

進化論入門

1. 「盲目の時計職人」より

ペイリーは「自然神学」を次の有名な一節で始めている。

「ヒースの荒野を歩いているとき、石に足をぶっつけて、その石はどうしてそこにあることになったのかと尋ねられたとしよう。私は恐らくこう答えるだろう。それはずっと以前からそこに転がっていたとしか考えようがない、と。誤っていることを立証するのは、そうたやすくはあるまい。ところが、時計が一個落ちているのを見つけて、その時計がどうしてそんな所にあるのかと尋ねられたとすると、こんどは石について答えたように、よく知らないが恐らくその時計はずっとそこにあっただろう、などという答えはまず思いつかないだろう。……その時計には製作者がいたはずである。つまり、どこかに、ある目的をもって時計を作った、つまり時計の作り方を知り、使い方を予定した考案者が存在したに違いない。……時計にみられるあらゆる工夫、あらゆるデザイン表現が自然の作品にも見出される。ただ、自然の作品は、測り知れないほど偉大で豊富である点が時計と異なっている」。

……ペイリーは眼を望遠鏡のような設計された道具と比較し、「望遠鏡が視覚を助けるために作られたということが自明であるのと全く同じように、眼が視覚のために作られたということが証明できる」と結論する。……ペイリーの議論には熱意のこもった誠実さがあり、当時の最良の生物学的知識が込められている。にも拘わらず、それは間違っている。見事なまでに完全に間違っている。望遠鏡と眼、時計と生きている生命体とのアナロジーは誤りである。見かけとは全く反して、自然界の唯一の時計職人は、極めて特別の働き方ではあるものの、盲目の物理的な諸力なのだ。本物の時計職人の方は先の見通しをもっている。心の内なる眼で将来の目的を見据えて歯車やバネをデザインし、それらをどう組み合わせるかを思い描く。ところが、あらゆる生命がなぜ存在するか、それがなぜ見せかけ上目的をもっているように見えるかを説明するものとして、ダーウィンが発見し、今や周知の**自然淘汰は、盲目の、意識を持たない自動的過程であり、何の目的も持っていないのだ**。自然淘汰には心もなければ心の内なる眼もありはしない。将来計画もなければ、視野も、見通しも、展望も何もない。もし自然淘汰が自然界の時計職人の役割を演じていると言ってしまうのなら、それは盲目の時計職人なのだ。私はこうしたことをすっかり説明するつもりだし、それ以外にもあれこれ説明するだろう。ペイリーにあれほどまでに畏敬の念を懐かせた、生きている「時計」の素晴らしさを矮小化するつもりだけではない。それどころか、この点でペイリーは、畏敬の念から更に前進することさえ出来ただろうという私の思いを描いてみたいと思う。……

（「盲目の時計職人」リチャード・ドーキンス／訳・中嶋康裕、他：早川書房 p22~25）

Richard Dawkins(1941~)による上記図書は「進化論の可能性を極限まで追求した不朽の名作」と評されています。これからこの図書や「眼の誕生」や他の資料の助けを借りてダーウィンによって拓かれた「進化論」、即ち、「生命は地球の環境の下で単純な物質の組み合わせから生まれ、**突然変異と自然淘汰**により、今日の姿にまで進化して来た」ということについて説明したいと思います。

なお、上記の文中のペイリーは、18世紀の神学者で、引用された彼の文は1802年に出版された「自然神学——或いは自然界の外貌より蒐集せられし、神の存在と特性についての証拠」にあり、神が生物をデザインしたとする「デザイン論」「創造論」の有力な著書です。進化論以前は、生命のような複雑なものは創造主である神の被造物であると信じられて来ました。

進化論は「創造主は無関係だ。生命は地球の環境下で自然の法則の下に発生・進化してきた」と主張します。このテキストでは進化論の主張を理解するために、ペイリーが「創造者でなければ決して創れない」と主張する眼が進化論で説明できることを示したいと思います。

2. 生物の遺伝情報を担うDNA

AHK テキスト「地球と生物」の「4.生命の誕生」で既にドーキンスが「祖先の物語(The Ancestor's Tale)」(小学館)の中で使っている造語**コンセスター**(共通祖先 Common Ancestor ⇒ Concestor)が出ていました。そこでは「人間から遡って祖先を共にする生物の**生命樹**の出発点を尋ねると、約 40 億年前の海中で誕生した**コンセスター**39 辺りで地球上の全ての生物は合流する」と述べています。

2・1 DNAとは

これらの全ての生物は、DNA (デオキシリボ核酸 Deoxyribo nucleic acid) と呼ぶ物質の上に書き込まれた遺伝子(遺伝情報を伝える素子)により、生物としての形態・機能等の諸特性を前の世代から受け継ぎ、次の世代へと受け渡します。

DNA をモデル化して描いた右図(「生命の設計図」/ニュートンプレス p83)で説明します。

反時計回り二重螺旋の中央部で**アデニン(A)**は**チミン(T)**と、**シトシン(C)**は**グアニン(G)**と呼ばれる4種の「**塩基(Base)**」(酸と対になって働く物質)と呼ばれる分子が互いに「**水素結合**」と呼ばれる強からず弱からぬ絶妙な結合力で夫々の螺旋構造体を結びつけています。四種の塩基はA+T、C+Gの組でしか水素結合しません。

各塩基は「**デオキシリボース**」と呼ぶ「**糖類**」(炭水化物とほぼ同義)と結合して「**ヌクレオチド**」と呼ぶ分子を構成し、「**リン酸**」と結合して一本の螺旋構造体を作ります。

塩基の並びは「**塩基配列(Base sequence)**」と呼び、これが**遺伝情報(生命の設計図)**の基盤になります。塩基は連続する3対で一つのアミノ酸を指定しており、この3対の塩基の並びを**コドン(Codon)**と呼びます。

細胞核内にあるDNAの或る遺伝子部分から一旦RNA(リボ核酸 Ribonucleic acid)に情報を転写し、RNAが細胞核から出て細胞内でアミノ酸を集めて、それらの連続結合体であるタンパク質を作ります。

その時にDNA上で**チミンT**であった個所だけはRNA上では**ウラシルU**に変化します。

DNAから遺伝情報を読み込み始めるRNA上のスタート点「**開始コドン**」はAUGであり、**メチオニン**と呼ぶアミノ酸を指定しています。このため、生命を形作る全てのタンパク質の開始点はメチオニンから始まっています。ここから読み始めて、アミノ酸合成に必要な情報をRNAに転写しながら何のアミノ酸も指定していないUAA、UAG、UGAの3種の「**終止コドン**」の何れかに至ると、この遺伝子部分に関するRNA合成作業は終了します。

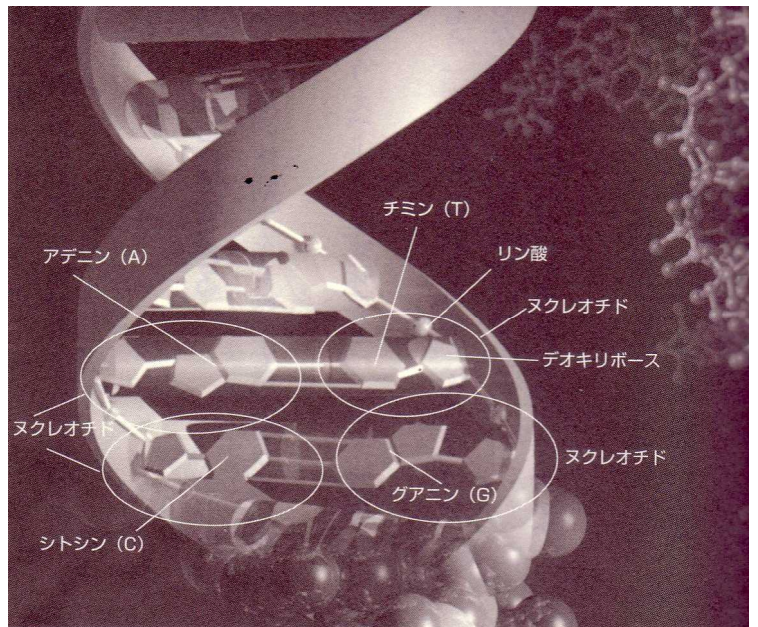
右図に真核生物の細胞内部のモデル図(Wikipedia: リボソーム)を示します。

①核小体で転写を終えたRNAは

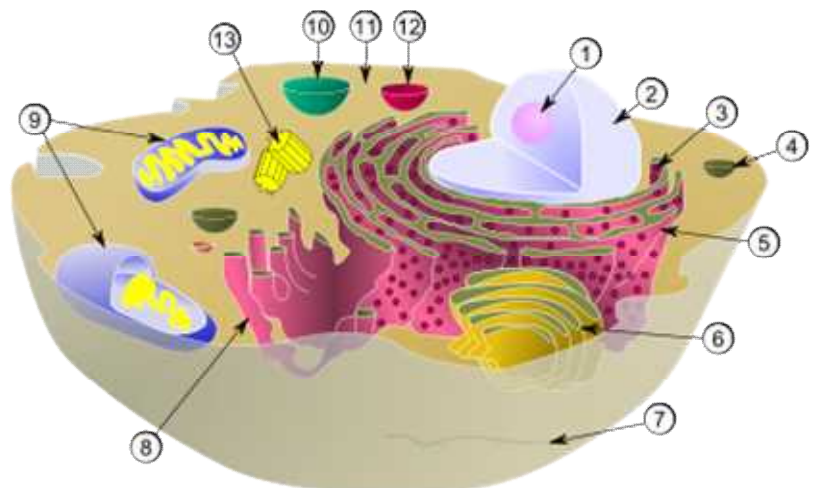
②細胞核を出て細胞質まで移動し、

③リボソーム(Ribosome)の働きでRNAに対応するタンパク質を合成します。

図中の⑨**ミトコンドリア**は酸素を使ってエネルギーを作る**細菌**の一種が真核細胞に取り込まれて**共生状態**になったもので、**遺伝解析**で重要な役割を持つ素子です。



DNA のモデル図

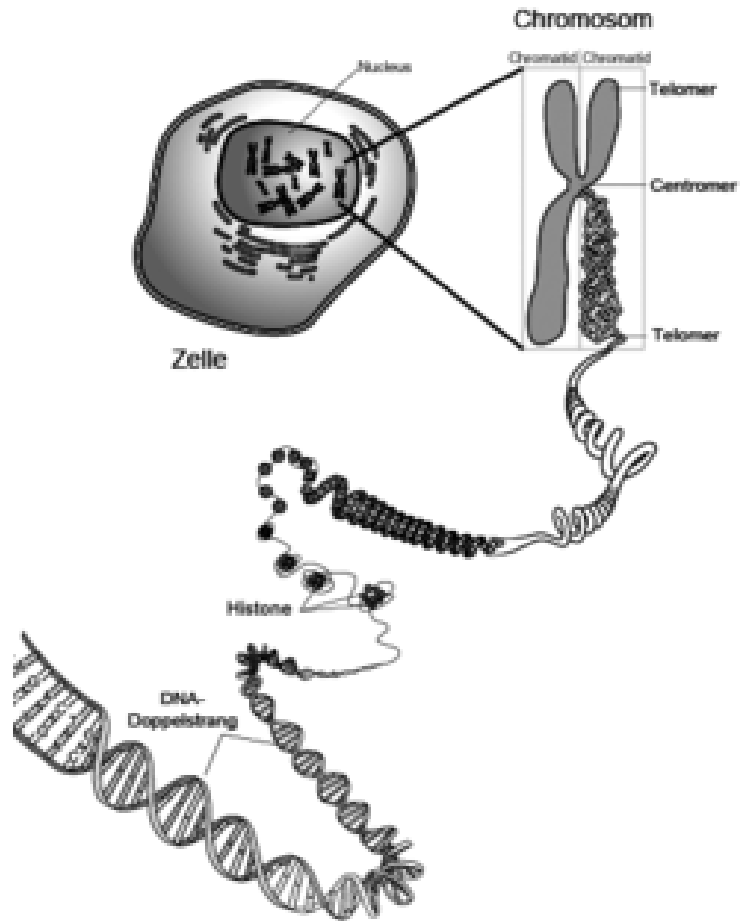


さて、この RNA は遺伝子からリボソームまで遺伝情報を届ける役割を担うことから、mRNA(メッセンジャーRNA)と呼んでいます。タンパク質は mRNA の働きで次々結合させられる瞬間は直線状に並んでいますが、アミノ酸から枝状に出ている分子間の化学結合力(接近した分子間の反発力や吸引力)の働きで自律的に複雑な立体構造を作り上げます。

2・2 ゲノムとは

ゲノム(Genome)とは生命の設計図の基本要素である**染色体(Chromosome: 塩基性の色素で着色され易いことから名づけられた)の一組の集まり**を呼びます。ゲノムは遺伝子(Gene)と染色体の複合語です。

染色体を構成している基本物質が DNA です。右図(Wikipedia:染色体)の左下の螺旋体が DNA、それが図の中央で**ヒストン**と呼ぶポピン(巻き棒)に2回ほど捲きついたものが凝集して右上のX型をした**染色体**の一方になっています。2本で1組となった染色体が左上の細胞核の中に在ることを示しています。



2倍体の遺伝子多様化戦略: バクテリア(真正細菌)やアーキア(古細菌)は**1倍体**(染色体1本でゲノム1セット)です。このため、次の世代もこの染色体をそのまま増殖させるので、クローンとしての増殖になります。

動物の多くは**2倍体**(染色体2本でゲノム1セット)です。ヒトの場合、生殖時に精子と卵子から来た各1本ずつの**23種類**の染色体がペアになって2本が平行になって中央部で交差状に結合し、計**46本**の染色体が右図の右上のようにX型の23組のペアを作ります。

次の世代に遺伝情報を引継ぐ時は、精子と卵子が夫々形成される時に、一旦2本の結合を解いて1本の染色体にします。この時に前の世代から来た通りの染色体に戻るものもあれば、交差部分で右上と左下・左上と右下で交換して夫々1本になる場合も有り、部分的に同じ遺伝子座(特定の遺伝を司る部位)間で遺伝子を交換する場合もあり、各世代毎に大きく異なる特徴を持つ個体が発生します。遺伝情報のかき混ぜ効果です。このメカニズムは2倍体(含む多倍体)の生物の遺伝情報に有効に多様性を与えることができ、災害や環境激変や疫病流行等の非常時に、その淘汰圧に耐える個体が生き延びて**種が存続できるチャンスを高めます**。その意味からも、精子と卵子の組み合わせはできるだけ遺伝情報の中身が異なる者同士から次の世代が生まれることが望ましいのです。悪い実例を挙げると、アイルランドでは最も生産性が高い単一種(クローン)のジャガイモを主食として栽培していましたが、1845~46年の胴枯れ病でジャガイモが全滅し、100万人が餓死し、100万人が飢餓難民としてアメリカへ移住する大災害を蒙っています。農作物の多様性の確保は人類存続のためにも必要なことなのです。

2本の染色体の同じ遺伝子座に同じ病気や奇形を発現する遺伝子が揃っている場合にだけ現れるのを「**劣性遺伝**」と呼びます。2本1組の染色体の一方に遺伝子異常があっても、もう一方の染色体の同じ遺伝子座の正常な遺伝子の働きで形質的(表に表れる形で)異常は発生しません。だが、両親に同じ遺伝子異常があると、もはやそれを救うことができません。多くの社会や宗教で近親者間の結婚がタブーとなっているのは、異常

遺伝子が2本の染色体の同じ遺伝子座に揃う確率が高く、重篤な劣性遺伝が出現し易いことが経験的によく知られているからです。

多倍体と染色体本数：動物の殆どは2倍体で、ウマとロバの雑種であるラバ(一代限りで、繁殖能力はない)などは4倍体です。植物には多倍体が多く、多倍体であることが農作物としての有用性の原因となっている場合が多いのです。ジャガイモは4倍体、普通コムギは6倍体等です。

参考までに染色体の本数の例を挙げてみましょう。ショウジョウバエ8/ハト16/イネ24/ヒト46/チンパンジー48/イヌとニワトリ78/コイ100/チョウ380/シダ約1200です。染色体の本数は、生物の構造の複雑さとは余り関係がありません。

ヒトのゲノムは約30億個のDNAの塩基対から成り立っていて、1本の紐にすると約1mの長さになります。

ゲノムは細胞の中に存在する**遺伝子情報の総体**を呼んでおり、タンパク質を指定する遺伝子と、遺伝子の発現を制御する遺伝子スイッチ等と、色んな事情で染色体の中に紛れ込んできたDNA等から構成されています。

ゲノムの解析：ヒトゲノム計画 (Human Genome Project) は、ヒトのゲノムの全塩基配列を解析する事業であり、1953年のDNAの二重螺旋構造の発見から50周年となる2003年に完了しました。

2013年現在は約十数万円の費用と1日間で貴方の全DNA(ゲノム)を分析したリストを入手でき、「貴方は潜在的にどのような病気に罹り易いか」「貴方にこの薬はどのように効くか」といった種類の怖いような情報が得られる時代になりました。DNA分析コストは利用度増加と共に急速に安くなるでしょう。DNAは身体の全ての細胞に存在し、爪、髪の毛、血、体液等の遺留物からDNA分析により特定の個人を割り出して犯罪調査に使われていることはよく知られています。

2・3 遺伝情報伝達のミス

RNAの出現：生命が最初に出現したのは、太古の海中の特異な環境、例えばブラックスモーカー等の化学反応が起こりやすい場所ではないか、その形態はRNAであったろうと推定されています。

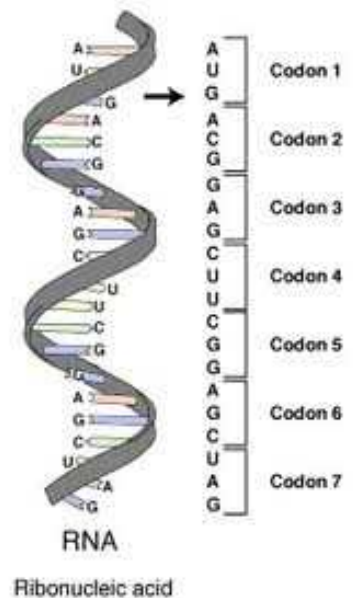
右にRNAのモデル図(Wikipedia: コドン)を示します。DNAを対称軸で分離させた構造がRNAなのです。RNAの螺旋体から棒が突き出ていますが、棒はヌクレオチド、その先端に遺伝情報である4種の分子の何れかが付いています。

この構造はA、U、C、G何れの分子も全く独立した存在であるために、放射線や熱擾乱や転写ミスでオリジナルと違った分子が付いても、それが正しいのか間違っているのかの判断ができません。

このため、RNAを用いて遺伝情報を世代間で引継ぐ時に、原型と違ったRNAに変化している場合が多分にあります。

ウイルスはRNAで遺伝情報を世代間に伝達しているため、頻繁に遺伝情報が変化しています。ウイルスにより引き起こされる病気への対策が難しいのは、この速い変化のためです。

ウイルスは進化の過程で自分でタンパク質を作る道具を脱ぎ捨てて、他の生物の中に侵入して細胞内の道具を借用して自分の遺伝子を増殖させる道を選んだ寄生体です。自分の装備だけでは増殖できないウイルスは、生物とは定義されていません。



DNAの出現： 原始の海中で発生した自己増殖能力を持つRNAから進化して、より複雑な構造を持つDNAが誕生したと考えられています。DNAは遺伝情報を2個の分子の対として伝達します。

このため、A、T、C、Gの何れか一つが**放射線**や**熱擾乱**や**転写ミス**でオリジナルと違った状態になっていても、DNAを巡回チェックしている**修復機構**が、各塩基対がAとT、CとGのペアになっているかを調べ、違っていたら正しいペアに戻します。このため、DNA遺伝子はRNA遺伝子に比べて、情報の毀損に対しておよそ10億倍強いと推論されています。

DNA分子の損傷は1日1細胞あたり最大では50万回程度発生する場合もあると推定されています。これを損傷のタイプ(塩基対、デオキシリボース、リン酸鎖等)によって各種の異なった修復を行う複雑なシステムで、ここでは詳細に立ち入れません。

DNA修復機構は素晴らしい機能を持っていますが、それでも遺伝情報の「**変異**」が統計的に或る程度の確率で発生します。形質等に影響大きい場合を「**突然変異**」と呼びます。

長大な染色体のどこかで欠落や書き換えや他所の遺伝子の一部が挿入されることがあっても、その大部分は生命活動には支障がないでしょう。そのような**遺伝には中立**(大きな影響を与えない)な遺伝情報の変化は時間と共にDNAの中に貯め込まれます。中立なDNAの変化量を調べて、遺伝形態に大きな進化を起こした時点からの時間的経過を統計的に推定できます。それを遺伝に関する「**分子時計**」と呼びます。

2・4 自然淘汰と進化

進化論とは： コンセスター1を共有するヒトとチンパンジーが分岐したのは約700万年前、と分子生物学者が推定したのは分子時計を用いてのことです。

生物としての形質や機能に大きな変化が起こった場合を「**進化(Evolution)**」と言います。RNAがDNAに進化した、コンセスター39からバクテリアが分岐した、コンセスター1からヒトとチンパンジーが分岐した、といった**大進化**もあれば、ガラパゴス諸島の島ごとに鳥類のフィンチの嘴が異なった進化を遂げていると言った**小進化**もあります。ダーウィンが研究したのは小進化の領域でした。

夫々の生物は**生態圏(Ecosphere)**：生物が生存可能な環境)に最も順応している個体がより多く繁殖すると言った形で「**自然淘汰**」と呼ぶ「**進化に対する圧力**」を受けて、時間の経過と共に「**進化**」するというのが「**進化論**」の基本的認識です。そしてそのような「**進化は遺伝情報の変異**」によって引き起こされています。

進化の大事件として挙げられるのは、6,500万年前にユタカン半島に巨大隕石が落下し、当時の昼間の地上という生態圏を支配していた大型動物である恐竜が絶滅したことです。この大災害でも個体数が多い小型動物は一部が生き残りました。空白となった昼間の地上という生態圏を巡って、恐竜全盛時代には夜間の地上を生態圏としていた哺乳類と、昼間の空を生態圏としていた鳥類の一部が大型化して、この生態圏の争奪戦を繰り広げ、遂に哺乳類がこの生態圏を手に入れ、現在の哺乳類の全盛期が訪れました。

残った鳥類は従来通り昼間の空を生態圏として確保しています。

この事件は生物の進化の判り易い事例です。

生物が進化によって生存できるようになる環境を**生態圏**と呼んでいます。異なる動物門の生物でも、似たような生態圏で生きようとするものは外観も機能も似たものになります。この場合を「**収斂(しゅうれん)進化**」と呼びます。後ほど事例が出てきます。

地球の地下の岩石の中も生態圏であり、ここに生きるバクテリア等のバイオマス総量(生物の総重量)は地上の全生物のバイオマスの2倍であろうと言われています。

アミノ酸自給機能の退化： 遺伝情報の変化が「**進化の原動力**」であると説明しました。次の例は「**退化**」と言うべきでしょう。全ての生物は、出現した時には間違いなく**20種全部のアミノ酸**を自給自足していたと思われる。ところが「**食物連鎖**」の上位にある生物は、生命活動に重要な物質を自分で生産できなくなる

ような遺伝情報の変化があっても、下位にある生物を捕獲して食べて不足するようになった物質を体内に摂取することにより、支障なく生命活動を続けることができます。

本来の働きを失った遺伝子を**偽遺伝子**と呼びます。この上位生物は下位生物から摂取できるアミノ酸に依存して自分で作れなくなる遺伝子の異変があっても、その後も支障なく生存できます。下位生物では、そんなことがあれば即生存できなくなるために、そのような遺伝子欠陥は次世代には引き継がれません。偽遺伝子はもはや役立たずですが、生存に関しては中立な遺伝子ですから、時間と共に変異が蓄積されて分子時計としての価値があります。

タンパク質合成に欠かせないアミノ酸 20 種類のうち、ヒトは9種類を自分の体内で作る能力を失っています。それでも不足する種類のアミノ酸は食物から「**必須アミノ酸**」として摂取して生命を維持しています。鳥類はヒトの必須アミノ酸に加えて、グリシンが不足していて 10 種類のアミノ酸を自分の体内で作れなくなっています。ネコとラットはヒトの9種類に加えて、タウリンが不足しており、これも 10 種類の必須アミノ酸が必要です。

ビタミンの必要性： ビタミン(Vitamin)とは、生存に微量に必要な栄養素のうち、炭水化物、タンパク質、脂質以外の有機化合物の総称です。ある物質がビタミンかどうかは、生物種により異なります。ビタミンC(化学名：L-アスコルビン酸)はヒトや真猿類にはビタミンですが、6千万年ほど前に分かれた原猿類始め多くの生物では自給自足できています。真猿類ではビタミンCを作る遺伝子が壊れて**偽遺伝子**として染色体に残っています。ヒトにとってのビタミンは13種類あります。

ヒトの遺伝子プールに貯まる遺伝子欠陥： ヒトは農耕時代に入ってから、食糧の確保が安定的になり余裕も出てきたために、狩猟採集時代であれば生存できなかったような弱さや欠陥を持った個体でも、周囲の助けを借りて生存することができ、子孫を残すことさえできるようになりました。過去の社会では自然淘汰された遺伝情報が、ヒトの遺伝子プールに貯まることになったのです。

この時期からヒトの遺伝子は SNP(一塩基多型)レベルでの変化が従来の 100 倍程度の速さで増加しているようです。その中には好ましい変異もあるでしょうが、自然淘汰なら残っていない変異の方が多いのです。ヒトは遺伝的には自然淘汰に対して脆弱になりつつありますが、それに文明の力で対抗する方法を選んだのです。古代ギリシャのスパルタでは、男の子は生まれた時の親の判断で、立派な戦士になれそうもない脆弱な子供はその場で殺されました。これは強い戦士だけの社会を作ろうとする価値観に基づく**人為淘汰**なのですが、今の社会では到底許されません。

ヒトは生物として受けるべき自然淘汰に、社会での相互扶助や医学等の技術力により抵抗するために、遺伝的には脆弱になりつつあります。ではどうすればよいか、倫理的に非常にデリケートな問題です。

2・5 進化論とバイオ工学

ダーウィンの時代にはなかったバイオ工学の一分野である分子生物学の進歩により、最近**進化論を分子レベルで理解**できるようになりました。

これは宇宙を**素粒子レベルで理解しつつある宇宙論**と事情が似ています。

バイオ工学は発展途上の学問です。20世紀には、タンパク質を作るアミノ酸を指定する部分だけが遺伝を司る「**遺伝子**」だと定義していました。当時はヒトゲノムでは、全体の DNA のうちの僅か2%だけが遺伝子で、残り98%は役立たずの「**ジャンク DNA**」だと思込んでいました。だが、約22,000個の遺伝子がヒトの身体を構成する約10万種のタンパク質を作っていました。どうやってでしょう。バイオ工学の進歩に連れて少しずつ生命現象の実相が判ってきました。周囲の DNA の中に遺伝子の働きをオンしたりオフしたり修飾したりする、スイッチ DNA 等の働きが発見されました。これらを含めて始めて遺伝情報の総体になる

ことが明らかになり、遺伝子という言葉の再定義が必要になりました。

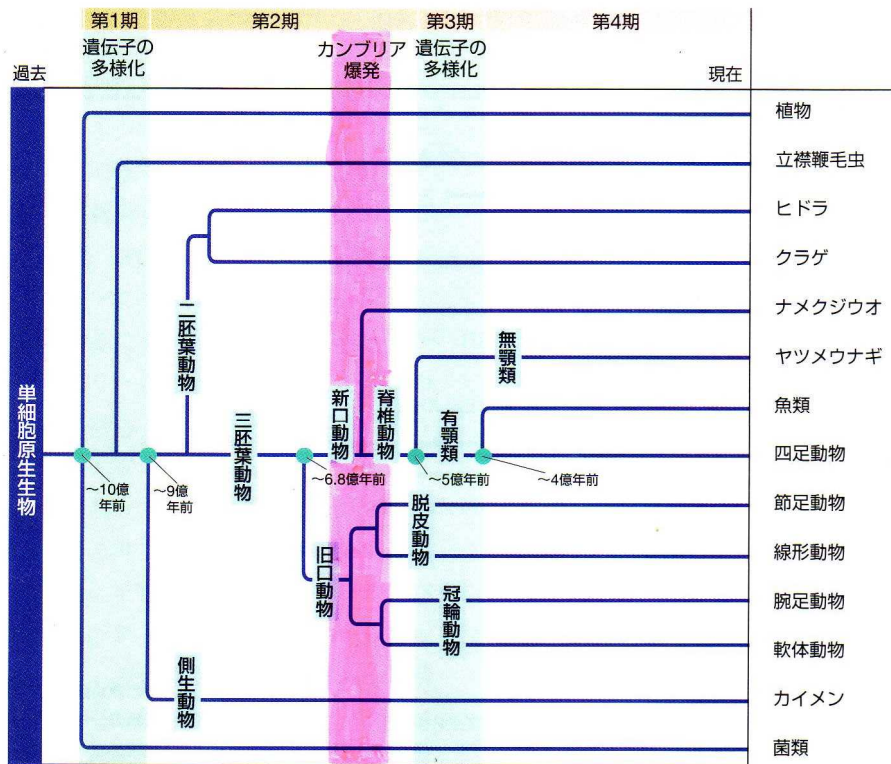
次の章では「カンブリア爆発」という言葉が出てきます。これは動物の形態が爆発的に多様化した5億4300万年前から僅か500万年の地質学的には瞬間と思える短期間に起こったことを指します。

分子時計の研究によると、新たな遺伝子の誕生が激しく起こったのは10～9億年前で、その後約4億年間は殆ど新しい遺伝子は誕生していません。

カンブリア紀で起こったことは、4～5億年前に既に出来ていた遺伝子というハードウェアを、如何に使いこなして生物として必要とされた機能や形態を作り上げるかというソフトウェア的対応に依るのだということが判っています。

右図(別冊日経サイエンス「崩れるゲノムの常識」/日経サイエンス社 p86)

でピンク帯はカンブリア爆発期、空色帯は遺伝子の多様化が特に激しかった時期を示しています。環境が大激変した時にそれに対応するために既にある遺伝子を周囲のスイッチDNA等の遺伝子制御要素が試行錯誤して新しい遺伝情報体系を作り上げて、生存に必要な生命形態を獲得したということなのです。このバイオ工学の働きがあって、始めて我々はカンブリア爆発の真相に迫ることができるのです。



形態の多様化と遺伝子の多様化 80～81 ページで示した真核生物の系統樹に、遺伝子多様化の時期を重ね合わせた。形態が盛んに多様化した時期と、遺伝子が多様化した時期には時間的なずれがある。

現在はまさにバイオ工学の成長期なのです。

生命をDNAレベルで理解し医学や治療に役立てること、有益なDNA組み換え作物を開発すること、DNAを化石から抽出して古生物を復元すること、DNAを操作してクローンや新しい種類の生命を創ること、ATCG以外の分子の組み合わせで自然界には存在しないDNAを持つ生命を創ることなど、以前は「神の領域」とされてきた分野で研究が進みつつあります。これまでも5年、10年の単位で目覚ましい進歩がありました。100年後には素晴らしい世界が出現しているか、恐るべき世界が出現しているか、想像するのが怖いような気がします。

第2章で参考にした文献・資料

「生命の設計図」ヤン・ウィトコスキー他：コルト・スプリング・ハーバー研究所/ニュートプレス

「別冊日経サイエンス「崩れるゲノムの常識」/日経サイエンス社

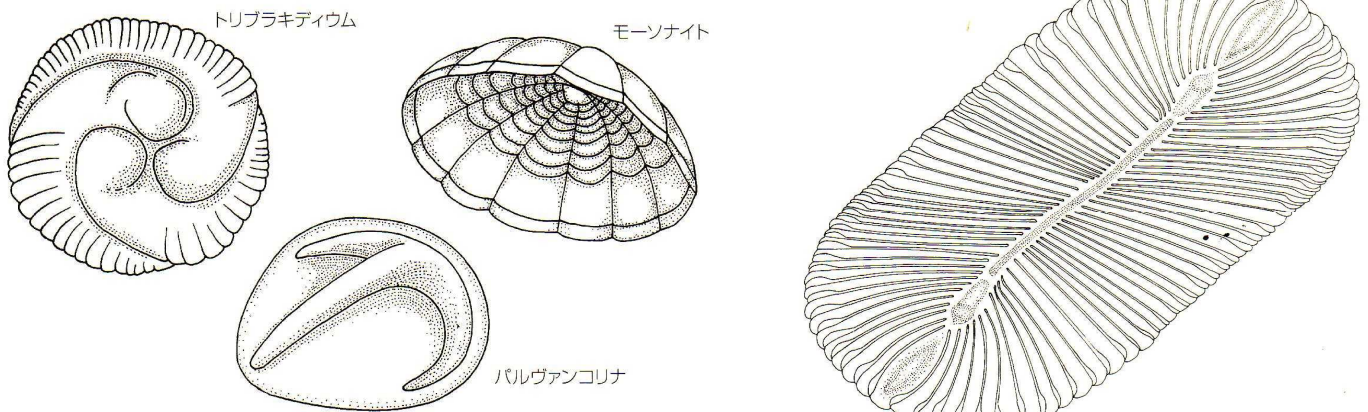
Wikipedia：倍体/塩基/糖類/ヒトゲノム計画/染色体/リボソーム/核小体/コドン、他

3. カンブリア紀の大爆発

カンブリア紀(Cambrian period)とは地質学的には古生代前期における区分の一つで、約5億4,300万年前から約4億8,830万年前の5,470万年間の時代を指します。当時は海洋が地球上のほぼ全てを覆い尽くしており、海中では様々な種類の生物が現れ、中でも三葉虫等の節足動物が繁栄し、藻類が発達しています。これ以前の時代の動物は軟体動物であるため印象化石程度しか残らず、化石が殆ど得られなかったために、化石に頼って時代区分を行っていた頃にはこの時代までしか区分ができず、それより古い地層は「先カンブリア時代」と荒っぽい命名をされています。

先カンブリア紀の化石：1947年にオーストラリアの丘陵の5億7,000万年前の地層で発見され、発見地名に因んで「エディアカラ動物群」と命名された世界最古の多細胞動物は、下図(「眼の誕生」A・パーカー／草思社 p43~44)のような形態をしています。これらは**全て軟体組織**で、印象化石として得られています。巣穴の生痕化石が一切見つかっておらず、海底を這い回るが、巣穴に入るものはなかったと知られています。状況証拠からは、この時代は動物の間では捕食者と獲物という関係は見当たらず、「エデンの園」のような平和な世界がそこに在ったようです。

この時代には三つの動物門が認められています。



エディアカラ動物。トリブラキディウム、モーソナイト、およびバルヴァンコリナ。

エディアカラ動物。ディキンソニア・コスタタ。

カンブリア紀の化石：この僅か3,000万年程後の5億4,300万年前~5億3,800万年前の**カンブリア紀の一部に過ぎない僅か500万年間**に現れた動物の化石は、**先カンブリア期**の化石とは様相が一変します。この時代の動物の多くが**硬い殻**を持つようになり、化石として残り易くなりました。

獲物や敵の襲撃を早期発見する**眼**、噛み砕く**口**、素早い**移動**のための器官、防御のための**硬い甲殻**など、動物たちは「食うか食われるか」の世界で攻撃あるいは防衛のため発達させた装備を身につけて出現します。この時代から捕食者と獲物の果てしない**生存競争**による**進化**が始まっています。

短期間に爆発的に動物の進化が起こったために、「**カンブリア紀の大爆発(Cambrian Explosion)**」と呼ばれます。カナディアン・ロッキーの発見地に因んで「**バージェス動物群**」と呼ばれるこれらの化石は、**12**の動物門に分類されています。

海綿動物／刺胞動物／有櫛動物／腕足動物／軟体動物／ヒステリオ／鰓曳動物／環状動物／有爪動物／節足動物／棘皮動物／脊索動物(ヒトが属する動物門)です。「門」は「**Body plan**」「体制」とも呼ばれ、脊索動物門であればトカゲ、ヒトなど脊椎(背骨)をもつ脊椎動物と、それと近縁な原索動物(ナメクジウオなどの頭索動物と、ホヤ類などの尾索動物)を合わせたものが含まれます。

これ以後の現在までの5億年の動物の歴史は非常に変化に富んでいます。ただ一つとして新しい動物門が現れることはありませんでした。この時代に動物門は出し尽くしてしまったのです。

カンブリア紀は特に節足動物が繁栄した時代でした。右の2枚の図(「ワンダフル・ライフ」p324~325)にその一部を示します。

節足動物とは、動物界最大の分類群で、昆虫類、甲殻類、クモ類、ムカデ類など、硬い殻(外骨格)と関節を持つグループを指します。陸・海・空・土中・寄生などあらゆる場所に進出し、現生種は約110万種と名前を持つ全動物種の85%以上を占めています。「虫」と呼ばれるものは節足類に属します。

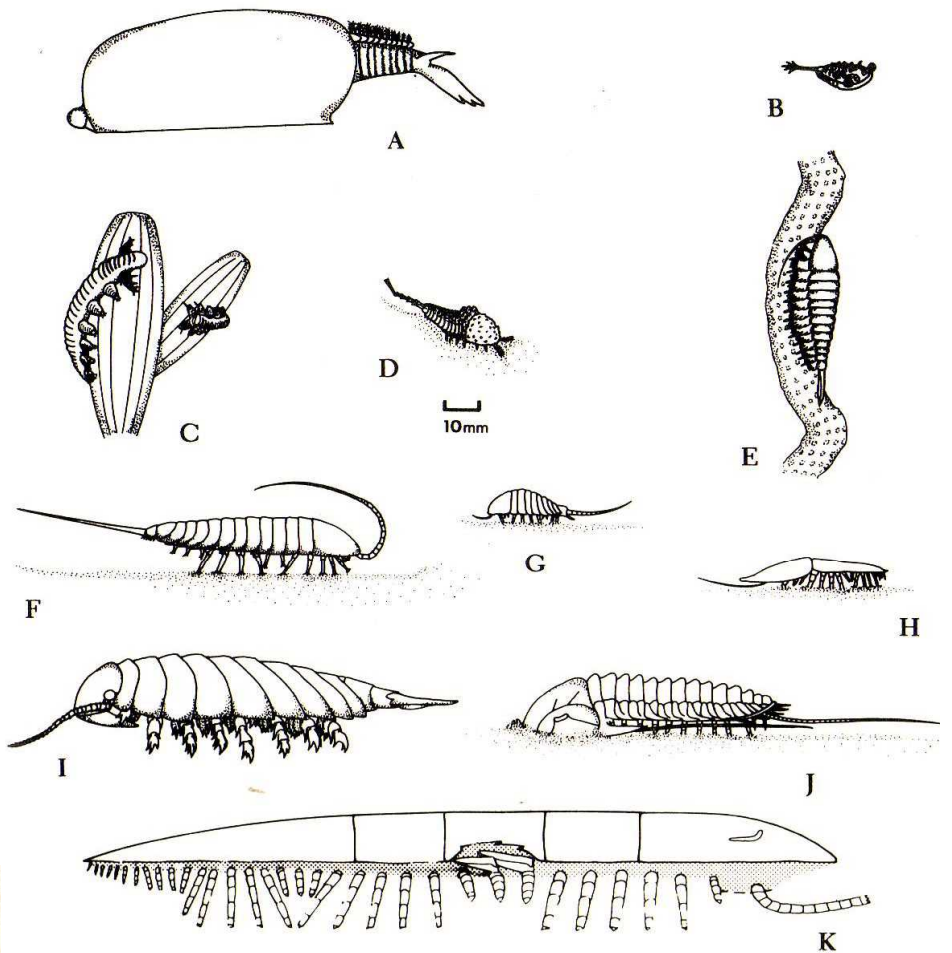


図3-73/バージェスの節足動物 (Briggs and Whittington, 1985)。相対的な大きさが比較できるように、すべて同じ縮尺で描かれている。(A)オダライア(B)サロトロケルクス(C)アユシェアア(D)ハベリア(E)アラルコメナエウス(F)エメラルデラ(G)モラリア(H)ナラオイア(I)シドネウイア(J)三葉虫のオレノイデス(K)大型軟体性三葉虫のテゴベルテ。

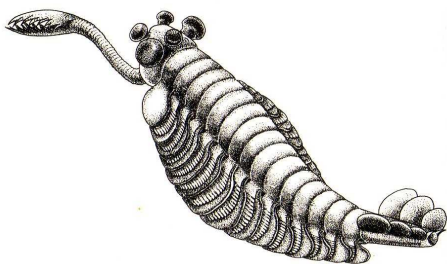


図3-21/オパビニア。前頭部から伸びるノズルの先端は爪状になっており、頭部には五つの眼、体節の上には腿、尾には三つの節がある。マリアン・コリンズによる復元画。

上の眼が五つで象の鼻のようなノズルの先端に蟹爪が付いたオパビニア(「ワンダフル・ライフ」p181)は奇妙奇天烈動物が並ぶカンブリア紀の中でも特に秀逸な Body plan(体制)の持ち主です。体長は5cm程度と小型です。子孫が残らなかったのは残念です。とにかく、この期間に動物はありとあらゆる Body plan を試したようです。

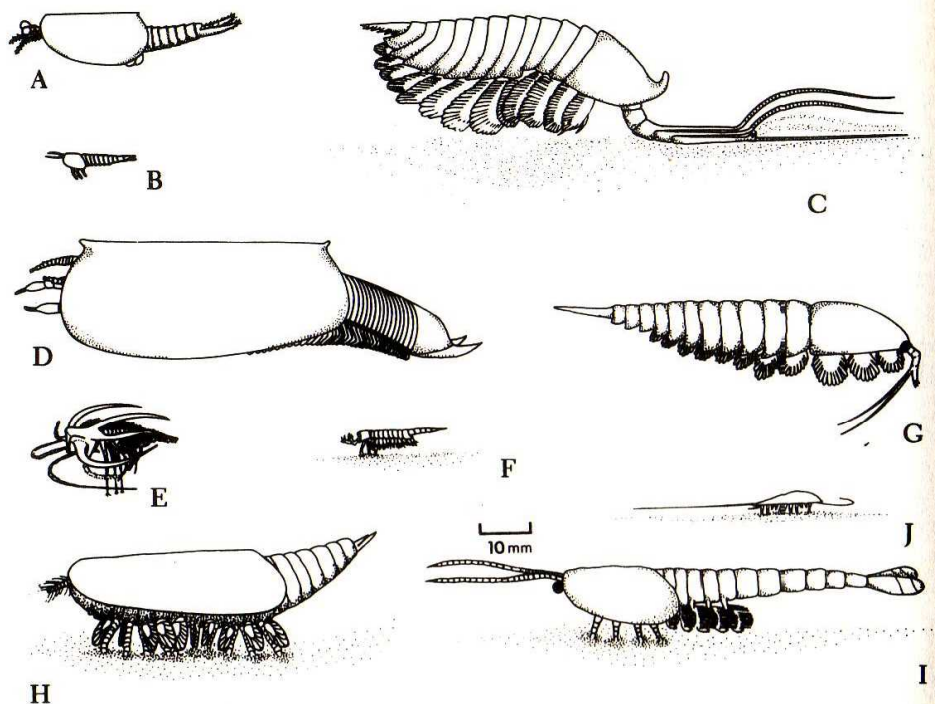


図3-74/そのほかのバージェス産節足動物 (Briggs and Whittington, 1985)。すべて同縮尺。(A)ペルスビカリス(B)プレノカリス(C)レアンコイリア(D)ブランキオカリス(E)マルレラ(F)ヨホイア(G)アクタエウス(H)カナダスピス(I)ワプティア(J)ブルゲッシア。

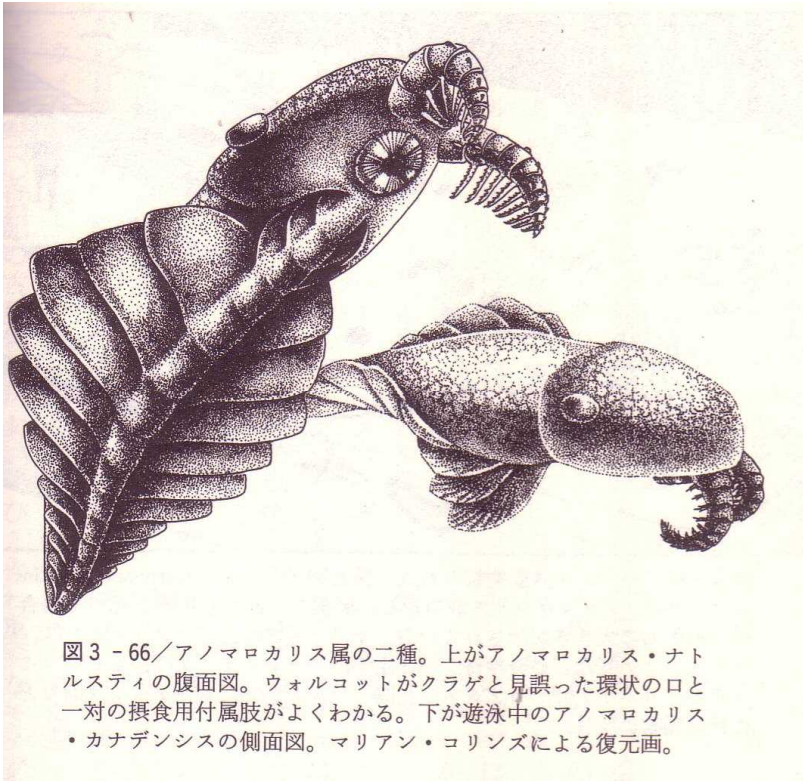


図3-66/アノマロカリス属の二種。上がアノマロカリス・ナトルスティの腹面図。ウォルコットがクラゲと見誤った環状の口と一对の摂食用付属肢がよくわかる。下が遊泳中のアノマロカリス・カナデンシスの側面図。マリアン・コリンズによる復元画。

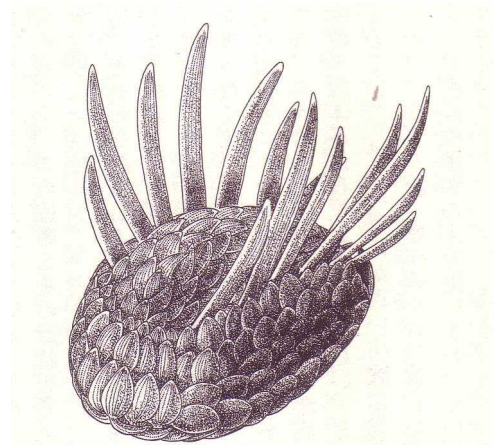


図3-58/海底を這いまわっていたと思われるウィワクシア。マリアン・コリンズによる復元画。

左上図(「ワンダフル・ライフ」p298)は当時の食物連鎖の最上位に君臨していたアノマロカリス(“奇妙なエビ”の意)で、全長約60cmと他の動物に較べてずば抜けて大きな体格をしています。前方下に2本の捕獲腕を持ち、3方向から中心に向かって絞り込まれる

鋭い歯を持ちます。他の動物はアノマロカリスに捕獲されないように注意しながら、自分の餌を捜していた訳です。

右上図(「ワンダフル・ライフ」p281)のウィワクシアは全長2.5~5cmの動物ですが、背中の防御用の骨片が凄いです。当時の海中はよほど危険に満ちた環境だったのでしょう。

右図(「ワンダフル・ライフ」p495)はバージェス動物群の中で見つかった唯一の脊索動物ピカイアです。体長5cm程度の扁平な形態をしています。このBody planが進化してヒトとなっています。脊索動物が進化して、正真正銘の脊椎動物が現れるのは約8,000万年ほど後のオルドビス紀中期になります。

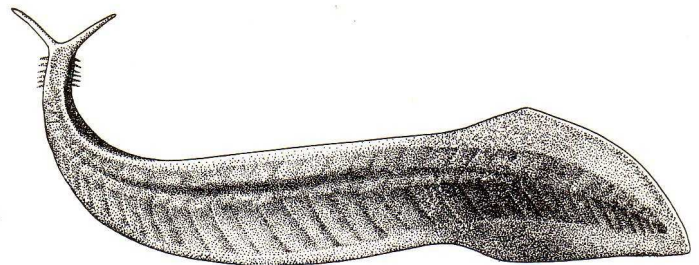


図5-8/ピカイア。バージェス頁岩から見つかった世界最古の脊索動物。われわれも属する脊索動物門の特徴が見つかる。すなわち、背面に沿って走る、後に脊椎へと進化した脊索と、ジグザグ模様をなしている筋節である。マリアン・コリンズによる復元画。

「カンブリア紀」の海には、今のところはまだ見つかっていないが、ピカイア以外の脊索動物も生息していたに違いないからだ。しかし、バージェスから出土するピカイアの標本の少なさや、バージェス以外の古生代前期のラーゲンシュテッテンから脊索動物は見つかっていないことから、私はこう考える。我々が属する動物門はカンブリア紀には大成功を収めていなかったし、バージェス時代の時点では脊索動物の将来は暗澹たるものだっただろうと。……読者は、人類は何故存在しているのかという年来の疑問を発したいかも知れない。ともかくも科学に取り扱える点からのみその質問に答えるとしたら、答えの核心は、ピカイアがバージェスの悲運多数死を生き延びたからというところに落ち着くに違いない。この答えは、自然界の法則は一つも拠り所としていない。そこには、予測できる進化の経路に関する言及もなければ、解剖学や生態学の一般則に基づいた確率の計算もない。ピカイアが生き延びたことは、“本当の歴史”の偶発事件だった。私はこれ以上に“高度”な答えが与えられるとは思わないし、もっと魅惑的な解決が得られるとも思えない。我々は歴史の産物であり、実現し得た世界

としては最も多様で興味を湧かせる世界の中で独自の道を切り開かなければならない。それは忍従の道ではなく、自分たち自身が選ぶやり方で成功したり失敗したりする自由が最大限に保証された道である」。(「ワンダフル・ライフ」497p)

第3章で参考にした文献・資料

「ワンダフル・ライフ」ステイブン J グールド：訳・渡辺政隆／早川書房

「眼の誕生」A・パーカー／草思社)

Wikipedia：動物門／脊索動物／節足動物／カンブリア紀／オルドビス紀

参考資料：(Newton2008年9月号)

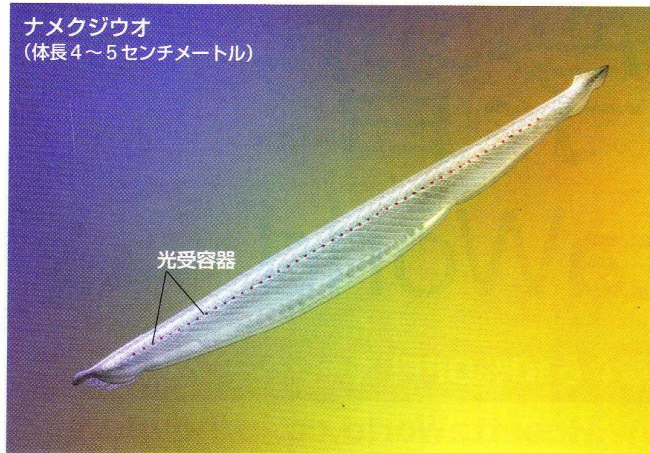
脊椎動物の起源にせまる ナメクジウオのゲノム解読 から、脊椎動物の進化の道 筋が浮かんできた。

●国立遺伝学研究所プレスリリース
2008年6月19日号

ヒトを含む脊椎動物は、より単純な脊索動物が進化して生まれたと考えられている。これまで、ホヤなどの「頭索類」がはじめにあらわれ、つづいてナメクジウオなどの「尾索類」、そして脊椎動物があらわれたと考えられてきた。

京都大学、国立遺伝学研究所、国立情報学研究所、理化学研究所

ナメクジウオ
(体長4～5センチメートル)



遺伝子の解析により、脊椎動物の起源が明らかになったようだ

などが参加する国際チームは、ナメクジウオのゲノム（全遺伝情報の1セット）の解読に成功した。ナメクジウオのゲノムは、ヒトゲノムの約6分の1のサイズだが、遺伝子の組成はよく似ていたという。ゲノムの解読で明らかになった遺伝子を頭索類や脊椎動物の遺伝子と比較した結果、ナメクジウオが最も早くあらわれたことがわかった。また、尾索類から脊椎動物への進化の過程で、ゲノムが2倍になる現象が2回起きたことも明らかになった。

今回の成果から、脊椎動物の起源が尾索類だと突きとめられた、と研究者らは考えている。

2008/7

4. 眼の誕生と進化

ペイリーは眼のような複雑で精巧な器官は創造主である神でなければ創れないであろう、と述べています。ところが古生物学や分子生物学の研究が進んで、生存競争上の必要があつて、眼は簡単な器官から進化して、現在の複雑で高性能な器官になったことが判ってきました。いろんな動物がいろんな器官から眼を開発したため、光を集める仕組みも、映像を分解して感知する方式も、驚くほど千差万別です。およそ物理学で思いつくほどの眼の方式は、殆どどれかの動物が眼として実現しています。

このことは、眼は生存にとっても必要であつたため、有り合わせの使いそうな器官から大急ぎで作り上げており、利用可能な物理法則を手当たり次第に試して実用化していることを示唆します。

4・1 カンブリア紀に突然出現した眼

カンブリア紀の僅か 500 万年ほどの短期間に、全ての動物門で突如として硬い殻が進歩した事象をカンブリア爆発と呼んでいます。「眼の誕生」がその鍵であつたという「光スイッチ説」に関心が集まっています。化石による研究結果では、先カンブリア紀の動物には眼がありませんでした。動物は「聴覚」「触覚」「臭覚」等の感覚器に頼って行動していました。そこに「視覚」を獲得した動物が出現します。それまではよほど近くまで接近しないと判らなかつた獲物の姿が遠くから見えるようになりました。捕食者の立場が有利になり、獲物は俄かに存続の危機に立ち、短期間で対抗策を立てなければならなくなりました。

その結果、簡単に食べられないように硬い甲殻を発達させて身にまとい、自分も視覚を発達させて眼を持たなければならなくなりました。これがカンブリア紀の爆発だということです。

“In the country of the blind, one-eyed is the King.”という諺がありますが、感覚器の中で視覚から得られる情報量は他の感覚器に対してずば抜けています。夫々の動物はどのようにして数百万年の短期間で眼を作り上げて視覚を獲得したのでしょうか。

4・2 色素を有する器官からの眼の構築

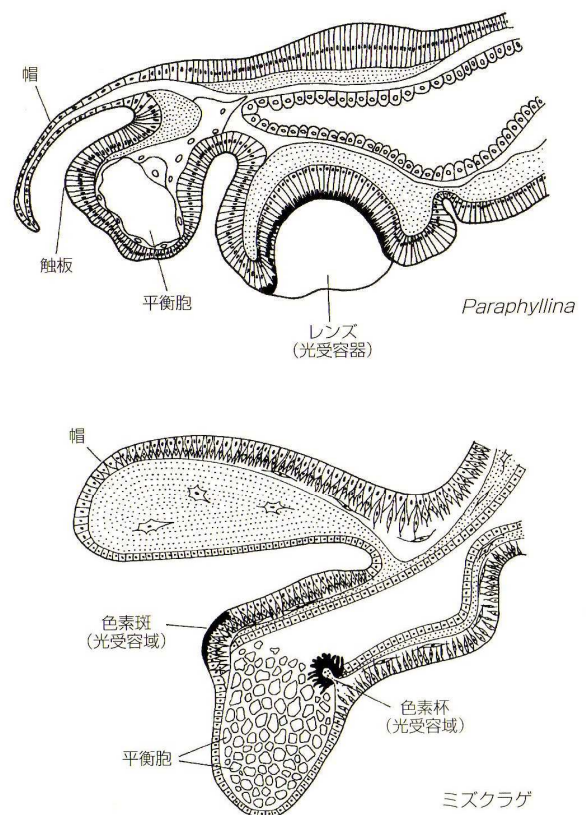
色素は或る特定の波長の光子を吸収すると、電位の変化を外部に現わします。これをその動物が感知できれば、光のセンサーになります。

右図(「眼の誕生」p241)は2種のクラゲの縁弁器官にある光センサーについて示すものです。下のミズクラゲの場合は、色素杯と色素斑が光受容域になっており、光が来れば、色素の発した電位変化を神経に伝達して、光を感知します。これだけでは光の有無しか判断できず、眼点としては低い機能でしかありません。

上の *Paraphyllina* はレンズを通して入る光を窪んだ網膜で受け取って、網膜の色素が光に励起されて発生する電位変化を識別して視覚を得ています。杯状の眼点は斜めから光線が入ると、色素がある網膜上に光の当たる場所と当たらない場所が発生し、光線の方向についての情報が得られる機能があります。

動物の体表面には色んな場所に色素が存在します。

どこの色素をどのように使うかの違いが、その後の眼の発達の方向性を決めるのです。



2種類のクラゲ *Paraphyllina intermedia* と *Aurelia aurita* (ミズクラゲ) の縁弁器官。複雑さの度合い(とくに光受容器)が異なっている。

4・3 三種類の単眼方式

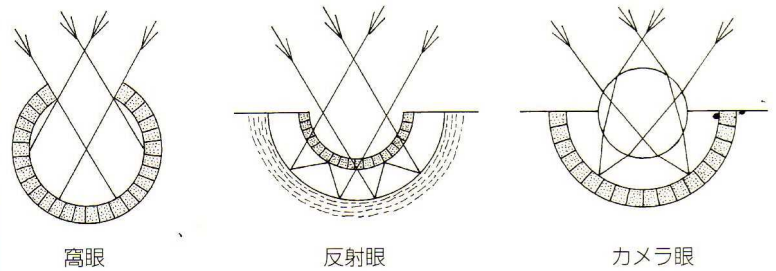
後ほど出てくる複眼に対して、単眼と呼んでいます。右図(「眼の誕生」p244)に単眼のモデル図を示しました。

左のオウムガイの「窩眼」の結像機構は、黒い虹彩に囲まれた小さな瞳孔により、ピンホール効果で網膜に倒立画像を結ばせます。ピンホールは小さいほどシャープな画像が得られますが、明るい視覚を得るためにはピンホールを大きくする必要があり、感度と解像度が相反します。オウムガイはピンホールを大きくする途を選んだため、ぼやけた画像で我慢することになりました。

中央の「反射眼」は一旦網膜を通り抜けた光線が窪んだ反射幕で反射する時に網膜上に焦点を合わせる反射望遠鏡方式です。反射眼を持っているのはホタテガイとその近縁の二枚貝に限られています。

右は「カメラ眼」です。巻き貝は皮膚から離れた所に大きな球面レンズを持っていて、光を網膜上に焦点を合わせます。虹彩を調節して光量を調節します。画像を見るには理想的な構造で、ほかの多くの動物門でも見られる眼の方式です。もしオウムガイが窩眼ではなく、同じサイズのカメラ眼を持っていたら、感度は400倍、解像度は100倍になると推算されています。

同じ貝類でも、これだけ多くの眼の方式を実現していることに注目してください。



3種類の単眼である窩眼、反射眼、カメラ眼と、それらの像の結び方。網かけの部分に光受容器(網膜)。反射眼には網膜の下に鏡(破線部分)が、カメラ眼にはレンズがついており、いずれも光を焦点に集めて鮮明な像を結ぶ。

4・4 眼点からカメラ眼まで進化するに要する時間

此処までの多数の事例で、出発点である光感受性がある皮膚の色素斑が内側に凹み始め、更に陥入して網膜が形成され、やがて球形レンズが構成されて魚類のレンズ眼ができるという各段階の視覚器官が現生動物で何れも存在し、生存と繁殖に役立っています。

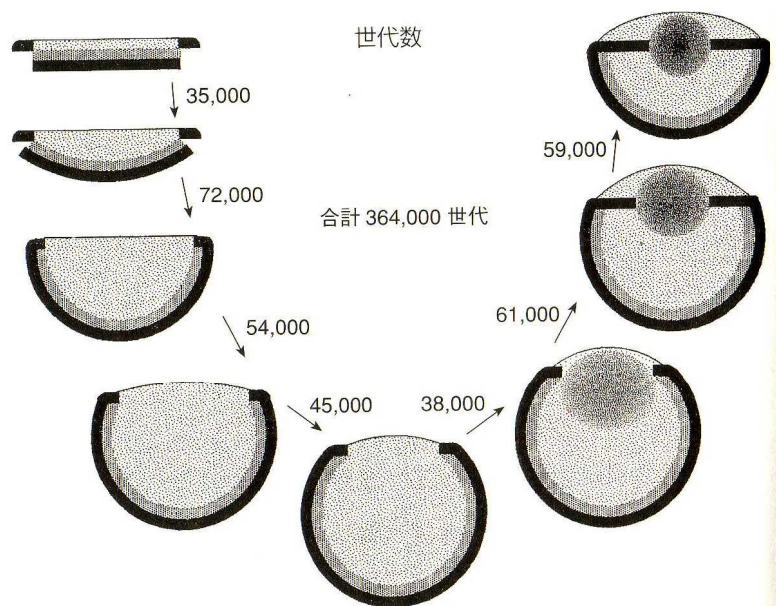
右図(「眼の誕生」p285)の左上の色素斑を起点 ①ミズクラゲとし、反時計廻りに

④Paraphyllina、⑤オウムガイ(内部に海水が入る)、⑧一般魚類となります。

色素斑からカメラ眼までの進化の中間段階の大事なところが現存するという事は、夫々の段階で持ち主である動物にとって役立っているということです。

眼の進化は中間段階でも生存競争に有効であり、最終段階で始めて機能するようになったのではありません。

ある研究者は眼が一段階進化する毎に光センサーの長さ、幅、タンパク質濃度が1%ずつ変化すると仮定して、左上の色素斑から始まって、右上の魚類のカメラ眼に至るまでに要する時間を試算しました。進化速度として1世代当り0.005%と設定した試算では色素斑から魚類のカメラ眼に進化するまでに40万世代も要しませんでした。1世代1年として、50万年足らずできちんと機能する視覚センサーであるカメラ眼が完成

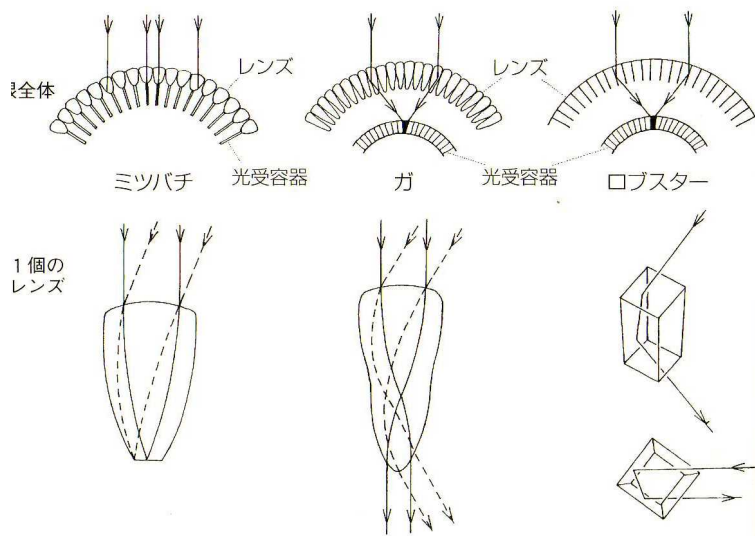


ニルソンとベルゲルの予測した、魚類などに見られるカメラ眼の進化。透明な保護層と黒い色素層にはさまれた、感光細胞の平らな斑点からスタートする。濃度勾配型のレンズは第6段階で現われる(ニルソンとベルゲルの1994年の論文より著者の許可を得て転載)。

しています。現在生きている甲殻類の光受容器の色素の研究では、ここに予想するよりも急速な進化が確認されており、実際は前述の予想よりもっと早くカメラ眼が実現したであろうと受け取られています。なお、右上のカメラ眼では、光の屈折率が水と近い魚類のレンズや水晶体では、レンズはこのような球形になっています。⑥で均質なレンズが出現して、⑧で中心部に屈折率が高い物質を集めて焦点がシャープになる不均一レンズで最終進化を遂げたカメラ眼を示しています。なお、これらは海中の魚類のカメラ眼であり、地上動物のカメラ眼とは異なる断面形状をしています。

4・5 いろんな集光原理を使う複眼

単眼には前述のように3種の主な集光方式がありました。複眼は外観的には似ていますが、とても右図(「眼の誕生」p255)の3種では代表できぬほどのバリエーションがあり、眼の内部の集光方式には驚くほど異なった物理法則を使用しています。右図はそれらのごく一部の参考例だと考えてください。



複眼が像を結ぶしくみ。ミツバチ(連立像眼)、ガとロブスター(いずれも重複像眼)の例が示してある。ガでは濃度勾配をなす材質によって、ロブスター(側面図と上面図)では鏡によって、焦点を合わせている。

左の**ミツバチ**の複眼は複数のレンズの後方に夫々の光受容器がついており、レンズの中心軸が向いている方向の光に反応する信号を脳に送ります。視野の狭い単眼が多数球面上に配置された構造で、**連立像眼**と呼びます。連立像眼にもレンズの代わりに光ファイバーのような光シリンダー方式のもの、光シリンダー内の媒体が均質なもの、外周から中心軸に向かって屈折率が高くなる高度な構造のものまであり、進化の素晴らしさ、見事さには感嘆します。

中央の**ガ**の複眼は、多数の光受容器が凸状に並んで網膜を形成し、球面上に並んだ複数のレンズ集合体が、特定方向から来た光を網膜上の特定の位置に焦点を合わせる**重複像眼**と呼ばれる構造をしています。魚類の単眼は凹状の網膜で倒立像を結びましたが、こちらは凸状の網膜で正立像を結びます。機能的には両者は共通原理で働いています。

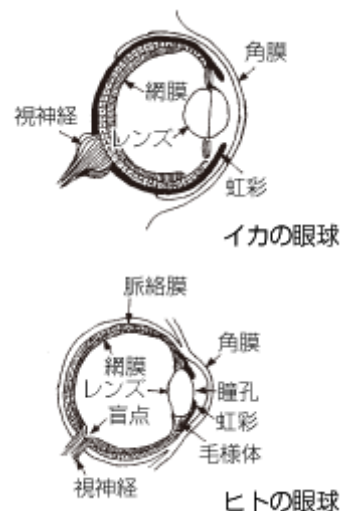
右の**ロブスター**はレンズの代わりに縦長の反射面を持つミラーボックスを用いている重複像眼です。

Corner reflector/Corner cubes と呼ばれる高度な光学技術が生体で実現されている見事さには感動を覚えます。

4・6 ヒトの眼、イカの眼

ヒトは他の動物には見られない頭脳の働きを持つため、進化の極致であるように思うかも知れませんが、試行錯誤の産物である我々の器官は決して生物界の最高傑作という訳にはいきません。この章は眼をテーマにしています。ヒトは3原色で対象物を見ますが、鳥類は紫外線領域を含む4原色で見しており、彼らから見たヒトは一種の色盲です。

右図(zen-ika.com/ikaQA50)を見てください。イカは視細胞をレンズに向けて配置し、網膜から後方に視神経を出しています。ヒトは視細胞を網膜の奥



まった位置に置き、一旦網膜の前方に視神経を出し、それを纏めて盲点から引き出して脳へ送り出しています。右図(「盲目の時計職人」p43)のヒトの目の断面図で説明しましょう。

ヒトの目は ①盲点と言う視覚が無い領域が視界の中に生じているが本人はそれに気付いていない、②光は神経網、視細胞の核、ミトコンドリア部を通り抜けて「光子を捉えるための色素の層」に達するまでに損失を生じる(相当感度が落ちる)という欠点があります。

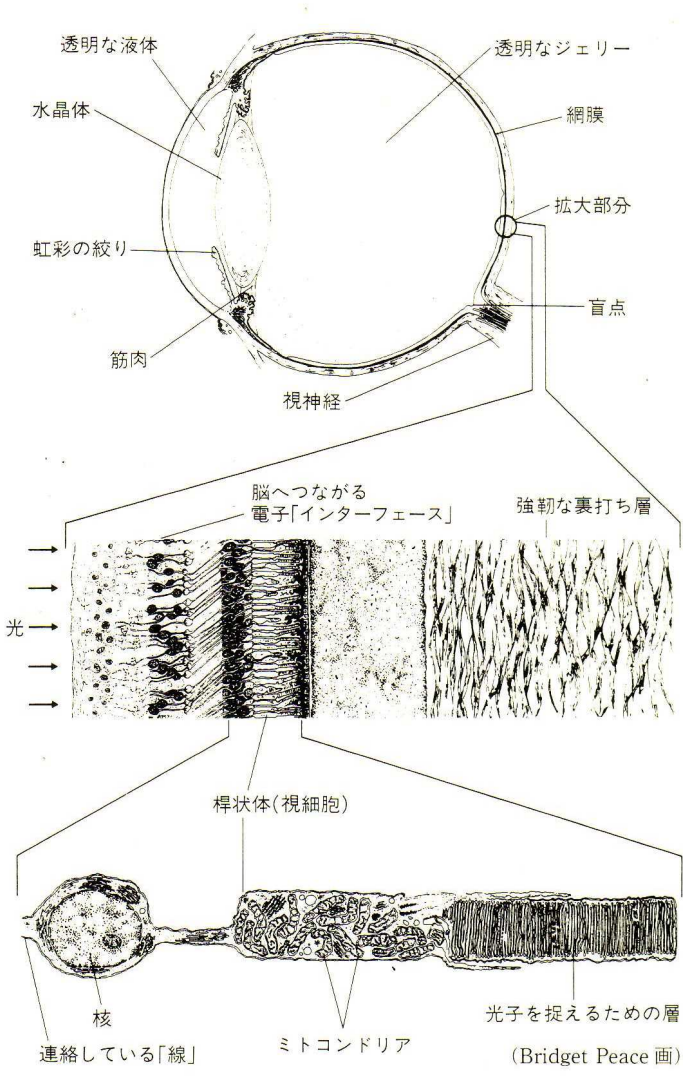
貴方が技術者であれば、ヒトの眼のような設計は絶対せずに、イカの眼のように神経を後ろに引き出すでしょう。こうなったのは、ヒトの眼とイカの眼では視覚を立ち上げた時の器官が異なっていたために、イカの眼では素直に感光部を前方に置いて視神経を後ろから引き出せたのですが、ヒト(哺乳類)の眼は最初に神経が前にある部位から感光部を発達させたために、いまさらどうにもならなくなったということです。

出来上がってみれば一種の設計ミスですが、利用者である貴方はそれで不自由を感じていないでしょう。仮にイカの眼と差し替えて見れば、その差は歴然としますが、誕生以来、ヒトの眼しか知らない貴方は、何が不便なのか理解できません。

貴方はヒトの眼をチャンと実用しています。ヒトとして生きて行くには、それで充分なのです。

オウムガイも窩眼で不自由なく生存・繁殖して今日があるのです。

客観的に判定すると、カメラ眼としてはイカの眼は最高傑作であるようです。これらの問題を除けば、ヒトの眼は進化が作り出した傑作の一つです。カメラとの類似性は驚くべきものです。焦点合わせは筋肉で水晶体を伸縮することによって(カメレオンは水晶体を前後させて)行います。虹彩(瞳孔)の絞りを調節してカメラでいう f 値(開口数)を最適に保ちます。視細胞は約 1.5 億個あり、視界の中心部±3° 範囲は特に密集して視力が最も高い領域です。視細胞の感光度は最も高い写真フィルムの 25 倍はあります。前方へ出た信号はその神経網で精緻な一時処理をされ、約 300 万本の神経節細胞に集められて盲点を通って後方に引き出され、脳に送られます。



4・7 カンブリア紀とは何だったのか

前カンブリア紀の化石に見出される Body plan (体制) は三つ程であったのに、カンブリア紀の化石からは 10~12(分類学上の意見の差異)の Body plan が発見されています。その中には、現在では存在しないものも幾つかあります。最初は僅か 500 万年の間に一気に Body plan の爆発的進化があったと考えられていましたが、今日の学界では Body plan そのものはもっと時間をかけて徐々に進化しており、カンブリア紀で起こったのは「眼の出現」と「防御のための硬い甲殻」(化石として残り易く、研究対象になり易い)を身にまとうようになったことだと考えられるようになりました。

その理由は前述しましたが、「最初に視覚を獲得した動物が捕獲者となって狩をし、獲物となった動物

が大急ぎで硬い甲殻と眼を発達させたのだ」とする学説が注目を集めています。前述 Andrew Parker の提唱する「**光スイッチ説**」です。彼は回折格子現象で発色させる動物が多いことに着目し、古代生物の化石から、その色彩を忠実に復元する偉業を成し遂げました。彼の研究結果では、「**最初の捕獲者は三葉虫であつたらう**」ということです。

体内の構造である **Body plan** を司る遺伝子の数は極めて多数ありますが、身体の外側の構造を司る遺伝子の数は少なく、そのため **Body plan** は変化に時間がかかるが、甲殻をまとうといった外側の構造の進化はそれより速いと知られています。同じことは次章の「**収斂進化**」についても言えます。

地質学的には一瞬ともいうべき 500 万年間に驚異の外形の進化が認められる理由は、「**眼を持った捕獲者の出現**」と「**捕獲者に対抗する硬い甲殻の形成**」「**捕獲者を発見して対応する眼の出現**」にあるのでしょう。

このテキストは「**進化**」とは何かを理解するために書かれました。博物学的に広範な進化の事例、例えば「**コウモリの聴覚レーダー方式による獲物の定位**」「**ヒドロキノンと過酸化水素の混合液を敵の顔面に噴射して致命傷を与えるホソクビゴミムシ**」といったどうしてそんな進化が可能なのか不思議に思われる興味深い事例に事欠きませんが、ここでは割愛させていただきます。

この章ではペイリーが「**創造者が設計したと考えなければ説明がつかない**」と述べ、ダーウィンも「**進化論からはどう説明してよいか判らない**」と悩んだ「**眼の出現と進化**」という最大の難問について、分子生物学の助けを借りて、できるだけ理論的に説明しようと試みました。

獲物となった動物たちが手当たり次第に**物理的に可能なあらゆる光学系を試し**、僅か 500 万年未満でともかくも**生存と繁殖に役立てる眼を獲得するに至ったプロセスには驚嘆を禁じ得ません**。

これこそ「**生存競争**」であり、「**進化**」の真髄なのです。

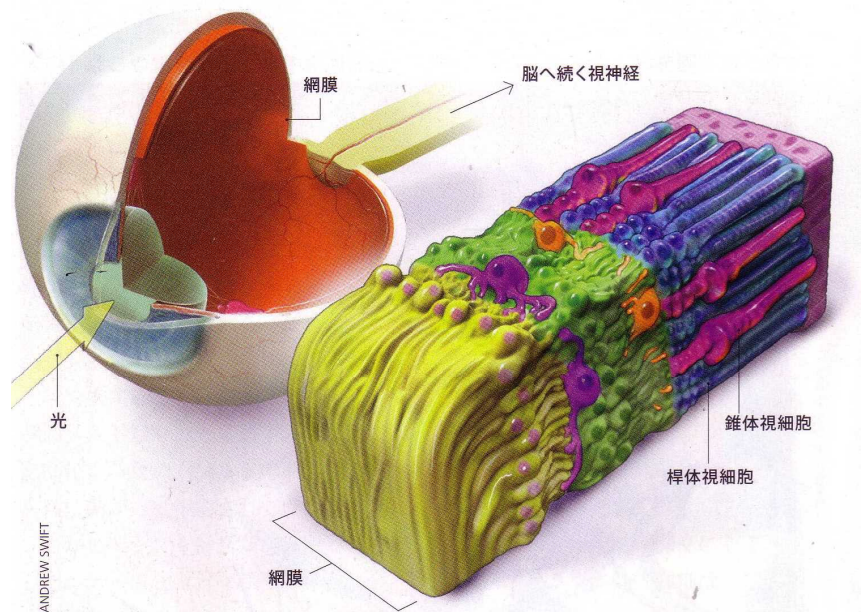
第 4 章で参考にした文献・資料

「**盲目の時計職人**」リチャード・ドーキンス／訳・中嶋康裕、他：早川書房

「**眼の誕生**」A・パーカー／草思社

Wikipedia：イカの眼球・ヒトの眼球／他

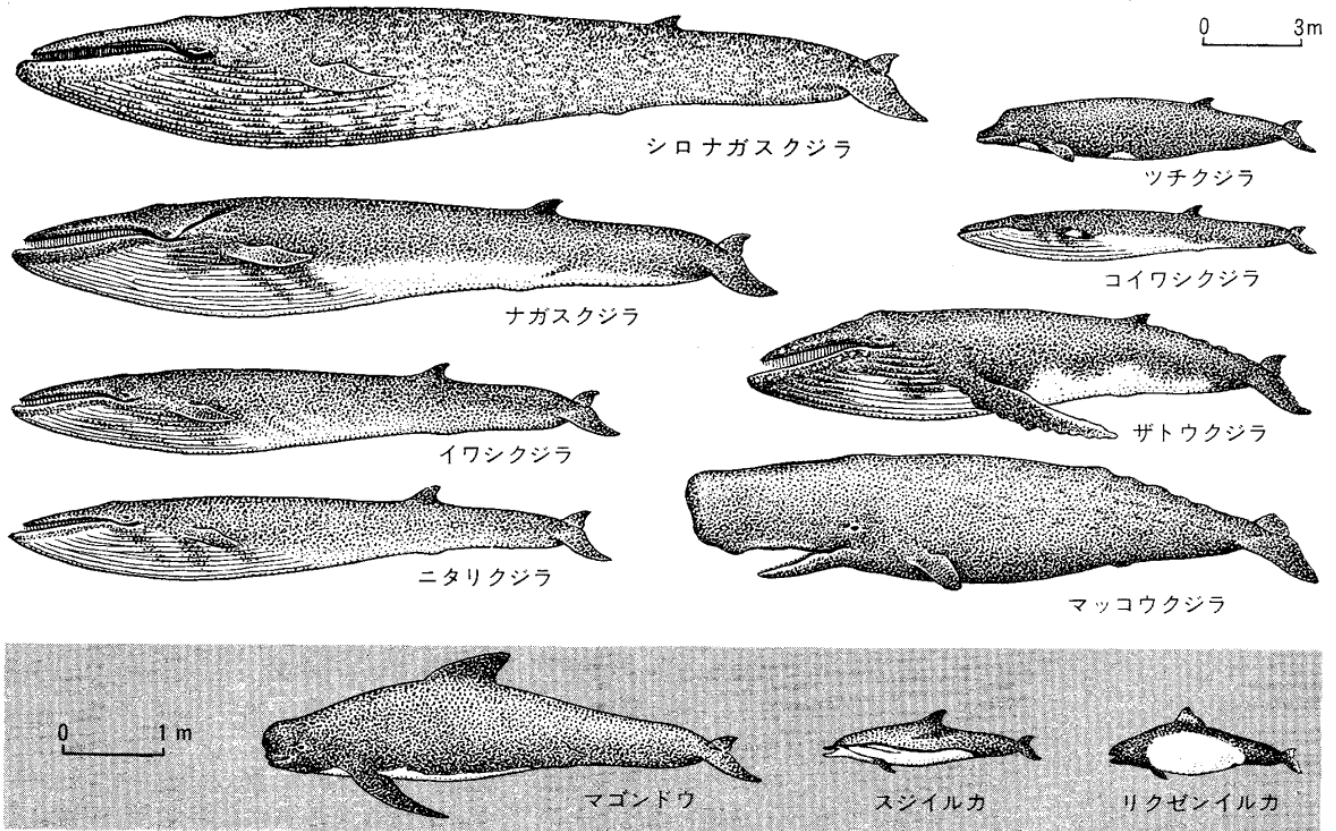
参考資料：右図は日経サイエンス 2009 年 7 月号の p66 にある「**網膜の構造**」です。光は図の左から入って来て、随分多くの組織を潜り抜けてやっと視細胞に到達します。この図には省略されている毛細血管網がこれらの組織に栄養分を補給するために張り巡らされており、そこでの散乱や吸収もあり、イカの眼と較べると、解像度も感度も相当低いレベルにあると知ってください。



網膜の構造 網膜は眼球の奥にある神経細胞の層で、視覚情報を視神経を通して脳に伝える。色覚を担うのは先のとがった錐体視細胞（錐体）だ。ほかに桿体（かんたい）視細胞と呼ばれる神経細胞もあるが、これは暗いところでものを見るときに働き、通常は色覚に関与しない。桿体と錐体は光受容細胞とも呼ばれ、網膜の奥の方に位置している。

5. 収斂(しゅうれん)進化

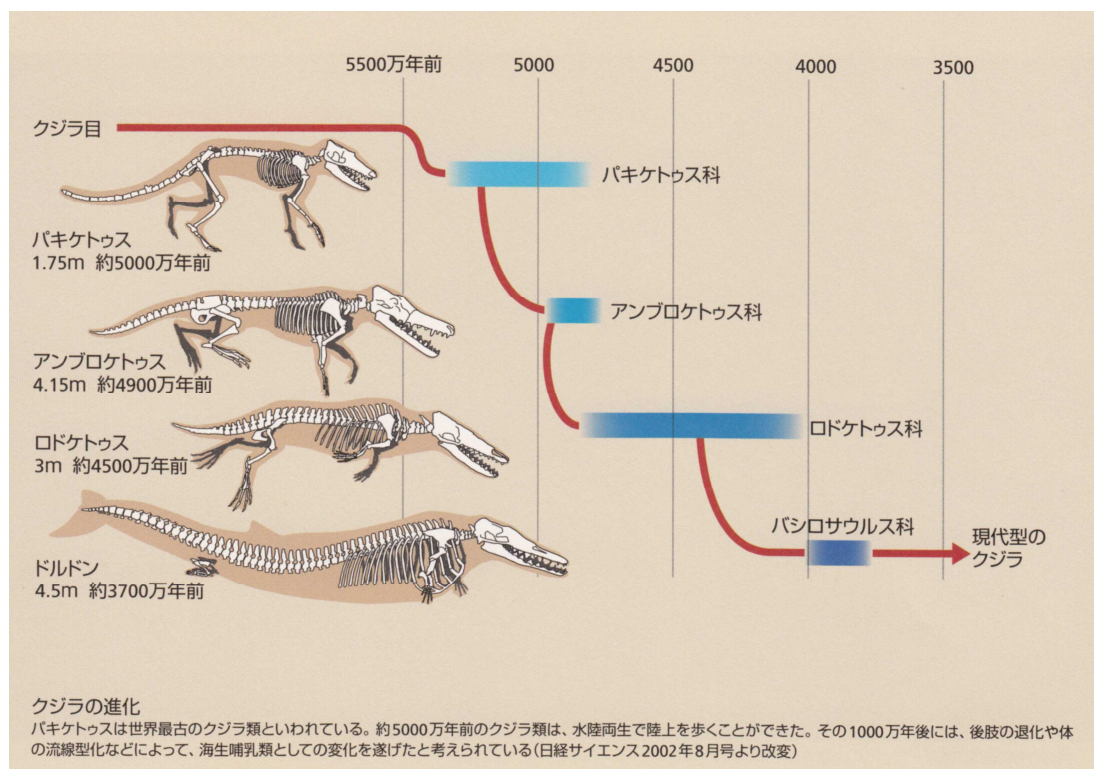
5・1 クジラは哺乳類



上図(ryomakcc.blog58.fc2.com)にクジラのイラストを示します。この体形を見て古代ギリシャの人たちが「クジラは魚類である」と考えたのは無理ありません。それでも何事も観測と実証を重んじる哲人アリストテレス(前384~322)は生態観測から「クジラは哺乳類」であることを結論付けました。

クジラは分子生物学的にはカバに最も近く、嘗ては陸上動物であったのが海を新しい生活圏として選び、海洋動物となってその環境に適応して進化し、体形も魚類に似通って行ったのでした。

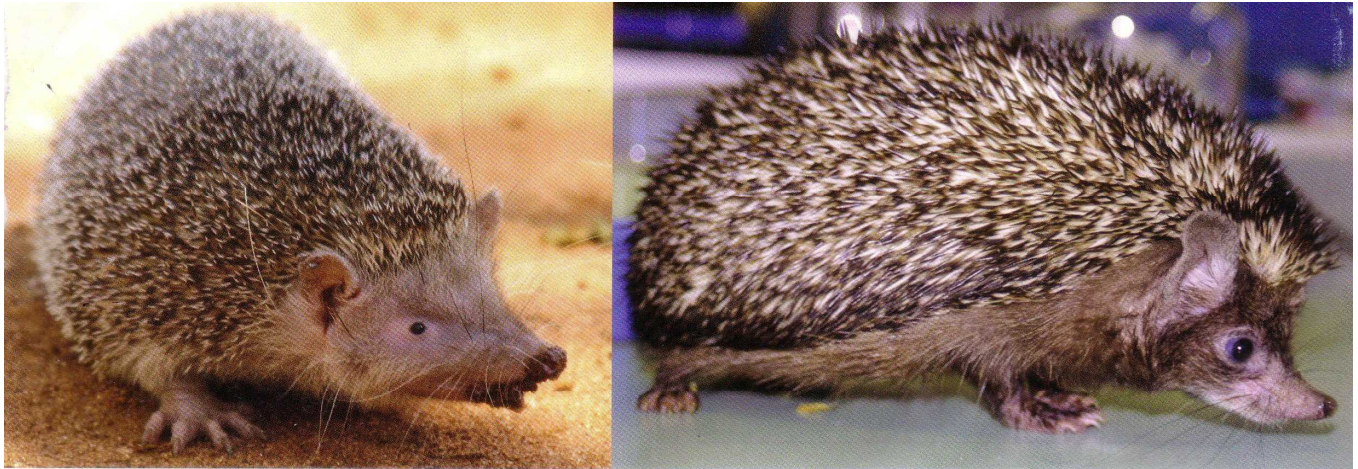
右図(「地球大進化 5」/NHK 出版 p118)は体長 1.75mの水陸両生のパキケトゥスから約 1,200 万年かけて体長 4.5mのドルドンに至り、現



生のクジラに至る化石の進化を示しています。中生代の海を生態圏にしていた首長竜や魚竜などの大型爬虫類は6,500万年前に恐竜と共に死滅しています。その生態圏を引き継いだのがクジラ類だったのでした。

クジラの体形は魚類の体形に収斂して進化したのです。水中を生態圏とすると、物理的に最も合理的なのが魚類の体形であり、クジラもその物理的誘導に従って魚類そっくりの体形になったということです。

5・2 ハリネズミそっくりのハリテンレック



姿形がそっくりなのは「収斂進化」 マダガスカル島に生息するハリテンレック(左)はハリネズミ(右)によく似た姿をしているが、遺伝子系統から見るとゾウやツチブタなどに近い。過去の大陸移動で分断されたそれぞれの大陸で独自に収斂進化した結果だと考えられている。

長谷川政美

上図(「日経サイエンス」2012/3月号 p19)の左のハリテンレックは右のハリネズミと見た目にはそっくりです。

「……そして、マダガスカル島だけにしかいない、テンレック科というトガリネズミに似たグループがいる。嘗ては食虫目に分類されたことがあるが、現在では私たちがランデヴー地点 13 で出会うアフリカ獣類に含められている。彼らは恐らく、他の如何なる哺乳類よりも以前に、アフリカから二つの異なった創始者個体群として到来したと思われる。現在では、ハリネズミに似た数種、トガリネズミに似た数種、及びミズトガリネズミのようにもっぱら水中で生活する一種を含めて、総計 27 種へと多様化している。この類似は収斂現象で、典型的なマダガスカル流のやり方で独立に進化したものである。マダガスカル島は地理的に隔離されており、「真の」ハリネズミも「真の」ミズトガリネズミも存在しない。それゆえ、テンレック類は、丁度幸運な時期に此処に到着し、局地的なハリネズミとミズトガリネズミに相当する種へと進化することができたのである。……」

(「祖先の物語・上」リチャード・ドーキンス／垂水雄二訳：小学館 p249)

上の文章で、ドーキンスはテンレックはコンセスター13 と約 1 億 500 万年前に分かれたアフリカ獣類に属し、最初は二種族の動物としてマダガスカル島にやって来たが、現在では進化により分化して 27 種になっていると説明しています。これらは分子生物学によれば、ゾウやツチブタと遺伝的に近い種族です。ハリネズミはコンセスター11 と約 8,500 万年前に分かれたローラシア獣類に属しています。分子生物学によれば、トガリネズミ、モグラに近縁の動物です。遺伝的な出自が大きく異なっているのに、同じような生活環境(生態圏)に適応して似通った機能や形態を持つに至った進化を「収斂進化」と呼びます。

5・3 有袋類と哺乳類での収斂進化の例

哺乳類の先祖であるコンセスター14 と有袋類が分かれたのは、約 1 億 4,000 万年前のことです。現在は有袋類の殆どはオーストラリアに生存しており、その代表格がカンガルーです。オーストラリアには幾つか有袋類と哺乳類が同じ生態圏を巡って争った痕跡があり、そこでは有袋類が勝ち残っています。

下の写真(「祖先の物語・上」p336)は上段に有袋類、下段にはそれに対応する収斂進化をしたローラシア獣類に属する有胎盤類を示しています。



自然の実験

有袋類(上段)とそれに「対応する」有胎盤類(下段) 左から右へ
 フクロオオカミ (*Thylacinus cynocephalus*) とオオカミ (*Canis lupus*)、
 フクロシマリス (*Dactylopsila trivirgata*) とパタゴニアスカンク (*Conepatus humboldti*)、
 フクロモグラ (*Notoryctes typhlops*) とサバクキンモグラ (*Eremitalpa granti*)、
 フクロモモンガ (*Petaurus breviceps*) とオオアメリカモモンガ (*Glaucomys sabrinus*)

収斂進化はとても面白いテーマです。あの美味なタラバガニはカニの一族ではなく、ヤドカリから比較的新しい時代に分かれて行ったとか、面白い話題にこと欠きません。ここでは外観の収斂について例示しました。今回は触れませんが、異なった種の間での遺伝子レベルでの収斂進化も別の大きなテーマです。

6. 進化論普及の歴史

現代の社会を動かしている科学技術は、西欧文明の産物です。西欧社会はキリスト教の社会です。キリスト教は姉妹宗教であるユダヤ教やイスラーム教と同じく、全能の神による天地創造を教義としています。進化論は「生物は簡単な存在から突然変異と自然淘汰の作用で今日の複雑な存在へと発展した」と主張し、「進化に関しては神の関与は必要ない」と説きます。

1831年、ダーウィン(Charles Darwin : 1809~1882)はビーグル号に乗って5年間の世界一周の旅に出、ガラパゴス諸島でフィンチ(小鳥の一種)に出会い、各島のフィンチがその島特有の果実や種子や昆虫をついばむのに最も適した特徴ある形状をしていることに気が付き、「これらの鳥は元は1種類の鳥が環境に適応して変化したのではないかと」帰国後の「ビーグル号航海記」に記しています。しかしここから導き出される「進化論」はキリスト教社会に与える衝撃が余りに大きいと自分の研究結果を発表することをためらって20年間が経過しています。遂にウォレスが同じアイディアの論文原稿の査読をダーウィンに頼んでくるに及び、背中を押される形で1859年に「進化論」の論文をウォレスと同時に発表し、その論文を要約した約15.5万語の「種の起源」1,250部を出版し、それは瞬く間に売り切れしました。

「種の起源」の明快さ、判りやすさは際立っていました。著名な科学者や知識人の間で支持者が増え、各地で賛成派と反対派が公開討論会を開催してお互いに激しく論陣を張るなどの社会現象化を呈しています。

「進化論」は科学者や知識人の間で急速に支持者を増して行きます。当然、「進化論」がキリスト教の信念に与えた打撃は激烈でした。科学はもともとキリスト教の組織が運営する教育・研究機関を母体として発達した歴史を持ちますが、科学が進歩するに連れて、社会人の多くがキリスト教の教義と自然科学の導き出す

概念に矛盾する部分が多いのに気づき、そのギャップに悩んでおり、それに明快な答えを出した「進化論」が爆発的に受け入れられる素地が既にあったのです。

生物は共通の先祖から分岐したという進化論の「変異」概念は比較的すんなり世に受け入れられましたが、「自然選択」概念の広範な浸透には時間を要しています。メンデル(Gregor Mendel : 1822~1884)が開拓した「遺伝学」とダーウィンの「自然選択」が統合された新しい枠組みにより 1930~1940 年にかけて広く受け入れられるようになりました。

その後、1953 年の DNA の二重螺旋構造の発見からバイオ技術が長足の進歩を遂げ、その一分野である分子生物学が確立されると、分子レベルで進化論を体系的に詳細に説明できるようになり、今日の「進化論」の姿があります。

進化論を要約しましょう。地球という環境のもとで悠久の時間をかけて発生した生物は、地球に存在する生存可能なあらゆる生態圏(生物が生存し繁殖可能な物理的環境)へと遺伝情報を少しずつ変化(「突然変異」)させながら進出しました。遺伝情報の変化の中には生存に有利なものと不利なものがあり、不利なもの(不運なものは滅び、有利なもの(幸運なもの)が世代を超えて生命を繋いで来た(「自然淘汰」「自然選択」)プロセスが「生物の進化」なのです。「生きろ!」、それこそが生物に与えられた絶対的的使命なのでしょう。

このプロセスは完全なる物理的過程であり、そこに実証不能な創造者の介入は必要とされていません。

この認識は人間にとって「真理に一步近づいた」という達成感と共に、数多くの古来からの哲学的・宗教的設問に対し、神・絶対者の存在抜きで向き合わねばならない精神的重荷を我々が負わねばならぬこととなります。

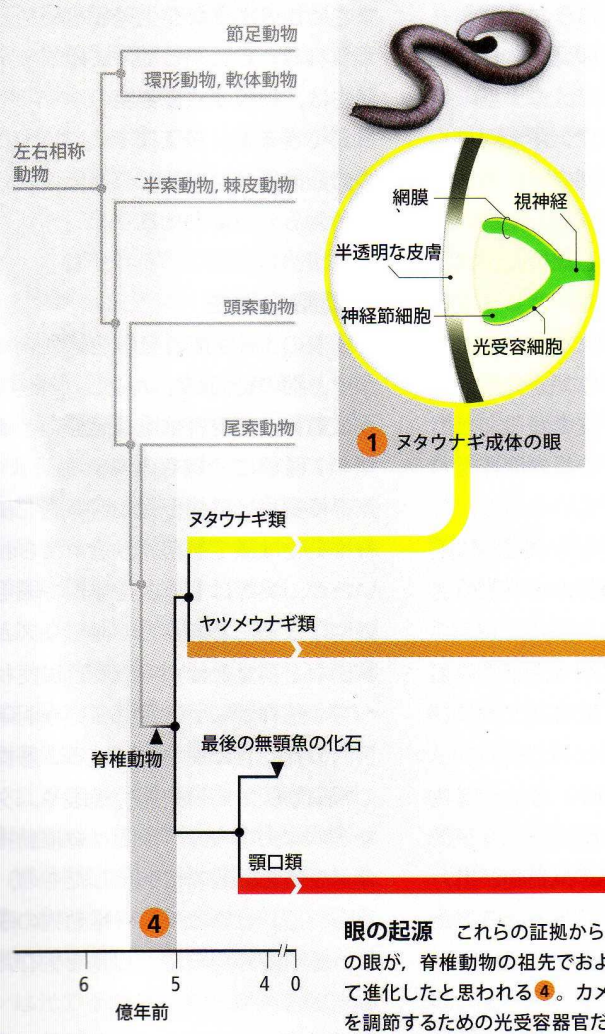
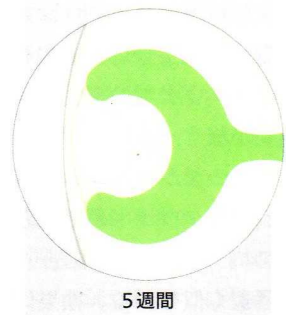
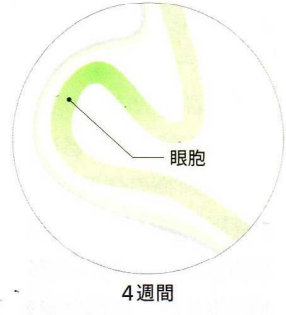
「精神的に耐えられる者だけが、真理に近づくことを許される」というのが真実なのでしょう。最後に「種の起源」の巻末の辞で締め括りましょう。

このようにして、自然の争いから、飢餓と死から、我々の考え得る最高の事柄、即ち、高等動物の誕生ということが直接の結果として起こったのである。生命はそのあまたの力とともに、最初は少数の、或いは只一つのものに息を吹き込まれたものであり、そして、この地球が確固たる重力の法則によって回転する間に、かくも単純な発端から、極めて美しく極めて驚嘆すべき無限の生物種が生じ、今も生じつつあるというこの見方には、壮大なものがある。

以上

胚発生に反映している眼の進化

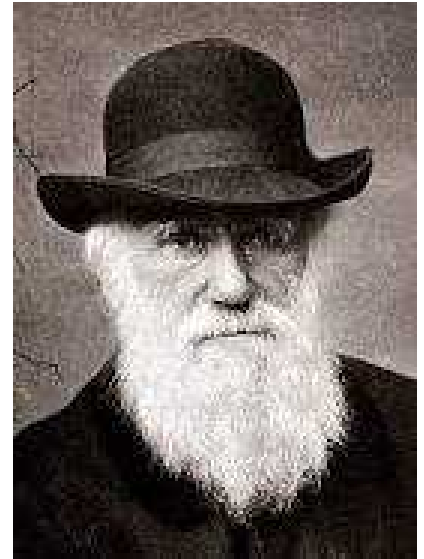
ヒトの「カメラ眼」はどのように進化し、最初どのように機能していたのか。その手がかりは、ウナギに似た原始的な脊椎動物であるヤツメウナギとヌタウナギの眼の構造や胚発生（発達過程）にある。ヌタウナギの眼は退化しており、視覚のためではなく、おそらく概日リズム調節のための光受容器官として機能している①。発生初期のヤツメウナギの眼の構造はヌタウナギの単純な眼に似ているが、変態時に複雑なカメラ眼へと変わる②。ヒトの眼も発生過程でヌタウナギの眼に似た構造をとる時期がある。発生初期のヒトの眼は網膜がヌタウナギと同様の2層構造で、その後新たな層が形成されて3層になる③。動物の胚発生はその系統の進化過程を反映することが知られている。



眼の起源 これらの証拠から、2層構造の網膜を持つ非視覚的な原始の眼が、脊椎動物の祖先でおよそ5億5000万年前から5億年前にかけて進化したと思われる④。カメラ眼のもととなったこの眼は概日リズムを調節するための光受容器官だったのだろう。

2. 人間ダーウィンの紹介

「人類が知っていることすべての短い歴史(A Short History of Nearly Everything)」(ビル・ブライソン著/NHK 出版)という面白い本があります。ベストセラーも出した著名な旅行記作家なのですが、科学の教科書について「まるで美味しいところは全部勿体ぶった謎に包んで、秘密にしておこうとでもいうようだった」「お陰で、私は科学がこの上なく退屈なものだと信じ込んで育ち、本当はそうでないはずだと薄々感じながらも、特に必要がない限り、科学のことなど本気で考えなかった。…」と書き出しています。貴方も同じ感想を持っているのではありませんか。彼はある時、一念発起して約3年間掛けて関連図書を読み込み、専門家にインタビューして、日本語で約650頁、字数でAHKテキストの約半分に当たる意欲的な本を書きました。その中から偉人ダーウィンの人間的な生き様について書いた箇所を以下に要約します。



Charles Robert Darwin (1809~1882)はイギリスの卓越した地質学者・生物学者です。西欧ユダヤ系の家系です。父親は裕福で高名な医者、彼が8歳の時に亡くなった母は著名な窯元のジョサイア・ウエッジウッドの娘でした。彼は最高の教育を受けて育ちますが、成績はぱっとせず、父は「お前は射撃と犬と鼠捕りのことしか考えていない。きっと、自分自身にとっても一族全体にとっても恥ずべき人間に育つだろう」と書き残しています。彼は博物学に傾倒していたのですが、父親の意志を容れてエディンバラ大学で医学と地質学を学びますが、患者の血や苦痛を見ることに耐えられず医師になることを諦めます(案外多いケースです)。法学に転換しますが退屈で我慢できず、父親の計らいでケンブリッジ大学で神学を修めさせられました。この時も地質学と博物学の良き教師に出会い、彼のこの方面の能力は強化されています。ただ、当時の上流階級の子弟の選択肢は医者か軍人か聖職者の何れかで、ダーウィンは軍人を嫌ったので、牧師になる途しか残っていなかったのです。本人は牧師は暇な時間があるから、博物学や地質学の研究ができるから悪くないなど考えていました。父親からはさほど期待されない、パツとしない人生のスタートです。田舎の牧師館で一生を過ごす筈の彼が22歳の時、イギリス海軍の調査船ビーグル号の23歳の艦長フィッツロイに誘われ、これは海外での博物学研究の良い機会だと飛びつき、航海中の艦長の夕食時の話し相手の地位で同行します。フィッツロイの期待は天地創造が聖書の記述通りに行われたという解釈について、ダーウィンは博物学的な証拠を見つけ出すことでした。艦長から見ると、ダーウィンは聖職者としての教育を修了していたことが乗船の決め手でした。後にダーウィンは艦長が期待していたキリスト教原理主義者とはほど遠いと判明、二人の争いの種となります。遠洋航海ではうつ状態になって精神に異常を来すことが多く、ビーグル号の前の艦長も閉塞感に襲われてピストル自殺しています。こういう難しい事情ですから、二人は口論が絶えず、「狂気の一步手前」だったようです。しかし、本業であった沿岸水域の海図作成等ではビーグル号の航海は成功を収め、ダーウィンも一生分の冒険をやり、持ち帰った多数の博物学の標本を学会に発表して名声を挙げ、その研究に数年間没頭し、やがて問題の進化論に行き着きます。以下は本文で説明したような経過を辿っています。1865年にはフィッツロイもその叔父の大蔵大臣カースルレー子爵と同様、喉を掻き切って自殺しています。家系の呪いでしょうか、「人生いろいろ」です。今日ダーウィン・フィンチと呼ばれている一群の小鳥は、その棲む島々の環境に応じて「自分で自分を創造していた」のですが、航海から帰った直後には博物学者としては未熟だったため、それぞれを別の種類だと思っていました。これを別々の才能を持つ多様なフィンチだと指摘してくれたのは友人の鳥類学者ジョン・グールドでした。ダーウィンが進化論の基本部分について書き始めたのは帰国後6年経った1842年です。1844年に匿名の人物(スコットランドの出版業者チェンバーズ：自分だということを40年間隠し通した)が、「人間

は創造主の手助けなしに下等な霊長類から進化した」と示唆する「創造の自然史の痕跡」という本を出版し、知識人の多くを激怒させます。これもあってでしょう、ダーウィンは誰にもその内容を教えず、2年間原稿を書き溜めたところで作業を放棄して、次の15年間は別のことに打ち込んでいます。10人の子供の父となり、8年間掛けてフジツボに関する包括的な著書を執筆する等です。

ダーウィンは年下のアルフレッド・ウォレスと気が合って以前から連絡を取り合っており、ダーウィンはウォレスに「種の創造というテーマで自著の出版に向けて準備しているところだ」（実際は半分が書き上がった時期で、出版の準備までは行っておらず、互いの研究テーマがバッティングしていることをほめかけた）と書き送っています。そしてウォレスが進化論と同じ内容の論文を崇拜するダーウィンに査読してくれと送ってきました。彼は末の息子が猩紅熱にかかり重体になる苦境の中で有力な友人二人に手紙を出し、「自分が書き溜めた論文を破棄するつもりだ」と身を退く意向を示します。友人たちは相談してウォレスとダーウィンのアイデアを合わせて要約を発表するという妥協案を出し、1858/7/1のリンネ協会の会合に発表されますが、ダーウィンは妻と共に末息子の埋葬に臨み、会合には姿を現していません。その場で7件の発表がありましたが、討論も行われず、活気のない会合として終わります。東マレーにいたウォレスは「共著者にしてもらって嬉しい」といつてきました。

反響が出たのは、本文にあるように、ダーウィンが急いで纏めた「種の起源」1,250部が発刊されてからでした。決定的な山場は1860/6/30、オックスフォードで開催されたイギリス科学振興協会でのウィルバースフォース主教とハクスリーの対決です。主教はハクスリーに向かい「サルに対する愛着心は祖父と祖母の何れから譲り受けたと公言しておいでか」と問いただします。ハクスリーは「真面目な学術的な討論を行うべき場で、高位を利用して無学なたわごとを持ち出す人間が自分の親類だと公言するよりも、サルが親類だと公言する方がましだ」と反撃しました。どちら側も後になって、相手を完全にやり込めたと主張しています。しかし、世間の最初の熱狂は少しずつ醒めて行きます。テキスト「地球と生物」にあるように、当時の科学界の大御所ケルビン卿は地球の年齢は2～4千万年の間と断定しています。ダーウィンは「種の起源」の初版で最短でも3億年だろうとし、更に改版ごとにその時間を伸ばしたため信用を失って行きます。

また、①当時は裏付けとなる化石がなかったこと（今は沢山出土しています）、②本文の1頁にあるような創造論的主張に対抗する理論（本テキストはその理論に関するものです）が持てなかったこと、③「一度獲得できた有利な形質も世代を重ねると薄まってしまう」というジェンキンの主張（誤っています）にも明快な回答が出せなかったこと等で形勢は不利になってきました。

最後の難問③は「メンデル(1822～1884)の法則」が3人の研究者により同時に再発見された1930年以後に徐々に学会にも賛同者が増え、解決しました。獲得された有利な形質は次の世代で全く現れないか、薄まらずにそのまま現れるかの何れかでした。そして適者生存で前者は淘汰され、後者が存続するのです。

ダーウィンは1871年に刊行した「人間の由来」で「自分は人間とサルの関連を信じている」と明言しています。当時はそのような化石がなかったのですから（ダーウィンはそのような化石はアフリカで得られる筈だとまで予言しています）、随分大胆な主張ですが、この本が登場した頃には世間の興奮も醒めつつあったので、大きな騒ぎにはなりません。熱心なクリスチャンであった彼の奥さんが、世間の反応を気に病み、結局は精神異常を来したのは気の毒なことでした。

ダーウィンは晩年をミミズの研究などにも費やし、多数の研究に対して多くの栄誉を与えられていますが、それらは「種の起源」や「人間の由来」に関してではなく、地質学、動物学、植物学に対する立派な功績を讃えるものでした。

ダーウィンはナイトの称号は得られませんでした。ウエストミンスター寺院のニュートンの隣りに埋葬されました。今の私たちは人類に対しダーウィンがニュートンに劣らない大きな貢献をしたことを知っていますが、埋葬された当時にも真の理解者はいたのかと思うと、心が安らぎます。

補遺了