

のは山々だと思えます。しかし、本日はものすごくスケジュールが混んでおり、質問の時間はありません。お手元にある質問用紙に、質問を書いて箱に入れてください。その質問と答えをインターネットを通して答えるようにします。この場では質問のやりとりはしません。

生命の話ができたところで、次は、生命の謎を長谷部先生にうかがいます。長谷部先生からは、魅力的な、静かな語り口で、生命に関してすごく深い話がきけると思っています。

●参考文献

- 1 海部宣男・「宇宙の謎はどこまで解けたか」(新日本出版社、一九九五年)
- 2 海部宣男・宮下曉彦・「すばる望遠鏡の宇宙」(岩波新書カラー版、二〇〇七年)
- 3 井田茂・小久保英一郎・「一億個の地球」(岩波科学ライブラリー、一九九九年)
- 4 井田茂・「系外惑星」(東大出版会、二〇〇七年)
- 5 海部宣男・「太陽以外の恒星を回る惑星系」『シリーズ現代の天文学Ⅰ・「人類の住む宇宙」第四章一五、一八〇―二二一頁(日本評論社、二〇〇七年)



はせべ みつやす

自然科学研究機構 基礎生物学研究所 生物進化研究部門・教授。理学博士。

1987年東京大学理学部生物学科植物学教室卒業。91年同大学大学院理学系研究科植物学専攻博士課程中退。同年同大学理学部附属植物園助手、93～95年日本学術振興会海外特別研究員併任(米国パーデュー大学)、96年岡崎国立共同研究機構・基礎生物学研究所助教授を経て、2000年より現職。

専門は進化学。特に植物の発生進化。現在は、世代交代と分化全能性の進化に関心をもつ。

1997年日本植物学会奨励賞、2001年日本進化学会研究奨励賞、05年第1回日本学術振興会賞、第1回日本学士院学術奨励賞受賞。

著書に『発生と進化』(岩波書店、2006年、分担執筆)などがある。

## 見えてきた！ 生命の謎

# 生物はどこからきてどこに行くのか

長谷部

光泰

基礎生物学研究所

海部先生は数百億光年の宇宙の歴史のお話を一時間弱でされ、私はたった四十億年ほどの生物の歴史の話を一時間弱でするので楽だと思われるかもしれませんが、それでもありません。生物は非常に多様です。本日は、この多様な生物が、どのように地球で生まれ、どのようにしてわれわれ人間のように複雑になってきたのかという話の概略をしたいと思います。

### 生物の大きな特徴…多様性

図1は、タイの二千メートルほどの山頂でとった写真で、この一枚に何百種類もの生物が写っています。植物だけでも何十種類、昆虫をいれると百種類を超えることでしょう。地球上のさまざまな場所に多様な生物がいます。

米国のフロリダにあるディズニワールド



図1 熱帯高地林であるタイのインタノン山山頂の写真 この一枚に何百種類の生物、何十種類もの植物が写っている



図2 食虫植物サラセニア フロリダ近郊の湿地帯に自生する

から五分ほど車を飛ばすと、平原が広がっていますが、そこにはかわった植物が普通に生えています。図2は、虫を食べる植物サラセニアです。また、米国の砂漠には、日本のように木がたくさん生えている森とは違ったタイプの森があります。遠くからみてぼつぼつ生えているのはサボテンです(図3)。大きなサボテンの森です。

このような多様な地球を、どう調査するか紹介します。図4は、インドネシアでの写真です。僕らは現地に出向き、山のなかを調査して歩きます。一番効率率のよいのは、道があるときは車を使うことですが、ほとんどの道はドロドロです。木を搬出するための道をトラックの荷台にのって進みますが、その道は雨が降れば泥沼となります。図4は、その泥沼にはまって立ち往生して、やっと脱出したときのものです。

道があるときはまだましです。ほとんどの場所には道がありません。その場合、川を使うと効率率が上がりません。ただし、奥地へいけばいくほど十分な装備の舟はありません。

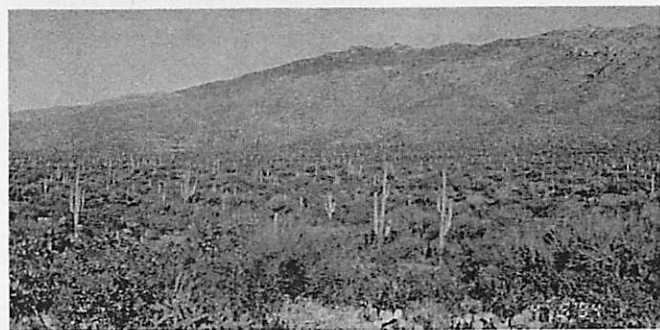
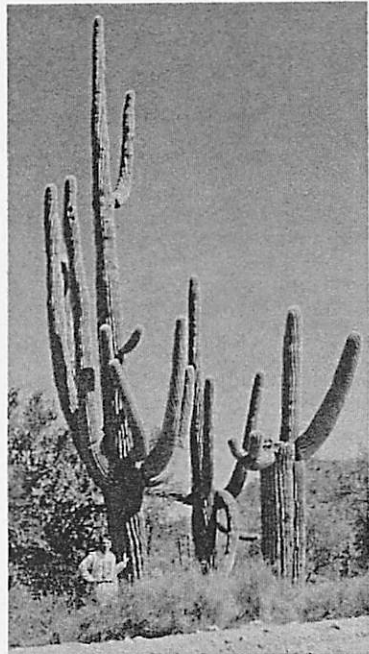


図3 サグアロサボテンの林 (米国アリゾナ州)



たいがい現地の人が日常使っている舟ですから、大人数でのるといろいろの予期せぬことが起こります。図5の舟は、この写真をとった二十分ほど後に浸水してきて、みんな舟から水をかきださねばなりませんでした。

### 実際の調査風景

調査現場に到着したら採集を開始します。図6は二か月間、インドネシアで川沿いに生える植物を調査したときの様子です。二か月間、毎朝七時から夕方三時ころまで、腰まで水に浸かりながら植物採集を続けました。

今日のシンポジウムはさまざまな高度な技術がでてきますが、図7も、ある意味で「高度」な技術です。この木はそんなに高くありませんが、それでも十メートル以上あります。十メートル以上の高さにある花をとるときに一番簡単で役立つのは、高枝ばさみです。庭で使うものをかなり長くしたものです。この操作はなかなか難しく、首が痛くなります。

さらにハイテクがあります(図8)。オーストラリアの方が使っていて感動したものが、散弾銃です。散弾銃で上を撃つと、標本がたくさん落ちてきます。難点は、標本に穴がたくさんあいてしまうことです。

そんなこんなで、二か月ほど調査生活をしますが、そのあいだ、お風呂は川



図4 インドネシアのカリマンタンでの調査風景  
調査地へ向かう途中でぬかるみにはまって立ち往生することもしばしばある

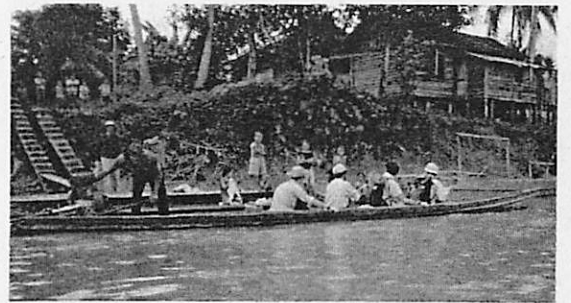


図5 調査地への移動に利用する舟



図6 溪流沿いに生える植物の調査風景 (インドネシア)



図7 高枝ばさみ(矢印)での採集



図8 散弾銃を使った採集風景

です。図9の川も昔は澄んでいて、イルカなどがいたそうですが、今は山を切ったため、泥が流出して茶色くなっています。調査は汗だくになりますから、こんなところで毎日、水浴びをします。僕らが学生のころに調査にいった、先生に、これは汚なそうですねという、「平気や」というので、ならってやっていました。でも、その水を研究室に持ち帰って顕微鏡でみたら、さまざまな微生物がたくさんいました。

ただし、よい点もあります。一か月以上泥水を浴びているので、肌が非常にすべすべになります。

泊まる場所もさまざまです。ヨーロッパの方々はテントや椅子、テーブルを持参して食事をしたりすることもあるそうですが、われわれの調査隊は、土着タイプでした。図10は比較的良好ほうで、酋長さんの家の離れに泊めてもらったときのものです。ちなみに、写っているのは現地



図9 調査後、川での水浴び風景

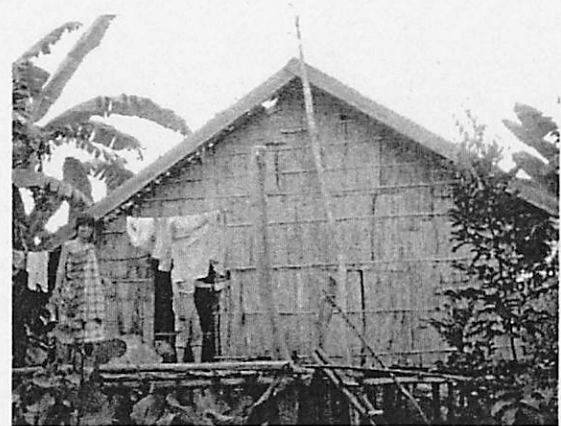


図10 調査地での宿舎

の方ではなく、一緒にいった、今は千葉大学の教授になっている先輩です。

昼間調査をして、夕方、さきほどのような宿に帰って、皆さんが小学校のときにやった押し葉標本をつくっていきます(図11)。標本はすぐく大事です。ここにいろいろな生の情報がはいっています。たくさん標本を収集して(図12)、それらをまとめてみることによる生物の多様性が理解できるようになります。標本というとなんか古臭いイメージがありますが、実際に標本でいろいろなこともわかってきていますが、新しい知識をもって古い標本をみると、もっと新しい発見がたくさんあります。科学の世界は、故きを温ねて新しきを知ると、もっと新しいことがでてくる世界のようなのです。

### 多様な生物の出発点はどこだろうか

この地球には多様な生物がすんでいます。それを多くの研究者が調査して、どんな生物が、どこにいるかほぼわかってきました。たとえば、日本であれば、どんな植物がどこに分布しているか概略はわかっていますし、どこかで植物を採取しても、それが何か、図鑑をみればわかります。ただし、調

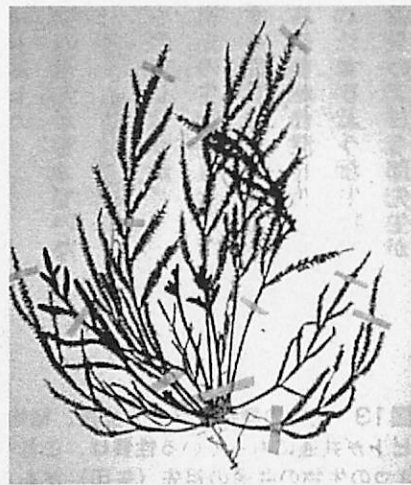


図11 押し葉標本



図12 植物押し葉標本の保存  
たくさん標本を効率的に収集できる



査が十分行われていない熱帯地域などで一か月も調査すると、十種類以上も、現地の人以外にまったく知られていなかった種類がでてきます。そこまで人類の知識はふえてきました。

では、多様な生物は、いつ、生まれたのでしょうか。海部先生の話では、四十億年ほど前に最初の生物が誕生したとのことです。最初の生物は、どんなものだったのかを考えてみます。

僕は大学の卒業研究で遺伝学研究室へいって、「進化の研究をしたい」といったとき、先生が、「だったらうちなんかこないで、タイムマシンをつくつたらいいんじゃないですか」といわれました。確かにそれが一番早い。でも、幸か不幸かまだありません。では、どうやって過去を推測するか。今生きているすべての生物に共通した性質、それは個々の生物で独立に何回も進化してきたと考えるより、全生物の祖先がもっていた性質で、それを今まで多くの生物が引き継いでいると考えたほうが仮定が少なく説明できます。では、動物、植物、バクテリアが共通にもっている性質とは、どのようなものでしょうか。

図13は、生物の類縁関係を家系図と同じように描いたものです。最初、祖先の生物から大腸菌が分かれ、次に、植物と動物が分かれました。これらすべての生物に共通する性質は、ふえるということです。お金は財布にいれておいてもふえませんが、生物は、ぬかみそをかき混ぜないとすぐにウジがわくように、すぐにふえます。最初の生物は、今僕らがイメージするような生物ではなく、もっと物質的だったと考えられています。多分、自然科学研究機構長の志村令郎先生が

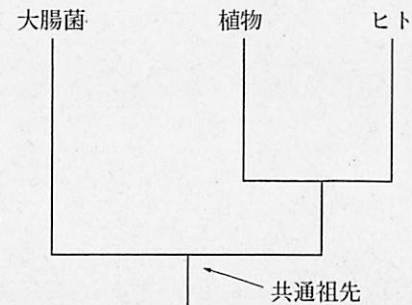


図13 生物の類縁関係 大腸菌、植物、ヒトが共通にもっている性質は、これら3つの生物の共通の祖先(矢印)がもっていた性質である可能性が高い

研究されていたRNAのような物質でした。ある物質が、自分と同じものをつくれるようになったことが生命誕生のキーになった出来事だと考えられます。ある一つのものがまったく同じ二つのものへとふえると、それがまた二つにふえていきます。このようにふえる仕組みができたことが、生物の始まりと考えられます。

### ふえると何が起るか

では、初期の生物は完璧に同じ遺伝子をもった、自分と同じ個体、すなわちクローンをつくり続けてきたのでしょうか。世の中、完璧なものはどうもないようです。僕らも習字で写本などをすると、必ず間違えます。生物はふえることができたのと同時に、間違いを犯し始めました。この間違いが、進化の源です。ある時点で、まったく同じものをつくつたのであれば、進化は起こりません。いつまでも同じものしかできません。ところが、必ずミスをしします。このミスが進化の原因です。つまり、生きていること自体が進化することです。僕らが生物である限り進化は止まりません。

ここで、進化論という言葉が思い浮かぶと思います。ダーウィンの時代には進化論でした。その後、今日は詳しくは紹介しませんが、たくさんの研究があり、現在は、進化学といってよい段階になっています。実験で進化を起こすこともできます。たくさんの実験によって、僕らが現在の段階で理解している、進化の起こる仕組みの概略が次のようにわかってきました。

まず、進化の源泉は、生物が生まれたときに起こった突然変異です。ある集団内に、一つの突

然変異でかわりものができます。ただ、突然変異が起こっただけでは進化は起こりません。かわりものができても、そのかわりものが一代限りであれば、次の代にはかわりものはいなくなります。つまり、かわりものが生き残って子孫をふやし、突然変異を起こした遺伝子を増加させなければなりません。その原動力として、二つの力が考えられます。一つは、ダーウィンを中心とした人たちが考えだした、というか観察データに基づいて帰結された、「自然選択」です。たとえば、本日は男性が多いようですが、何らかの点で女性にもてるような男性が突然変異で生まれたとします。すると、次の世代には、その人のお子さんがふえます。自然選択とはそういうことで、特定の性質がどんどんふえていくことです。

もう一つ、大事な原動力は、米国のライトや日本の国立遺伝学研究所におられた木村資生先生らが精力的に研究された遺伝的浮動です。これは考えてみれば当たり前のことですが、「偶然」です。たとえば、この部屋で起こってほしくありませんが、突然、天変地異が起こり、男性、女性の一人ずつが生き残ったとします。世界中にその二人だけになると、次の世代は、その二人の遺伝子だけをもつことになります。このことは、人間でも南の小さな島などで起こったことがわかっています。生物の四十億年の歴史では、そのようなことがたくさん繰り返されています。つまり、突然変異でつくられたものが源となり、その後、自然選択は必然的に起こります。それと、偶然的に起こる遺伝的浮動によって、もともといた生物が、突然変異をもった生物に置き換わっていくことが進化であると考えられています。

自然選択には、環境によるものもあります。たとえば、非常に暑さに強い二百度までも生きられるような突然変異種がいたら、地球がいくら暑くなっても平気でしょう。また、ほかの生物との戦いもあります。いわゆる弱肉強食です。強いものが生き残るだろうということです。

### 限られた資源、多くの敵——どうやって生き残るか

自己複製し、突然変異によって自分と似て異なる別の生物を生み出していく。すると、もともといた生物と新しく進化した生物のあいだで争い、すなわち、資源の争奪戦が始まります。まるで、戦国時代のような様相だったと思われます。そのようなときにわれわれならどうするか。堀をつくり、城を築いたりします。生物もそのようなことをしたみたいです。

現在生きている生物をみると、ふえる物質は遺伝子と呼ばれています。それは必ず膜に覆われて袋にはいっています。ビニール袋のなかに遺伝子がいっているといったイメージです。この袋を、細胞と呼んでいます。細胞が誕生した後、さらに生物は進化を続けます。そこで多様性をつくりだすことが大事です。これは会社でも戦国時代でも同じです。多様な人材を育成していくことが、僕らの社会を維持するうえで重要です。それは生物も同じです。そこで役に立ったのが、有性生殖です。

突然変異がときどき起こり、かわりものができます。これで、それなりに多様な集団ができます。しかし、有性生殖をすると、もつと多様なものができます。有性生殖とは遺伝子を混ぜ合わせることで、突然変異でできたものと、もともとものを混ぜ合わせて、その中間的なものをつくることができます。これは、お子さんをイメージすればわかると思います。



## 有性生殖はほんとうに有利か

実際、ほとんどの生物が有性生殖をしています。高校の教科書では、有性生殖は生物が多様な仲間をつくって環境変動などに耐えられるようにするために役に立っていると説明されています。ところが、現実には、そうでもありません。

図14は、もともと日本にあるカントウタンポポですが、今ではなかなかみかけなくなりしました。現在、東京周辺でよくみかけるのは、ヨーロッパからはいつてきたセイヨウタンポポです。カントウタンポポは有性生殖をするため、虫の助けで受精しないと種ができません。一方、セイヨウタンポポは無性生殖であるため、雄は不要です。雌だけでよく、虫の力も必要としません。

テレビドラマなどで、冬の河川敷に少年が座っていて、タンポポが一輪咲いているといったような場面がありますが、それはセイヨウタンポポです。カントウタンポポは冬に咲いても虫がいらないため種ができません。一方のセイヨウタンポポは、真冬に咲いても種ができます。どう考えても圧倒的に強いわけです。実際、セイヨウタンポポが日本にはいつてほんの百年足らずのあいだに、有性生殖のカントウタンポポと置き換わってしまいました（最近では、セイヨウタンポポと思われるものにも在来種の遺伝子が流入していることもわかっています）。

では、有性生殖のメリットとは何なのでしょう。環境が変わるから有性生殖が有利だといいましたが、よく考えると、環境はそれほど急激に変化しません。したがって、別の環境に対して有利な能力をもった変異体が現れたとしても、その能力を使う機会はほとんどありません。したがって、その個体の子どもがたくさんふえることにもなりません。ということは、わざわざ有性生殖をしなくてもそれなりにやっつけていけます。というより、タンポポの例のように雄雌が必要な有性生殖は無性生殖に比べて不利なように思えます。しかし、現実をみると、ほとんどの生物は有性生殖をしています。ということは、何か大事なようです。しかし、じつはわれわれはまだはつきりとした答えを知らないのです。

これまでの研究から、まだ実証が必要ですが、有性生殖がある一つの理由として、もっとかわりやすい環境があるのではないかと考えられています。それは病原菌や病原ウイルスです。インフルエンザウイルスのように、ウイルスはどんどん変化します。そのようなものに対して、僕らもどんどん変化して抵抗力をつけていかなければなりません。とすれば、有性生殖は有利です。したがって、有性生殖はウイルスに抵抗するために進化したのかもしれない。その点は、もう少し実験的に調べる必要がある問題です。

## 新しい武器の獲得——細胞内共生

有性生殖は生物の進化の過程で生じました。生物はもっと驚くようなことをして、新しい武器を獲得しました。さきほど海部先生が触れられた植物が酸素をつくることができるようになったのも、細胞内共生の結果です。これは、えげつない進化の仕方です。ある生物がいて、別の進化をしている生物を食べてしまいます。食べて消化するのではなく、自分の細胞中にとりこんで、そ



図14 カントウタンポポの花序（東京大学伊藤元己教授提供）

れを使ってしまおう。それが細胞内共生です。

めったに起こりませんが、この細胞内共生は生物の歴史において少なくとも二回起こったようです。その一回目が、約十億年前です。この共生によって生物はミトコンドリアを獲得しました。酸素呼吸をするバクテリアを細胞中に獲得することで、効率よくエネルギーをつくれるようになりました。

この十年ほどで単細胞生物の類縁関係がかなりよくわかってきました。遺伝子の情報をすぐに読み取れるようになったからです。その技術を使って各種の生物の系図をつくと、いろいろな生物が十億年ほど前にいつせいにふえたことがわかってきました。その原因は、この時期に単細胞生物がミトコンドリアを獲得したことだと考えられています。

ミトコンドリアを獲得するより前に、地球には酸素がある程度ふえていました。ミトコンドリアをもつことによって、ほかの生物よりふえやすい生物が誕生したのです。それが、地球上にどんどん広がっていきます。分布の範囲が広がれば、そのうち交流することができなくなる集団が現れてきます。そして、有性生殖を行う機会を失い、それぞれが別々の種へと分化していきます。それによって多様な生物が生まれたと考えられています。

さらにもう一回、細胞内共生が起こりました。それまで酸素をつくっていたバクテリアを獲得することを植物の祖先がやったのです。それが葉緑体になりました。葉緑体をもった単細胞生物が、さらに、二次的に別の生物に細胞内共生したこともわかってきました。ミドリムシなどがその例です。ここでは、一次的な共生によってできた生物のみを植物と呼んで話を進めます。

## 多細胞生物の進化

さて、約十億年前に、一つの細胞からなるきわめて多様な生物が地球上にふえました。それには、細胞内共生によるミトコンドリアの獲得が大きな影響を与えました。このくらいの段階まではいくつか例外はありますが、生物は単細胞でした。それが、ある時点から多細胞生物が登場しました。われわれは多細胞でたくさんの細胞からできています。多細胞生物の進化には大きな二つの系統があります。動物と植物です。動物と植物は、十二億年ほど前に、単細胞生物から独立に進化して多細胞になりました。そのため、動物と植物はいろいろな点で違ってきます。最大の違いは、動物の細胞は動くことです。たとえば、僕らの血管中を血球細胞が動いています。動物は、受精卵から発生が進んで細胞を動かしながら身体をつくっていきます。

カエルの受精卵が分裂して、一つの細胞がどんどん分割していくとき、少しずつ動いていきます。さらに観察すると、内側にへこんではいりこんでいきます。カエルの原腸陥入といわれる現象です。カエルが発生するとき、細胞が動くことによって身体づくりが進みます。

一方、植物の仲間のコケの葉が伸びる様子は、ずいぶん違います。一回できた細胞はまったく動きません。下から押し上げられるだけです。これが、植物と動物の大きな違いです。この違いによって、発生システムはまったく異なったものとなります。動物は細胞を動かしながら発生しますが、植物の細胞はがちつと固まっていて動けません。イメージとして、手を自分でつねるとわかります。動物の細胞は動きます。しかし、キャベツをどんなにつねっても動きません。動かないから植物は積み木型で、上にどんどん積み上げていく発生をするのです。



動物と植物は、どのように進化したのだろうか

このような動物と植物の違いは、どのように生まれてきたのでしょうか。

祖先の単細胞のときから違っていたようです。動物でも植物でも、祖先単細胞生物の段階では、それぞれの細胞の真ん中に遺伝子があり、それが袋にはいつているような状態でした。細胞内も水で満たされていると考えていただければよいと思います。ただし、ビニールに水をいれ、しばって机の上に置くと、ぺちゃんとしめます。しかし、細胞はそうはなりません。それは、細胞内に骨が存在するためです。それを細胞骨格と呼びます。細胞内にある微小管というたんぱく質の管が細胞骨格です。動物の場合、中心体から細胞骨格が四方八方に伸び出したようになっています。ただし、この中心体の実体は、実際にはよくわかっていません。

それに対して、植物のどこかの段階の祖先単細胞は、細胞の表面に針金をもったような状態になったようです。そして、中心体は存在しません。動物は中心から放射状に針金がでて細胞を立体的にしますが、植物は細胞の外側に針金を巻くようにして二次元的に保っています。つまり、植物の細胞表面に細胞骨格があります。微小管は水道管のようなものだと思っただければ結構です。細胞の表面に骨があることよってきちんとした形態を保っていることは、ある葉を加えて細胞骨格を溶かすと、水をいれたポリエチレン袋と同じように細胞はだらーっと膨らんでしまうことでわかります。

植物が積み木型に発生するとき、細胞骨格は重要です。植物の細胞は動けないため、植物は身体をつくっていくとき、伸びる方向を調整するしかありません。左右に伸びるか、上下に伸びる

かです。そのとき、細胞表面にある骨格が役に立ちます(図15)。

ばねを想像してもらったらよいと思います。よく階段の上から転がっていくリングのばねがありますね。あのばねは、縦方向には伸びますが、横にはけっして伸びません。ところが、横にはばねをつくと、そのばねは横に伸びますが、縦には伸びません。植物の細胞はそのような構造をもっています。細胞骨格がそのような役割をはたしています。骨格ができていると伸びる方向が決まってしまう。

どうして異なった微小管系ができたのか

なぜ、動物と植物で異なった細胞骨格(微小管系)ができたのでしょうか。また、動物の場合、どうやって放射状の骨ができているのでしょうか。また、中心体の実体にはまだよくわからない部分がありますが、中心体のなかで微小管がつけられ、伸び出していきます。

一方、植物には中心体はありません。では、そのつくり方が違うのでしょうか、小さな中心体がいっぱいあるのでしょうか。

ここで、技術の進歩は非常に大事です。ただし、技術が進歩してみえるようになって、それを解釈する人、見出す人がもつと大事です。

私の研究室の村田隆助教授はその眼をもっています。村田先生は、数年前、GFPという光るたんぱく質を使って骨をみえるようにしました。これまで、生きたままの細胞で微小管を詳細に観察した例はありませんでした。多くの人がこれをみえるように工夫していたので

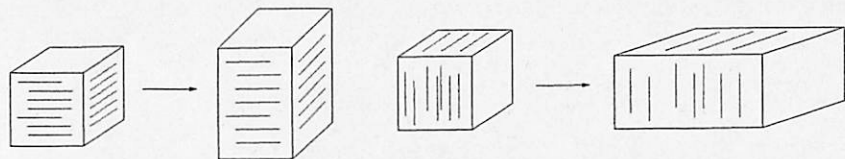


図15 細胞骨格の配列方向によって制御された植物細胞の伸長方向 四角が模式化した細胞、なかの線が細胞表層の微小管を模している

すが、じつは村田先生は誰も気づかなかったある発見をしたのです。

科学者にはかわった人が多く、村田先生も本人がここにいないのでいつてしまいましたが、ちょっとかわっています。なにしろ微細管が大好きなのです。微細管が動く様子を飽きもせず、一週間、いやもつとかな、じつとみていました。いろいろ映像をみていたら、「あれ？」というわけです。微細管はすごいスピードでできたり消えたりしています。撮影した画像をゆっくりみていくことで、微細管のできる瞬間をとらえることができました。すると、何と、新しい微細管がそれ以前にあつた微細管から生え出してくるようにみえたのです。動物の微細管は、中心体から一方的に伸びるだけで枝分かれはしないというのが常識でした。ですから、村田さんのみたものはまさに常識はずれだったので。

一回気づくと不思議です。気づかないと何もみえませんが、一回気づくと、全部みえてしまいます。微細管のほぼ一〇〇%が枝分かれしてできていることがわかりました。植物では、微細管のつくり方からしてまったく違っていました。

単細胞生物ができた段階で、細胞を立体的に保たなければならぬため、骨格系は必須です。その骨格系をつくる時点で、動物は一点から伸ばすようにつくり、植物の祖先は枝分かれをしていったのかもしれませんが。そのころは、生物も多細胞になろうと思っていたわけではないと思います。最初の単細胞段階での微細管の形成方法の違いが、現在の多細胞に進化した後の植物と動物の発生様式に大きく影響を与えたのかもしれませんが。

ただ、村田先生の発見の後、どうも動物の微細管にも枝分かれがあるようだということがわか

ってきました。もしかすると枝分かれの仕方に違いがあるのかもしれませんが。進化は長い年月をかけて進んだものです。話はなかなか複雑なようです。

進化のある時点で起こった変化、単細胞段階での微細管形成方法の違いが、多細胞に進化した後の発生様式に影響を与える。以前に起こったことが、後で思わぬところで役立つということ。これはわらしべ長者と同じです。拾った薬が、その後、いろいろなものにかわっていきます。生物は、このようなパターンの進化をしてきたのです。

### 多細胞生物の多様な形は、どのように進化したのだろうか

生物は単細胞から多細胞へと、どんどん多様になってきましたが、そのメカニズムも少しずつわかってきました。

これもさかのぼって考えてみます。受精卵から発生が進んで、多細胞の身体ができます。最終的な僕らの形態は、発生過程の結果できあがります。たとえば、コケと花の咲く植物(被子植物)では形がずいぶん異なっています(図16)。しかし、どちらも最初は一つの単細胞の受精卵が細胞分裂して、親の形態になるのです。途中、すなわち、発生過程が違うため、最終的な形態が違ってきます。

では、発生過程の多様性は何によって引き起こされているのでしょうか。それは、遺伝子です。発生過程では、たくさんの遺伝子が協働して進んでいきます。受精卵から細胞が二つに割れ、四つに割れて、身体がどんどんつくられていく過程で、たくさんの遺伝子をはたらいています。遺



伝子は会社と同じで、ある階層性、組織をもってはたらい  
ています。ある遺伝子が次の遺伝子に「はたらけ」という  
命令を与え、ある遺伝子が次に、「はたらけ」という命令  
を与えます。そして、ある遺伝子の一部が変化することに  
よって、発生過程が変化してきたことがわかってきました。  
発生過程の結果、形態ができます。突然変異が起こると、  
遺伝子系に変化が起こります。それが進化です。そうする  
と、発生も変化しますし、形態も変化します。どんどん変  
化していきます。遺伝子が進化することで発生過程がかわ  
り、その結果、違う形のもので生まれるようになります。  
生物の形の進化は、発生にかかわる遺伝子の進化によって  
引き起こされたのです。では、生物の形は、どんな遺伝子  
が、どのように変化することで起こったのでしょうか。

生物の形態の進化はどのような発生遺伝子の進化によって  
引き起こされたのか

ここでは花について紹介します。図17左は、ペンペン草  
に近い仲間のシロイヌナズナです。日本では、自然科学研

究機構の志村令郎機構長、岡田清孝基礎生物学研究所長が最初に普及させたものです。大学共同  
利用機関には、日本のなかで新しい科学をどんどんプロモートしていくという役割があります、  
それが非常にうまくいった例としてシロイヌナズナがよく紹介されてい  
ます。

このシロイヌナズナは実験に非常に使いやすいものです。遺伝子の数  
が少ないことも特徴の一つです。生物学でショウジョウバエが役に立つ  
ことはよくご存じだと思いますが、あれも交配実験により遺伝の実験が  
できるからです。シロイヌナズナもそれができます。また、遺伝子を自  
由に操作できる点でも優れた材料です。

ところで、花は非常に不思議です。いろいろな花がありますが、基本  
構造はどれもまったく同じです。外側にくぐがあり、内側に花弁、雄し  
べ、雌しべという順番はすべて同じです。

花は植物にとつての生殖器官です。雄しべの花粉が雌しべについて受  
粉することで、種ができます。この花がどのような遺伝子によつてつく  
られているのかがわかってきました。

ここで、まっとうなものを調べるには、かわりものを解析します。か  
わりものが役に立つのです。遺伝子に突然変異が起こり、ある遺伝子が  
壊れると、かわったものができます。ですから、その遺伝子かわる原

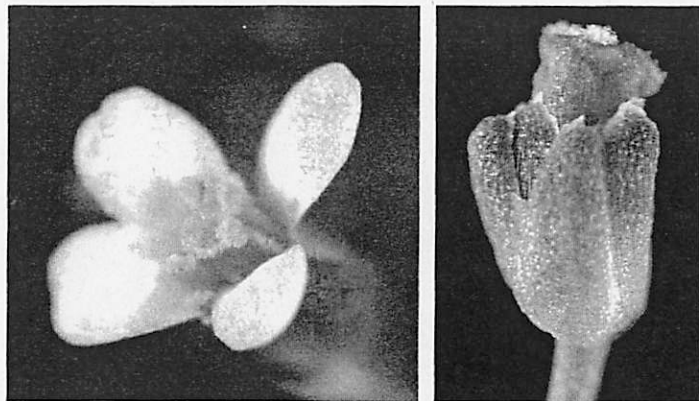


図17 シロイヌナズナの花(左)とリーフィー遺伝子の壊れた突然変異体(右)

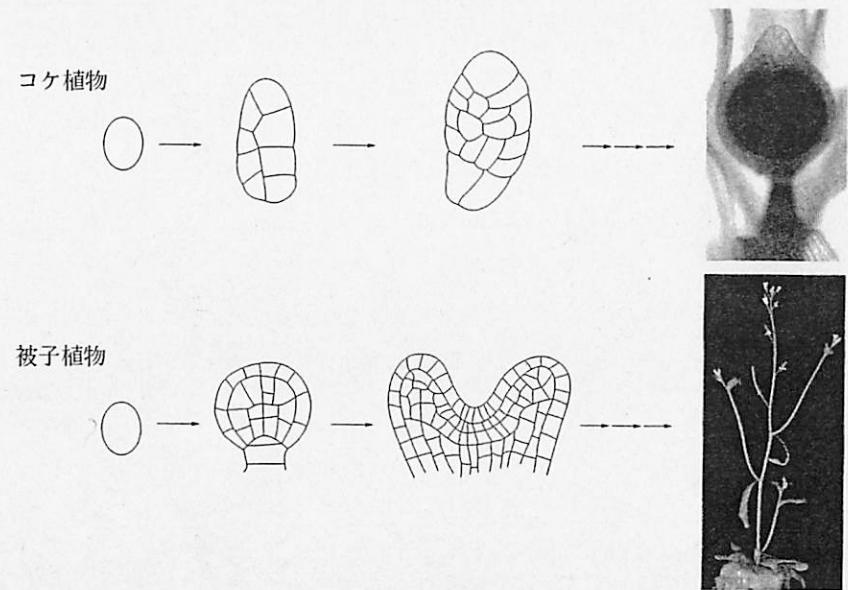


図16 コケ植物と被子植物の発生過程の模式図

困をつくつたはたらきをしていると考えられます。

### 花器官はどのような遺伝子のはたらきでつくられるか

シロイヌナズナもかわつた形態の花が突然変異でできます。雄しべと雌しべが花弁に変化すると八重咲きになります。つまり、雄しべと雌しべをつくる遺伝子が壊れているわけです。あるいは、花弁が雌しべにかわつた突然変異体を解析することにより、花弁や雌しべをつくるためにどんな遺伝子をはたらいているかわかります。その結果、驚くほど単純な仕組みで花ができていくことがわかってきました。米国とヨーロッパのグループが中心になって明らかにしたことですが、A、B、C三種類の遺伝子のはたらきでつくられていました。A遺伝子だけがはたらくと、がくになります。A遺伝子とB遺伝子の両方がはたらくと花弁をつくり、B遺伝子とC遺伝子のはたらくと雄しべに、C遺伝子だけだと雌しべになります。このような遺伝子の組み合わせで、花という一見複雑な構造ができていたのです。

さらに驚いたことに、分子生物学の進歩で、これらの遺伝子の配列を調べると、A、B、C遺伝子は複数ありますが、それぞれたいへんよく似ていることがわかってきました。ほとんどの遺伝子にはマーズ(MADS)ボックスと呼ばれる領域があり、たいへんよく似たアミノ酸配列をもっていたのです。よく似た遺伝子が三種類あつて、それが花をつくっている。それはどういふことなのでしょう。どうして、よく似た遺伝子があるのでしょうか。

さきほどの突然変異の起こり方を遺伝子レベルで考えてみます。普通、突然変異はいくつかの

パターンがあります。たとえば、ある塩基が置き換わつたり、どこかの塩基が欠けたり、新しい塩基が加わつたりします。進化に突然変異は不可欠ですが、必ずしも有利なことばかりではありません。たとえば、僕らに突然変異が起こると、遺伝病の問題が生じたりします。このため、突然変異はよいことばかりではありません。つまり、僕らの身体はすでに世の中に適応し、ある程度進化しきっています。ですから、何か変異が起こると、たいがい悪いほうにいけます。ところが、突然変異のなかには別のパターンがあります。

コピー機を思い出してください。コピーでどんな数をふやしていきます。僕らの細胞がふえるとき、コピーをして遺伝子を子どもに伝えていきますが、コピーをすると必ず一枚や二枚、ミスコピーがでます。六ページが二枚あるとか、五ページが三枚でてきたりします。そのことが大事です。ミスコピーをしたとき、五枚目が二枚あつたら、余つた一枚は紙飛行機にすることもできますし、計算用紙にもなります。遺伝子もそのようなことをします。

### 遺伝子の進化—遺伝子重複と機能分化

このように、複製して新しい遺伝子をつくる時、ミスコピーをして二つになることがたまに起こっているようです。これを遺伝子重複といいます。もともとはたらきは、もともとある遺伝子がするため、遺伝子重複が起こっても生きていくことに支障はありません。ミスコピーでできた遺伝子は何をしてもよいわけです。計算用紙になっても紙飛行機になってもかまいません。ミスコピーに突然変異がどんどん蓄積していきます。それによって、進化が起こつたと想像され



ます。

さきほどのA、B、C遺伝子は、遺伝子がコピーするときふえて、ふえて余ったものが何かごじょごじょとかわっていき、気づいたら花ができていたというように進化してきたことがわかってきました。

いつごろ、遺伝子がふえたか、祖先をたどってみました。陸上の植物に一番近い原生生物は、淡水にいるミカヅキモやシャジクモの仲間の藻類だと考えられています。調べてみると、それらも花をつくる遺伝子をもっていました。遺伝子重複によってA、B、C遺伝子ができたのであれば、祖先はマズボックス遺伝子を一個しかもっていないはずですが、調べると、案の定、ミカヅキモやシャジクモには確かに一個しか存在しませんでした。遺伝子が遺伝子重複によってふえて新しい機能をもったことによって進化が起こったわけです。

マズボックス遺伝子はどのように制御されているのだろうか

もう一つ大事なことは、マズボックス遺伝子が転写調節因子であったことです。たとえば、会社のようにたくさんの遺伝子がはたらいていて、階級があります。転写調節因子は管理職です。課長のように社員の遺伝子に命令をだします。その社員がたくさんはたらいて花をつくっています。転写調節因子はたくさんの遺伝子を制御しています。そのため、転写調節因子に変化が起こると、非常に大きな影響を及ぼすことになります。この転写調節因子の進化は、大きな発生過程の進化を引き起こします。

では、A、B、Cのマズボックス遺伝子は、どのように制御されているのでしょうか。課長がいたのですから、部長もいそうです。確かにいました。米国のグループが花がまつたくできず、葉だけになった突然変異体を解析することによってわかったのです(図17右)。これは花が緑色の葉のようになります。これをリーフィー(LEAFY)遺伝子と呼んでいます。リーフィー遺伝子が部長でした。部長遺伝子が課長のA、B、C遺伝子に命令をだします。そのとき、部長補佐もいます。そのような階層性があったって発生が進むのです。

花弁とがく片をもたない裸子植物はA機能遺伝子をもっているのか

シロイヌナズナでそのような階層性があるのであれば、ほかの植物ではどうでしょう。たとえば、マツやイチヨウなどの裸子植物は花弁とがく片をもっていません。松ぼっくりをいくら探しても花びらはありません。そのため、花弁をつくるA遺伝子が存在しないと推察されます。また、A課長の指示する部長がいけない可能性も考えられます。遺伝子を調べてみると、マツやイチヨウにはリーフィー遺伝子は存在するのですが、A機能遺伝子が存在しないらしいことがわかってきました。

A、B、C課長はリーフィー部長のもとではたらいていますが、では、リーフィー部長とA、B、C課長の関係は、いつ成立したのでしょうか。

それを明らかにするために次のような実験をしました。シロイヌナズナで、リーフィー遺伝子が壊れると花弁などができなくなります。しかし、遺伝子操作によってシロイヌナズナの正

常なリーフィー遺伝子をいれてやると、正常な花を咲かせることができます。

リーフィー遺伝子がどのくらいの植物までA、B、C遺伝子に命令できるか調べてみました。コバノグネツムという裸子植物のリーフィー遺伝子を、リーフィー遺伝子が壊れたシロイヌナズナに導入すると、花が咲きます(図18)。もともとのシロイヌナズナの花とまったくかわらないため、たいしたことがないような気がしますが、この花は花の咲かない植物の遺伝子によってできた花なのです。つまり、コバノグネツムは花をつけませんが、この段階からリーフィー遺伝子によるA、B、C遺伝子の制御関係はできていたのです。

### コケ植物のリーフィー遺伝子

コケ植物と花の咲く植物は五億年くらい前に分岐しました。裸子植物と花の咲く植物が分かれたのが三億

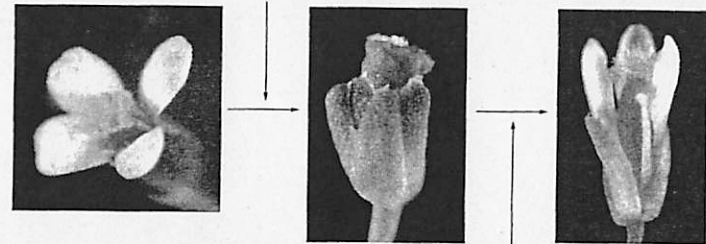
年くらい前ですから、それよりずっと前のことになるわけです。さきほどの実験と同じように、コケの仲間のヒメツリガネゴケのリーフィー遺伝子を、シロイヌナズナのリーフィー突然変異体

に導入してみました。ところが、今度は花をもとに戻すことができませんでした。つまり、ヒメツリガネゴケのリーフィー遺伝子はシロイヌナズナのA、B、C遺伝子を制御できないということです。では、何がかわることによってリーフィー遺伝子はA、B、C遺伝子を制御できるようになったのでしょうか。

被子植物、裸子植物、コケ植物などのリーフィー遺伝子のアミノ酸配列を並べて比較してみました。共同研究を行っていた、ドイツのマックス・プランク研究所のアレクシス・マイゼルさんはおもしろいことに気づきました。リーフィー遺伝子ではA、B、C遺伝子を制御するのに重要な配列がわかっていますが、そのうち一つのアミノ酸、ヒスチジンがヒメツリガネゴケだけアスパラギン酸にかわっていたのです。

では、コケの遺伝子のこの部分を、花の咲く植物のものと同じにしたらどうなるか、アスパラギン酸をヒスチジンにかえてやって、シロイヌナズナリーフィー突然変異体にいれてやりました。僕は絶対うまくいかないと思っていました。なぜなら、ほかにいっぱい違う部分があります。ところが、何と、花が咲いたのです。ということは、進化の段階でほんの少しのアミノ酸配列の変化が花をつくりだした可能性ができました。さきほど、既存の遺伝子に突然変異を起こすと不利になる場合が多いので、遺伝子重複による進化が多いという話をしました。ところが、リーフィー遺伝子の場合、遺伝子重複を介さず、既存の遺伝子に突然変異が引き起こされることによって起こったらしいのです。これは、何とも予想外の結果でした。科学をやることの楽しみの一つは、われわれの予想通りにならないことがしばしばあることですが、これもその一例です。

リーフィー遺伝子を壊す



裸子植物コバノグネツムのリーフィー遺伝子を導入



コバノグネツム

図18 裸子植物リーフィー遺伝子によって花をつけたシロイヌナズナ



## 人間の進化は進化を超えた

遺伝子の突然変異で、既存の遺伝子に変化が起るとたいがいよくないことが起こりますが、ときにはよいことも起こります。また、遺伝子重複によって遺伝子がふえるといういろいろな新しい機能を獲得する可能性が高くなります。これらのことが組み合わさって、僕らのような多様な生物が進化してきたのです。

ただし、まだわからないことが多くあります。たとえば、図19に示したバイオリンムシとハエトリソウ。なぜこのようになったのか、まったくわかりません。これは一例にすぎません。生物のなかにはよくわからない現象がたくさんあります。

今、再生医療がさかんにいわれています。僕ら動物は手を切ったら普通生えてきませんが、植物は葉を差しておくと二日ほどのあいだに、よきによきと生えてきます。どうしてこんなことが植物では可能なのか、まったくわかっていません。生物学にはまだ多くの謎が残っています。

「生物はどこからきてどこに行くのか」というタイトルで、生物がどのように進化してきたかという話をしました。この進化の話をきかれて、皆さん思ったと思います。ひどい話ですよ。弱肉強食だとか弱いものは死ぬだとか、福祉の精神に反しています。非人道的です。われわれの社会ではそんな

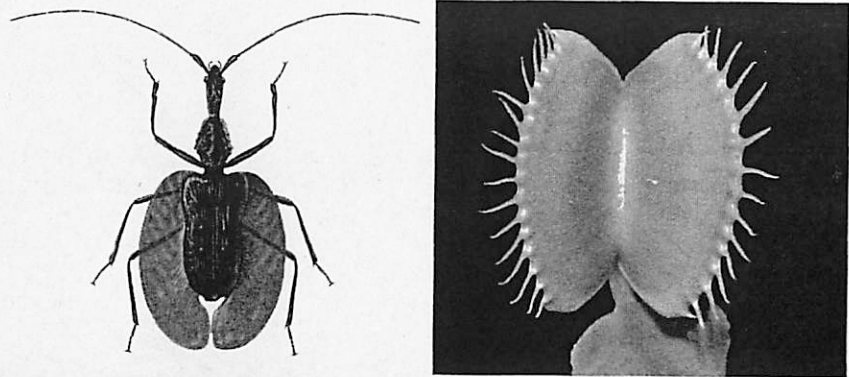


図19 奇妙な形をもった生物 バイオリンムシ (左) とハエトリソウ (右)

ことが起こらないようにしています。でも、こんなことをするのは人間だけなのです。つまり、人間の進化は、生物の基本原則であった進化を超えてしまい、進化の法則に逆らって生きる生物を生み出してしまったのです。超えた理由は、脳の進化です。どんな生物も、すべて遺伝子で、子どもに何かを伝えなければなりません。突然変異は、子どもをつくれなければ、伝わりません。ところが、僕は脳を発達させました。だから子どもをつくらなくても、たとえば、本を一冊書けば、自分のつくりだした情報をたくさん子どもたちに伝えていくことができるのです。その点で、僕は進化を完全に超えています。

では、このあたりで次の柿木先生の脳の話にバトンタッチしたいと思います。ご清聴ありがとうございました。

### 参考文献

- 1 葛西奈津子…『進化し続ける植物たち』(化学同人、二〇〇八年)
- 2 長谷川眞理子…『進化とはなんだろうか』(岩波書店、一九九九年)
- 3 カール・ジンマー著・渡辺政隆訳…『進化』大全(光文社、二〇〇四年)
- 4 石川統、斎藤成也、佐藤矩行、長谷川眞理子編…『シリーズ進化学1-7』(岩波書店、二〇〇四～二〇〇六年)
- 5 石川統…『進化の風景―魅せる研究と生物たち―』(裳華房、二〇〇〇年)