第２６章　自然選択と生命の進化

　ダーウィンが提唱した自然選択による進化の理論は、サイエンスにおける大きな革命でしょう。これは、コペルニクスによる地動説や、ニュートンの運動の法則などと並ぶ古典的な理論と言っていいでしょう。この生命体の進化の理論があって初めて、宇宙の進化の歴史が完結するのです。今回はこの生命体の進化の理論について学んでいきましょう。

ダーウィン以前の理論

ダーウィン以前には、動物がどのようにして発生したのかという決まった理論はありませんでした。それは、再現可能性はありませんので、主に宗教的な問いかけでもあったのです。したがって、宗教によって答えは変わり、それは観測などの裏付けのないものでした。ヨーロッパでは、キリスト教の影響で、すべての種は、６０００年ほど前に神によって作られたということが一般的でした。これにより、すべての種は発生したときから変わらないということです。私たちは、生存している間に種が変わっていくというのはほとんど経験しませんので、ある意味こう考えるのは自然だったのです。ダーウィンの進化論は、２０００年以上にわたるそうした考え方を根本的に変えてしまいました。もっとも進化の考え方を最初に言い出したのはダーウィンではありません。1809 年に生物学者ジャン＝バティスト・ラマルクが出版した本の中で、彼は、種は不変ではなく進化するものだと提唱しました。ラマルクは進化論を最初に提唱した人です。しかし、進化とは最初に単純な生命体から複雑な生命体に自然に変わっていくものとしました。また、環境によって培われた新たな技術により次の世代が変わっていくとしました。つまり、環境によって個体は変わり、それが次の世代に受け継がれていくのです。これに対してチャールズ・ダーウィンとロバート・ワラスの理論では、進化は、このように絶えず向上していくということを意味していません。自然選択による進化とは、同じ種からなる、個体群の中の多様性によっておこるものだとしたのです。つまり進化とは個々におこるのではなく、種全体の特性としておこるのです。これはまた進化のメカニズムを自然に説明した革新的な理論です。それでは、いったいどういう根拠でこの理論が提唱されたのでしょうか？

種の時間的変化の根拠とは？

ダーウィンが彼の仕事をしていた頃は、生物学者と地学者達は化石を集めてそれを解釈し始めていました。最初に、化石は相対的な時代ごとに整理されて行きました。それは、堆積岩のできる地層の比較によって可能だったのです。また、現在の地上では見られない種の化石が多数見つかりました。最初、多くの科学者はそれらは未開の地に住む生物の化石であると思っていました。しかし、現在の生物と異なる化石ばかりが出てくるので、次第にそれはありえないことであると思うようになったのです。そして、ほとんどの科学者が化石で出てくるのは絶滅した種であることを認識するようになったのです。その頃の多くのヨーロッパ人は、これらはノアの箱船に乗り損ねた種であると思ったようです。ダーウィンはこれを種は変化することの証拠であるととらえました。もし、絶滅した種があるのなら、現在の種も過去から変化している証拠であると主張したのです。

三葉虫の化石　初期のものよりも、目だけ泥の上に出して隠れるように進化した

ダーウィンが進化論を発表する以前から、特定の箇所から出てくる化石が、地層ごとに変わっているが似かよった種が出てくることを見てとれたのです。しかも同じ時代の地層からは同じ種が各地で発見されたのです。これはダーウィンの進化論にとって大きな状況証拠となりました。

痕跡器官

人の尾てい骨のように、様々な動物には現在何も使われていない、痕跡器官があることが知られていました。生物学者達は、数千にも及ぶ痕跡器官を収集しました。ダーウィンの理論では、これを自然に説明できるのです。痕跡器官は、種は最初から不変であるとする理論においては全く説明できません。

ひげクジラの骨格　C に後ろ足の痕跡がある

種が関係している根拠は？

ダーウィンがビーグル号での航海で、ガラパゴス諸島に滞在しました。そして、そこで植物や動物の収集をしました。中でもガラパゴスモッキングバードと呼ばれる鳥を見つけます。数年後ダーウィンがロンドンに戻ってきた後に、友人の一人が、異なる島で採取した鳥は別の種であることを指摘しました。極めて似ていますが、色や形が異なるのです。　ダーウィンはこれは、進化という考え方では自然に説明できることに気づきました。彼は、元にそこに住み着いた鳥が、島ごとにそれぞれが独自の進化をしたということで説明しました。それぞれの島ごとに隔離された鳥は、異なる種として進化したのです。このように、類似した種の存在は、進化論の大きな根拠となりました。

ガラパゴス諸島のダーウィンフィンチ

ダーウィンの進化論と科学的方法

さてここまでダーウィンの進化論を支持する証拠を挙げてきました。しかし、これらの観察や化石などの状況証拠は、種は変化しないということを排除する結果ではないことにも注意しましょう。つまり、種が変化しなくてもそれぞれの現象を説明することは可能なのです。たとえば､違う島に似かよった種が最初からいたというようにしてもよいのです。したがって、ダーウィンが唱えたのは、証明ではありません。ダーウィンが主張したのは、種が変化しないという主張よりは、様々なデータはもっと自然に説明が可能であるということを述べたにすぎません。自然選択による進化論は、痕跡器官などを極めて自然に説明できる理論なのです。それでは次に種の進化の直接的な証拠を見る前に、ダーウィンの進化論についてまず詳しくみてみましょう。

自然選択による進化論とはどんな過程か？

ダーウィンの理論で最も重要なのが、進化の仕組みです。それは、自然選択です。これはどのような形でおこるのでしょうか？ダーウィンは次の４つの過程で起こると考えました。

１．それぞれの種が、大きさや形など様々な形質のばらつきのある個体群からなる。

２．それらの形質の内いくつかは遺伝的なものとなり、子孫にも伝えられる。たとえば泳ぎの速い魚の子孫はやはり泳ぎが速い。

３．それぞれの世代では、大人にまで生存できるものよりも多くの子孫が誕生している。その個体群で、子孫を残すまで生存した個体のみが子孫を残すことになる。そのため、環境に有利な個体の子孫が多くなる。

４．自然選択は、ある特性を持った個体が持たない固体よりも多くの子孫を残すときにおこる。

進化は、自然界で自然におこっている現象によっておこるのです。このように、同じ種の中の多様性が非常に重要になります。また、進化するのは個体ではなく、種全体である個体群である点にも気をつけましょう。たとえば、人にはガンになりにくい遺伝子を持つ人が存在するようです。しかし、ガンは通常子孫を残した後に起こることが多いので、ガンになりにくい遺伝子を持つ人は、人類では優勢になりません。このように、非常に良い性質を持っていたとしても、それが子孫を残すことに対して差をつける過程がなければ種の中で優位性がなく、そのため種の主要な特性にはなりません。

このように、自然選択による進化は、遺伝する多様性が生存と繁殖に差をつける過程があるときにおこるのです。

進化論の実験的証明は？

結核は人類の３大疾病の一つです。１９世紀にはパリで 3.3 パーセントの人をしに至らしめ、日本でも江戸時代や明治時代の物語に良く出てくるように不治の病の代名詞でした。それは現在の癌に相当するものだったと言って良いでしょう。しかし、抗生物質の発達と共に、1950 年以降 1990 年くらいまでは、先進諸国からは結核は一掃され、大した病とは見なされなくなりました。元々栄養状態や衛生状態が良ければ、それほど移りにくい病気なのです。しかし、1980 年代後半から、先進各国の結核の患者数は増加していきました。抗生物質の効かない結核菌が出てきたのです。なぜこのようになったのかの明確な証拠はニューヨークのある病院で明らかになりました。

結核菌

ある患者が熱と咳のため、病院にやってきました。胸部エックス線写真と肺の中の菌の培養によりすぐに結核だとわかりました。そこで彼は数種類の抗生物質を投与されます。２週間に一回の投与を行い念のため３３週間続けました。症状はたいしたことはなく、１０ヶ月後には治療開始から、検査では結核菌は検出されなくなりました。しかし、そのたった２ヶ月後には再び発熱とひどい咳が出始めたのです。様々な抗生物質の投与の貝もなくそれから１０日後に彼は亡くなりました。彼の体からは、結核菌が検出され抗生物質に完全な耐性をもっていたのです。いったいこの耐性菌はどこからやってきたのでしょうか？彼の体の中で進化したものかそれとも他からの感染なのでしょうか？この問題の解決のため、結核菌の遺伝子が比較されたのです。最初に入院したときに採取した菌の DNA と耐性菌の DNA を比較しました。その結果、驚くべきことがわかったのです。違いは一カ所だけ見つかりました。それは、RNA ポリメラーゼの合成に対応する DNA のコドンの一カ所が TCG から TTG に変わっているだけでした。抗生物質は RNA を転写する酵素、RNA ポリメラーゼに付着し、転写を妨げることによって作用します。この一カ所の違いのため RNA ポリメラーゼの形は変わり、抗生物質が効かなくなっているのです。遺伝子は変化しやすいので、それ以外に全く食い違いがないということは、他からの感染ではなく、これは患者の体内での増殖のときに進化したのだと考えられます。患者を最初に治療したときにこの変異体、おそらくたった一つの菌が生き残ったものと考えられます。そのため、菌が検出されなくなりました。しかし、この生き残った菌が増殖を初めて再び症状がでるようになったのです。このことからダーウィンの理論が証明されたとも言えます。

まず、DNA の複製ミスによる突然変異により種に多様性が生じます。そして、その突然変異は次に引き継がれていきます。この複製ミスは、通常の状態でも起こっていたはずですが、大多数は普通の菌ですので多くは増殖しませんので少数派です。しかし、抗生物質による自然選択の結果、大多数となったのです。このように、進化とは DNA の複製ミスによる変異によって引き起こされるのです。

農業従事者の体験する進化とは？

農業に従事している人たちの多くは、進化を体験しています。野菜などの作物には害虫が多く、そのための対策が必須になります。たとえば、ハダニは、葉っぱにつくダニで葉っぱを食べ、植物を弱らせたりします。このために、ハダニを駆除する殺虫剤が使われます。殺虫剤を使った当初、ハダニは死滅してしまったかに見えます。しかし、しばらくするとまたハダニが現れます。そしてこのハダニには、同じ殺虫剤が効かないのです。つまり、この殺虫剤に対しての耐性を持った個体が優勢となってしまったため、殺虫剤が効かないのです。農薬会社は、このような耐性のハダニのため、毎年のように新しい殺虫剤を開発していますが、いたちごっことなります。そのため、ハダニ対策は、水に弱い性質を利用したりして、ハダニの育ちにくい環境を整備するなどの対策をほどこしたりしています。

進化とは良くなること？

突然変異は、DNA のコピーミスによって引き起こされることを見ました。これは、その固体が望んで行ったことではないことに注意しましょう。つまり、複製のミスは様々な遺伝子で起きており、そのほとんどはむしろ致命的な複製ミスである場合が多いのです。真っ暗な状況で暮らしているカエルなどには目が退化したものがあります。しかし、これは目が合った方がその維持のために代謝によるエネルギーを用いています。そのため、突然変異で目が退化した固体の方が、生前に有利だったのでしょう。つまり、その目が要らないという状況の中で目の退化は進化だったのです。このように、自然選択による進化とは個体や個体群の意志で行われているわけではないことに注意しましょう。

種の分化はどのようにして起きる？

突然変異体がより環境に適応した個体の場合、それが個体群の中で優勢になっていくことを見ました。しかし、それは一つの種が変化していくにすぎません。しかし、ガラパゴス諸島の鳥の例でもわかるように、ただ変化するだけではなく新しい種に分化していくことがあります。種とは、お互いに生殖可能かどうかで判断されます。種の分化とはお互いに交配可能ではなくなることを意味しています。いったいこれはどのようにしておこるのでしょうか？

異なる島に行ったり、陸地の変動で海によって隔てられてしまうなどしたりすると、個体群がお互いに環境的に孤立してしまうことがあります。このとき、環境に有利となる変動は異なる環境ごとに全く独立におこります。つまり、個体群の持つ遺伝子が独立に変化していくのです。そして、お互いの遺伝子が生殖できないほど変わってしまったとき、種の分化がおこります。つまり、そこで遺伝子の混じり合いが止まるのです。実際陸地の生物の多様化は、大陸の移動によって引き起こされています。

たとえ孤立した環境に置かれなくても、同じ陸地や海でも種の分化はおこることがあります。それは、食生活の変化により、個体群が別々の場所をすみかにすることがあるからです。また、生殖のときの減数分裂のときに誤って、染色体の数が増えてしまうことがあります。それが子孫に受け継がれると、染色体の数が異なるもの通しでは子孫ができなくなり、分化がおこることがあります。

このように、様々な要因により自然選択による種の分化がおこってきたのです。

進化の歴史のキーワードは？

これから生命の歴史を見ていきましょう。

現在生息している生物については、その遺伝子などがわかりますが、生命の変化の歴史を見ていくときの３つの重要な出来事があります。それは、突然の動物多様性の勃発と、適応放散という現象、そして大量絶滅です。今からこれらを見ていきましょう。

系統図とは？

生物学者は、生命体のグループ進化の歴史を示すのに、系統図を用います。これはどのように見たらいいのでしょうか？

系統図では、縦軸が時間を表します。そして分岐点は一つのグループが二つに分化したことを表します。極めて単純ですね。このように、系統図は、生物の進化を表すには非常に良いのですが、いったいどうやってそれを構築していくのでしょうか？

基本的な考え方は、類似性の高い種は、比較的最近分化したのだという考え方です。つまり、共通する部分が多ければ、その分化は現在に近い時間におこり、また異なる部分が多くなるほど、より過去に分化がおこったのだと考えるのです。細菌では、DNA や RNA の比較によってこの異なる度合いを調べることができ、それによってそれまで考えられてきた系統図が変更を受けました。

このように、生物におけるお互いの類似性の度合いを調べることによって動物の系統を調べることができるのです。

化石はどのようにしてできるの？

現在の生物が過去にどのような生物から分岐したものかを調べる直接的な証拠は、化石です。むしろ化石のみが生物の進化の歴史を知る、唯一の証拠と言ってもいいでしょう。

それでは化石はどのようにしてできたのでしょうか？化石の多くは、生命体が沼地や砂などで死ぬことで始まります。そして、それがバクテリアや菌類による腐敗よりも先に、土に埋められてしまう必要があります。たとえば、沼地が非常に酸性が強かったりしてバクテリアが住めないような環境ではそうしたことが起こりますし、沼が通常の水質であっても沼の底に素早く沈んでしまったら腐敗しないで残ります。そして山などの風化による砂などがその上に堆積して行きます。土が堆積して圧縮された後、その個体が朽ちてしまったら、その朽ちて穴となったところに溶けた鉱物が流れ込み形だけ元と等しい化石ができるのです。

また、腐敗が非常にゆっくりしている場合、溶けた鉱石がゆっくり流れ込み、細胞壁などを残したままの化石ができるのです。写真のような木の化石がはこのようにしてできたものです。

希な化石は生息数がすくなかったことことを表すの？

たとえば、私たちの身の回りの生物が死んでもそれが化石になることはありません。それらは朽ちてしまうだけです。このように化石になるということは様々な条件が必要です。このために、化石として残る生物の種類などにかなりの偏りがあることを認識するのが重要です。以下、どのような偏りが生じるのかを見てみましょう。

まず、堆積物によって埋められることが重要です。このような環境としては、川の河口付近や、海岸、沼地などが適しています。山の上では崖崩れのような現象が必要となります。平原では、埋まる前に朽ちてしまいますので、化石には残りません。このように、生物の生息地によって化石化する割合が大きく異なります。また、大陸の移動によって陸地が移動しています。そのため、大陸同士の衝突や、プレートの滑り込みまた岩石循環などによって、化石がマントルの方に運ばれていき、化石として発掘されなくなります。したがって、時間的に古い化石ほど発見されなくなります。したがって、発見された個体数が希な化石でも、その種の生息数がすくなかったのではなく、化石になりにくい生息地などということもありますので、全体でどのくらい生息していた種なのかの判断は極めて困難となる場合があるのです。このように、化石として個体数が少ないのは、必ずしも当時の生息数が少ないことを意味しないのです。

大まかな時代区分と生物の進化

時代区分は、同じ時間感覚を表していません。それは、現在のように放射年代測定が行われる以前には、地質によってその時代が表されていたからです。基本的に全部を覚える必要はありませんのでどういったことがどういった順序で起こったのかだけ理解しましょう。

まず、５億４選２百万年前までを**先カンブリア時代**と言います。その後に続くカンブリア紀以前には、地質では判断できなかったので、前カンブリア時代と一括して呼ばれるのです。この時代には、生命は単細胞生物であり、光合成をするシアノバクテリアの出現と共に、大気に酸素が満ちてきた時代です。

その後に続くのが**古生代**です。古生代には非常にたくさんの動物が出現し、そして生物の大量絶滅で終わります。

続くのが**中生代**です。中生代ははは虫類の時代です。陸地には裸子植物と恐竜が栄えていました。しかし、恐竜は絶滅してしまいました。

そして、それに続いて現在までを**新生代**と言います。新生代はほ乳類の時代です。この新生代には現在も含まれます。

カンブリア爆発

進化の歴史の中でもっとも衝撃的な出来事は、動物の出現です。約５億６選５百万円前に、海綿やクラゲなどが化石の中に現れます。しこもその５０００万年後には、ほとんどの動物の原型に当たる様々な種類の動物が出現したのです。たとえば、殻で覆われた動物や、尾を持ったものや筋肉を持ったものまで現れます。つまり、豊富に存在する生産者であるバクテリアなどを基本に、動物の生態系が非常に短期間の間に築かれていったのです。このような、カンブリア紀における急減か動物の多様性の表れを**カンブリア爆発**と言います。

このような変化はどのようにして起きたのかについては、現存する系統の動物の DNA や染色体の数を調べることによってなされてきています。その結果は、生殖のときのミスにより、染色体数が倍化することが引き金になったという仮説が有力です。つまり、染色体数が増加することにより、新しい情報を多数持つことができるように進化したのだというのｄす。

適応放散とは？

系統図をみると、ただ単に二つに分化するだけでなく、一度に多数の種に分化することがあります。この理由には**適応放散**という考え方が使われます。適応放散とは、一つの種が、多様な生息地に分散し、その結果一度に多数の種に分化することを言います。このような適応放散のために、非常に多数の種がほぼ同時期に出現することになるのです。このような適応放散は、生態系の中で新しい種が生まれそれをえさとすることが可能となることが引き金となることもあります。

大量絶滅

生物はその歴史の中で何度か**大量絶滅**を経験しています。カンブリア紀以降、つまり約５億年前までの間に、５回の大量絶滅がありました。

特にペルム紀末およそ２億５千万年前には、地球上の生物の９０パーセントが絶滅したのです。この時代に大量の溶岩の噴出があり、ほとんどの生命に毒物となる硫化水素が大気中に高濃度に流出しました。また、海面の水位が劇的に下がり、海水が無酸素状態になったことも確認されています。このようなことがなぜ急激に起こったのかはわかっていません。

白亜紀に起こった絶滅では陸上の動物の６０パーセントから８０パーセントが死滅したと考えられています。この絶滅の理由は比較的良くわかっています。それは、当時の堆積岩には通常では考えられないイリジウムという物質が含まれていることがわかったからです。しかもそれが世界中から見つかりました。これは、地球上では、隕石などの激しい衝突によってでしかできない物質なのです。その後、実際に隕石の後がメキシコのユカタン半島の先で発見されました。このときのクレーターの大きさは直径約２００ｋｍです。これから推測される隕石の直径は約１０ｋｍです。エネルギーとして広島型原子爆弾１億個分に相当するエネルギーです。このときの衝撃では、地球最大の津波が各地を襲い、吹き上げられて硫黄化合物が硫酸の雨を降らします。また、大気を覆ったちりは、太陽の光を長期間にわたり覆い隠し、冬の状態がしばらく続きます。その後、生物による光合成が少なくなり２酸化炭素濃度の上昇とともに、温室効果のため暑い日が数千年にわたり続くことになるのです。生態系を完全に破壊しました。しかし、恐竜が絶滅したのにもかかわらず、なぜほ乳類は生き延びられたのでしょうか？もちろん恐竜の大きな体では食料が多く必要であるからというのが恐竜絶滅の理由の一つです。しかし、ほ乳類とそれほど変わらない大きさの恐竜類も絶滅しています。そのため、この恐竜の絶滅の理由はまだ解かれていない問題でもあるのです。

生物の多様性と年代　単位１００万

地球と生命の歴史

生命すべてが単細胞生物 ⟷ 多細胞生物が広がる

冥王代 4570 – 3800

- 太陽系の形成
- 地球が固まる
- 月の形成
- 水の出現

始生代 3800 – 2500

- 隕石の頻繁な落下が終わり
- 冷えて最初の海が出現
- 生命の出現
- 光合成を行うシアノバクテリア出現

地形は不明

原生代 2500 – 542

- 真核生物の出現
- 光合成をする真核生物出現
- 性別のある生物出現

地球のほとんどは海と氷

カンブリア紀 542 – 488

藻が大繁殖
海に無脊椎動物多様化

- 無脊椎動物の多様化
- 節足動物の出現
- 棘皮動物（ウニ・ヒトデ）出現

超大陸ゴンドワナ出現

オルドビス紀 488 – 443.7

ヒトデやウニが繁殖

- 陸の植物出現
- 菌類出現
- えら呼吸の魚出現

寒冷な気候
ゴンドワナが氷に覆われる

シルル紀 443.7 – 416

珊瑚礁拡大

デボン紀 416 – 359.2

森林の形成
魚の多様化、両生類

- 最初の昆虫
- あごを持つ魚出現
- 維管束植物出現
- 空を飛ぶ昆虫出現
- 種子植物出現
- 葉を持つ植物出現

超大陸ローレンシアがゴンドワナの北に誕生
気候は温暖

石炭紀 359.2 – 299

昆虫の多様化
両生類の多様化

- は虫類出現

ペルム紀 299 – 251

石炭を作る沼地が減少

- ほ乳類に似たは虫類出現
- 導管を持つ植物出現

超大陸パンゲアが形成される
温暖な気候続く

三畳紀 251 – 199.6

裸子植物、陸に植物が上陸
Pangea 内部は広大な砂漠

- みつを吸う昆虫が出現
- 恐竜の出現

パンゲアがそのまま
温暖な気候が続く

ジュラ紀 199.6 – 145.5

恐竜が多様化

- 最初のほ乳類
- 恐竜を食する恐竜の出現

パンゲアが分裂

白亜紀 145.5 – 65.5

花をつける植物が多様化

- 花をつける被子植物出現
- 鳥の出現
- 百合の出現
- ハチとアリの出現

ゴンドワナ分裂

インドが分裂

パレオジン 65.5 – 23.0

哺乳動物多様化

被子植物多様化と受粉する昆虫の多様化

暁新世 65.5 – 55.8

始新世 55.8 – 33.9

- 馬の出現
- 霊長類出現
- クジラの出現

漸新世 33.9 – 23.0

- 類人猿出現

大陸が分裂していき
インドがユーラシアに
衝突

アフリカが乾燥
草原が出現
アルプスとヒマラヤが
形成される

ネオジン 23.0 – 1.81

草食動物の多様化

中新世 23.0 – 5.33

鮮新世 5.33 – 1.81

大陸は現在とほぼ同じ位置に
南極が氷に覆われ始める

第四紀 1.81 –

- ホモサピエンス出現

氷河期

キーワード