現代遺伝学とダーウィンの進化論

―アフリカ・ビクトリア湖の魚の進化―

東京工業大学大学院生命理工学研究科教授 岡田 典弘

私の今日の題は「現代遺伝学とダーウィンの進化論」ということですが、このテーマと、われわれが現在やっておりますビクトリア湖の魚の進化についての話をしたいと思います。

ダーウィンに関してはご存じの方がたくさんおられると思いますが、簡単におさらいをしておきます。1809年に生まれていますので、今年で生誕203年です。1831年、22歳のときにビーグル号での航海に出発をした。ちょうど30歳のとき、1839年に「ビーグル号航海記」を出版、1859年、50歳のときに「種の起源」を出しています(図1)。

ビーグル号はイングランドを出発して南米に行きます(図2)。ダーウィンはずっと船の上に乗っていたわけではなく、内陸のほうもかなり探検をしました。あとで出てくるいろいろな化石などを

発見していますが、 ガラパゴス諸島で非 常におもしろいいろ いろな生物を観察し て帰ってきます。

その中の一つの例ですが、ガラパゴスゾウガメというのがいます(図3)。カメの甲羅がドーム型になっているもので、これは地面に生える植物を食べるのですが、餌となる植物が

けない。そうすると鞍状にちょっと盛り上がっているゾウガメがいます。これは鞍型といいますが、食性によってゾウガメの形態が適応するというのが一つの例です。 図3にはガラパゴス諸島が示されています

非常に少ないところでは低めの木の上の葉っ

ぱとか実を食べるために首を伸ばさないとい

図3にはガラパゴス諸島が示されていますが、それぞれの島で鞍型のものとドーム型のものが分布をしている。それといまの植物層等が対応している。またロンサム・ジョージというもので、絶滅したと思っていたものが発見された。ゾウガメの亜種らしく、現在でもまだ生きているらしいのですが、そういうのがいます。

それからもう一つの例はイグアナです(図4)。イグアナは陸に棲んでいるリクイグア

1809年2月12日 イギリスのシュルーズベリにて誕生

1831年12月

ケンブリッジ大学卒業後、22歳の時、約5年間の ビーグル号での航海に出発。 航海の先々で進化論の元となるさまざまな動植物と

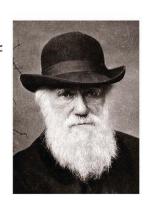
出会う。

1839年

「ビーグル号航海記」(初版)を出版

1859年11月24日 「種の起源」出版

1882年4月19日 死没 チャールズ・ダーウィン 1880年の肖像写真



ビーグル号航海記より



1831年12月27日~1836年10月2日 南米沿岸の測量のための航海に同行し、各地でさまざまな動植物を観察した。 図 2



図 3



海に潜るイグアナ。

数分間〜数十分の「潜水」が可能とされ、浅瀬の岩についた海藻を食べる。 ガラパゴスの海は寒流の影響でとても 冷たく、海に海藻を食べに行った後は、 海岸近くで日光浴をする。

ウミイグアナ

ガラパゴスリクイグアナ

元は一種類だったイグアナが、ウミイグアナとリクイグアナに分かれて進化したとみられる。 植物や昆虫などを食べる雑食性とされるが、一番の好物はウチワサボテン。

画像出展元:科学技術振興機構 理科ねっとわーく



図 4

ナと、海に棲んでいるイグアナがいるわけですが、気候の変動で食料が不足したときに、ハイブリッドが生まれ、こういうのが存続をします。これはウミイグアナの特徴である長い爪がある。そういうのがリクイグアナではできない高いところのサボテンに登ることができる。そういう長所を持っているので写真のようなハイブリッドが観察される(図5)。

つまりある気候の変動に種が適応する。そういうような観察をして、いろいろ考察を加え、50歳のときに種の起源を書きました。ウォレスという人がいて、彼が自然選択でほとんど同じようなアイデアを出したというので、ずっと考えをためていたものを同時にレポートとして出し、その後こういう本を出版したという有名なエピソードがあります。

「種の起源」を最初から最後まで読むのは なかなか大変で、全体を読み通した方はそれ ほど多くはないと思いますが、簡単に章立て を説明すると、「飼育栽培による変異」が第 1章です。全部を説明する余裕はありません が、いくつかピックアップして論理の展開に ついて説明をしたいと思います(図6)。

これは現代のウシの品種ですが、人為的に、われわれの目的に合うようにいろいろな品種が改良されています(図7)。こういうものをパッと見て、もし品種であることがわからなければ、別の種であると考えることができるほど形態的な変化は大きい。しかし別の種とは考えないわけです。それぞれの品種でそれぞれ違う変異がたまり、ある新規な形態が出てくることをダーウィンはいちばん最初の章立てで述べています。

そのときに遺伝を司る法則はほとんどわかっていない。同じ種の異なる個体に、同じ特徴が表れても、個体によってそれが遺伝することもあれば、遺伝しないこともあるのはなぜか?また、祖父や祖母、あるいはもっと遠

ハイブリッドイグアナ

雄のリクイグアナと雌のウミイグアナの 交雑によって生まれた、両種のDNAを 併せ持った雑種のイグアナ。



ウミイグアナの特徴である長い爪が備わっており、リクイグアナでは不可能な高木サボテンに 登ることが出来、また海に潜り海草も食べることが出来るハイブリッド種。

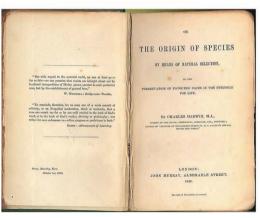
画像出展元:科学技術振興機構 理科ねっとわーく

図 5

い祖先に見られた形質が子供に表れることが よくあるが、なぜそうなるのか?こうした遺 伝にかかわる疑問はいずれもまだよくわかっ ていないというのが、第1章に書かれていま す。まだメンデルの法則は発表されていませ ん。もちろんDNAの構造はわかっていませんので、遺伝の法則がわかっていない。遺伝学の法則がわかっていなくて、最終的にこれだけのことをダーウィンが明らかにしたというのは本当に驚くべきことだと思います。



『種の起源』発表の頃 (50歳頃)のダーウィン



『種の起源』(1859)

タイトルページ

図 6

生物の研究の歴史 ですが、1859年、い まの「種の起源」の 第1版が出版されて いますが、そのあと 1866年にメンデルの 法則が発表されてい ます。ダーウィンは 第1版を出してから 何回か版を重ねて、 最終の第6版の1872 年に至るまでいろい ろ論争がありますの で、ダーウィンの中 でいろいろ改変が付 け加えられ、最終的

オーロックス(家畜牛の祖先)

A Red Devon bull.Mark Robinson from Williton, UK









様々な牛の品種





This image was originally posted to Flickr by

http://www.flickr.com/photos/robert_scarth/61337 840/. It was reviewed on 13:59, 26 November 2006 by the FlickreviewR robot and confirmed to be licensed under the terms of the cc-by-sa-2.0.

図 7

に1872年のものが第6版です。そのときには メンデルはもう遺伝の法則を発表しています。 有名なことですが、メンデルはこのときに発 表したけれど、まだ科学界にきちんと知られ ていなかった。メンデルの法則の再発見は 1900年になされます。ただ、いろいろ調べて みると、1866年に発表されたメンデルの遺伝 の法則はいろいろな人に配っていますから、 それを引用する論文もちらほらあることが知 られていて、まったく科学界に知られていな かったのではないと言われているらしいので す。

ところがダーウィンはそれについてまった く知らないような感じです。ダーウィンは、 変異というのは代々希釈されると考えていた みたいで、それはメンデルの法則とは相容れ ない。そういう試行錯誤を経て「種の起源」 が書かれているわけですが、再発見のあと 1953年にDNAの構造、二重らせんが発見され、 DNAがどうやって遺伝するかという物質レ

ベルでのメカニズムが提案される。木村資生 が1968年に中立説を出し、具体的に突然変異 が集団の中でどうやって固定していくのかと いうことの理論を確立しました。だいたいこ ういう流れです。

メンデルが独立と優性と分配の法則を出し た。これはすごく美しい法則で、ダーウィン がもしこれを知っていたら、本当にこれを美 しいと思うと思うのですが、どうも当時は、 豆の遺伝の形質が非常に特殊な場合で、一般 性がないと思われていたふしもあるらしい。 そういうことも知ってか知らずか僕はよくわ かりませんが、ダーウィンはこういう遺伝の 法則を知らないで「種の起源」の理論をつく り上げた。

先ほどウシの例を出しましたが、イヌもそ うで、小さなものから大きなものから、たぶ んもう交配はできないと思われるぐらいの形 態の変化を遂げている。ダーウィンはこのイ ヌに関して、「優れた育種家ははっきりした 目的意識をもってより優秀な血統の品種づくりに取り組んでいる。その場合に彼等が頼りにするのが選択である。しかしここで取り上げるのは、だれもが最良の家畜を所有し、繁殖させようとする結果として生じる無意識とでも呼べる選択のかたちである。たとえばキング・チャールズ・マニエル種のイヌはチャールズ王の時代以来、無意識の選択によって大きく変化したものと思われる。イギリスのポインターもこの1世紀で非常に進化した。それは無意識の選択によって徐々にではあるが、きわめて効果的に変わってきた」という記述があります。

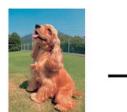
いま出てきたキング・チャールズ・スパニ エルは写真のようなイヌですが(図8)、吻が短くなっていて愛玩用ですが、もともとの このイヌはコッカースパニエルで、猟を行う イヌです。ですからいまのダーウィンの記述 に従うと、選択によって大きく変化したと言 います。当時、チンという吻が短いイヌがイ ギリスにかなり流行ったというバックグラウ ンドがあるらしくて、吻が短いものを無意識 のうちに選択することが起こったらしい。そ れでコッカースパニエルからキング・チャー ルズ・スパニエルという愛玩犬が生まれた。

つまりわれわれの側での選択、子どもの中からそういうのを無意識のうちにどんどん選択をしていく。そういうことでこういう品種が生まれてくる。ポインターもそうです。ポインターもこの1世紀で非常に変化した。もともと非常に気の荒いイヌだったらしいのですが、セッターと掛け合わせることで非常に温和なイヌに品種が改良されている。

ですから一見違う種と見まがうような形態的な変化は選択によって生じるという、われわれにとって非常に身近な例をいちばん最初に持ってきて議論をしています。そのあと自然界でどういうことが起こるか。種は変種から生じると言っています。「私は個体差を何よりも重要だと考える。個体差とは変種として記録に残す価値があると思われないほどの軽微な変種につながる第1歩である。個体差よりも幾分顕著で恒久的な変種をさらに一層明確で恒久的な変種につながる第1歩と見なすのだ。さらにその変種が亜種につながり、次いで種につながるのである。このようにある段階から次の段階へと進むのは、あとで説明する自然選択の積み重ねの差異によるのだ

と言って差し支えない。 そこではっきりと変種と わかるものを、私は発端 の種と呼びたいと思う」 ということで、身近な例 から出発し、実際に自然 界でどういうことが起こ っているかということを 説明します。

ダーウィンの有名なフィンチですが(図9)、同じ章に、「私は何年も前にガラパゴス諸島に隣接した島々に棲息する鳥を比較し、さらにそれらの鳥とアメリカ大陸に棲息する鳥とを比較したことがある。そして種と変



コッカースパニエル (実 猟 犬)



ポインター(鳥猟犬)



キングチャールズ スパニエル (短吻の愛玩犬)

ポインターが一流の猟犬種になるまでには課題があった。初期のポインターは、どう猛であり、訓練に対して反抗的な気質を持つとされていた。これを和らげるために各種のセッターと交配された記録が残っており、成功していると言える。

種との区別がまったと知ださいと知がまったと知がまったと知がまったと知がまができるので、いうがあるでではないがあるでで、はくいうないと種を種のいいがあるでで、ないのではないがはく、はないがでで、はないがで、説がでいるないがで、説がでいるないがで、説がで、説ができないがで、説ができないがで、観察です。ことでは、

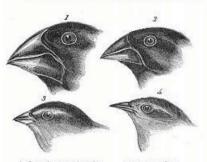
ガラパゴスは先ほどち

ょっと出てきましたが、フィンチのくちばしが島によってそれぞれ違う。これは食性の違いです。果実や昆虫を食べるものとか、種子を砕いて食べる食性の違いによってくちばしががっちりしたものから、そうではないものにいろいろ変化をするということです。

いままでの例を挙げてきて、生存闘争と自 然選択あるいは適者生存ということに言及を します。「生存闘争は変異に対してどのよう に作用するのだろうか。人間にとって有用な 変異がたしかに起こってきたとなれば、それ ぞれの生物にとっても何世代も重ねる間に生 存闘争において何らかのかたちで有利な変異 が起こってもおかしくないとは考えられない だろうか。生き残れる数をはるかに上回る数 の個体が生まれるのだから、生き延びる機会 と子孫を残す機会に最も恵まれるのは、他の 個体よりも少しでも有利な点を持つ個体だろ う。一方、少しでも有害な変異は容赦なく駆 逐されるに違いない。このように差異や変異 のうち、都合のよいものは残り、有害なもの は駆逐されるということを、私は自然選択あ るいは適者生存と呼んできた。」こういう概 念が出てきます。

有名な例は、キリンの首はなぜ長いという ことです。キリンはもともと首が短かった。 多くの子どもが生まれて、子ども同士で生存

『ビーグル号航海記』より



Geospiza magnirostris
Geospiza parvula

Geospiza fortis
Certhidea olivacea

Finches from Galapagos Archipelago

ダーウィンは、ガラパゴス諸島でクチバシの形や生態の異なる13種類のフィンチを採集。

樹上で果実や昆虫を食べるフィンチと、 地上でがっしりとした嘴で種子を砕いて 食べるフィンチがいる。

1.オオガラパゴスフィンチ 2.ガラパゴスフィンチ 3.コダーウィンフィンチ 4.ムシクイフィンチ

図 9

闘争が起こる。そのときにちょっと首が長くて、上のほうの木の実を食べられるものが有利であって、その有利な個体が選択をされ、だんだんキリンの首が伸びた。

こういう自然が選択をするということで、 自然界に現在起こっているいろいろな形態的 な問題を説明しようとしています。ダーウィ ンは、花と蜜との共適応ということも言って います。「自然選択の作用について最も複雑 な例を挙げておきたい。植物に甘い汁を分泌 するものがあり、昆虫はこの汁を好んで求め る。その花蜜を求めてやってきた昆虫に花粉 がつき、その花粉がしばしば花から花へと運 ばれる。こうして同じ花の二つの個体が交配 する。最も多くの花蜜を分泌する花を咲かせ る個体が、昆虫のやってくる機会がいちばん 多くなり、交配する機会もいちばん多くなる ということで、たくさん花蜜をつける植物に 有利に働き、それがだんだん自然選択をされ る」。それがハチによって媒介されるという ことです。

これは有名な例ですが、ダーウィンランというのがあり(図10)、蜜がここにあり、すごく長い距というのが伸びていて、こういうランをダーウィンが見たときに、その時は発見されていなかったのですが、蜜を吸うような長い触覚を持ったような動物がいるに違い

アングレクム・セスキペダレ(ダーウィンラン) と キサントパンモルガニ



「アングレクム・セスキペダレ」マダガスカル原産のラン。 白い6弁の下から黄緑色のストローのよう距(キョ)が伸びている。 1862年にこれを見たダーウィンは、この長い管形の「距」に溜まる蜜を吸う口の長い未知の昆虫がいるに違いないと予言。

没後41年を経て、30cmにも及ぶ口を 持つ「キサントパンモルガニ」が発見さ れた。

アングレクム・セスキペダレを「ダーウィンのラン」と呼ぶ由来である。





「キサントパンモルガニ」

(財)進化生物学研究所所蔵写真

図10

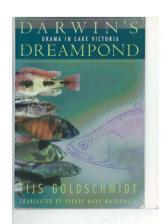
ないということで予言をしたわけです。それ がそののちに発見されています。

ダーウィンはそういうような論理の流れで、 自然選択でいろいろな現象を説明しようとし ましたが、それだけでは説明できないと思わ れるようなものが自然界にはたくさんある。 ダーウィンは非常に素直に自分の学説の難点 を述べています。

「ここまで読んできた読者は、私の説には数々の難点があると思ってきたのではないだろうか。これらの難点はいくつかに分類できる。第1に、種が他の種から徐々に細かい変化を経て生じたのだとすれば、その無数とも言える過渡的な移行形態のものが至るところに見られないのはなぜかという問題がある」。これが第1の問題です。「第2の難点は、たとえばこうもりのような構造や習慣を持つ動物が、著しく異なる他の動物が変化してできたというようなことがありうるだろうか」。

こういう二つの難点があると、自分の学説 について言っています。あとで私の研究の話 を少ししますが、ビクトリア湖にシクリッドという魚がいます。日本語ではカワスズメ魚類と言いますが、ビクトリア湖に関する本が出ていて、"Darwin's dream pond"といいます(図11)。これは日本語訳があまりよくなくて、「ダーウィンの箱舟」と訳されていますが、英語は「ダーウィンの夢見た湖」という名前です。なぜダーウィンの夢見た湖となっているかというと、種と種が出現する直前の状態をビクトリア湖の魚は体現をしている

いま過渡的な移行形態のものが至るところでどうして見られないのか?ダーウィンの時代にはそういうものが見つかっていなかったわけですが、ビクトリア湖にはそういうのが見られるというわけです。これはわれわれがそういう研究で本を出していますが(図12)、コレクションです(図13)。あとで少し仕事の話をしますが、いろいろな魚がいます。非常によく似ているけれど、生態的に非常に違うようなものもいますので、こういうグルー



翻訳本では「ダーウインの箱庭」と訳されている。 図11

プを研究するとまさに種が分岐しつつある最中の状態がどうやって起こるのかがわかります。

もう一つダーウィンが言っていたものは、 先ほどコウモリの例が出てきましたが、コウ モリ以外に眼の例を出しています。「完璧で 複雑な器官と言えば、たとえば眼がそうだ。 さまざまな距離に焦点を合わせ、さまざまな 量の光を受容し、光の球面収差や色収差を補 正するといったような比類なき機能を備えた

眼が自然選択によってつくられてきたのだろうと考えるのは、素直に言って、この上なくばかげていると思える」と書いてあります。

 ということだと思います。

ちょっと飛ばして、地質学的に見た生物の成因という章です。先ほどちょっと言いましたが、種の絶滅について彼は非常に驚いた。「種の絶滅を示す事実を目の当たりにしたとき、私ほど驚愕したものはいないと思う。アルゼンチンのラプラタなどの絶滅した巨獣の化石を発見した。」それは種は、神がつくったものではなく、不変ではない。絶滅もするし、新しくできるということももちろんあるだろうということで、彼は非常に驚いた。これはそのときに見いだされたメガテリウム、ナマケモノの祖先の非常に大きな化石です(図14)。

それで最後の結論でこういうことを言っています。「動物界と植物界という二つの生物に2大区分を見ても一部の下等動物はあまりにも中間的な形質を持っているため、どちらの下位に入れるべきか、博物学者の間で論争されてきたほどである。したがって形質の枝分かれを伴う自然選択の原則に立つと、動物も植物もこのように下等で中間的な生物から共に発達してきたと考えても、あながち荒唐無稽とは言えないようだ。そしてもしこのこ

ビクトリア湖のシクリッド(カワスズメ魚類)

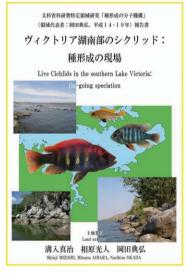




図12

我々がサンプリングしたシクリッドの一例



まさに種が分岐しつつある最中の現場を捉えている!

図13

プンタアルタの化石 (メガテリウム)

ビーグル号での航海中、 ダーウィンは

ミロドン・ダーウィニィ メガテリウム メガロニクス セリドテリウム 絶滅したウマ パキデルマタの歯 トキソドン など

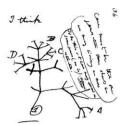
多くの化石を発見した。

メガテリウムは なまけものの祖 先の絶滅種



megatherium americanum 2006-08 took the photo on the "Muséum national d'Histoire naturelle, Paris" LadyofHats

考察ノート のスケッチ (1837) 生命の樹 (Tree of Life)



The better A & B. cans by of wellow. C + B. The friend predation, B.D. withen greater distraction Then frame boats he formed. - Kenry Wellow

図15

とを認めるなら、この地球上に棲息したあらゆる生物がある一つの祖先から変化してきたということを認めざるをえなくなる」と書いています。

そういうことで生命は単一祖先から進化したということまで言っています。こういうことを最初に言ったのはダーウィンかどうか議論があるところで、チャールズ・ダーウィンにはエラズマス・ダーウィンという有名なおじいさんがいるので、彼の頭にはいろいろ情報が入ってきたと思いますが、とにかく一つの大きな本の結語として単一生命から進化したということを断言している。これは有名な考察ノートのところのスケッチで系統樹ですが(図15)、こういうので種の起源がだいたいまとまっています。

それからもう一つダーウィンが言ったのは 性選択、あるいは性淘汰ということです。こ れはダーウィンの本の人間の進化と性淘汰と いうところのイラストに描かれたものですが (図16)、クジャクとかライオンのたてがみ もそうですが、オスがディスプレイをするこ とでメスを引きつける。より良く引きつけた オスがより子孫を残すことができる。こうい うのを性選択といいます。

自然選択と性選択という二つの大きな概念をダーウィンは提案をした。それは、変異がどうして遺伝するかというメカニズムもまったくわからないでそういう理論を出したとい

性選択または性淘汰

性淘汰(せいとうた)または性選択とは、進化生物学における重要な理論の一つ。異性をめぐる競争を通じて起きる進化のこと。クジャクやシカのように雌雄で著しく色彩や形態・生態が異なる動物について、その進化を説明するためにチャールズ・ダーウィンが提唱した。

チャールズ・ダーウィン 『人間の進化と性淘汰』 (1871年)のイラスト



図16

うところがすごいと思います。細かな点では 試行錯誤があり、間違っていることもたくさ ん言っていますが、大きな流れとしては非常 に革新的なことを言った。

ただ、あれから150年も経っていて、現代ではDNAの構造がわかり、遺伝のメカニズムもわかる。そういう状態で、今度は分子レベルでどうして種が分かれるのかを明らかにしなければいけない時代に現代はなってきています。ダーウィンが知らなかった分子レベルでどういうふうにして種が分かれるのかというのを、ビクトリア湖(図17)の魚を材料にしてわれわれのグループが研究をしてきました。そのことを紹介する前にカワスズメ魚類というのは非常におもしろい魚のグループだということを紹介します。

これは英語でダーウィンが夢見た湖という

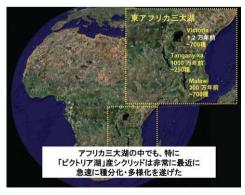


図17

題になっていますが、日本語で訳されたときに「ダーウィンの箱庭」となっていて、あまりよくわからない訳です(図11)。あまりいい訳だと思いませんが、この本の中にシクリッドの紹介の研究が二つ出てきます。この二つは日本人の研究なので、日本の研究者にとってシクリッドの研究はかなり身近な存在です。京都の川那部先生などが、マラウイ湖とタンガニイカ湖に生態学者を何人も派遣されていて、いろいろな研究が進んでいます。

この中で堀道雄先生の研究と佐藤哲さんの研究が紹介されています。堀先生の研究は魚を日干しにすると、どんな魚でもそうですが、口が右側か左側に曲がります。これを右利き、左利きと彼は名付けていますが、どうして魚に右利きとか左利きがあるかという問題です。ミクロレプスというタンガニイカの魚がいて、この魚はほかのシクリッドの鱗を取って食べます。鱗を取って食べるときに、後ろから近づいてきて右側か左側か、どちらかの鱗を引き剝がす。

たとえばこのミクロレプスが左側の鱗を剝がしたいと思ったときには、口が右側に曲がっていたほうが取りやすい。ですから口が右側に曲がっているこの魚は、攻撃の対象となる魚のうしろの左側から攻撃をする。それがずっと長く続くと攻撃される魚は、この魚は左側ですが、左側を用心するようになる。ですからだんだん鱗が取れなくなる。そうするとミクロレプスのほうがいま右のほうに口が曲がっていたのが、左に曲がっている口の集団がどんどん増えてくる。これは頻度依存性の選択といいますが、そういうものの周期がだいたい5年ごとに表れます。

だいたい5年間の周期があって、ある時期は右利きがすごく多くなるけれど、右利きが多くなると鱗を取られる魚が用心するのでだんだん取られなくなり、今度ミクロプレスは左利きがだんだん増えてくる。そういう周期を5年ぐらいで波打っている。そういうような発見です。

もう一つ佐藤哲さんの発見はおもしろいの

ですが、シクリッドに託卵をするナマズとい うのを、彼がNatureに単名で論文を出して います。これはカッコウナマズと言いますが、 恐るべき繁殖様式を持つ。一般的にシクリッ ドはマウスブリーディングといい、口内で保 育をします。子どもが小さいので敵に食われ てしまう可能性がありますから、敵が近づく と子どもたちを口の中に吸い込む。写真はい まこれが膨らんでいますが、いま子どもを口 の中に加えている状態です。こういうのを口 内保育といいます。このナマズは自分の卵を この中に入れてしまいます。そうするとカッ コウナマズは成長が早いので、ほかのシクリ ッドより先に成長して口の中でシクリッドの 卵を全部食べてしまうということが起こりま す。

鳥で見られる託卵というのを、シクリッドの口内保育という性質を利用してナマズが行っている非常におもしろい例です。こういうふうにシクリッドは生態的にいろいろおもしろいことをやっている魚です。ガラパゴスゾウガメの場合ですがダーウィンは、いろいるな島で甲羅が違うということで、異所的な種分化を考えていました。それではいったい同所的な種分化は起こるのか、起こらないのかという問題が一つ課題としてあると思います。

異所的種分化は地理的隔離が起きているわ けですから、お互いに交配をしない。お互い に交配をしないことになれば、それぞれ違う 場所で違う形態を発達させることが起こりま す。しかしながらたとえばビクトリア湖に見 られるようなさまざまな魚は700ぐらいの種 がいますが、地理的隔離が起きているという 感じではない。しかし700ぐらいの種がとに かく存在をする。そういうときにすべてが同 所的に種分化しているかどうかわかりません が、とにかく同所的な種分化ということも現 実としては起こっています。こういうのはダ ーウィンが考えもしなかった、知らない世界 ですが、こういうことが分子レベルでどうし て起こったのだろうか。そういうようなわれ われの問題意識があります。

私どもの研究の紹介をしますが、まず三つの湖です。マラウイ湖とタンガニイカ湖、ビクトリア湖がありますが(図17)、タンガニイカ湖とマラウイ湖は水が透明です。ですから先ほどの託卵の発見はタンガニイカ湖で行われたわけですが、とにかく観察をすることができます。水が透明ですから、行動を観察することができる。ですから京都の研究者グループは、かなり昔からタンガニイカ湖やマラウイに乗り込み、生態的な研究がたくさん発表されています。しかしながらビクトリア湖には日本人研究者がいままで訪れたことがなかった。われわれはビクトリア湖に特に着目をしました。

なぜビクトリア湖に着目をしたかというと、このビクトリア湖が1万2,000年前に生まれた非常に若い湖である。1万2,000年というと人類が農耕を始めるというような時間のレベルで、種が分かれるということを考えるようなタイムスケールではありませんが、このビクトリア湖には700もの種が存在をすると言われています。

非常に最近に種が分岐をしたということは、DNAレベルではどういうことが観察されるかというと、たとえばこのA種とこのB種という形態的に違っているビクトリア湖の種があったとして、ほとんどのDNAは同一である。たとえばどこかに変異があったとしても、機能のない中立的な変異の場合は多型状態といいますが、たとえば一方の種で配列がAだったりGだったりすれば、もう一方の種のDNAの配列も多型状態という点では同じであるという点が予測されます。

ところがこの種はある特定な形態を持っているし、別の種はある特定な別の形態を持っていますから、そのような形態の違いに関与した遺伝子を見てみると、その遺伝子の中はたとえばこちらはAでこちらがG、ある変異がこちらの集団全体で固定しているという例が必ずあるはずであるということをわれわれが考えた。つまり種の中で固定しているような変異を見つけると、種が分かれた原因の遺

伝子を特定できるのではないかというのが、 われわれが考えたことです。

これはもともと僕が分子生物学をやっていたことと関係がありますが、生態学ではなくて分子生物学的に見て、このビクトリア湖に興味を持った。特に何が重要かというと、ものを見ることがすごく重要です。タンガニイカとマラウイは水が澄んでいる。ですから行動を観察しやすい。ところがビクトリア湖は濁っている。光の環境が赤っぽくなる。透明な場合は光の環境が赤っぽくなる。透明な場合は青色になりますが、濁っている場合は赤っぽくなる。そういうようなことで視覚が非常に重要だということを考えて現地のサンプルを収集しようと思い決め、調査隊を派遣することになりました。

私はもともとDNAの研究者ですが、生態 学者と分類学者の方々に協力を求めて一緒に タンザニアに行き、シクリッドの採取とか分 類のフィールドワークをしました。カウンタ ーパートはタンザニア水産学研究所で、 TAFIRIという研究所があります。そこの水 産学研究所の所長さんがもともと住んでいた 家らしいのですが、それをわれわれに貸して くれた。そこはオカダハウスというのですが、 これは僕らが言い始めたのではなく、向こう の所長さんがそういう名前をつけたのですが、 ビクトリア湖の近くの家を借り、泊まりまし た。蚊が多いとか、蛇がいるとか、襲われな いように銃を持った警備員が夜中にずっとこ の周りを回る。家はもちろん鉄条網で隔離さ れているのですが、巡回してくれる。いろい ろな問題がたくさんありますが、そういうの を全部クリアして調査を継続した。

岩場が非常に多いのですが、草のあるところもあります。調査に出発をするわけですが、ご覧の通り水がかなり濁っています。どのくらい濁っているかというのが一つ重要な生態的な環境なので、円盤を沈めて白い輪っかが見えなくなる点で透明度を測定します。刺し網を主に使いますが、刺し網だとえらのところをひっかけるので、えらのところがちょっ

と傷つく。ですから非常に重要なサンプルを 取りたいときは釣りをしたり、電気を使った りすることもあります。

これがわれわれの大発明ですが、シクリッドはさまざまな色を持っているものがいますが、死ぬと10分ぐらいで色を失い、全部真っ黒になる。何が何だかまったくわからなくなる。ですから生きている状態でのどういう色であるかということを写真に撮らないといけない。それはどうやってやるかということで、プラスチックのボックスをつくり、中にスポンジを入れます。中に水が入っていてスポンジとガラスの間に生きた魚を挟み込む。魚が動けない状態で写真を撮ります(図18)。

いま全部でサンプルが2万個体ぐらいありますから、そういう写真をきちんと整理することをやりますが、デジタルカメラがこれだけ普及して簡便化したことも非常に大きい。昔の論文を見ると、新種の記載などもカラーではないから言葉でどこが赤いとか書いてありますが、それでは何が何だかわからない。やはりタイミングとしてデジタルカメラが普及したことと、われわれのこういうサンプリングが成功したことには深い関係があると思います。そういうようなタイミングもあって2万個体くらいの魚をきちんと分類、整理することに成功しました。

近くには研究所があります。それからもう一つ言っておかなければいけないのは、ビクトリア湖では有名なナイルパーチという魚が



図18

います。ナイルパーチが放流された。ナイル パーチは2mも大きくなる魚で、シクリッド をどんどん食べるのでシクリッドは絶滅をし てしまったと一時言われました。われわれは 科学者としてシクリッドの多様性は非常に重 要で、保護しなければいけないものだと思っ ていますが、アフリカの人たちは、魚が小さ いので食べると骨っぽい。あまりみんな食べ ないし、鳥の餌になるぐらいなので、これを 特に保護しようという意識は存在しない。ナ イルパーチは大きくなりますから、身をたく さんつけるので、国の大きな産業として輸出 をされている。そういうことがあるのでシク リッドにとっては非常にまずい状況で、シク リッドはビクトリア湖から絶滅したのではな いかと、一時言われました。

その後ジーハウゼンという人が、ロックシクリッドという概念を出しました。このロックシクリッドは岩場に生えている苔を食べるグループで、岩場にいると大きなナイルパーチが近づくことができませんから、比較的生き延びたグループだというので、沖合にいるような魚はナイルパーチに食べられて絶滅してしまったけれど、ロックシクリッドは生きていますという報告をジーハウゼンという人がしています。

ところがわれわれが行って調査をしてみると、結局ナイルパーチを人間が取り過ぎてしまっているので、だんだんナイルパーチの数も少なくなり、からだのサイズも小さくなっている。そのお陰で絶滅したと思われていた沖合性のシクリッドが少しずつ復活をしている。「失われた種」と思われていたものが、実際は存在しますということをわれわれが見つけているということで、いろいろな種を見つけて先ほど言いましたような本をつくっています(図12)。

先ほどのシクリッドのコレクションは本になっていますが、あれはわれわれの探検をサポートしたJSPS、日本学術振興会の研究費で出版したものなので、もし皆さん方で、魚の種分化を研究したいという方がおられまし

たら、ご一報いただければ本をお送りすることができると思いますので、ご連絡いただければと思います。

いよいよ種分化の問題ですが、先ほどもちょっと言いましたが、ビクトリア湖の場合は濁っている。透明度が高いところと低いところが存在する。われわれはどこを主なフィールドにしているかというと、ビクトリア湖の南のところにムワンザ湾がありますが、ムワンザ湾とスピークス湾の近くをフィールドとしています。この湾の外を見ると、このへんはかなり水が澄んでいますが、ムワンザ湾の中に入っていくとかなり濁ってくる。そういうような生態的な条件でどういうことが起こっているのかを調べた。

これは一つの例ですが、ルブリピニスとル フスという二つの魚がいますが、かなり近縁 な魚です。このペアを透明なところから取っ てきても、濁ったところから取ってきても同 じようにルブリピニスとルフスが取れてくる というのが観察されます。ところがプンダミ リアとニエレリですが、これはあとでまた出 てきますので、ちょっと気をつけておいてい ただければありがたいのですが、プンダミリ アはひれは赤くなっていますが全体的には青 の体をしています。ニエレリは全身がかなり 赤い魚です。ニエレリは非常にきれいなもの ですから、ニエレリというタンザニアの初代 大統領の名前をもらっています。この二つの 非常に近縁な魚の場合は透明なところだとニ エレリとプンダミリアが取れてきますが、濁 ってくると雑種になってしまいます。

先ほどのルブリピニスとルフスの場合は雑種ができない。しかしプンダミリアとニエレリの場合は雑種ができる。濁った状態で雑種ができるというのはどういうことかというと、視覚にお互いの認識を頼っているということが言えると思います。それでどういう研究をしたかというと、先ほどのプンダミリアとニエレリという二つの非常に近縁な魚の光受容体のタンパク質であるオプシンを調べた。オプシンの中でも赤いほうの光を受容する

LWSというオプシンを調べた。

どういうものを持っているかということを 調べたのですが、ここでちょっと多型という ことを説明しないといけません。血液型に興 味のある方がおられると思いますが、僕は BOですが、B型とA型とO型といる。これ はもともと一つの遺伝子が変化したもので、 糖の転移酵素でその性質が変わったもので、 ある人はAの転移酵素があり、ある人はBの 酵素があり、〇はそれが変異でなくなってい ますが、これは一つの座位、ゲノムの中の一 つの場所の変異です。一つの場所で、各個人 で違う遺伝子を持っている。そういうのを多 型と言います。LWSのオプシンがそれぞれ の集団で多型になっている。○型の場合は○ 型のアリルと言いますが、B型のアリル、A 型のアリル、アリルとは対立遺伝子という意 味ですが、アリルという言葉を使います。

それでPというアリルが青のプンダミリアの集団では非常に多い。赤いニエレリの集団ではHというアリルが多い。これは血液型でいうと、インドの人たちはB型が非常に多い。われわれ日本人はA型、O型、B型、AB型で4:3:2:1の割合になって分布をしていますが、アメリカインディアンはO型ばかりです。そういうようなことで多型の場合とO型に固定してしまっているとか、B型に固定してしまっているとかかります。このように一つのアリルだけしか集団が持たなくなる状態を「固定する」といいます。

プンダミリアの場合はPのアリルだけに固定をしていて、ニエレリの場合はHのアリルに固定している。なぜそうなるかというと、Pアリルの場合にはその最大吸収波長というものが544nmであり、短波長側に最大吸収波長がある。Hアリルの場合には長波長側に最大吸収波長がある。長波長側は赤いほうです。短波長は青のほうですが、ある光の異なる波長に合わせて、それぞれ違う対立遺伝子が固定をしているという状態が観察をされた。それに応じて、プンダミリアの場合はほとんど赤の体色を

Sensory Drive: 視覚の適応が引き起こす種分化

Step1.シクリッド: 異なる光の環境(水深、透明度など)に分布を拡大

図19-1

Sensory Drive: 視覚の適応が引き起こす種分化

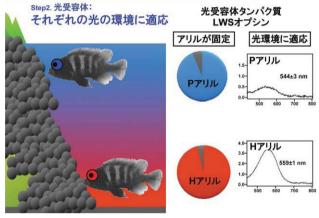


図19-2

Sensory Drive: 視覚の適応が引き起こす種分化

Step3. シクリッド:

適応した光受容体に感度よく受容される婚姻色に進化

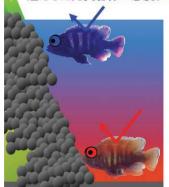




図19-3

持っている。これはオスですが、 先ほどの性選択の場合と同じよう に、メスはこういう色を持たない。 オスがこういう色を持ってメスを 引きつけます。

以下のような性選択の実験が可能です。一方の端にプンダミリアのオスを置いておいて、他方の端にエレリのオスを置いておく。つまりこちらが赤で、こちらが青です。たとえばプンダミリアのメスを真中に入れると、メスはプンダミリア側にコンタクトをする。逆にニエレリのメスをここに入れると、ニエレリ側にどんどんコンタクトする。つまりメスはそれぞれの色を見て配偶者を決めていることがわかります。

こういう実験から婚姻色が性選択の原因になっているということがわかります。いまの実験で好みが青のプンダミリアのメスは青のオスを好み、ニエレリのメスは赤いニエレリのオスを好む。そういう好みが分化をしていることがわかりました。ですから一つのアリルだけに固定するというところで一つの選択が働いている。

これはどうして種分化が起きるかという漫画ですが、ある祖先種がいて、ちょっと違う光の環境にやってきたとする(図19-1)。 先ほども言いましたが、ビクトリア湖は濁っている湖なのでちょっと浅いところのほうが青です。濁っていると青の光が散乱してしまい、赤の光しか残らないので、ちょっと深いところに行くと赤の光に支配されたような光環境になります。そうすると浅い方に住み着いた魚は青の光環境で生活をする。ちょっと深い方に住み着いた魚は、 赤の光環境で生活をすることになります。

そうすると、もともとPのアリルとHのアリルの多型であったわけですが、その多型状態が、この環境が青であるとすると、Pのアリルのほうが短波長側に最大吸収があるとすると、Pのアリルを持っていたほうが青の環境ではものがよく見えることになる。ですからこういう環境でよりよくものが見えることが自然によって選択をされる。それでこの集団のアリルがPのアリルにだんだん固定をしてくる(図19-2)。

同じようなことがニエレリ側で起きます。 Hのアリルのほうが若干長波長側に最大吸収 波長がある。長波長は赤いところを見るわけ ですが、光の環境が赤いということのために、 赤いほうに最大吸収波長のアリルを持ってい たほうが、この中でよくものが見える。そう いう有利な状態があってHのアリルが選択を され、集団全体に固定をしていくということ が起こる。

そうすると対応するメスは、この光の環境 で青の体色を持っているオスのほうがよりよ く美しく見えることになります(図19-3)。 もともと光の環境が青なので、体色が青にな っていたほうがメスによく選択をされる。こ の場合も体色が赤になっていたほうがメスに よく選択をされるということで、それぞれの 体色が変化をする。このグループは青になり、 このグループは赤くなる。これがプンダミリ ア・プンダミリアで、これがプンダミリア・ ニエレリであるということですが、そういう ふうに体色が変化をするとお互いが認識され ないという状況が起きて、最終的に種分化が 成立をする。こういう視覚の適応が引き起こ す種分化をセンソリードライブと言いますが、 センソリードライブは理論的には言われてい たのですが、実際にこういうふうに分子レベ ルで実例をもって証明されたのはこれが初め ての例です。

これはNatureに載ったのですが、Nature の表紙になりまして、News & Viewsに紹介され、2008年のYear in Natureというのか、

20個ぐらい最もよく引用される論文の中に入りました。

ダーウィンの話に戻りますが、ダーウィン 生誕203年が経過した。「種の起源」の出版よ り153年が経過した。それでダーウィンが提 案した自然選択ですが、自然選択の分子レベ ルの現象はかなりたくさん報告されています。 しかし実際に種分化に結びついた例は非常に 稀だと思います。

それから性選択ということも主に生態学的な研究が進んでいますが、この自然選択と性選択が組み合わされて、分子レベルで種分化のメカニズムが明らかになったという例は非常に少ない。私がご紹介をしたこの例が最もいい例だと思いますが、こういう研究をビクトリア湖に棲むカワスズメという魚を題材にすることができたというのでご紹介をさせていただきました。

この講演会をしないといけないということで「種の起源」を読み直したのですが、ダーウィンは、遺伝のメカニズムもわからずによくこれだけ洞察力があるものを出したなというのが素直な印象です。ただ、ダーウィンの時代にはわからなかったことは、もうすでにいろいろわかっていますので、今後はこういう形態の進化みたいなものを分子レベルできちんと説明することが、進化に興味がある分子生物学者、あるいは分子生物学を取り入れる進化学者の今後の課題ではないかと思っています。

ちょっとつたない話ですが、これで終わりにさせていただきます。