



In Laboratory Now

研究室訪問 1

生コンツェルト物たちの協奏曲

本川 達雄 研究室～生体システム専攻



本川 達雄 教授

地球表面の約7割を占める海。この神秘的な世界には、我々の想像もつかないような方法で生活を営んでいる生き物が、数多く住んでいる。彼らは周囲の環境に適応するために、自分の体を独自に進化させてきた。そうした彼らの体の構造には、その生活模様が色濃く表われている。本川研究室では、海の生き物たちの世界を体の構造から垣間見ようと研究している。

海を眺めれば、あなたにも見えるだろう。彼らの生活が。



動かない生き物の生活

あなたは海辺を散歩している。ふと潮溜まりに目をやると、あなたの気配を感じた魚たちは、さっと岩陰や岩の下に隠れてしまう。残ったのはあまり動かない生き物、ナマコやヒトデ、ウニである。彼らは棘皮動物と呼ばれる、海で生活を営む生き物なのだ。

ここで、ナマコを捕まえていじめてみよう。木の棒を探して、これでつついてみる。するとナマコの皮が意外に硬いことに気付くだろう。さらにこのナマコをつついてみると、自分を守ろうとしてさらに硬くなる。つつき始めて数分、不思議な現象が起きる。硬くなっていったはずのナマコの皮が、今度はぐにゃぐにゃに軟らかくなってしまったのである。

なぜナマコは、状況に応じて皮の硬さを変えられるのだろう。秘密は、ナマコの皮を構成する「キャッチ結合組織」という特殊な結合組織にある。結合組織とは、我々の皮膚や腱などを構成している非常に丈夫な組織のことだ。この結合組織の硬さを、ナマコは自由に変えられるのだ。

我々のような普通の動物は、筋肉を収縮することで姿勢を維持している。一方、ナマコは半分以上

上が皮で構成されていて、筋肉はほとんど持っていない。ナマコは、キャッチ結合組織の皮の硬さを調節することによって、身を守ったり、姿勢を維持しているのである。ナマコは、体も大きく動きも鈍い。それなのに外敵に捕食されず、海の中で繁栄しているのは、キャッチ結合組織によるところが大きいのだ。

キャッチ結合組織の特に素晴らしい点は、その省エネルギーにある。キャッチ結合組織は、一度エネルギーを使って硬くしてしまうと、その硬さをい

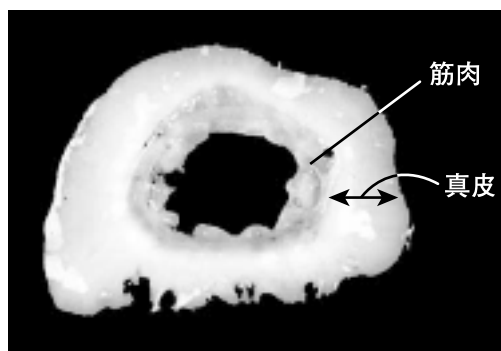


図1 ナマコの断面

つまでも維持できるのである。再度、組織にエネルギーを使えば、元の硬さに戻すこともできる。あたかも、ドアの留め金(catch)のように働くのである。我々が筋肉を使って腕を上げ続けている時は、その姿勢を維持するのにずっとエネルギーを使い続けなければならない。これに対して、ナマコは一度エネルギーを使って皮を硬くしてしまえば、それ以上エネルギーを使うことなく、姿勢を維持できるのである。

ナマコにはエネルギーを節約できるキャッチ結合組織も、我々のような活発に動く動物が使ったら、非常に効率が悪いだろう。体を動かすたびに皮膚の硬さを変えなければいけないからだ。一方、棘皮動物はめったに動くこともないので、省エネになる。キャッチ結合組織は、めったに動くことのない棘皮動物にうってつけの組織と言えるのだ。

棘皮動物が、キャッチ結合組織の硬さをどのようにして変えているのか、詳しいメカニズムはまだ明らかになっていない。この仕組みを明らかにすることが、現在の本川先生の課題である。先生は最近、ナマコから硬さを調節する成分をいくつか発見した。この物質をナマコの皮に与えると、皮が硬くなったり、軟らかくなったりするという。これらの成分が、硬さを制御する神経系や結合組織中のタンパク質の繊維に働いて、皮の硬さを変えているのではないかと先生は考えている。

また、キャッチ結合組織を別の手段に使う生き物もある。ウミユリがそうである。ウミユリは棘皮動物の祖先で、キャッチ結合組織の進化を考える上では、非常に重要な生物なのだ。しかし、ウミユリは深海性の動物で飼育することが困難であるため、これまではあまり研究されてこなかった。そこで、先生は水槽を暗くするなど環境を整えて飼育してみた。すると面白い事実が分かった。深海の底に固着して動かないと思われていたウミユリが、水槽の中を這って移動したのである。ウミユリは体の一部を除いて筋肉が全くない。だから当然、ウミユリは全く動かないものと考えられていたのである。この発見は、世界中の棘皮動物の研究者たちに衝撃を与えた。

ウミユリの体は、植物のように長く伸びた茎とその一端から伸びた数本の腕から構成されている。ウミユリは、腕を使って海底の流れがあると

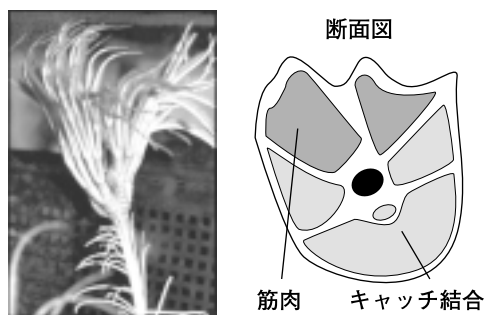


図2 ウミユリの写真と巻枝の断面

ころへと移動する。そして、目的の場所に来ると、茎から生えた巻枝と呼ばれる器官で岩に自身を固定させて、流れに乗ってきた栄養分を食べるのである。この腕と巻枝は、円盤状の小さな骨のパーツが筋肉とキャッチ結合組織で連結されて、円盤の片側ずつに筋肉と結合組織とがくっついて構成されている。常識的に考えたら、腕は筋肉の方にしか曲がらないと思われる。ところが、ウミユリは筋肉の逆側、キャッチ結合の方へも腕が曲がることを先生は発見した。ためにウミユリの筋肉を全て取り除いてみたが、それでもやはり曲がったのである。これは、キャッチ結合組織が収縮して、運動する力を生んでいることを意味している。動物が筋肉を使わないで運動することは、非常に珍しい現象である。これが具体的にどのようなメカニズムで起こっているのか、現在研究中である。

先生は、研究において重要なのは動物全体の見方が変わるような発見だと言う。例えば、動物がどういう性質の組織を持っているのか一つ分かったただけでも、その生物がどのような生活をしているのかがわかる。さらには、その種を含む動物全体の見方が一転してしまうのである。実際、古生代の海の主要な動物であるウミユリが動くという事実は、古生物学者たちに大きな衝撃を与え、古生代の海の見方を変えた。

人間が生き物と正しく接するには、相手の「論理」を理解しなければならない。動物たちの論理とは、つまり生き方だろう。そして、動物の生き方はその体の構造から窺い知ることができる。生き物の構造を研究して、人間と生き物との正しい関係を築くことが、生物学者としての自分の役割だと先生は語った。



1+1=2にならないセカイ

生物の消費するエネルギーは、その体重の3/4乗に比例することが昔から知られている。この他にも、生物のサイズとその生理的な関係にはいくつかの面白い事実が知られている。これらについては、本川先生の著書『ゾウの時間 ネズミの時間』に詳しく書かれているので、ぜひコラム“15億の刻の中で”とあわせて読んで欲しい。しかし、これらは経験則で、その原因についてはあまり詳しくわかっていない。本川先生は、このことについても研究している。

先生がサイズの生物学に興味を持ったのは、今日の生物学の考え方に疑問を感じたからだ。現在の生物学は、分子生物学という学問が中心になっている。分子生物学とは、生命現象を分子のレベル、細胞内のタンパク質やDNAから解明しようとする学問である。しかし、先生はそれだけで生物が本当に理解できるのかと以前から疑問を持っていた。

例えば、ゾウとネズミの細胞を取り出しても、細胞の中身も大きさもほとんど同じである。違うのは数だけなのだ。生物を分子レベルの要素に還元するなら、細胞という要素がほぼ同じゾウとネズミが同じ生き物ということになってしまうだろう。もちろん、そんなことはない。ゾウとネズミを比較するには、細胞の数が違うこと、すなわち動物のサイズに注目しなければいけないのでは、というのが先生の考えだ。

サイズの生物学が経験則に過ぎないのは、実験することが難しく、証明するための手段がなかなか見つからないからである。これを証明するには、同じ種類で大きさの違う個体を用意しなければならない。つまり、同じネコという動物を調べるためには、ゾウのように大きいネコやネズミのように小さいネコが必要なのである。それは非常に困難なことだ。

そこで、本川先生は群体性の生き物に目を付けた。群体は、同じ大きさのクローン個体がいくつも集まって出来ている。個体間に連絡があって、群体が一個の個体のようにふるまうのである。大きくなった群体を切って小さくすることもできるし、それをくっつけて大きくすることもできる。

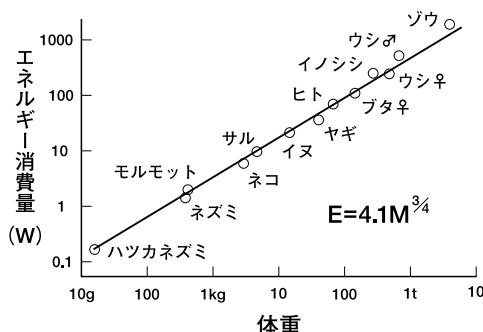


図3 エネルギーと体重の関係

サイズを自由に調節できるのである。先生は、群体性の動物の中でも成長が速く、実験がしやすいホヤで研究することにした。

まず、ホヤのエネルギー消費量を調べてみた。ホヤの時間当たりの酸素消費量を測って、これをエネルギー消費量とした。実験の結果、この値はやはり群体の体重の3/4乗に比例した。群体性の生き物のエネルギー消費量は、個体性の生物と全く同じ関係だったのである。すると、群体性の動物特有の面白い現象が分かった。

群体ホヤは、二個の群体が結合して、一個の大きな群体になることができる。するとエネルギー消費量はどうなるだろう。やはり、エネルギー消費量は体重の3/4乗に比例する。つまり、結合した後の一個の大きな群体のエネルギー消費量は、結合前の二個の群体のエネルギー消費量の和よりも小さくなってしまふのである。これは、個体のホヤが群体全体の大きさを把握して調節していることになる。目や耳などの感覚器官を持たないホヤが、どうやって自分の体の大きさを認識してエネルギーを調節しているのか。先生はこの原因の解明に取り組んでいる。

本川先生は、このような現象を「1+1=2にならない」と表現している。群体ホヤのエネルギー消費量は、1匹と1匹が結合して2匹ぶんより小さくなってしまふ。エネルギーを使わない、さぼる個体が出てくるからだ。

自然界を見渡してみると、実にこのような現象にあふれている。例えばミツバチでは、群れの個

体の数が増えてくると、必ず怠けるような働きバチが出てくる。システムが大きくなると、その中の構成員はさぼり始めるのである。

我々は、昔から1+1は2になると学校などで教

えられてきた。ところが、自然界では必ずしもそうはならないらしい。時には我々の生活の中でも、 $1+1=2$ になることを疑ってみることも必要かもしれない。

生物学のエチュード

本川先生は、生物学の歌を歌って授業をするユニークな先生としても知られている。先生の著書『歌う生物学』(歌のCD 3枚付き)は、学生から主婦まで幅広い層に読まれるベストセラーになった。また、先生の楽譜の一部は、高校の生物の教科書に掲載されている。最近では、研究雑誌『Science』にも紹介されたという。なぜ先生は、生物学に歌を取り入れたのだろう。それには、次のような経緯があった。

本川先生は、一般教養として東工大の全類の学生に生物学を教えている。以前から先生は、生物学を学生にどう分かりやすく、覚えやすく講義するか悩んでいた。

まず先生は、教える内容をよく吟味してみた。生物学は、覚える内容が非常に多い学問である。そのため、常識として知っておかなければならないことも多い。そこで、生物学を専門としない学生にも、将来世の中に出て役に立つ知識を選び出した。しかし、それだけを講義で教えたとしても、やはり学生には退屈だろう。そこで、今度は教える内容からキーワードを集め、それにメロディーをつけてみた。歌詞にして歌えば、授業の単調さから抜け出せる。生徒にも歌ってもらえば、なおよい。こうして、生物学の歌が誕生した。

先生は、歌って覚えることに意味があるのだと言う。科学は論理だから、厳密な論理をおろそかにしてはならない。しかし本当に理解するためには、その論理全体のイメージをつかむ必要がある。科学をきちんと理解するには、論理を司る左脳とイメージの右脳の両方使わなければならない。左右両方の脳の理解が一致することが、本当の理解につながるのだ。イメージを与える詩にして言葉を理解することは、その手助けをしてくれるのだと言う。

さらに、口に出して歌えば、体で覚える事もできる。目で読んだり、耳で聞いただけでは、すぐに忘れてしまう。口に出してみたり、手で書



き写したりすると、なかなか忘れないものだ。歌にした最大の理由は、ここにあると言う。

本川先生は、高校などへ行って出張授業をする時に、自身で作った曲を使って授業をするという。「大学で歌うのは何となく気がひけるので、高校生や子供向けの生物の歌をもっぱら作っています」とのこと。現在、CD付きの絵本を作成中だそう。

こうして本川先生が今までに作った曲は、200曲に上る。そのどれもが先生の手による作詞作曲で、ボーカルを務めているというのだから驚きである。先生の歌声は、研究室のホームページで聴くことができる。ぜひ一度、試聴してもらいたい。



人はパンのみに生きるにあらず

本川先生の研究は、東工大の生命理工学部の中でも特に理学的な内容で、実生活に直接役に立つようなものではない。そのため、なかなか研究資金がつかず、東工大の学生もあまり来ないそうだ。キャッチ結合組織の研究をしている研究者も、本川先生を含めて世界でもわずか数人だという。こうした研究のやりがいとは、一体どこにあるのだろう。

先生は、理学的な研究には工学的な研究にはない素晴らしさがあると言う。常に「脳のパン」になるような研究を先生は心がけている。脳のパンとは、脳の知的好奇心を満たすもの。脳が要求するような知識や論理、そして自然の見方の研究である。一方、実用的で応用性があるような研究は、我々の体が生きていくのに必要な、いわば「体のパン」だ。最近の我々はどうも、体のパンばかり重視しすぎではないだろうか。

現代の社会は消費主義がモットーだ。世の中にはものが溢れ、そこから出たゴミ、そしてそれによる環境汚染の例には枚挙に暇がない。それは、人間が周囲の自然や他の動物のことを顧みずに、体のパンばかりを盲信してきた結果だと言えるのではないか。

我々は、自然や他の動物についてあまりにも無知だ。目隠しをして地球の上を闊歩している。そんな人間に、脳のパンは視界を与えてくれる。脳のパンになるような研究によって、周囲にいる動物たちが見えるようになれば、自然の中にいる人間の位置がわかるようになる。

そうして得た脳のパン、他の動物の生き方を世間に紹介していくことが研究者の使命だと本川先生は言う。研究者は、ただ研究だけをやっても意味がない。動物たちの発する声を、自分の研究や発見した事実を広く世の中に紹介していかなければならない。自分の研究成果をよく読まれる研究雑誌に載せていくことが重要なのももちろんだが、その意味するところを世間に紹介することも必要である。生物の知識を歌にすることも、その一環だろう。

人間とその周囲の生き物。そして彼らが住まう巨大な地球。同じ空の下で、生き物たちはそれぞれの楽器を演奏している。地球という舞台の上で協奏曲を成功させるためには、周囲のいるそれぞれの生き物の音色を聴かなければならない。その手助けをするのが、生物学者の役割ではないだろうか。

私が『ゾウの時間 ネズミの時間』という本を最初に手に取ったのは、高校生の時だった。本を読んだ時の私は、生物のサイズを式で表し、そこから様々な生命現象の関係性を導き出すことができるという事実に、純粋な感動と興奮を覚えた。

そして今回の取材。よもや自分が、あの本川先生の研究室を取材することになるとは夢にも思わなかった。自分の拙文で少しでも先生の情熱や研究の興奮が伝われば幸いである。

本川研究室は、文学部から経済学部まで、様々な分野の出身者が集う研究室だった。本川研究室のユニークな発想は、こうした幅広い視点によって得られているものだと思われた。

二度にわたる取材に快く応じて下った本川先生に、この場を借りて厚くお礼申し上げます。本川先生及び研究室の方々のより一層ご活躍を心よりお祈り申し上げます。

(吉田 圭介)

本川先生の著書

「ゾウの時間 ネズミの時間」 中公新書 (1992)

「歌う生物学 必修編」 阪急コミュニケーションズ (2002)

「時間 生物の視点とヒトの生き方」 NHKライブラリー (1996)

本川研究室のホームページ

<http://www.motokawa.bio.titech.ac.jp/>

15億の刻の中で

動物と一口に言っても、その寿命は様々である。ゾウは50年以上も生きるし、かげろうはわずか数日の間に生を閉じる。彼らは、本当に我々と同じ感覚で生きているのだろうか。我々と同じ時間を過ごしているのだろうか。「サイズの生物学」はそんな疑問に一つの答えを与えてくれるかもしれない。

皆さんは、長く生きる動物として何を思い浮かべるだろうか。ゾウ、くじら、かめなどではないだろうか。一方、寿命の短い動物では、ネズミなどの比較的、体の小さい動物を思い浮かべるだろう。どうも一般的に考えて、大きな動物ほど長生きしそうである。実際、動物の体の大きさと寿命の関係については昔から様々な人が研究してきた。たくさんの動物の調査から、哺乳類では次のような関係がわかってきた。

$$(\text{時間}) = k \times (\text{体重})^{1/4}$$

動物の寿命は、その体の重さの1/4乗に比例するのである。つまり、体重が16倍になるなら、寿命は2倍になる。さらにこの式は、寿命に限らず、動物の生活における様々な時間で成り立つ。心臓が鼓動を一回打つ時間、血が体内を循環する時間、有害物を体外に排出する時間など生物の日常過ごす、ほとんどの時間で成立する。

そうすると、次のようなことが考えられる。動物の何かの動作にかかる時間が体重の1/4乗に比例するのなら、時間の項同士を割り算すると、体重に関係しない数が出てくるはずである。例えば、心臓がドキンと一回鼓動を打つ間隔を考えてみると

$$(\text{寿命}) = k_1 \times (\text{体重})^{1/4}$$

$$(\text{鼓動}) = k_2 \times (\text{体重})^{1/4}$$

となるので、

$$\frac{(\text{寿命})}{(\text{鼓動})} = \frac{k_1}{k_2} = k_3$$

と一定になる。

つまり、動物が一生の間に打つ心臓の鼓動の回数は、一定になるのだ。実際に計算してみても、約15億回となり、哺乳類であれば一定になることがわかる。同様に、動物が一生でする呼吸の回数は3億回、一生の間で消費する体重あたりのエネ

ルギーは30億ジュールと一定になる。

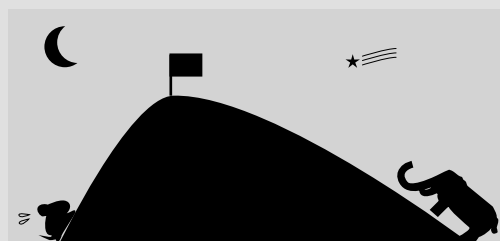
我々人間は、「時計」という物理的な時間を共有して生きている。しかし、動物ごとでは生きている間に過ごす物理的な時間はそれぞれ異なる。生物では心臓の鼓動の回数が、この時計の役割になるのではないだろうか。例えば、ネズミは体が小さいし、数年しか生きられない。しかし、そのぶん心臓の鼓動は速いし、エネルギー消費も激しい。生物的な時間の流れ方は、人間よりもずっと速いだろう。

こうは考えられないだろうか。動物はみな、生きている間に「一生」という一本の映画を見る。この映画には15億の刻みがあり、けれどその数はどんな動物も変わらない。ただし、映画の画質が異なるのだ。同じ内容の映像でも、人間とネズミでは使われる刻みの数(コマ数)が異なる。人間よりネズミのほうが費やすコマ数が多くなるのだ。よって、ネズミのほうが15億のコマを早く使い切ってしまう。一方、人間の見る映画は低画質だが、多くの映像が記録されている。

ネズミの映画に比べたら、人間の映像は1コマの間の間隔が長い。もしネズミが人間の映画を見たとしたら、同じコマ数で長い映像が収められている映画の早さに目を回すだろう。一方、もし人間がネズミの映画を見たら、スローモーションのように遅く見えるのかもしれない。

*人間がネズミの大きさになって世界を見たらどうなるか。非常に興味深い問題である。皆さんも時間があったら、考えてみてはいかがだろうか。

(『ゾウの時間 ネズミの時間』より)



ゾウには登るのに50年以上かかる山も、ネズミはわずか数年で登ってしまう。