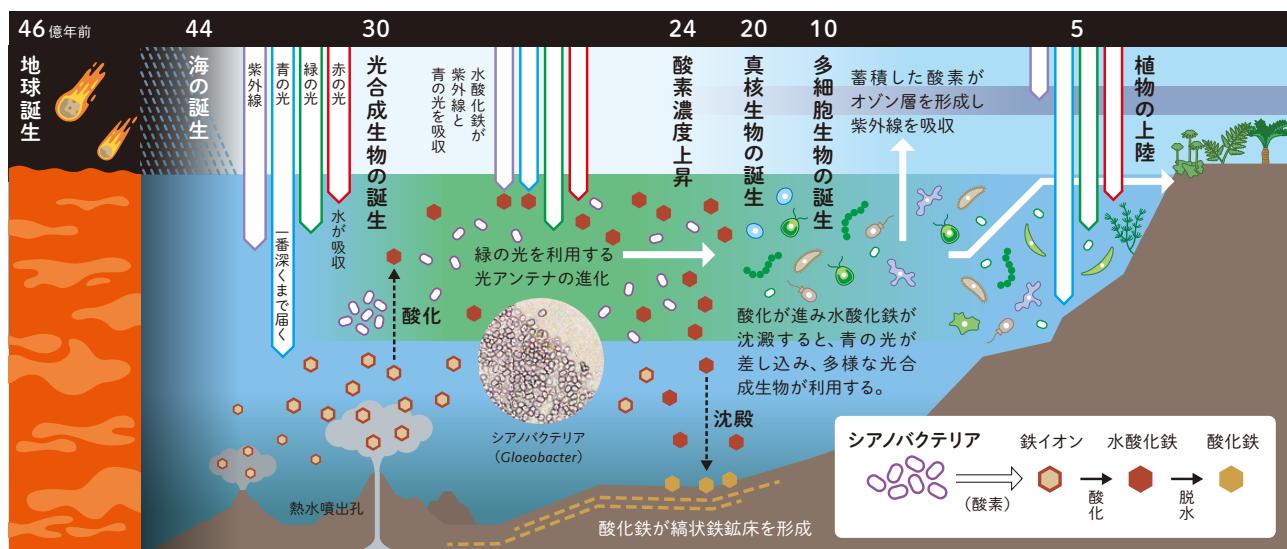


(図2) 光と色の関係

- a: プリズムを使った分光実験
- b: 光の三原色
- c: 色を認識するしくみ

### 3. 光—緑の海仮説

それでは、46億年前に話を移しましょう。図3に照らしながら、地球と生命の始まりを見ていきます。誕生間もない地球では、1500度を超えるマグマの海が広がっていました。分厚い雲が立ち込め、太陽の光はほとんど届きません。その後温度が下がると、1000年近く雨が降り続き、原始の海ができあがります。海底の熱水域からは、活発な火山活動により大量の鉄イオンが溶け出していました。雲が晴れ太陽の光が海に差し込むようになると、光の三原色のうち、赤の光、緑の光の順で水に吸収され、青の光が海底まで届き反射します。つまり、当時の海は青色に見えたはずですが。そして約40億年前、熱水噴出孔もしくは間欠泉（一定周期で噴出する水蒸気や熱水）の近くで、有機物の集まりの中から最初の生命が誕生します。この時代はオゾン層がないため、生体に有害な紫外線は遮られることなく海上に降り注ぎ、酸素もまだありません。その後10億年の間に光合成能力をもつ生物（シアノバクテリアの姉妹種など）が現れ、水から酸素をつくり始めます。紫外線の届かない水深で、青の光を使っていたのでしょう。鉄イオンは、酸素と結びついて水酸化鉄となり表層を漂います。この水酸化鉄は、不溶性の微粒子で、紫外線と青の光をよく吸収します。赤の光は浅い海域で水に吸収されるので、海中には緑の光が残されることになります。実際に、水酸化鉄の濃度分布を計算すると、この緑の光環境が再現されたのです。詳細は後述しますが、シアノバクテリアは、この光環境に合わせて緑の光を効率よく使えるように進化したと考えられます。そして、緑の光の一部は、水酸化鉄に反射し、実際に海は緑色に見えていたのではないかと、というのが私たちの仮説です。これは、「海中が緑の光で満たされたこと」と「海面が緑色に見えること」という2つの意味で、“緑の海仮説”と呼ばれています。



(図3) 緑の海仮説”(写真：図4cと同じ)

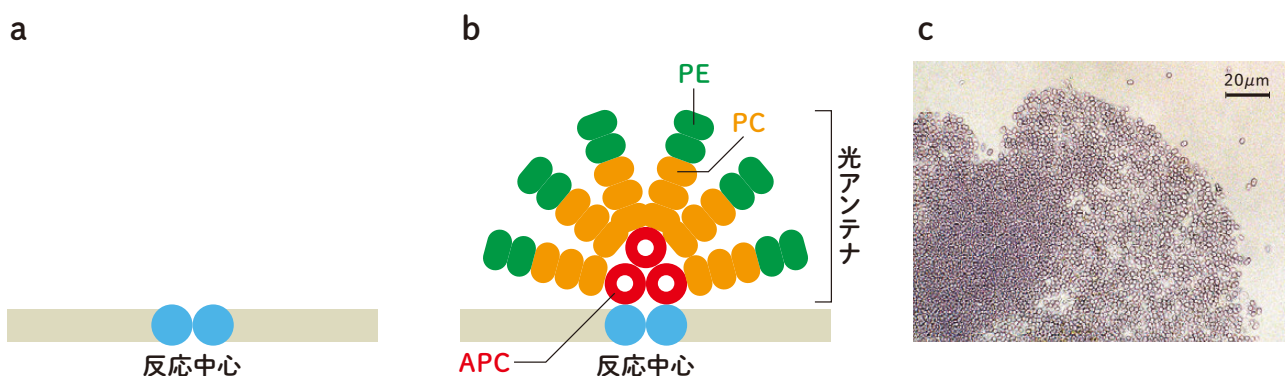
緑の海は、緑の光が豊富でシアノバクテリアが多く生息する酸化的な表層部と、より深い還元的な深水部に分けられ、鉄イオンはこの境目で酸化されていきます。大部分が水酸化鉄になると(酸化する相手がなくなると)、海中に酸素がたまり、飽和して大気中に放出されます。そして、24億年前に大気の酸素濃度が爆発的に上昇する大酸化イベントが起こり、ほどなくして真核生物が誕生します。水酸化鉄の微粒子は、お互いにくっついて大きめの粒になり沈澱していきますが、海底に堆積すると脱水され、酸化鉄に変わります。これが層状に積み重なったのが縞状鉄鉱床で、現在の私たちにとって貴重な鉄資源となっています。水酸化鉄が沈みきると、海中が澄み、青の光が差し込むようになります。そして、10億年以上続いた緑色の海は、再び青色の海になるのです。また、大酸化イベントによって大気中に一定量の酸素がたまるとオゾンが形成され始め、約5億年前に現在のようなオゾン層ができあがります。海上の紫外線が弱まり、浅い海域もどんどん酸化されていきます。同時に、生きものの進化が進み、全球凍結を経て、カンブリア大爆発や植物の上陸を迎えるのです。

## 4. 地球と生命の共進化

青の海で生まれたシアノバクテリアは、緑の海でどのような進化を遂げたのでしょうか？ 光合成は、光を集める、つまり、光エネルギーを吸収することから始まりますが、これを実行するのが「光アンテナ」です。集められた光は、「反応中心」に伝達されると、水を分解して酸素を発生させ、エネルギー源(ATP・NADPH)を生成し、次のステップ(糖の合成)に受け渡します。前述の通り、初期のシアノバクテリアは青の光を、続く緑の海では緑の光を、オゾン層の形成によって紫外線が弱まると全ての光を使えるようになります。私たちは、シアノバクテリアは光環境の変化に合わせて光アンテナを進化させてきたのではないかと考えています。



光アンテナは光合成色素とタンパク質からなる複合体ですが、光合成色素は、利用する光の波長によって決まります。原始的な光合成生物は、単純な光アンテナしかもたず、反応中心付近に局在するクロロフィルa（光合成色素）で青い光を集めていたのかもしれませんが（図4a）。集光効率はあまり高くはなかったのではないのでしょうか。緑の海に暮らすようになると、シアノバクテリアは、3種類の色素タンパク質複合体（PE・PC・APC）で構成される巨大な光アンテナを発達させます（図4b）。この中で、特異的に緑の光を集めるのはPEで、フィコエリスリンと呼ばれるビリン系色素タンパク質複合体です。赤の光を反射します（図4c）。私たちは、緑の海という光環境の選択圧の中でPEを獲得した種が生き残り繁栄したのではないかと考え、いくつかの培養実験を行いました。まず、PEを持たない現生種は、太陽光のような白の光環境下では非常に速く増殖しますが、緑の光環境下では急激にその速度が遅くなります（図5a）。このことは、緑以外の青や赤の光を主に利用していることを示しています。次に、PEの構成要素であるビリン系光合成色素、PEB（フィコエリトロビリン）を合成できる遺伝子組み換え株と、合成できない野生株を緑と白の光環境下で競合させると、遺伝子組み換え株は緑の光で（図5b）、野生株は白の光で優勢となります。緑の光を集める遺伝子組み換え株が緑の光環境に適応したためです。これらの結果は、PEBをもつシアノバクテリアが、緑の海で繁栄したことを裏付けるものです。さらに、遺伝子組み換え株を白の光環境下で培養すると、PEBの合成能力が失われることもわかりました（図5c）。現代につながる光環境では、緑の光を集める機能が必ずしも必要ではないのでしょうか。緑以外の光が十分に使える現生種には、これまでの巨大な光アンテナを捨ててしまう種も多く存在します。このような、海の光環境とシアノバクテリアの光アンテナにおける段階的なやりとりは、“地球と生命の共進化”とも言えるのです。



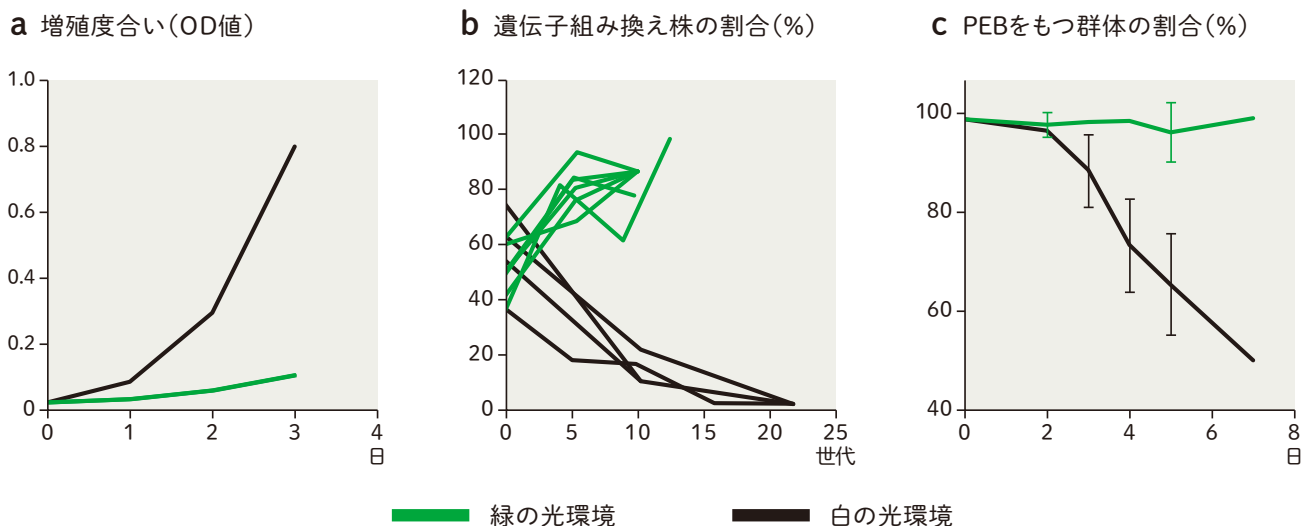
（図4）光アンテナの進化とPEをもつ赤色のシアノバクテリア

a：原始的な光合成生物の光アンテナ

b：緑の海の光環境下に生息するシアノバクテリアの光アンテナ。PE→PC→APC→反応中心の順に光エネルギーを伝達していく。

c：Gloeobacter violaceus PCC 7421（写真撮影：三輪久美子特任助教、協力：藤田祐一教授・馬場真里研究員）

現生種の中では最も古い時期に分岐したと考えられている。



(図5) 培養実験の結果

a: 緑の光環境  $n=3$ /白の光環境  $n=3$ 。OD値(光学濃度)はシアノバクテリアの個体数を反映する。

b: 緑  $n=7$ /白  $n=4$

c: 緑  $n=3$ /白  $n=4$ 。エラーバーはデータのばらつきを示す。

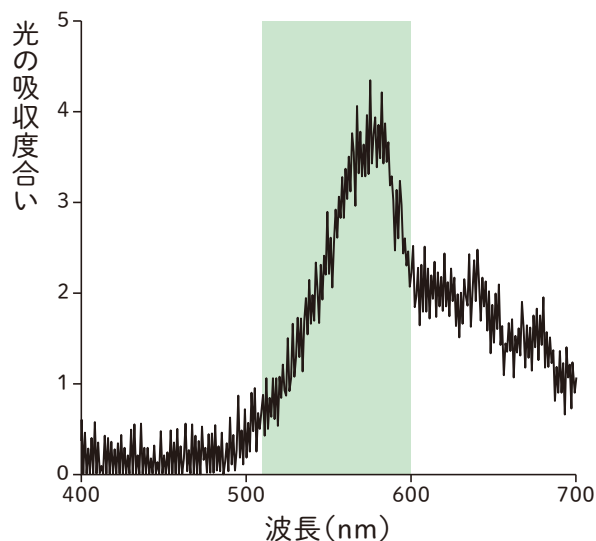
## 5. 地球生命と宇宙生命

ここからは現在に話を戻します。実は、緑の海は大昔だけの現象ではないのです。例えば、薩南諸島硫黄島海域には、現在でも緑の光環境が再現されています(図6ab)。とりわけ水酸化鉄が多い(青の光の遮蔽効果が大い)地点では、表層の白の光環境の地点と比べて、PEを持つ種が多いことも明らかとなっています。野外調査からも“緑の海仮説”が支持されたことになります。さらに、“地球と生命の共進化”は、現在も進行中なのです。このアイデアは、何億年という時間的スケールと、地球という空間的スケールから導かれたものです。この宇宙的とも言える視点から見ると、現在の地球生態系も宇宙との相互作用の中にあることが想像できます。地球生命は宇宙生命の1つにすぎず、私たち地球生命だけでは生命とは何かをきちんと理解することはできないのです。「宇宙・地球・生命」というつながりの中に生きものの本質があり、そこから人間を見つめ直す必要があるのではないのでしょうか。また、地球生命は、約40億年という宇宙年齢のおよそ3分の1の時間をつないできましたが、ヒトが誕生したのはつい最近のことです。その間、無数の生きものが現れては消え、現生種は記載のあるものだけで約200万種にのぼります。この生きものの歴史(進化)を地球史、さらに宇宙史の中で読み解いていくことで、私たち人間は現在を謙虚に受け止め、未来を見据えることができるのではないのでしょうか。

a



b

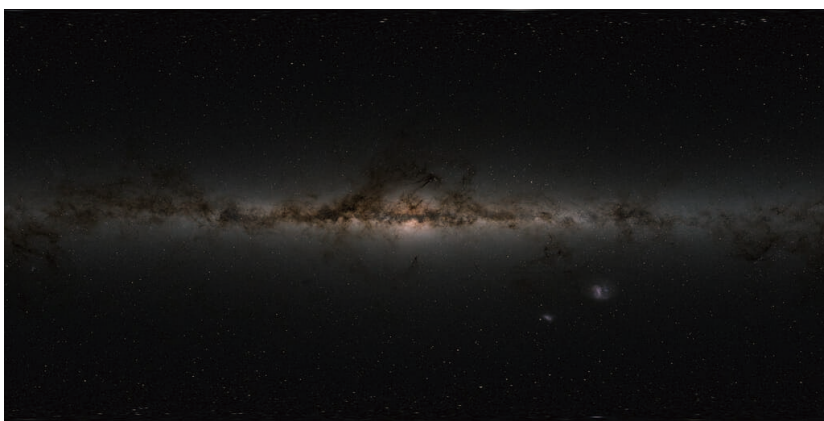


(図6) 薩南諸島硫黄島海域

a: 実際の海の色。

b: 水深5.5mにおける光のスペクトル。緑色に見える波長領域を背景に示す。

最後に、天文学的に“緑の海仮説”をとらえると、緑色の海は宇宙生命の“サイン”となる可能性を秘めています。緑色の海の時代は億年単位で続き、青色の海よりも10倍も明るいのです。その光を望遠鏡で観測することは、決して非現実的な試みではありません。宇宙空間にかがやく緑の星を想像してみてください(図7)。そこでは、海全体を酸化する小さな生物の活動が見られるのでしょうか。宇宙生命が発見されれば、地球生命との比較から、生命の普遍性と星ごとの固有の性質を知ることができるかもしれません。これからも、地球生命を手がかりに、生命とは何かを問い続けていきたいと思っています。



(図7) 天の川銀河(写真提供: NASA)



松尾 太郎 (まつお・たろう)

千葉県出身。名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程修了。NASA Ames Research Center訪問研究員、名古屋大学大学院准教授などを経て、現在大阪大学大学院理学研究科教授。著書に『宇宙から考えてみる「生命とは何か?」入門(14歳の世渡り術)』(河出書房新書)。専門は天文学、宇宙生物学。宇宙生命探査のための宇宙望遠鏡を開発しながら、「宇宙・地球・生命」から生命をとらえる研究にも取り組む。



# 世界を旅する赤い藻類

## 極限環境微生物の地理的分布



瀬川高弘 山梨大学 総合分析実験センター

南極や北極などの極地、雪の残る高山などにひっそりと現れる「赤い雪」。その正体は、雪や氷の表面で繁殖する微小な藻類 — 雪氷藻類です。DNA解析から地理的に独立した場所に棲む彼らの関係や、小さな藻類と大きな地球との関わりが見えてきました。

### CHAPTER

#### 1. 雪が赤く染まる

#### 3. DNAが示したつながり

#### 5. 世界を旅する小さな藻類

#### 2. 雪の中で生きる赤い藻類

#### 4. ハワイ島での発見

#### 6. 終わりに - 小さな生命と大きな地球

## 1. 雪が赤く染まる

真っ白な雪原の中に、にじむように現れる赤い斑。北極のスバルバル諸島や南極大陸、アルプスや日本の高山地帯で観察されてきたこの現象は、古くから「赤雪」と呼ばれている（図1）。古代ギリシャの哲学者アリストテレスの著作にも赤雪の記述があり、19世紀にはダーウィンも著書の『ビーグル号航海記』のなかで、アンデス山脈で靴底を真っ赤に染める赤い雪に出会ったことを印象深い出来事として書き残している。日本でもいくつかの古文書に「赤き雪」の記録が残されており、人類は長いあいだこの不思議な雪に魅せられてきた。



（図1）雪原に現れる赤い雪

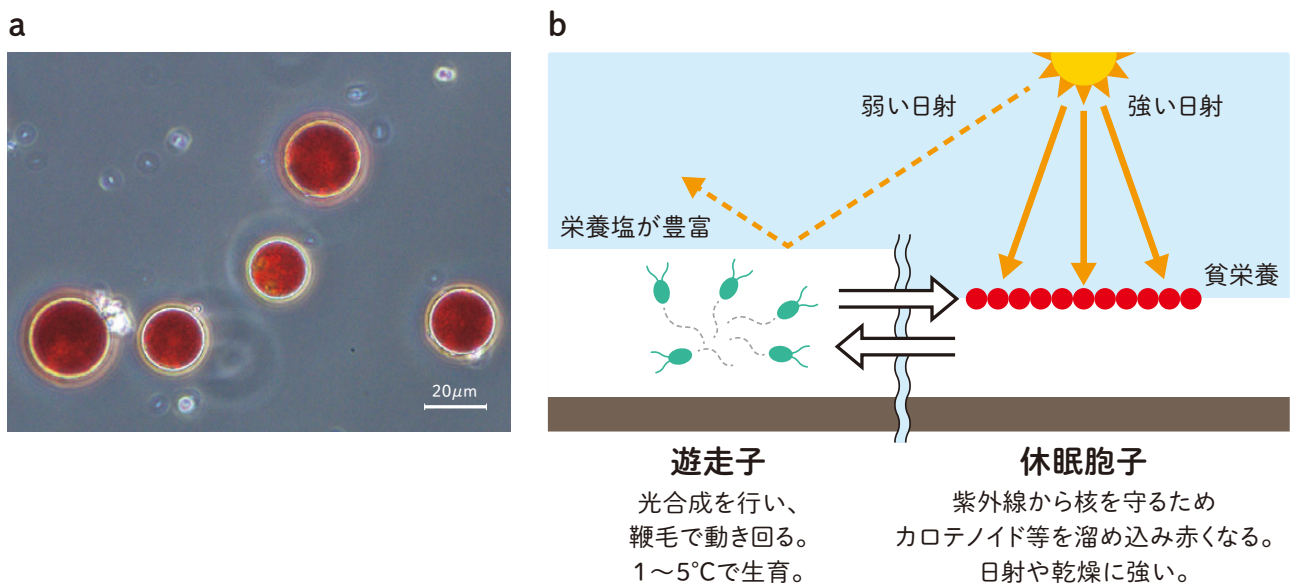
左）南極半島 リビングストーン島

右）アラスカ ハーディング氷原



## 2. 雪の中で生きる赤い藻類

赤雪の正体は、雪や氷の表面で繁殖する微小な藻類 — 雪氷藻類（せっぴょうそうるい）である（図2a）。北極や南極、世界各地の高山の融雪期に現れる単細胞の光合成生物で、一般的な生育温度は1 ～ 5℃程度の低温環境である。氷や雪の上という極端に低温で栄養も乏しい環境に適応した「極限環境微生物」の一員だ。積雪や氷河上に生息する他の従属栄養生物（註1）へ有機物を供給する一次生産者として、雪氷の生態系で重要な役割を果たしている。春から夏にかけて雪面が解けはじめると、雪氷藻類は鞭毛をもつ緑色の「遊走子」となって雪の中を泳ぎ回り、光や栄養の多い場所へと移動して光合成を行う。しかし、強い紫外線や貧栄養などのストレスにさらされると、生き残りモードに切り替え、「休眠孢子」になる。そのとき、細胞の中にはアスタキサンチンをはじめとする赤いカロテノイド系色素が大量に蓄えられる。いわばサングラスのように紫外線を遮り、DNAが傷つくのを防ぐしくみだ。（図2b）こうして赤く染まった休眠孢子が雪面いっぱいに蓄積すると、肉眼でもはっきりと赤く見える「赤雪」となる。休眠孢子は、紫外線や乾燥に強く、雪が完全に消えたあとも長く生き続けることができる。そして次の春、雪の表面が解けはじめると再び発芽して遊走子となり、短い夏の間だけ雪の中で活動を再開する。雪氷藻類は、このサイクルを繰り返しながら、極地や高山という過酷な環境を生き抜いている。



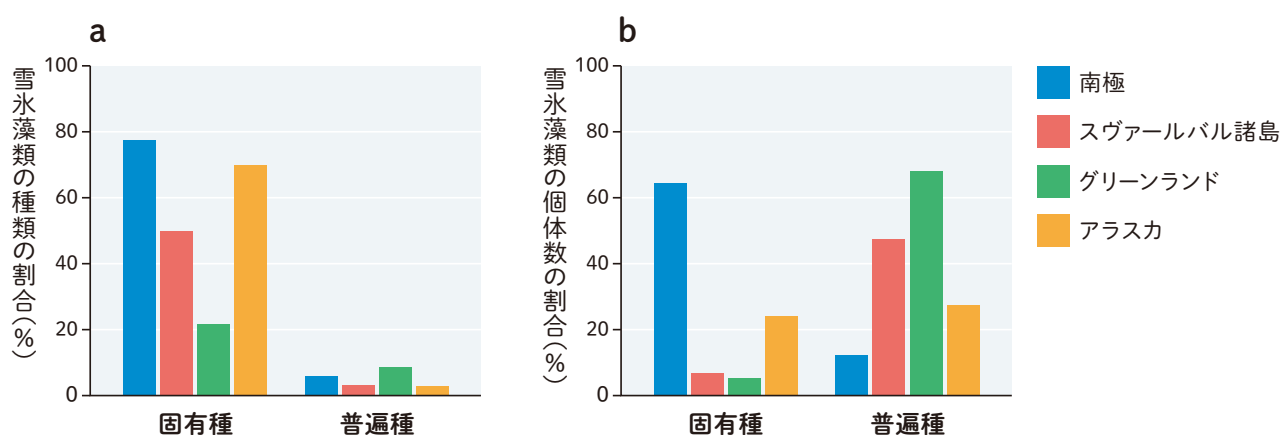
（図2）a)雪氷藻類(休眠孢子)      b)環境に応じて姿を変える雪氷藻類

（註1）従属栄養生物

生きるために必要な栄養を自分自身で生産できず他の生きものを摂取する生物群

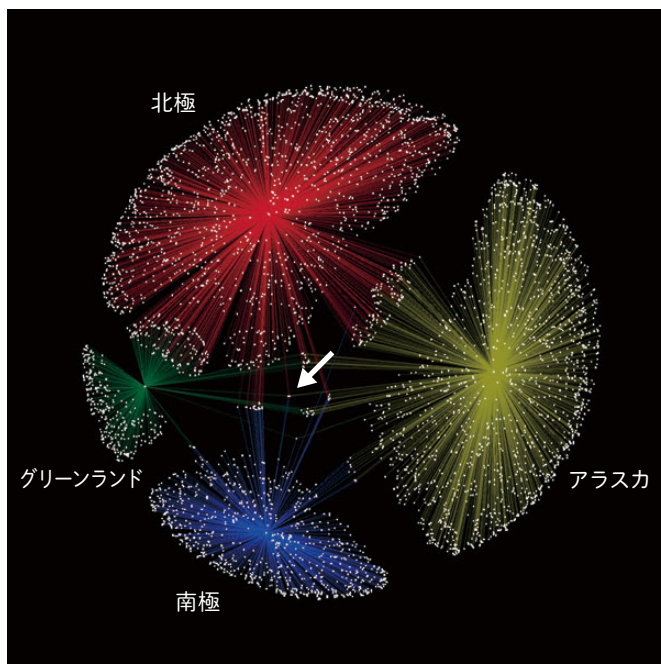
### 3. DNAが示したつながり

雪氷藻類はグリーンランドやアラスカなどの北極圏から南極大陸まで、極域の様々な場所に広く分布している。しかし、実際に雪面で観察される赤い色素を持った雪氷藻類の多くは「休眠孢子」の状態であり、どこの赤雪を観察してもほぼ同じような色とサイズに見えるため、形態から正確に種類を見分けることは難しかった。雪氷藻類の棲む氷河や積雪は、北極と南極、山岳地域ごとに地理的に独立している。では、例えば2万キロメートルも離れた北極と南極には、まったく別の雪氷藻類が生息しているのだろうか。そして、それぞれの雪氷藻類は一体どこから来たのだろうか。この問いに答えるため、北極圏（スヴァールバル諸島、グリーンランド、アラスカ）および南極で採取した赤雪試料を用い、ITS2と呼ばれるDNA領域に注目してDNA解析を行った。ITS2領域は進化速度が速く、特に菌類や緑藻を含む植物・藻類において、種レベルの同定や系統解析に広く用いられている領域である。解析の結果、全部で64,047種の遺伝的タイプ（系統グループ）が見つかったが、そのほとんどは特定の地域にしか存在しない「固有種」であった。一方で、解析した全ての地域から検出された「普遍種」の種数は912種で、全体のわずか1.4%に過ぎなかったにもかかわらず、赤雪中の雪氷藻類の個体数の割合の内訳を見ると、これら普遍種が占める割合は平均で37.3%に達していた。つまり、遺伝的タイプの数としては少数派であるにもかかわらず、実際の雪面上では、普遍種の方が主要な構成メンバーになっていたのである（図3）。仮に北極と南極間で藻類の行き来が長い間途絶えていれば、同種内でも両極間では進化速度の速いITS2領域の塩基配列は異なっていくはずである。したがって、地球上で最も離れた場所にある北極と南極のあいだで、共通する雪氷藻類が広く分布しており、それらは現在も分散、交流していることになる。見た目にはどこも「同じような赤い雪」に見えるが、そのDNAを読み解くことで、地球規模でつながった小さな藻類のネットワークが浮かび上がってきたのである（図4）。



（図3）両極から検出された雪氷藻類の割合

完全一致配列の多くは特定の地域のみが存在する「固有種」（平均55.1%）で全域から検出された「普遍種」の割合は3-9%（平均1.4%）と低頻度だった（a）。しかし「普遍種」の個体数の割合は平均で37.3%と高い（b）。



(図4) 各地域間の微生物-微生物ネットワーク図  
完全一致配列(点)につながった線の色が、その配列が検出された地域を示す。白い矢印はすべての色とつながっており、全ての地域から検出された完全一致配列。ほとんどが地域固有のものであるため、違う色で結ばれる線は少ない。

## 4. ハワイ島での発見

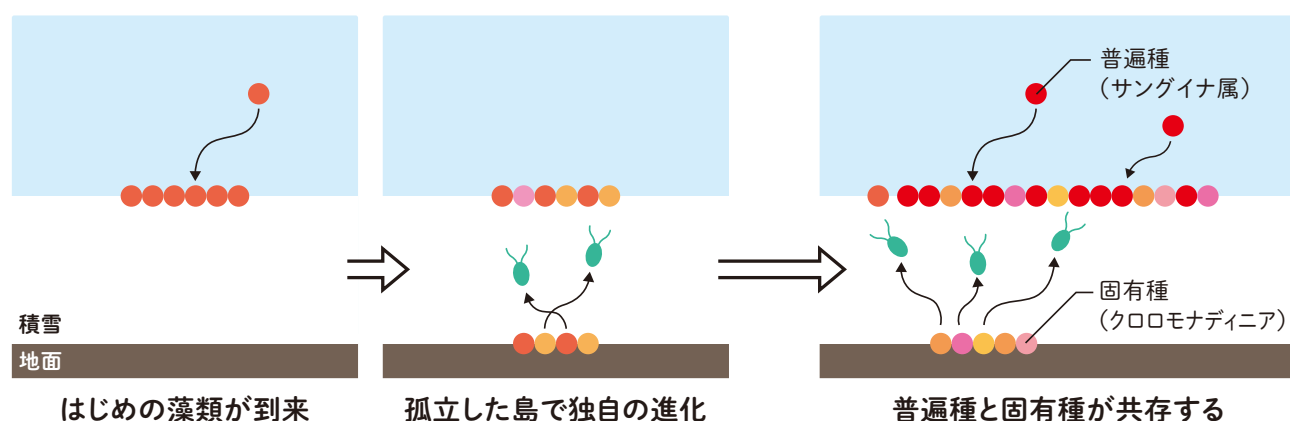
赤雪はこれまで、北極や南極の氷河に加えて、日本の高山域や北米ロッキー山脈、南米のアンデス山脈など、世界各地の山岳地域から報告されてきた。ところが2023年、世界で最も孤立した雪氷圏であるハワイ島マウナケア山でも赤雪が観察された。ハワイ島のマウナケア山(標高4,207メートル)は、熱帯に位置するにもかかわらず、冬には山頂が雪に覆われる特異な山である。太平洋中央部に位置し、最も近い大陸から約3,900キロメートル離れたハワイ島の雪に、雪氷藻類が繁殖して赤雪現象が起こるかどうかについては、これまで報告されていなかった。普段は雪が積もっても春先にはすぐに消えてしまうが、2023年はラニーニャ現象の影響もあって冬から春にかけてたびたび降雪があり、気温の低い状態が続いた(図5)。その結果、山頂部で過去33年間で最も長く雪が残り、7月末になっても雪渓が消えないという異例の状況が生まれた。それが、赤雪の試料を採取するまたとない機会となった。



(図5) ハワイ島マウナケア山の積雪

左: 2021年1月21日、右: 2021年3月26日。普段は2ヶ月もすれば雪は溶けて残雪はほとんど残らない。

遺伝子解析の結果、ハワイ島マウナケア山の赤雪には、大きく二つのグループが存在することがわかった。一つは「クロロモナディニア」と呼ばれるグループの一員で、約25万～13万年前にハワイ島に飛来し、その後島内で独自に進化してきたハワイ島の固有系統である。分子進化解析により、この固有系統が近くの氷雪圏からハワイ島に到来した時期は、マウナケア山が氷河で覆われていたポハクロア氷河期（約19万～13万年前）と重なっている。つまり、この固有系統は、寒冷期にハワイ島へと飛来したクロロモナディニア藻類が独自に進化したものと考えられる。もう一つは、「サングイナ属」に代表されるグループで、北極から南極まで世界各地の赤雪で検出される、いわゆる「普遍種」であり、一部は、現在世界各地で報告されている種とITS2配列が完全に一致していた。このことは、雪氷藻類でも種によっては長距離分散によりハワイ島へ到来し、2023年のような雪が長が残る年には赤雪を引き起こすほど繁殖することが可能であることを示している（図6）。



（図6） ハワイで共存する2種類の雪氷藻類

ポハクロア氷河期（約19万～13万年前）に到来し、時間をかけて定着・多様化した「固有種」と、長距離分散によりその年に到来した「普遍種」。

すなわち、ハワイの赤雪は「長い時間をかけてこの島に根づいた固有種」と、「遠方から飛来し、一時的に増える普遍種」が同じ雪面で共存していることが明らかになった。孤立した熱帯の島であっても、地球規模の大気循環や気候変動がこの藻類の繁殖に影響しているようだ。同一の山域において、長期スケールで進化した固有種と、現在も継続的に飛来する普遍種が共存するという現象は、微生物生態学に新たな知見を与える事例として大きな関心を集めている。



雪氷藻類を求めて、北極や南極、さらには南米パタゴニアの氷河地帯など、地球上の極限環境へ調査に向かう。パタゴニアでは、食料やテント、調査用具を何頭もの馬に載せ、風にあおられながら氷河を目指して歩き続けることもある。調査ができるのは、雪が解けて雪氷藻類が活動を始める夏のわずかな期間だけだ。吹雪で数日間、基地やテントに足止めされることもあれば、雪原を数十キロの荷物を背負って歩くこともある。限られた時間と設備のなかで、雪氷藻類が集まって赤く染まった雪試料を慎重に採取し、試料を冷凍容器に入れて持ち帰る。途中で解けてしまうと細胞の状態が悪くなり、DNAもすぐに分解されてしまうのだ。こうした現地調査が欠かせないのは、雪氷藻類が研究室ではほとんど培養できないからでもある。理由はまだはっきりしていないが、どれだけ温度や光条件を調整しても、人工環境では長く生き延びることができない。だからこそ、観察や遺伝子解析には、自然環境から直接採取した試料を使うしかない。過酷な自然のなかで集めたひと握りの雪が、地球の環境変化や生命の適応のしくみを読み解くための、大切な手がかりになっている。



ハワイ島での調査の様子

コンタミネーション(試料の汚染)を防ぐために防護服を着用して試料を採取する。

## 5. 世界を旅する小さな藻類

では、雪氷藻類はどのようにして、北極から南極、そしてハワイ島にまで移動しているのだろうか。風に舞い上がった孢子が大気中を長距離輸送される可能性に加え、近年注目されているのが渡り鳥の役割である。これまでの研究から、南極の海鳥トウゾクカモメ (*Stercorarius pomarinus*) がインド洋まで渡り、その過程で特定のバクテリアを取り込み、それを南極に運んでいる可能性が示されている(参考①)。もしバクテリアが鳥によって地球規模で移動できるのであれば、藻類の休眠孢子も、鳥の足や羽、あるいは糞を介して運ばれていても不思議ではない。実際、海鳥や高山性の鳥たちは雪上に降り立ち、採餌や繁殖を行っている。



### 【参考文献】渡り鳥による耐性菌の南極への拡散

アデリーペンギンの巣に近づくナンキョクオオトウゾクカモメ。

撮影者：高橋晃周(国立極地研究所) 撮影地：南極昭和基地近く 袋浦

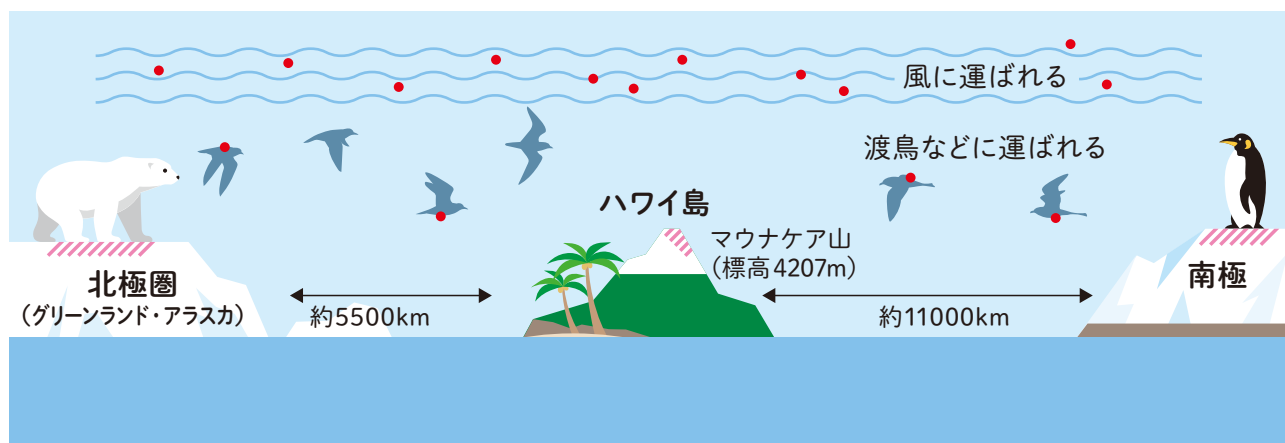
Segawa, T et al. (2024) Spread of antibiotic resistance genes to Antarctica by migratory birds.,

*Science of The Total Environment*,

渡り鳥による抗生物質耐性菌の南極への拡散が明らかに



以前に行った北極と南極の赤雪藻類の比較研究では、多くの雪氷藻類が北極や南極に固有の「固有種」だが、ごく一部に両極に共通して分布する「普遍種」が存在し、それらが赤雪の主要構成種になっていることがわかった。今回のハワイ島の研究は、こうした「固有種」と「普遍種」が同じ雪面で混ざり合う様子を、具体的なケースとして示したと言える。赤雪は、生きものや大気の流れに運ばれながら、静かに世界を旅しているのだ(図7)。



(図7) 世界を旅する雪氷藻類

## 6. 終わりに - 小さな生命と大きな地球

近年では、雪氷藻類の作り出す赤雪は、雪を赤く染めることで太陽光をより多く吸収し、氷や雪の融解を加速させることが報告されている。しかしそれは単に、「地球温暖化を加速させる存在」という話にとどまらない。雪氷藻類は、雪氷環境で生きることを選んだ生きものであり、雪を解かす行為も含めて、何百万年という時間スケールで続いてきた雪氷圏の生態系の営みの一部である。同時に、気候変動への警鐘でもある。気候モデル研究では、今世紀末にかけてマウナケア山の降雪頻度や残雪期間のさらなる減少を示唆する報告があり、長期にわたり形成されてきたハワイ島固有の遺伝的多様性が将来的に失われるリスクが高まる可能性がある。

これからは、雪氷藻類のゲノムを読み解くことで、雪氷の過酷な環境での生活を支える代謝経路や、「赤くなる」反応を制御している遺伝子の姿が、少しずつ見えてくるだろう。また、氷の中にタイムカプセルのように眠る過去の藻類を解析することで、雪氷藻類がいつどのように進化し、多様化してきたのかも明らかにしていきたいと考えている。こうした知見は、雪の中でしか生きることができない雪氷藻類の保護や、温暖化によって消えつつある雪氷生態系の保全にもつながるはずだ。もしかすると、地球温暖化の進み方を理解する新たな鍵を与えてくれるかもしれない。これからも、広い地球に共に生きるこの小さな藻類の姿を、雪の上から静かに追いつけていきたい。



瀬川 高弘 (せがわ・たかひろ)

2005年東京工業大学大学院生命理工学研究科博士課程修了。国立極地研究所・新領域融合研究センターの特任研究員、特任助教として北極・南極の雪氷生態系研究に従事したのち、山梨大学総合分析実験センター特任助教を経て、2021年より同センター講師(現職)。専門は雪氷微生物生態学、古代DNA解析、環境DNA解析。

氷河に生息する微生物やアイスコアに封じ込められた古代の微生物をはじめ、マダガスカル島で絶滅した象鳥エビオルニスやニホンオオカミ、ナウマンゾウなど大型絶滅動物のDNA研究も進めている。化石や氷試料、堆積物などから、過去の生態系の「タイムカプセル」を開ける瞬間が何よりの楽しみ。

# 原始多細胞動物の世界

## 〈ゲノムと実験研究から迫る未踏の地〉



現在の地球で繁栄している動物の多細胞体制のしくみはどのように始まり、多様化したのでしょうか?その発展のもととなる原始の多細胞動物について、3名の研究者が考えました。

- 
- CHAPTER      1. はじめに  
                 2. 座長より  
                 3. 座談会（船山典子 × 菅 裕 × 小田広樹）
- 

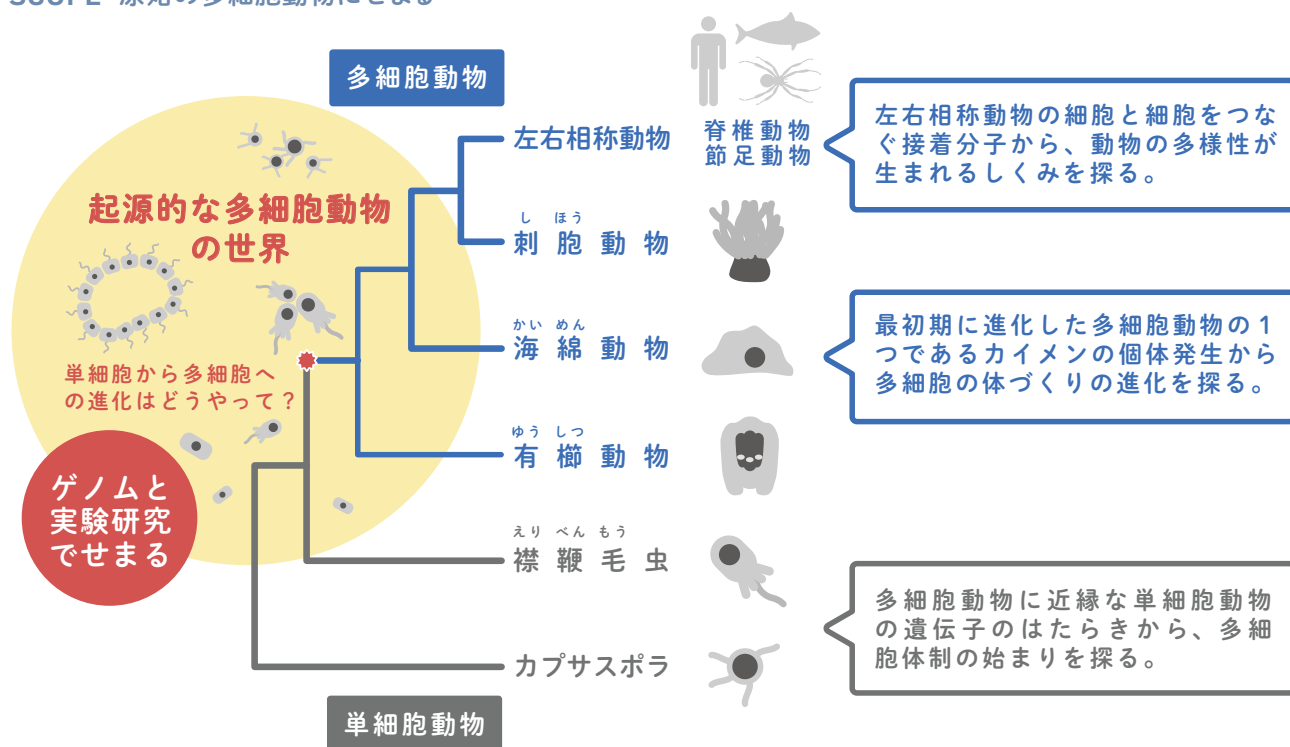
## 1. はじめに

地球上では脊椎動物や昆虫など、高度に組織化された多細胞動物が繁栄してきました。しかし、数億年の単位で時代を遡れば、現在のような複雑な形を作れない多細胞動物の世界があったと考えられます。動物の多細胞体制の仕組みはどのように始まり、進化の過程で高度に組織化され、多様化し、地球上の様々な環境に適応したのでしょうか?研究館では、その発展のもととなる原始の多細胞動物について考えるシンポジウムを開催しました。本記事では、シンポジウムの最後で語られた研究者たちの声を紹介します。

## 2. 座長より

2025年現在、ゲノムを通じて生きものの深い歴史をたどれる時代が到来していることは間違いありません。しかし、原始の細胞の仕組みを理解するには、ゲノムだけでは不十分で、実験研究の発展が待たれている状況と認識しています。実験研究から展開される開拓者精神を持った研究者が、未踏の研究領域に挑むこと。そのような面白さが詰まった今回のシンポジウムが、未来への道標となれば幸いです。





## SPEAKER 演者紹介



### 小田広樹(座長) JT生命誌研究館 細胞・発生・進化研究室

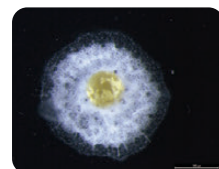
動物多様化の背景にある細胞システムの進化に興味を持っている。1) 形態形成に重要な役割を果たす細胞間接着構造(アドヘレンスジャンクション)に関わる進化の研究と、2) クモ胚をモデルとした調節的発生メカニズムの研究を行っている。



### 船山典子 京都大学 大学院理学研究科

単細胞動物から多細胞動物はどう進化し、どのように発達したのだろうか? 現存する多細胞動物の中で最も早く進化したと考えられる動物門の1つであるカイメン動物の個体形成過程に着目している。そして、カイメン独自の機構を解明することで、これまで知られていない全く新しい発生の仕組みを明らかにしようとしている。

(参考記事: 季刊「生命誌」70号「カイメンの幹細胞から見る多細胞化の始まり」)

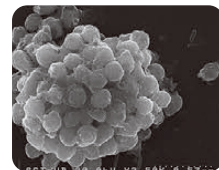


カワカイメン



### 菅 裕 広島県立大学

動物が多細胞体制を進化させるには、細胞同士の接着や連絡など、多くの新しい分子機能が必要であったはずである。そうした機能を実現するために必要な遺伝子を、動物の祖先はどこから調達したのだろうか? この謎に、動物に近縁な単細胞生物である「単細胞ホロゾア」と呼ばれる生物をモデルに迫ろうとしている。



群体をつくるカプサスポラ

## 2. 座談会「ゲノムと実験研究から迫る未踏の知」

### 遺伝子の役割は変わっていく

小田 本日は嬉しさでいっぱいです。原始多細胞動物を理解する上で大事だと思う点をお二人とは共有していると感じています。これ以上お尋ねすることが思い当たらないくらいですが、ここで掘り下げてみたいのが、遺伝子の祖先的な機能についてです。



我々の体をつくるのに重要な「ヘッジホッグ」という遺伝子があります。脊椎動物の特徴である、背骨（脊椎）の繰り返しパターンをつくる遺伝子です。ヘッジホッグは節足動物や刺胞動物などにも広く受け継がれていますが、脊椎動物以外でどんな機能をもっているのかは研究が進んでいません。この遺伝子、多細胞動物の祖先では全く別の機能をもっていたのではないかと思いますのですが、船山さんのお考えはどうですか？

船山 祖先的な機能を語るのは難しいですが、少なくともカイメン動物と脊椎動物では性質が違います。脊椎動物のヘッジホッグは、遠隔の細胞に情報を伝える分泌シグナルの役目もちます。多数の離れた細胞とやりとりをすることで、大きな体のパターンをつくり出せるのでしょう。一方、初期に分岐した多細胞動物であるカイメンでは、ヘッジホッグに相当する遺伝子は非常に長く膜貫通型です。つまり細胞膜に埋まった状態で、隣の細胞とのやりとりにしか使えません。

小田 興味深い違いです。細胞間でいかに情報をやりとりするかは、多細胞動物の体づくりで重要になってきますから。遺伝子が受け継がれていく中で、ヘッジホッグの性質が変わっていったのでしょうか。

船山 祖先の単細胞動物からさまざまな多細胞動物が分岐していくにつれ、色々な分子について、遺伝子ドメイン\*の組み合わせが変わる「ドメインシャッフリング」が起きたよう



です。脊椎動物と同じ分泌型のヘッジホッグは、刺胞動物が進化する前にドメインシャッフリングで生じ、隣の細胞だけでなく離れた細胞とも相互作用できるようになったことがわかっています。ここからより複雑な構造をもつ多細胞動物の体づくりに働くようになったのだと考えられています。

\*ドメイン…遺伝子の中で特定の機能や構造をもつ配列のまとまり

小田

多細胞体は細胞同士がしっかりくっつくことが重要です。そのため多細胞動物にはカドヘリンやインテグリン、ラミニンなどいくつかの接着分子があります。我々はクモやハエのカドヘリンに着目していますが、細胞を基底膜に接着させる役割をもつラミニンにも興味をもっており、菅さんのお話に大いに興奮しました。

菅

ラミニンは動物の複雑な体づくりに関与する、実に「多細胞動物らしい」遺伝子ですが、単細胞動物であるカプサスポラにもあります。カプサスポラは環境が悪化すると群体になるのですが、この時、互にくっついた塊になるのにラミニンは使われている。つまり彼らにとって、ラミニンは危機の際にはたらく遺伝子なのです。動物の多細胞化は、祖先の単細胞動物が危機避難の際に使っていた遺伝子を流用したことが始まりではないか、というのが私の仮説です。

小田

実際、多細胞体制に必要な遺伝子の多くを、カプサスポラがもっているというお話には驚きました。一方で、単細胞ホロゾア\*のゲノムにある遺伝子を幅広く見た時に、左右相称動物には見られない多様な遺伝子があるのではないかと思います。菅さんはその多様性を感じることはありますか？

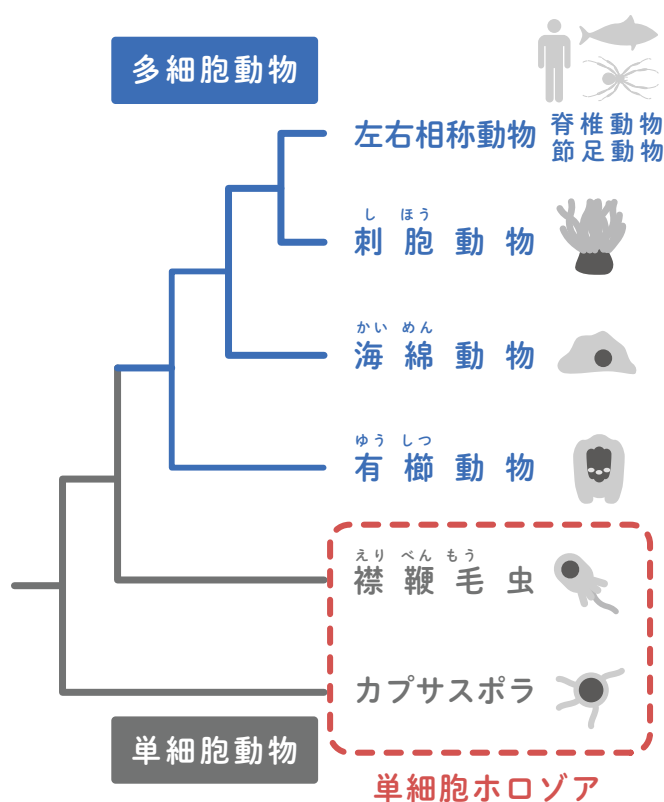
\*単細胞ホロゾア…多細胞動物に近縁な単細胞動物。襟鞭毛虫やカプサスポラを含む（下図参照）。

菅

ドメイン単位での組み合わせには複雑なバリエーションがありますね。初期に分岐した動物のグループでは、後の動物からは想像できないようなドメインの組み合わせが見られます。かつて、さまざまな組み合わせを試した時代があったのだと思います。

もちろん生物は目的を持って進化するわけではありませんから、生物が試行錯誤して進化したと考えるのは正しくない。実際は、どんなに滅茶苦茶でも環境が良くて生き延びられた時代があったのだと、私は考えています。数

億年前の地球のどこかに、何をやっても生きられる天国みたいな場所があったのではないかと。我々が今眺めると、厳しい環境のなかで行われた適応のようにも見えますが、彼らにしてみれば、もしかしたら逆に、制約のない状態で自由気ままに行われた進化実



験だったかもしれません。ここで一旦多様になった組み合わせの中から、子孫の代でそれぞれの生息環境に適したものを受け取っていったのだと思います。我々のような多細胞動物は、そうした子孫の一つです。

## 遺伝子から見る生きものの関係性

小田

カイメン動物にもさまざまな系統や種がありますが、「カイメンをカイメンたらしめている」といえるような共通の遺伝子セットは見つかっていますか？ それとも、それぞれのカイメンがお互い全く違う遺伝子をもっているのでしょうか？

船山

カイメンに限らず、動物では基本的に分類群ごとに、その生き方や生息環境に合わせた特異的な遺伝子群があることは知られています。カイメン動物にもそのような遺伝子セットがあるはずで、その一つは「集合因子遺伝子群」かもしれません。カイメンは、体を構成している個々の細胞の接着を人工的にうまく外して、バラバラな多数の細胞にすると、細胞が再び集合して小さな個体をつくることができますが、集合因子群とは、このとき同種の細胞を認識するのに働く多種類の巨大分子の遺伝子群です。

今までは、わかりやすさのために生物共通の遺伝子ばかりが着目されてきましたが、多様性を理解するためには、たとえ難しくとも、そのグループで獲得された新しい特徴に結びつくような独自の遺伝子 (Taxonomically restricted genes) の機能を解き明かしていくことが大切だと考えています。

小田

動物の分子生物学的な研究は、ヒトを知る目的から始まったところが大きいので、特にヒトと共通の遺伝子ばかりが研究される傾向にありますね。しかし、実際はそこから外れた多様な遺伝子があるはずだと、私も思います。生物の歴史を語るときには、左右相称動物では研究されてこなかったような目立たない遺伝子が、実は大昔に大事なことをしていたかもしれないのです。

船山

もう一つ、遺伝子が共通なのか多様なのかという見方も、今後は変わってくるはずです。これまで遺伝子が似ているかどうかは、アミノ酸の配列（並び順）を比較して判断することしかできませんでした。しかし生体において遺伝子の情報は、アミノ酸の配列が3次元構造のタンパク質になることで、初めて機能を発揮するわけです。AlphaFold\*という画期的なツールができた今、ゲノムやトランスクリプトームの比較では似ている遺伝子が全くないと言われた生物どうしが、タンパク質の立体構造をみると似たものをもっていた、という事例が出てきています。

\*AlphaFold…タンパク質の3次元構造を、そのアミノ酸配列から高精度に予測できる人工知能プログラム。



小田 菅さんはどうですか？単細胞ホロゾアの遺伝子実験から、何か面白いことが見えていますか？

菅 ヒトからかけ離れた生物は、離れているからこそヒトを理解する糸口になり得ます。「ハンチントン病」という人間の疾患をご存知ですか。手足が意志に反して動いてしまうことから、昔は「舞蹈病」と呼ばれていました。原因となるのは「ハンチンチン」という遺伝子で、そのタンパク質が神経細胞に滞留することが疾患の引き金になるとわかっています。実はヒトのハンチンチンと同じ遺伝子が、カプサスポラにもあるんですよ。

小田 我々の疾患と関わっている遺伝子が、カプサスポラにもあるとは意外です。

菅 アルツハイマーもそうですが、疾患の原因となる遺伝子が、正常な状態でどんな機能を果たしているのかは未解明ことが多い。遺伝子が捨てられていないということは何かしているはずですが、本来の機能がわからないため研究の進めようがないのです。し



かし、複雑に分化したヒトの細胞ではなく、カプサスポラのような単細胞生物なら、その機能を明らかにするのは難しいかもしれません。実際私たちが、カプサスポラのハンチンチンをノックアウトしてみたら、細胞の運動性に影響がみられたんです。カプサスポラのような一見役に立たない生きものが、ヒトの舞蹈病を解決することを夢見たりするのです。

## 一から立ち上げるからこそ見える世界

小田 お二人の研究で難しいと感じる点、反対に面白いと思う点は何ですか？

船山 モデル生物なら既に確立しているような基本的な手法でも、カイメンの研究では一から確立しなくてはならない苦労がありました。特に遺伝子機能解析やライブイメージングができないことが大きな壁でしたが、研究を始めたときからその実現を目掛けて努力してきて、やっと花が咲きそうです。仲間も増えつつあり、これからさらにカイメン研究が大きく展開するところです。

小田 それは素晴らしい。これからが楽しみですね。

船山 またカイメンの細胞は柔軟性に富んでいる点が面白いのですが、柔軟すぎて遺伝子発現解析だけでは捉えられないのではないかとずっと考えてきました。最近、ライブイメージングができるような手法の確立に成功しました。やはりこの眼で生きた細胞を見られ

と違います。ありのままに観察できるライブイメージングで細胞がどう挙動するか捉えることで、遺伝子発現解析では全く分からなかった、驚くようなことが沢山わかってきそうです。カイメンの想像を超えるうまく出来た仕組みや美しさを知ると、ヒトよりもずっと進化した時間が長い動物には、その動物らしい洗練された仕組みがあるのだと感動します。

小田 菅さんはいかがでしょう？

菅 カプサスポラを研究しているのは、私たち日本のグループとスペインの研究室のたった2つです。研究のコミュニティーが小さいことの心細さがあります。その生物で初めて遺伝子導入技術を確認しようとDNAコンストラクト\*を作り、それをさまざまな方法で細胞に入れてみるのですが、当然最初はうまく行きません。うまく行かない原因がコンストラクトにあるのか、手法にあるのか、それとも他の原因なのかは知りようがなく、最終的に一発当てるまでは完全に手探り。実験がうまく行かない間は、無間地獄にいる気分です。

\*DNAコンストラクト…遺伝子組換え技術で用いられる人工的に作製されたDNA断片

小田 相当なご苦労があったでしょうね。お気持ちはよくわかります。

菅 しかし一度うまく行けば、その技術を持っているのは自分だけです。暗闇を手探りで探検していたら小さなろうそくが手に入って、それを灯すと周りには誰もいないことに、忽然と気づく。小さくともオンリーワンの状態です。自ら技術を切り拓いて展開させていくところに、研究の楽しさがありますね。

## 自らの手で解き明かす喜び

小田 最後に、これから研究の道に進む若い方たちに一言お願いします。この先楽しくなりそうなテーマや、ご自身の研究から見てきたことなどありますか？

菅 私が気にかかるのは、近年、ポスドクや博士課程の学生の生活が苦しいと報道される場面が多いことです。もちろん生活は楽ではないし、異国で家族を抱えている人は、来年どうなるかもわからないといった、底知れぬ不安は付き纏います。多くのメディアは閲覧数を上げようと、ことさらに研究者の苦しさを書き立てるし、研究者は艱難辛苦を訴えることで少しでも待遇が改善されるなら、と喜んでその苦境を誇張しがちです。でもみなさん、大半の研究者は何よりも「自分の人生は楽しい」と思っていることをぜひ知って欲しいのです。

まずは円安に負けず、外国を経験してみてください。朝永振一郎博士は、アメリカ留学

時、「天国に島流しにされたようだ」と言ったそうです。

船山

AI（人工知能）が出てきた今、すぐに答えを求める傾向が社会全体にあると思います。でも、人間もAIも知らないことは、まだ山のようにあるはずです。時間はかかってもそれを見つけ出すこと、自分で仮説を立て、「そうだったのか」と知ることは素晴らしいことです。自分が面白いと思うことを、自らの手で少しずつ解き明かす楽しみに勝るものはありませんから。

結局、どの道を選んでも悩みは生まれます。それならばやりたいことを突き詰めて、その楽しさを分かち合える人とどんどん繋がってみてください。それが人としての深い喜びであり、研究面でも社会への貢献面でも予想外の展開につながるはずです。昔と比べて、学生さんやポスドクは社会から求められているし、留学しても言葉の壁にぶつからずに済みます。可能性は大きく広がっていますよ。

小田

お二人とも、ありがとうございます。本日は「原始多細胞動物の世界」というテーマでシンポジウムを行いました。現在の地球を少しさかのぼって、動物の始まりの時代に戻ったような気持ちになり、楽しかったです。皆さん、ありがとうございました。



# 阿形清和

基礎生物学研究所・京都大学 名誉教授



## 再生研究に魅せられて 青年は京都をめざす



写真：大西成明

### Biography

1954年  
大阪府生まれ

1979年  
京都大学理学部卒業

1983年  
京都大学理学研究科  
生物物理学専攻  
博士課程修了

基礎生物学研究所  
発生生物学研究系 助手

1991年  
兵庫県立姫路工業大学  
理学部生命科学科 助教授

2000年  
岡山大学 理学部生物科学科 教授・  
理化学研究所 発生再生総合科学  
研究センター  
進化再生研究グループディレクター

2005年  
京都大学 大学院理学研究科・  
生物科学専攻 教授

2016年  
学習院大学 理学部生命科学科 教授

2019年  
基礎生物学研究所 所長・  
京都大学 名誉教授

2025年  
基礎生物学研究所 名誉教授

### Awards

2023年  
第1回国際再生生物学会  
国際再生生物学賞

文化功労者  
岡崎市民栄誉賞



# 幼少時代：昆虫ハンティングと戦う遊び

父は大阪大学の医学部第三内科の出身で公衆衛生医をしていました。母方の私の祖父は阿波藩の御殿医家系で阪大医学部の1期生だったと聞いています。1954年、大阪の保健所に父親が勤務していた頃、長男として生まれました。その後は高知県や福井県へと父の異動で転々としました。母も本当は医者になりたかったけれど、女性になるのは難しい時代だったようです。両親とも医者の家系でしたが、母から私が医者になることを強要されることはありませんでした。

高知の保育園児だった頃には昆虫採集に目覚めていたと聞いています。また、福井にいた幼少期はお城の跡地にトノサマバッタなどたくさんの昆虫がいたので採集に凝っていました。今でいうところのビオトープを庭に作って、バッタを放し飼いにしたり、川でフナを捕っては放流したりしていました。高知や福井で自然に恵まれていたこともあり、幼いころから自然と親しんだ生活をしていました。

父が厚生省に異動となり、小学校に入る頃には文京区での生活が始まります。東京の真ん中ではありましたが、住んでいた小日向台町は自然に恵まれた環境でした。お寺も多く、チョウ・セミ・トンボ・タマムシの採集に情熱を燃やしていました。ただ、昆虫少年として標本を収集するという趣味は強くなく、虫捕りハンターといった感じでした。日没前に現れるオニヤンマを確実に捕獲できる角度で待ち伏せして捕るとか、木にとまっているミンミンゼミを見つけたら瞬時に葉の形状や間隔を見抜いて、セミに察知されることなく素早く捕虫網で捕まえることに命を賭けていました。ハンティングの失敗と成功を繰り返すことで、生き物の動きや気持ちを理解して確実に捕らえることに凝っていました。家の近くに鳩山邸(現・鳩山会館)があったので、春の陽だまりに集まって来るカナヘビ捕りや落葉した後に見つけられるようになる冬に、蛾の繭採りに行っていました。また、鳩山邸は音羽の谷と小日向の台地の間の斜面にあったので缶蹴りをするには最高にスリリングで、若手の政治家が勉強会をやっている横でランカランと缶蹴りをやって、よく怒られていたことを憶えています。缶蹴りで樹木に隠れる時には、樹木の形状に合わせてどの



高知の保育園児だった頃。クロアゲハを捕まえて満足気な様子。

ような姿勢で自然と融合するのかを常に考えながら隠れている少年でした。

小学時代の典型的な遊びといったら、独楽回しと野球でした。小日向神社で10人くらいの仲間を集めて2チームに分けて、独楽回しでの対決です。回っている独楽を手に乗せて、地面で回っている相手の独楽を爆撃して独楽の息の根を止めるのが快感でした。高速で回っている独楽を手の上に乗せても手に穴が開かないように、独楽の心棒を神社の土台の石でつやつやに磨いて、いつも怒られていましたね。当時は小日向神社からは後樂園のカクテル光線を観ることができました。ある日、小日向神社で野球をしていて、アウトだセーフだと喧嘩していたら「うちのお坊ちゃまに野球を教えてもらえませんか」と言われて、ついに行ったらその坊ちゃまは中村勘九郎(五代目)でした。ずっと歌舞伎漬けで、外で遊んでいる僕らに憧れた勘九郎に野球を教えることになったんです。他にも、服部半蔵の旧屋敷跡の斜面で、泥団子ぶつけとかをやっていました。水雷艦長といい、戦うスポーツがわれわれの遊びの基本でした。これらの原体験がその後の自然とスポーツを人生の二大テーマとした素地となったような気がします。

## 中学時代：京都への憧れと『遺伝子の分子生物学』

母方の親戚はみんな京都だったので、夏休みは必ず京都に行きました。母の兄、私の伯父一家は京都の丹波橋に住んでいて、息子が3人いました。私には2歳上の姉が1人いましたが、この従兄の3人が私の5、6、10才上の、お兄さん的な存在でした。京都でも伯父や従兄に頼んで、東京で経験したことのないクマゼミ採りに連れってってもらっていました。クマゼミほど手応えのあるセミ・ハンティングはありませんでした。東京の連中に見たこともないクマゼミを自慢したくて、伯父に聞いてお湯で眠らせてから新幹線に乗ったことがあります。ところが途中でクマゼミが目覚まして新幹線の中で何十匹もがシャンシャンと大合唱を始めて肝をつぶしたことも苦い思い出として残っています。京都の伯父と3人の従兄は全員サッカーをやっていました。伯父は登山もやっていました。その影響もあり、中2の春からは山登りを始めて、時間がある時には奥多摩の山々を次から次へと

02



制覇していました。従兄達はエルヴィス・プレスリーやビートルズのレコードを聴いていて、東京では味わうことの無かった人生のテイストを京都で味わったことは、その後の自分の人生に大きな影響を与えてくれました。

そして、中学生になった時、京都からザ・フォーク・クルセダーズという音楽グループが『帰ってきたヨッパライ』という曲で衝撃的なデビューを果たします。東京ではありえない発想のハチャメチャな曲で、どうやったらこんな発想の曲が生まれるんだ!? 京都には未知との遭遇を体験させてくれる何かがあるに違いない!と感じたことは間違いありません。そして、『イムジン河』の発売禁止ののち、『青年は荒野をめざす』というレコードが発売されます。五木寛之の作詞に加藤和彦がメロディーをつけるのですが、後に、私が東京から離れて一人で京都に乗り込む時のイメージと重なる楽曲となりました。京都の方には失礼だけど、ザ・フォーク・クルセダーズみたいな意味不明な人たちが育つ<京都という荒野>に、1人で東京から乗り込んでいく気概を私に惹起した楽曲でした。

中学生時代、暇な時は神田の古本屋街に行っている本を見て回りました。もともとは物理・化学少年で、ブルーバックスの物理化学シリーズや量子力学などを読んでいました。神田の書泉のブックマートというのができた頃、店の外に山積みになっていた『遺伝子の分子生物学』という本を手に入れました。これが1968年、中学3年の時です。生意気ですよ。ジェームズ・ワトソンが書いた『Molecular Biology of the Gene』という本の、松原謙一さんと中村桂子さんと三浦謹一郎さんの監訳です。今まで博物学だったものがサイエンスとしての生物学になるということを、この中学生の時に感じ取っていたということになります。時代は変わるんだ、生物学の時代は変わるんだと。

## 高校時代：サッカーと過疎研究

1970年に東京教育大学附属高校（現 筑波大学附属高等学校）に入学し、京都の伯父と従兄らがやっていたサッカーというのが気になっていたのも、サッカー部に入りました。今の東京12チャンネルができた頃で、その目玉番組として『三菱ダイヤモンド

03

ド・サッカー』が始まりました。1970年のワールドカップの、予選から決勝に至るまでの全試合を1年以上にわたって放送していた番組で、世界にはこんなにも違うサッカーがあるのかということを目の当たりにします。最終的にはペレのいたブラジルが優勝、3度目の優勝で“ジュール・リメ杯”というワールドカップを永久保持します。そういう歴史的なワールドカップの全試合をテレビで観戦し、おかげでサッカークレージーになりました。

高校1年の時には過疎の研究をしました。米山俊直さんという京都大学の教授が『NHKブックス』で十津川という奈良の山奥の過疎について書かれていて、その研究をしようと私を含む同級生3人として奈良の大塔村に行きました。夏の暑い時期に、五條からバスに乗って、つり橋を渡って、斜面にある家に泊めてもらい、五右衛門風呂に入りました。その家に犬みたいなのがいたのですが、よく見たらタヌキで。ちゃんと首輪をつけて、タヌキを飼っていて驚きました。この時の過疎研究で、日本の構造的・経済的な問題はあるにしても、子どもたちが故郷へ帰って来なくなる環境になっていないことも過疎の要因の一つだと感じました。議員さんたちは選挙権のあるお年寄りの言うことには耳を貸すものの、選挙権のない子どもに貸す耳はもたない構造的な問題もあると。この時の過疎研究の経験から、後に相生の農村地帯に少年少女のスポーツクラブチームをつくり、子どもに投資するようになるかということにチャレンジをすることとなります。



高校時代の奈良での過疎地研究は、その後農村地帯にスポーツクラブを設立し、三〇年以上運営することにつながった。(本人：右から二人目)



高校時代から現在まで、サッカーは人生で重要な存在に。(京大時代のゼックストンフットボールクラブでのワンシーン)

## 再生の研究者をめざして

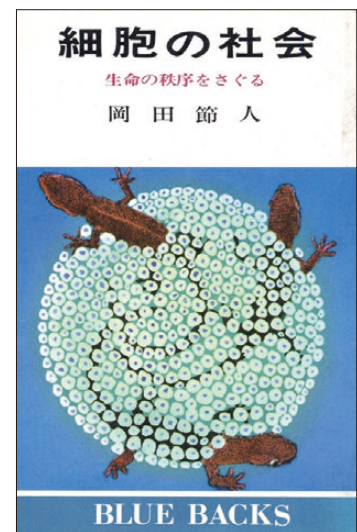
高校3年生の時に神田の古本屋街で『自然』という雑誌に出会って、両面見開きのページに、京大の理学部に生物物理学教室の新しい教室ができたという紹介記事が書いてあったんです。2階が細胞レベル、3階がバクテリアやタンパク質レベルで、4階が分子・原子レベル、5階が数学や物理理論で生物学にアプローチするという、斬新なものでした。2階の細胞レベルのところに岡田節人さん、3階のバクテリアレベルのところに小関治男さん、タンパク質レベルのところには丸山工作さん、4階に分子・原子レベルの吉沢透さんと大西俊一さん、5階に理論物理学の



湯川秀樹さんの門下生である寺本英さんがいると。それで、どんなところだろうって、高校3年の時に新幹線に乗って京大の生物物理学教室に潜り込みました。片っ端から部屋を開けていたらある所で授業をやっていたのです。潜りの高校生とばれないように襟を立てて入って、一番後ろに座りました。そしたらその授業が、大学院生向けの集中講義で。九州大学の山名清隆さんが、アフリカツメガエルを初めて見る大学院生に、これが新しいモデル生物ですと言って実物を見せながら、その卵を使ったRNAの転写制御の授業をやっていたのです。そのチューターが岡田節人さん(当時は京大・生物物理学教室の初代教授、後にJT生命誌研究館の初代館長)でした。この時初めて岡田さんの後ろ姿を見るわけです。授業中、パイプを吸っていました。その授業の中で『細胞の社会』という本の紹介があって。その『細胞の社会』で、イモリのレンズの再生について読んでしまったために、サッカーに代わる、わくわく感があるものとしてイモリのレンズの再生に燃えることになります。何たって、光を通さないように働いていた黒眼の細胞が、レンズが失ったことを感知して、逆に光を通す透明なレンズ細胞に変身(分化転換)してレンズを再生するのですから。そんなことができるなら、どんなものでも再生できるようになるのでは!となったわけです。それまでは、大学には行かずに職人になろうかとも思っていたのですが、この本を読んで、大学へ行って再生の研究者を目指そうと決意して、京大を受けることになりました。

## あしたのための体質改善

1年目は受験に落ちて、自分との戦いが始まりました。研究者になるには自分の体質改善が必要だと思ったのです。中学の時はほとんどオール5で、極めて優秀な優等生でしたが、試験前にしか勉強しませんでした。しかし、研究者になるためには自分が面白いと思って、自分で勉強をやらなくてはいけない。良い成績を取るために勉強をするという姿勢から、自分を磨くために勉強するようにシフトしないと大学へ行っても意味がないだろうと。浪人1年目は、朝夕刊の配達と集金までやっていたので、疲れているし、もやもやしたものが常につきまとっていました。年に何回かある休刊日には朝刊を配ってから山に行き、山に泊まって翌朝に縦走を終えて帰ってきて夕刊を配るという熾烈な生活を強



1972年11月24日初版の『細胞の社会』(講談社)。再生の研究者を目指すことになったきっかけの本。

いて、自分を追い込むストイックな生活をしました。『少年マガジン』で連載していた『あしたのジョー』にも影響を受けて、2年目の浪人の時には自分を磨くために、あしたのために基礎からきちっとやりました。午前中は英語と国語を、午後に数学と理科をやる。新聞配達は辞めて、自分のために勉強するという精神を身に付けて、あっという間に偏差値は40から50、60となって最後は70で安定しました。日本史が好きだったので、理系なのに駿台の全国模試で全国1位を取りました。「面白いと思ったら自分でやる」という姿勢をこの時に身に付けた2年間は私の人生のターニングポイントとなり、京大の理学部へもスムーズに入ることができました。

## 泥酔の末プラナリアを知る

1975年、いよいよ京大に行きます。入学式の後の教務ガイダンスで261人の新入生相手に、なんと岡田節人さんが教務委員長として理学部の単位について説明していました。説明が終わってみんなが帰る中、私が岡田さんに「再生の研究がしくて京大に来ました」と言ったら、細かいことは一切聞かずに、おもしろいやつが来たと言って、「じゃあ研究室にこれから帰るからおまえ連れてくわ」と岡田研究室に連れて行ってくれました。

その日の夜に、研究員の安部真一さんという人がスナックに飲み連れで行ってくれました。渡辺憲二という人のボトルを空っぽにしまって、ウイスキーなんかそんなに飲んだことがないから、酔い潰れてしまったんです。居候していた丹波橋の伯父さんの家に帰れなくなって、ボトルに書かれていた渡辺憲二さんの家に泊まることになりました。翌朝起きたら部屋中に花札やら麻雀牌、点数表が散っていてあまりにも汚かったので、一宿一飯の恩義で部屋を片付けて帰るんですが、片付けていた時、本棚の『Planarian Regeneration』という本が目に入りました。Holger Valdemar Brøndstedという人が書いた有名な本です。この時に、プラナリアという存在に出会いました。こんなやつもあるんだ、と印象に残っています。



# 先輩たちの技術指導

京都大学に入って1年目から岡田研に入り浸りました。特に1年目は、学費値上げ闘争があって、ストでほとんど授業がありませんでした。試験もないから、レポートだけ出せば単位になる。先生も、学生がストをしてくれた方が、授業も試験もしなくて研究に専念できるという感じでした。学生も誰も文句を言わない、先生も文句を言わない。試験も無く誰もがハッピーというのが京大でした。

昔は教授1、助教授1、それから助手が2名、技官が1名と、5人で1つの研究室を構成していたんですね。岡田節人教授、江口吾朗助教授、安田國雄さんと竹市雅俊さんの二人が助手で、それに岡本光正さんという技官の方がいました。研究室には、さらに秘書の方がいて、あとは大学院生と研修生です。院生も曲者ばかりで、ボトルを飲み干して泊まった部屋の渡辺憲二さんも4月までは岡田研の院生だったらしく、それに上田正道さん、浜田義雄さん、荒木正介さん、後に粘菌の研究をされて筑波大学の教授になられた漆原秀子さんがいました。それに私を酔い潰してくれた研究員の安部真一さんがいました。

学部生時代の四年間は、大学院生たちが扱う動物の飼育を一手に引き受けて世話をしていました。イモリ、ゼノパス、マウス、ラット、チャイニーズハムスター、ウサギ。今思うと大学院生には大助かりだったでしょうね。動物の糞を90Lくらいの大きなバケツに貯めて、リヤカーに乗せて農学部の畑の近くの牛とか馬の糞を集めているところに持って行って捨てるのですが、板が一枚だけのところを踏み外してずぼっと糞の中に入ってしまうという、とんでもない経験もしました。臭い、汚い飼育室を水洗化して飼育環境を良くする工夫をして。飼育室に顕微鏡を持ち込み、カエルやイモリの初期胚の観察を岡本さんに教えてもらって、一日中発生を観察をしていました。

江口さんは真面目な人で、イモリのレンズの抜き方を伝授してくれました。当時はメスが高いから、片刃の貝印のカミソリを割って、グラインダーできれいに背中の部分だけ研いで、それを角膜に差し込んでぴっと切って、レンズをピンセットで抜く。角膜をいかにきれいに切開するかを教えてもらいました。安部さんには、



「理岳会」という山登りの会に入り、厳冬期の鹿島槍へ。登山用のロープで四〇メートル懸垂下降するというとんでもない経験をした。

イモリの野外採集を教わり、細胞培養のためのイモリの血清を集める手伝いをしていました。オヒデさんこと漆原さんからは、シャーレやピペット洗浄の仕方を習い、培養プラスチックに負けない乾熱滅菌したガラスシャーレの作り方を学びました。竹市さんには細胞の接着と解離の仕方を習いました。組織の細胞をばらばらにする方法については竹市さん直伝です。ストで授業がない頃は、岡田研に朝の8時半に通って、院生の浜やんこと浜田さんに、分子生物学の英語の教科書を一年かけて勉強させてもらったことが特に大きな糧となりました。『Molecular Biology of Eukaryotic Cells』、真核生物の分子生物学という本があって、大学2年の時から浜やんとマンツーマンで演習問題に取り組んで、英語の勉強にも分子生物学の勉強にもなりました。

院生の先輩方には食事にもよく連れて行ってもらって、先生の悪口を聞いたりして。そうやって、教養学部から大学院に行くまでの間に、たくさんの先輩方からいろいろな技術や院生の生き方について伝授していただきました。

院生の荒木さんは“理岳会”という山登りの会を作っていて、そこに私も入れてもらいました。厳冬期の鹿島槍に連れて行ってもらって、東尾根から登頂して、まさかの鹿島槍の北峰から40メートル、ザイルで懸垂下降するというとんでもない経験もさせてもらいました。

## カルチャーショック

一番強烈だったのは何といっても岡田節人さんです。ある日たばこの灰が落ちていたから、灰皿で受けるように差し出したんです。普通はありがとうって言うじゃないですか。岡田さんは違います。「そんなことに気を遣うやつはサイエンティストとして大成できない」って言うんです。これは驚いたけど言い得て妙な部分があって。教授は大学院生にバズーカを渡して、そのお城を攻めろと言っているのにもかかわらず、学生たちはシャベルでお堀に土を入れて埋めて汗かいて、しんどいしんどいとやっている。やっている気になっている。教授はバズーカもミサイルも渡しているのに、おまえらは一生懸命やっていると言う、と。

08

大学院へ進学した時の岡田研のメンバー。左から岡田節人教授、近藤寿人助手、竹市雅俊助教授。





あと、岡田さんが、おまえこれどう思う?と聞いてきたら、東京で育った私はこういう考え方もあるし、こういう考え方もあります、みたいな事を言うわけです。そうすると、岡田さんが怒って、「おまえはいつもええ子ちゃんぶってる。それはみんなに嫌われないようにしているだけで、どっちの味方が分かん。それは官僚のやること、官僚の文化である」って言うんです。関西では0と100の人が話をして、それを聞きながら自分が60、40なのか、30、70なのか考える。それが人間の姿であり、それが人間の会話であると。一方、嫌われないために灰色になってしまう会話をするのが東京の文化であり、これは何も生まないと説教されました。

私はサイエンティストになる前は職人に憧れたという話を岡田さんにしたことがあって。その時に岡田さんが何を言ったかという、おまえは職人とサイエンティストの違いを知っているかと。伝統工芸の師匠が30年かけたものは、お弟子さんも30年かけて経験を積んでいくのが職人の世界。サイエンティストは教授が30年かけたことを1週間、7日で教わり、残りの29年と358日を新しいことに使わなくてはならない。そうしないとサイエンスは進まない、と。要するに、教授は30年やった研究を、ちゃらんぽらんな若造に1週間で教えなきゃいけない。サイエンスは非情なのだ、と言うのです。おそろべし岡田節人。私の常識の範囲を完全に越えていました。大学受験で2浪して鍛えた私の精神性は、岡田節人さんによって完全に粉碎されました。

入学してすぐ、1年の時から岡田研に入れて、岡田さんを筆頭に東京ではあり得ないくらいキャラクターの濃い人たちと接して。京都に来た時のカルチャーショックは強烈でしたね。

## レンズ研究の出帯禁でプラナリアの道へ

1979年に大学院に進学すると、レンズの分化転換について本格的に遺伝子レベルでの研究を開始します。そして、1983年の博士3年の時に、基礎生物學研究所の教授に就任した江口吾朗研究室の助手になり、博士学位を取るとともに、イモリのレンズ再生の遺伝子レベルでの解析に取り組みました。そして、酒とともに、また人生が動きます。一九九〇年、江口研の忘年会で、当時江口研の助教授だった渡辺憲二さんから「四月から姫路工業



大学の教授になるので、阿形も一緒に助教授として来ないか」と言われました。江口さんの許可を得ていると言うので受けることにしましたが、江口さんはそんなことは言った覚えがない!と。助教授と助手が揃って抜けるなんて許せないということで、レンズの再生のテーマは持ち出し禁止になりました。さてどうしようとなった時、渡辺さんの部屋で読んだ本を思い出し、「プラナリアの再生はどうか?」と提案しました。レンズ再生の研究が禁止になったことで、私たちの新天地、プラナリアの研究がはじまったのです。



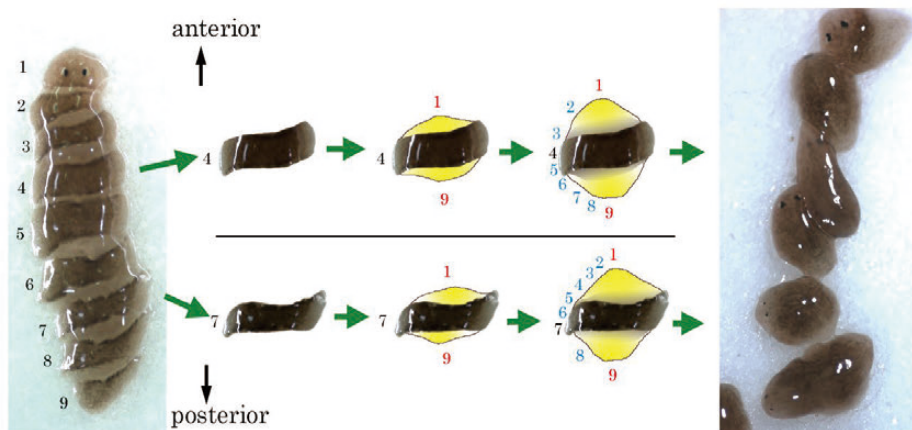
姫路工業大学の理学部新設時のメンバー。(右から本人、渡辺憲二教授、Prof. Volker Schmid、織井秀文助手)

## 切っても切っても プラナリアができる分子システム

姫路工業大学では、世界で初めて実験室で増やすことに成功した、GIというプラナリア株を使いました。渡辺さんが岐阜の入間川で採ってきた1匹から無性生殖(fission: 分裂)によって増やしたものです。私たちは、プラナリアのさまざまな細胞の分子マーカーをとっては、「細胞の社会」というコンセプトで、プラナリアの再生を細胞レベルで詳細に観察したのです。プラナリアにはある一定の大きさになったら自分で分裂して増え、また、10個に切ったら10匹になるという性質があります。プラナリアでもイモリと同じように細胞の分化転換能力があることで高い再生能力が発揮されるに違いないと渡辺・阿形の二人とも思ってプラナリアの再生研究をしていたのですが、どんなに分子マーカーを用いても分化転換は観察されませんでした。古くから、プラナリアは成体になっても、あらゆる種類の細胞になれる多能性幹細胞(neoblastと呼ばれる)を持っていることで高い再生能を保持



岐阜県の入間川で採取したプラナリア株 GI



まず先っぽの細胞を作り、残っている細胞との間を埋めるように再生する。

していると考えられてきたのですが、結局、多能性の幹細胞を細胞選別装置(FACS)で精製することに成功し分子マーカーを取得したことで、われわれは分化転換屋さんから幹細胞屋さんへとシフトすることになります。そして、山中伸弥さんがiPS細胞(成体の分化細胞を幹細胞へリプログラミングした細胞)を作ったことで、人々はプラナリアが多能性幹細胞を使って切ったところからどうやって必要な場所に必要なものをつくるのかに着目するようになります。そして、われわれは「体の個々の細胞には番地みたいなものが付いていて、異なる番地の細胞が接すると途中の番地を埋めるように多能性幹細胞が反応することで再生が起きる」、すなわち、プラナリアは失われた部分のうち、まず先っぽの番地の細胞を作ることで、残っている細胞との間を埋めるように再生していくことを見出します。個体という多細胞生物の「細胞の社会」はこの座標のようなシステムによってコントロールされていることをプラナリアの再生研究から示すことができました。



絵本『切っても切ってもプラナリア』  
(岩波書店)

## 再生医療の提唱

1994年に『細胞工学』という雑誌で、『再生による治療の道を探る』という特集号を作りました。冒頭にはこう書いています。「(前略)高齢化社会を迎えた現代において、再生による組織や臓器の治療は大きな付加価値があると思われる。単に悪いものを治すという考えから一歩進んで、若返るという意味も込められている。不老不死までとは望まないが、せめて細胞のリフレッシュメントができればと思う方は多いのではないだろうか。ビールや酒を、体に良いわけがないと思いながらつい飲んでしまうが、再生する肝実質細胞のおかげで、細胞のリフレッシュメントと同時に精神のリフレッシュメントもできているのである。潜在化している再生能力を引き出して、いろんな組織を治療するとともにリフレッシュしてしまう。ひと仕事、定年後には、まず再生で細胞のリフレッシュメントを行ってから、身も心も新しく第2の人生を復活させる。そんな時代もいいじゃないか」。この特集を見て最初に反応したのは京大の医学部長だった本庶佑さんと思われます。結核の研究所である胸部疾患研究所を再編成するためのアイデアとなったようで、「再生」の名を冠した再生医科学研究所をつくるきっかけの一つとなり、再生生物学が再生医療へと

繋がり、全世界へと広がっていきます。

皮膚の細胞から、卵、精子が作れるとんでもない時代がやってきました。幹細胞である受精卵は自律的に位置情報をつくり、あらゆる細胞をつくりながら個体を形成していきます。一方で、ES細胞やiPS細胞といった幹細胞は、あらゆる細胞になれるものの、座標を自分では作れないので正常な個体へと成長することができないのです。細胞の社会には座標、位置情報システムがあり、プラナリアにもヒトにも座標をつくる遺伝子プログラムが備わっています。どのように発生をコントロールしているのかという点で、プラナリアの研究が注目されるようになったわけです。必要な場所に、必要なものを作る。プラナリアで示した細胞の位置情報のコンセプトとその分子メカニズムが、ヒトを含む多細胞生物の位置情報の理解をより深め、再生医療の未来へと繋がっていくことを期待しています。

## プラナリア研究がもたらした意外な幸運

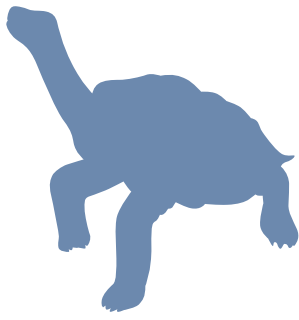
2023年にプラナリア研究の業績が評価され文化功労者として顕彰されました。その時の文化勲章の受賞者が元日本サッカー協会会長の川淵三郎さんで、皇居で開催された懇談会でお話することができたのです。川淵さんは、私にとって神様みたいな存在なので、大興奮。Jリーグ100年構想で全国にスポーツ文化を根付かせるという川淵さんのアイデアに共感して始めた30年以上の農村地帯での活動を、想像もしない形で伝えることができました。ご自身のSNSに、「Jリーグ理念の具現化にずっと地域社会で活動されていたことのお話を伺って深く感銘を受けた。本当に嬉しかった。」と書いていただき、こんなに幸せなことはないと思いました。プラナリアとサッカーという人生で重要な2つがこのような形でつながる日が来るとは。再生医療で自分の膝も治療して、ずっとサッカーをプレーしたいですね。

12

1994年に兵庫県相生市矢野町にある小学校を全面天然芝化し、矢野スポーツクラブを創設。2025年の現在も新幹線で通い、監督としてクラブを運営している。







## PAPER CRAFT

# 絶やすのはたやすい 消えた動物



生命誕生からおよそ40億年、この地球にいるすべての生きものは共通祖先から同じだけの時間を経てここにいます。人間もまたその生きものの一つです。ところが人間の活動は、多くの生きものの暮らしに影響を与え、中には種を絶やすほどの行いもありました。絶滅というと「恐竜の絶滅」のようにはるか過去の事件のように聞こえますが、実は今まさに絶滅しつつある生きものがいます。私たちが気づかない間に消えてしまった生きものも数多くいるはずです。紙工作「絶やすのはたやすい消えた動物」では、人間の些細な都合で絶滅してしまった生きものをつくります。いなくなってしまう生きものは取りもどせません。今、私たち人間も生きものとして自然のなかに生きるとはどういうことか、改めて考える時です。

## 1. カメの島、ガラパゴス

ガラパゴス諸島は、南米大陸の北西部から約1,000km離れた太平洋にある赤道直下の火山群島です。「ガラパゴス」はスペイン語の方言でカメを意味し、16世紀の発見当時は無数のゾウガメが島々を埋め尽くしていたと伝えられています。このガラパゴスゾウガメは、野生では100年以上の長寿で、大きいものでは体長150cm、体重250kgとなる世界最大のリクガメであり、7つの島および、島内の火山で隔てられた地域ごとに15の種（または亜種）に分類されています。



歴史上のガラパゴス諸島の記録は、16世紀にヨーロッパ人がアメリカ大陸への進出した時代に始まります。生活水が乏しく居住に適さなかったため、ペルーの財宝や特産物を運ぶ船を襲う海賊の基地とされ、18世紀には捕鯨船の寄港地となりました。寄港の目当ては、豊富なガラパゴスゾウガメです。ゾウガメは、半年以上飲まず食わずで生き延びるので、新鮮な食肉として船に積み込まれ、時には数十万頭が連れ去られたそうです。やがてゾウガメが減少すると、島には家畜としてヤギが放たれ、野生化します。人と共に入ったネズミが卵や子ガメを食べたことで、1970年代までにゾウガメは3千頭まで数を減らしました。一方、ヤギは4万頭にまで増え、カメの餌となる植生は壊滅し、日陰や水場などの生息地が失われたのです。

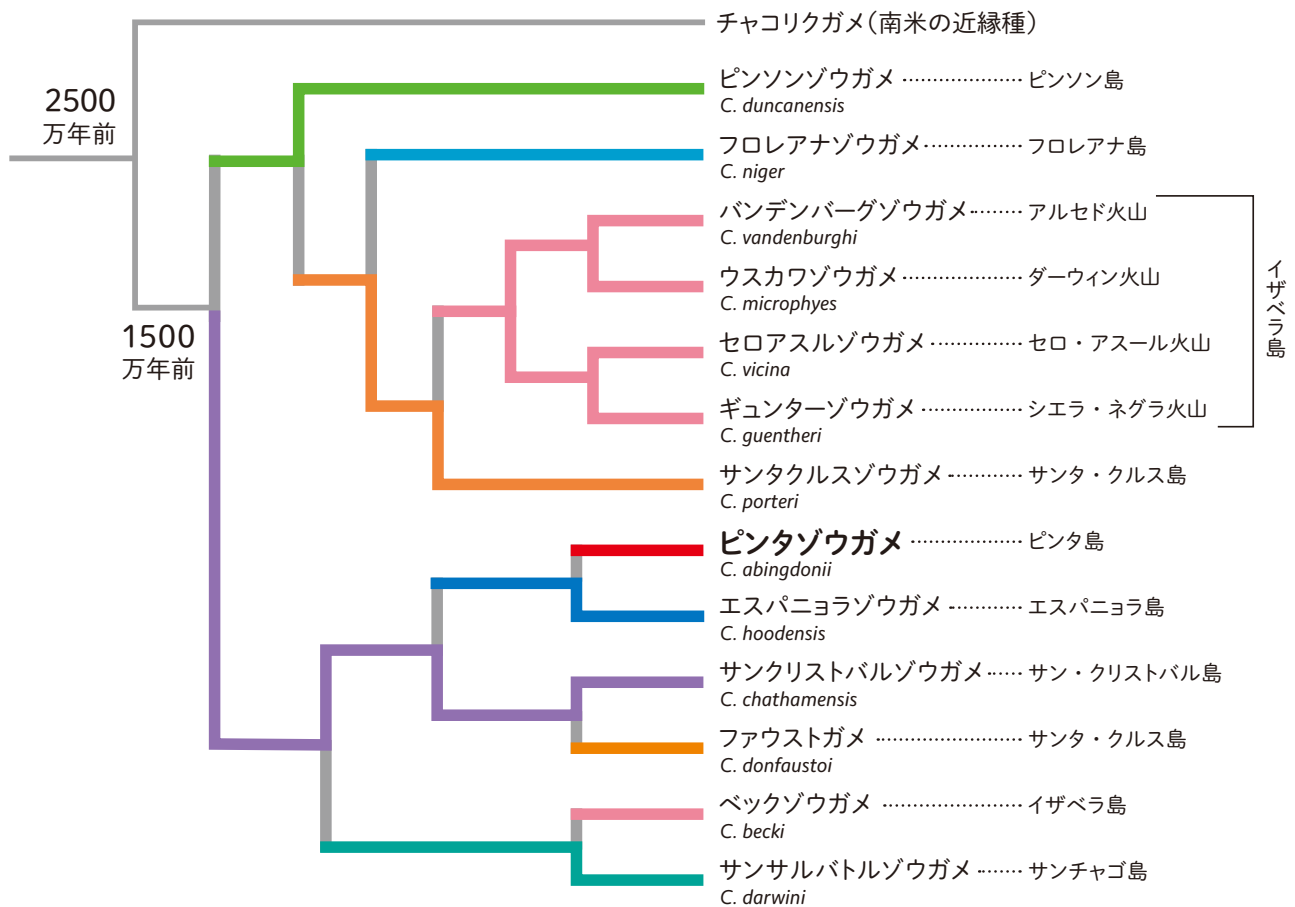
## 2. ピンタゾウガメ

ピンタ島の固有種、ピンタゾウガメは20世紀の始めに絶滅したとされていましたが、1971年にハンガリーの科学者が偶然発見し、その翌年にサンタ・クルス島にあるチャールズ・ダーウィン研究所で保護することになりました。最後の1頭となったオスガメは、ロンサム・ジョージと名付けられ、ガラパゴスの希少動物のシンボルとして注目を集めました。ガラパゴスゾウガメの甲羅には、丸いドーム型と端のそり返った鞍型がありますが、ピンタゾウガメの特徴は馬の鞍（サドル）型の甲羅です。乾燥地で背の高い木の葉や枝などを食べるための適応であり、甲羅と首の間に大きく無防備な隙間を許しているのは、捕食者のいない環境であったことを示しています。ジョージの血統を残そうと、研究所では形の近いベックゾウガメとの繁殖を試みましたが、卵を孵すことはできませんでした。その後、遺伝的に近いとされるエスパニョラゾウガメとの同居を試みましたが、関心を示さなかったそうです。そして、2012年6月24日に水飲み場で動かなくなっている姿が見つかり、死亡が確認されました。年齢は100歳を超えており、老衰による自然な最後でした。遺体はニューヨークのアメリカ自然史博物館で剥製として復元され、2017年にはガラパゴスに帰還し、サンタクルス島のファウスト・ジェレナ繁殖センターに展示されています。動かぬジョージの姿は、種の生存が人間の手によって危機に陥り、手遅れとなればもはや守ることはできず、永遠に失われてしまうことを静かに訴えているのです。

## 3. ロンサム・ジョージのゲノム

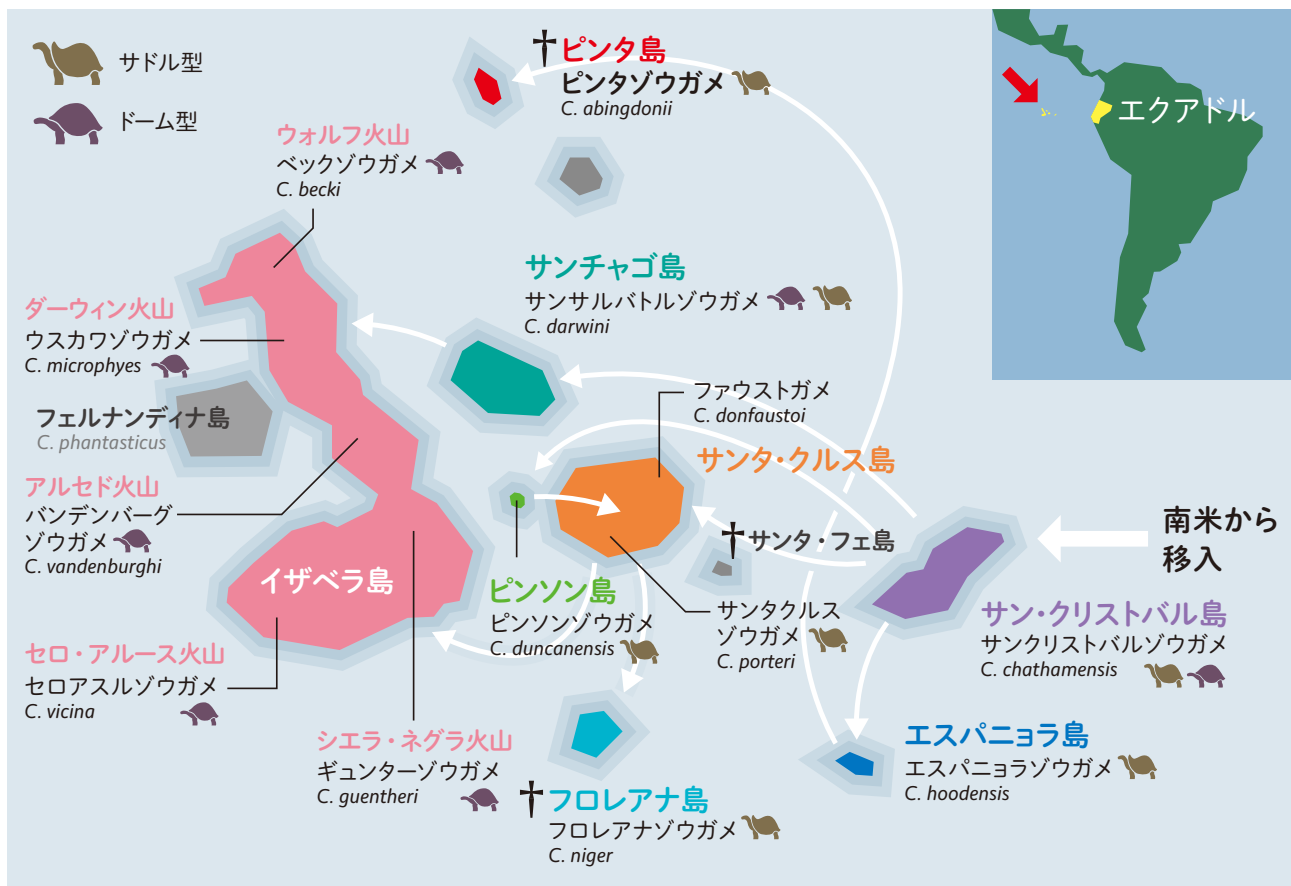
ジョージの体からは解析のための試料が採取されました。ゲノムが精細に解析され、ガラパゴスゾウガメ全体のゲノムを調べる基準となっています。ミトコンドリア全遺伝子を用いた系統解析からは、ガラパゴスゾウガメの起源や島々で固有種が分岐した過程が明らかになりました（図1）。ガラパゴスゾウガメの祖先は、南米大陸の小型のリクガメであるチャコリクガメであり、2～3千万年前に太平洋に向かう海流に運ばれて、当時は陸続きだった東の2島（サン・クリストバル島、エスパニョラ島）に漂着したと考えられています（図2）。その後、中央の3島（サンタ・クルス島、フロレアナ島、ピンソン島）が連なった島に移動し、さらにイザベラ島へ、また、サンチャゴ島からもイザベラ島北部へと移動したと推定されました。離れたエスパニョラ島からピンタ島へは、海流

に乗って渡ったようです。サンタ・フェ島、フロレアナ島からは19世紀前半に人による乱獲で、フェルナンディナ島からは火山の噴火により絶滅したとされています。



(図1) ミトコンドリアゲノム全遺伝子の比較に基づく、ガラパゴスゾウガメの系統関係

ピンタゾウガメは、距離の離れたエスパニョラゾウガメに近縁であることがわかった。枝の色は図2の地図の島に準じる。



(図2) ガラパゴス諸島とゾウガメの移動の推定経路

矢印は系統関係から推定された移動経路。かつては東の2島と中央の4島はそれぞれ陸続きで、離れた島へは海流に乗って移動し、それぞれの種が分かれた。サンタ・フェ島、フロレアナ島では1800年代に絶滅したとされ、フェルナンディナ島では最近固有種の生き残りが発見された。

また、100歳を超える長寿に関連する遺伝子に注目した解析も行われました。病原体から身を守る免疫については、侵入を防ぐ自然免疫に関わる遺伝子が増えていました。また、がんの予防に関わる腫瘍抑制遺伝子には、ゾウガメに特有の変異や数の増加が見つかり、がんにかかりにくい性質を示しました。さらに老化と関わるDNAの修復遺伝子やテロメアの維持に関わる遺伝子、ミトコンドリアにある解毒機能の酵素にも特徴が見られました。これらの遺伝子が寿命にどう影響するのかはさらなる研究が必要ですが、ガラパゴスゾウガメを知ること、ガラパゴスを再びゾウガメの島にする試みにつなげようとしているのです。

## 4. 自然遺産としてのガラパゴス

ガラパゴス諸島の陸地の97パーセントを占める国立公園は、1978年にユネスコの世界自然遺産第一号に登録されました。その結果、観光業の成長に弾みがつき、人間の往来が活発になり生態系を脅かす状況になったのです。そこで1998年には、移民の制限などを含む環境保全を目的とした「ガラパゴス保護法」が制定され、2001年に海洋保護区も世界自然遺産となりました。ところがそ



の後もナマコやサメなど輸出目的の商用漁業のための乱獲が続き、2007年には、観光地化に伴う環境汚染や人口増加、海洋資源の損失により「危機遺産」リストに登録されてしまいます。自然を侵食したり、変えたりすることなく、人間の活動、生存の権利を守ることは容易ではなく、保全に対する激しい抵抗も起きました。しかしガラパゴスは、人がそこに暮らすことを通して、人の手によって貴重な自然を守ることを選びました。2010年に危機遺産から脱し、住人に環境保全のための教育や就労の機会をつくることで、故郷を守る意識を高める政策を進めています。身近な生きものに関心をもち、慈しむことが自然を守るために必要であることを、ガラパゴスの変化を見てきた人々は身に沁みて感じているのです。

## 5. 再びゾウガメの島へ

1990年代後半から、島の環境を回復するために野生化したヤギなどの外来種を駆除するプロジェクトが開始されました。精力的な取り組みによって、ピンタ島は2003年にヤギのいない島と宣言されました。他の島々でも外来種から島を取り戻す取り組みが進み、ゾウガメの帰還を通じた生態系の回復を目指したプロジェクトが行われています。研究所で親ガメを保護し、繁殖により生まれた子ガメを育成して、島に戻す再野生化の取り組みです。失われた種を人の手で再生するのではなく、それぞれの島の生態系に合わせて進化してきたゾウガメが、再び自然の中で役割を果たすことを目指しています。ゾウガメはガラパゴスの島々において、摂食と種子散布により植生の循環をうながし、景観と在来種を守る「生態系のエンジニア」と呼ばれています。実際、再移入が試みられた島では、驚異的と言われるほどに景観が回復しているのだそうです。

## 6. ジョージの残したもの

ピンタゾウガメは、ロンサム・ジョージの死をもって2015年にレッドリストで絶滅と記載されました。その一方で、ガラパゴスゾウガメの保全は徐々に実を結んできています。エスパニョラ島のエスパニョラゾウガメは、1960年代に、オスが2頭、メスが12頭にまで数を減らしていました。そこで1976年に米国の動物園で飼育されていた80歳を超えるエスパニョラゾウガメのオスをジョージが暮らしていた研究所に連れ戻します。ディエゴと名付けられたこのオスガメと残っていたメスとの繁殖は成功し、先に放たれたその子孫たちは2020年には2,300頭に増え、親ガメたちも島に返され、自然の集団として3,000頭にまで回復しました。ディエゴは今も故郷のエスパニョラ島で暮らしているのです。また、調査による再発見も相次いでいます。絶滅したカメの標本のみが知られていたフェルナンディナ島では、メスガメ1頭が発見され、2021年に標本と同種のフェルナンディナ島固有種と判定されています。ジョージと同じ最後の生き残りとして保護されましたが、島ではまだ探索が続いています。また、2020年にイザベラ島のウルフ火山で行われた調査で、1800年代に絶滅したフロレアナゾウガメの血を引く20頭のカメが発見されました。さらに、ロンサム・ジョージと同じピンタゾウガメのゲノムを16%もつメスガメも発見されています。かつての人間による移動で雑種となった生き残りたちが、血筋をつないでいるようです。

人間の手によって破壊された自然を人間の手によって取り戻すことは難しく、正解はありません。それでも、生きものを知る科学と自然の中に暮らす知恵をつかって生きていくことが、生きものとしての人間のあり方でしょう。ジョージのゲノムに刻まれた物語を通して、ガラパゴスから地球と私たち生きものの未来が見えてくるはずです。

---

#### 参考文献

- Poulakakis, Nikos, et al. Colonization history of Galapagos giant tortoises: Insights from mitogenomes support the progression rule. *J. Zool. Syst. Evol. Res* 2020 58(4) :1262
- Quesada, Víctor, et al. Giant tortoise genomes provide insights into longevity and age-related disease. *Nat. Ecol. Evol* 2019 3(1) :87
- Resurrecting the lost giants of the Galápagos *National Geographic* 2025 September
- ロンサム・ジョージのたいなる遺産 *Nature* ダイジェスト 2012 9 (10)
- 特定非営利活動法人日本ガラパゴスの会



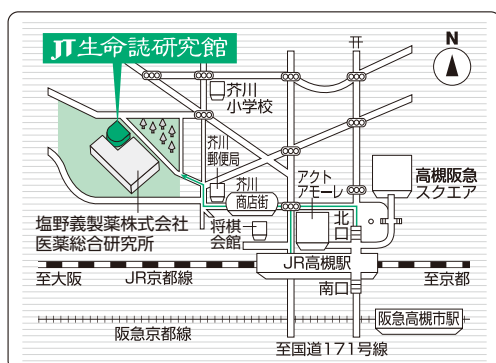
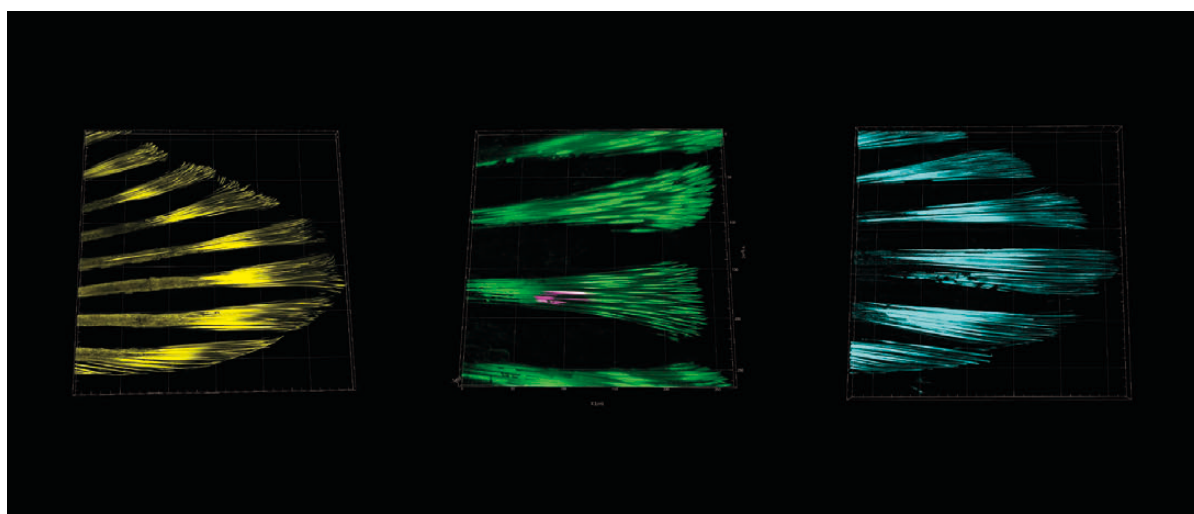
- ガラパゴス保護協会 Galapagos Conservancy



ピンタゾウガメ  
ダウンロードはこちら  
PAPER CRAFT DOWNLOAD



2025年4月にスタートした「細胞がからだを建築するしくみを探るラボ」。ここではゼブラフィッシュの尾ビレを用いて、細胞がどのようにして体を構築しているのかを解き明かそうとしています。細胞のはたらきが解明されれば、魚にとどまらずさまざまな動物の体づくりの仕組みを知ることにつながります。この研究室で取り組んでいる研究の魅力を伝える企画展を2025年12月末より開催予定です。魚のヒレを顕微鏡で観察してみると、うちの骨のようにまっすぐ規則的に並んでいる様子が観察できます。どうしてこのようになったのでしょうか？ 独自の技術で体づくりの秘密に迫ります。お見逃しなく！



〒569-1125 大阪府高槻市紫町1-1  
Tel:072-681-9750(代表) Fax:072-681-9743

JRのご利用が便利です。