

地球と生物

1. 地球の年齢

嘗て地球の年齢を推定することが人類にとっての究極の課題であった時代があります。

1650 年、アイルランド教会の大主教ジェイムズ・アッシャーは聖書を始め歴史的な文献を丹念に調べ上げた結果、「旧約聖書年代記 (Annals of the Old Testament)」という大冊の中で、「地球は紀元前 4004 年 10 月 23 日正午に創られた。」と断言しています。それは創世記 5・25 「メトシェラは 187 歳になったとき、レメクをもうけた。メトシェラはレメクが生まれた後、782 年生きて、息子や娘をもうけた。…」といった年代記を丹念に積算したものでした。この数値は英国の欽定訳聖書第 1 頁の欄外に恭しく書かれていました。

初めに、神は天地を創造された。地は混沌であって、闇が深淵の面(おもて)にあり、神の霊が水の面を動いていた。神は言われた。「光あれ。」こうして光があった。……神はご自分にかたどって人を創造された。神にかたどって創造された。男と女に創造された。神は彼らを祝福して言われた。「産めよ。増えよ。地に満ちて地を従わせよ。海の魚、空の鳥、地の上を這う生き物を全て支配せよ。」……そのようになった。神はお造りになった全てのものをご覧になった。見よ、それは極めて良かった。夕べがあり、朝があった。第六の日である。……
(新共同訳聖書／創世記 Genesis1.1-31)

ダーウィンは 1859 年出版した「種の起源 (The Origin of Species)」で地球の年齢は最短でも 3 億年であろうとの見解を述べています。これは浸食によってできた英国のウィールド大渓谷で削られた岩石の量を計算し、それを沈殿物が堆積する速さで割って出した年数です。

ダーウィンと同時代の英国の著名な熱力学の科学者であるケルビン卿 (叙勲名 Lord Kelvin、本名 William Thomson：絶対温度の単位 $^{\circ}\text{K}$ (ケルビン)に名を遺す) は誕生時の地球は熱を持った球体であり、それが少しずつ冷えて行ったという仮説に基づいて 2~4 千万年との数値を算出しました。

ダーウィンや他の地質学者たちは余りにも岩石に刻まれた記録に反するこの数値に異議を唱えたのですが、科学界の大御所ケルビン卿は反論を相手にせず、ダーウィンの死後には計算精度を更に上げて、最終的に地球の年齢は 2,400 万年と宣言しました。

この大きな間違いは、地球の内部の放射性物質が α 線(アルファせん：ヘリウム粒子線)、 β 線(ベータせん：電子線)、 γ 線(ガンマせん：短波長電磁波)を放出しながら崩壊して発生する熱が地球を内部から加熱していることが当時は知られていなかったために起こったものです。

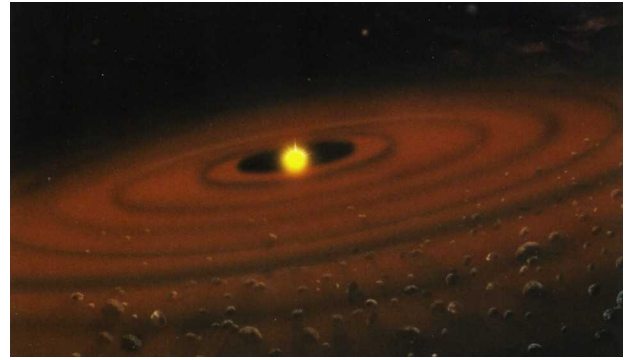
地球の年齢の正解は 45 億 5 千万年 (4,550,000,000 年) です。アッシャー大主教説の百万倍、ケルビン卿説の 100 倍です。この数値は岩石に閉じこめられたウラニウムと鉛の比率から経過時間を算出するウラン・鉛法(補遺 2 参照)で得たものです。

嘗て(約 46 億年前)、この近くの空間で、太陽の 8 倍以上の質量がある星が超新星(Super Nova) となって大爆発しました。この星の寿命の終わりに近い頃と爆発の瞬間に、主に核融合反応により炭素 ${}^6\text{C}$ より重い物質が造られました。地球には窒素 ${}^7\text{N}$ 、酸素 ${}^8\text{O}$ 、ナトリウム ${}^{11}\text{Na}$ 、マグネシウム ${}^{12}\text{Mg}$ 、アルミニウム ${}^{13}\text{Al}$ 、珪素 ${}^{14}\text{Si}$ 、リン ${}^{15}\text{P}$ 、硫黄 ${}^{16}\text{S}$ 、塩素 ${}^{17}\text{Cl}$ ……鉄 ${}^{26}\text{Fe}$ ……銀 ${}^{47}\text{Ag}$ ……金 ${}^{79}\text{Au}$ ……鉛 ${}^{82}\text{Pb}$ ……ウラニウム ${}^{92}\text{U}$ 等々が存在しますが、これらは超新星の中で (特に鉄より重い物質は超新星の中でのみ)造られたものです。

その意味で我々は皆「星の子 (Star Child)」なのです。

なお、数字は「原子番号 (Atomic Number: 原子核の中の陽子の数)」、英字記号は「元素記号 (Atomic Symbol)」と呼びます。

超新星が残していった爆発ガスの残骸の中から重力で互いに引きつけ合ってガス雲は、残された角運動量のため回転ガス円盤へと発達し（アイススケートでのスピンのような現象）、その中心に集まった大きなガス球体が自分の重力で圧縮・加熱され、中心部の温度が約 1000 万℃を越えたとき、水素の核融合反応が始まります。新しい太陽の始まりです。



原始太陽系の想像図（Newton 誌より）

……1969 年にメキシコのチワワに落ちた有名な
アジェンデ隕石を調べた地球科学者が、このコンド

ライト（球状隕石）に含まれる灰長石に奇妙なことがあるのに気がついた。……測定できるくらいの量のマグネシウムが含まれていたのだ。……アルミニウム 26 が崩壊してマグネシウムになってはねつけられる前に、（灰長石の）結晶の中に入り込んだということだ。アジェンデ隕石のコンドライトにマグネシウム 26 が見つかったことで、超新星のイベント（このとき放射性のアルミニウム 26 が生じた）から太陽の誕生（隕石と同時に誕生した）までの時間は、かなり限られたものだということになる。……超新星から新しい太陽系の精錬所で灰長石が溶解するまで、（放射性アルミニウム 26 の）半減期（71.7 万年）は 10 回も繰り返していない、つまり数百万年しか経っていないことを意味する。……一つの星の激しい死から新しい星の創造まで、それほど短い時間で起こったのは驚くべきことだ。創造の過程から離れたコンドライトだけが、まだ太陽系が若い頃の目が回るほどの忙しい時代を覚えている。……

〔括弧内は桐生の記述〕

「地球の自叙伝」M.ビョーネルド／渡会圭子訳：日経 BP 社 p126~128)

説明しますと、放射性アルミニウム 26 ($^{26}_{13}\text{Al}$ と書く)の原子核は陽子 13 個、中性子 13 個より成り、陽子 1 個が電子捕獲して中性子となり、陽子 12 個、中性子 14 個のマグネシウム 26 ($^{26}_{12}\text{Mg}$)に原子核転換し、その半減期(放射性核種(ここでは Al26)の残存数が 1/2 になる時間)が 71.7 万年だということです。溶融した原料の温度が下がり、灰長石が結晶して析出する時には Al は結晶の成分だから含まれているが、そうでない Mg は含まれている筈がないのです。

太陽が輝き始めると、太陽に近い領域では、残っている水素 1H 、ヘリウム 2He などの軽いガスは太陽光線の圧力を受けて遠方まで吹き払われ、後には宇宙塵や岩石など比較的重い物質が残され、物質分布の濃い場所の引力で徐々にそれらが集まって大きな塊へと発達し、更にその塊の群が衝突して合体するなどの過程を経て、太陽を巡る惑星へと発達します。

このような状況下で地球サイズの惑星のコアが形成される時間は、シミュレーションにより約 3,000 万年と見積もられています。（ハーバード大学イン博士、他／ネイチャー誌 2002/8/29）

太陽を一つの中心とする楕円軌道上(楕円には二つの中心があります。重力で結ばれた主星と衛星では、衛星の軌道は主星を一つの中心とする楕円軌道になります)を公転する惑星は内側から水星、金星、地球、火星で、ここまでがガスが吹き払われた領域にある岩石惑星です。

更に外側には木星、土星、天王星、海王星と続きますが、これらは太陽から充分遠方であったために太陽の放射圧で吹き飛ばされなかったガスが集まってできたガス惑星です。

なお、46 億年前の太陽の輝き(放射エネルギー)は現在の 70%程度でしかありませんでした。（「金星・地球・火星の気候の進化」J.F.カスティング／日経サイエンス 1988 年 4 月号）

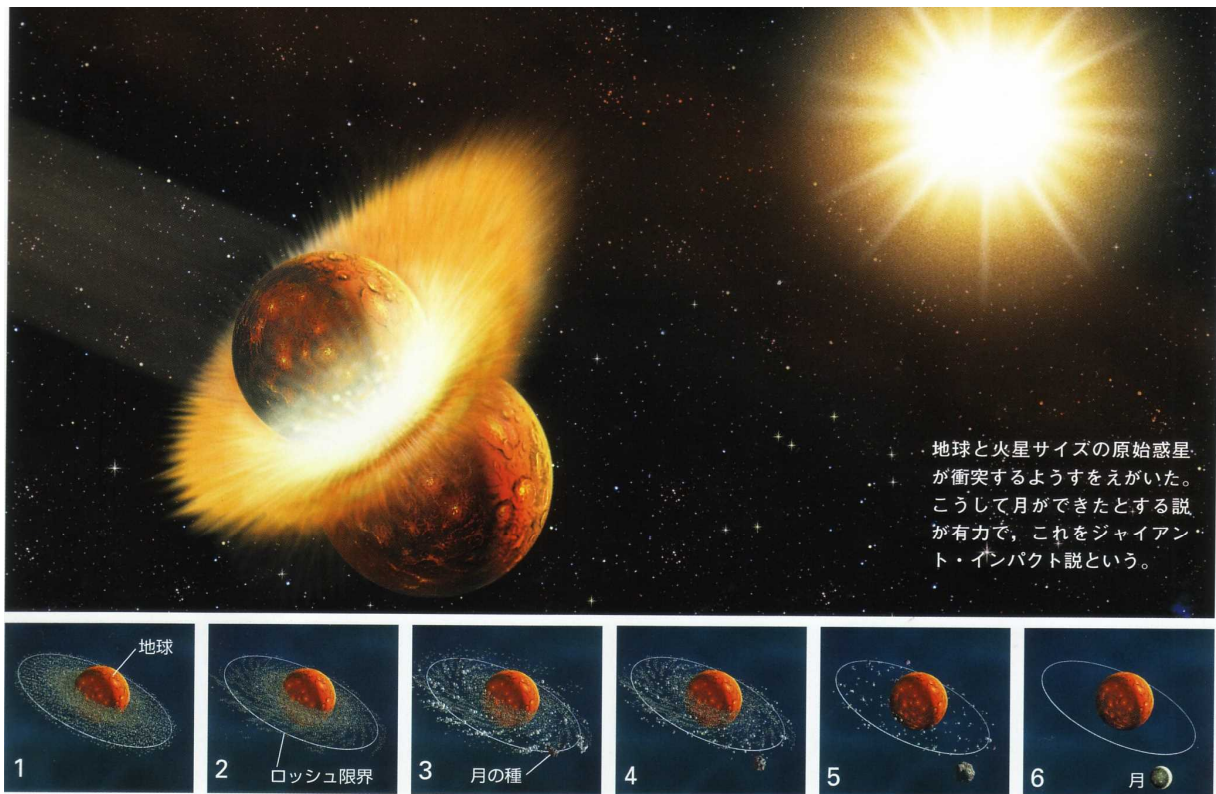
2. 月の誕生

惑星は多くの場合、惑星の重心を一つの中心とする楕円軌道を公転する衛星を伴っています。地球の衛星は月です。月の直径は地球の約4分の1、体積は約64分の1あり、他の惑星の衛星と較べるととてつもなく大きい衛星です。このため、地球・月系の角運動量は他の惑星系に比べて異常に大きく、これが地球の地軸(公転面に対し約 23° の傾き)の安定性、ひいては気候の安定性に大きな貢献をしています。

月が誕生したメカニズムについては、1946年に最初の仮説提案があり、紆余曲折があつて1984年に最も可能性が高い学説としての地位を占めたのが**ジャイアント・インパクト説**(Giant Impact: 巨大衝突)です。

原始地球と同じ公転軌道面を動いていた火星くらいの質量の原始惑星ティアが、あるとき、多少原始地球の中心を外した軌道で衝突しました。下図はその状況をイラストにしたものです。

以下はコンピュータ・シミュレーションの結果です。①衝突直後、原始惑星の中側の重いコア部分は原始地球と合体し、軽いマントル部分の岩石の一部は地球を取り巻く円盤になります。②約2日後、ロッシュ限界(主星に近い側、主星の引力による潮汐力(引き伸ばす力)が強すぎて、衛星となるべき物質が互いの引力では集合できない範囲内)の内側では地球の重力のため岩石は合体できません。③約1週間後、岩石が渦巻きの腕に振り回されて月の種ができます。④約2週間後、月の種はロッシュ限界の直ぐ外側で、内側の岩石を集めて成長を始めます。⑤約1ヶ月後、月の約90%が完成し、残された岩石は地球や月に衝突します。⑥約1年後、月は完成しました。

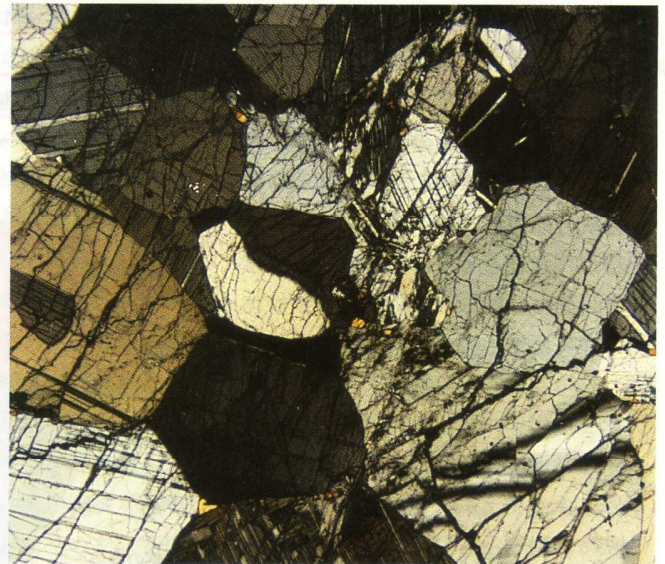


ジャイアント・インパクトの瞬間の想像図

(「地球は3000万年でつくられた」編集部/Newton2002年不明)

この学説の根拠の主なものは次のようです。

- (1) 1969年のアポロ11号の月面着陸以来、計12人が月の6つの地点から計328kgの岩石を持ち帰っています。それらを調査・研究した結果、月は地球のマントルに比べて揮発成分(カリウム、ナトリウム、ビスマス、タリウム等)が非常に乏しく、含水鉱物が全く存在しないことが判りました。逆に難揮発性物質(アルミニウム、カルシウム、トリウム等)は地球での存在比より50%多く存在しています。これはインパクトで加熱され、かりかりに焼き上がったためと考えられます。



月から持ち帰った斜長岩とその顕微鏡写真 斜長岩は月の高地の岩石種である(左)。岩石を薄片にし、偏光をあてて写真を撮ると、化学組成についての情報が得られる(右)。化合物の種類ごとに光の偏光の状態が異

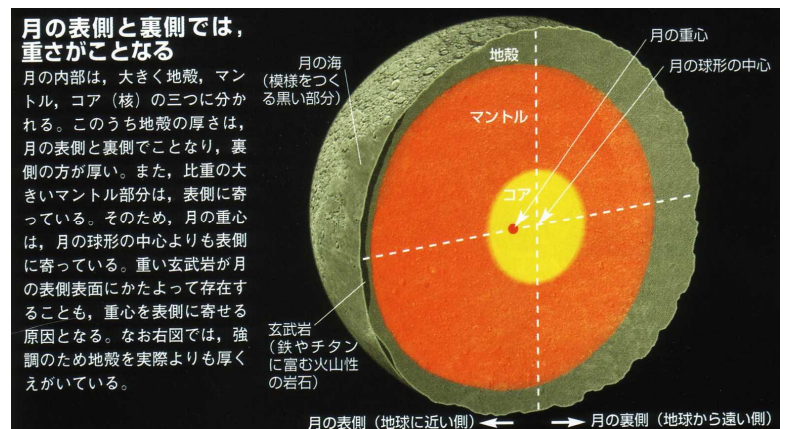
なるので、フィルターをかければ色の違いにより見分けがつく。灰色から白色の鉱物はすべて斜長石である。小さなオレンジ色の粒子は鉄とマグネシウムを含んだ鉱物である。

月の石とその断面 (「アポロが残した科学の財産」 G.J.テイラー／日経サイエンス 1994年4月号 p48)

- (2) 地球・月系の ①他の惑星に比べて異常に大きい角運動量と、②地球に対する月の公転軌道が太陽に対する地球の公転軌道面と少し外れている(一致していたら毎月1回、日蝕が起こる)ことは、インパクト時に原始惑星が原始地球の回転主軸を少し外して衝突したと考えるとよく説明できます。他の説では難しい点です。
- (3) 地球の比重 5.52 に比べ月の比重 3.34 は著しく低いですが、衝突してきた原始惑星の比重が重いコア部分が原始地球の内部に取り込まれ、主にマントル部分が飛び散ったと考えると説明できます。

以前からあった ①捕獲説、②分離説、③同時発生説では、これらの事象を説明できず、ジャイアント・インパクト説が観測された全ての事象を矛盾なく説明できたため、正しい理論であろうと認められたのです。

出来たばかりの月は地球から僅か約2万kmの低い公転軌道(現在は約38万km)を巡っています。地球に海が発生しますと、変形できる液体が月の引力に基づく潮汐力を受けると月へ向かって細長く引き伸ばされ、地球が1日に1回転すると月に面する場所とその反対側の二箇所が現在では平均して約50cm盛り上がり、陸にいと1日に2回そこを通るため満ち潮になり、その途中では引き潮になります。このような海面の変形のための海水の移動は地球の自転にブレーキを掛ける作用があり、地球は少しずつ自転の角運動量を失い、作用反作用の法則で地球の回転エネルギーは月の公転の回転エネルギーへと移され、年約3cmずつ地球から遠ざかって行き、約100億年後に平衡し、地球から見て同じ位置に静止します。月も地球の引力の潮汐力を受けて右の「月の断面図」のように変形しています。月の中心よりも月の重心の方が地球に近い方に来ているのが判るでしょう。起き上がり小法師のように、錘の方が地球に近い方であって、重力的に安定な状態



月の断面図

(「地球は3000万年でつくられた」編集部／Newton2002年不明)

になっています。地球に向いた側の地殻厚さは 30～50 km、反対側は約 100 km です。

2 頁前に地球の自転軸の傾きが月のお陰で非常に安定していると述べました。月が他の惑星の衛星並みの小さな質量ですと、地球・月系の角運動量は極めて小さなものとなり、地軸は公転面に対して $0^{\circ}\sim 80^{\circ}$ の範囲で不安定な変動をするとシミュレーションの結果は指摘します。原因は太陽からの引力の作用と、主に木星からの引力の作用で共鳴現象が発生することがあるためです。現に金星は地軸がふらついて逆向きになったために、現在は公転に対して自転が逆方向になっていると考えられます。

地軸が不安定になると、地球の各地は極寒の世界から灼熱の世界へと激しい気候変動に曝(さら)され、生物の生存・進化が困難な惑星になっていたと考えられます。月の存在は、地球の生物にとって大きな恵みであったのです。

……32 億年前の石に見られるタイダルリズム(潮の干満の痕跡を残す化石)は、初期の地球と月の綱引きを伝えている。保存状態が特によい層からは、毎日の潮の満ち引き、一ヶ月に二回の大潮小潮、さらには季節の周期まで読み取れる。……粒子の大きさがばらばらなのは、潮流が荒く、月が地球に遙かに近かったことを示し、これもまた荒っぽい月の誕生を裏付ける。そして最も注目には値するのは、地球の自転するスピードが今より速かったことが一年分の層の中にさらに存在する。10 億年前、地球の一日は 20.4 時間だった(一年は 430 日)のだ。……
(「地球の自叙伝」 p126~128)

アポロ計画による月の岩石研究から、41 億年前から 38 億年前にかけて月のクレータが集中的に発生したことが判明しており、太陽系ができた時期を前期として、この時期を**後期隕石重爆撃期(Late Heavy Bombardment)**と呼んでいます。岩石の誕生とは岩石が溶融した原料から結晶として析出する時期であり、地球で最古の岩石は 42.6 億年前に海底で誕生したと判明しています。その時期には既に地殻と海が出来上がっていたのです。月がこの時期にあれだけボコボコにされていますから、計算上はその 26 倍も多数の隕石の重爆撃を受けたら、地球も大変な目に遭っている筈です。

事実、大変な目に遭ったようで、40 億年前に多分直径 400km 級の巨大隕石の衝突を受けて、**全海洋蒸発事件**があったと考えられます。その証拠と思われる現象の研究が現在進行中です。シミュレーションによると水蒸気の雲の底は地表 300km に在って厚さは 60km もあります。それが少しずつ冷えて約 1,000 年かかって雲底が地表近くまで下りてきて 1,000 年以上大雨を間欠的に降らせて元の状態に戻ります。

後期隕石重爆撃期が起こった原因として、①木星や土星などの巨大ガス惑星の軌道移動説、②天王星・海王星の後期形成説、③第 5 惑星(火星と小惑星帯の間にあった)説などが候補に挙がっており、ジャイアント・インパクト説のようにこれだと確定したものとはなっていません。

それにしても、目眩(くるめ)くような大事件が次から次へと起こったのが、地球誕生の初期(冥王期)の実相でした。

3. 海の誕生

地球は形成直後は ①重い物質が沈降するときに発生する熱のため、②微惑星が地球に衝突するときの熱のため、③多かった放射性同位元素が崩壊する熱のために、表面全体が溶けたマグマの海でした。

それが冷えて、水が地表に現れたのは何時なのでしょう。

西オーストラリアから採取された 44～40 億年前のジルコン粒子を分析したところ、結晶に含まれた酸素の安定同位体の比率から 42 億年前には当時の地球表層に低温の環境と液体の水がなければならぬとの結論が出ました。意外と早くから地球の表面には地殻と水が存在した証明になります。（「原始の地球はすぐ冷えた？」 J.W.Valley／日経サイエンス 2006 年 2 月 p55）

徐々に気温が下がると、水蒸気として上空に存在していた水が雨となって、大量に降り続けた結果、マグマの海は更に冷やされて固化し、海が誕生しました。この頃に降った雨は、地球を取り巻くガスの量が多く、気圧が高かった関係で約 300℃の高温の熱湯の雨でした。海が出来ると大気中の二酸化炭素(CO₂)が急速に海水に溶解し、温室効果が減って気温がさらに低下し、気圧も現在に近い所にまで下がって行きました。

さて、この水は何処から来たのでしょうか。地殻の主成分である花崗岩の主要成分である角閃石は珪素 Silicon 8 個に対して水分子 1 個を有します。角閃石を地下 200m 以下にある圧力と温度を加えると、結晶中の水を放出して崩壊し、その水は火山の通路を通過して地上に出てきます。このお蔭で、岩石惑星である金星、地球、火星には誕生初期にはかなりの量の水が存在したはずで、つまり、相当部分は地球が誕生した時に既に岩石の中の成分として持っていた水が遊離して地表に現れたのです。

しかし、地球は内部から噴き出したというだけでは説明しきれないほど大量の水を持っています。何とこの水の半分以上(比率については各種の学説がある)は氷が主成分である「汚れた雪だるま」といわれる彗星が地球の引力に掴まって届けられたものです。（「Water from the Rock」 B.Harder／Science News, 23 March 2002）

海は地表の 70.8%を占め、これらは全て繋がっています。他にも、地表のごく小さい面積が塩水や淡水で覆われていますが、これらは海には含めません。海の面積は地表の面積の約 2.42 倍、現在の平均的な深さは 3,729m です。

主星から遠過ぎて水が氷になってしまわず、近過ぎて水が沸騰してしまわないで、水が海として存在できる衛星の軌道範囲をハビタブルゾーン(Habitable Zone：生命居住可能領域)と呼んでいます。

太陽系でハビタブルゾーンに入っている惑星は、金星、地球、火星です。テキスト「太陽系」で説明しますが、金星は 8 億年ほど前に熱暴走して灼熱の惑星となっています。火星には過去にはかなり大きな海があった痕跡が発見されていますが、現在は地表には液体の水は見当たりません。しかし、地中には氷や水分があり、その中に微生物がいないか探査が行われています。

興味深いことに、木星の衛星エウロパは全面氷で全地球凍結と同じ外観をしていますが、木星の潮汐力により地殻が周期的に変形させられて発生する内部発熱で表面の厚い氷の下に液体の海があることが確実視されており、地球外生命発見の有力候補地となっています。貴方の青年時代以降には、エウロパの内部海探査が行われると思います。

土星の衛星タイタンの地表には液状のメタンの川や海が見られ、液体メタンを溶媒とする地球とは異なった原理で生存する生命体が存在する可能性も論じられています。楽しい時代になりつつありますね。

4. 生命の誕生

「猿と別れた日」で、**コンセスター39** 辺りで全ての生物が合流する、即ち、全ての生物は共通祖先を有すると述べました。生命の共通祖先は約40億年前に海中で誕生しました。**コンセスター39** (39代前の共通祖先) から分岐したのは真正細菌 (バクテリア) です。この中に、後に地球を酸素の惑星に変える**シアノバクテリア**の祖先がいます。(「コンセスター」の定義は「祖先の物語」リチャード・ドーキンス／小学館に依ります。)

コンセスター38 から分岐したのは古細菌 (アーキア) で、次の章で活躍します。

コンセスター37 より後は全て真核生物です。真核生物の細胞は DNA などを入れた細胞核という細胞の司令部のような構造を持っています。次章で説明しますが、私たち真核生物の細胞の一部は真正細菌類に近く、細胞核は古細菌に近い構造をしています。

コンセスター37 から動物と植物が分岐して行きます。

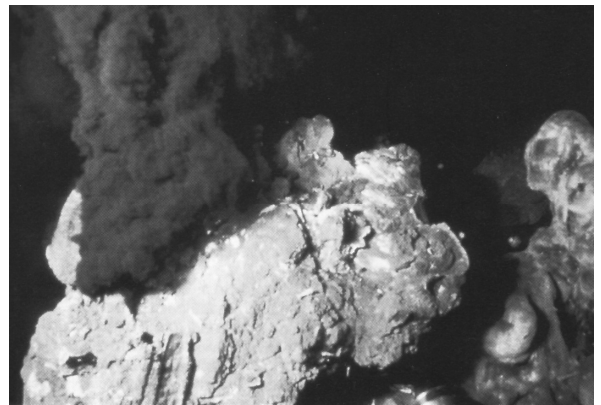
コンセスター1 から**コンセスター39** に至までの全ての生命体は、同一原理で働く DNA よりなる遺伝子を使って代謝・増殖します。外観・機能は似ても似つかぬ生物種が、全く同一の DNA の動作原理に従って生きております。

そして DNA の一部を交換したり、嵌め込んだりすることもできるのです。最初のスタートが1種類の生物でなければこのような状況は考えられません。その1種類の生物から、今日、地球上で見る全ての生物がそれぞれの生態圏 (生きる場所) を求めて進化して行ったのです。

古細菌や正真細菌には非常な高温や、高い酸性度、高いアルカリ度、高い塩分濃度といった極端な条件下で繁栄している種があります。一つのグループとしての古細菌類は、生物がどこまで耐え得るか「限界に挑んでいる」ように思えます。初期の海中で最も利用できるエネルギー源が

豊富であったのは、マグマから大量の栄養分が (「祖先の物語(下)」リチャード・ドーキンス／小学館 p316) 放出されている海中温泉の噴出口であるチムニー

あるいはブラックスモーカー(右上)と呼ばれる場所です。水圧が高いため、数百度の高温で栄養分に富むこの環境は、化学反応により複雑な化合物を作り上げる絶好の化学実験室であります。



ブラックスモーカー

ここで化学的に出来た RNA (リボ核酸 Ribonucleic acid) の中から、偶々、自己触媒作用を持つものが現れ、自己増殖が始まり、我々が生命と呼ぶ存在へと進化して行ったと考えられます。この筋書きで最初の生命体は RNA であったとするのが「RNA ワールド」説です。

ウイルスは今でもこの段階に止まって RNA 遺伝子により繁殖します。RNA 遺伝子は1本鎖なので、宇宙線や熱などの強力な破壊力を受けると、その個所の情報が書き換えられることがあります。その場合、元はどうであったかを参照して修復する手段がありませんから、RNA 遺伝子に頼るウイルスはどんどん変化します。このため、ウイルス系の病気はウイルスが絶えず変化するため、なかなか薬の開発が追いつきません。

1本の RNA 鎖に相補的(Complimentary)な RNA 鎖が組み合わされて、二重らせん構造になったのが DNA (デオキシリボ核酸 Deoxyribo nucleic acid) です。宇宙線や熱などの破壊力を受けて2本鎖の一方の一部の情報が壊されても、もう1本の鎖の同じ個所に相補的な情報 (A と T が、G と C が必ずペアになっている) が残されているので、修復酵素の助けを借りて正しい遺伝情報を復元できます。

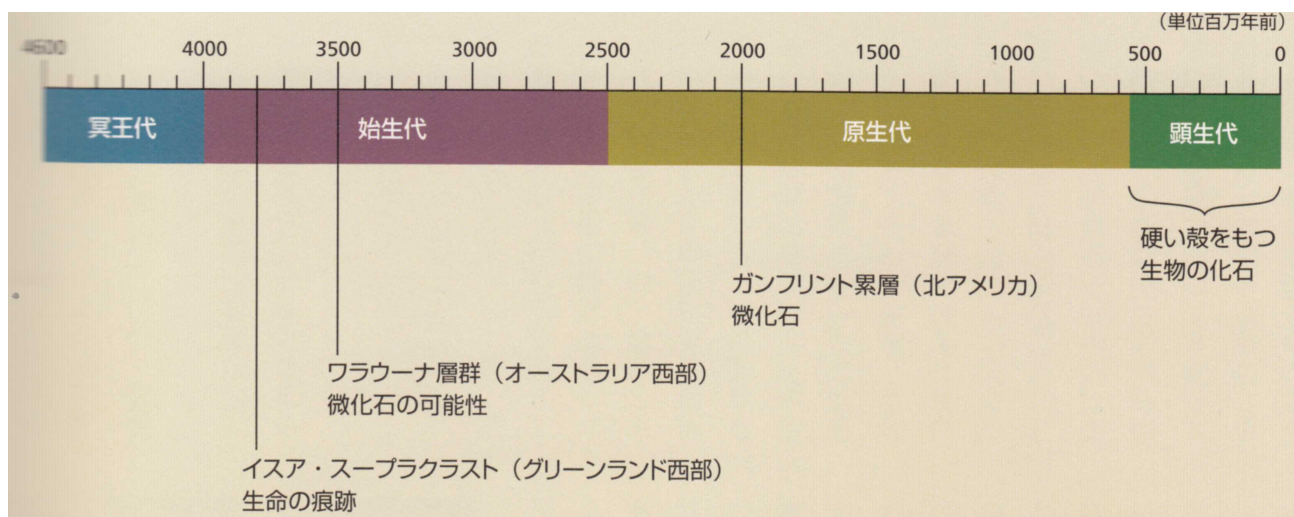
このため、DNA 遺伝子は RNA 遺伝子に比べて、情報の毀損に対しておよそ 10 億倍強いと推論されています。

複雑な遺伝情報を誤りなく次の世代に伝えることが出来れば、複雑な構造の生命体へと発展して繁殖することができます。しかし、幾ら確率が低くても、やはり、誤りは発生します。次の世代は前の世代と少し違ったものがあることがある、これが進化の原動力なのです。できるだけ正確に次世代に遺伝情報を伝えながら、大きくなりすぎない程度で変化して行く、この絶妙なバランスが今日の生物界を作り上げています。



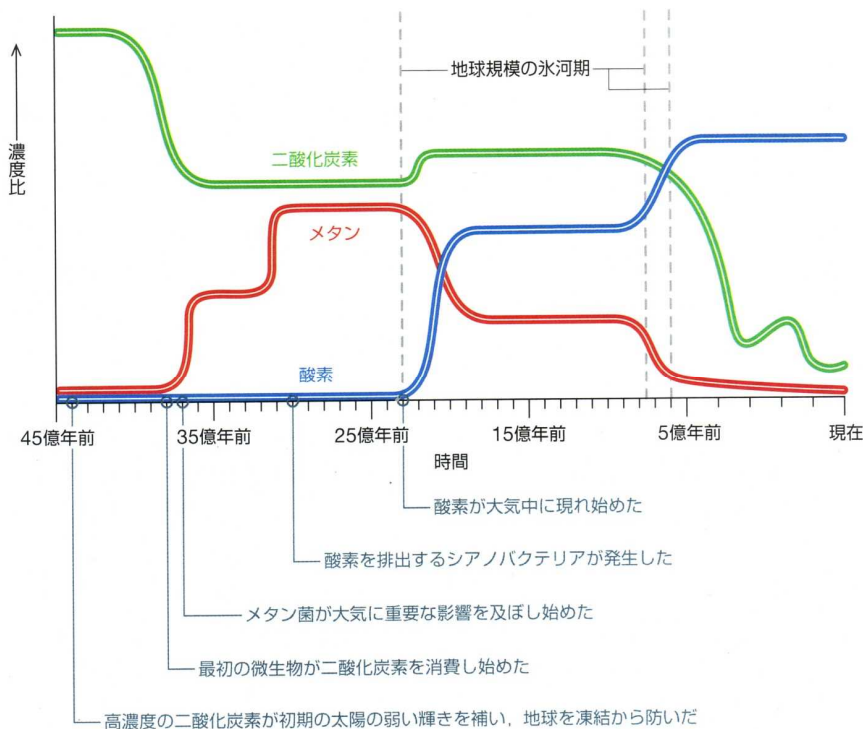
35 億年前の細胞の化石（「生命の起源」 L.E.オーゲル／日経サイエンス 1994 年 12 月号 p59）

上の写真に 35 億年前のラン藻の写真と図を載せました。もう、この時代には、植物は多細胞化しているのです。今のところ、動物の細胞化石でこれだけ古い時代のものは発見されていません。多細胞動物の本格的な活動までは 5 億 2 千万年前まで待たねばなりません。



生命の痕跡とその年代（「地球大進化 1」／NHK 出版 p122）

5. 生物と地球の大気の不思議な関係

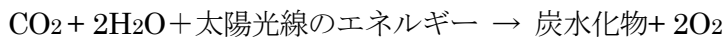


大気中のガス存在比

(「原始地球の気候を支配したメタン菌」L.E.カスティング

／日経サイエンス 2004 年 10 月号 p81)

35 億年ほど前に、真正細菌に属するシアノバクテリアが誕生しました。彼らの働きは次のようです。



1 個の炭酸ガス分子と 2 個の水分子と太陽光線エネルギーから、この場合は炭水化物と 2 個の酸素分子(O₂)を作り出し、その過程で得るエネルギーで生命活動を営みます。

これは、まさしく現在の植物が行っている光合成作用です。

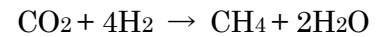
実は、植物は後にシアノバクテリアの仲間を細胞の中に取り込んで一心同体の共生状態（内共生）となり、水と炭酸ガスと太陽エネルギーを主たるエネルギー源として生命活動を行うことができるように進化したものなのです。(補遺 3 参照)

さて、この酸素が徐々に蓄積されて、メタン菌や嫌気性生物は酸素にやられて衰退し、深海底などの限られた生態圏に閉じこめられて温暖化ガスが激減し、23 億年前にヒューロニアン氷期と呼ぶ地球史最初の氷河期が出現しました。また、海中の酸素濃度が徐々に高くなると、この酸素と栄養素を使ってエネルギーを作り出すミトコンドリアという真正細菌が誕生します。植物も動物も後にミトコンドリアの仲間を各細胞の中に千体の単位で取り込んで一心同体の共生状態となり、酸素と栄養素を体内に取り入れ、炭酸ガスを体外に放出して得たエネルギーで生命活動を行うように進化したものなのです。私たちの体重の 10%弱がこのような後から細胞内に取り込まれて重要な一員として役割を果たしている真正細菌の末裔であります。

植物や動物は最初は古細菌と同じく嫌気性の（酸素の乏しい）環境で進化しましたが、シアノバクテリアの仲間や、ミトコンドリアの仲間を細胞内部に取り込んだため、細胞内部に酸素が行き来する状態になりました。嫌気性の生物が酸素に晒されるのは、極めて危険です。その対策として、本来は嫌気性の中核部分が

地球の大気は最初はマグマから噴き出た炭酸ガス CO₂ と水素 H₂ で満たされています。

最初に地球規模で活動を開始したのは古細菌の中の数種類のメタン菌です。メタン菌は次のように働きます。



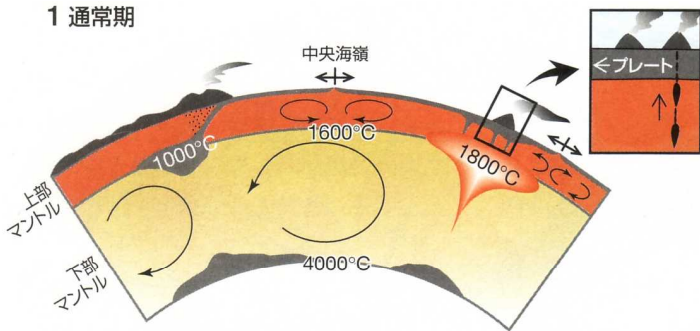
1 個の炭酸ガス分子(CO₂)と 4 個の水素分子(H₂)が 1 個のメタン分子(CH₄)と 2 個の水分子(H₂O)に変換され、その過程で生み出されるエネルギーを使って、メタン菌は生命活動を営みます。

まだ太陽の活動レベルが現在の 80%程度の時代、大量に生産されたこのメタンガスが温暖化ガスとなって、地球を凍結から守っていたようです。

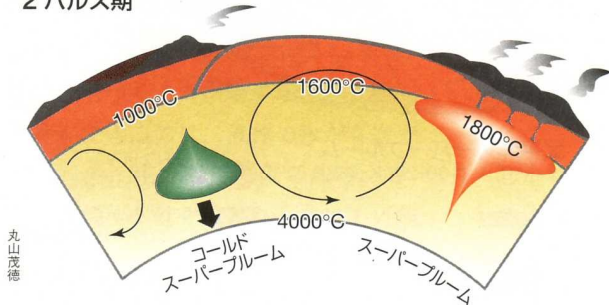
細胞核という一種の酸素が入れないバリアーを持つ場所を作ってその中に移動し、細胞膜と細胞核の間の空間をエネルギー製造工場のように使って、嫌気性の化学反応(還元反応)の20倍もエネルギー発生効率が高い好気性の化学反応(酸化反応)を使って活動レベルを大幅に向上し、大いに進化・繁栄したのです。細胞核をはっきり記録に留めている微量化石が21億年前の縞状鉄鉱石で発見されており(「地球の自叙伝 p177」)、丁度、酸素革命が始まった時期と内共生が始まった時期がほぼ一致しています。

6. 移動する大陸

1 通常期

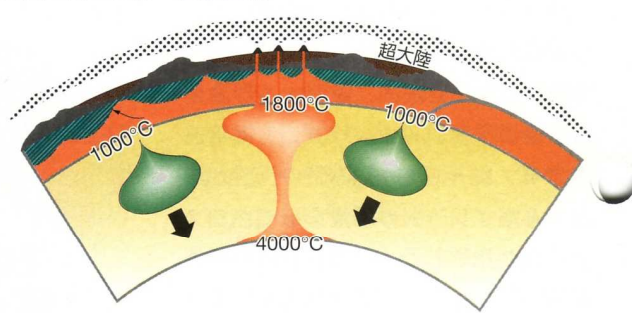


2 パルス期

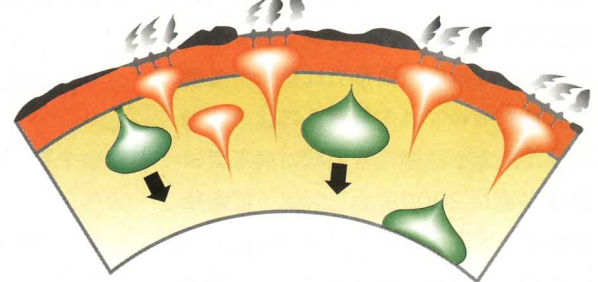


スーパーブルームの誕生 地球表面のプレートはマントルに沈み込み、上部・下部マントル境界面付近に滞留する（通常期）。滞留したスラブ（沈み込んだプレート）が崩落すると、大規模な下降流（コールドスーパーブルーム）が生じてマントル対流が活発化。火山活動も通常期の2倍に激し

3 スーパーブルーム誕生期



4 マントルオーバーターン



くなる（パルス期）。超大陸を取り囲むプレート沈み込み帯ではマントルに大量の水が供給され、この結果、マントル対流がさらに激しくなってスーパーブルームの上昇流が生まれる（スーパーブルーム誕生期）。地球誕生初期にはマントル対流の大規模な反転も起きた（マントルオーバーターン）。

スーパーブルームの誕生（「地球史を支配した水」丸山茂徳／日経サイエンス 2002 年 4 月号 p50）

地球は誕生直後の溶解した状態の時から、比重の重い物質は中心部へ向かって沈み込み、軽い物質は上に浮く重力分別が始まりました。地球の総面積約 5 億 1000 万平方キロのうち、陸地は約 29%を占めます。大陸の主な成分である花崗岩(比重 2.6~2.8)は、海底地殻の主な成分である玄武岩(比重 2.9~3.2)より軽いので、大陸は地球の全体積の 80%、質量の 67%を占めるマントルの上に浮いています。マントルの下には、コアがあります。

地球の高さの分布には二つのピークがあり、海拔約 840mのピークは大陸の平均高さ、海面下約 3,729mのピークは海底の平均深さです。金星や火星には一つの高さピークしかなく、この点が地球の特徴になっています。

大陸地殻の平均厚みは約 35 km、海底地殻の平均厚みは約 5 kmです。地球のコア（中心核）は地下 2,900 km以下に存在し、直径 7,000 kmで下部マントルに接し、主に鉄とニッケルから成っています。

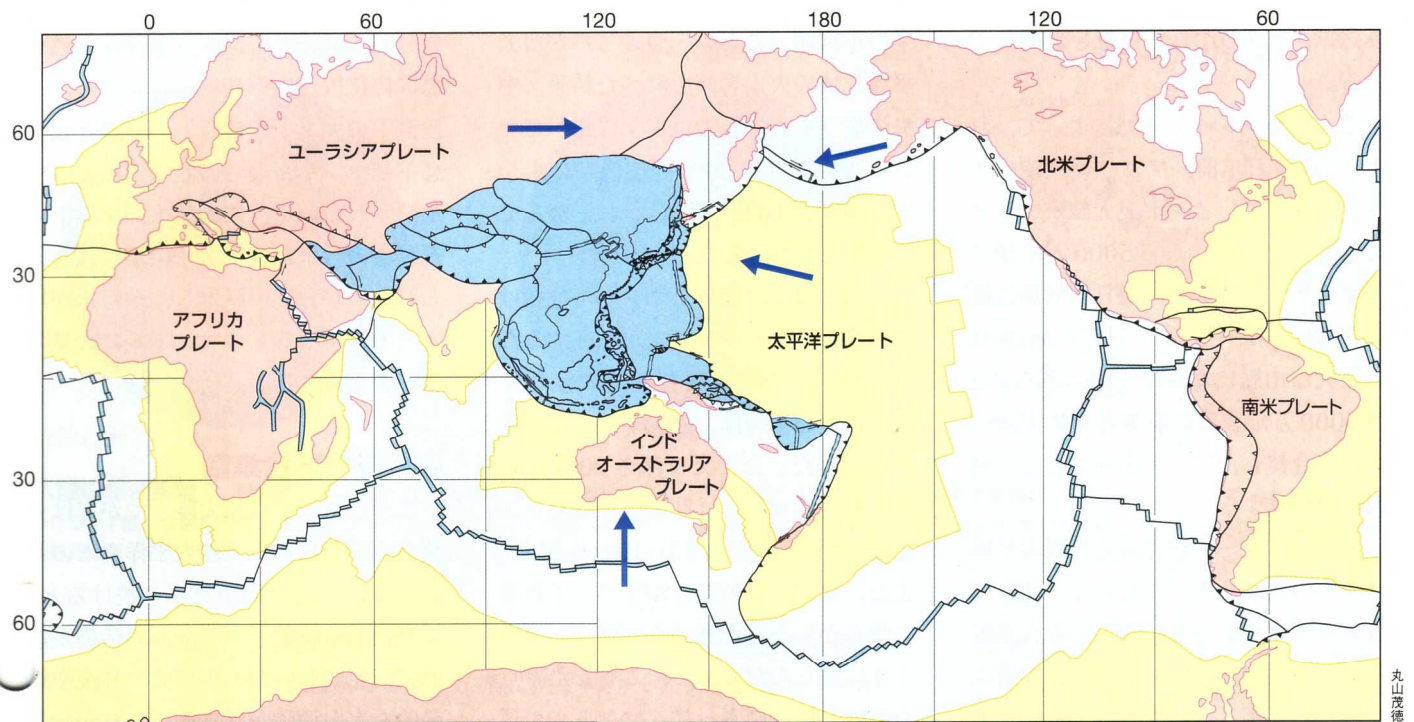
その温度は放射性物質の崩壊熱によって加熱されて約 6,000℃、上図にあるようにプレート（地殻）直下の上部マントルの平均温度は約 1,600℃で、固まりかけたキャラメルくらいの粘度があります。

このような系では薬缶の中のような対流現象が発生します。4面からなる上図を見れば、その概要を理解できるとと思います。

太平洋プレートはハワイと米国西海岸の間の中央海嶺から湧き上がり、日本へ向けて年間約 9 cm移動し、日本列島の下に潜り込んで行き、その間の時間は約 2 億年です。このため、大陸の地質には 42 億年当時のものが存在しますが、海底の地質には 2 億年以上前のものはありません。海底を掘り返しても、そう古い化石は出てきません。

以上のような理論をプレートテクトニクスと呼びます。

次頁の図は現在のプレートの移動状況を示しています。



西太平洋は海水の飲み込み口 東アジアの真下に存在するコールドスーパーブルーム（水色の領域）は周辺のプレートを引き寄せ、東から太平洋プレート、南からはインド・オーストラリアプレートが沈み込んで「2重の沈み込み帯」を形成している。こうしたプレート運動により、現在

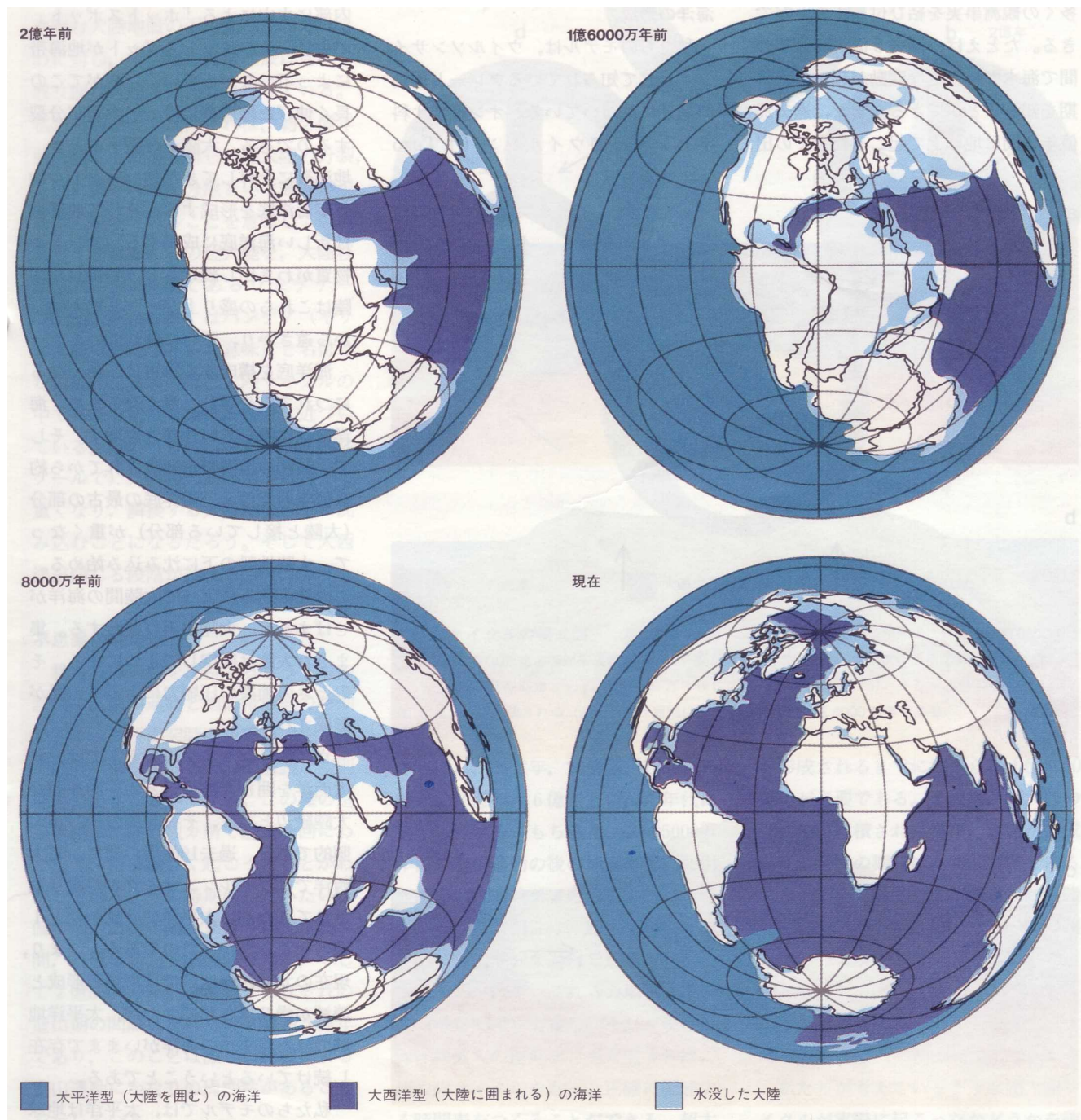
すべての大陸がアジアに集まりつつあり、2億5000万年後には巨大な超大陸が誕生する。この地域ではプレートの沈み込みとともに大量の海水がマントルに流入している。これが続くと、いずれはマントルの活動が活発になって爆発的な上昇流が生まれ、将来の超大陸もいずれは分裂する運命にある。

プレートの移動（「地球史を支配した水」丸山茂徳／日経サイエンス 2002年4月号 p50）

……大陸衝突時の圧縮力で生じた山脈の年齢を調べると、不思議な規則性を見出すことができる。この種の造山活動は世界の数カ所で過去6回にわたって、特に激しく起こったことが判っている。その時期はだいたい26億年前、21億年前、18～16億年前、11億年前、6億5000万年前、そして2億5000万年前である。それぞれの造山期の間隔はだいたい4億年～5億年であり、このことは激しい造山運動にかなりの周期性があることを示している。しかも、各造山期の約1億年後、地溝帯の形成が始まる。大量のマントル起源の岩石（地溝帯の形成によって生じた地殻の割れ目の中にマグマが上昇してできたであろう岩石）の年齢は大ざっぱに、25億年、20億年、17億～15億年、10億年、6億年といった時代に集中している。……超大陸が分裂し始めてから（だいたい地溝帯の形成から4000万年後）各大陸が最も離れ、新しい海洋底で沈み込みが始まるまで約1億6000万年かかる。それから各大陸が再び近づいて超大陸が形成されるまでには更に1億6000万年が必要である。その後、超大陸の下に熱が蓄積され、再び地溝帯が形成されるまでの期間は約8000万年である。地溝帯形成の4000万年後、再び超大陸は分裂を始めるが、これはその前の超大陸の分裂から4億4000万年後のことである。……

（「分裂と統合を繰り返す超大陸」R.D.ナンス他／サイエンス 1988年9月号 p19）

上記の 超大陸⇒大陸の分裂⇒超大陸 の繰り返しを、ウィルソン・サイクルと呼んでいます。



パンゲアの分裂と移動 (「分裂と統合を繰り返す超大陸」 p18)

現在は前回3億年前に存在した超大陸(パンゲア)が分裂し、各大陸が最も離れている時期に当たります。パンゲアが分裂して行く様相を上の方の4面の図に示します。

現在のように大陸が赤道付近でなく、極に近い位置に集まっている時は、南極やグリーンランドのような高緯度地域の大陸を氷河で十分に覆えば、氷床は下の岩石の降雨による浸食を防ぎます。すると浸食されて出てくる化学物質により炭酸ガスを炭素にして地中に埋没させるプロセスが弱まり、炭酸ガス濃度が低下しなくなり、氷河の成長を止める抑制作用が働いて、氷河の量を安定化させる作用が起こります。

7. 全地球凍結 Snowball Earth

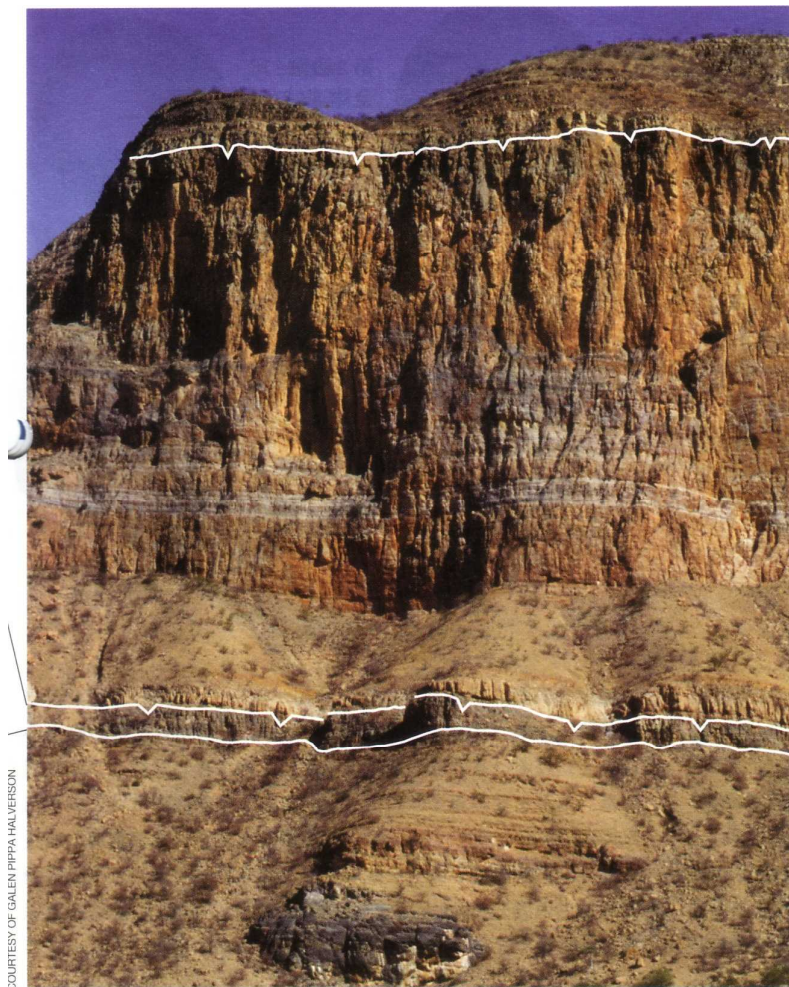
生物が、まだ、海中の世界に閉じ込められていた長い時期、7億5千万年前から5億8000万年前の間に地球は極端な寒冷化(全地球凍結)と温暖化を繰り返し4回も立て続けに起こしたことをP.F.ホフマン等の地質学者たちが発見しています。

氷河は重力により移動する時に岩壁を削って持ち下り、解氷する時に削り屑を解放します。解放された物質が氷河性堆積物です。この中の微少帯磁鉱物(鉄、ニッケル、コバルト等)が地層が硬くなる時期に地磁気により磁化された方向が水平であれば赤道、垂直に近ければ北極か南極に近かったことになります。

驚くべきことに、世界中での氷河性堆積物の調査結果は、当時の氷河が覆っていた陸地は殆ど赤道にあったことが判明しました。

全地球凍結のプロセスは次のようです。7億7000万年前のゴンドワナ超大陸が分裂し、小さくなった大陸群が赤道付近に散らばりました。大陸の岩石は水分の供給源である海に接近することとなり、より大量の雨が降り、海の温度は急速に下がり、極の近くに巨大な氷が形成され、氷が太陽光線を反射するために一層地球は冷却され、暴走冷却により、地球の大部分が厚い氷に覆われてしまいました。

このままでは、地球は永久に氷に覆われた状態が続きます。しかし、その間も火山活動は続きます。数千万年も過ぎると、大気中の炭酸ガス濃度は超温暖化を引き起こすまでに高くなります。地球規模の温暖化により赤道付近の氷は溶解し、表面温度は50℃も上昇し、蒸発と降雨の激しいサイクルを引き起こします。炭酸ガスを吸い込んだ炭酸水の雨が濁流となって陸地を削り、窒素、燐、硫黄、カルシウム、微量ミネラル等の栄養塩を海に大量に供給し、炭酸水は海で炭酸塩鉱物(石灰岩)を大量に作ります。下の写真のキャップ炭酸塩岩がそれです。いよいよ、海中生物大繁殖の条件が整いました。

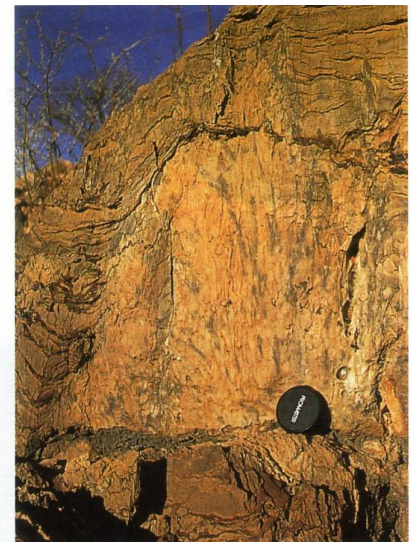


COURTESY OF GALEN PIPPA HALVERSON

クリスタル・ファン (扇状結晶集合体)

キャップ炭酸塩岩

氷河性堆積物



COURTESY OF DANIEL P. SCHRAG

全地球凍結の証拠 ナミビアの骸骨海岸(スケルトンコースト、真ん中の写真)の岩壁は全地球凍結仮説を裏付ける最良の証拠だ。著者のシュラグ(左ページの写真の左)とホフマン(同右)は、約7億年前の全地球凍結事変を示す堆積層(氷河性堆積物)が上位の炭酸塩岩に覆われることを示している。氷河性堆積物中の白っぽい巨礫は、おそらくかつて氷山にとりこまれて移動し、氷が溶けた際に泥質の海底に落下してできたのだろう。

氷河性堆積物の上に積み重なった混じりけのない炭酸塩岩層は、全地球凍結の直後に必然的に起きる温暖化により、温暖で浅い海に沈殿して形成された。このキャップ炭酸塩岩は巨大な扇状の炭酸塩鉱物結晶体(クリスタル・ファン)をもつ原生代後期の岩石にだけ見られる(上の写真)。

全地球凍結の証拠の露頭 (「氷に閉ざされた地球」P.F.ホフマン他/日経サイエンス 2000年4月号 p59)

8. カンブリア紀の大爆発 Cambrian Explosion

全地球凍結はおよそ 7,000 万年にわたって陸上では 3,000m、海では 1,000m にも及ぶ氷に閉ざされた世界でした。この間、生命は海中温泉のような避難所に生息していたのでしょう。今でも多様な生物がそこに住んでいます。

全地球凍結が終わる頃から、浅い海の太陽光線を浴びて、シアノバクテリアが大繁殖して海中に大量の酸素が供給され、それが大気中にも出て行って、酸素革命が始まります。地球が酸素の惑星になるのです。

この酸素によって、これまで海中に溶解込んでいた鉄やマンガンが酸化して酸化鉄や酸化マンガンとなり、海底に堆積します。現在、製鉄業が原料としている鉄鉱石はこうにしてできた生物起源のものです。酸素は極めて化学的活性度が高い物質で、すぐに他の物質と酸化という化学反応を起こして、消費してしまいます。地球に豊富に酸素があるということは、常時、酸素が供給され続けていることを意味します。このシアノバクテリアもその後に勃興した海洋生物との生存競争に勝てず、現在では塩分濃度が極めて高い限られた海域に追いやられ、ストラマトライトという形でしか見ることはできません。

代わって現代の酸素を供給しているのが植物です。

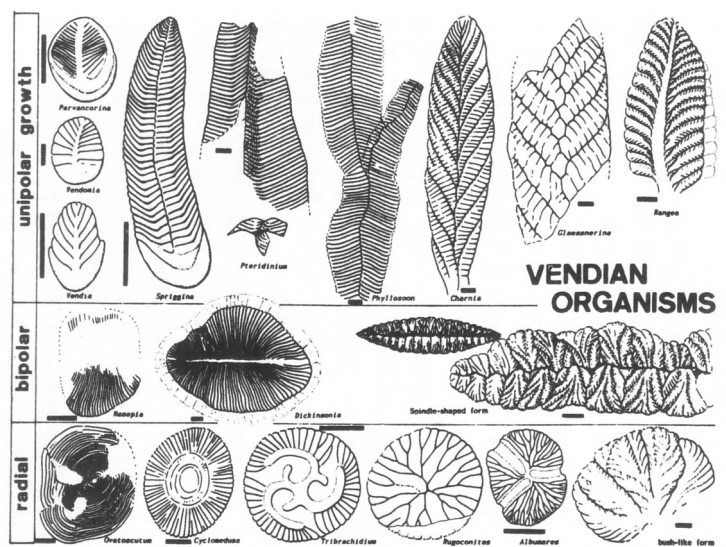
全地球凍結が終わって海中の酸素濃度が上昇し、陸地からの豊富なミネラルの供給を受けて繁栄した生物として知られているのが、エディアカラ生物群です。1946年にオーストラリアのエディアカラ丘陵地で発見され、このように命名されました。6億年から5億5,000万年前の化石です。右図がそれなのですが、この時代、始めて多細胞化した動物の化石が出現します。生物がコラーゲンというタンパク質構造体を獲得して、大型化が可能になったのも原因といわれます。軟体動物は普通化石化できないのですが、一気に泥が覆い被さったのが堆積岩石となって、このような印象化石が残りました。

数 10 cm から 1 m を越すものまであります。

注目すべきは、これらには一切、攻撃や防御のための器官が備わっていません。砂の上に這って行った跡の化石が残されており、これらが動物であることは間違いありません。氷が去って、栄養分に満たされ、争うものもない世界、まさしく動物にとっての「エデンの園」がそこにありました。

1909年、カナディアン・ロッキー山中で発見された5億4,200万年～5億3,000万年前のカンブリア期の化石では様相が一変します。獲物や敵の襲撃を早期発見する目、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競争による進化が始まります。

この時代、動物は、まっさらなキャンバスに自由に画を描くように、実に多様なボディプラン（身体構造）を、



エディアカラ動物群

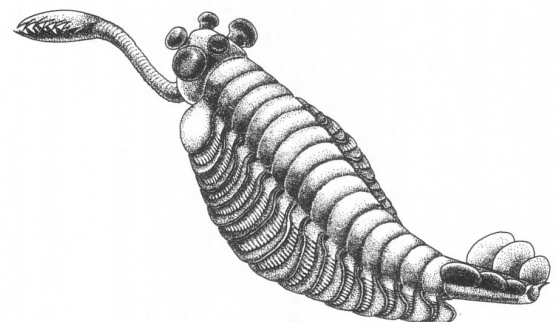


図3-21/オパビニア。前頭部から伸びるノズルの先端は爪状になっており、頭部には五つの眼、体節の上面には鰓、尾には三つの節がある。マリアン・コリンズによる復元画。

オパビニア（「ワンダフル・ライフ」p181）

試みました。前頁下のオパビニアを見てください。目が5個、頭のノズルの先には蟹のような鋏がついています。4〜7 cmの小柄な動物です。

次の右の図は有名なアノマロカリス(“奇妙な海老”の意)です。これは体長 60 cm〜1 m級で、当時の食物連鎖の最上位に位置した動物です。口は円周上の歯が中心に向かって絞り込まれる構造になっています。左右の甲板を波打たせて悠然と遊泳していたようです。このアノマロカリスに掴まらないように、それぞれの動物は得意技を磨いて、生存競争を生き抜こうとして大いに進化しました。

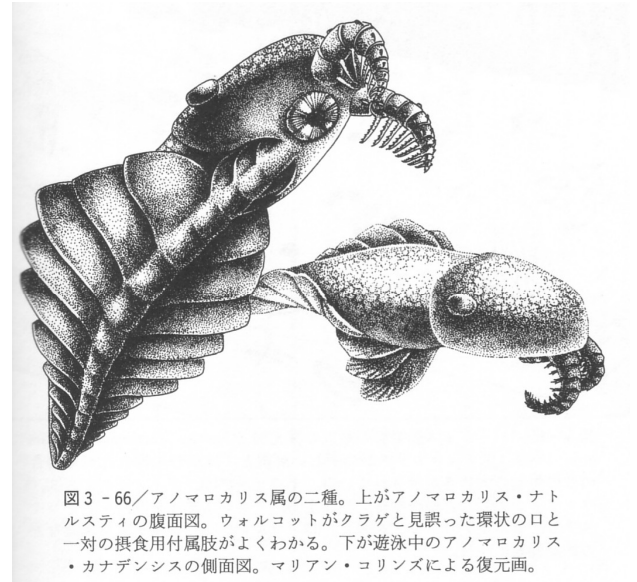


図3-66/アノマロカリス属の二種。上がアノマロカリス・ナトルスティアの腹面図。ウォルコットがクラゲと見誤った環状の口と一対の摂食用付属肢がよくわかる。下が遊泳中のアノマロカリス・カナデンシスの側面図。マリアン・コリンズによる復元画。

1984年に中国の澄江で5億2,500万年前と同定されたアノマロカリス(「ワンドフル・ライフ」p298)ミクロンミンギアと呼ばれる無顎類の魚に似た脊椎動物(背骨がある動物)が発見されました。全長2〜3 cmの小柄な魚類です。コンセスター26に当たります。

地質学的にはほんの一瞬のこの時期に、突然、多様な動物が一斉に現れました。これをカンブリア紀の大爆発と呼びます。生物の設計図は遺伝子です。だから、この時期に特異的に遺伝子の進化があったと思うのは当然です。しかし、DNAを研究する分子生物学者たちは違う見解を持っています。

……上述した遺伝子パターンの多様化には二つの大きな特徴がある。第一に、遺伝子は徐々に多様化するのではなく、短い期間に集中的に多様化する。第二に、これは重要な結果だが、およそ6億年前に爆発的に動物の形態が多様化したと思われる時期、すなわちカンブリア爆発の頃には遺伝子多様化はほとんど見られない。遺伝子レベルの多様化と形態レベルの多様化の時期は明らかに重ならない。この遺伝子パターンが示唆する最も重要な点は、遺伝子の爆発的多様化がカンブリア爆発の直接の引き金ではなかったということである。カンブリア爆発と遺伝子爆発の時間的なずれは、カンブリア爆発の分子機構を考える上で、新しい遺伝子を作るというハードの視点ではなく、既にある遺伝子を如何に利用してカンブリア爆発を達成したかというソフトの視点が重要であることを物語る。……カンブリア爆発は、新しい遺伝子を造ったのではなく、単細胞の時代に既に造られていた遺伝子を利用して達成されたことになる。我々多細胞生物には多細胞生物特有の遺伝子があって、そうした遺伝子がその特徴を形作っていると信じてきたが、その考えはどうやら捨てなければならないようである。……

(「地球大進化(第2巻)/カンブリア爆発と遺伝子の多様性」宮田隆/NHK 出版 p131)

動物の遺伝子レベルの多様化は、まだ単細胞動物であった約9億年前に整っていました。しかし、全地球凍結といった厳しい環境下では形態的に進化することができず、それが終了して地球が温暖化し、海中の栄養分の急激な増加があって始めて形態的多様化が発揮できる大きな生態圏が生じて、カンブリア爆発が実現したというのが現代の理論です。

「サルと別れた日」に「アカギツネが20年間の人為淘汰でボーダーコリー犬のようになり」「野生種のヒトツブコムギが20年間の人為淘汰で栽培種のコムギになり」した研究論文を例示しました。この驚くべき速さの進化は、遺伝子はその期間中に急速に進化したために起こったものではありません。何千万年もかけて将来どのように使われるかの目的意識もなく、全く無目的・無作為に作られていた遺伝子が、ある環境の下でスイッチを入れられ、機能を発現したということなのです。

9. 生物、陸へ上がる

第5章のグラフにあるように、この時期、シアノバクテリアが大活躍して大気中の炭酸ガス濃度は下がり、酸素濃度は急上昇して15%程度になります。それまでの陸地は太陽光線中の破壊力が強い紫外線が地上を直撃するため、紫外線に弱い遺伝子を持つ生物は陸地に進出できませんでした。

酸素が上空にまで達し、紫外線に曝されると、一部の酸素分子 O_2 はオゾン O_3 に変わります。このオゾンが強力な紫外線吸収材で、これで生物が地上で紫外線の直撃を受けることはなくなり、安全になりました。

植物の上陸：この草木1本もない火星の地表のような不毛の大地に、最初に進出したのは植物です。最古の陸上植物はカンブリア紀の次であるオルドビス紀（5億年前～4億4,000万年前）から孢子や表皮や維管束などの破片として見つかり始めます。

形が明確に判る最古の陸上植物は約4億3,000万年前の古生代シルル紀中期の地層から高さ10cmにも満たないクッソニアと命名されている小型の植物です。根も葉もなく、針金のような体が二股に枝分かれを繰り返して、各先端に孢子嚢をつけています。地球の各地で化石が発見されています。やがて維管束植物は根を持つようになり、土壌中の栄養素を効率良く吸収し、地上部を支える基礎にもなりました。

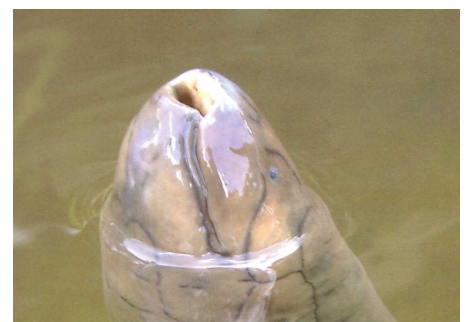
この時期に早速、植物と菌根菌との共生が始まっています。植物の根に寄生した菌類が植物の根の内部に菌糸を侵入させ、植物が光合成で得た養分の一部を吸い取り、代わりに菌類が岩石から得たリンや窒素などの栄養分を植物が供給を受ける相互扶助態勢ができあがりました。現在の植物の90%が菌根菌との共生状態にあります。植物が乾燥地帯や栄養塩の乏しい環境にも進出できるのは、菌根菌との共生のお蔭なのです。

地球の誕生は約45億年前。始めて生物が地上に進出できたのは約4億5,000万年前。既に誕生から現在までの時間の10分の9を過ぎています。ここ地上は水に乏しく、直射日光は強烈であり、紫外線にはDNAを殺傷する力があります。このような危険な地上に生物は進出して海中に比べれば、生物の種の数で約10倍、バイオマス Biomass（生物体総量）では100倍にも及ぶ繁栄を獲得しました。栄養塩が豊富であった海中から陸地へと上陸した植物は、菌根菌と共生状態に入って自分では摂取できない栄養塩を菌類から供給されます。海中の環境を陸地へ持って上陸したようなものです。動物の体内の血液の塩分濃度は嘗ての海中の塩分濃度と殆ど同じというのも、動物が海の世界を地上へ持って上陸したと考えることができます。生命が陸上に作りだしている海の世界、それをハイパーシー(Hyper Sea 超海)と呼ぶ世界観があります。

3億7,000万年前に地球最初の木、アーキオプテリスが出現します。それまでの植物が1、2年で成長が止まり、死ぬまで大きさが変わらなかったのに、アーキオプテリスは現代の木と同じように堅く、年々成長を続け、最大40～50年間の寿命を持っていました。地中深く根を張り、高さ20mまで成長しました。針葉樹に似ていますが、葉に孢子嚢を持ち、空気中に孢子を散布して子孫を残していました。その点は羊歯類に似ています。全ての陸地に拡散して大繁栄したこの木は、成長するに従い、下方の葉を落葉させます。このため、陸地は有機物が堆積して地味が豊になり、水中に落ちた葉は浅い海に栄養を供給しました。その結果、何が起こったのでしょうか。

肺で呼吸する魚の誕生：4億1,700万年前（シルル紀とデボン紀の境界）に**コンセスター18**と別れたのは肺魚です。彼らは乾期を生き延びるために泥の中に穴を掘って潜り、休眠状態に入り、泥に開いた小さな穴を通して空気を吸います。右の写真は、アマゾン河で撮った水中での呼吸の姿です。

コンセスター18が生きた当時の海では、全ての魚の90%は板皮類（ばんびるい）と呼ぶ強力な顎と上半身が鎧のように硬い甲羅で覆われた



肺魚の呼吸（「地球大進化3」p72）

魚類であらゆるニッチ(生態圏)が占められていた時代です。

少数派の**コンセスター18**は浅瀬に生態圏を求めました。アーキオプテリスの落葉により大量の有機物が海に流れ込み、頻繁に酸欠状態が発生し、時には海水が干上がってしまう浅瀬には、天敵である板皮類が侵入できなかったようです。この肺という器官は魚の鰓呼吸を助ける補助器官として、最初の硬骨魚類の鰓の第六鰓孔の下にある消化管の一部が袋状になり、そこに血管が密に張り巡らされて初期の肺として誕生したことが、研究の結果、判っています。

手の誕生：3億 4,000 万年前（デボン紀）、現存する全ての四肢類の祖先である**コンセスター17**と別れたのは両生類です。カエル・ガマ類、サンショウウオ類、アシナシイモリ類等が現生する両生類です。アカンソステガと呼ばれる**コンセスター17**の一種は右のような骨格を有しています。アカンソステガの指は8本、その少し前のイクチオステガの指は7本、トゥレルペトンの指は6本です。後の四肢類は5本指が事実上の標準となりますが、胚の時より成体で指の本数が減ることは頻繁にあります。

現生の馬は極端な例で、中指1本になっています。

この手も海中の生活で鰭から発達しています。現生のイザリウオは鰭を手のように使って、水流に流されないように止まります。アカンソステガが住んでいた湿地帯にはアーキオプテリスの落ち葉が堆積し、水草が茂っており、どろどろの海底を掴みながら進んだり、水草を掻き分けるために手と指を発達させたようです。どろどろの水中は見通しが悪いため、目は頭の上に付いており、顔を水の上に出したようです。このため、頭が身体から独立して首が発生しました。**四肢動物の手足の骨の構造は、上肢が1本、下肢が2本の骨でできていますが、その構造がアカンソステガに既に備わっています。**

1987年に発見された体長1m程のアカンソステガ以後、デボン紀の四肢動物の化石が約10種類発見されています。動物が湿地帯の浅瀬に進出してから500万年から1,000万年の間に、忽ち、四肢動物は多様化しています。水際が進化の実験場になった理由は、海に比べて陸は水路や森や山の尾根で隔てられて孤立した環境を生みだし易いため、遺伝子の交流が妨げられて多様な種が生まれると考えられます。



アカンソステガが泳ぐ様子(ジェニファ・クラック博士と国立科学博物館・速藤秀紀博士の監修による)

アカンソステガの骨格 CG

(「地球大進化3」p82)

10. 生物を襲った5度の絶滅事件 Big Five

化石学者たちは多くの生物がある時期に突然消え去り、別の生物と入れ替わる現象を知っており、それを基にカンブリア紀とかジュラ紀といった時代名称を付けてきました。

下の図は縦軸は生物の科の数、横軸は6億年前から現代までの時間軸です。生物は右表のように「界」「門」「綱」「目」「科」「属」「種」の順で分類します。

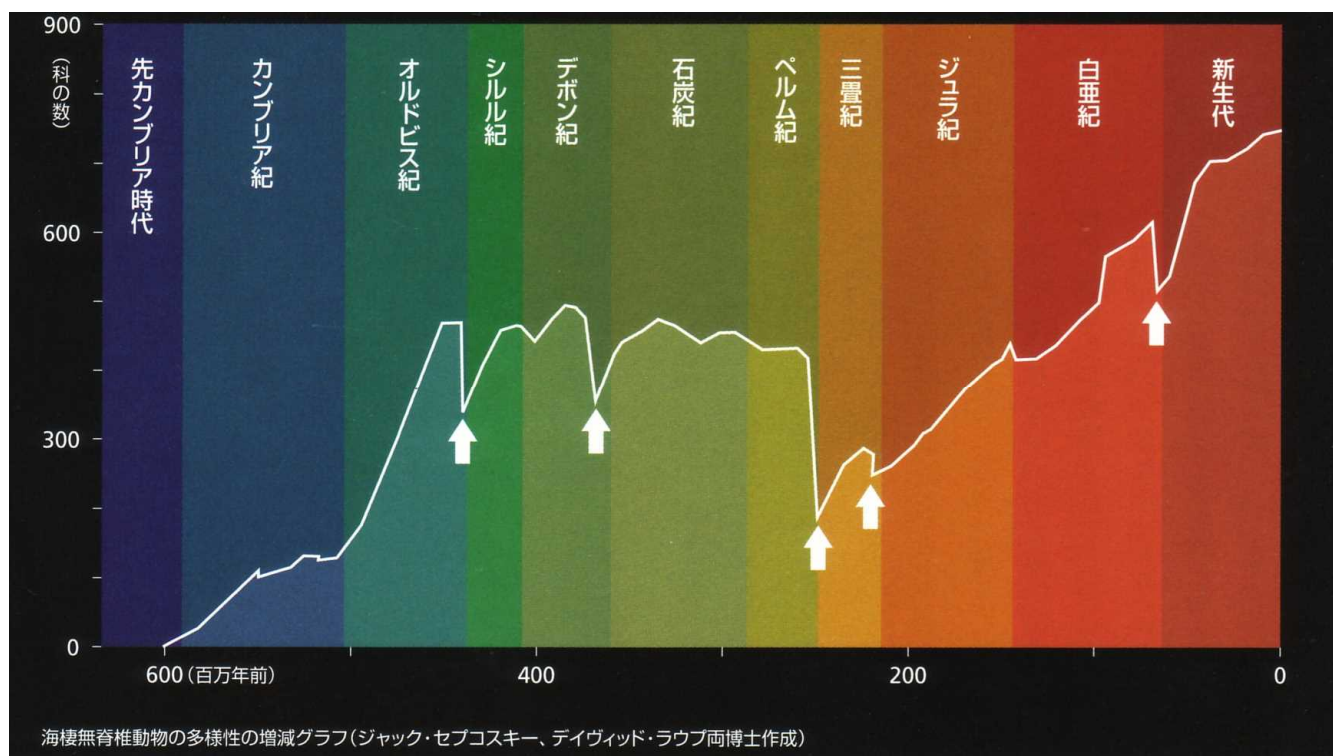
より詳細には「目」と「科」の間に「亜目」「下目」「上科」が入ります。

下の図は「科」のレベルで書いてあります。

種の階層分類

※各分類群の説明は例外もある。

	例	説明
界	動物界 (Animalia)	運動能力と感覚をもつ多細胞生物。外部から栄養を摂取する。
門	脊索動物門 (Chordata)	一生、もしくは一時的に脊索（体の中央を縦に走る組織）をもつ。
綱	哺乳綱 (Mammalia)	体温を一定に保ち、肺呼吸をする、授乳によって子を育てる。
目	霊長目 (Primate)	5本の指をもち、親指がほかの指と対向して、ものをつかむことができる。
科	ヒト科 (Hominidae)	2足歩行をし、とくに脳容量が大きい。
属	ヒト属 (Homo)	脳が大きく進化したグループ。
種	ヒト (sapiens)	現生のすべての人類。



5回の大絶滅事件／ビッグファイブ（「地球大進化4」 p17）

この図こそ、1982年にシカゴ大学のD.ラウブ博士が地球の歴史において、5回の大量絶滅 Mass Extinction が存在したことを世界に示したグラフなのです。

今からおよそ2億5,000万年前、古生代のペルム紀に「科」のレベルで52%、逆算推定法では理論的に「種」のレベルで最大96%の生物が絶滅した、と博士は世界に示しました。ペルム紀末には、実際に90～95%もの生物種が絶滅していることが、その後の化石や地層の実地研究によって確認されつつあります。

2億9,000万年前、最後の超大陸パンゲアが出来上がりました。海洋プレートはパンゲアにぶつかってその下へ潜り込みます。大量の海洋プレートの残骸は深さ670km付近に一時停滞し、ある限界を超えると重く冷たい岩石の大崩落が超大陸の周囲で一斉に起きます。その反動で、コア・マントル境界付近から、高温で軽いマントルの塊が、約1,000kmの直径の塊となって上方に押し上げられます。これが地殻に衝突すると巨大な火山活動を引き起こし、超大陸を引き裂き、次のウィルソン・サイクルが始まります。

2億5,000万年前にこのマントルのプルームはシベリアの大地を突き上げ、巨大な洪水玄武岩の噴火をもたらしました。

この溶岩は200万立方kmを上回ると算定されており、炭素に換算して11,000ギガトン(1.1×10^{13} トン)の二酸化炭素(CO_2 ガス)が放出されました。これは現在の大気中に含まれる炭酸ガス(二酸化炭素ガス)のおよそ10倍の濃度(3,200ppm)であり、この効果だけで地球の平均気温が4～5℃上昇したと推論されます。

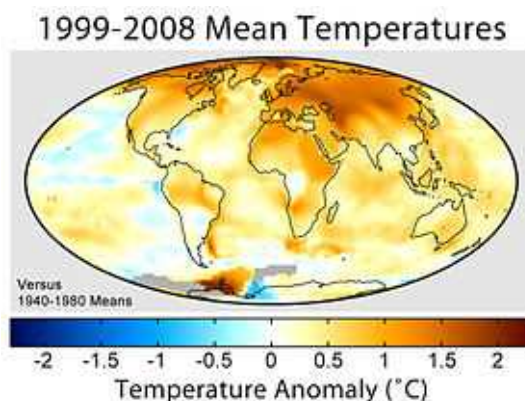
火山ガスには二酸化硫黄(SO_2)も含まれ、水蒸気と反応して亜硫酸(H_2SO_3)となり、強烈な酸性雨を降らせます。これで植物が枯れて CO_2 ガスを吸収できなくなり、空気中の水蒸気濃度も上がり、加速的に温暖化が進みます。

最終的に海水の平均温度が6～7℃上昇して海水に対する酸素溶解度(0℃での溶解度を100とすると、20℃で63、40℃で47です)が大幅に下がり、約100万年かけて全世界の海が酷い酸欠状態に移って行きます。各地で発見される化石を辿ると、徐々に拡大する酸欠の海からそうでない海へと、遊泳性の生物が避難して行く移住の様子まで、時系列的に判りつつあります。この海中の超酸素欠乏事件 Superanoxia は約1,000万年回復することがありませんでした。

酸素を嫌って海底へ逃げた嫌気性バクテリアが作ったメタンハイドレート(メタンガス(CH_4)がシャーベット状の氷の結晶の中に閉じ込められたもの)が海水温が上がって氷の結晶が溶けてガスを放出したため、炭酸ガスより温暖化効果が大きいメタンガスが大気中に加わって温暖化が一層進行しました。

さまざまな地質学的、古生物学的な証拠から、最終的な温度上昇は赤道付近で8～9℃、極付近では20～25℃であったと見積もられています。

右図は現代の地球温暖化状況を図示(Wikipedia「地球温暖化」)したものです。1940～1980年の平均気温に対する1999～2008年の平均気温上昇値をカラー表示してあります。赤道付近は僅かしか上昇していませんが、北極や南極付近での気温上昇は著しく大きく、以前は船舶が立ち入れなかった北極海の氷山が溶解し、北極海に商船の航路が開通されつつあります。20世紀中にはとても考えられなかったことで、温暖化の影響が急速に現れつつある兆候です。



この時期を生き残った動物では、ウサギの大きさを超えるものはありませんでした。

コンセスター16(私たちが恐竜と鳥類に結びつけるものでトカゲに似ていた)と**コンセスター15**(トガリネズミに似ていた)の間に哺乳類型爬虫類がいます。この大災害の直前に、哺乳類型爬虫類は穴倉を掘って住む居穴という性質を獲得しており、暑さの厳しい時期は穴の中で夏眠していたのであろうと考えられています。オルドビス紀末(4億4,000万年前)とデボン紀末(3億6,500万年前)の大量絶滅は超大陸の形成や分裂に伴った大規模火山活動によってもたらされたようです。三畳紀末(2億1,200万年前)の大量絶滅は熱と酸素欠乏であったと考えられています。

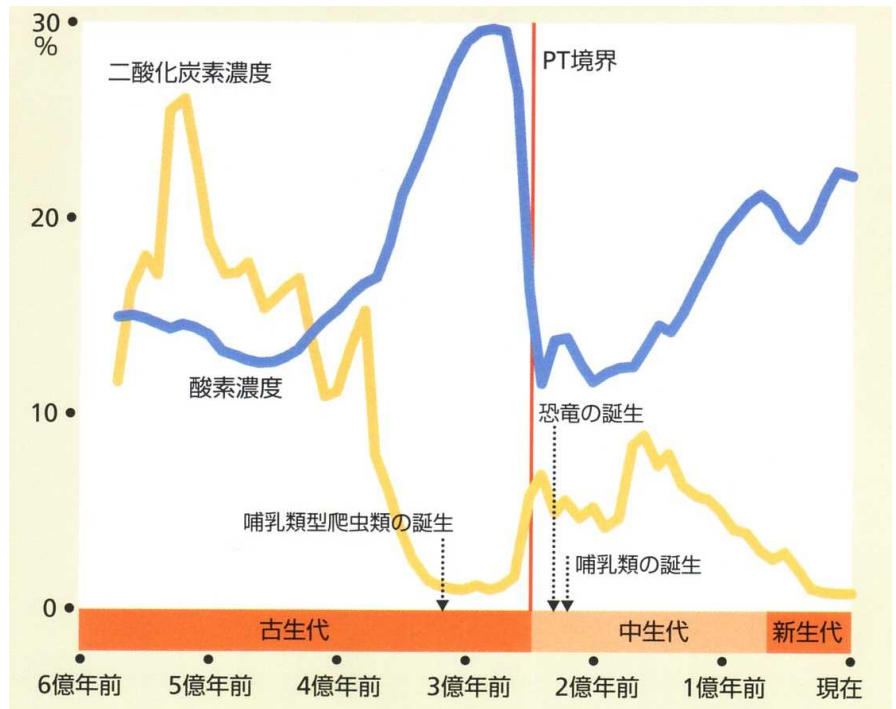
これらの大量絶滅の本格的な研究は、始まって僅か10数年間しか経っていません。絶滅古生物学は、現在ホットな課題である温暖化ガスの急激な増加による大量絶滅の再来の可能性についての議論の基礎にもなる重要な学問分野です。今後、大きな進展があると思います。

1 1. 恐竜の登場

右上のグラフの大気中の酸素濃度に注目してください。3億7,000万年前の森林の形成以来、酸素の主力製造者は海中のシアノバクテリアから陸上の植物に交替し、13%位だった酸素濃度は30%にまで上昇しました。

3億6,000万年前～2億9,000万年前の石炭紀は高さ38m、樹径2mに及ぶ巨木を含む植物（後に石炭になった）が大繁茂し、高い酸素濃度の環境下で単純で効率が低い呼吸器系しか有さない節足動物や昆虫が大型化できた時代です。

全長60cmのクモ、翼長70cmのトンボ、全長2mのムカデが闊歩していました。

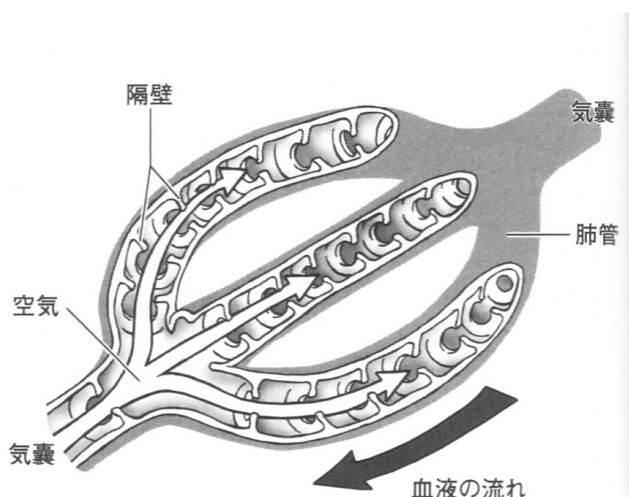


酸素濃度の時系列変化（「地球大進化4」p143）

それがPT絶滅で酸素濃度が一気に11%にまで低下して絶滅します。

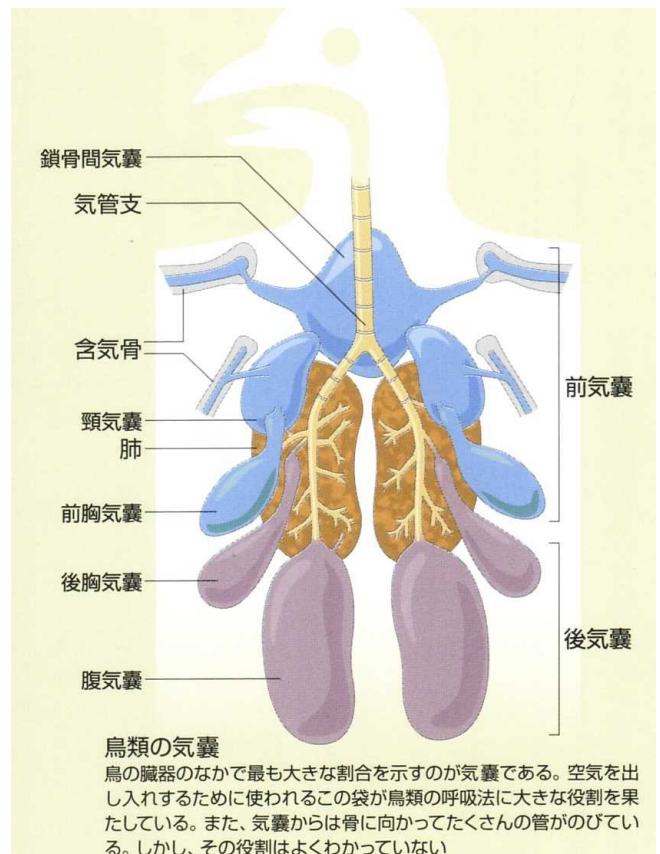
その後に天下を取ったのが恐竜です。こんな低酸素濃度環境下で大活躍できたのは、何か理由がありそうです。

究極の呼吸方法を獲得した恐竜： 恐竜の竜盤目、現生の鳥類に共通する気嚢(きのう)を使った呼吸システムは究極の呼吸方法であるといわれます。右図で説明します。



対向流酸素交換する鳥類の肺

（「恐竜はなぜ鳥に進化したのか」p259）



鳥類の呼吸システム

（「地球大進化4」p144）

口から一気に吸った空気は、一旦、5個ある前気嚢に貯えられます。ここから一定速度で空気を送り込んで、左図のように肺の中を一方向に通る抜ける気流を作り、酸素を肺に供給し、肺から炭酸ガスを受け取り、一

且、4個ある後気嚢に貯えます。次に口を開けたとき、後気嚢内の空気は一気に口から吐き出されます。前気嚢は吸った空気の、後気嚢は吐き出す空気のバッファー（一時貯蔵庫）になっており、どの瞬間にも肺の中を休むことなく一定速度で新鮮な空気が流れて行きます。

我々哺乳類の呼吸方法と比べてご覧下さい。我々は肺に空気を吸い込んだ瞬間は、空気は酸素が多い新鮮な状態ですが、吐き出そうとする時は酸素は殆ど残っておらず、炭酸ガス濃度が高い状態です。

我々の呼吸サイクルの半分は肺での酸素摂取に役立っていません。

鳥類の場合は、どの瞬間も肺は新鮮な空気と接触して酸素を摂取しています。鳥類は同じ大きさの哺乳類と比較して、海面上の高度で 約 30%、高度 3 km で約 3 倍も酸素摂取効率が高いのです。

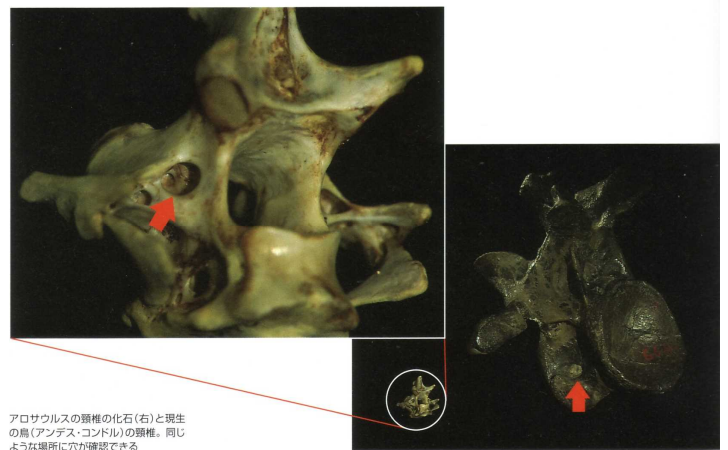
鳥類が恐竜の竜盤目の末裔であろうことは、以前から恐竜の化石に鳥類と類似の気嚢システムの穴が開いていることから推察されていましたが、2000 年頃から中国で多数の恐竜と鳥類の中間生物の化石が発見されて、疑いの余地なく証明されました。

右の2葉の写真は、左がコンドルの頸骨、右がアロサウルスの頸骨で、共に頸骨の相当する個所に気嚢システムの穴が開いています。

竜盤目の恐竜(ティラノサウルス、アパトサウルス等)は気嚢システムを有していたのは間違いありません。

鳥盤目の恐竜(トリケラトプス、ステゴサウルス等)は気嚢システムの穴が見られません。鳥盤目の恐竜は低酸素時代が終わった後に個体数を増やしています。

恐竜の気嚢システムが現生の鳥類と同じレベルで高いガス交換能力を有していたら、それから得られる大量の酸素によって高い基礎代謝レベルを維持できると考えられます。近年の化石の研究から、恐竜が驚異的な成長スピードであったことや運動能力が高かったことなどが明らかになっていますが、高効率の気嚢システムがそれに寄与していた可能性が高いのです。



アロサウルスの頸椎の化石(右)と現生の鳥(アンデス・コンドル)の頸椎。同じような場所に穴が確認できる

鳥類と恐竜の頸骨の類似性

(「地球大進化4」p91)

前章の PT 絶滅(ペルム紀と三畳紀の境界)での大量絶滅で海中では三葉虫の時代が終わり、アンモナイトが繁栄します。

陸上では哺乳類型爬虫類の時代が終わり、三畳紀(この紀の岩石は、赤色の砂岩、白色の石灰岩、褐色の砂岩の3層が積層している)前期には生態系の頂点に立つ覇者が不在となりました。800 万年～1,200 万年にわたって地球の生命システムは停滞したのです。

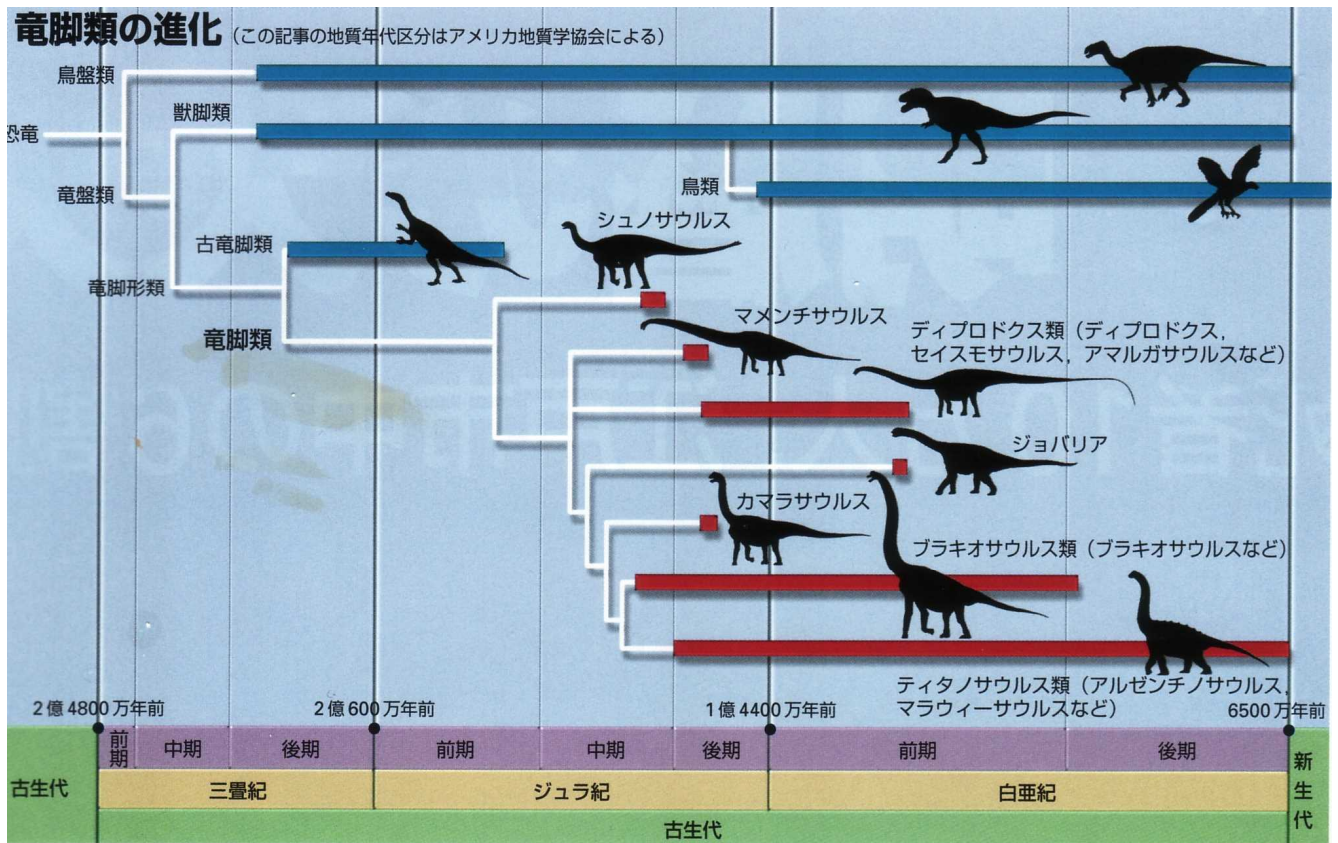
恐竜は爬虫類から進化しました。最古の恐竜の化石は 1991 年に 2 億 2,500 万年前の地層から発掘されたエオラプトルです。この祖先も PT 絶滅期は小型動物として生き延びたのでしょう。

恐竜は PT 絶滅で空白となった生態圏のニッチの殆どを埋めて多様化します。その後、約 1 億 6,000 万年にわたって、地球は**恐竜の支配する世界**となりました。

この時期を一括りして**中生代**(2 億 5,000 万年前～6,500 万年前)と呼びます。

細分化すれば**三畳紀**、**ジュラ紀**、**白亜紀**に相当します。

巨大化した恐竜：恐竜の中で最も繁栄したのが植物食の竜盤目・竜脚類で、全世界で 50 属の化石が発見されています。セイモサウルスは全長約 35m、体重 50 トンと推定されています。彼らは酸素濃度が低く、炭酸ガス濃度が高い温暖化時代に生存していました。当然、植物の生育も盛んで、食物資源に恵まれて巨大化したのでしょう。



(「恐竜はここまで巨大化した」／Newton 誌)

ジュラ紀の竜脚類の原始的な歯の構造は、彼らが葉をちぎって丸呑みしていたことを窺わせます。堅い植物繊維を消化するにも巨大な身体が必要だったと思われます。

竜脚類は長い尻尾と長い頸を持ちますが、歩いた足跡は多数発見されても尻尾を引き摺った跡はありません。竜脚類の背骨は上方へ大きな突起が伸びていて、ここから強力な靱帯や腱を伸ばして頸や尻尾を無理なく吊り上げて行動していたようです。

竜脚類には天敵もいなかったようです。ティラノサウルスなどの肉食性の獣脚類は最大でも全長 15m ですから、自分の倍もある竜脚類を襲うことは困難であったでしょう。

参考までに、現生のアフリカ象は体長 6～7 m、体重 5～6 トン、走る速度は時速 40 km まで出します。

鳥類の誕生： 前頁で紹介したように、中国では近年、次々と羽手恐竜が発掘され、鳥類が竜盤目の恐竜の子孫であることがはっきりしました。2003 年に発掘されたミクロラプトル・グイ（“小さな猛禽グイ”の意／鳩くらいの大きさ）は衝撃的です。嘴には歯が生え、四肢と尾に明確に羽毛が見られます。大型恐竜が PT 絶滅で全滅した中で、小型恐竜であった鳥類は生き延びて、今日の大繁栄に繋がったようです。

右の写真は、2004/8/7 に幕張メッセで開催されていた「驚異の大恐竜博」での最大の見玉展示品である「ミクロラプトル・グイ」の化石を指さす当時 6 歳の私の孫娘です。その時の彼女の感想が面白い。「恐竜が鳥の先祖なのがよく判った」でした。まさに「百聞は一見に如かず」がこの化石でした。



ミクロラプトル・グイの化石

恐竜の酸素摂取能力の高さを活かして、酸素濃度が高くなった新生代に、鳥類は飛翔という激しい運動を継続的に行う能力を精一杯活用して、制空権を確保し、繁栄した種族の地位を得ました。羽毛は小型恐竜が保温のために発達させたものを、鳥類は飛翔に転用したということが、化石研究の結果、判ってきました。

絶滅のクレーター：1,000年に一度の確率と予言されていた木星への彗星の衝突が(天文学者にとっては)幸運にも1994年7月に発生しました。人類が初めて見る大気圏外での物体の衝突です。

衝突したのはシューメーカー・レビー第9彗星(SL9彗星1993e)です。この彗星は1992年に木星に異常接近して、木星の強力な潮汐力を受けて20個以上の破片が一行に並ぶ形で1994年に再度木星近傍を通り、遂に掴まってしまったのです。

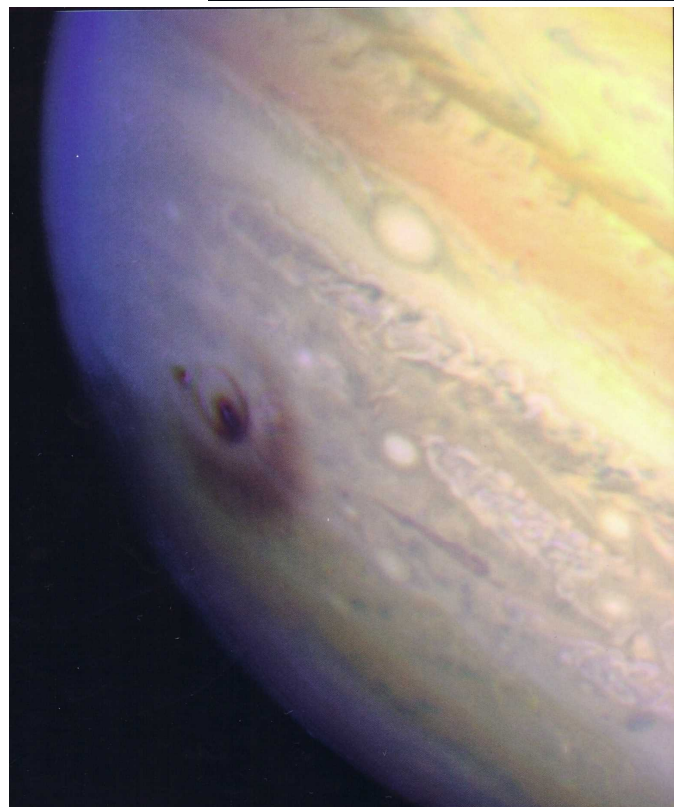
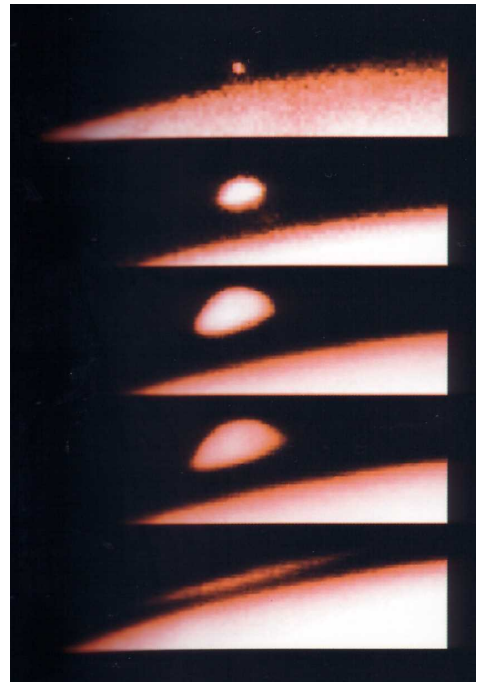
右上の連続写真はハッブル宇宙望遠鏡が撮影した7番目の破片G核の衝突で、上から7月18日の7時33分、38分、41分、44分、51分のもです。(「ハッブル宇宙望遠鏡がとらえた宇宙」／誠文堂新光社 p18) 衝突地点は地球から見て地平線の少し向こう側でした。木星の自転周期は10時間なのでやがてG核の衝突跡がこちらに向きました。右下の写真がそれで、地球の直径より大きい痕跡が観測されます。

(SL9彗星の衝突痕／同上 p19)

このように太陽系の遠方から接近する物体の多くは土星や木星などの重力が強い惑星に捕獲されて、地球には接近できないのです。

木星は地球を危険な物体から守ってくれるので**Good Jupiter**と呼ぶことがあります。

だが、6,500万年前に何故か直径約10kmの小惑星が秒速およそ20~50km(ライフル銃弾の初速の約20~50倍)でメキシコのユカタン半島のメキシコ湾に近いチチュルブに落下しました。



……小惑星は音速の40倍以上もの速度で地球へぶつかってきた。そのサイズは非常に大きく、一端が地表に接触したとき、反対側の端は民間航空路線の巡航高度よりも上にあったほどだ。衝突によって広島型原爆およそ60億個分に相当する大爆発が生じ、……穿たれたクレーターは現在は埋もれて地表からは見えないが、直径は180kmにも達し、今日の地名に因んでチチュルブ・クレーターと呼ばれる。その周りを囲むように、直径240kmの円を描いて断層が走っている。衝突の衝撃が地殻に及んで生じたものだろう。……小惑星は粉々に砕け散り、同時に地殻のかかなりの部分が高温によって気化した。これらの残骸は炎に包まれたプルーム(上昇流)となってクレーターから立ち昇った。……プルームは直径100~200kmに膨らみ、やがて宇宙にまで達して地球全体を覆い尽くした。巻き上げられた物質は重力によって落下を始め、チチュルブから打ち上げられたときとほぼ同じエネルギーで大気へ突入した。……落下速度は秒速2~11kmにもなり、大量の大気を数百℃に熱した。……4日間でほぼ全ての物質が地球に舞い戻ったが、10%強は地球の重力圏を完全に脱して……

火災は森林破壊だけでなく、凄まじい大気汚染をもたらした。……冬のように暗くて寒い期間の後には、温室効果による地球温暖化の時代がやってきた。……衝突後の堆積層から植物化石が見つかる割合をもとに推定すると、(森林の)再生には1万年近くかかったという。……

(「The Day the World Burned」D.A.Kring /SCIENTIFIC AMERICAN December 2003)

この一撃で1億6,000万年間の繁栄を誇った恐竜は小型の鳥類を残して絶滅しました。この6,500万年前の大量絶滅をKT絶滅（白亜紀と第三紀の境界）と呼びます。ここは生命史上最大の主役交代があった時ですが、第10章の「5回の大絶滅事件」のグラフで見ると、決して最大の絶滅ではありません。

この時もウサギより大きな動物は生き残れませんでした。大災害で小型動物が生き残るのは、相対的に個体数が多いからだと考えられます。

ここに生じた生態圏のニッチを哺乳類が埋め、今日の哺乳類の時代になります。だが、そうなってまだ6,500万年間しか経っていません。果たして哺乳類の繁栄期間が恐竜の繁栄期間を超え得るかどうか、それが判るまで、前途は長いようです。

12. 哺乳類の時代の幕開け

分子生物学によれば、約3億1,000万年前に我らの祖先である**コンセスター16**は恐竜、鳥類、爬虫類と別れました。

コンセスター16から**コンセスター15**の間にいた哺乳類型爬虫類の殆どはペルム紀末のPT絶滅で消え去り、僅かに残った**コンセスター15**は約1億8,000万年前に単孔類のハリモグラやカモノハシなどと分かれた。

卵生から胎生への進化：**コンセスター15**からは哺乳類となります。**哺乳類**は**胎生**(単孔類は例外的に卵生)、**哺乳**(母親は乳腺を持ち子供に乳を与える)、**恒温**(一定の体温をもつ)の特徴があります。哺乳類が出現した時代は低酸素濃度という困難な時期でした。この環境下でも生まれてくる子供に常に酸素を送り続けて、確実に子孫を残せるように、繁殖法を卵生から胎生へと変えたと考える学説があります。**コンセスター15**は卵生、**コンセスター14**は不完全な胎生である有袋類、**コンセスター13**からは完成された胎生です。卵生から胎生への進化はおよそ7,000万年の時間をかけて実現したようです。

恒温性のことですが、鳥類も恒温動物ですから、爬虫類から発達した恐竜が現生の爬虫類と同じ変温動物だとは言いきれないのですが、この問題はまだ決着が着いていません。酸素摂取効率の高い恐竜が恒温動物であった可能性は高いといえます。

コンセスター14は約1億4,000万年前に有袋類であるカンガルー、コアラ、オポッサムなどと別れました。有袋類は北アメリカ起源のようで、ある程度進化が進んでから、当時、陸続きであったオーストラリアへ移住したようです。3,500万年前に3科5属13種の有袋類がいたことが化石で確認されています。その後、**コンセスター14**以下の真獣類との競争に負けて、北アメリカの有袋類は絶滅し、現在は真獣類の進出がなかったオーストラリアでのみ生態圏を得ています。

コンセスター13は約1億500万年前にアフリカ獣類であるゾウ、ジュゴン、ツチブタなどと別れました。

コンセスター12は約9,500万年前に異節類(貧歯類)であるナマケモノ、アrikui、アルマジロなどと別れました。

コンセスター11は約8,500万年前にローラシア獣であるラクダ、ブタ、シカ、カバ、クジラ、ウマ、イヌ、ネコ、コウモリ、トガリネズミ、センザンコウなどと別れました。

コンセスター10は約7,500万年前に齧歯類(げっしるい)やウサギ類と別れました。

コンセスター9は約7,000万年前にヒヨケザルとツパイなどと別れました。この時期に大事な出来事があります。これまで、花粉を風に乗せて送る**風媒による繁殖**が主力であった植物(裸子植物)の世界に、花が咲く植物(顕花植物/被子植物)が出現し、**昆虫や鳥類と共進関係を結んで繁殖**する植物が草から樹木まで幅広く多様化して広がりつつありました。そして6,500万年前のKT絶滅を迎えます。

恐竜の時代の哺乳類は、大体において捕食者である恐竜の獲物でした。そのため、見付かりにくいように身体は小型化し、見付かれれば敏捷に逃げ回ったことでしょう。恐竜が活動している昼間は隠れ家に潜んで休み、恐竜が寝静まった夜間に外部に出て活動しました。現生のトガリネズミに似た動物であったようです。

聴覚の向上：暗闇の中では聴覚が頼りになります。哺乳類型爬虫類では複数の骨が集まり、顎が形成されていますが、哺乳類への進化の過程で歯骨以外の顎の骨が耳の中へと移動し、耳小骨という中耳の骨に変化し

ました。耳小骨はつち骨・きぬた骨・あぶみ骨からなり、鼓膜が受けた音波の振動を梃子機構により約 20 倍に増幅して内耳に伝達します。聴覚が鋭敏になったことにより、哺乳類は脊椎動物の歴史で始めて夜の環境に生きることができるようになり、恐竜とは重ならない生態圏を確保できたのです。

明暗視力の向上と色覚の喪失：嘗ての地上の覇者、恐竜に連なる鳥類は昼間に活動します。このため、昼間視力が非常に良いだけでなく、色覚が発達しています。**鳥類は何と 4 原色で対象物を見るのです。**

恐竜時代に暗闇で生活しなければならなかった初期の哺乳類は、目の桿体視細胞を発達させて暗闇の中の明暗を高感度で見分ける能力を高めましたが、その代償として脊椎動物の共通祖先が持っていた色覚を担う錐体視細胞 4 種（赤、緑、青、紫）の内、赤と紫を残し、緑と青を退化で失いました。現生の殆どの哺乳類はこの状態に止まっており、緑、黄、赤の見分けがつきません。

旧世界ザルを含む**コンセスター 6**は夜行性から昼行性となり、花や果実や葉を見分ける必要性から緑の錐体視細胞を再進化させ、現在は 3 原色で世界を見ています。

鳥類は 4 原色の錐体視細胞を持ち、更に油滴フィルターを持つため、波長の識別度が我々より遙かにシャープです。鳥類から見たら、我々は一種の色盲なのです。鳥類の多くは視力 10 以上の分解能で、我々には想像もできない豊かな色彩の世界に生きているのです。

これで驚いてはなりません。海中の極楽魚は 8 原色の視覚を持ちます。カンブリア紀に出現し、ペルム紀に絶滅した古生代に最も繁栄した海中の節足動物である三葉虫の一種は 12 原色の視覚を有していました。

巨鳥の跋扈する世界：小惑星による KT 絶滅で生き残ったのは小型動物であったと述べました。確かに大量絶滅は大悲劇ではありますが、生き残ったものには大きなチャンスです。生態圏の上部の領域が空白なのですから。

昼間の地上を恐竜が支配する時代、鳥類は空に生態圏を求め、哺乳類は夜間の世界に生態圏を求めました。いま、昼間の地上という生態圏が空白になったのです。生き残った鳥類と哺乳類は、その生態圏を目指して覇権を競います。

最初に生態系の頂点を占めたのは鳥類でした。右の写真はその一種である体長約 2 m、体重約 200 kg のディアトリマの化石です。現生のライオンと同じ位の噛む筋肉を持っています。恐竜がいなくなったあとの約 2,000 万年をこの系統の巨鳥が地上の覇者となりました。元来、鳥の成長を制約しているのは身体の 35% を占める胸の筋肉です。飛ばなくなれば、この筋肉を維持するためのエネルギーを他へ廻せます。地上に舞い降りたディアトリマの祖先は数百万年の短期間で巨大化したと推定されています。一方で哺乳類の方は巨鳥の圧力を受けて、相変わらず子犬程度の大きさのままでした。

巨鳥の化石はアジア大陸以外のあらゆる地域、当時南アメリカと陸続きだった南極でまで発見されています。しかし、当時はユーラシア大陸の中央部が海峡であったため、アジアには翼がない巨鳥が進出できていません。当時はアジアと北アメリカとの間は、ベーリング陸橋で繋がっていましたが、寒冷期であったため、厳しい寒気に阻まれ、進出できなかったのです。このアジアでの巨鳥の不在が、哺乳類の進化を促進しました。



ディアトリマの化石

(「地球大進化 5」p24)

アジアから勃興した哺乳類：当時のアジアは最大の大陸であり、気候も変化に富んでおり、進化により様々な哺乳類が現れました。アジアは巨鳥が不在であったため、恐竜なき後の生態圏を哺乳類が埋めることができました。この頂点に立ったのがハイエノドントです。ハイエノドントは体長約 50 cm、柔軟な関節を持ち、疾走して獲物を捕食するスタイルを哺乳類として始めて確立した種です。体長に注目してください。恐竜が

絶滅してから 1,000 万年ほど経過しても、生態圏の頂点に立つ哺乳類のサイズがまだこの程度なのです。巨鳥の大型化の速さとは比べるべくもありません。鳥類は基礎代謝率が高いのも差が付いた原因のようです。およそ 5,500 万年前に始まった温暖化をきっかけに、ハイエノドントはベーリング陸橋を通過して北アメリカに進出します。競合者が多いアジアで揉まれて来たハイエノドントは、忽ち多くの種を打ち負かして制覇して行ったようです。身体が小さいながらも、チームワークを活かした素早い攻撃で獲物に迫る敏捷なハイエノドントを相手に、さしもの巨鳥類もじりじりと退勢に陥り、4,000 万年前を境に巨鳥の化石が見付かることはなくなりました。

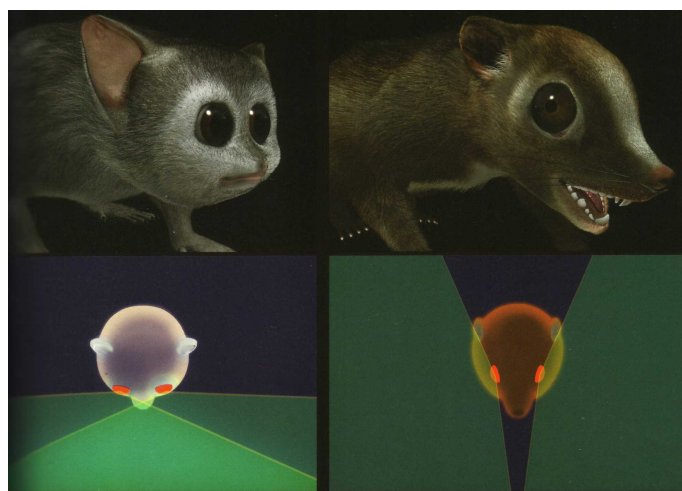
KT 絶滅期を迎えたときは、**コンセスター 9** はネズミに似た動物で、目は顔の両側面に付いていました。この目の配置は片側で 180 度近い視野を持ち、両眼でほぼ周囲 360 度全域を視野に収めることができ、外敵を警戒するには誠に理に適った配置です。

コンセスター 9 は北アメリカで出現し、ヨーロッパなどに生息域を広めて行きました。主食は昆虫や果実で、かぎ爪を使って木に巧みに登り、大型動物との競合を避けていました。ここへアジアで進化した齧歯類が侵略して来ました。齧歯類は伸び続ける歯を持ち、繁殖力が強いいため、同じ生態圏ニッチを占める **コンセスター 9** は**駆逐**されて、個体数を激減させています。このピンチに **コンセスター 9** はかぎ爪を短く平たい爪に変え、細い枝が握れる**握力が強い手**を持ち、太い幹でなければ有効でないかぎ爪を持つ齧歯類が来られない細い枝に自由に移動して枝に付いた果実を食べることができる動物へと進化しました。

右のイラストの右側はショショニアスと呼ばれる齧歯類に駆逐された **コンセスター 9**、左側はそれから進化して細い枝に生態圏ニッチを求めたカルポレステスと呼ぶ **コンセスター 8** を示します。

ネコくらいの体格で、木の樹冠と呼ばれる領域で密集した木から木へと自由に飛び移ります。このためには、隣りの木までの正確な距離を測るための立体視が必要になり、顔の両側についていた目が、顔の正面に並ぶ進化をしました。

向かい合って物を握れる手、**立体視できる顔の正面の両眼**を持つことが霊長類の特徴です。**コンセスター 8** から霊長類に入ります。



コンセスター 8 とコンセスター 9 の目の位置と視野
(「地球大進化 5」 p60)

KT 絶滅の後、約 6,300 万年前に **コンセスター 8** はキツネザル等の曲鼻猿類と別れました。イヌのような鼻を持つ猿類で、最大の生息地はマダガスカル島です。

約 5,800 万年前に **コンセスター 7** はメガネザルと別れました。メガネザルは一夫一妻で一産一子です。体長は 9.5~15 cm、体重 57~120g、頭の大きさは 4 cm ほどなのに眼球は 1.6 cm もあり、眼球一つが脳の重さに匹敵します。眼窩内(がんかない)で目を動かすことができず、代わりに柔軟な首を約 360 度の全方向に廻します。夜行性で**視力を極限まで進化**させたボデイプランです。驚異的な跳躍力で昆虫などを捕食する肉食性の生物です。**コンセスター 7** 以降は直鼻猿類に属します。

コンセスター 7 からは天敵がいなくなったようで、始めて昼行性の生活様式となり、目も時代と共に小さくなります。

約 4,000 万年前に **コンセスター 6** は中央アメリカと南アメリカに住んでいる新世界ザルと別れます。クモザル、ホエザル、オマキザル、マーモセットなど広鼻猿類(直鼻猿類の亜目)のことです。

別れた後、**コンセスター6**はそれまで赤と紫の二原色視覚であったのが、緑の**色覚を再進化させて三原色色覚を獲得**します。これは軟らかい若葉や果実を見分けるのに有効でありました。面白いことに、新世界ザルの中のホエザルもまた三原色視覚を取り戻していますが、その進化の起源は**コンセスター6**とは異なり、独立進化であることが確認されています。

約2,500万年前に**コンセスター5**は旧世界ザルと別れました。ヒヒ、テングザル、オナガザルなどです。この時代からは、世界の気候と植生が我々の時代とほぼ同じだということが認められます。

約1,800万年前に**コンセスター4**はテナガザル類と別れます。彼らは最高の空中曲芸師として知られています。また、彼らは厳格な一夫一婦制です。

約1,400万年前に**コンセスター3**はオランウータンと別れます。研究結果は、この時期、**コンセスター3**がアジアに生息していたことを示唆します。恐らく、殆どの時間を木の上で過ごし、果実を食物にしていたものと考えられます。

そして約700万年前にアフリカに戻った**コンセスター2**は、ゴリラと別れます。**コンセスター2**はナックル歩行(握り拳を突いて歩く)をしており、夜間は木の上でも時間を過ごしていたと推論できます。

ゴリラは意外なことに草食なのです。それもセロリのような栄養分の少ない植物を食べます。このため、巨大な体格を維持するために、殆ど一日中食べていなくてはならないのです。その様な植物は痩せた土地に生えます。ゴリラの先祖は競争が少ないそのような土地を生態圏に選んだのです。必要な栄養分を摂取するために広い縄張りが必要になります。このことが、人類が密林の開拓をするようになってから著しくゴリラの生態圏を脅かすことになり、現在、稀少動物保護の上で大きな問題になっています。

霊長類の半数 絶滅の危機：地球上に生存する霊長類634種の半分近い303種が絶滅の危機にあり、内69種は絶滅の恐れが極めて高いとの調査結果を、国際自然保護連盟(IUCN)と国際的な環境保護団体、コンサベーション・インターナショナル(CI)などの研究グループが5日、発表した。世界の霊長類の生息状況に関する初の包括的な評価という。バイオ燃料開発もあって急速に進んでいる森林伐採や狩猟が主な原因で、霊長類の置かれた厳しい状況が明らかになった。…… (2008/8/5 日本経済新聞夕刊)

約600万年前に**コンセスター1**がチンパンジーと別れ、200万年前にチンパンジーからボノボが別れています。そして、話は「サルと別れた日」に引き継がれます。

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。 (「種の起源」ダーウィンの結びの言葉)

あとがき

このテキストには貴方の世界観・人生観を変えるような驚異的な事実が多数盛り込まれています。書きながら私が驚いたのは、**重要な発見が割に最近に行われている**のです。2000年以後の重大な発見が多いのです。対象テーマが急速に進展中の分子生物学に関するものが多いのと、社会資本主義に舵を切って化石考古学に研究資源が廻るようになった中国で超大物の化石発見が相次いでいるなどで、新発見を豊富に取り上げることができたためです。これは科学の最新事情に通じていなければ知らない発見が多数収録されているホットなテキストなのです。さて、これらの壮大な事実の中から、特に重要なものを箇条書きしてみましょう。

- (1) 45億年前の太陽が放射する熱エネルギーは現在の約70%に過ぎませんでした。当時の地球の水が凍らなかったのは、濃厚な温暖化ガスが存在したためです。温暖化ガスの濃度が現在と同じなら、当時の平均気温は現在より90℃も低い-70℃に止まっていたはずですが、温暖化ガスが存在しなければ-18℃まで寒冷化します。
結果的に、温暖化ガスの主力である炭酸ガスを炭酸同化作用によって消化して酸素ガスを発生する植物により地球の平均温度が現生生物の生存に最適にコントロールされており、地球と生物との協働により生態圏の環境が維持されている実状を地球・生物系が一種の超生命体を構成していると見なして、これを**ガイア GAIA** と呼ぶ世界観があります。
- (2) 地球は放射性物質の崩壊熱により内部から発熱しており、内部のマントルは対流・循環しています。我々が立つ地殻は比重が軽いためマントルの上に浮いている平均厚さ35kmの浮島であり、平均厚さ5kmの海洋プレートが約2億年で生成・移動(3~9cm/年)・再沈下する流れに乗って約4.5億年サイクルで超大陸を形成したり、散らばったりの離合集散を繰り返してきました。
- (3) 全ての地球上の生命は、同一起源に発します。バクテリアから高等動物まで、全く同一のDNAの動作原理を利用して生きています。生命の源は唯一つなのです。
- (4) 進化は生態環境が変わるのに合わせて遺伝子が都合良く進化するから起こるものではありません。DNAは将来何に使うかの目標を持たず、化学的原因や物理的原因や単なる複写ミスで突然変異した遺伝子を長年貯め込み、後に環境が変わった時に新しい環境に対処できるような進化に必要な機能を発現させます。環境の変化が遺伝子の動作スイッチを入れて無作為に大量の進化の実験を行い、新しい環境に最も適合できる進化をした個体が生き残るのが進化論の基本原理です。
- (5) 地球は生命にとって極端に住みにくい惑星になったことが過去に複数回あります。全地球凍結や火山活動の超活動期や小惑星の衝突などであり、種の95%まで絶滅したこともあります。GAIAと呼べるほど地球の環境が安定したのはそれほど長期間のことではありません。大自然が100万年掛けてやるような温暖化ガスの増加を、現在の人類は100年間でやろうとしています。人間が安定的に地球システムの中で存続可能な存在か否かは、まだ、答が出ていません。

ギリシャの哲学者たちが心から知りたいと思って果たせなかった素晴らしい自然界の真理に、貴方は今、触れています。科学上の発見は常により新しい発見で書き換えられる可能性を持っています。この種のテキストは書き上がった瞬間から陳腐化が起こる運命にありますが、新しい知見が加わる毎にこのテキストを更新する計画です。

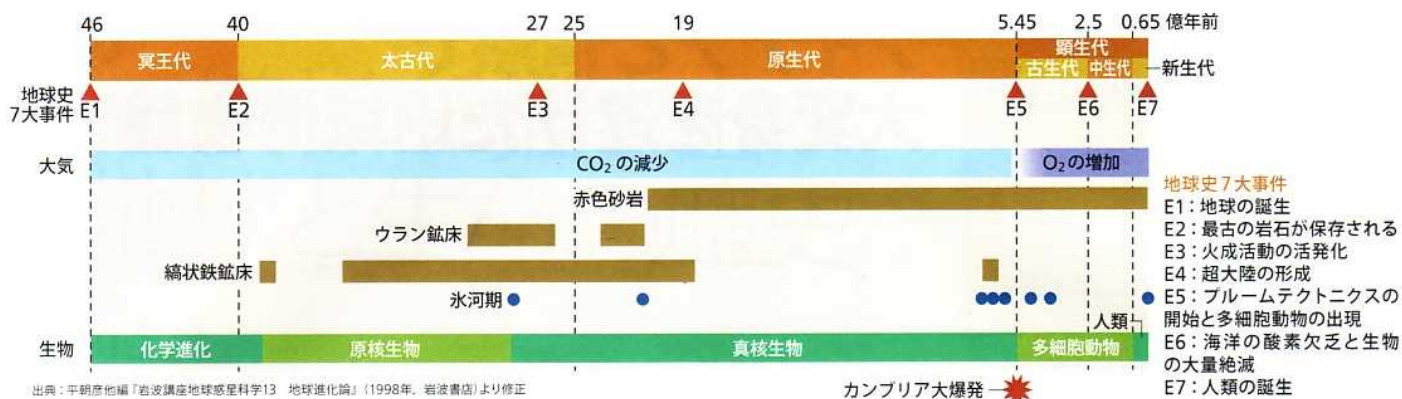
このテキストの前に「太陽系」と「宇宙と物質」を、このテキストの次に「サルと別れた日」と「人類と社会・・・古代」から「人類と社会・・・現代」までの社会的動物・人類の歴史シリーズを置きます。これは開闢から今日までの宇宙と、その一隅の地球に生存する人類についての年代記なのです。

これらを通読する時、貴方は現在の人類が文字で書き留めた貴重な歴史や、科学の力で知り得た世界観を自分のものにすることができます。

以上

補 遺

1. 地球史全貌



地球史年表 (日経サイエンス 2007 年 11 月号 p67)

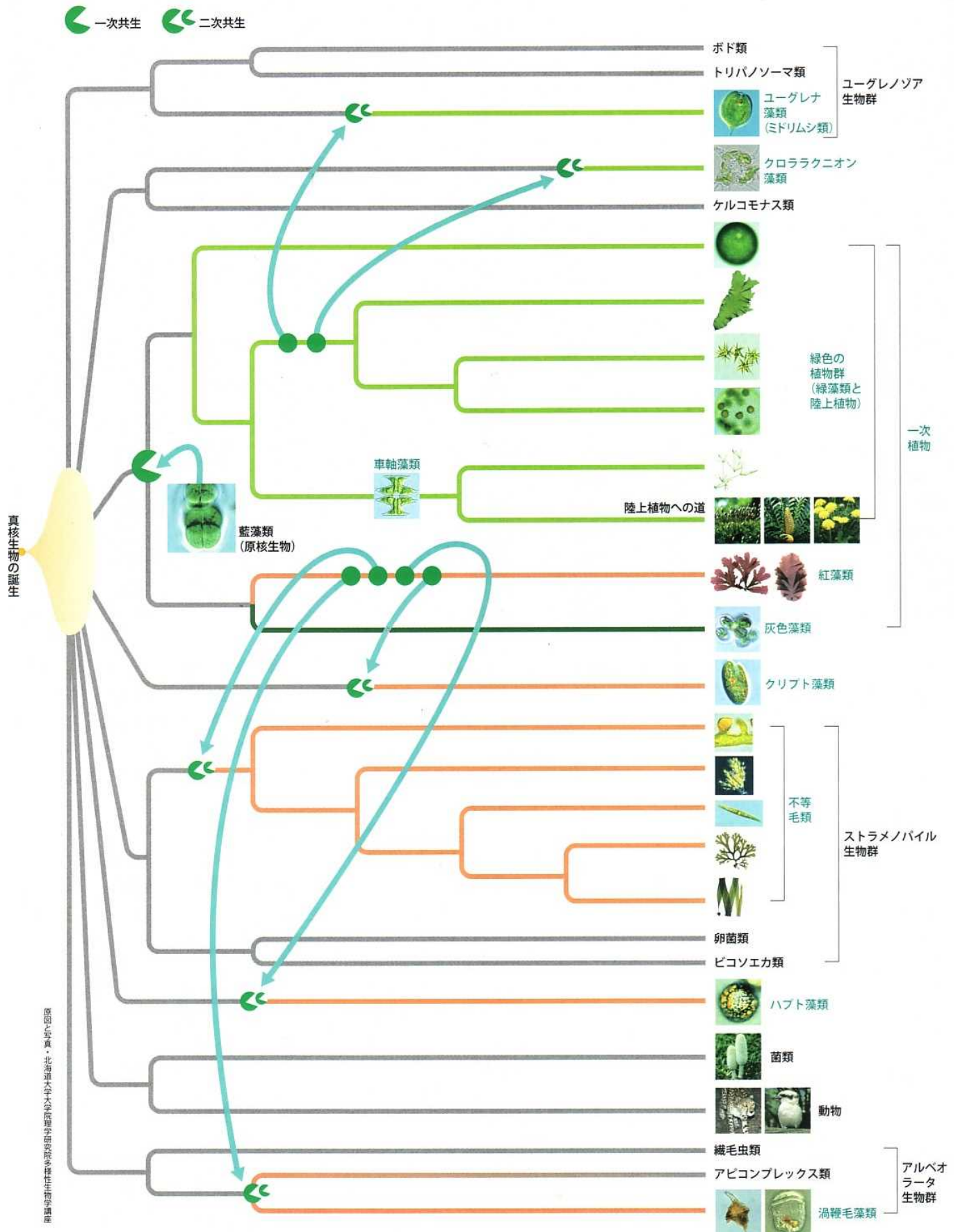
2. ウラン・鉛法

ウラン・鉛年代測定法は、通常ジルコン(ZrSiO_4)を含んだ鉱石に対して試みます。ジルコンは、結晶中にウランを含有しやすいという性質がある反面、結晶中に鉛は非常に含有されにくいという性質も持っています。従って結晶になった後のジルコンの中に含有されている鉛は、ジルコンが冷え固まる時に結晶中に取り込まれたウランやトリウムが崩壊した結果生じたものであると考えられます。誤差 0.1%~1% 程度の精度で年代測定が可能です。

$^{238}_{92}\text{U}$ は、ある決まった期間で一定の割合が、 α 崩壊 (ヘリウム分子放出) や β 崩壊 (電子放出) を繰り返して、最終的に $^{206}_{82}\text{Pb}$ に変化します。この間の α 崩壊の回数は 8 回、 β 崩壊の回数は 6 回です。これに対して $^{235}_{92}\text{U}$ は α 崩壊の回数は 7 回、 β 崩壊の回数 4 回で、最終的に $^{207}_{82}\text{Pb}$ に変化します。年代測定は、この二つの核分裂系列に対して行われます。

なお、 $^{207}_{82}\text{Pb}$ と書くと、Pb は鉛、207 は原子量 (原子核の陽子と中性子の数の和)、82 は原子番号 (原子核の陽子の数) を意味します。「宇宙と物質」で詳しく説明します。

3. 葉緑体の遣り取りから見た生物系統樹



藍藻類(シアノバクテリア)と内共生する生物の系統樹です。一次共生とは藍藻類と内共生する状態、二次共生とは一次共生した生物を取り込んで共生する状態をいいます。コンセスターとは違った切り口で見た生物の系統樹です。

「葉緑体進化のダイナミズム」堀口健雄(北海道大学)／日経サイエンス 2008年1月号 p90

4. 超大陸、岩石年代から復元

考古学調査でお馴染みの年代測定法が大陸移動の解明に貢献しつつある。名古屋大学年代測定総合研究センターの鈴木和博教授は独自の測定法を駆使し、何億年も前の巨大大陸(超大陸)の姿を復元しようとしている。……「……世界各地の岩石の年代を調べ、結果をジグソーパズルのように繋げば超大陸形成の過程を復元できるはずです」——岩石の年代をどう測るのですか。「大半の岩石はマグマの熱などで変成(変質)しているので、年代の特定が難しい。それを克服したのが、私たちが開発した『チャイム法』です」「岩石中に微量に存在するモザナイトやジルコンという鉱物は熱で変化しにくく、ウランやトリウムなどの放射性元素を含みます。これらは長い年月をかけて崩壊し、最後は鉛になる。各元素の比率を測れば岩石のできた年代が決まります。モザナイトなどは髪の毛ほどの太さの微少鉱物ですが、細い電子線を当ててエックス線分析で元素の比率を測定します」——日本列島の太古の姿にも迫ろうとしていますね。「日本最古の岩石は岐阜県上麻生で発見された花崗岩礫(れき)で、約 20 億年前に生まれました。チャイム法で調べると、約 30 億年前にできたジルコンを含んでいました。これほどの古い鉱物は『クラトン』という安定大陸にしか産出しない。日本の一部と朝鮮半島東部は安定大陸の一部だったと考えられます」……「……かつてウェゲナーが世界地図を睨んで大陸移動説を構想したように、壮大な地球史に思いを巡らす。これがこの研究の魅力です」

(2007/12/16 日本経済新聞かがく Café／聞き手は久保田啓介)

5. 世界の3大隕石衝突構造

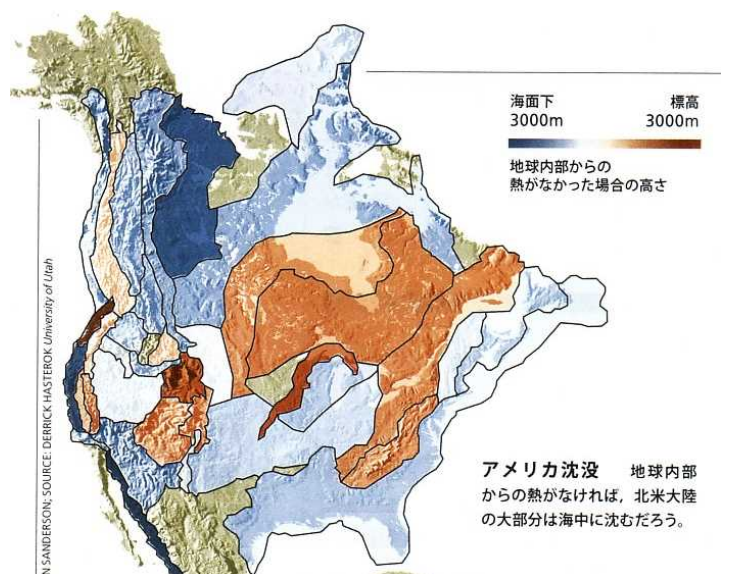
南アフリカのヨハネスブルグから南西に 120 kmの地点に、最大かつ最古の隕石衝突跡「フレーデフォート・ドーム(Vredefort Dome)」があります。約直径 10 kmの隕石が衝突してできたとされ、衝突時は深さ 40 kmまでえぐられて、地殻物質だけでなくマントル物質まで吹き上げた痕跡があります。半径 50 kmのドーム(地層の隆起構造)や直径 300 kmのリング地形が残され、貴重な研究資料として 2005 年に世界自然遺産に登録されました。隕石の放射性年代測定法により 20 億 2,300 万年の出来事と同定されています。

2 番目はカナダの「サドベリー・クレーター」で、衝突リングは 200 km、衝突時期は 18 億 5,000 万年前です。3 番目が前出「絶滅のクレーター」にあった 6,500 万年前の「チチュルブ・クレーター」です。衝突リングは約 200 kmで、現在では全て土砂で堆積されて平らになっていますが、地中の重力分布でリング構造が存在することが確認されています。(Newton 誌 2008/2 月号)

陸地の面積は地球の総面積の約 29%ですから、巨大隕石は海の方により多く衝突したと思われますが、海底のプレートは生成から約 2 億年で大陸の下に潜り込んで消滅しますので、海の隕石痕は発見できていません。

6. 陸地が沈まずに済んでいる理由／大陸を海面より高く保っているのは地熱の力だ

北米大陸の標高の凡そ半分は地球内部の熱による。それ無しには大部分が海面下に沈むだろうと、ユタ大学の地球物理学者ハステロクとチャップマンはいう。二人の最新の計算によると、ロッキーとシェラネバダの山々は頂だけが島になって残り、ニューヨークやロスアンゼルスはもとより、海拔 1 マイル(約 1,600m)のデンバーまでもが海面下 200m 以下の深さに落ち込む。大陸地殻は平均で約 40 kmの厚みがあり、高密度のマントルの上に浮かんでいる。これは両者の密度差のほか、熱の作用によることが以前から知られていた。地殻の温度は場所によって違うものの、底面は最低でも 400℃あると推定される。この熱の 60%は高温の



地球内部から伝わってきたもので、残りは放射性元素(酸化ウランの比重が低いため、地球のウランの殆どは大陸地殻に存在する)の崩壊によって蓄積した熱だ。そして地殻岩石も多くの物質と同様、温度が高いほど膨張する。この結果、密度が下がって、より高く浮かぶ。……こうした不一致が生じるのは、大陸地殻の組成(これも場所によって異なる)も浮力に影響するからだ。ある種の岩石は別の岩石に比べ、どんな温度条件でも密度が高い。また、地殻の厚みが場所によってさまざまなことも問題を複雑にしている。プレートの力はある場所では山脈を厚く積み上げるが、別の場所では地殻を薄く引き延ばしているからだ。……

(日経サイエンス 2008/1月号 p15)

「6. 移動する大陸」に「大陸の平均高さは海拔 840m、海底の平均深さは 3,729m」とあります。地球内部の熱が下がってマンツルの移動がなくなると造山活動が停止し、陸地は雨の浸食に曝されて平坦になり、最終的に全て海中に没してしまい、地球は海だけの惑星になります。

7. 生物の分類法

近代分類学の開祖はスウェーデンの博物学者 リンネ(Carl von Linné : 1707~1778) です。

右の図では「イエアマガエル」が「動物界」「脊索動物門」「両生綱」「無尾目」「アマガエル科」「アマガエル属」に属する「イエアマガエル」種と階層的に分類されています。

この体系化方式により分類学者の仕事はとても容易になりました。しかし、それでも「種」間の線引きはしばしば問題を引き起こしています。

ダーウィンは「種」の議論になる度に、博物学者たちが百家争鳴になる様子はお笑いぐさだ」と1856年に書いています。「私にとって“種”とは、互いによく似た固体の群れに対して、便宜的に適当に与えられた名前に過ぎない」。そうではあるが、リンネの分類法が便利であることは間違いありません。今日、この分類法が標準的手法となっています。

「種」のレベルでは交雑可能性が一つの判定基準となります。

リンネの宇宙——標準となる分類学

リンネは1700年代に近代分類学の基礎を確立し、すべての生物を界(動物・植物・菌類)のレベルから始まり観察可能な一組の特徴をもつ個々の種にいたる階層的グループに分類した。イエアマガエル(*Litoria caerulea*)に至るリンネ階層分類をたどると次のようになる。



(「生物の種とは何か」 C.ジンマー／日経サイエンス 2008年9月号 p63)

「鳥の祖先は恐竜」証明

東北大、指の成長仕組みが一致

鳥の翼と恐竜の前脚にある「指」の成長する仕組みが同じであること、東北大学の田村宏治教授と大学院生の野村直生さんらが突き止めた。鳥が恐竜から進化したとする仮説を裏付ける結果。専門家からは始祖鳥の発見以来、鳥の起源を巡る約150年間の論争に終止符を打つ成果との意見も出ている。研究成果は11日、米科学誌サイエンスに掲載される。

卵の中分析、論争に終止符

鳥の起源を巡っては、羽毛のある恐竜の化石の発見が中国などで最近相次ぎ、恐竜から進化したとする説が有力になってきた。ただ鳥と恐竜はい

ずれも前脚が3本指であるものの、成長の仕方が違う。このため恐竜より原始的な爬虫類(はちゅうりゅう)から進化した可能性があるのではないかとする

説の間で論争が続いていた。鳥と恐竜の前脚の違いは「3本の指がどの指から成長したのか」という点。これまで、ニワトリは卵の中では親指と小指が成長せず、「人さし指、中指、薬指」の3本指に

なると考えられてきた。一方、恐竜は小指と薬指が退化した痕跡がある化石があり、「親指、人さし指、中指」の3本とされていた。

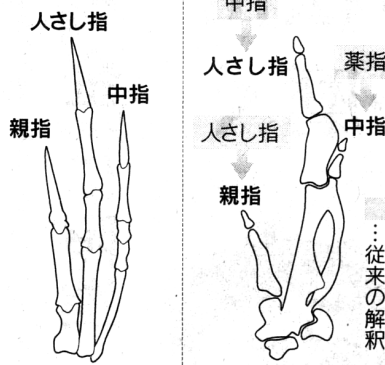
田村教授らがニワトリの卵で指の成長を促したところ、3本指に成長したのは恐竜と同じ「親指、人さし指、中指」だった。たんばく質が初期段階では薬指の位置にあったため、薬指が成長したと誤解されていたが、発生から3日目以降にはたんばく質が薬指からなくなっていたという。

唯一の矛盾解消

動物の進化に詳しい国立科学博物館の真鍋真研究主幹の話。鳥が恐竜から進化したという起源説を巡って唯一、残っていた矛盾を解消するすばらしい成果だ。現在の鳥や爬虫類などの発生過程をみれば、化石しかない恐竜の進化を深掘りできる可能性を示した点でも意味が大きい。

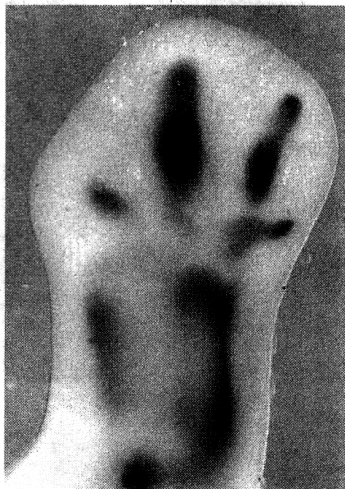
前脚に羽毛を持ち最古の鳥である始祖鳥は1億61年にドイツで約1億5千万年前の地層から発見されたが、当時から進化の過程を巡って世界各国で論争が続いていた。

恐竜の前脚と鳥類の翼の指



恐竜の獣脚類

鳥類(ニワトリ)



卵の中のニワトリの前脚、左から親指、人さし指、中指になる。右端の指らしきものは退化する(東北大・田村教授と神山菜美子さん提供)

320万年前の人類も土踏まず

二足歩行裏付け



初期の人類で、「ルーシー」の愛称を持つ化石でも知られるアファール猿人(アウストラロピテクス・アファレンシス)は、足裏にヒトと同じ土踏まずのアーチ(弓)状の形があったとする研究成果を米ミズーリ大などのチームが11日付の米科学誌サイエンスに発表した。アフリカ東部・エチオピアで発掘した約320万年前の足の骨を分析した。

米大、アファール猿人分析

チームはエチオピアのハダールで、左足の薬指と足首の間の部分にある「第4中足骨」の完全な形の化石を発見。チンパンジーやヒトの骨と比較したところ、骨の先端が地面に平らに着くようねじれ、骨が地面に対して傾きを持つなど、アーチを持つヒトの骨と同じ特徴を持つことが分かった。地面をけり出す強さと衝撃を吸収する柔軟さがあったと考えられるという。

見つかった第4中足骨(左上)の位置を、土踏まずのあるヒトの足の骨で示したものの(キャロル・ワード氏ら提供)アファール猿人は樹上での生活ではなく、地上で直立二足歩行していたとの説を裏付ける内容。チームは、足は木の枝など物をつかむ構造から、ヒトのような二足歩行を可能にする構造に進化したとみている。

鳥類の先祖が獣脚類の恐竜であったことは、前出「鳥類の誕生」の章で奏氏と一緒に写っていた「ミクロラプトル・グイ」の写真が雄弁に物語りますが、発生学的に見た場合もそれを裏付けられるという記事です。

9. 白亜紀の北米と恐竜たち

多様な恐竜たち

白亜紀後期にあたる9000万年前から7000万年前、北米大陸は内海によって分断されていた。西の陸塊はラミディア大陸と呼ばれている。ラミディア大陸の南部と北部で恐竜などの動物の集団が異なっていたらしいことが以前から気づかれていた。しかし、化石の採取が時間的・地理的に偏っているためにそう見えているのではないかと疑う科学者もあった。

グランド・ステアケース・エスカランテ国立公園のカイパロウィッツ累層で最近発見された恐竜の集団は、北部の集団と同時期に生息していたものであることがわかり、ラミディア大陸の南北で恐竜の種が異なるという説を裏付けた。南北の恐竜を隔てた自然の障壁が何だったのかは謎のままだ。下の地図に角を持つ恐竜の集団をいくつか示した。図中イラストは頭骨。



ADAPTED FROM RON BLAKEY Northern Arizona University

上図は 2012 年「日経サイエンス 6 月号」p59 記載のものです。前出「分裂と統合を繰り返す超大陸」で大陸が移動する Plate Tectonics 理論を紹介しました。白亜紀(Cretaceous period)は、大略 1 億 4,550 万年前から 6,550 万年前を指し、その末期にチチュルプ小惑星が地球を直撃し、恐竜全盛期は終焉を迎えました。白亜紀は無氷河期(現在は氷河が存在します)で平均気温も現在よりかなり高く、海面は 150~200m 高かった(Haq et al. 1987) のです。上図の白線は現在の海岸線を表わしています。北米大陸に海が侵入し、西と東に分離しています。この論文では、何が障壁になったか特定できてはいないが、北米の西海岸側のラミディア大陸の南部と北部で異なった恐竜群が生息していたと述べています。地球は絶えず変貌し続けてきたことを実感する参考資料にしてください。

10. 地球の進化と生物の進化の一例

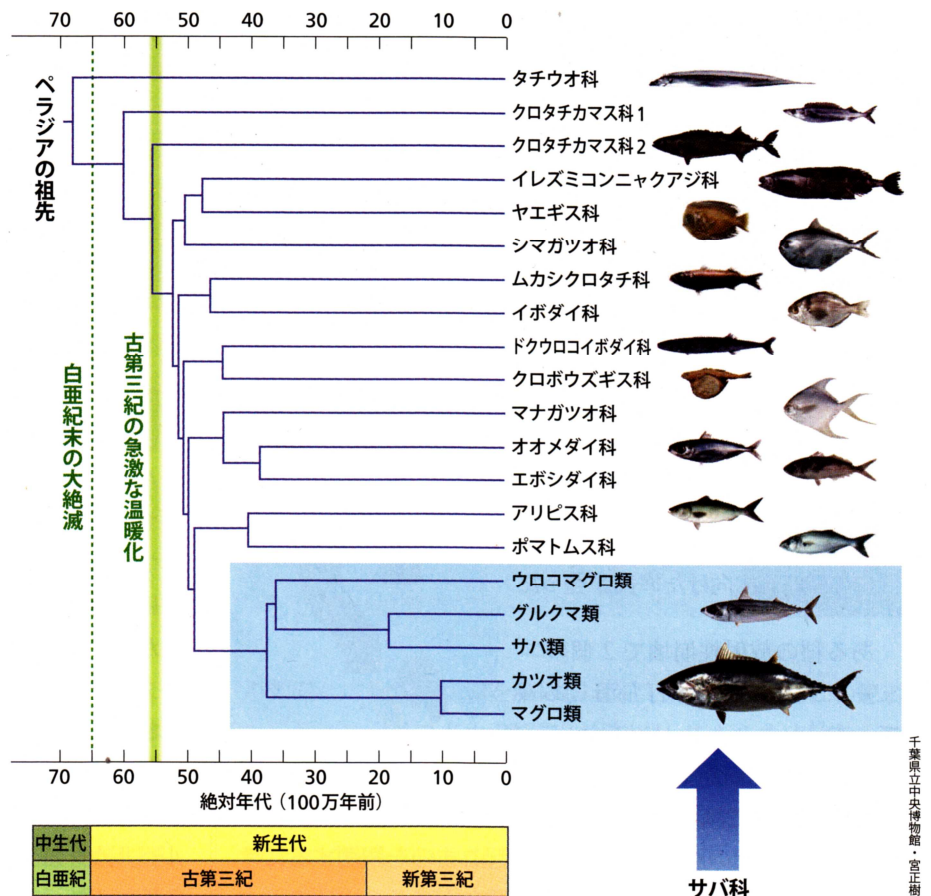
右図はチチュルブ巨大隕石の落下による 6,500 万年前の中生代白亜紀末の恐竜を始めとする生物大絶滅を生き延びたペラジア（“外洋に住むもの”の意）15 科 57 種のゲノム分析により判明した進化の過程を示します。近年の化石の研究により、この大絶滅で海洋においても海洋表層を生存圏とする捕食型のサイズの大きい遊泳性魚類も絶滅したことが判ってきました。天体衝突により膨大な粉塵が空を覆い、急激な寒冷化が起き、酸性雨が降り注いだのが原因でしょう。海洋表層の生態圏は大きなダメージを受けましたが、深海域への影響は少なく、ペラジア一族は生き延びました。

しかし、右図でも判るように、ペラジアの分化が急速に進んだのは、5,500～5,000 万年前です。この頃に急激な温暖化が起っています。PETM 期と呼ばれ、

地球史上最速の温暖化でした。PETM 期には北極圏の島々にはヤシやシダ類が生い茂り、ワニなどが闊歩する亜熱帯のような有様でした。一部の哺乳類は小型化しています。体積当たりの表面積が広がって放熱に有利なためです。深海でも気温が急上昇して酸素欠乏が起こり、有孔類という微生物グループの種の 30～50%が死滅しました。ペラジアの祖先は深海が住みにくくなって、海洋表層へと進出したようです。そして海洋表層にはライバルがあまりいなかったために、生息域を広げて種の分化が起きたと考えられます。

（「マグロやカツオの祖先は深海魚」中島林彦／日経サイエンス 2014 年 2 月号 p21 より要約）

補遺了



多種多様な姿への進化 ペラジアの 15 科は姿形や生活史は様々だ（図ではクロタチカマス科を 2 つに細分して表示）。推定された系統樹によると祖先は中生代白亜紀頃に登場、約 6500 万年前の白亜紀末の大絶滅を生き残り、約 5500 万年前の新生代古第三紀前半頃に分化が急速に進んだ。分化の時期で最も新しいのはサバ科のカツオ類とマグロ類で、約 1000 万年前に新たな種として登場したとみられる。