

Title	生物の断続平衡進化とイノベーション
Author(s)	弘岡, 正明; 山田, 保治
Citation	年次学術大会講演要旨集, 25: 965-968
Issue Date	2010-10-09
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/9450
Rights	本著作物は研究・技術計画学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Science Policy and Research Management.
Description	一般講演要旨

生物の断続平衡進化とイノベーション

○弘岡正明、山田保治（京都工芸繊維大学・創造連携センター）

研究・技術計画学会第 21 回大会から、毎回イノベーションのダイナミズムについて論じてきた^{1)~4)}。イノベーションは S 字型の経時変化を示す非線形関数で記述できる。さらに一つのイノベーションから次世代のイノベーションへと断続平衡的に進化する。今回は広く生物の系統進化の全貌を解析し、新たな推論を行う。その態様を一昨年論じたイノベーションの系統進化と対比する。

生物進化とプルームテクトニクス

生物学での進化論は Darwin(1859)による「種の起源」を嚆矢とする自然淘汰説から始まったが、遺伝学と分子生物学の発達によって新しく分子進化論が進展した。それは DNA を遺伝子とする進化論である。また、生物進化が単純なダーウィンの漸進進化論ではなく、いく度かの大絶滅を繰り返しながら、断続的な変化を遂げてきたことがわかってきた。それは 1972 年の Eldredge と Gould による断続平衡論(Punctuated Equilibrium Theory)¹⁰⁾で説明されるものであるが、さらに生物進化は不可逆的であって、その長い歴史の中ですでに進化の最終段階に近づいていることを示すのが今回の第一の目的である。

生物進化は超大陸の形成と分裂、その原因であるスーパープルームの周期的な上昇による、いわゆるウイルソンサイクルと深く連動している。確かにそれらの天変地異は生物の進化に重大な影響を与えた。しかし、本質的には生物進化にはそれぞれの生物学的トリガー、進化のきっかけが存在し、そのトリガーによって進化が断続的に展開してきたと考えられる。このトリガー説は生物断続平衡進化の成因として本論が独自に提案するもので、生命が生まれてから何回かのトリガーが発現した。

地球のプルームテクトニクスから見ると、地球創成期、地球は約 15 億年かけて徐々に冷却が進み、30~28 億年前には最初の氷河ボンゴラが誕生した。しかしその後、約 27 億年前に火成活動が再び活発化、マグマのオーバートーンが起り、そこから再び地表の冷却が始まり、24~22 億年前には、超大陸ヌーナ(Neuna)にヒューロニアン氷河ができるまでになった。しかし 19 億年前になると再びマントルのオーバートーンが起り、これを境に地球マントルは上部マントルと下部マントルの 2 相構造から全マントル対流の一相構造に変わり、今日まで徐々に冷えてきている。その間にしばしば大陸プレートの一部がスラブとなって上部マントルに沈み込み、それが千切れ、メガリスとなって下部マントルにまで落ち込むコールドプルームの沈み込み現象が起る。これが大陸の集合を引き起こし、超大陸を形成する。一方で下部マントルからのスーパープルームの上昇により活発な火山活動が起り、超大陸が分裂する。このようなマントルの動静による超大陸の形成と分裂が繰り返されてきた。11~8 億年前には超大陸ロディニアが形成されたが、その後太平洋スーパープルームにより分裂、7~5 億年前には Gondwana 大陸が形成されたが、南太平洋スーパープルームで分裂、3.5~2.5 億年前に形成されたパンゲア大陸は、アフリカスーパープルームにより分裂した。白亜紀には南太平洋スーパープルームが上昇し、温暖な気候がもたらされた。これらの挙動を要約すると、コールドプルームの沈み込みで超大陸が形成されると、大陸は冷えて氷河期に入り、その後再び地下のマグマが上昇、そのスーパープルームによる超大陸の分裂が始まり、生物の大絶滅が起る。大陸の分裂によって浅い海ができると、新しい生物進化の潮流が生まれ、その度に大きな世代交代が繰り返されてきたといえる。

生命の誕生は地球創成期の化学進化で複雑な有機物が生成し、DNA, RNA, 蛋白質などの機能を持った各種高分子を含む原始スープにおいて複数の酵素反応が生まれ、代謝系が維持されるようになった。原始の海では、深海の熱水噴出孔のような高温環境が生命発生の場所であったと推測されている。リボソームの塩基配列を比較して原核生物の分類をすると、原始的な細菌ほど高温生息の特性を持っており、最初の細菌は熱水鉱床のような場所で発生したことを示唆している。すなわち、最初の DNA を持つ生物はおよそ 38 億年前、酸素のない二酸化炭素主体の大気の時代、地殻が固まった時機に嫌気性真性細菌として誕生したと考えられる。

真核生物進化のトリガーと放散

以来地球は次第に冷えて、最初の氷河ボンゴラができるまでになった。この最初の氷河は 27 億年前のマントルオーバーターンで消滅し、温暖化が進んだ。その頃から酸素発生型の藍色細菌：シアノバクテリアが光合成を開始し、大気に酸素が含まれるようになった。当初はシアノバクテリアによる発生酸素が還元的环境を酸化するのに消費され、今日の鉄鉱石の集積をもたらしたが、その後シアノバクテリアが出す酸素によって地球は酸化型となり、大気に酸素が蓄積され始めた。ここでシアノバクテリアのような好気性菌が、それまで主役であった嫌気性細菌に取って代わる時代へと転換して行った。その後 20 億年前 前後、ヌーナ大陸が形成された時期に真性細菌から古細菌が分離、さらに古細菌から真核生物が生まれ、3 つのドメインに分化した。これは酸素濃度が生物の酸素呼吸が行える限界のパスツール点（現在の濃度の 1 %）を超えた時点に対応する。この二種の細菌の融合による真核生物の誕生が最初の進化のトリガーであったと思われる。すなわち、好気性のシアノバクテリアが次第に繁殖するにつれて、酸素の濃度が高まり、生存が難しくなった嫌気性細菌が好気性細菌を取り込んで行った。すなわち真核生物の誕生であり、古細菌が真性細菌を取り込んで、共生することによって誕生した特異な生物である。このような共生による複合化がその後の進化の多様性をもたらした最初の決定的なトリガーである。さらに、光合成細菌の光合成能力を失った α -プロテオ細菌が真核生物の中に取り込まれてミトコンドリアとなり、エネルギー生産の原動力となる ATP 合成システムとして機能、特に好気性分解で多量の ATP を効率的に生産することが可能となり、生物の活力を大きく高めた。一方、原生生物の一部は、藍色細菌を細胞内に共生させて葉緑体となり、光合成で栄養を得る植物へと進化した。しかしその後現在に至るまで、真正細菌と古細菌は、その枠内での進化はあっても、その殻を破ることができず、そのままのドメインに留まっている。すなわち、全ての生物はいずれも DNA を持っているが、真核生物のみが今日の多様な生物進化をもたらした特異なドメインであるといえる。20 億年前ヌーナ大陸形成時に 3 つに分裂したドメインはその後新しいドメインが誕生することなく、今日に至っている。

その中で真核生物の多細胞化が始まる。すなわち、次の超大陸ロディニアが 11 億年前から 8 億年前の間に形成された中で、10~9 億年前に真核生物が多細胞生物として進化し一斉に放散、原生生物界、菌界、植物界、動物界の 4 つの界(kingdom)に分裂、真性細菌、古細菌と共に 6 つの界を形成した。そのとき以後新しい界が創成されることなく今日に至っている。すなわち、多細胞化が生物進化の第 2 のトリガーであったと言える。

その後 10~6 億年前の間にわたる長い氷河期に地球は凍結されていたが、7~6 億年前に南太平洋スーパープルームの上昇に伴い、ゴンドワナ大陸の分裂が始まり、その最終期に生物の新しい進化が爆発的に起こった。すなわち、多細胞生物の大規模な進化によって、二胚葉動物門として、海綿動物、刺胞動物、有櫛動物を軸とするいわゆるエディアカラ動物群が大発生した。最近になってこの紀の詳細が次第に解明されつつあり、6.3 億年以降、カンブリア紀前の 5.42 億年前までの期間をエディアカラ紀ということとなった。これらの動物群は 5.42 億年以前に絶滅し、いわゆる PC/C 大絶滅といわれる。これを境にしてカンブリア紀に入り、いわゆるカンブリア大爆発が起こり、再び生物の大進化が進展した。すなわち、動物界が 50 もの門(phylum)に分裂するすさまじい進化が起こったのである。その後 3 億年前までに 32 門までに淘汰されるが、今日までそれら残った門の系統はひたすら堅持されてきている。生物の主要な種類がこの時期に出揃ったということが出来る。カンブリア大爆発で特に重要なことは、三胚葉動物がナメクジウオに遡る共通したマスター調節遺伝子 (HOX 遺伝子) を持つようになったことである。この HOX 遺伝子は海綿動物にはないが、刺胞動物に初めて発生し、三胚葉動物に進化するに際しての起爆剤となり、カンブリア大爆発を起こした。この共通マスター遺伝子が今日までの多様な生物を生み出す重要な鍵になっており、この HOX 遺伝子の誕生が第 3 のトリガーであったといえる。このトリガーによって門の放散が進展した。

シアノバクテリアが 27 億年前から光合成による酸素を出し続けてきた。特に 6 億年前ごろにマグマが上昇、温暖化が始まるとともに、大気中の酸素濃度が急に増加し、今日の 1/10 程度に達し、いわゆるオゾン層が形成されるようになった。このオゾン層が太陽からの紫外線を遮り、陸上でも生物の生存を可能とする程度に減少した結果、生物の大陸への上陸が始まった。5 億年前頃にまず植物が上陸し、しだ植物が地上に繁茂し始めた。また、7.5 億年前ごろから海水がマントルに注入され始め、海水の減少が始まり、陸地面積が次第に増大し始めたことにも注目しておく必要がある。

カンブリア爆発が始まる古生代において、HOX 遺伝子の獲得の中で進化、誕生した脊椎動物門ではあるが、それよりほぼ 2 億年後にアフリカスーパープルームの上昇に伴うパンゲア大陸の分裂と共に放散

が起こり、6つの綱(Class)に分裂した。それらは円口類、魚類、両生類、爬虫類、哺乳類、鳥類である。鳥類が最後の綱で、2.3億年前に誕生した。それ以後、新しい綱は生まれていない。そのトリガーは脊椎の獲得であったと思われる。2.5億年前に綱の放散で誕生した哺乳動物綱は、白亜紀の後半、南太平洋スーパープルームの上昇を契機に、8000万年前頃から目への適応放散が始まり、霊長目、齧歯目、兎目、肉食目、鯨目、偶蹄目、有袋目などと多様化した。その間、6500万年前、K/T：中生代白亜紀(Cretaceous, 独 Kreide)と新生代第三紀(Tertiary)の境界で生物の大絶滅が起こった。この時期の恐龍などの絶滅の原因は巨大隕石の落下に起因するとされてきたが、目(Class)の放散、多様化は、それより前の8000万年前頃から始まっているので、目の放散の抜本的な要因は他に原因を求めるべきであろう。この進化の過程で胎生の獲得が進んでおり、それがトリガーと見ることができる。哺乳類はすでに2.3億年前に発生しているが、スーパープルームの上昇が引き金となって、8000万年前頃から一斉に放散の時期を迎えた。目の放散が終わったその後の進化は科、種の放散しか起こらない時代である。霊長目の最後の進化は600万年前に真猿亜目からヒト科が分かれた。おりしもアフリカ地溝帯でのプルーム上昇で起こった気候変動がきっかけとなった可能性がある。

以上の推移は、生物進化が断続的に一方向に進み、すでに最終段階に至っていることを示している。それぞれの進化は地球のプルームテクトニクスが引き金になっていることがみられるが、直接的にはそれぞれの生物学的なトリガーが作用していると考えられる。そのトリガーとして、真核生物の誕生(ドメインの分裂)、多細胞化(界の分裂)、HOX遺伝子の誕生(門の分裂)があり、その後のトリガーは脊椎の獲得、胎生への進化が考えられる。このように動物が5億年前に門が分裂、2.5億年前に綱が放散、8000万年前に目の放散が起こった時期に対応して、シダ植物、裸子植物、被子植物が生まれており、植物も同じ進化の動機に対応していると考えられる。なお進化の多様性先細りには池田の考察⁹⁾がある。

以上要するに、生物の進化はEldredge/Gouldが指摘したように、断続平衡論として記述できる現象である。生物は特定の時期に、あるトリガーによって進化が開始され、比較的短時間の間に進展するS字型の経緯を辿る特性を持っているとみられる。そのような断続的な進化は、ドメインから界、門、綱から目へと一方的に波及し、38億年の歳月を経て、いまや最後の分類までその進化、放散が終了した最終段階にあると考えられる。太陽系の寿命はあと50億年といわれ、太陽が膨張し始めて地球を飲み込み、超新星爆発を起こして終焉する。生命の進化はちょうどその折り返し点で完了したことになる。

イノベーションの系統進化

人類は石器時代より種々の道具を発明し、進化してきた。その中でも現代は11,000年前より始まった温暖な気候が安定している間氷期にあって爆発的に進化した。古代文明は5000年前から3500年前の温暖期(現代に比べ相対的にかなり温暖)に黄河文明、メソポタミア文明、インダス文明、エジプト文明、エーゲ文明などが一斉に開花した。エーゲ文明を受け継ぐギリシャ文明は寒冷化を迎えて衰退した。その後紀元前後の温暖期にローマが栄え、一時代を構築したが、西暦100年頃からの寒冷化に伴いゲルマンの大移動などもあって、5世紀後半にローマ帝国は滅亡した。10世紀以後再び温暖期を迎え欧州諸国が誕生し、13世紀には元がモンゴル帝国を拡大、中国を統一した。しかし、15~17世紀の寒冷化でシュペラー、マウンダー氷期が襲来、欧州ではペストが流行し、General Crisisの時代を迎えた。この寒冷期の最終段階の17世紀になって、科学的考え方、科学思想が芽生え、ニュートン力学が構築された。18世紀から19世紀にかけて近代文明が一斉に進展し、生物学、化学、電磁気学が構築され、哲学、経済学、音楽、小説、絵画、詩などが大きく花開いた。それと共に、蒸気機関、製鉄技術、紡績機械などの発明を基礎に近代工業化へ向けて産業革命が展開した。文明の進化は気候と深く相関しているように思われる。1579年チコ・ブラーエの天体観測に始まり、1589年ガリレオが天体望遠鏡を使って本格的な天文学の基盤を作り、約120年で最初の天文学の枠組みができ上がった。その後、1888年のマイケルソン・モーリーの実験を契機とした相対性理論の発展がきっかけとなり、20世紀になってブラックホールの概念、インフレーション宇宙の描像を描き出した近代天文学が成立した。すなわちガリレオ、ニュートン天文学は相対性理論によって新しい近代天文学のパラダイムに再構築された。一方、ガリレオの鉱山ポンプの概念はゲーリケの真空ポンプから、パパン、セイバリー、ニューコメンの火力機関を経て、J.ワットの蒸気機関に至り完成を見た。この蒸気機関が紡績機械、製鉄技術、機械工業の原動力となり、産業革命の主役となったが、今や過去の産物となって役目を終えている。18世紀の終盤になるとラヴォアジエが化学原論で基礎化学を構築、これが引き金となって、19世紀には製鉄、合成染料、繊維工業、医薬、農薬、など一連の近代化学工業の基盤が構築され、生物進化での放散と同じ現象が起こった。1665年フックが顕微鏡を使って細胞の観察を始めたことを契機に微生物の認識が深まり、19

世紀にはパスツールらにより細菌学が集大成された。18 世紀の半ばビュフォンは生物進化論はラマルク、アガシを経て、19 世紀にダーウィンの進化論となったが、DNA と遺伝学を契機に、20 世紀には分子生物学をベースにした今日的な分子進化論へと再構築された。また、バイオテクノロジーの認識ができ上がり、ゲノム工学の分野が開け、この分野はなお進化の途上にある。

この 200 年で大きく発展したこれら近代科学は、一つの発見、発明を契機に新しいパラダイムが展開する構図を示している。この現象は生物の進化が、一つのきっかけで新しいパラダイムに放散して行く現象と相似であり、同様な断続平衡的非線形現象として把握できる特性を持っているといえる。

参考文献

- 1) 弘岡正明、「イノベーションのタイミング計測と産業展開」第 21 回大会 (2006)
- 2) 弘岡正明、「イノベーションの進化とメガサイクル」第 22 回大会 (2007)
- 3) 弘岡正明、「イノベーションの系統進化・トリガーと雪崩のダイナミズム」第 23 回大会 (2008)
- 4) 弘岡正明、「イノベーションのダイナミズムと知的財産権の消長」第 24 回大会 (2009)
- 5) 熊澤峰夫、丸山茂徳「ブルームテクトニクスと全地球史解説」岩波書店 (2004)
- 6) 熊澤峰夫、伊藤志士、吉田茂「全地球史解説」東京大学出版会 (2002)
- 8) 川上紳一、「生命と地球の共進化」日本放送出版会 (2000)
- 9) 池田清彦、「動物進化考 10、動物の多様性先細り?」、日本経済新聞、平成 16 年 5 月 9 日 (2004)
- 10) Eldredge, N., & Gould, S.J., "Punctuated Equilibria" in Schopf, T.J.M., "Models in Paleobiology", Freeman Cooper, pp.82-115 (1972)

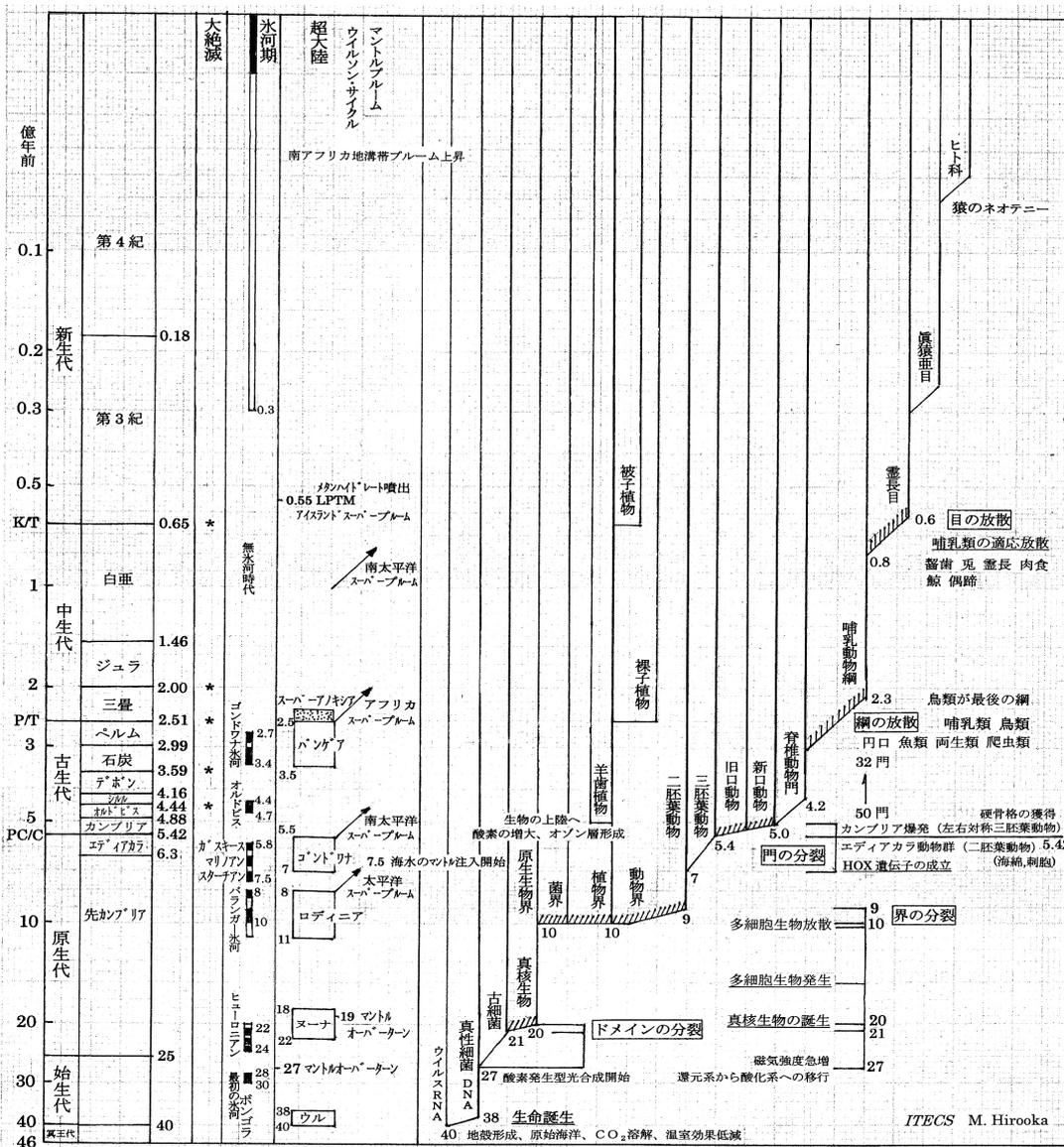


図 1 地球史と生物進化の断続平衡特性