

ハチドリのスケッチ(エルンスト・ヘッケル画)。ヘッケルはダーウインから大きな影響を受け、生物の多様性の根拠を進化に求めて、環境への適応を考える学問「生態学(Ecology)」を提案した。他にも系統発生(Phylogeny)、個体発生(Ontogeny)を提案し、生きものを進化-発生-生態系と統一的に捉えていたようだ。

今号テーマ

### 生命誌の時間

JT生命誌研究館が開館して30年。創立30周年記念の集いでは、霊長類学者の山極壽一先生が共感がヒトを育む歴史をたどり、小説家の小川洋子さんをお迎えし、永田館長がホストを務める鼎談は、言葉によって生まれた時間と物語から人間を見つめます。中村桂子名誉館長は、生命誌の30年と受け継がれる知を語り、今、屈指の研究者が結集した座談会からは研究のワクワク感を伝える声を届けます。学問の誕生の歴史は生命誌へ。最初の研究を牽引した小さな冒険者オサムシは、生命誌研究の向かう先を灯しました。生きものとしてのわたしたちを探る道のりはまだまだ続きます。

もくじ

SYMPOSIUM

#### 30周年を迎えて

##### 人類の飛躍と没落

—共感社会と言葉のもたらした世界

山極壽一

##### 科学を私たちの言葉で

小川洋子・山極壽一・永田和宏

ACADEMIA

##### ゲノムが紡ぐ生きものの個性と関係性

RESEARCH

##### オサムシ研究のこれまでとこれから

蘇 智慧

連載記事

##### 発生生物学の

##### 静かな革命

VOL.8

近藤寿人

PAPER CRAFT

##### 超遺伝子

表現多型を生むゲノム

チビナナフシ

EXHIBITION

生きものの時間 第4期

—生命誌の時間—



## SYMPOSIUM

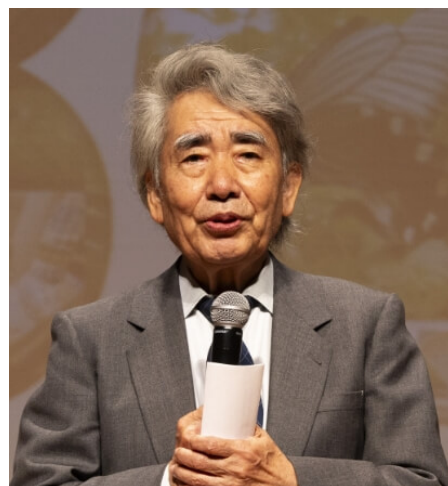
ご挨拶

# 30周年を迎えて

永田和宏 JT生命誌研究館 館長



JT生命誌研究館は、創立以来、ゲノムを切り口として38億年の生命の歴史と関係性を探る研究を続けています。同時に研究の魅力を皆と共有したい、音楽やスポーツのように、科学を文化として楽しんで欲しい。という思いから、科学的知を基盤として社会へ発信する。そんな姿勢を貫いてきました。創立30周年記念のシンポジウムでは、お二人のゲストを迎えて、自然環境の中のヒト、進化という時間を生きるヒト、そして言葉を扱うヒト人という視点から、改めて、生きものとしての人間を考えて、次への一歩としたいと思っています。



写真：川本聖哉

# 人類の飛躍と没落

— 共感社会と言葉のもたらした世界

山極 壽一 総合地球環境学研究所所長

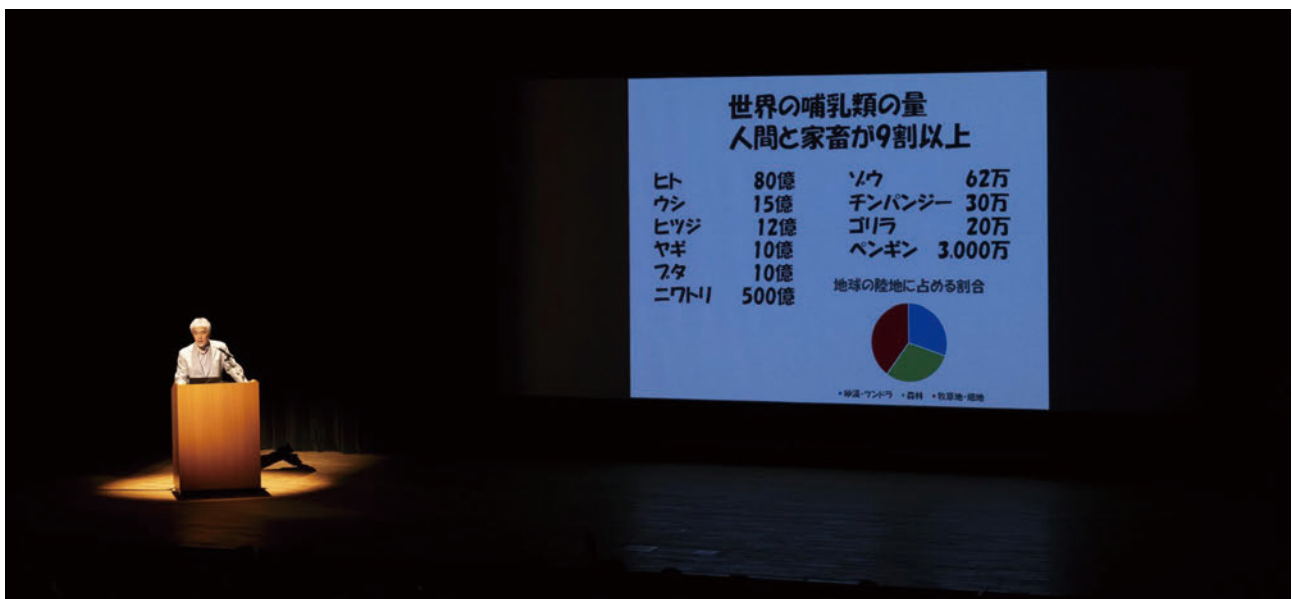


CHAPTER

- 1. 生命誌研究館に期待すること
- 2. 共感力を持つ変な生きもの
- 3. 言葉のいらない集団
- 4. 人間は共同で保育する
- 5. もう一つの世界へ
- 6. 物語を共有して生きる生きもの

## 1. 生命誌研究館に期待すること

人類は今、大変な危機に直面しています。昨年、人口は80億を超えました。新たな時代区分として、地質学者たちは、1950年代以降を「人新世、Anthropocene」とすることを提案しています。この100年間で人口は4倍。家畜もそれぞれ10億を超え、ニワトリは500億羽。野生動物に比べて4桁も違う。その結果、人と家畜を食べさせる畑や牧場が地球の陸地の4割を超え、野生動物が住む森林はわずか3割しか残されていません。21世紀に地球の限界を表す指標として提唱されたプラネタリーバウンダリーの9つの指標のうち3つから4つが既に限界値に達しているのです。



近代科学、資本主義、新自由主義によるグローバル化は、個人の欲望を拡大してきました。これを続けては人類も地球も滅びます。19世紀頃までは、哲学が人間の生きる道、世界を知る術を教えてくださいました。しかし、20世紀中盤にワトソン、クリックによって、すべての生命はDNAという共通の

物質の4つの塩基の組み合わせで書かれた遺伝情報に基づいて生きることが明らかにされて以降、学問と世界認識は大きく変わりました。さらに近年、我々は新型コロナウイルスによって、地球は微生物の惑星でもあることを思い知らされた。ヒトの遺伝子の8%はウイルス由来だと知られるように、生命は共進化していることもわかっています。ではなぜ突如、ヒトに感染する新しいウイルスが



現れたのか。フェリシア・キーシング博士は、生態系の多様性がウイルスの突発的な変異を抑える効果があることを証明した業績により、昨年、コスモス国際賞を受賞されました。人間が自らの手で自然を壊しその厚みを削ってしまった報いが降り掛かってきたのではないかとと思われるのです。

人類は、どこで道を間違えたかと、自らの進化と文明化の過程を振り返り、真剣に考え直さなくてはならないところに来ています。地球を支配しているのは、人類でなくウイルスやバクテリアかもしれません。7万から10万年ほど前に言葉を使い始めた人類は、他と比べて高い知性を持つと言えるのでしょうか？ 1万2000年ほど前に食料生産を始めたことは爆発的な人口増加をもたらしました。それでよかったのでしょうか？ 近代科学に基づく産業革命は、エネルギー改革だけでなく経済や政治も変えました。果たしてそれがよいことだったと言えるのでしょうか？ 人類はさまざまな対立を抱えています。先ほどのプラネタリーバウンダリーによって示されるように、これまでのように地球資源から富を増やし、再分配するやり方は限界に達していることは明らかです。何か別の方法を見つけ出さなくてはなりません。今日は、生命誌研究館が新しい道を示してくれることに期待してお話をさせていただこうと思います。

## 2. 共感力を持つ変な生きもの

人類の進化700万年を振り返ってみると、3つのエポックがありました。まず、700万年前に人類は二足で歩き始めて森林から草原へと進出した。これが最初の一步です。次に200万年前、人類は脳が大きくなり始めた。そして誕生の地アフリカを出た集団はユーラシアへと進出した。そして7万から10万年ほど前に言葉をしゃべり始めて、再びアフリカから全大陸へと広がり始めた。ではそれ以前を少し振り返ってみましょう。

人類の祖先である類人猿は2000万年ほど前にアフリカの熱帯雨林に登場しました。当時、アフリカの熱帯雨林にはほぼ類人猿しかいませんでした。ところがその後、類人猿以外のサルが種も数も増やし、現在ではサルが80種、それに比べて類人猿はたったの4種しかいません。つまり類人猿は決して繁栄した種でなく、追い詰められて数を減らした種なのです。なぜ類人猿がサルに負けたか。そ

れは2つの点で劣っていたからです。1つは消化能力。サルは胃や腸の中にさまざまなバクテリアを共生させており、我々が食べられない未熟な果実や堅い葉っぱを食べることができます。食物範囲が広い。類人猿は熟した果実か柔らかい葉っぱしか食べられません。もう1つは繁殖能力。サルは毎年か1年おきに子を産みます。類人猿は4年から9年の間隔でないと子を産めません。一旦、数が減ってしまうと、その回復に類人猿は時間が掛かる。その間にサルが勢力を拡大します。そうして類人猿は追い詰められて行ったわけです。



サルと類人猿に共通して他の動物とは違う特徴があります。それは、毎日食べなくてはならないということです。どこで何をどうやって、いつ誰と食べるのかという課題が日々のしかかります。その中で、消化能力が弱い類人猿は、誰と食べるのかということに注力してきました。人間も一緒です。ニホンザルがそうですが類人猿以外のサルは食物を分配しません。一つの食物を前に顔をつき合わせた時、けんかが起こる前に互いの優劣を判断して弱い者が引き下がって他の食物を探す。サルの社会はそういうルールによってけんかを防いできた。ところが、類人猿は食物が限られていますから、弱いほうが引き下がったら飢え死にしちゃう。だから食物を分配します。サルは強いほうが餌場を乗っ取る。でも、類人猿はチンパンジーもゴリラも、体の大きな強いオスが持っている食物を、体の小さいメスや子供たちに分けてあげます。さらに食物を運び、気前よく食物を分け、皆と一緒に食べるようになったという特徴が、我々が最初に持った人間らしい社会性です。二足歩行はそのために役立ったのです。

サバンナでは食物が分散しています。屈強な人が遠くまで出掛けて、自由になった手で食物を持ち帰り、安全な場所で皆で分け合って食べる。我々は、今もそうしているわけです。潮干狩り、ナシ狩り、イチゴ狩りも、自分の必要以上のものを集めて、持ち帰って皆で分け合って食べる。これが人間の食事です。皆さんにとって当たり前かもしれませんが、サルから見たらとても不思議なことをやっているよ

うに見えるわけです。我々にそれができたのは、仲間を信頼する気持ちが芽生えたからです。遠くに行った仲間が自分の好きなものを持ち帰ってくれるという期待。そんな期待を抱いて待っている仲間がいるという思い。それらが見えないものを欲求する人間に独特な感情を育んだ。これはサルも類人猿もできません。そのおかげで現代人は、誰がつくったのかもわからない、誰が持ってきたかもわからない食物を信頼して食べることができるようになっているのです。



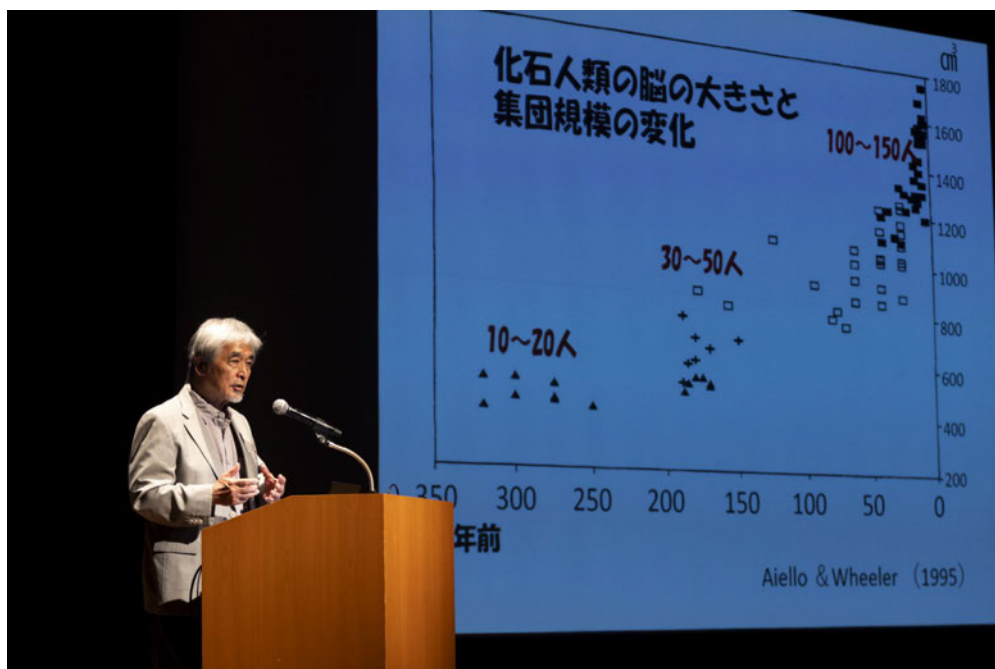
直立二足歩行は、四足歩行に比べて速力も敏捷性も劣りますがメリットは大きい。自由になった手で食物を運ぶことが高い共感力を人類にもたらした。これが人間社会の基本だというのが私の仮説です。それだけではありません。二足で立ち上がったことで、喉頭が下がり、そこに間隙ができて様々な音声を発することができるようになった。腕(前肢)で体重を支える必要がなくなったので胸部への圧力が減り多様な声も出せる。さらに支点が上がり、手足を始め、上半身と下半身を別々に動かして自在な身体表現に用いことができる。踊りです。踊りは、相手の身体を自分の動作の延長にも、自分の身体を相手に預けることにもつながる。これには同調と共感をさらに強化する効果があったはずです。

ロボットも二足歩行できますが、やっぱり歩き方が下手で人間とは違う。ファッションショーが象徴的ですが、歩くことは自己主張です。二足で立ちあがる。そして、どのように歩いて見せるかに表現の効果があるのだと思います。

### 3. 言葉のいらない集団

人間の脳はゴリラの3倍の大きさです。脳が大きくなり始めたのは200万年前、そして、40万年前に現代人並みの大きさに達した。現代人より二段階前のホモ・ハイデルベルゲンシスが1400ccの脳

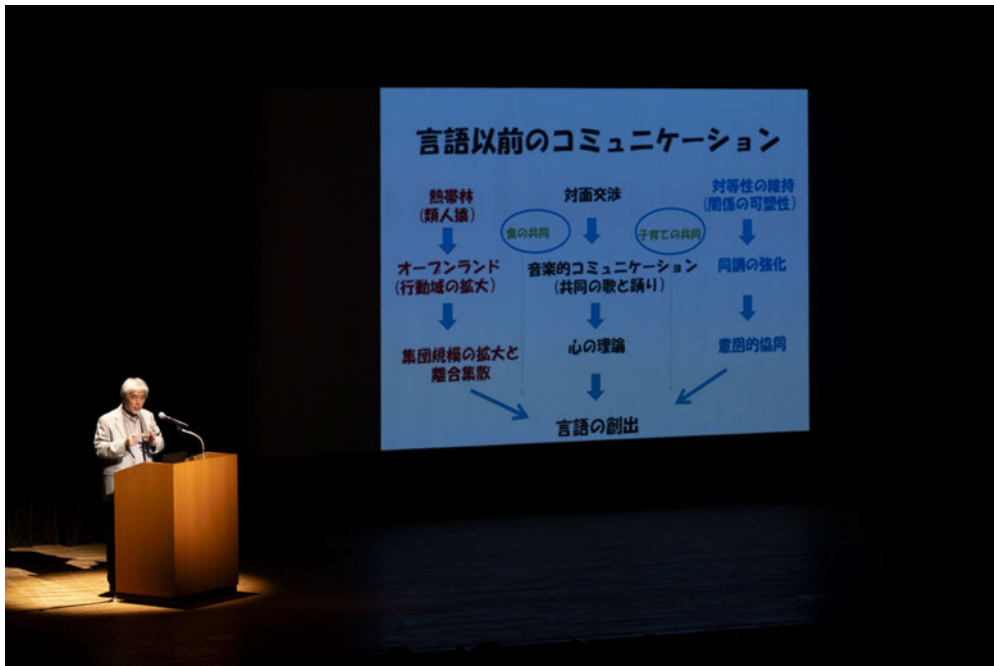
を、後に出たネアンデルタール人は、現代人より少し大きめの1800ccほどの脳を持っていた。実は、現代人の脳は、農耕牧畜が始まった1万2000年前に比べて10%から30%小さくなっています。そもそも脳はなぜ大きくなったのか。イギリスの研究者ロビン・ダンバーが面白い仮説を発表しました。脳の領域は新皮質と旧皮質に分かれます。彼はその比率とそれぞれの種が暮らす集団の大きさととの関係を調べた。すると大きな集団で暮らす種ほど新皮質の比率が高いことが示されたのです。集団が大きいほど、つき合う仲間が多く、自分との関係や仲間同士の関係を熟知したほうが有利に生きられる。つまり、脳は社会脳としてお互いの個体間関係を把握するための記憶力を増すように進化した。社会脳として進化したことが結論づけられたのです。700万年前はゴリラと同程度の大きさだったと考えられるので、当時の我々の集団の規模は、現代のゴリラと同じ10から20人。200万年前には30から50人。そして、現代人の脳だと150人くらいの集団で暮らすのに適していることがわかった。この150人を発見者の名前を取ってダンバー数と呼びます。



20万年前には脳は既に現代人並みの大きさに達していたけれど、当時まだ言葉はありません。言葉の出現は7万から10万年前です。でも集団規模は既に150人くらいあったはずで、現代でも狩猟採集民がまさにその規模です。その後、農耕牧畜、食料生産が始まり人類の集団規模は急速に拡大しました。でも脳は大きくなっていない。脳と集団規模の相関関係が文明化の過程で失われたのです。その要因は言葉だろうと思います。

ゴリラと同じ10から15人の集団規模とは、現代社会では、例えばラグビーやサッカーのチームで、この規模だと言葉はなくてもいい。スポーツの練習では、言葉を駆使してプレーを学ぶかもしれませんが、いざ試合に出れば、誰も言葉なんか交わさない。身振り手振りと声だけで連携してチームプレーできる。ゴリラも群れが、まるで1つの生きもののように動くことができます。人類はスポーツの中にその能力を保っているのです。では現代で30から50人規模の集団と言え、皆さん思い浮か

ぶと思いますが学校のクラスです。それはお互いに顔と特徴が一致してまとまって動けるのです。だからこそ、学校も先生1人でクラスを指導できる。この規模は言葉が介在しなくても、身体と声の共鳴だけでも成り立つ。そして、現代人の脳に匹敵する150人規模の集団はといえば、これは社会関係資本、ソーシャルキャピタルだと思います。トラブルに陥って誰かと相談したい時、疑わず相談できる相手の最大数が150人。これも原則として、言葉はなくても過去に喜怒哀楽を共にした、身体を共鳴させてつき合った仲間の数なのです。



言葉は、自分の集団外の人たちと契約を結んだり、交渉するために生まれたのではないのでしょうか。日常生活で、10から15人の共鳴集団と言えば家族や親族です。生まれた時から一緒にいるので後ろ姿を見ただけでも気持ちがわかる。その集団が10から20個集まって地域コミュニティーをつくっている。地域コミュニティーも実は言葉を原則としてつながっていません。エチケットやマナーは言葉で説明しなくても、人々の交渉を自然の流れに沿ってうまく動かすようにつくられている。大事なものは流れですから、それらすべてを音楽的なコミュニケーションと呼ぼうと言うわけです。

## 4. 人間は共同で保育する

言葉の前にどんなコミュニケーションがあったのかをゴリラが教えてくれました。サルは対面コミュニケーションができません。相手の顔をじっと見つめる行為は威嚇になるので、弱いサルは見つめられたら視線を避けるのがマナーです。ところがゴリラは近くで顔を見合わせてじっとしていることができます。お違いに見つめ合うことができる。挨拶したり、仲直りしたり、交尾を誘ったりと、さまざまな見つめ合いの場面がある。対面交渉ができるかできないかは類人猿とサルを分ける特徴で、人間もこれをやっています。但し、ゴリラと違って1メートルくらい距離をあけて、この距離には意味があった。目です。いろいろなサルと類人猿の目を比べると、類人猿はサルとそっくりで、人間だけ



が違って白目がある。1メートルくらい離れて相手の顔を見つめると、その微細な白目の動きから相手の気持ちを読むことができます。共感力です。人間は生まれつきこの能力を備えています。声だけで意味を伝え合うのではなく、相手の白目の動きから気持ちを読み取るのです。



このような共感力の働きは、共同による子育てにも見られます。ゴリラは共同で子育てをしません。生まれた子はお乳を飲ませお母さんが独占して育てます。乳離れした子はお母さんを離れ、お父さんを頼りに育ちます。子育てをバトンタッチする。人間は夫婦に限らずいろいろな人が協力して子育てする。これは人間社会の特徴です。オランウータン、ゴリラ、チンパンジー、ヒトでとりわけ乳児期の長さが違います。オランウータンはお乳を7年吸う。チンパンジーは5年、ゴリラは3から4年。離乳した時、既に永久歯が生えており大人と同じものを食べられる。人間の子は1、2歳で離乳しますが、その後なんと6歳まで永久歯は生えません。人間の子だけ離乳後も乳歯の時期が続くのです。

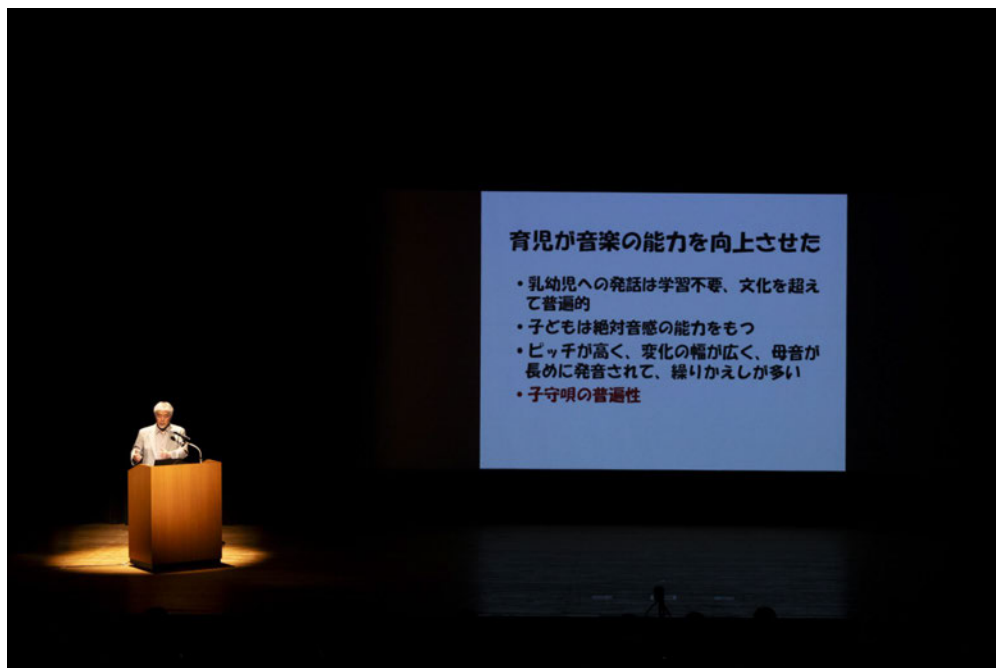
なんでこんな面倒くさい時期ができたのでしょうか。おそらく出産間隔を縮めて子を多く産むために生じたのでしょう。授乳期間はプロラクチンというホルモンが排卵を抑制しますから妊娠できません。人間の場合、子をたくさん産むには、乳児を早期に離乳させる必要があった。それもこれも人類祖先が食糧豊富で安全な熱帯雨林を離れたためです。草原に木はありません。大型肉食動物に襲われたら木に登れば助かるけれど、木がないので逃れようがない。だから他の餌食になる動物と同じように多産になる必要があった。多産になるには、一度にたくさん子を産むか、何度も子を産むか。人間はサルや類人猿と同じ一産一子ですから出産間隔を縮める必要があった。

もう1つ、繁殖能力があるのに繁殖しない青年期という時期が人間にだけあります。これは脳を急速に成長させる必要からエネルギーを脳に回したために身体の成長が遅れたわけです。でも脳の成長が終わる12歳から16歳頃に、今度は身体の成長にエネルギーを回すようになり、思春期の成長スパートと言いますが、この時期は、年上の先輩たちや大人たちの助力が必要です。そこを親だけでなく共同保育で子供たちの成長を助けるようになったわけです。

現在の我々の家族や地域共同体を核とする社会は、人類の進化史の末に重層構造として成り立っているわけです。これはゴリラもチンパンジーもつくれなかった。ゴリラは家族的な集団だけ。チンパンジーは家族がなく共同体的な集団だけです。この2つはそれぞれ編成原理が違います。家族は見返りを求めず奉仕し合う集団。共同体は見返りが必要な互酬性に満ちた社会集団です。相反するこの2つを統合できたのは、自分も相手の立場に立てる共感力によるものでしょう。その結果、人

間は他の動物が持たない社会性を持つことになった。自分の犠牲をいとわず集団のために尽くすという変な特徴で、そのために戦争ということまで起きてしまった。戦争は自己犠牲を伴います。共感力は人間の発展にも滅びの道にもつながっていると私は思っています。

もう1つ重要なことは、人間は、直立二足歩行で獲得した声と身体による音楽の能力を、さらに共同保育によって強化してきた。生まれたばかりの赤ちゃんは、自力でお母さんに掴まれません。お母さんが離れる度に泣いちゃう。危険が迫るからです。赤ちゃんが泣くのは自己主張です。お母さんに限らず泣き声を聞きつけた周囲の大人たちは赤ちゃんを世話する。人間の赤ちゃんは生まれつき共同保育をしてもらえるような特徴を持っているわけです。そして、赤ちゃんをあやす時に語り掛ける声は「インファント・ダイレクトスピーチ」と言って、世界共通の特徴を持った音の連なりです。ピッチが高く、変化の幅が広く、母音が長めに発音されてくり返しが多い。赤ちゃんは、言葉の意味を理解できませんが、言葉が持っている音楽的なトーンやピッチを理解して聞いています。だから、日本人の赤ちゃんに英語で話し掛けても中国語で話し掛けても赤ちゃんは聞いてくれる。でも言葉をしゃべるようになると相対音感が出てきて絶対音感の能力が消えます。そうして赤ちゃんから子供へと成長するのです。



赤ちゃんに語り掛ける音楽的な声が大人の間に普及して音楽になったという仮説があります。音楽は、お母さんと赤ちゃんの間に生じるような効果を広めた。お互いの壁をなくして皆と一緒に乗り越えていく精神です。協力、共鳴、共感という能力が芽生えた。これが人間の社会を強くしたのですね。

人間の本質は何かと考えると、実は音楽的コミュニケーションで結びついた身体の共鳴による共感力であり、家族と複数の家族を含む重層構造の社会を編成できる認知能力ではないでしょうか。しかし、人間の心身は、せいぜい150人からなる小規模な社会の暮らしに適応しています。言

葉は、そうした小規模な社会や文化をつなぐ役割を果たしたけれど、実は信頼関係を伴っていないのではないかと。我々は、700万年に及ぶ進化の時間の99%を占める狩猟採集の生活で培ったシェアリングとコモنزという文化的土壌の上に、わずか1万2000年前に始まった食料生産による定住と所有を原則とする社会に生きています。これはまだ心身に染みつくには至りません。

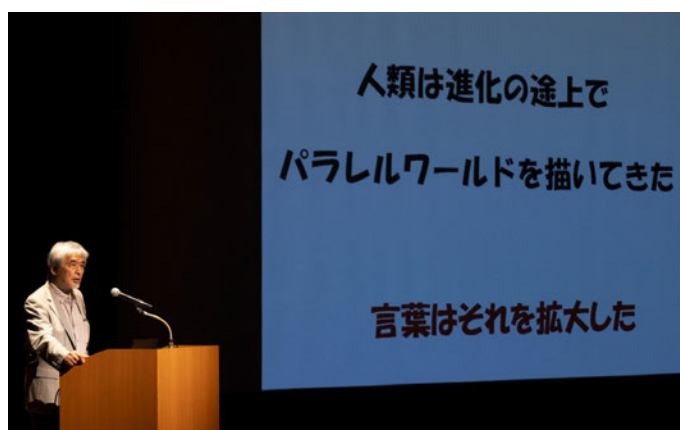
音楽的コミュニケーションはアナログです。時間の流れを必要とする形式です。そこではリズムが重視され、それは同調や共鳴を要請する。その後には現れた言葉というものは、世界を切り取る手段です。分類する、識別する。そして、遠くにあって見ることのないもの、体験できなかった過去の出来事を言葉によって伝えることができる。言葉はさらに、現実にはないものまで物語として想像させることができる。考える手段となり、新たなものを創造する手段となった。でも言葉は切り取って伝えま

## 5. もう一つの世界へ

言葉はコミュニケーション効率を向上させました。そして集団を超え、世代を超え、さまざまな継承をもたらし、世界を解釈し直す道具になりました。言葉によって、我々の社会は3つの自由を得たと思います。ゴリラやチンパンジーの社会にない、移動する自由、集まる自由、対話する自由です。

とりわけ対話する自由というのは大きかった。言葉が登場した後、狩猟採集から農耕牧畜社会に移り、産業革命によって工業社会に、そして今、情報革命により超スマート社会に突入しようとしています。今、私がここで話しておきたいのは、パラレルワールド、もう一つの世界という概念です。我々は、進化過程で五感を駆使してさまざまなパラレルワールドを描いてきました。それが、言葉を獲得したことで一気に拡大した。大航海時代、まだ見ぬ大陸へ大きな夢を馳せた。『ガリバー旅行記』、『ドリトル先生アフリカへ行く』は、私が小さい頃の愛読書でした。『バンビ』は人間の言葉をしゃべる。ドイツのザルテンという作家がつくり出した物語をディズニーがアニメ化して世界中で流行りました。皆が動物も人間と同じように心を持っていると思い始めたのはこの作品のおかげでしょう。そして『キングコング』。これはモデルとなったゴリラとは似ても似つかぬ怪獣に仕立て上げられてゴリラは大変な損をしました。『猿の惑星』や『2001年宇宙の旅』は空想の世界を描くことで人間の未来を予想した。

今、我々は、情報革命のただなかにはいます。そもそも脳の働きとは、意識と知能、あるいは感情と知識であり、両者は分かちがたく結びついて人間の判断力をもたらしてくれる。ところが今、AIやChatGPTによって、情報として切り出された知識だけを分析して期待値を出すという技術





が登場しました。意識や感情という情報にできない人間らしさを生かす場面がどんどん失われつつあると危惧しています。

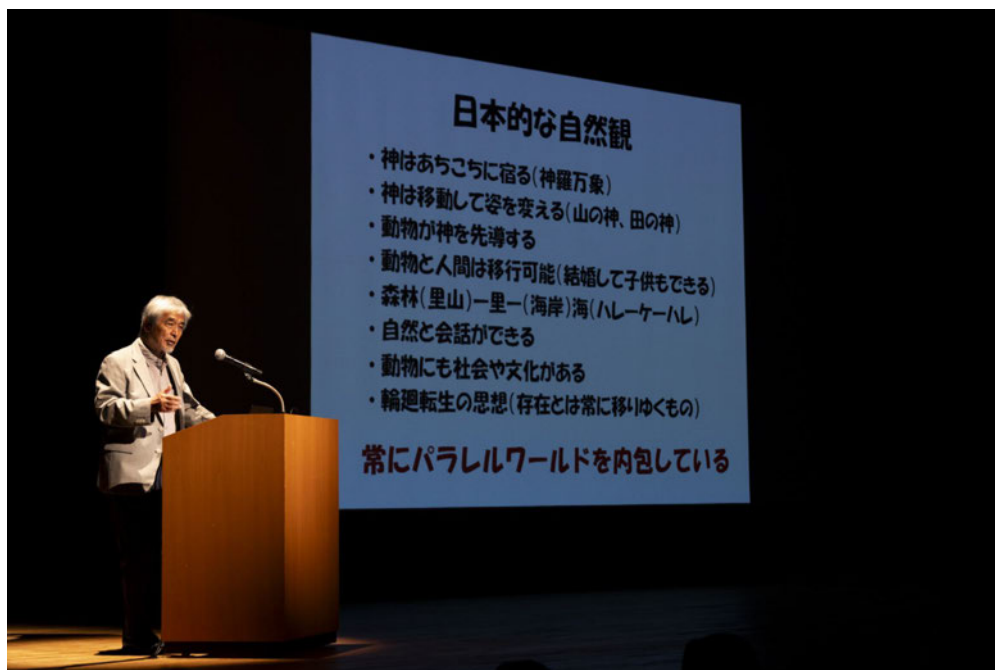
我々は、今、ウイルスやバクテリアも含めて目に見えない生命と生命のつながりも考慮しながら、新たな人間の暮らしを構築しなくてはなりません。果たして、その準備が我々にできているでしょうか？これは疑問です。ぜひ永田先生に生命誌研究館のこれからを語っていただき、その答えを出していただきたいと思います。

2018年にコスモス国際賞を受賞されたフランスのオギュスタン・ベルクという方がいらっしゃいます。この方は地理学者ですが、同時に日本文化に詳しい思想家でもある。その彼の受賞講演が強く記憶に残っています。西洋、近代の古典的パラダイムは、存在論的には二元論に、論理的には排中律に基づいており、必然的に近代化と工業化を伴ってきたが、このパラダイムは行き詰まりに達していると仰いました。この二元論と排中律について、実は、京都大学が誇る山内得立さんという哲学者が1974年に書いた『ロゴスとレンマ』という本の中で解説しています。西洋の二元論は、Aか非Aしかなくて間がない。でも、東洋には間を認める考え方がある。両否定と両肯定ですね。Aでも非Aでもない。Aでも非Aでもあるという立場があり得る。これを容中律と呼ぼうと。この容中律を生かしていくことがこれからの人間に必要なであることを仰ったわけです。容中律の例は、日本にたくさんある。「あいだ」や「はざま」という考え、あるいは「何々と何々」と言う時の「と」。これはアンドとは違います。そして「見立て」、現物の奥に別のものを見る見立ての思想です。

これは、京都大学の西田哲学の祖、西田幾多郎が1927年に論文『働くものから見るものへ』で語っていることでもあります。日本人は、形なきものの形を見、声なきものの声を聞く。それが情緒だと。本来は、見えたり聞こえたりすることから隠れている根源的動静が我々の目や耳に一時的に捕まえられて可視化した姿だという風に説明しています。その例として雪舟や上村松園らの日本画家の絵が挙げられます。背景の何も書いてない余白に我々は何者かの姿を見、何者かの声を聞くことができる。

日本人は伝統的にそういう風に世界を見てきた。日本的な自然観というのは、神はあちこちにある。これはアニミズムの思想です。動物と人間は互いに移行可能で、自然と会話することができる。暮らしの場としても、ハレの山や森や海と、ケの里の間に、里山や里海を育んできた。これは間の思想です。そして、その間には鳥居があり、そこを通る時には禊をしなくてはならない。山の上の神さまは、田植えの時期になるとサルに連れられて田の神さまになって降りてくる。そして、収穫期には皆でお祭りをして、神さまを山へお送りするというように年中行事が行われてきました。浦島太郎が竜宮城

へ連れて行ってもらった亀に出会った海岸も間だし、川も間です。そこに架かる橋は、どちらの岸にも属さず、どちらの岸にも属している。だから橋は、逢い引きの場所だし、密談の場所なのです。三途の川もあの世とこの世の間ですね。日本の家屋にも間の場所があります。縁側です。縁側は家の内でも外でもある。そこにお客を呼び入れてお茶を入れ、将棋や碁を指し、世間話に打ち興じる。そこは隠居の場所でもあった。隠居は、社会活動から一步離れた存在です。



そして日本が誇る「鳥獣戯画」。我々はこれをサルやウサギやカエルだと思って見ていません。そこに人間の姿を見るから面白い。盆栽は、樹木の単なるミニチュアではなく、そこに魂が宿る老木です。文楽は、それを人形劇に仕立て上げた芸能で、西洋の操り人形とはまったく違います。魂が込められた人形によって人間を超えたドラマが演じられる。それを見て、我々は泣いたり笑ったりできる。そうした文化は、現代のアニメやフィギュア、ロボットやコスプレまでつながっている。日本人が作り上げてきたパラレルワールドは世界中で人気を集めています。今、一神教の世界を超えて、第二のジャポニズムをもたらし始めていると私は思っています。

## 6. 物語を共有して生きる生きもの

今、どの国もSDGsと言って17の目標、169のターゲットに向かって持続的な開発目標を数値で立てて取り組んでいます。やっと世界が一致し始めた。これは素晴らしいことだと思います。でも私は不満です。人間が生きる上で不可欠なのにSDGsにないものがある。何だと思います？文化です。文化とは意識に埋め込まれている価値観です。その産物はたくさんあります。皆さんが座ってる椅子もそう、私が使ってるパソコンも時計もそう。全部、文化の産物です。しかし、文化そのものは価値観として心身に埋め込まれているので測ることが難しい。数値目標にならない。それがSDGsに入らなかった理由です。

私は総合地球環境学研究所という京都にある研究所に勤めています。2001年の開設で、地球環境の根幹は人間の文化の問題であると言い切って始まった研究所です。同年、ユネスコのパリ総会で文化的多様性に関する世界宣言が採択されました。その第1条に素晴らしいことが書いてあります。生物的多様性が自然にとって必要であるのと同様に、文化的多様性は交流、革新、創造の源として人類に必要なものである。



文化は、個性的で多様でなければならないと言っているのです。さらに第7条には、創造は文化的伝統の上に成し遂げられるものであるが、同時に他の複数の文化との接触により開花するものである。文化は個性的で多様でなければならないが、孤立してはいけない。他の文化と接触して初めて新たな創造性を育むのだ。と言っています。

これは、とても重要な宣言だと思います。私は、これまで西洋の知一辺倒、科学技術に大きく依存した社会の在り方を、もっと東洋の知を入れてつくり変えなくてはいけないと思っています。西洋の知は、原因を突き止めて分析し、悪いものを取り除くという方法をとります。それには要素に分ける必要があった。でも、東洋では要素に分けません。自然の諸力と融合し、その力を生かすという方法が東洋の知です。実は、風土という考え方と生態系という考え方は、共に全体論的な要素に分けなくてもいい考え方で相性がいい。生態系は西洋発で、風土は東洋発。両者は結びつくことができます。結びつける大きな方策は、関係性と循環を重要視することで、まさに音楽です。流れを重視しなければなりません。

今世界で、文化の無国籍化が起こりつつあります。効率と生産性を優先した結果、GAFAに代表されるようなプラットフォームが世界中に張り巡らされて文化が見えなくなっている。価値観が一元化しているのです。それによって格差が増大している。元々、ある文化の価値は他の文化には通じないことが多く、価値の転換が必要だった。ところが世界が一元化してしまうと外がない。だから貧しい人はずっと貧しい。富める人はずっと富めるという状況になってしまう。

もう1つ私が抱く危機感は、信用社会から契約社会へ大きく移行してしまったこと。我々は家族と複数の家族を含む地域共同体を根幹として、人を信用するソーシャルキャピタルによって関係性を紡いでいきました。ところが現代社会は、人々がばらばらにされて制度やシステムにぶら下がるしくみになっている。皆さんがたくさん持っているカードはその契約書です。大きな企業や政府にとっては、そうなったほうがコントロールしやすい。だから皆をばらばらにして制度やシステムを強化しようと

する。でも意図されているわけではありません。日本で言えば、生活の拠り所だった地縁、血縁、社縁という3つの縁が既に崩れ去っています。新型コロナウイルスへの対処もそれを加速させました。しかし、縁がなければ我々は生きられません。人と人がつながり大きな物語を共有して生きるのが人間です。我々はこれから何をすべきか。現代に相応しい新たな社交を構築しなくてはなりません。では社交とは何か。これは、一昨年にお亡くなりになられた日本が誇る劇作家の山崎正和さんが、2003年に『社交する人間』という著書を書いておられて、その中で素晴らしいことを言っています。

人間のあらゆる欲望を楽天的に充足しつつ、しかし、その充足の方法の中に仕掛けを設け、それによって満足を暴走から守ろうという試みである。これは協力してリズムを盛り上げることによって成り立つものである。それには作法が必要で、それは、自然らしくそれを踏んでいくことを要求する。そして、行動の全体は、まるで音楽のように1つの緊張感で貫く。これが社交だと言っているのです。社交とは文化である。社交とはリズムである。と山崎さんは仰っている。それを忘れてはいけません。

私たちは今、さまざまな情報通信技術によって自由に動ける時代を迎えた。それは、第二のノマド、遊動の時代だと思います。そうすると、実は、食料生産が始まる時代より前に戻って、人類進化の大半を占めてきた狩猟採集時代の精神世界に戻れるのではないかと私は希望を抱いています。定住がなくなり、所有がなくなって、代わりにシェアが増える。共有財、コモンズが増える。そうすることで、大きな企業によって支配されてきたものの価値や規格を脱して、個人と個人との間で価値をつくれる時代を迎えるのではないかと思います。

最後に、この後、鼎談でお話しするお二人に私が用意してきた質問をご紹介します。永田和宏館長には「生命の本質はリズムじゃないの?」「言葉の基調は音楽ではないか?」永田先生は、生命学者であると同時に短歌の歌人でもありますからこの2つの質問を投げ掛けてみたい。小川洋子さんは著名な作家で、物語というのは小川さんの世界そのものです。では、「人間がつくった物語はいのちをどう変えたのでしょうか?」そして、「物語は我々人間をどこへ導いてくれるのでしょうか?」もし小川さんにお考えがあれば、ぜひお聞かせいただきたいと思っています。これで私のお話を終わります。どうもありがとうございました。



写真：川本聖哉

# SYMPOSIUM

対談

## 科学を私たちの言葉で

山極 壽一

総合地球環境学研究所所長

小川 洋子

小説家

永田 和宏

JT生命誌研究館 館長



### CHAPTER

1. 空を飛べなかったサル

3. 言葉以前の世界へ

5. 曖昧さを抱えらる科学を

2. いまはむかし

4. 定住と所有、死者と土地

6. 生命を奥底から紡ぎ出すもの



## 1. 空を飛べなかったサル

永田

今日はまず山極さんに、霊長類の進化も含めて人間が言語を獲得し、どのように文化が築かれたかとスケールの大きなご講演をいただきました。お尋ねしたいことも多々ありますが、まず小川洋子さんのご感想からお伺いします。

小川

人間だけがなぜ言葉を話し、書き言葉として文字を持つようになったのか。科学的な証明は難しいと思いますが、その起源に音楽を持ってこられたところに実感として共感します。例えば、バレエを見ると、自分が言葉で書く小説って、一体、何なんだろうと、身体や音楽による表現に打ちのめされる気がします。山極先生は、どういうところから音楽と言葉を結び付けられたのですか。



山極

ドラミングと言って、ゴリラは両手で胸を叩く。パーカッションですね。チンパンジーは胸を叩く代わりに足を踏み鳴らしたり木の幹を叩いたりします。音楽は自己主張から始まったと思うのです。これは二足で立たないとできません。もう一つ、パントフットと言ってチンパンジーは合唱します。「フーホフーホフーホッホホ」って、俺、チンパンジーじゃないからうまくないけど(笑)。ゴリラは「ウウウーウウウー」ってハミングする。これもメロディーです。ゴリラの鼻歌は1頭でやる場合が多く、物静かな雰囲気です。皆が満足してる時、それが伝染して行きます。チンパンジーは興奮。人間に合唱も鼻歌もありますね。音楽は仲間と一緒に感情を共有する。しかも身体性を伴います。音楽のほうが起源は古く、言葉はずっと後だろうと思います。

小川

山極さんは、シジュウカラの研究をされている鈴木俊貴さんと『動物たちは何をしゃべっているのか?』という共著を出されましたが、鳥の囀りも音楽ですね。

山極

実はサルって、元々、鳥になりたかった動物だと思うんです。最初の霊長類は、恐竜が滅び始めた6500万年前頃に現れ、夜の世界でひっそりと大型恐竜の子孫に食べられないよう地上に隠れ住んでいました。昼の世界は鳥が占有していた。その後、だんだんと体を大きくして霊長類も鳥に勝てるようになり昼の世界に進出した。でもサルは飛ばません。だからその子孫の我々は今も飛ぶことに憧れている(笑)。空に進出した鳥は、3次元の世界を自由に飛び回り、声を自在に操って、遠方ともコミュニケーションしていました。我々は地面から離れられません。でも、遠くまで出掛けていった仲間が情報を持って帰ってくる。それを示すのに一番手っ取り早い手段が声でした。声で意味を伝え合うことを始めたのが言葉の始まり。言葉によって人間は、やっと鳥と同等のコミュニケーションを獲得したんだと思います。



小川

アウシュヴィッツに送り込まれた子供たちが、チェコの収容所にいた時にこっそり絵を描いていて、その展覧会を見たことあるんです。多くの子供が、なぜか蝶と鳥を描いてる。空を飛べるといことは、塀の向こうに行く、自由の象徴ですね。

人間は飛べない代わりに、二足歩行して両手を使って踊り、叫び、いつ

の間にかそれが言葉になった。今やってるラグビーワールドカップで、サモアやニュージーランドの選手が試合前に独特な踊りをします。あれを見ると、自分の中にある古い記憶が揺さぶられるような感触に襲われて無性に感動してしまう。あれは、死を覚悟した歌と踊りだと思うのです。これから生きるか死ぬかの勝負に出るとい気迫が感じられて、狩猟に出掛ける際の家族に別れを告げる歌が発祥ではないかと想像します。踊りやリズム、音楽は底が深く魅力的で、言葉ってなんて薄っぺらなんだろうという気持ちになってしまいます。



## 2. いまはむかし

永田

言葉の起源として声と身体が重要ということですが、音楽はアナログなもので共感につながる気がします。一方、言葉は共感と同時に疎外をもたらす。デジタル化してしまうのです。山極さんの話で、チンパンジーの歌は自己主張だと思います。ゴリラは共感という面も強かったけど、言葉って究極のデジタルだと僕は思うのです。デジタル化とは切り取ることで、自分はこう思う、こう見る、世界をこう認識するという自己主張でもある。言葉には共感をもたらす面と、逆に、自分を他から切り離し疎外をもたらす両面がある。これがどこでどういう風に分かれて来たかを知りたい。やはりアナログとデジタルに帰着しますかね。

山極

音楽は、時間の芸術と言われるように、音と音とがつながり合って流れをつくるのが本質。1音では成立しません。ジェスチャーも同じ。そもそも切り離せません。でも言葉はそれを切り離した。切り離したことで、違うものを同じように捉えられるようになった。類推、アナロジーですね。言い換えができるようになった。これは狩猟に役立った。自分がやっているように、他の動物もお腹が空いたらここへ果物を食べに来るだろうという重ね合わせができる。さらに同じ人間なのに、違う集団の人間を区別する。境界線を引くことができるようになった。言葉とは、世界に線を引くことではないか？ 小川さんいかがでしょうか。

小川

言葉を用いるようになった代償として、国家、宗教、民族というあつてなきが如くの、実体が説明できないものにも名前を与え存在させることができるようになった。そのため他の動物はやらない戦争するという事まで起きてしまったわけですね。

永田

言葉は、時間を獲得することにもつながったと思うのです。言葉がなければ、時間という概念は持てない。山極さんとゴリラとの面白い話がありましたね。26年ぶりに再会したゴリラの…。

山極

タイタスね。

永田

山極さんが、昔、アフリカで観察していた若いゴリラで、26年ぶりに、もう大人になったそのゴリラに出会った。するとタイタスは、一日目には思い出さなかったんだけど、二度目に会って、山極さんを思い出したとたん、腹を見せてひっくり返って喜んだ。つまり昔、山極さんと遊んだ若い頃の自分に戻ってしまった。ゴリラは、今と昔という時間の区別を持たないので、昔を思い出すことはそのまま昔に戻ることになると、僕はそう解釈しているんですけど。

山極

時間は因果関係をつくります。チンパンジーもゴリラも、原因と結果の関係が目の前で起きている分には理解できますが、過去や未来の出来事は関係づけできません。人間は言葉を持ったことで、物事を順序立てて並べ因果関係をつけて、まさに物語にできる。物語をつくったことが言葉の最大の功績ではないでしょうか。

永田

人間は、時間の整合性を離れると不安になる。小川さんの『博士の愛した数式』に描かれたテーマでもありますね。主人公は、80分以上前のことが全く記憶できない。何度読んでも最後やっぱり泣いちゃうとても素晴らしい小説ですけど。



小川

パントマイムは、時間を表現できないそうです。昨日や明日を表現できない。表現できるのは今やっていること。人間は言葉によって、時間の流れを物語としたり読んで味わったりできるようになった。物語によって、自分がまだ生まれていなかった時間も体験できるし、死後の世界を想像することもできる。自分を客観視できることは物語の重要な役割の一つだと思います。自分が世界の中心にいて、自分を中心に時間が巡っているという意識に囚われると息苦しくなるので、自分がいない時間にも世界はちゃんとあるとわかったほうがいい。むしろ自分をどんどん小さくしていったほうが気持ちは楽になる。俯瞰して世界を見れば、自分はちっぽけな、取るに足らない存在だと、そう思ったほうが実は心穏やかに生きられる。小説はその手助けをしていると思います。

### 3. 言葉以前の世界へ

山極

アナログとデジタルという話題に戻りますが、永田さんがご専門の生命科学という分野は、デジタルの考え方と技術にどんどん依存し始めましたね。デジタルは安定で、何度でもくり返すことができるからです。アナログはつながっているので、どこかが変動するとそれが他にも影響して変わりやすく不安定。人間の身体はアナログですが、遺伝子は4種類の塩基の組み合わせですからデジタルと捉えることもできます。この両面性をどう考えたらよいか。

これまで自然科学は、さまざまな生命現象を、その現象がもつ流れを止めることで解明しようとしてきました。顕微鏡で観察するのは、対象から切り出した切片だし、細胞内の機能を調べるにも、その動きをいったん止めて見なければならぬ。しかし、生命はアナログで常に動いている。

気候変動シミュレーションもデジタル。ここから予想はできても、地球はアナログなので、予想に反して何が起こるかわからない不確かさがつき纏うのです。今日、小川さんに伺いたいのは、永田さんが仰るように言葉はデジタルだけれども、その間に潜むアナログ的な言葉の間にあるものを紡ぎ出し、人々をあっと言わせるのが作家だと思うのですが、一体どうやって考えていらっしゃるのでしょうか。

小川

本を読んで感動するのは、意味を理解したからではありませんね。むしろ意味のレベルを超えて「何なんだこれは!」というところまで連れて行かれた時に感動する。芥川賞の選考会などでも、この小説がいい、私はこれを推したいという説明はとても難しい。「すごい」としか言いようがありません。

作家は、理屈を超える限界点みたいなところを常に目指しています。人間が言葉を獲得する前の世界に読者を導く。宮沢賢治はそれをやろうとした人です。これは文化人類学者の今福龍太さんがお書きになっているのですが、『なめとこ山の熊』で、熊撃ちの名人が、彼はいつも熊に申し訳ないと思いながら熊を撃っていた。ある時、不意打ちで熊に殺されちゃう。すると熊のほうがその主人公小十郎のお弔いをするんですね。狩人の小

十郎の弔いをする。その死体の周りを熊たちがぐるぐる回る。それは踊り、音楽です。その時、ここが宮沢賢治のすごいところで、熊という表現を使っていないのです。黒い大きなものっていう表現をしてるんですよ。宮沢賢治が書いているのは、人間が熊という言葉を使う前の世界です。

山極

言葉は、実はほんのわずかな言葉だけで奥深い世界を言い表すことができる。それは言葉の恐ろしさでもある。

永田

言葉はデジタルだから隙間がある。その隙間に秘められているものを探り当てるのが作家であり、歌人ですね。短歌を始めた初心者が、自分の思っていることがなかなか表わせませんと言いますが、詠う前に、詠いたいことはわからない。人間の心を書こうと思っても無理なんだと小川さんも書いておられますね。その人の



周りを描写していくところから心の中にあるものを読み取ってもらう。短歌は五七五七七のわずか31文字しかありません。作者が何を言いたいかを読者が読み取ろうと努力してくれないことにはまったく伝わらない形式なんです。読者が読み取ってくれるだろうという信頼の下につくるのが短歌で、小説もそうだと思うのです。

小川

文学作品は、作家の手を離れたら読者とその本、歌集との1対1の関係で、そこに作り手は介入できません。ですから読者の数だけ読み方、感じ方がある。許容量の広い作品ほど残っていくのかなと思います。作家がこう読まれたい、私の気持ちはこうですと書いたら、読み手は自由度がなく、窮屈だと思います。ですから、例えばピントの外れた書評が載ったりしても、ああ、こういう読み方もあるのかとむしろ嬉しくなってしまう。

永田

その通りですね。

## 4. 定住と所有、死者と土地

山極

今、科学が伝わりにくくなっています。それは科学に物語がないから。科学者はなるべく物語にすることを避けます。科学で大事なものは原因と結果で、それを膨らませてしてしまうと、真実とは違うと却下されてしまう。

永田

生命誌の誌は歴史の史でなく、ごんべんに志すなんですね。岡田節人先生、中村桂子先生が館長の時代から、語るということをとっても重視しているのです。生命の辿った時間の累積を物語るナラティブを大事にしています。

しかし、山極さんも仰るように一般的な科学、とくに分子生物学、細胞生物学にはデータ以上のことは語らないという不文律があつて、もうちょっと言いたいところをグツと我慢して、データから言えるのはここのまでというマナーを遵守している。とても大事なマナーなんだけれど、一方でそこに、一般にサイエンスが面白いと思ってもらえない壁があるように思います。今日の山極さんの講演のように、大胆な飛躍がいっぱい、突っ込みたいところも多々あるけれど、こう考えることができるんだと大きな可能性を示す。そこに科学の存在意義もありますね。

山極

科学は、なぜという問いに対しては答えられない。現象を語るのが科学の説明の仕方です。でもなぜという疑問に対する答えが見えてこない人々は納得しません。宇宙はなぜできたのか。これには答えられません。科学者は、宇宙はどのようにできてきたかという現象の説明はできる。でも、なぜできたかには答えられない。それが科学の限界です。



永田

科学者は実験して確かめられない現象は対象として扱わない。これは健全な科学の姿です。生命はどのように進化してきたかについて、検証や実験ができるデータに基づきながらどこまで語るることができるか。

小川

科学者は仮説を立てますね。素人から見ると、その仮説が物語的で面白い。なぜ人間は戦争してしまうのか。野生動物はどんなに対立したって相手を全滅させることはしないのに。仮説は立てようと思えばいくらでも立てられる。その仮説には物語る力が必要だと思いますね。

山極

チンパンジーやゴリラの研究を通して人間の過去を見つめてみると、闘争状態は我々の本性ではありませんね。考古学的にも、戦争の証拠は1万3000年ぐらい前までしか遡れないこともわかっています。ではなぜ戦争が始まったのでしょうか。ここからが仮説です。歴史的な過程を調べると、やはり定住と所有ということに結びつきます。人間は狩猟のために武器をつくりました。でも狩猟採集民は、狩猟の武器を人間には向けません。狩猟は経済行為です。相手を殺害するためにやるわけではないと狩猟採集民たち



は言います。これは戦争の起源ではありませんね。今、ここを真剣に考えなくてはいけない時代だと思うのです。

永田

山極さんのご著書の中で、戦争の起源に、死者と土地を据えておられますね。自分たちのルーツを持つ。そして農耕時代になって定住する。死者と土地を共通の財産として持つ集団の発生が戦争の起源だと仰って。動物は死者を持たないが、我々は、言葉を獲得したことで死者を持つようになったと考えられませんか？

山極

狩猟採集民たちは死者の名前を保存しません。埋葬もせず、森の奥に捨て置いたり、鳥葬したり。なぜかという移動して行くから。だから、言葉として記憶が残る範囲は4世代ほどです。墓というものは、その土地に祖先が足を踏み入れてから延々と続いた伝統を示すもの。その土地に住み着いている人々は、祖先たちが眠っている共通の墓地を持っていて、祖先を礼賛する儀礼もありますね。

小川

死者という、もう目の前にいなかった人について冗舌に語れることも言葉を持つ人間の特徴ですね。私たちは、うわさ話が好きですね。その場にはいない人の話をするのがなぜか楽しい。目の前にいない、去っていった人、死んでしまった人について、あたかも今ここにいるかのように語る。それが物語の力で、それがどこかで捻れると、この墓を守らなくてはならないと、隣の土地の人を敵対関係で捉えてしまうのでしょうか。

永田

自分たちの祖先や死者は、既にこの世界にはいないけれど、物語として思い描くことができるのは、言葉の持つ大きな力ですね。

小川

子供の頃、お盆にナスとキュウリに割り箸を刺して馬と牛をつくったことを強烈に覚えています。今日は、本当に死者がやって来る日なんだと言って火を焚いて、来る時には馬に乗って早く来て欲しい、帰る時には牛に乗ってゆっくり帰って欲しいとお迎えした。この世は、生きてる人だけで成り立ってるわけではないと知った原点です。そのような死者との関係が、現代では失われつつあるのかもしれない。

## 5. 曖昧さを抱えらる科学を

永田

科学は厳密を求め曖昧を排除します。しかし、日常的には曖昧さが人と人との間を取っていることは明らかで、この曖昧さとは何かを説明することはとても難しい。曖昧さや間は、小説を書かれる時にも大事なところかと思います。

小川

言葉は、所詮、人間の都合でつくられたもので、人間とは何かというような根本的な問題を説明できるような道具ではありません。しかし、その言葉で敢えて物語をつくろうとしているのは、時に、残酷で耐え難くもある現実の中で、本を開くと、もう一つの世界にひととき避難することができる。人類が途切れることなく物語をつくり続けてきたのは、そのような心の寛容さを育ててくれる言葉が持つ曖昧さのゆえかと思います。

今日の鼎談の前に生命誌研究館を見学して、クモの研究をされてる方のお話を伺ったら、なぜこれを研究対象に選んだか自分でもわからないのですって仰ったんですね。何か美しいものがそこにあったんですという風に。とても科学者と思えない発言をされて(笑)。そんな風に、自分でも訳がわからないままつき動かされているという感じに共感しました。

永田

短歌もそうですが、曖昧さを認識できないと文学にならないだろうと思います。その真逆が、今、話題の生成AIで、これは確率で言葉を選んで並べます。

小川

最初に私の担当になった編集者が「男はトレンチコートの裾を翻して去っていった」というような文章は絶対に書いてはいけないと言っていたのを覚えています。こう書けば大

勢の人と共有できるという楽な道へ行くと袋小路に入ってしまう。だから使い古された言葉には敏感になります。辞書に載ってない言葉の意味の奥底まで、熊という言葉のない、黒い大きなものであった時代まで下りていかないと、本当の表現は見出せない。書くのに時間がかかるわけです。ストーリーやキャラクターを考えるとということではなく、描写に時間が掛かるのです。





山極

屋久島に山尾三省という2001年に亡くなった詩人がいて『アニミズムという希望』という本を1999年に書かれてるんですよ。古くからの知人で、彼によれば、現代のアニミズムとは、自分が好きなもの、敬意を払えるもの、それらはすべてカミだと。漢字の神じゃなくて片仮名のカミ。それを見つめていると自分の誠が見えてくる。恐らく、クモの研究者もご自分の誠をそこに見ている。私もゴリラを見つめていると自分の誠が見えてくる。僕は、生成AIという人工の言葉のエキスパートと会話をするよりも、人間とは異なる存在をつくってきた自然と向かい合うことが大事だと思います。言葉を使い始めた人間は、自然と会話することを忘れてしまった。自然界はすべてアナログでできています。自然と向かい合い自分の誠を見る。それは生きる力を与えてくれるはずです。

小川

人間には自然からしか学べないことがあると山極さんは仰っていますね。

山極

自然は未知の事柄でいっぱいです。科学は曖昧さを許さない。自然は許してくれます。曖昧なうちにわかる、間を含めてわかる必要があるんです。自然とのつき合い方は、曖昧さを前提にわかり合うか、機先を制するかというコミュニケーションです。最近では、地面の下で、異種の植物の根同士がバクテリアの循環でお互いの栄養を分け合っていることがわかっていますが、これまでは異種の植物同士は競合していると考えられていた。でも助け合っている面があることがだんだんわかってきた。ある時は競争しながら、ある時は分かち合いながら。お互いを根絶やしにしないのが自然の姿で、そこに、厳密さを要求する科学では切り取れない部分があると思いますね。

## 6. 生命を奥底から紡ぎ出すもの

永田

早いもので、そろそろお開きの時間となってしまいましたが、最初の山極さんの講演で、小川さんと私に投げかけられた質問に、まだお答えできていません。小川さんいかがでしょうか。「物語はいのちをどう変えたか？」難しい質問ですね。

小川

少しでも死ぬのが怖くないように人間は物語をつくっているのかな。死んだら優しい天使のようなものが空へ運んでいってくれるというような物語をつくることで、少しでも死の恐怖を和らげようとしている。限りあるいのちが、死んだ時に途切れるのではなく、死後の世界にも、自分が生まれる前の世界にもつながってるんだというように、いのちの尺を伸ばしてくれる、そういう役割を物語は果たしていると思います。また「物語は私たちをどこへ導こうとしているのか」という質問については、逆に、物語なしに人間は生きられない。真実の世界だけでは息苦しくなってしまう。時に嘘も混じった、理屈の通らないような曖昧さの中に身を置くことを、物語は許してくれると思います。

永田

ただ、物語を書いている時、そのように意識していませんよね。

小川

書いてる時はその世界に入り込んで、登場人物たちを観察して、追いかけていくので精いっぱい。でも彼らを操っているわけではなく、自分は物陰から彼らの様子をじっと伺っているという感じ。書くというより、イメージの中の世界を見ている時間のほうが長い気がします。

永田

短歌というのは五七五七七と定型があるので必ず終点がある。でも小説はどこで終わるかという決まりはありませんね。

小川

これは、物語のほうが終わるんです。あ、このお話はここで終わろうとしているということを、向こうから私に合図を送ってくれます。

永田

やはり以前、詩人に聞いた時もそう言ってました。次は、山極さんから私への質問で「言葉の基調は音楽ではないか?」。実感としてその通りだと思います。皆さんもいろいろな短歌を記憶しておられると思いますが、リズムも型もない、何の音韻も踏まない書き言葉は覚えられないでしょう。我々歌人は、少なくとも何千首かの短歌は出てきます。自然に言葉が出てくる。これは言葉にリズムと抑揚と音韻があるからで、五七五七七という定型がリズムを生み出してる。単に1つ1つの語が並んでいるのではない。言葉の本質はそういうところにあると思います。もう1つの質問は「生命の本質はリズムか?」。我々、地球上の生命体は、1日の時間を自ら刻む概日時計というしくみを体内に備えています。細胞レベルで1日の周期を制御しています。太陽の光を手掛かりに生体のリズムが1日24時間でうまく回るように調節しているのです。例えば実験でマウスを暗闇の中へ長らく置いておくと、周期がズレてうつになったりします。



山極

一生という時間は生きものによって違いますね。そもそも時間はリズムの積算ですからパターンはそれぞれ違って、リズムを基調としながら多様な現象を自ら紡ぎ出している存在が生命なのではないかと思います。

永田

多様な生命の時間の基底にリズムがある。生命にとってリズムが大事であることは間違いありませんね。最後に小川さん、今日はいかがでしたでしょうか。

小川

お二人の著名な科学者に挟まれて、私がどれほど緊張していたかおわかりいただけたかと思いますが、どうにかお二人に助けていただき自由にしゃべることができました。ありがとうございました。

写真：川本聖哉



対談のダイジェストはこちら

※この記事は、2023年9月30日(土)に、JT生命誌研究館の創立30周年記念として開催されたシンポジウム「生命誌から生命科学の明日を拓くIV」の内容を、季刊「生命誌」の記事としてまとめたものです。



#### 山極壽一（やまぎわ・じゅいち）

1952年東京都生まれ。京都大学理学部卒。理学博士。京都大学大学院理学研究科助教授、同教授、同研究科長・理学部長を経て、第26代京都大学総長。人類進化論専攻。日本霊長類学会会長、国際霊長類学会会長、日本学術会議会長歴任。南方熊楠賞、アカデミア賞受賞。『人生で大事なことはみんなゴリラから教わった』など著書多数。



#### 小川洋子（おがわ・ようこ）

1962年岡山市生まれ。早稲田大学第一文学部文芸科卒。1988年「揚羽蝶が壊れる時」で海燕新人文学賞を受賞してデビュー。主な著書『妊娠カレンダー』、『博士の愛した数式』、『密やかな結晶』、『ことり』、『掌に眠る舞台』など。最新刊はエッセイ集『からだの美』（文藝春秋社刊）。

# ゲノムが紡ぐ 生きものの個性と関係性



生命誌研究のさらなる展開を見据え、公開シンポジウムを開催しました。近年、飛躍的に発展したゲノム解析技術を駆使し、分子・細胞から進化・生態系まで、独創的な研究を行う8名の研究者がJT生命誌研究館に集い、プレゼンテーションとディスカッションを繰り広げました。「座談会」で交わされた研究者の声を伝えます。

## CHAPTER

1. はじめに
2. 壇上座談会 前半  
(小田広樹 × 河野暢明 × 秋山-小田康子 × 古澤力)
3. 壇上座談会 後半  
(市橋伯一 × 藤原晴彦 × 尾崎克久 × 吉田聡子)
4. 研究館のラボを率いる2名より

## SPEAKER



**小田広樹**  
JT生命誌研究館



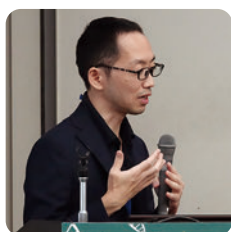
**河野暢明**  
慶應義塾大学



**秋山-小田康子**  
JT生命誌研究館



**古澤力**  
理化学研究所／東京大学



**市橋伯一**  
東京大学



**尾崎克久**  
JT生命誌研究館



**藤原晴彦**  
東京大学名誉教授



**吉田聡子**  
奈良先端科学技術大学院大学

# 1. はじめに

近年、飛躍的に発展したゲノム解析技術を駆使して、分子、細胞から進化、生態系まで、独創的な研究を展開する8名の若手研究者が集い、プレゼンテーションとディスカッションを繰り広げました。本項では、講演後の「座談会」で交わされた研究者それぞれの「声」を伝えます。生きもの研究の明日をつくる仲間への熱い呼びかけです。

本シンポジウム開催への思いを込めた一文です。

生命誌30年、はじめは遺伝子の構造とはたらきが垣間見えてきた頃。  
今、ゲノムの情報を得ようと思えば得られる時代、どんな生物種であっても。  
色々な生きもののゲノムが読まれれば読まれるほど、生きものがそれぞれ違うのだ、  
と知らされる。

ゲノムに基づいた発展で、違いを挙げ連ねることは簡単になった。

しかし、違いを理解することは難しい。

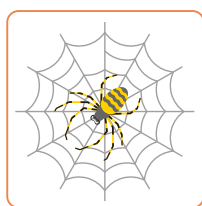
「違い」は個性を生み、関係性を育む。

数学、物理学、化学、工学など、あらゆる学問を総動員して、「違い」を深く理解したいと思う。

その先に、生きものの本当の面白さが見えてくる。

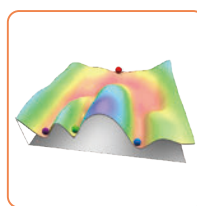
JT生命誌研究館 小田広樹

講演当日の一部をYouTubeでご覧になれます。



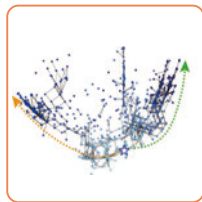
**動物の道具を  
人間が借りるには**

河野暢明  
慶應義塾大学



**実験室で進化を  
観察する**

古澤力  
理化学研究所／東京大学



**進化実験が  
分子生態系を生み出した**

市橋伯一  
東京大学



**メスだけが擬態する  
アゲハの不思議**

藤原晴彦  
東京大学名誉教授



**アゲハチョウ：  
親の好き嫌いの子の事情**

尾崎克久  
JT生命誌研究館



## 2. 壇上座談会 前半

(小田広樹 × 河野暢明 × 秋山-小田康子 × 古澤力)



小田



それではここから壇上談話会ということでちょっと趣向を変えまして、講演者の方に今日のご自身の研究への向き合い方についてお話しいただきたいと思っています。

### Q1. 研究で楽しかったこと

小田

これまでの研究の中で皆さんが一番わくわくしたのはどんな時でしょうか。例えば、何かを発見したり、思いついた瞬間などありますか。

河野

今日のお話で言えば、ゲノムからクモ糸の遺伝子の全長配列を探すのですが、長さが10キロベース程あり、シーケンサー \*で一度に読めるギリギリの長さです。そうすると、配列の最初の頭だけ、端のお尻だけの断片的なデータしか取れないこともしょっちゅうで、トライアンドエラーを繰り返して、ついに頭からお尻まできれいに収まったデータが取れた時は一番興奮しました。

\*シーケンサー…塩基配列を読み出すことができる解析装置のこと。



小田 それからだんだん研究が進んできて、今はもうその発見に慣れてしまった感じですか。

河野 刺激に慣れてしまったということはあるかもしれませんが。長く続けているとある程度勘が働くようになるということもあります。今はもっと長い50キロベース以上あるクモ遺伝子を探す旅に出ているんですが、そのシーケンスデータ解析をしている時は未だにワクワクしますね。

小田 続いて、秋山さん、今までで一番わくわくしたのは？

秋山-小田

やっぱりクモですね。私はクモ胚の発生が面白そうだと思ってオオヒメグモを扱い始めたのですが、初めは思うような結果が出なかったんです。当時登場したばかりのRNAi\*を知って、ショウジョウバエや脊椎動物で背腹の軸を決めるときに働いている遺伝子のノックダウンをクモで試してみたら、絶対何か起こっていると期待できるような形態変化が見られました。その時は「クモを使ってすごいことが見える！この研究を続けていいんだ。」と興奮しました。



\*RNAi…タンパク質機能を解析のために、遺伝子発現をノックダウンする手法

小田 ちょうどあれは2004年でしたね。僕がナメクジウオの採集で中国に行って研究室を留守にしていたのですが、電話でその連絡を受けました。

秋山-小田

そうですね。ちょうど小田さんが出張でいない上に学生さんも誰もいなくて、実験室に一人だったのを覚えています。たまたまいた技術員さんになかなかその感動を伝えられず一人で胸を躍らせていました。今思い返すと全く新しい機能解析という技術を用いて、クモの性質とマッチした実験スタイルが組める可能性という、うまく言葉にできないような未来が広がった瞬間に私は感動していたんだと思います。

小田 次は古澤さん、進化実験の研究を続けてきた中で一番ワクワクする瞬間は何ですか。

古澤 私は理論研究の人間なので、頭の中で因果関係を切り出せた瞬間がすごく好きでした。人間はコンピューターの中にある沢山のデータから、高次元のデータをダイレクトに見ることはできません。3次元までしか把握できない。大腸菌を用いた実際の実験で得た何千もの遺伝子の発現量や配列の変化を含むデータの中から、適応能力の進化のルールを示唆する関係性を見出すためには、複雑な高次元データの果てしない選択肢の中

からなんとか上手い切り口を探り当てなくてはなりません、それが「わかった!」となる瞬間が好きですね。

**小田** コンピューター上でデータを集めている最中には面白くないですね。

**古澤** データを集めている最中はあまり面白くないのですが、進化実験はどんな結果が出るか全く分からないので、まず進化させてみようとして手をつけてみます。そうして出てきた沢山のデータから見える切り口を探すことは私にとってはかけがえのない面白さです。



## Q2. もしも、こんな技術があったら

**小田** 次の質問ですが、現在の技術では難しいけれど今の時代からさらに技術が進んで、いざれできるようになったら是非挑戦してみたいという実験や、解析はありますか。

**河野** 実現はそう遠くないと思っはいますが、やはりクモの遺伝子はしっかり解析できるようになるといいなと思っています。今CRISPR\*という技術の登場により、かなりゲノム編集が簡単にできる生きものもいるんですけども、なかなか導入がするのが難しい生きものも多くいます。近い将来、それを難なくクモなどにも使えるようになったらいいですね。

もう1つは、これも実現は近いと思いますが、タンパク質や化合物を特定するシーケンサーが欲しいです。現在のナノポアシーケンサーは膜タンパク質を通過する物質の大きさや形によって、流れる電極のパターンを検出して4種類の塩基ATCGを分別する仕組みです。最近ではアミノ酸の20種類でも分別できるようになってきて、タンパク質のシーケンスも簡単にできると考えています。さらに、現在の質量分析のような技術を超えて、いろいろな物質を特定できる技術革新を期待しています。

\*CRISPR…ゲノム編集ツール

**小田** 勉強になります。クモのCRISPRなど、私たちも同じ悩みを抱えています。実験室の飼育でクモの世代を回せてはいますが、いざ卵に何か操作をして、それを親に育てて、また次の世代を見るころがまだ難しいですね。もしクモにゲノム編集が容易にできるようになれば、違う世界が広がると私たちも思っています。続きまして秋山さん、どうですか。



秋山-  
小田

汎用性のある技術ではありませんが、私はコンピューターや数学にあまり精通しておらず純粋に生物学の出身なので、多細胞生物やそのパターンについて数学などを取り入れた研究をより積極的に行いたいと思っています。もちろん、既にそのような研究をされている方もたくさんいますが、生物学においてもそれらを取り入れて、よりエレガントに洗練された研究ができると良いかと常に考えています。

小田

われわれのラボとしてもやはり生物に起こる現象を、最終的には数学的に説明できるようになることが一番重要ではないかと思ってやっています。次に、古澤さんはどうでしょうか。

古澤

この先、人類が地球外生物を見つける技術をつくるのか、生命をつくる理論をつくるのか、どちらかのうまい切り口を求めています。最近、共同研究やプロジェクトが始まって、今、アストロバイオロジー(宇宙生物学)のプロジェクトに関わっているんですが、現在、エンケラドゥス\*や火星から質量分析のデータを取り、そこにどのような物質が存在するかが分かりました。そのデータからどんな生物がいたのか、ちょっと考えてみて、って言われたんですよ。なかなか面白いテーマですけど、どうやってアプローチすればいいかなと悩んでいるところです。

今は機械学習を使うと、実現可能な全ての化学反応を羅列するようなことができます。実測された物質で、うまく代謝が回るようなネットワークや構造の予測を積み上げていくと、地球上の生物にとらわれない「生きているとはどういうことか」というところに最終的に到達できると、個人的には期待しています。

\*エンケラドゥス…土星の第2衛星

小田

なかなかスケールの大きい話ですね。地球外生物の探索というような、誰もが夢とロマンを感じるテーマに対して生命科学がうまく糸口を提供できれば素晴らしいと思います。

### Q3. 若い人に一言お願いします

小田

それでは最後に皆さんに、今の研究者やこれから研究者を目指す人に向けて一言お願いします。

河野

あんまり流行りに飛びつかないほうがいいですね。本当に自分の興味や好奇心という軸を持てるようなところをまず鍛えて、その後で何が好きなのかを見極めてほしい。流される勉強はしないほうが良いと思います。

秋山-  
小田

本当に自分のわくわくすることは何かなっていうことを、真剣に考えて欲しいと思います。他の人と共有できる部分との兼ね合いもあるけど、それ以上に昼夜問わず自分がずっと取り組めそうなことを見つけられたら、それが幸せなんだろうなって思ったりしています。

古澤

学生には、好きなことをいろいろやればいいと言っています。世界をきちんと眺められる人になってほしいと思って指導しています。あとは50年後ぐらいまで引用されるような論文を書けるようになることは大事だと思います。

壇上座談会 前半はYouTubeでご覧になれます。

JT生命誌研究館 30周年 公開シンポジウム

小田広樹  
JT生命誌研究館

河野暢明  
慶應義塾大学

秋山-小田康子  
JT生命誌研究館

古澤力  
理化学研究所/東京大学

壇上談話会01

ゲノムが紡ぐ  
生きものの  
個性と関係性  
＜分子・細胞から種・生態系に広がる世界＞



## 2. 壇上座談会 後半

(市橋伯一 × 藤原晴彦 × 尾崎克久 × 吉田聡子)



尾崎



皆さん何聞かれるんだろうってすごく緊張していらっしやいましたけど、あくまでも談話会という、皆さんの人柄が見えるような場にしたいと思ってます。怖い質問は出ないはずで  
す。(笑)

### Q1. 研究で楽しかったこと

尾崎

本日は皆さんとても興味深い講演をしてくださりありがとうございました。まず初めに、普段行っている研究の中でここが楽しいっていうところがあったら教えていただけますか。

市橋

僕は進化を一から観察してみたくて、RNAという、遺伝情報をもつ物質だけを繰り返して自己複製させるシンプルな実験系を作りました。RNAの振る舞いやそこに書かれた遺伝情報がどのように変化してくるのかをみています。かなり自分の研究室に特異的な話になりますが、やはり進化実験をやっているので、MEGAという系統解析ツールを使って、PCの画面上で遺伝情報を示す塩基配列の変異を自分で探している時が一番楽しいです。そこにどんな進化の兆しがあるのか想像するとワクワクします。



尾崎

配列解析をするときの、ずらっと並んだATGCの配列の違いを探している時ですよ。原因遺伝子を見つけたときの嬉しい気持ちはわかります。続きまして、藤原さんは今までの研究生活の中で、わくわくしたことはありますか。

藤原

難しい質問ですね。自分自身が実験するっていうのは、50歳以降はあんまりなくなって学生や研究員と話をしながら進めることが多いのですが、一番楽しいのは、現場で実験を進めている学生や研究員と話して、全く予想していなかったことを聞いたときです。例えば昆虫の性を決定する因子として知られていた

*dsx*という遺伝子が、たった一つでチョウの翅の模様を「擬態型」から「非擬態型」にする働きももつことがわかりました。こういう話を聞いた時は、自分で発見した時と同じくらい嬉しいです。



尾崎

コミュニケーションをとることは大事だと思います。その分野に造詣が深いからこそ、他の意見がスツと刺さることってありますよね。次は吉田さんですが、普段されている研究の中で一番楽しい瞬間はありますか。

吉田

私の扱っている寄生植物の研究では何万という変異体のスクリーニングをやります。大量のゲノム情報を読んだだけでは、その結果から何がわかるのかがわからないことが多くその都度壁に当たります。それを何万回と繰り返していく中で、ものすごく綺麗な表現型の変異体を見つけたときや全く予想しなかった新しい遺伝子に出会った瞬間は、今までの苦労が報われて霧が晴れたような気分になります。



## Q2. もしも、こんな技術があったら

尾崎

もし何も制約がなく、自由にやりたいことをやれるとしたら、何をしますか？私の場合、生物でも植物でも構いませんが、ある場所に完全なシミュレーションを作りたいと思っています。現在は昆虫と植物の関係について研究していますが、昆虫や植物だけでなく、捕食者や病原菌など、さまざまな生物同士の関係やネットワークが存在すると考えています。もし、このような生物の活動を完全にシミュレーションできたら、過去を見たり未来を予測したりすることができて楽しいだろうと思います。ただし、現在の技術では不可能

です。もし原因や進化の仕組みを実験で証明できるようになれば、素晴らしいと思います。個人的には、そういったことを実現できたら嬉しいです。制約がない場合、どんな研究をしたいですか。

市橋

今の尾崎先生のお話はもう1個新しい世界をつかってそこで実際に観測するということですね。

尾崎

はい。言ってしまうともう1個、コンピューターの中に1個地球をつくってしまいたいなと。

市橋

僕は本当にお金があるんだったら、地球の反対側辺りにもう1個地球を作りたいです。ドラえもんに「地球創生セット」という似たような道具がありました。僕は生命誕生から見たいと思います。

尾崎

面白いですね、藤原さんは制限のないあらゆるリソースを使えたら解明したい事がありますか。

藤原

そんな大きなことは言えませんが、今日の擬態ということに関して言うと、モデルとなる種と擬態する種とでは表現型は似ているけれど、全然違うシステムでそれを実現しているんですね。例えば同じ白い色の模様でも物質自体が違うものを使っているの、最終的に収斂進化はどのように起こるのか、その仕組みの全てを知りたいです。

尾崎

僕も似た模様の蝶なのにゲノム上では全然異なっている擬態の収斂進化は興味深いところです。吉田さんは実現したいことはありますか。

吉田

難しい質問だと思うんですけど、寄生植物の中でいうと、今の疑問は寄生植物には結構エンドパラサイト\*みたいな宿主の中でずっと過ごしている種がいます。ラフレシアなどもそうなのですが最後に花だけポーンって出るような。他の植物の中で過ごすってどういことなんだろうということを解明したいなって思っています。

\*エンドパラサイト(endoparasite)…宿主の内臓や組織に生息する寄生者

尾崎

寄生する生物って、宿主内で何が起きているのか不思議ですよ。生育条件を変えることなく、中で何が起きているのか丸ごとわかれば良いなと思います。

### Q3. 若い人に一言お願いします

尾崎

それでは最後に皆さんに、今の研究者やこれから研究者を目指す人に向けて一言お願いします。

市橋

僕は学生の頃、その場その場で適当に決めてそれなりにやっていっていたけど、ずっとすごく退屈していました。何かしたいと思いつつ、あまりすべきことも見つからなかったのですが、研究を始めたらずごく退屈がなくなったんで、もし研究を始めるか迷っているなら、すぐに研究を始めてみてください。

藤原

僕は若い頃、研究者になるつもりはなかったんですよ。銀行に行こうかと考えていた時期もあって(笑)。成り行きかもしれないけど、僕には少し外れた道の方が合っていて今まで研究者を続けてこれました。そういう生き方もあるということを伝えたいです。

吉田

学生さんには一人の研究者としての主体性をしっかり持って欲しく思います。言われたからやるのではなく自分がやりたいことをやる。最終的にはその研究者の持つ切り口でどんどん進んでいくと思うので、やりたいようにやればいいんじゃないかなと考えていて、一人の研究者として研究を面白く思って欲しいです。

尾崎

皆さん控えめなので成り行き任せなどの言葉しか出ないのですが、その都度適切な選択をしてこられたってことだと思います。恐らく研究を楽しんでいらしたので、頑張ったとか苦労したんだとかそういう気持ちではなく、成り行き任せでうまくいったみたいにしてるんじゃないかなと個人的には感じました。

壇上座談会 後半はYouTubeでご覧になれます。



JT生命誌研究館 30周年 公開シンポジウム

市橋伯一  
東京大学

尾崎克久  
JT生命誌研究館

藤原晴彦  
東京大学名誉教授

吉田聡子  
奈良先端科学技術大学院大学

ゲノムが紡ぐ  
生きものの  
個性と関係性  
＜分子・細胞から種・生態系に広がる世界＞

壇上談話会02

**小田広樹 室長**

(細胞・発生・進化研究室)



JT生命誌研究館の設立は1993年、私が大学院生として研究を始めた時期と重なります。その頃生命科学は期待感に満ち溢れていました。それから30年、生命科学は想像をはるかに超えて発展しましたが、その一方で、研究活動の中でワクワク感をもつことが難しくなっているのではないかと危惧します。今回のシンポジウムでは、生きものの仕組みを理解する研究において、本質的に重要な、多様な未開の地が広がっていることを確認したいと思いました。そして、ワクワクしながら、そういう未開の地を切り開く研究者がいることを知ってもらいたいと思いました。私自身のことと言えば、今も毎日ワクワクしています。研究では論理的思考が求められますが、大きな仕事につながる最初の最初は直感と行動力が大事だと思います。カドヘリンドメインのない“カドヘリン(?)”を見つけた時にその思いを強くしました。生きものの仕組みは人間の想像を超えています。実際に行動を起こし続けて、眼前でふとUnexpectedな発見の芽が認められたときには興奮します。

**尾崎克久 室長**

(昆虫食性進化研究室)



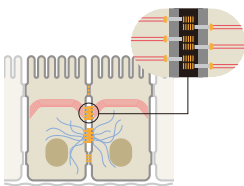
研究対象の生物のゲノムを読んで大量のデータを手に入れて、一気にいろんな事が解るぞ!とワクワクしたのもつかの間、こんなにも解らないことだらけなのかと分厚い壁にぶち当たります。私個人の主観ですが、現状はゲノム配列が読まれたことによって体ができあがるまでについては一気に理解が進むのに対して、体ができあがって生まれた後にどのように【生きている】のかは解らないことだらけです。この問題を解決するため、機械学習を研究に取り入れたり様々な工夫を行っていますが、問題を解決しようと悩みながら挑戦している今が最も楽しい時間ですね。

壇上座談会では演者の皆さんに思いのまま語っていただきました。3人とも謙虚で、まるで成り行き任せで生きていたらなんとなく今に至ったという雰囲気のお話をされていましたが、きっとその都度適切な判断と必要な努力を沢山積み上げられてきたのだと思います。おそらく、努力を努力と感じないくらいに、問題解決の努力を楽しんでいらしたのではないのでしょうか。



#### 小田広樹 (おだ・ひろき)

専門分野は発生細胞生物学。ショウジョウバエをモデルとした細胞間接着分子カドヘリンの研究から、脊椎動物と節足動物の違いに関心を持ち、節足動物門の中で昆虫から系統的に遠く離れた動物を探す中でオオヒメグモに出会い、その胚発生に魅せられ、このクモを材料とした研究を2000年にスタート。系統的位置の重要性に加え、オオヒメグモのもつ研究遂行上便利な特性や、様々な実験技術及び数学表現との相性の良さ、得られる知識の新規性・有用性などから研究が発展した。カドヘリンの研究では、動物の系統によって分子の長さが異なり、祖先状態が長く、派生状態が短いことを見出した。動物の胚発生と細胞間をつなぐ構造の仕組みを調べることで、多細胞動物の進化の向きを説明する理論の構築を目指している。



#### ■ 研究内容

発生生物学、細胞生物学



#### 河野暢明 (このの・のぶあき)

専門分野はバイオインフォマティクス、合成生物学、ゲノム科学であり、情報と実験を組み合わせたアプローチで分子生物学研究を進めてきた。情報生物学としての研究では、オミクスデータをブラウズするウェブアプリケーションや、シーケンスデータの解析アルゴリズムの開発を行う。実験生物学では、合成生物学による微生物のゲノムデザイン原理の探求、分子生態学による一時社会寄生種アリの寄生戦略理解や、変形菌が自他を認識する分子機構の解明を目指している。近年はゲノム科学・高分子科学により、天然構造タンパク質の利活用に資するゲノム科学研究を進めている。クモが自然界で作る糸の強さを人類はまだ再現できていない。またそもそもなぜクモがこれだけ強い糸を作れるようになったのか分かっていない。こうした分子進化の背景を解明すべく、ヒトゲノムに匹敵するほど巨大なクモゲノムを決定し、新規糸遺伝子の網羅探索、クモ糸タンパク質の再現に挑んでいる。



#### ■ 研究内容

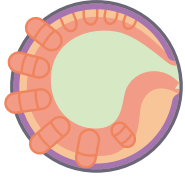
バイオインフォマティクス、合成生物学、ゲノム科学





### 秋山-小田康子 (あきやま・おだ・やすこ)

専門分野は発生生物学・分子遺伝学。卵からどうやって体ができるのか?という問いに答えたいと思い、卒業研究ではアフリカツメガエル、大学院ではショウジョウバエを対象に研究。ある時ラボに連れられてきたオオヒメグモの卵の美しさに心打たれ、これを研究しようと決意。遺伝子の発現や機能を解析するための実験系を立ち上げ、体軸形成や体節形成など胚発生の初期に起こる現象を研究してきた。球形の卵に非対称性を生み出す遺伝子の発現や細胞の動き、体節の繰り返し構造形成のための遺伝子発現の波の存在を明らかにした。次はこれらを実現する分子ネットワークがゲノムにどう書かれているのかを明らかにしたいと思う。さらに、それが進化の過程でどのように変化してきたのかを理解したいと思っている。

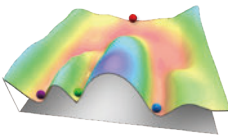


■ 研究内容  
発生生物学



### 古澤 力 (ふるさわ・ちから)

専門分野は生物物理学・普遍生物学。プリゴジンの散逸構造など、非平衡系における自己組織化現象に興味を持ち、そうした系の中で自分にとって最も面白そうな生物システムの理論研究を始める。力学系を背景とした細胞分化モデルの研究で学位取得後、実際の生物システムを触って解析したいと思い、幹細胞分野の実験研究に加わる。その後、いろいろと紆余曲折を経て、微生物の代謝システムの解析や進化研究を始める。特に微生物の進化実験を用いた解析により、進化ダイナミクスを適切に記述する方法論や、進化を予測し制御する手法の開発を進めている。理論研究と実験研究を有機的に統合することにより、生物システムが持つ普遍的な性質の理解を目指している。

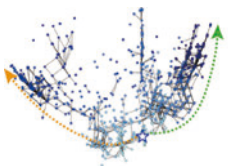


■ 研究内容  
生物物理学、理論生物学



### 市橋伯一 (いちはし・のりかず)

専門は進化合成生物学。大学院では黄色ブドウ球菌のDNA複製の研究をしていたが、あまり楽しくなくなってきたので合成生物学の研究に転向した。博士研究員のときにRNAを自己複製させて進化させることのできる実験系を開発し、それ以来、断続的にずっとRNAを進化させている。だんだん今まで起きなかった進化現象が起きようになってきて楽しい。最近はずっと天然生物に近いものを扱いたくなってきたので、DNA複製、転写、翻訳機構(要するにセントラルドグマ)を持つ自己増殖するシステムをデザインベースで作りはじめた。こうした進化とデザインによって生命みたいなものを作り出す研究によって、地球生物に限らない生命の可能性を探りたいと考えている。



■ 研究内容  
構成的システム生物学、進化合成生物学



### 尾崎克久 (おざき・かつひさ)

大学入学時は花の研究をするつもりでいたが、昆虫学の講義が面白すぎて、その先生の指導を受けた。昆虫学研究室に所属。研究を通じて、戦後に日本に持ち込まれた昆虫「アメリカシロヒトリ」が数十年で日本の環境に適応して生物カレンダーを変化させたことを目の当たりにし、生物が環境と関わり合いながら命を紡ぐ様子を深く知りたくなった。農水省時代に、植物病原性のカビがウイルス感染によって病原性を失い無害化する現象の研究に携わり、他の生物の存在こそが最も重要な“環境”であると考えた。吉川寛元顧問よりアゲハチョウを扱う研究室の創設にお誘い頂き、まさに取り組みたいと考えていた課題であると直感した。アゲハチョウを研究材料として、植物とどのように関わり合いながら【生きている】のか理解するため、昆虫学・分子生物学・生命情報科学・機械学習などの技術を道具として取り入れ、解明に挑戦している。



■ 研究内容  
進化生物学、昆虫学



### 藤原晴彦（ふじわら・はるひこ）

専門分野は進化遺伝学・分子生物学。大学院時代は、rDNAに転移する利己的遺伝子などを研究していたが、博士終了後は一般の人が興味を持ちうる研究対象として昆虫の擬態に着目。当初はカイコ幼虫の紋様形成を研究していたが、擬態の宝庫ともいえるアゲハチョウの擬態に研究をシフトさせた。幼虫の紋様が鳥の糞型から食草型へ切り替わる現象や、蛹の体色が周囲の環境に応じて緑や茶色になる現象を長らく研究した。最近になり、ダーウィンの時代から興味を持たれていた「メスだけがベイツ型擬態をするシロオビアゲハ」の擬態の原因領域が超遺伝子であることを解明した。超遺伝子の特殊な構造と機能は今も多くの研究者が注目している。現在は大学院時代の研究とのつながりで、遺伝子治療を目指すベンチャー企業を創業し、研究指導を行っている。



#### ■ 研究内容

進化遺伝学、分子遺伝学



### 吉田聡子（よしだ・さとこ）

専門分野は植物分子生物学。植物と環境や他の生物との関わりに興味があり、シロイヌナズナの緑葉の老化やミヤコグサを用いた根粒菌や菌根菌との相互作用の研究を経て、2006年よりハマウツボ科寄生植物の寄生機構の研究を始めた。アフリカで甚大な農業被害をもたらしている寄生雑草ストライガのゲノム解析から、寄生植物が宿主植物から水平伝播によって遺伝子を得ていることを見出した。寄生の分子機構を解明するために、日本に自生する寄生植物コシオガマを用いたモデル実験系を構築し、寄生遺伝子の解析を進めている。宿主植物と維管束を連結して栄養を獲得する寄生植物が、どのように宿主を認識し、侵入し、宿主と連結するのか、寄生植物はどうやって寄生能という特殊な能力を身につけたのか、これらの疑問を解明したい。



#### ■ 研究内容

植物生理学、分子生物学

# オサムシ研究の これまでとこれから

蘇 智慧 JT生命誌研究館 系統進化研究室



JT生命誌研究館では、開館当初からオサムシの遺伝子解析研究を行なってきた。野外の昆虫を対象とした世界的なDNA調査は、日本の昆虫の分子系統進化研究の先駆けとなり、多くの成果を生んだ。私たちのオサムシ研究のこれまでとこれからの展望を紹介する。

- 
- |         |               |                |
|---------|---------------|----------------|
| CHAPTER | 1. 研究館のオサムシ研究 | 2. 大陸と共に広がった昆虫 |
|         | 3. 列島とマイマイカブリ | 4. 平行進化の発見     |
|         | 5. 静の進化と動の進化  | 6. オサムシの後翅の退化  |
|         | 7. オサムシ研究と人々  |                |
- 

## 1. 研究館のオサムシ研究

生命誌研究館(BRH)の設立当初より、大澤省三博士(BRH初代顧問)が中心となって始めたオサムシの分子系統解析研究プロジェクト。当時はオサムシのような自然中の昆虫のDNAを用いた解析はまだ行われておらず、大きなチャレンジだった。半年後の1994年4月に私が研究チームに加わり、大澤先生と二人三脚で研究を進めた。

研究の成否を左右するのは研究資料の入手だ。頼りになったのは大澤先生の「虫屋」の人脈だった。まずは近畿のオサムシ研究グループの方々がオサムシ採集の協力を約束してくれた。さらに日本全国のアマチュアの昆虫愛好家約50名へ材料採集の依頼状を送ったところ、次々とアルコール漬けのオサムシ標本が送られてきて、嬉しい悲鳴をあげた。これらの方々のご厚意に報いるために、「おさむしニュースレター」を1995年から1999年(20号)まで発行し、新しい研究結果を逐次共有した。こうしてBRHのオサムシ研究は、プロとアマチュアが共同で研究を進め、発見の喜びを分かち合う見事なモデルケースとなったのである。

1996年にフランスの大学、1997年に中国科学院、1998年には韓国の大学との共同研究を開始し、BRHのオサムシ研究の輪は着実に世界へと広がっていった。1980年代後半からPCR(DNA増幅技術)、1990年代初めからはDNA塩基配列の自動読み取り技術(オートシーケンサー)が登場し、DNA塩基配列の解析が容易になった時代の後押しもあり、我々のプロジェクトは、当時最新の解析技術を駆使した研究として時代の先端を走っていた。その技術を学ぶために、全国から学生や研

研究者、虫の愛好家らがBRHに集まった。BRHのオサムシ研究が、日本の昆虫分子系統進化研究の先駆けとなり、その基礎を作ったことは間違いないだろう。

オサムシという昆虫がどのような経緯で多様化し、世界中で美しい種を生み出したのかの一端が見えてきた。またオサムシは、進化という現象について様々な興味深い様式を見せてくれた。開館から続いてきた研究から見えてきたことを、30年の節目に振り返ってみたい。そしてオサムシ研究の今後の展望について紹介する。

## 2. 大陸の移動と共に広がったオサムシ

いわゆるオサムシは、分類学的には甲虫目(=鞘翅目)、オサムシ科、オサムシ亜科に属する昆虫で、世界各地におよそ1000種存在する(図1)。



(図1) 世界のオサムシの分布

オサムシグループは、主に北半球に分布するセダカオサムシ族とオサムシ亜族、オーストラリアの南部とニュージーランドに分布するオーストラリアオサムシ亜族、南米チリとアルゼンチンの一部に分布するチリオサムシ亜族、そして北半球から南半球にかけて最も広く分布するカタビロオサムシ亜族に分けられる。種の数ではオサムシ亜族が最も多い。

オサムシは、カブトムシなど他の甲虫類と同様、堅い前翅が体を保護する役割を担い、薄い後翅が飛ぶための役割を担う(図2)。しかし、オサムシは一部を除く全ての種が、飛ぶための後翅または飛翔筋、あるいはその両方が退化して飛べなくなっている。飛べないオサムシの中には美しく輝く前翅をもつものが多いため「歩く宝石」と呼ばれており(図3)、ヨーロッパをはじめ世界中に多くの愛好者がいる。それは我々の研究の資料集めに大いに役に立った。

### オサムシ



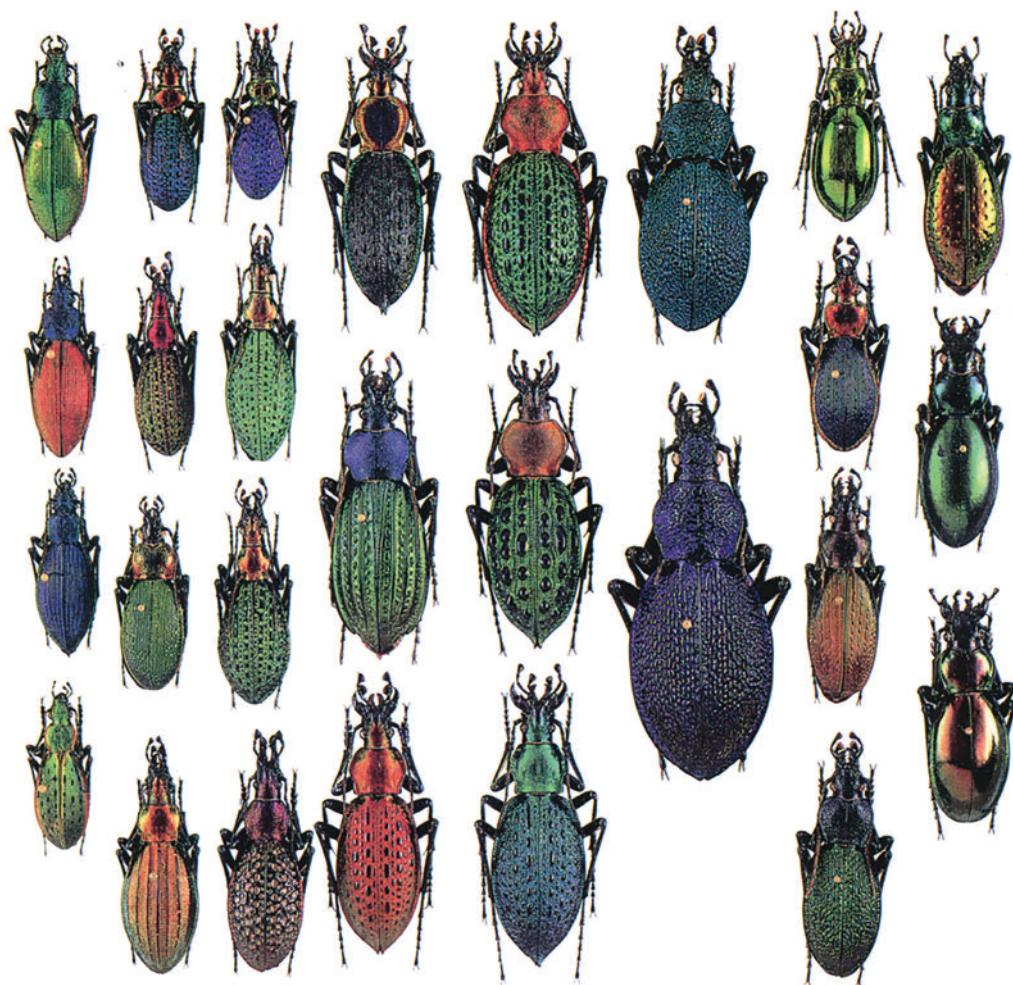
飛べない

### カブトムシ



飛べる

(図2) 飛べないオサムシ(左)と飛べるカブトムシ(右)



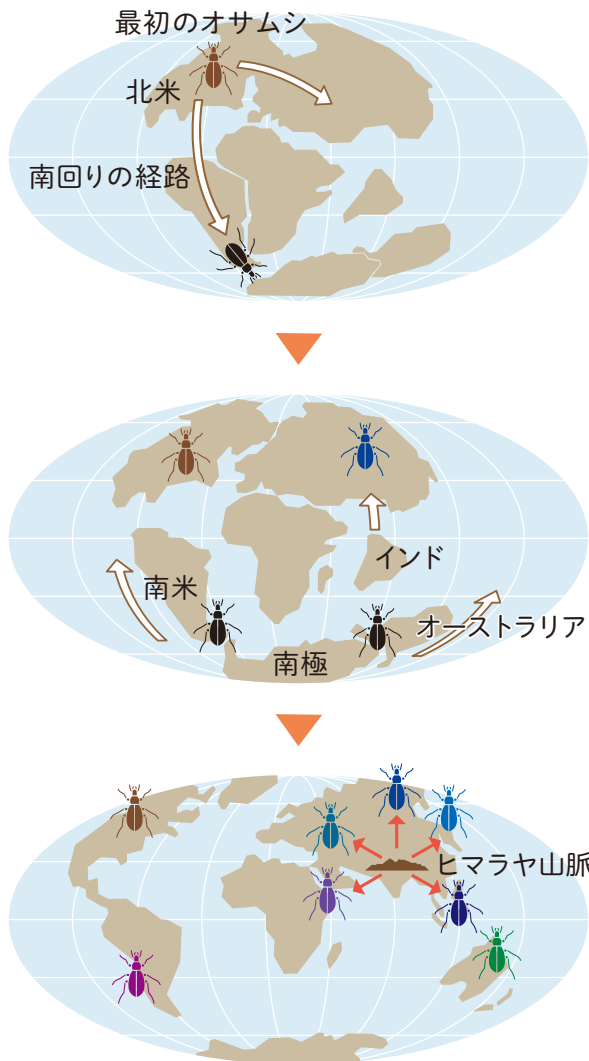
(図3) 様々な世界のオサムシ 美しい前翅をもつ種が多く「歩く宝石」と呼ばれる。

我々は世界中のオサムシのDNAを解析し、系統関係と分岐年代の推定を試みた。当時、オサムシのような小さい分類群の分子系統解析には、核DNAよりも進化速度の速いミトコンドリアDNAが適当だと考え、ND5遺伝子を使用することに決めた。乾燥標本は遺伝子の増幅が全くうまくいかなかったため、協力者からの新鮮な標本が成果につながった(Osawa, Su & Imura, 2002)。こうして、オサムシの起源と、オサムシが世界中に分布するようになった経緯を以下のように推定することができた。

オサムシの祖先は、オサムシ亜科の外群となるゴミムシ、または現在特定できないオサムシ科の一種から、おおよそ1億～9000万年前に、現在の北米かそれに近いローラシア大陸で登場したようだ(図4上)。そして8000～7000万年前、セダカオサムシ族が共通祖先から最初に分岐したとみられる。

その後、北米から南回りで、当時地続きだった南米・南極・オーストラリアへ広がったグループは、チリオサムシ亜族とオーストラリアオサムシ亜族に分かれた。2つの亜族が分岐したと推定される6000～5000万年前は、南米大陸・南極大陸・オーストラリア大陸が分裂した年代とほぼ一致している(図4中)。つまりオーストラリアオサムシ亜族とチリオサムシ亜族は、これらの大陸の分断によって集団が隔離されたことによって成立したのだろう。(南極にいたオサムシは、南極大陸がその後南に移動したことで、寒さのために絶滅したとみられる)

一方、起源地である北米から北回りで、北極圏を経由し地続きだったユーラシアに広がったグループは、約5200万年前にオサムシ亜族とカタビロオサムシ亜族に分かれた。その後、4000～3000万年前になると、2つの亜族の中で急速な種分化が始まる。このように短期間で様々な種が一斉に分化することを「一斉放散」と呼ぶ。4000万年前は、インド亜大陸がユーラシア大陸に衝突し、ヒマラヤ山脈やチベット高原が隆起した時代に相当する(図4下)。造山活動がオサムシの生息環境に大きな変化をもたらし、一斉放散の引き金になったと推測される。こうして種を増やした北半球のオサムシは、ユーラシア大陸全体に広がったのである。



### 1億年前

最初のオサムシが北米に登場し、世界中に広がる。

### 5000万年前

南米大陸、南極大陸とオーストラリア大陸の分裂によりチリオサムシとオーストラリアオサムシの系統が分かれた。インド大陸はユーラシア大陸に向かって北上する。

### 4000万年前

インド大陸が北上してユーラシア大陸に衝突することでできたヒマラヤ山脈。造山活動による環境変化が、オサムシの種類が一気に増える「一斉放散」につながった。

(図4) 地球上のオサムシの拡散・分化の歴史

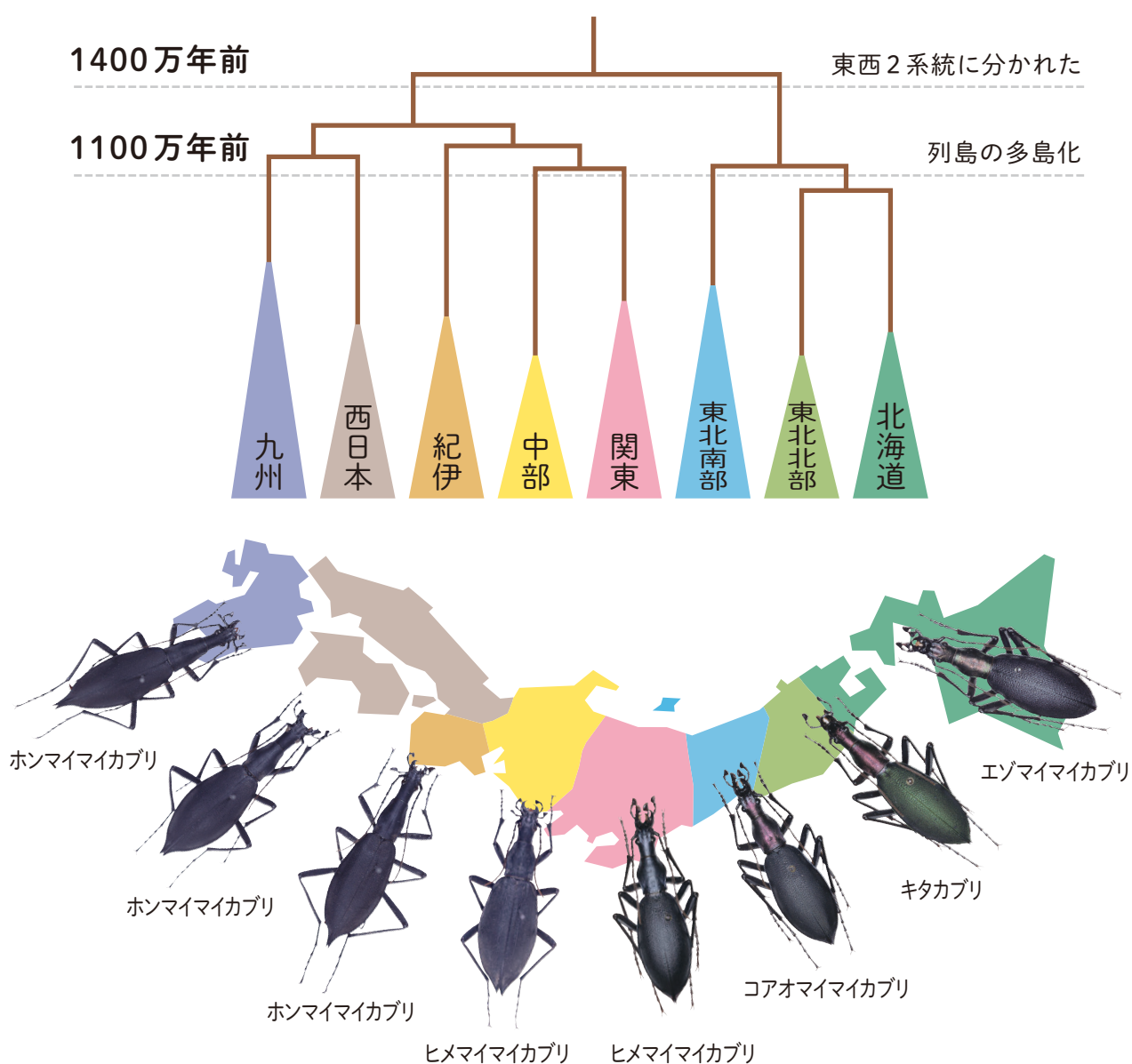
## 3. 日本列島の歴史を語るマイマイカブリ

日本にいるオサムシは、これまで全てが氷期(約200万年前以後)に日本列島に進入し、多様化したと考えられていた。しかし我々の系統解析の結果は、列島への進入経路が大きく2つのグループに分けられることを示した。

第1グループは、オオオサムシ亜属とマイマイカブリに代表されるグループで、約1500万年前、日本列島が大陸から分離する際にそこに乗っていた祖先種が、列島内で分化したと考えられる。第2グループは、ユーラシア大陸から氷期に陸橋を渡ってサハリンや千島経由で北海道に入ったグループ(アカガネオサムシ、コブスジアカガネオサムシなど)と、朝鮮半島から対馬に入ったグループ(ツシマカブリモドキなど)である。これらのオサムシは、氷期の直前に大陸やサハリンの種から分岐し、日本各地で多様化したことが系統解析の結果から推測できた。

第1グループに属するマイマイカブリの仲間について、特に興味深いことがわかった。このグループは約1500万年前にまず東西の2系統に分かれ、その後約1000万年前になると、それぞれがさらに3つと5つの亜系統に分岐している。興味深いことに、これら亜系統の分布は列島内の特定の地域に限定されている(図5)。これは日本列島が現在の姿になるまでに、まず大陸から離れて2つの半島になり、それらがさらに8つの島になる様子を写していると考えられる。まさにマイマイカブリの進化は日本列島の成り立ちを語っているようなのだ。

ちなみに、我々の最近の追加解析の結果から、西系統には、糸魚川・静岡構造線沿いにもう一つの亜系統が存在することが判明した。ここから逆算して、8つの島だった古日本列島は、実は9つの島だったのではないかと考えられるのだ。



(図5) マイマイカブリの系統・分布と日本列島の歴史



## 4. 平行進化の発見

オサムシの起源とその分布圏の成立について述べてきたが、オサムシがどのような経緯で多様化したのか、その進化の様式を知ることも研究の目的の一つである。作成した分子系統樹の枝の先にオサムシの形態の情報をのせると、進化の様子が浮かんでくる。形態の似たもの同士が必ずしも同じグループになるとは限らないことや、また、分岐してからの時間と形態的な違いの大きさが比例するとは限らないことなど、興味深い様々な進化現象を発見した。詳細は「大澤・蘇・井村、2000」を参照していただきたい。ここでは、代表的な「平行進化」の例について述べる。

進化的に離れた系統の間に似た形態が現れる現象を、平行進化と呼んだり収斂と呼んだりする。平行進化と収斂の区別は必ずしも明確でなく、同じものだという人もいる。また形態が全体的に似る場合と部分的に似る場合もある。ここでは便宜的にそれらを区別せず、すべて「平行進化」とする。

これまで、日本固有のオオオサムシ亜属や、クロナガオサムシ亜属など多くのオサムシグループから形態の平行進化の現象を発見した。ここでは一目で分かる、もっとも顕著な例の一つを紹介する。コウガオサムシ *Cathaicus brandti* とクギヌキオオズオサムシ *Eupachys glyptopterus* である(図6)。



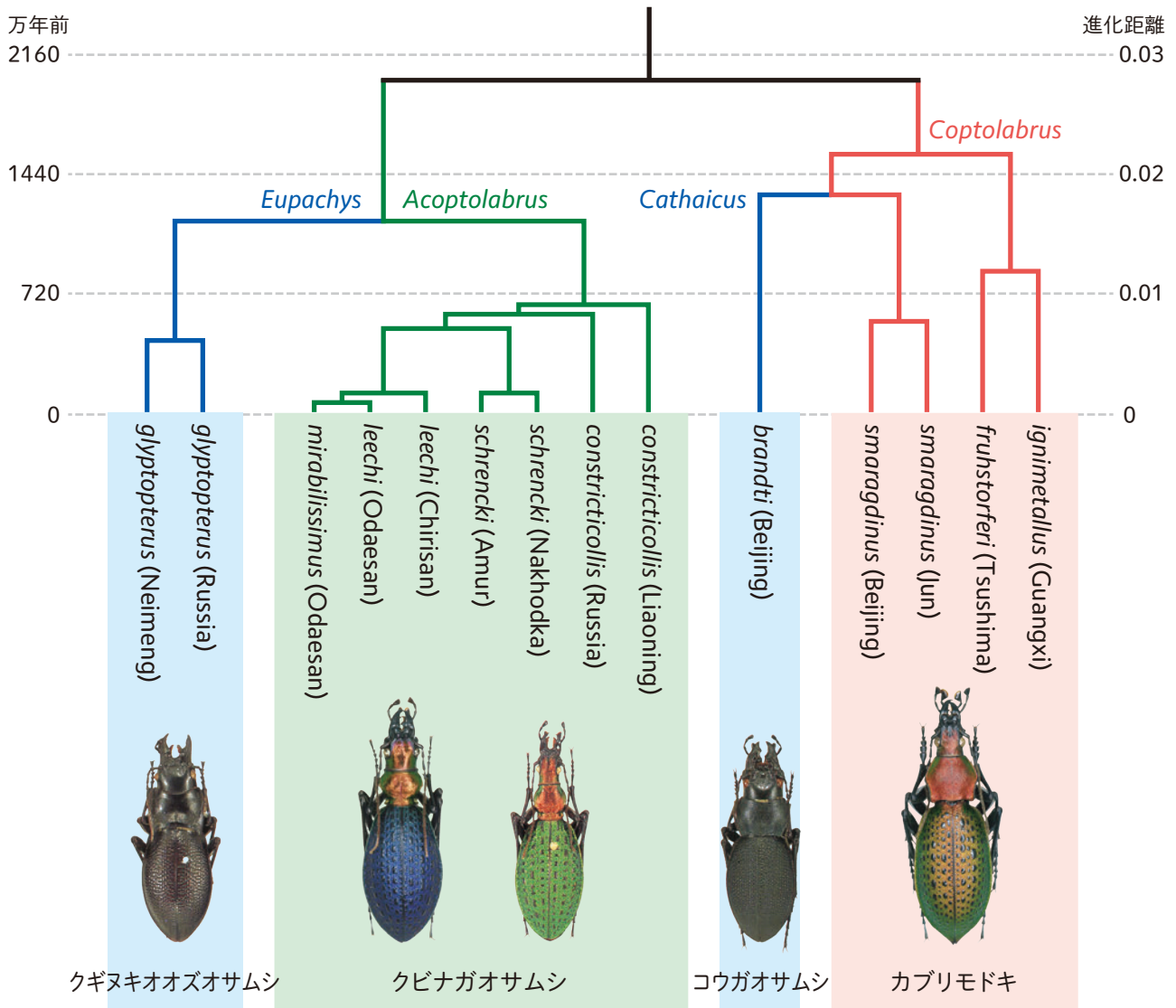
クギヌキオオズオサムシ



コウガオサムシ

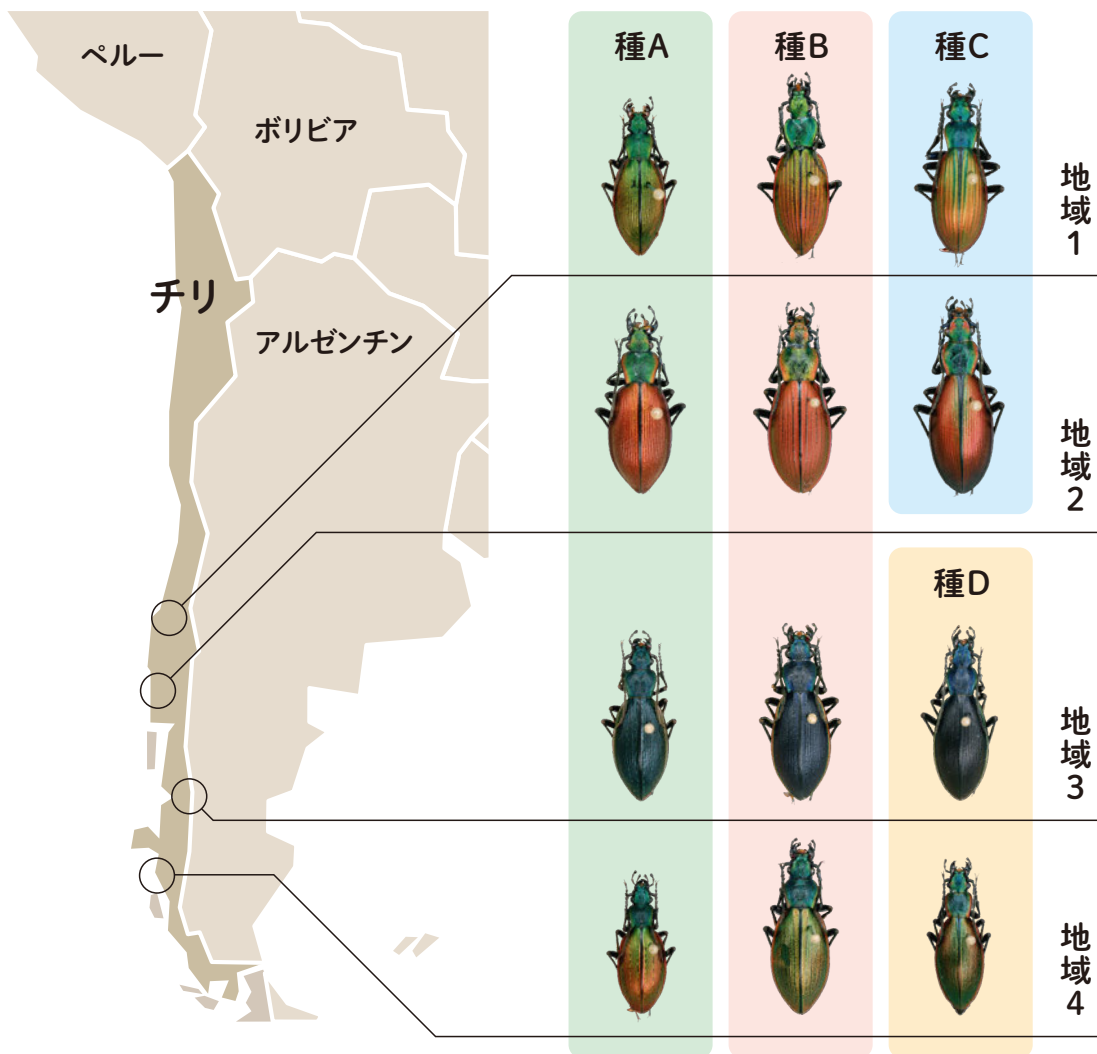
(図6) クギヌキオサムシとコウガオサムシ

2種はともに真っ黒で分厚い体の巨頭化オサムシだが、これらをヨロイオサムシ群(美しいオサムシが多いグループ)の他の種とともに系統樹に入れてみてびっくり。見た目がよく似たこの2種は姉妹関係にはなく、コウガオサムシは美麗種揃いのカブリモドキ類(*Coptolabrus*)と、クギヌキオオズオサムシはこれまた歩く宝石クビナガオサムシ類(*Acoptolabrus*)と親類なのである(図7; Su et al., 2001)。忍者顔まけの見事な変身で、離れた系統から似た形態が現れる顕著な平行進化である。



(図7) オサムシの分子系統樹から見えた平行進化

もう一つ、チリオサムシの見事な色彩の平行進化を紹介する。図8を見てほしい。この図では、縦に産地を異にする同一種を並べた。縦に並んだ種が同種とは驚きである。また、横に産地(地域1, 2, 3, 4)を同じくする別種を並べたが、色だけで判断すると横に並んだ種は同じ種としか思えない。



(図8) チリオサムシの色彩の平行進化

種A: *Ceroglossus buqueti*、種B: *C. chilensis*、種C: *C. magellanicus*、種D: *C. darwini*

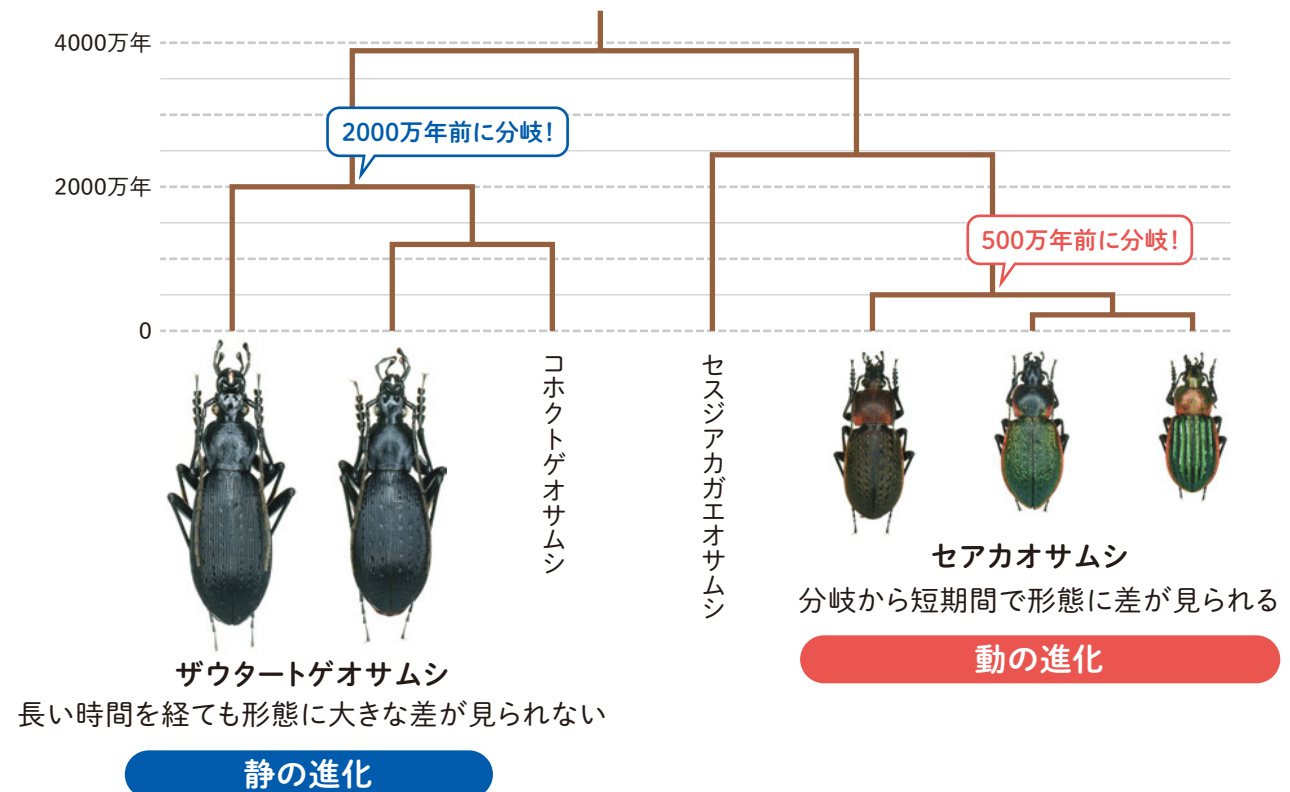
これらは、当時学校教師であった柏井伸夫さんが採集されたチリオサムシである。色彩の多様性に惑わされてしまうが、分子系統や、詳細な形態的特徴を比較すると、縦列は同じ種と同定されるのだ。それでも“ほんとかいな”と思ってしまう。また興味深いのは、別種でも同じ所でとれるものは、色も似ているという規則性があることだ。このような色彩の平行進化がどうして起きたのかは、現状客観的証拠がないので推測になるが、一つは種分化前のチリオサムシに著しい色彩の多様性があり、それが種分化後に持ち越された結果、種の区別なく、それぞれの地域に特定の色のものが配分された可能性、もう一つは、初めはランダムにそれぞれの地域に配分された種が、地域の生息環境に対する適応進化の結果、色が分かれた可能性が考えられる。いずれの場合でも、系統樹から見ると色彩の平行進化は比較的最近の出来事と推定される(Okamoto et al., 2001)。

## 5. 静の進化と動の進化

分子系統樹は客観性が高いが、もう一つ重要な点は時間が系統樹に刻まれることである。分子進化は時間に比例して変異が蓄積される、分子時計の概念が導入されている。時間の要素が系統樹に入ると、系統樹から得られる進化的情報が俄然増える。形態の進化が起きていなくても、分子進化が進んでいる(時間が進んでいる)場合や、逆に分子進化があまり進んでいなくても(時間があまり経っていなくても)、大きな形態の進化が生じたことも分かる。

世界中のオサムシの分子系統樹を描き、その枝の末端に位置するオサムシを見渡してみると、顕著な形態変化が生じている2種がごく最近に分岐していたり、逆に形態の違いが全く見られない2種がかなり昔に分岐しているなどの例を多数発見した。前者は形態進化が短期間で起きた証拠であり、後者は形態進化が長期間に渡り停滞している証拠となる。我々は前者を「動の進化」、後者を「静の進化」とした(Su et al., 2001; 大澤・蘇・井村, 2002; Osawa et al., 2016)。当然、「動の進化」と「静の進化」の時間は、相対的であり、絶対的な時間の基準は決められない。下記いくつかの例を紹介する。

「動の進化」の好例は、セアカオサムシ属 *Hemicarabus*の3種である。ヨーロッパセアカオサムシ、マックレイセアカオサムシ、セアカオサムシは一見して区別出来るほどの形態差があるが、これら3種に分岐はおよそ500万年前と、種分化としては比較的最近の出来事である(図9)。



(図9) オサムシの分子系統樹から見てきた「静の進化」と「動の進化」

「静の進化」については図9にも示したザウタートゲオサムシが好例であろう。2000万年以上前に分岐した三つの系統の間で、形態の違いが全く見られない。つまり、形態進化はおよそ2000万年にわたって停滞している。

日本国内の例を挙げると、日本固有種のアキタクロナガオサムシの進化は「動の進化」である。このオサムシはマークオサムシと近縁関係にあるが、マークオサムシから日本で約700万年前に著しい形態変化をともなって分岐している。その他にも、系統解析の結果から、国内のオサムシで、恐らく食性の適応進化によって巨頭化や狭頭化という進化が色々な分類群と地域において短期間で起きていることがわかっている。他にも、まだまだ「動の進化」「静の進化」の例をあげることができるが、ここでは割愛する。詳細は大澤・蘇・井村, 2002とOsawa et al., 2016を参照していただきたい。

形態の変わらない「静の進化」がどうして生じているのかについては、恐らくそれらのオサムシの形態形成に必要な遺伝子群に変異が起きていないということになるだろう。もっと正確にいうと、そのような変異が起きると、適応度が下がるために淘汰されるとみられる。つまりそれらの形態は、長期に渡りもっともその生息環境に適応しており、安定維持されてきたということだ。勿論、形態や機能に変化をもたらさない変異は、遺伝子やゲノム上に蓄積され続けているはずである。

## 6. オサムシの後翅の退化

後翅が退化して飛べないことはオサムシの最も大きな特徴である。それによって地理的隔離が生じやすく、種分化や種の多様化につながりやすい。オサムシを研究材料に選んだのも、そういった進化の格好の材料としての特徴を考慮したためであった。

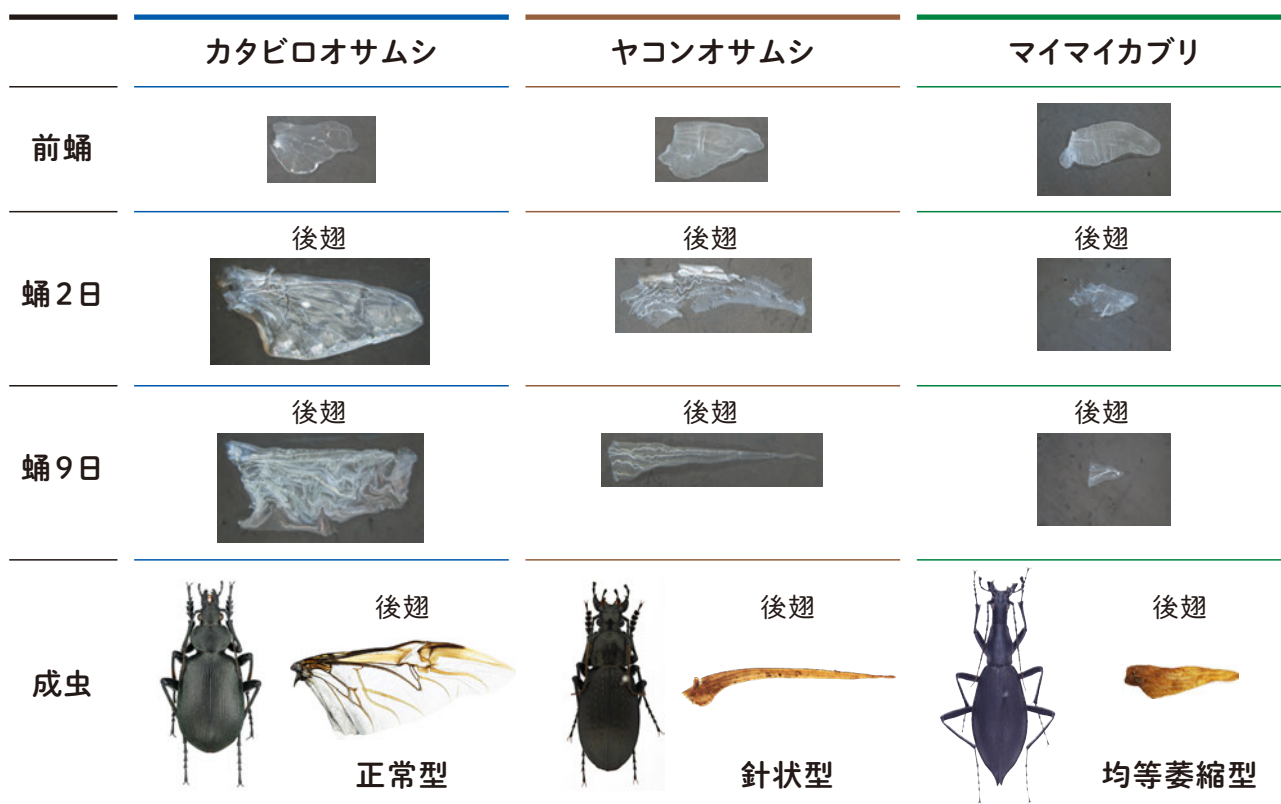
しかし、オサムシはなぜ、どのようにして後翅を無くしたのだろうか。オサムシ研究プロジェクトが開始した当初より興味深い問いの一つとして考えていた。しかし、後翅の退化的進化に関する研究は、当時の研究技術の限界で実施に至らなかったが、近年の研究技術の急速な進歩によって再開することができた。

まずオサムシ亜科内の各分類群の後翅の形態を詳細に調べることが先決であろうと考え研究を始めた。その結果、セダカオサムシ族の現存種に後翅はなく、前翅のみの2枚翅甲虫であることが判明した。一方、チリオサムシ亜族とオーストラリアオサムシ亜族では、後翅が1mmほどの短い針状に退化し、ほとんど痕跡のようなものとなっている。また、オサムシ亜族では、針状に退化したものから正常な後翅に近いものまで、退化後翅の形態が多様である。正常な後翅を持ち飛べるカタビロオサムシ亜族に、後翅が退化したものがいることが確かであることも判明した(Imura et al., 2018)。

以上の結果から、オサムシの後翅の退化は各分類群で独立に生じたと考えるのが妥当であろう。つまり、オサムシの祖先は正常な後翅をもち飛ぶことができた。カタビロオサムシの系統は飛翔機能





を維持している。飛ぶことができた祖先の系統から、セダカオサムシ族、オーストラリアオサムシ族、オサムシ亜族が順次分岐し、その後、後翅が遺伝的な要因によってそれぞれのグループで独立に退化した。その遺伝的要因を突き止めるために、本研究は正常な後翅を持つカタビロオサムシ1種と後翅の退化形態が異なる代表的なオサムシ3種を用いて、後翅退化の発生過程の解明と、飛翔機能喪失の遺伝基盤と分子機構の進化の解明を目指している。

まず、4種のオサムシの飼育法を確立し、後翅の発生過程を観察した(図10)。その結果、前蛹期の後翅原基について、サイズと形態に明白な違いは観察されなかったが、クロカタビロオサムシの正常後翅原基は翅脈がより明確であるように見えた。また、退化後翅原基の中でマイマイカブリは最も翅脈が不明瞭であった。一方、蛹期ではカタビロオサムシの後翅は発生の進行につれて、翅脈間の組織が形成され、膜の中で翅が発達するが、退化後翅は、蛹期0日目では翅組織が膜の中で一杯になっていたが、2日目では翅組織の退縮が観察された。その後、ヤコンオサムシとマイマイカブリはその退縮がどんどん進行し、特にマイマイカブリの後翅は退縮程度が激しく、4日目にはすでに痕跡のように縮まっていた。ヤコンオサムシは羽化する前に後翅がすでに針状になっていることも確認された。一方、アカガネオサムシ(北海道タイプ)は、蛹2日目に翅組織の退縮が観察されたが、その後、翅組織が形成され発達する様子も見えた。羽化後のアカガネオサムシの後翅を観察したところ、その後翅は翅前縁から半分程度の大きさで、翅脈と翅脈間の翅膜は正常にみえた。



(図10) 様々なオサムシの後翅形成過程

以上の観察結果から、後翅の退化は蛹期の発生過程において、後翅の組織が正常に形成できないだけでなく、アポトーシスによる組織の退縮も関わっていることが明らかになった。また、RNA-seq解析による翅形成関連遺伝子の発現調査を行った結果、翅形成における翅脈間細胞分化に関わる遺伝子や翅の退縮を抑制する遺伝子が、正常後翅と比べ、退化後翅では発現が減少していることが判明した(図11)。今後はさらに候補遺伝子の特定を進めるとともに、候補遺伝子の機能検証も行う予定である。

	後翅の形状	後翅を作る遺伝子	後翅退縮を抑制する遺伝子
飛べるオサムシ (正常後翅)		高発現	高発現
	カタビロオサムシ		
飛べないオサムシ (退化後翅)		低発現	低発現
	アカガネオサムシ		
		低発現	低発現
	ヤコンオサムシ		
		低発現	低発現
	マイマイカブリ		

(図11) オサムシの後翅と系統関係

発生過程の観察や網羅的な遺伝子解析により、オサムシの後翅は祖先の段階で失われたのではなく、それぞれの系統で独立に退化したことがわかってきた。

## 7. 研究に携わってくれた人々

冒頭で述べたとおり、BRHのオサムシ研究は、プロ・アマチュアも、国内外も問わず多くの人との共同作業により実現した。グループの一員であり日本のオサムシの生き字引でもある富永修さん(当時大阪府職員)は、オサムシの産地を熟知しており、必要な資料を次々と届けてくれた。DNA解析の結果を伝えると、的確なコメントと共に不足の資料が調達されて返ってくる。このキャッチボールが「おさむしニュースレター」の発行に繋がった。1996年には、「世界のオサムシ大図鑑」を完成させたばかりの井村有希さんが加わり、研究は加速的に進展した。井村さんの本業は産婦人科医だが、ほぼプロのオサムシ研究者である。欧米のオサムシサンプルは、世界中にオサムシ研究者と愛好者の知人がいる井村さんが入手してくれた。1997年に東京大学で博士学位を取得した金衝坤さんがBRH奨励研究員として研究チームに加わり、DNA解析を担当した。その後、美しいチリオサムシ

に特別な興味をもつ柏井伸夫さん(当時・宝仙学園教師)と、北海道に分布する綺麗なオサムシが好きな岡本宗裕さん(現・京都大学霊長類研究所教授)も本格的に研究チームに加わった。柏井さんは毎年チリでチョウ採集の傍オサムシも採集し、次々とチリオサムシのサンプルを届けてくれた。岡本さんは、朝鮮半島、沿海州、北海道に分布するクビナガオサムシ類のDNA解析を担当した。オサムシについてここまでたくさんの研究成果を得ることができたのは、長期で深く研究に関わってくれた方々のお陰である。



**蘇 智慧 (そ・ちけい)**

JT生命誌研究館 系統進化研究室 室長

カイコの休眠機構の研究で学位を取得しましたが、オサムシの魅力に惹かれ、進化の道へと進みました。1994年から現在に至るまで、ずっとJT生命誌研究館で研究生活を送ってきました。オサムシの系統と進化の研究から出発し、昆虫類をはじめとする節足動物の系統進化、イチジク属植物を始めとする生物の相互作用と種分化機構の研究を行っています。





# 発生生物学の静かな革命

## VOL.8 動物の形の多様性という名の変奏曲集 I 目と顔と手

近藤寿人

JT 生命誌研究館 顧問・表現ディレクター



動物の様々な形の妙には心を奪われます。そのことから、「多様性」がしばしば生物学の中で熱く議論されます。しかしその多様性を生み出す、厳然とした基礎ルールがあることが論じられることは、あまりありません。音楽に例えてみましょう。変奏曲を構成するそれぞれの変奏を聞くと、多様な表現が駆使されていて飽きることはありませんが、ある主題(長い音列、基礎パターン)の華麗な展開の集成からなっています。動物の形の多様性というのは、いわば変奏の多様性に例えられる、ある枠の中の多様性なのです。今回からしばらくは、その多様性の基礎となる主題を意識しながら、「形」という変奏を楽しみましょう。



(図1) ハラビロカマキリ(メス)。力強い大きな手を持つ。(撮影・筆者)

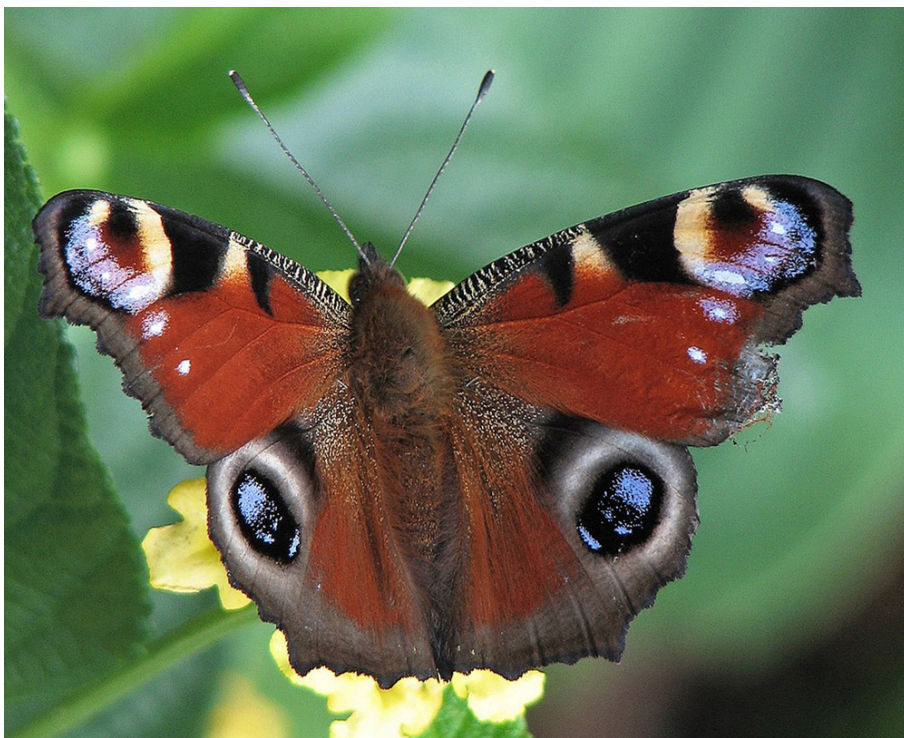
図1の写真は、先日、生命誌研究館の近くの舗装の上を歩いていたメスのハラビロカマキリです。「カマキリの顔(頭)は前から見ると逆三角形で、上辺の両側に大きな目があり、下のすぼまったところにある口に、頑丈な手で捕らえられた餌の虫が運ばれます」という文章は、多くの方に難なく受け入れられるのではないのでしょうか。このことには、私たちの体の共通性に関わる幾つかの「変奏の主題」が重なっています。

## A. 視覚情報から脳がとらえる目と顔

その一つは、私たち(少なくとも陸上の脊椎動物)には、視覚を介した情報の中から、「目、そして顔」を認識する脳の回路が、生まれながらにして備わっているらしいということです。カマキリの目も顔も、その形は人間のものとは形は似ても似つかないものです。でも、目は目と認識され、またそのことは幼児にも納得して受け入れられています(トンボの目玉は大きな目玉)。子供をハラハラワクワクさせるテレビ番組「仮面ライダー」の顔は、代々、異なった昆虫の顔を模して、人間のものとはかけ離れていても「顔」は「顔」です。

外界を認識できるようになった乳幼児は、母親の目を見つめて微笑みます。また、猿であれ熊であれ、野生の動物から逃れる時には「目を見るな」と言われます。これは人間以外の動物にも、人間と同様に「目」を視覚情報の中で認識する脳機能が備わっていることの反映です。

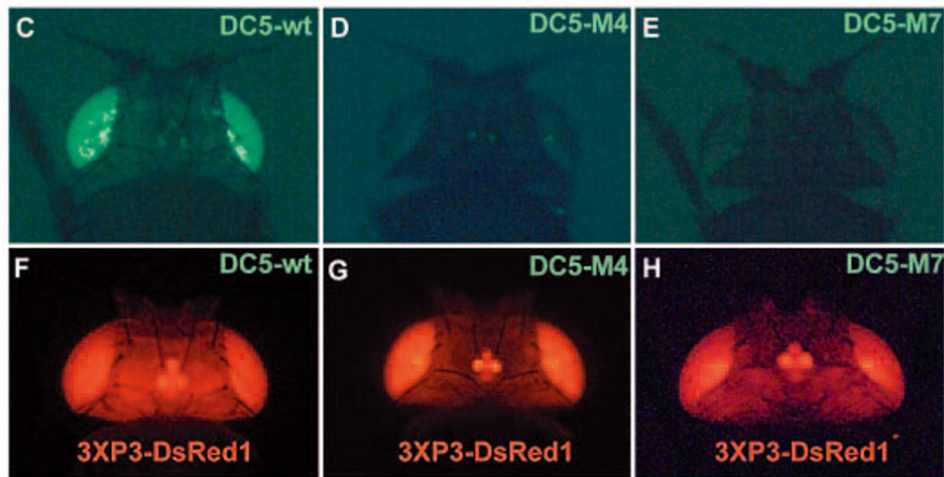
脳機能には、一对の円を顔の中的一对の目と認識する仕組みがありそうです。確かに、一对のヘッドライト(時に丸いヘッドライト)を持つ自動車を前から見ると顔のように感じます。自然界に目を移すと、立派な蝶や蛾の中には翅に鱗粉で大きな円を描くものが少なくありません(図2)。これは、大きな一对の円で、大きな一对の目を模して、「こんなに大きな顔を持った大きな動物なのだぞ」と、捕食者を威嚇するためだと言われています。本当にそうだと示す実験事実があるのかどうかは、筆者には定かではありませんが。



(図2) クジャク蝶。大きな蛇の目紋は、目を模すとされている。

【出典】 [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tagpfauenauge\\_\(Inachis\\_io\)\\_d1\\_2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tagpfauenauge_(Inachis_io)_d1_2.jpg)





(図3) Pax6とSoxで活性化される、ニワトリ $\delta$ -クリスタリン遺伝子DC5エンハンサー(ニワトリでは水晶体で活性化される)をショウジョウバエに導入すると、複眼で活性化される。

A. DC5エンハンサーの塩基配列と、その配列上でのSox2とPax6の結合領域。wtは野生型配列。M4, M7は、Sox2, Pax6が結合できない変異体の塩基配列。

B. ショウジョウバエの中でDC5エンハンサーが活性を持つと、緑色蛍光タンパク質EGFPが発現され、緑色の蛍光を発するよう設計された遺伝子の構造。この遺伝子を持ったトランスジェニック ショウジョウバエが作られた。

C~E. 野生型DC5エンハンサーは複眼で活性を持ち、緑色の蛍光を放った。しかし、M4, M7変異体は、全く活性を持たなかった。

F~H. 同時に導入した、目と神経系で発現する遺伝子の発現。遺伝子導入はうまく行ったことが赤色蛍光タンパク質の発現によって確認された。[文献6]より。

結果は明確で、ショウジョウバエの複眼でDC5エンハンサーが強く活性化されること(図3では、緑色蛍光タンパク質が発現され、緑に光っている)がわかります。Sox因子が結合できない変異(M4)、あるいはPax因子が結合できない変異(M7)を持ったエンハンサーは全く活性を持ちませんでした。つまり、DC5エンハンサーがショウジョウバエの目で活性化されるためには、ニワトリの目の場合と同様、SoxN(Sox2)とPax6が、図3Aに示したDNA配列の決まった場所に結合しなければならないのです。

同じ「目」だといっても、ニワトリは水晶体で光を集めて像を網膜に投射する単眼、ショウジョウバエは、多数の視細胞からなる複眼で、構造は全く違います。それにも関わらず、これほどにも異なった、脊椎動物と昆虫の目が、同じ“Sox2+Pax6”という主題からの変奏というべき関係にあることが明らかになりました。

## C. 目と顔・脳のコネクション

動物の頭の方というのは、概ね、その動物が通常移動してゆく方向の端の部分の部分を指します(直立しているヒトは例外ですが)。また、光受容器(視覚感覚器)である目があるのも、ほとんど例外なくその「頭の方」です。動物が光に反応してその方向に進むという基本的な行動パターンが、動物の系統発生のかなり初期から備わっていたのでしょう。

しかし、光受容器である目があっても、それだけでは顔(頭)とは言えません。その一対の目を一部として包含する、より大きな組織構造があって初めて「顔(頭)」なのです。そのような組織構造はなぜできるか?それはその中に脳ができるからです。非脊椎動物の神経系は、概ね梯子状に体の前後左右を結びつける神経索(Nerve cord)という繰り返し構造からなります。脊椎動物の神経系は神経管という構造を持ちますが、機能的には左右に分かれているので、梯子状神経系と相同だとみなされます。それらの「頭の方」に脳ができます。光受容器のニューロンから出る視覚情報を処理する機能が頭の方の神経系で発達して、それが「脳」という、かさ高い神経組織となり、脳を収納する前端領域として、頭部(前から見ると顔)を生み出したというのが、有力な仮説です。それを示唆するのが転写因子Otx2という、第2の主題です。

一言で言えば、脳も、光受容器(目)の神経細胞も共通して、転写因子Otd(ショウジョウバエでの呼称)=Otx(脊椎動物での呼称)を発現し、それらの転写因子の作用に依存して発生するという事です[文献7]。光受容器の観点から述べれば、光受容器全体は、Sox2とPax6に依存して発生し、その中の神経系(脊椎動物では網膜)は、さらにOtx2による制御を必要とするというのが、これから述べることの大まかな要約です。

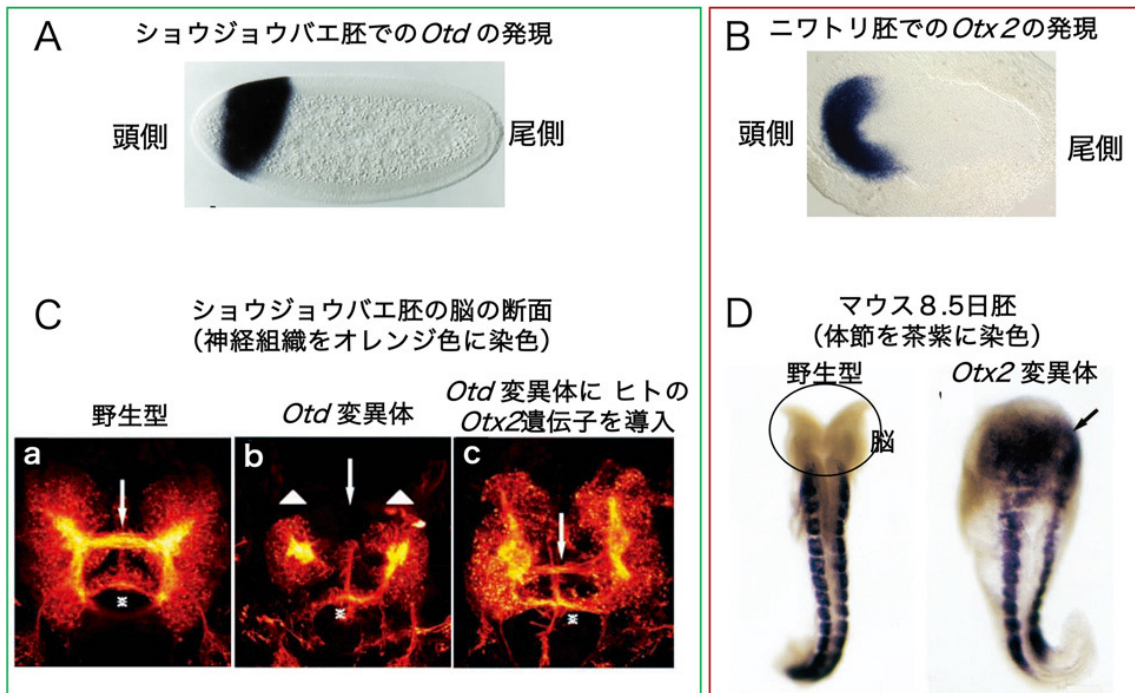
#### コラム 遺伝子の名前について

動物の発生に関わる遺伝子の多く(半分以上)は、ショウジョウバエの変異体の名前に由来しています。“orthodenticle”というのは、Christiane Nüsslein-Volhard(ニュスライン-フォルハルト)と、Eric Wieschaus(ヴィーシャウス)によって実施された、ショウジョウバエの発生に関わる変異体の網羅的なスクリーニングの中で見出された変異体の一つです。(発生生物学の静かな革命VOL.4「胚のいつ、どこで、何を発生させるのかには欠かせない抑制機構」をご参照下さい)。この変異体の外見的特徴の一つが、幼虫が匍匐前進するために、それぞれの節の腹側にもつ小歯状突起(denticle)の配列の変化でした。小歯状突起のバンド(denticle bands)の幅が狭くなり、直線的(ortho)に見える突然変異体だったことから、このように名づけられました。その後の研究で、(1)この変異体は神経系、特に幼虫の脳の形成に欠陥があること、また、(2)この変異体の原因遺伝子(その遺伝子の活性が変化—多くの場合、失活—することによって変異体の表現型が生まれた元の遺伝子)が、Hox因子群とは別のタイプのホメオドメインを持つ転写因子であることも明らかになりました。遺伝子の名前は、変異体の名前から来ることが多く、この遺伝子はorthodenticleと呼ばれ、Otdと略されます。Otd遺伝子がコードする転写因子タンパク質がOtdです。

ショウジョウバエにある遺伝子の多くは、それに相当する遺伝子(ホモログ遺伝子)が脊椎動物にも存在します。Otdに相当するものとして2つの脊椎動物遺伝子、Otx1, Otx2が見出されました。脊椎動物の転写因子の遺伝子名には、番号の前の3文字目にxをつけることが多いのです。先に述べた、Sox2, Pax6も同様です。Otxは、Otdに似た転写因子の遺伝子なので、Otxと名付けられました。脊椎動物の2つのOtx遺伝子(Otx1, Otx2)は同様の働きをしていますが、Otx2が主となって働いています。ショウジョウバエのゲノムの中にもさらに、Otdに似たOtp(orthopedia)というもう一つの遺伝子が見つかりました。プラナリアの脳では、2つのOtx遺伝子と1つのOtp遺伝子がセットになって働いています(後述)。



発生生物学の静かな革命 VOL.4



(図4) ショウジョウバエ*Otd*と、脊椎動物*Otx2*の発現と機能の類似性。

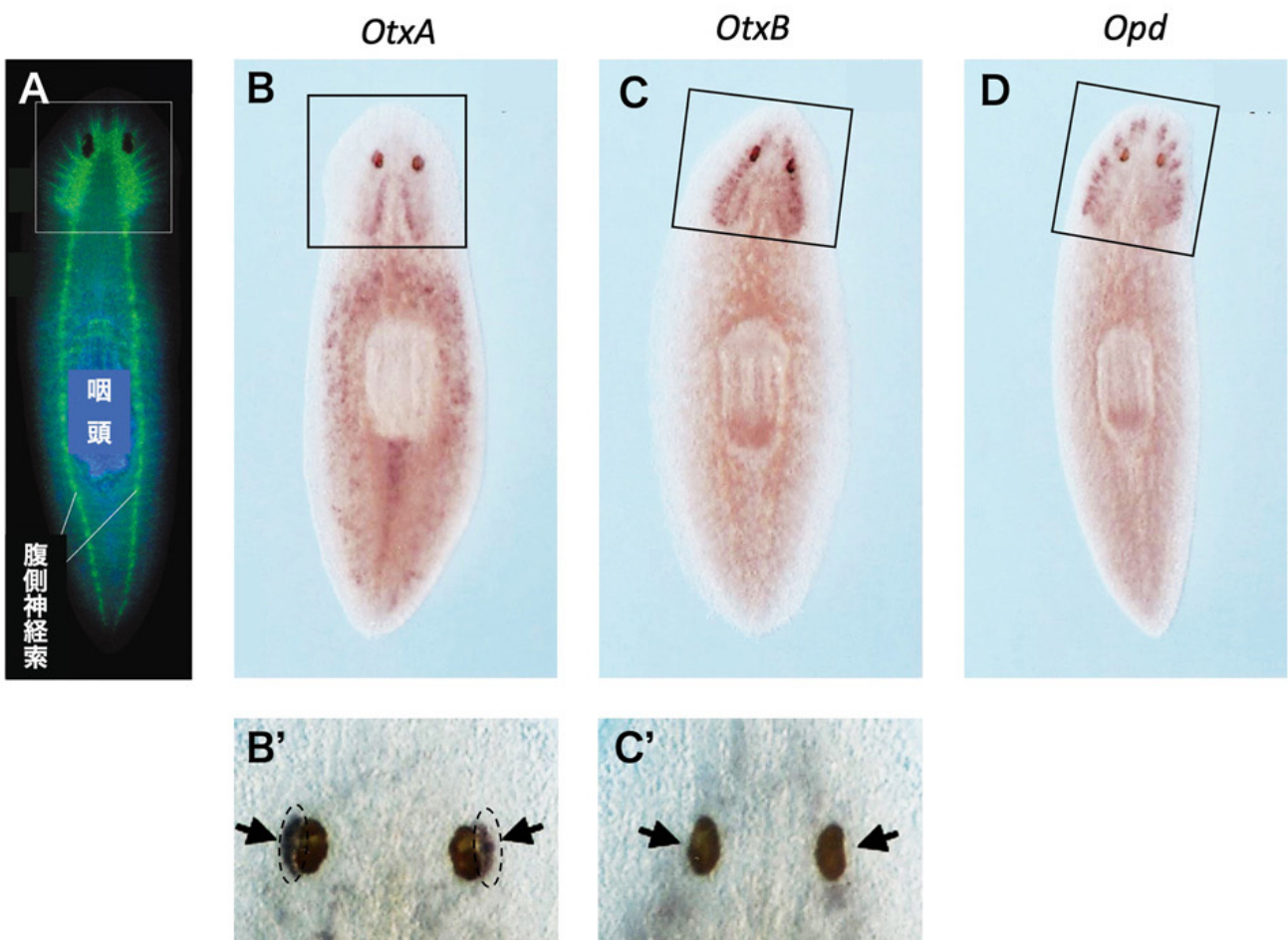
- A. ショウジョウバエ胚 頭側領域での、*Otd*遺伝子の発現(濃青)。発現領域が、将来の頭部にほぼ対応している。[文献8] より、Development誌からの許諾を得て掲載。
- B. ニワトリ胚での*Otx2*遺伝子の発現。発現領域が、将来の頭部にほぼ対応している。(浦田歩、寺元万智子、近藤寿人のデータ)。
- C. ショウジョウバエ*Otd*変異体の脳組織の欠損と、ヒト*Otx2*遺伝子による欠損の回復。脳の神経をオレンジ色に染め出している。a. 野生型脳の切片。b. *Otd*変異体の脳。左右の神経塊(葉 lobe) が貧弱であるとともに、左右の葉をつなぐ神経束(矢印) が欠けている。c. ヒトの*Otx2*を発現すると、脳のいずれの欠損も回復した。[文献9] より、Development誌からの許諾を得て掲載。
- D. マウス胚で*Otx2*を欠損させると、脳(左の野生型胚の楕円で囲んだ部分)が失われる(右)。茶紫の染色は、体節を示す。[文献10] より、Development誌からの許諾を得て掲載。

図4は、ショウジョウバエの*Otd* [文献7,8]と脊椎動物の*Otx2*の、胚での発現、そして機能の類似性を示したものです。ショウジョウバエ胚でも(A)ニワトリ胚でも(B)、胚の頭側の端に近い、結構広い領域で発現されていることがわかります。これらの領域が、発生が進むと脳になります。(C) (D)は、これらの遺伝子の変異体を示しています。ショウジョウバエの胚の脳は、結構複雑な構造を持っています(C(a))。*Otd*の遺伝子活性を失った変異体では、左右の神経組織(葉)が小さくなり(白三角)、左右をつなぐ神経の束(矢印)が失われています(C(b))。*Otx2*変異体マウス胚では、脳が全くなくなります(D)。ここで重要な実験が行われました。*Otd*変異体にヒトの*Otx2*配列を持つDNAを導入して*Otx2*因子を発現させると、変異体の脳構造の2つの欠陥が回復しました(C(c)) [文献9]。つまり、*Otd*因子と*Otx2*因子とは、アミノ酸配列の特徴がよく似ているだけでなく、転写制御タンパク質としての機能にも互換性があったのです。

この実験によって、*Otd*と*Otx2*という別の動物種の遺伝子が(1)似た塩基配列を持つ、(2)胚の脳を作る場所で発現する、(3)変異体では脳形成がうまくいかない—という類似性を超えて、同じ機

能を持つタンパク質をコードしていることが確認されました。後にも触れることですが、*Otd*遺伝子と*Otx2*遺伝子は数億年も前に別れたものです。それらがコードするタンパク質が、今日でも同等の制御機能を持っているというのは驚くべきことで、現代の多様な動物の脳も、「転写因子*Otd/Otx2*の制御機能の上に成り立つ」という主題の変奏であることを示しています。

*Otd*や*Otx2*遺伝子の単純な変異体の表現型からは、これらの遺伝子が脳の発生に必須の遺伝子であることが明らかになりました。さらにその後、目の組織だけで遺伝子を失活させる(条件的ノックアウト)などの方法で、*Otd/Otx2*は、目の神経組織(脊椎動物では網膜)の発生に欠かせない転写因子であることが明らかになりました。ショウジョウバエでは*Otd*とその類縁遺伝子である*Dve*が複眼の光受容細胞のタイプを決定していること[文献11]、マウスの網膜を構成する神経細胞の発生には、*Otx2*とその類縁遺伝子である*Crx*の働きが必須であることなどが明らかになっています[文献12]。



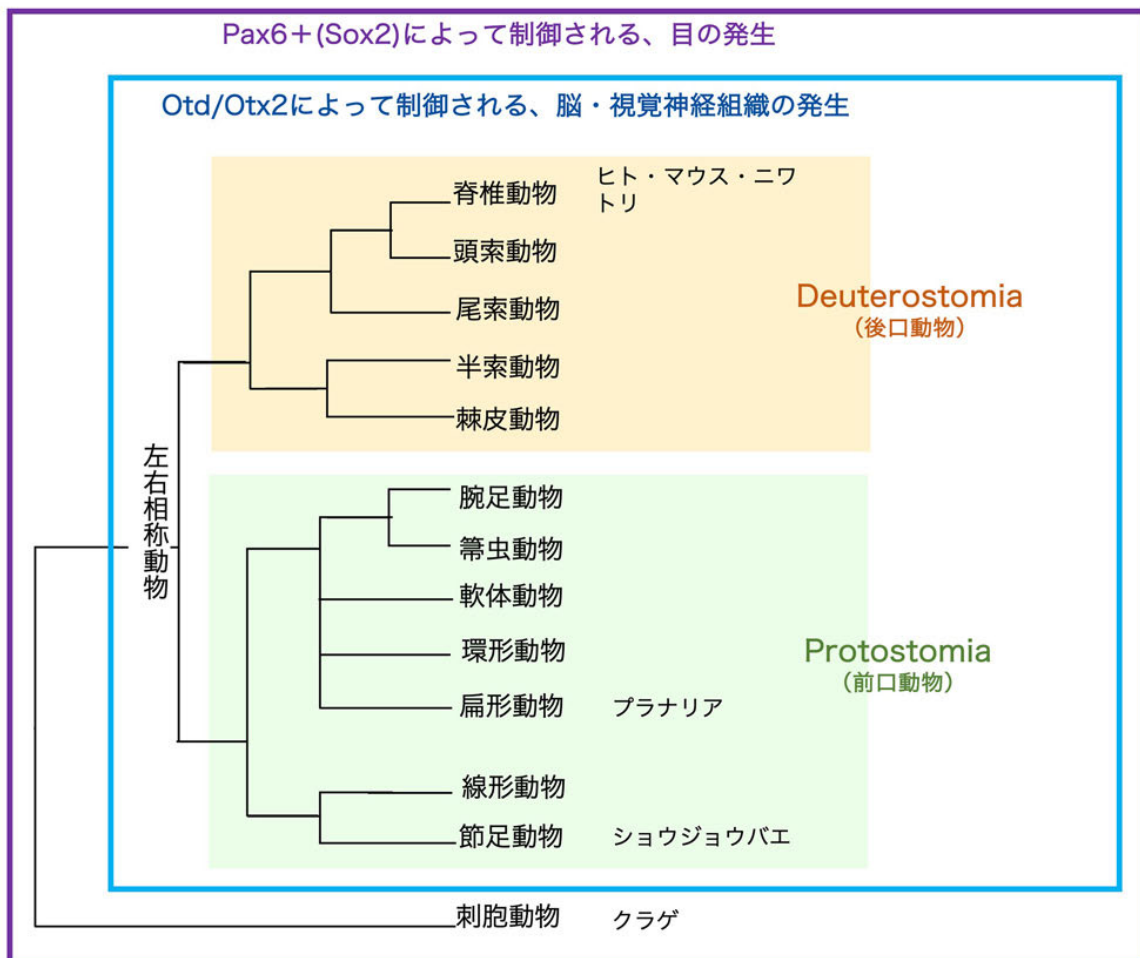
(図5) プラナリアの脳と光受容体神経細胞における、*Otx*系転写因子の発現。

A. プラナリアの神経組織を抗シナプトタグミン抗体を用いて緑に染め出した。脳の部分を矩形で囲った。[文献13]より、著者の許諾を得て転載。

B-D. プラナリアでの3つの*Otx*系遺伝子*OtxA*、*OtxB*、*Opd*の発現を検出(赤茶色)。矩形で囲んだ脳領域での3つの遺伝子の発現を足し合わせると、Aで示した脳の神経の分布パターンを再現できる。B'とC'はB、Cの目の部分の拡大(別の個体)。目(矢印)には色素細胞があり、それはB'、C'いずれにもある。B'は、その外側の光受容神経(点線で囲んだ)で*OtxA*が発現されていることを示す。B-D、B'、C'は。[文献14]よりSpringer-Natureからの許諾を得て掲載。

脳と目の神経組織での、Otd/Otx転写因子群について、プラナリアの例で詳しく見てみましょう。図5Aは、プラナリアの神経系全体を抗シナプトタグミン抗体で緑色に染め出したものです[文献13]。一对の目は、黒い色素細胞(黒く色が抜けている)の存在でわかります。矩形で囲んだ脳の後方に、左右の腹側神経索が伸び出しています。図5B~Dは、OtxA, OtxB, OtpというOtd/Otxタイプの転写因子遺伝子の発現を、in situ hybridizationという方法で染め出したもので[文献14]、これらから次のことがわかりました。(1) これらの3遺伝子の神経系での発現は、脳の領域(矩形で囲む)に限定されていること。(2) 3遺伝子の脳での発現は領域が異なっていて、OtxA, OtxB, Otpの発現を重ねて初めて、Aで示した神経系のうち、脳の神経組織分布を再現できること。

B', C'は、OtxA, OtxB, の目(矢印で示す)での発現を拡大してみています(B, Cとは別の個体)。目の神経細胞は、黒い色素細胞の外側に位置しています。OtxAは、その神経細胞で発現されている(B')のに対して、OtxBは発現されていません(C')。このように、Otd/Otxタイプの転写因子遺伝子は、動物によって多様な使い分けをしなが、脳と視覚系の神経組織の発生に中心的な役割を果たしています。



(図6) 本文中で登場した動物を、系統樹の上に配置した。大きく隔たった動物系統群であるDeuterostomiaと、Protostomiaを、背景の色を変えて示した。



## D. 動物界の中で

ショウジョウバエとプラナリアを何気ない素振りで脊椎動物と比較してきましたが、これらの動物はどんな関係にあるのでしょうか。図6の動物の系統樹の上に、登場した動物を置いてみました。(古典的な系統樹は、動物やその胚の形態的な特徴をもとに描かれましたが、様々な動物のゲノム配列が網羅的に解析されて得られた情報をもとにして、系統樹は大幅に再編されました。図6は、それをもとにした略図です。しかし、以前の分類名は実際の動物の特徴とは齟齬を来しながら残っているのが問題です。これから取り上げるProtostomia、Deutrostomiaは、口が肛門より先にできる、後にできるという意味ですが、それらに分類される動物の発生には、その名に相応しくないものが少なくありません。また、系統分岐図は現存する動物のゲノム配列間の隔り(距離)をもとに描かれたもので、この図の分岐の通りに系統が分岐していったと主張するものでもありません)。

動物の大部分は、左右相称動物で、その中で数億年前に別れたとされる、Protostomiaか、Deutrostomiaに属しています。ヒトをはじめとした脊椎動物はDeutrostomia、ショウジョウバエ・プラナリアはProtostomiaですから、それらは数億年前に別れた——それにも関わらず、「Pax6+Sox2によって制御される、目の発生」、「Otd/Otx2によって制御される、脳・視覚神経組織の発生」という、体の機能ユニットの形成と転写因子との関係が、2つの大きな系統の分岐前に成立していたこと、そしてその関係が数億年を経て維持されていることは驚くべきことだと感じます。

コラムの中で、「動物の発生に関わる遺伝子の多く(半分以上)は、ショウジョウバエの変異体の名前に由来しています。」と書きました。つまり、これほど隔たったショウジョウバエと脊椎動物の間で、多くの遺伝子が共有されているのです。しかし、共有の仕方は様々です。例えば、ショウジョウバエの変異体がきっかけとなって見出されたヘッジホッグ遺伝子。「発生生物学の静かな革命VOL.4 胚のいつ、どこで、何を発生させるのかには欠かせない抑制機構」で詳しく述べたように、この遺伝子がコードするタンパク質が「分泌されて細胞間のシグナルを担う」ことについては、ショウジョウバエと脊椎動物との間で共通(保存されている)です。しかし、働く場所はショウジョウバエ幼虫では腹側の小歯状突起の形成、かたや脊椎動物では体節や指原基の形成の調節といった具合に関連性がありません。しかし、Pax6+Sox2, Otx2を例として、発生を制御する転写因子の多くは、動物種の大きな隔たりを超えて、体の機能構造の形成と深く結びついています。つまり、体の機能構造は動物種間で形態的には多様に見えますが、それらの発生の基盤となる転写因子の作用を「主題」とした、多彩なしかしあくまでも変奏としての発展の結果なのです。



発生生物学の静かな革命 VOL.4

さて、左右相称動物からはさらに隔たった、刺胞動物ではどうでしょうか。Joram Piatigorskyのグループは、クラゲが持つ(立派な)目の形成では、Pax6の祖先型とも見なされるPaxBが働いていることを示しました[文献15]。「Pax6による目の形成の指定」という機構は、左右相称動物が成立する以前の段階から存在していたことになります。(Sox2相当因子と一緒に働くのかどうかは調べられ

ていない)。一方、Otd/Otx2の方は、クラゲでは筋肉(striated muscle)で発現されているのみで、「Otd/Otx2による脳と光受容体神経の指定」という機構は、左右相称動物の成立あたりから生まれたもののようです[文献16]。

図6を詳しくご覧になった方は、なぜこんなにも形が違う棘皮動物(ヒトデ・ウニ)が、ショウジョウバエよりも遙かにヒトに近いのかと怪訝に思われるかもしれません。最近、ヒトデとその胚での発生に関わる遺伝子の発現が解析されました[文献17]。その結果を一言でいうと、『棘皮動物は「ほとんど頭」からなる動物だ』ということです。Otxをはじめとする、脳・頭部の形成に関わる転写因子の遺伝子は、脊椎動物のものとある程度対応可能な領域分布で発現されていました。これらの動物は決して下等ではなく、私たちと同じく地球上の長い時間の間に変化してきたものたちですから、脊椎動物と棘皮動物の間の遺伝子発現パターンの対応は入り組んでいます。

## E. 手

「手」は変奏の主題ではなく、次回への軽い前奏曲です。

前脚を「手」とするかどうかは、脳の判断によるところですが、基本的には、体を支えるのではなく「食」などのために前脚を使う時に、「手」という意識が脳に芽生えるように思います(前脚と手は排他的に使われるものではありません)。前脚が手になるのは、それが「口+顔」に近いことと切り離せないでしょう。

ー赤ん坊は、手で掴んだものをなんでも口に運びます。箸、フォークなどが無い時代や状況では、大人も(霊長類も)手で食べ物を口に運びます。そのようにして食べるおにぎりは美味しいですね。

ーパンダは、「手」で竹を掴んで口に運びます。

ーラッコは、貝を仰向けのお腹に乗せて、「手」に持つ石で殻を破り、「両手」で貝の身を口に運びます。

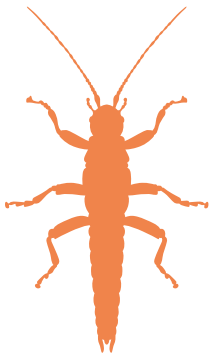
ー猫の「手」も借りたい! ネコ科の動物は、餌を捕らえるために「手」を使います。猫は、ネズミやセミ(結構昆虫食)を「手」で捕らえます。大型のライオンなどは、「手」で大型動物にしがみついて倒し、餌とします。

次回は、掌(手のひら)と指についてお話するつもりです。

## 引用文献

- [1] Kamachi Y, Uchikawa M, Collignon J, Lovell-Badge R, Kondoh H. (1998). **Involvement of Sox1, 2 and 3 in the early and subsequent molecular events of lens induction.** *Development*. 125: 2521-2532. doi: 10.1242/dev.125.13.2521.
- [2] Kamachi Y, Uchikawa M, Tanouchi A, Sekido R, Kondoh H. (2001). **Pax6 and SOX2 form a co-DNA-binding partner complex that regulates initiation of lens development.** *Genes Dev*. 15:1272-1286. doi: 10.1101/gad.887101.
- [3] Inoue M, Kamachi Y, Matsunami H, Imada K, Uchikawa M, Kondoh H. (2007). **PAX6 and SOX2-dependent regulation of the Sox2 enhancer N-3 involved in embryonic visual system development.** *Genes Cells*. 12:1049-1061. doi: 10.1111/j.1365-2443.2007.01114.x.
- [4] Gehring WJ, Ikeo K. (1999). **Pax 6: mastering eye morphogenesis and eye evolution.** *Trends Genet*. 15:371-377. doi: 10.1016/s0168-9525(99)01776-x.
- [5] Gehring WJ. (2004). **Historical perspective on the development and evolution of eyes and photoreceptors.** *Int J Dev Biol*. 48:707-717. doi: 10.1387/ijdb.041900wg.
- [6] Blanco J, Girard F, Kamachi Y, Kondoh H, Gehring WJ. (2005). **Functional analysis of the chicken delta1-crystallin enhancer activity in Drosophila reveals remarkable evolutionary conservation between chicken and fly.** *Development*. 132:1895-1905. doi: 10.1242/dev.01738.
- [7] Finkelstein R, Smouse D, Capaci TM, Spradling AC, Perrimon N. (1990). **The orthodenticle gene encodes a novel homeo domain protein involved in the development of the Drosophila nervous system and ocellar visual structures.** *Genes Dev*. 4:1516-1527. doi: 10.1101/gad.4.9.1516.
- [8] Grossniklaus U, Cadigan KM, Gehring WJ. (1994). **Three maternal coordinate systems cooperate in the patterning of the Drosophila head.** *Development*. 120:3155-171. doi: 10.1242/dev.120.11.3155.
- [9] Leuzinger S, Hirth F, Gerlich D, Acampora D, Simeone A, Gehring WJ, Finkelstein R, Furukubo-Tokunaga K, Reichert H. (1998). **Equivalence of the fly orthodenticle gene and the human OTX genes in embryonic brain development of Drosophila.** *Development*. 125:1703-1710. doi: 10.1242/dev.125.9.1703.
- [10] Ang SL, Jin O, Rhinn M, Daigle N, Stevenson L, Rossant J. (1996). **A targeted mouse Otx2 mutation leads to severe defects in gastrulation and formation of axial mesoderm and to deletion of rostral brain.** *Development*. 122:243-252. doi: 10.1242/dev.122.1.243.
- [11] Johnston RJ Jr, Otake Y, Sood P, Vogt N, Behnia R, Vasiliauskas D, McDonald E, Xie B, Koenig S, Wolf R, Cook T, Gebelein B, Kussell E, Nakagoshi H, Desplan C. (2011). **Interlocked feedforward loops control cell-type-specific Rhodopsin expression in the Drosophila eye.** *Cell*. 145:956-968. doi: 10.1016/j.cell.2011.05.003.
- [12] Yamamoto H, Kon T, Omori Y, Furukawa T. (2020). **Functional and Evolutionary Diversification of Otx2 and Crx in Vertebrate Retinal Photoreceptor and Bipolar Cell Development.** *Cell Rep*. 30:658-671.e5. doi: 10.1016/j.celrep.2019.12.072.
- [13] Umesono Y, Agata K. (2009). **Evolution and regeneration of the planarian central nervous system.** *Dev Growth Differ*. 51(3):185-195. doi: 10.1111/j.1440-169X.2009.01099.x.
- [14] Umesono Y, Watanabe K, Agata K. (1999). **Distinct structural domains in the planarian brain defined by the expression of evolutionarily conserved homeobox genes.** *Dev Genes Evol*. 209:31-39. doi: 10.1007/s004270050224.
- [15] Kozmik Z, Daube M, Frei E, Norman B, Kos L, Dishaw LJ, Noll M, Piatigorsky J. (2003). **Role of Pax genes in eye evolution: a cnidarian PaxB gene uniting Pax2 and Pax6 functions.** *Dev Cell*. 5:773-785. doi: 10.1016/s1534-5807(03)00325-3.
- [16] Müller P, Yanze N, Schmid V, Spring J. (1999). **The homeobox gene Otx of the jellyfish Podocoryne carnea: role of a head gene in striated muscle and evolution.** *Dev Biol*. 1216:582-594. doi: 10.1006/dbio.1999.9522.
- [17] Formerly L, Pelus P, Kohnle I, Malnick J, Thompson JR, Pitel M, Uhlinger KR, Rokhsar DS, Rank DR, Lowe CJ. (2023). **Molecular evidence of anteroposterior patterning in adult echinoderms.** *Nature*. 623, 555-561 (2023). doi: 10.1038/s41586-023-06669-2.

サムネイルは図3より



## PAPER CRAFT

# 超遺伝子(スーパーゼーン) 表現多型を生むゲノム



動物は様々な色や形をもち、同じ種の中でも異なる姿形をしていることがあります。これを多型といい、多型を生み出すしくみの一つが、超遺伝子と考えられています。**超遺伝子については、113号の記事の3.超遺伝子(スーパーゼーン)**で解説しましたので、ご覧ください。



チビナナフシ(*Timema*属)は、アメリカ西海岸にのみ生息する体長2センチメートルほどの小さな昆虫です。翅がないため広い範囲を移動することがなく、特定の植物の上に集団で暮らしています。一箇所に数千個体程度という小さな集団は、遺伝子の広がり調べやすい大きさです。環境との関わりからどのような表現型が選ばれ、その背景にどのような遺伝型の組み合わせがあるのかを知る進化の実験場と考えることができます。一般にはあまり馴染みのない昆虫ですが、研究者はこのような生きものを通して、見ることの難しい進化に挑戦しているのです。

## 1. チビナナフシと隠蔽擬態(カムフラージュ)

環境にあわせて姿を隠す隠蔽擬態は、自分の姿と似た色や模様背景に溶け込むことで、捕食者などの敵から身を守ります。木の葉に似せたコノハムシや枯葉にそっくりなコノハチョウ、枝に真似るナナフシやシャクトリムシなど、昆虫にとって植物は身近な隠れ家です。チビナナフシの一種のクリスティナは、体色に緑(緑型)と褐色(褐色型)があり、さらに緑には背中に白い線をもつもの(白線型)と緑一色(緑色型)のものがいます。棲家とする宿主植物は、バラ科低木のチャミーズとクロウメモドキ科セアノサス属の低木グリーンバークで、チャミーズは細い葉、グリーンバークは広い葉をもちます。白線型の個体はチャミーズの細い葉に擬態し、緑色型の個体はグリーンバークに隠れます。褐色型の個体は、どちらの植物でも枝や枯葉に紛れることができます。チビナナフシは、翅のない小さな昆虫なので、広い範囲を移動することはできません。チャミーズとグリーンバークは似た環境に育つため行き来は可能ですが、自ら模様にあわせた宿主を選んで移動することはないでしょう。おそらく、生まれた宿主と模様が一致すれば隠れて生き延び、目立ちやすい宿主に生まれれば捕食の危険にさらされるのです。そこで、環境に適応した個体が生き残り、そうでない個体が減っていくという自然選択の実験場になっているのです。実際、チビナナフシを用いた野外実験では、あらかじめ数を揃えた個体を宿主の上に放して、自然の状態ですぐ捕食できるようにした結果、生き残った数を数えて、生存率を調べています。



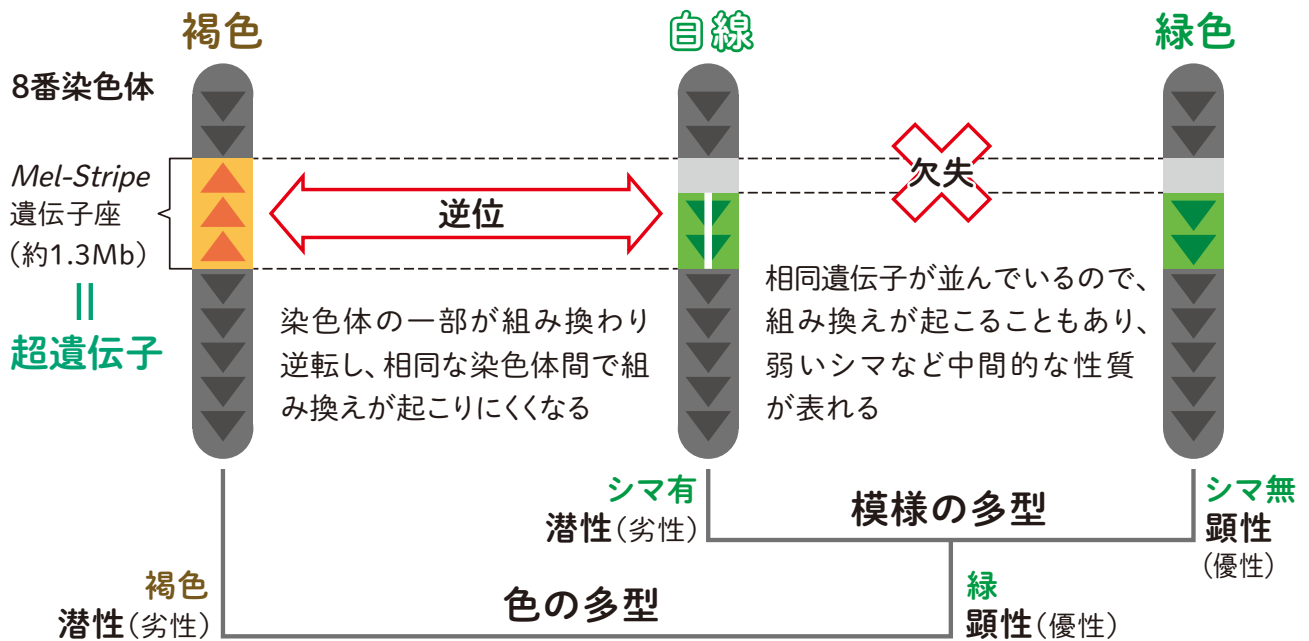
(図1) (左)擬態しているチャミーズの上の白線型とグリーンバーグの上の緑色型。  
 (右)擬態していないチャミーズの上の緑色型とグリーンバーグの上の褐色型。

## 2. チビナナフシの超遺伝子

ゲノムの解析により、色と模様に関わる遺伝子は、8番染色体の13Mbの領域にあることが予想されました。この*Mel-Stripe*遺伝子座は、対立遺伝子座として、緑型と褐色型があり、緑型が顕性、褐色型が潜性のメンデルの法則を示します。*Mel-Stripe*遺伝子座をさらに調べたところ、緑型と褐色型では向きが逆方向になっている逆位であることがわかりました。逆位によって、組み換えが抑制されていることは、超遺伝子の特徴です。さらに、緑型には褐色型に対して一部の配列が失われる欠失が見られました。染色体上でそれぞれ異なる配列になり、緑と褐色は独立した対立遺伝子座として保持されていると言えます。

模様の遺伝子座も同じ*Mel-Stripe*遺伝子座にあることが予想されています。模様の線のあるなしは、線のない緑色型が顕性であることがわかりました。遺伝子型との一致が、色の区別に比べて弱いことから、白線型と緑色型は組み換えが起こる可能性も考えられますが、線のあるなしを決める遺伝子はまだわかりません。フィールドでの調査から、緑型の個体には褐色型の遺伝子座をもつヘテロ型が多いことが観察されました。褐色型の個体は、真菌感染症に強いことや高い気温を好むことがわかり、環境との関わりで褐色型の遺伝子座をもつことが有利な場合あるのではないかと推測されています。

一般に、多型は世代を追うごとに中間的になり、次第に失われると考えられていますが、クリスティナチビナナフシでは、2種類の宿主との関わりが両方の性質を保持する選択圧となり、多型の表現型が守られていると考えられます。



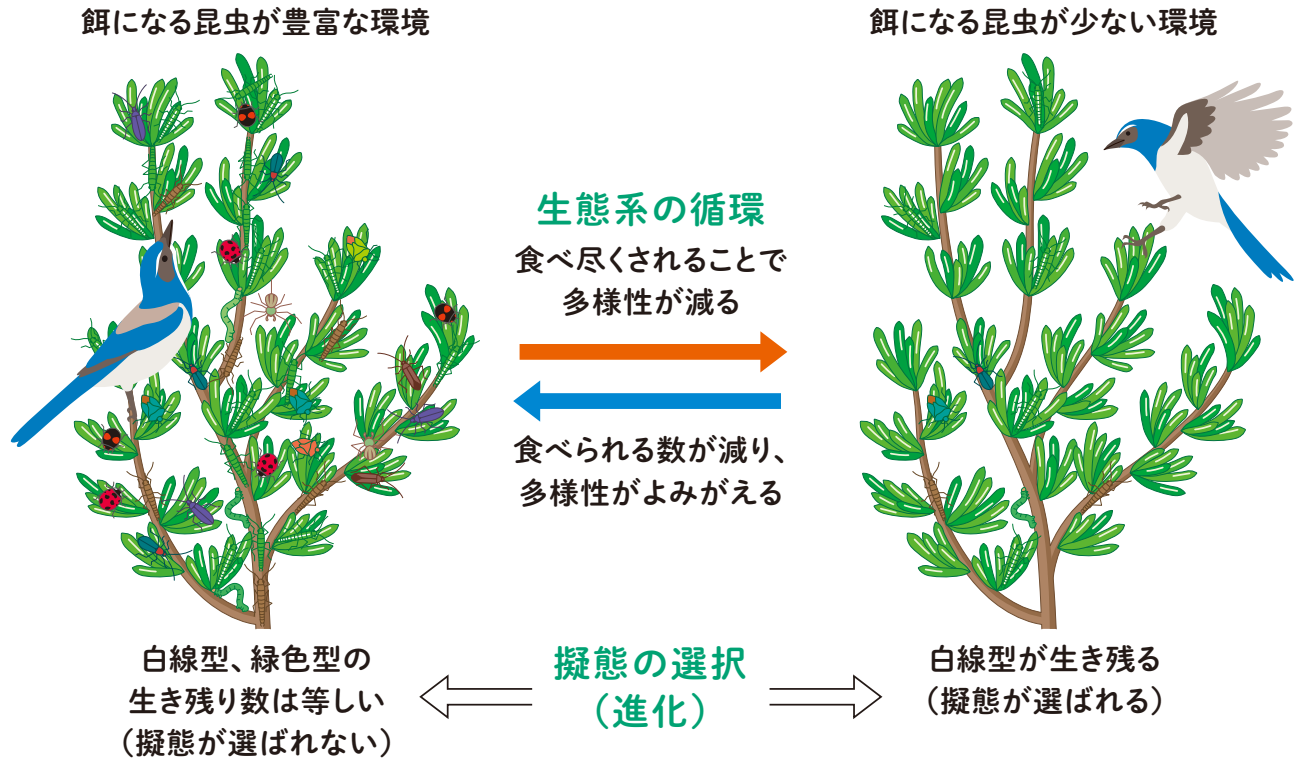
(図2) 色と模様を決める遺伝子座(超遺伝子)

### 3. 擬態と環境

隠蔽擬態は、個体が環境に合わせることで身を守ることができますが、逆に環境に対してどのような影響があるか調べた研究があります。細い葉をもつチャミーズに、擬態する白線型と擬態しない緑色型を放した状態で、周辺にいる昆虫などの小動物の数を調べたところ、擬態しない緑色型を放った木では、鳥による捕食が進み、昆虫の数が減りました。一方、白線型のいる木では、昆虫の数が保たれたことから、擬態によって、他の昆虫を捕食から守り、多様性の維持につながるのではないかと予測されました。これを確認するために、今度は環境となる昆虫の数を換え、多い場合と少ない場合を比較しました。すると昆虫が多い環境では、白線型と緑色型の数が変わらないことがわかりました。つまり、昆虫など鳥の餌になる生きものが多い場所は狩場として鳥を引きつけるため、擬態しても擬態しなくても捕食の危険は変わらず、擬態の効果が少ないと考えられます。一方、昆虫が少ない環境では、擬態した白線型の方が生き残りやすいことがわかりました。擬態が多様性を守るという現象は、こちらの状態を見ていたこととなります。多様性が守られ、昆虫が生き残った場所は、やがて昆虫が増えて鳥を引きつけ、捕食圧にさらされます。このように、周囲の昆虫の豊かさを行き来する生態系の循環があり、その中にチビナナフシの擬態が生き残りに有利かどうか進化の選択が関わると考えることができます。

飛ばない小さな昆虫であるチビナナフシは、いずれも低木で同じ地域にある2種類の異なる宿主植物との関わりから、それぞれに適した表現型が出現し、鳥などの捕食者によって選択を受けながら、両方の多型のバランスを保っているのです。

現在、人間の手による地球環境の変化がおきています。多くの生きものが、生息環境を奪われたり、変化に適応できなかつたりして、危機に瀕しています。小さな環境で生きているチビナナフシを通して、私たちもこの小さな生きものの仲間でありひとつであることを思い出して、生きものらしい生き方を考えましょう。



(図3) 昆虫等の数とチビナナフシの擬態の関係を調べる  
 チャミーズにチビナナフシと昆虫を放った実験場。昆虫とチビナナフシが豊富で鳥(捕食者)を呼ぶ環境といずれも少ない環境が時とともに行き来するときに、ナナフシの擬態が有利にはたらくことがある。これを生態系の縮図として、進化を考える研究が行われている。

(参考文献) *Molecular Ecology* Volume26, Issue22 Pages 6189-6205  
*Current Biology* Volume 25, Issue 15, 3 August 2015, Pages 1975-1981

タブを引くとそれぞれの環境に隠れていたチビナナフシが飛び出すカードは『季刊生命誌114/115号』に同封されています。

カードについてはこちらから



EXHIBITION

特別展示

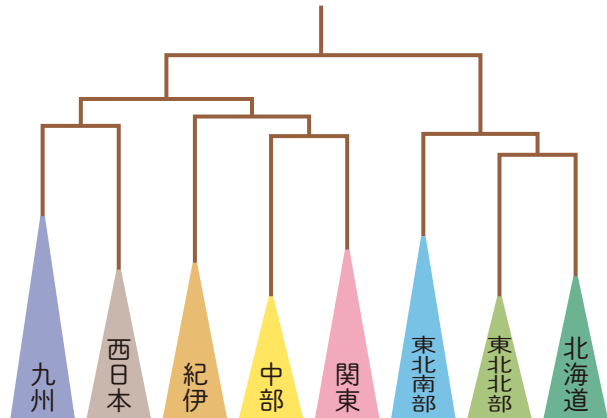
## 生きものの時間 第4期

—生命誌の時間—

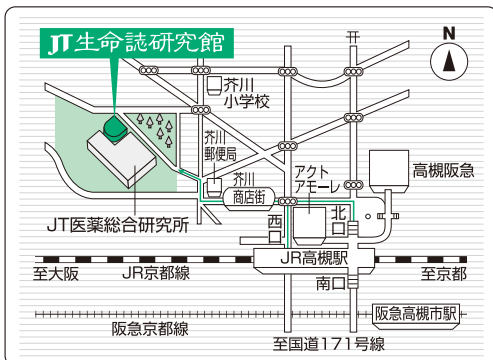
開催：2023年1月20日(土)～

場所：JT生命誌研究館

生命誌は、ゲノムを切り口に生きもの全体に眼を向ける新たな自然誌として構想されました。本展示では、DNAや細胞から進化を研究し、それを新しい形で表現してきた研究館30年の歩みに加え、自然誌から分子生物学に至る学問の誕生の時間を振り返り、さまざまな時代の自然を見る眼差しに学びます。また、開館当時から続けてきたオサムシの世界的なDNA解析の研究成果から見える生命の物語もご紹介します。2022年より続けてきた「時間」をテーマとした展示シリーズの最終編です。



特設ページはこちら



### JT生命誌研究館

〒569-1125 大阪府高槻市紫町1-1

Tel:072-681-9750(代表) Fax:072-681-9743

開館時間 10:00-16:30 入館無料

休館日 毎週月曜日/年末年始(12月29日-翌年の1月4日)

最新の開館情報はサイト(www.brh.co.jp)でご確認ください。

交通 JR京都線高槻駅より徒歩10分

阪急京都線高槻市駅より徒歩18分

JRのご利用が便利です。