

特集『地球システム変動と大量絶滅』

スノーボール・アース現象

田近 英一¹

1. 地球システムの安定性と変動性

海と生命という、地球を特徴づけるふたつの要素は、地球史のかなり初期段階からずっと存在し続けてきたと考えられている。このことは、地球環境が地球史の大部分を通じて安定に維持されてきたことを示唆する。しかしながら、太陽放射の時間的増大、火成活動の変動、大陸地殻の成長、生物進化といった、地球環境を規定するいくつかの要因の変化を考えてみただけでも、地球環境が長期に渡って現在と類似のものであったとすることはきわめて困難であるようにみえる。

この問題は、地表温度が主として大気中の二酸化炭素の温室効果によって規定され、二酸化炭素濃度が、大気だけではなく海洋・生物圏・地殻・マントルなどから構成される地球システムにおける物質循環に

よって自律的に調節されている、と考えることで理解することができる。すなわち、長期的にみた場合、大気海洋系における二酸化炭素の主要な消費プロセスである珪酸塩鉱物(大陸地殻の構成物質)の化学風化作用が強い温度依存性を持つために、それがあたかもサーモスタットのような役割を果たすことで地表温度が安定化されてきた、というわけである[1]。これは、地球システムに内在するフィードバック・ループのうち、地表温度に関しては化学的風化作用に起因した“負”のフィードバック機構が強く働くため、地球環境は地球史におけるさまざまな擾乱に対して安定に振る舞ってきたのではないかと、いう考え方である。

一方で、地球史においては大陸氷床が発達する寒冷期や氷床が全く存在しない温暖期が何度も繰り返されてきた(図1)。また、生物の大量絶滅を引き起こ

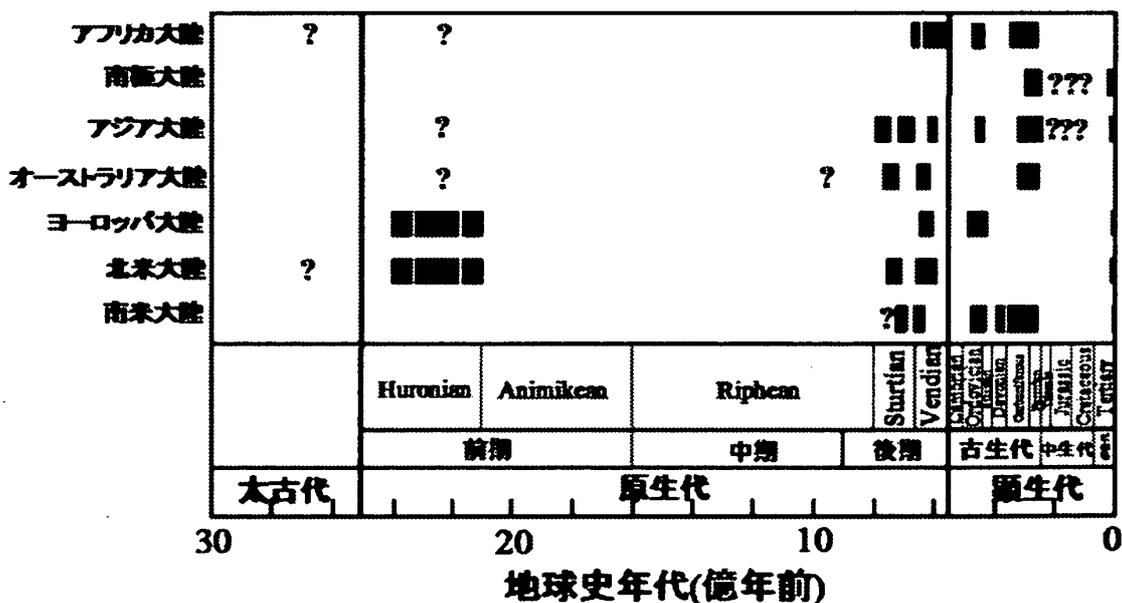


図1: 地球史における氷河時代。現在の各大陸地塊に大陸氷床の痕跡が残っている時代を示す。

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

すような大きな地球環境変動も数多く生じてきた。しかし、こうした地球システム変動は、地球システムの内的変動や外的擾乱に対する地球システムの応答として理解することが可能である。

最近、こうした地球システム変動の新たな事例として、きわめて特異な地球環境変動現象が議論されるようになってきた。それは、原生代(現在から25億年前～5億4300万年前)において、地球表面の大部分が凍結してしまうような極端な寒冷化現象が何度も生じたのではないかと、いうものである[2-4]。これは、“スノーボール・アース仮説”と呼ばれている。もしこのような極端な地球環境変動現象が本当に生じたのだとすると、海洋や生命が持続的に存在することができないような深刻な事態がもたらされた恐れがある。実際、スノーボール・アース現象は、生物進化史上の重要なイベントと密接な関係にある可能性も指摘されている[3, 4]。スノーボール・アース現象とは、いったいどのような原因によって生じるいかなる地球システム変動現象なのだろうか？

2. 原生代氷河堆積物の謎

原生代には、ヒューロニアン氷河期(約24～21億年前)、スターチアン氷河期(約7億6千万年～7億年前)、ヴァランガー(またはマリノアン)氷河期(約6億年前～5億5千万年前)という三つの大氷河時代の存在が知られている(図1)。とくに、原生代後期の地層には汎世界的に氷河性堆積物が分布し、それらのうちのあるものは当時の低緯度域で形成されたのではないかと、いう可能性が以前から指摘されていた。低緯度氷床の存在は、顕生代(5億4300万年以降)の氷河時代においては全く知られていない。

地質記録に残されている原生代の氷河性堆積物には、この他にもいくつかのきわだった特徴がある。まず、氷河性堆積物には鉄鉱床やマンガン鉱床が伴っている。こうした鉱床が形成されるためには、鉄やマンガンが海水中に大量に溶存できるような貧酸素環境

が長期間に渡って実現されなくてはならない。ところが、現在のように大気海洋系に酸素が豊富に存在する環境においては、鉄やマンガンは酸化物として沈殿してしまうため、海水中には極微量にしか存在することができない。約20億年前を境に大規模な鉄・マンガン鉱床はほとんど形成されていないことから、そのころ大気中の酸素濃度が急激に増加して地球表層が酸化的な環境になったのではないかと考えられている。したがって、原生代後期において鉄鉱床がふたたび形成されるようになったことの解釈は非常に難しい。

また、氷河性堆積物の直上には、数十～数百メートルの厚さで炭酸塩岩が堆積している。この炭酸塩岩は、氷河性堆積物をキャップするように堆積しているので、“キャップ・カーボネート”と呼ばれている。炭酸塩岩は、現在では珊瑚礁に代表されるように、水温が高い低緯度海域でのみ形成されている。すなわち、原生代においては、氷河性堆積物が形成されるような寒冷な環境と、炭酸塩岩が形成されるような熱帯性の環境が時間的に接しているという、きわめて奇妙な状況がみられる。

さらに、原生代後期の氷河性堆積物の前後では、海水の炭素同位体比の大きな負異常がみられる[3]。生物は光合成をする際に、軽い同位体をより多く取り込む性質(同位体分別効果)があるため、生物生産が活発になると残された海水中の炭素同位体比($\delta^{13}\text{C}$ 値)はより重くなる。海水から炭酸塩鉱物が沈殿すると、その値(通常は0‰程度)が記録される。ところが、原生代後期における炭素同位体比は、氷河期直前に非常に高い値(10‰程度)を示したあと急激に低下し、ついにはマントル起源炭素に近い値(-5‰)にまで達し、氷河期が終了してもなかなか回復しない。この解釈としては、生物による光合成活動がほとんど完全に停止した状態が少なくとも数十万年(大気海洋系における炭素の滞在時間)以上継続したと考えるのがもっとも妥当であるが、それはきわめて異常な状況といわざるを得ない。

これらのことを考え合わせると、原生代の氷河時代

には、これまで我々が全く知らなかったような、何かきわめて特殊な現象が生じたのではないかと考えられる。世界中のさまざまな地域から得られた原生代の炭素同位体比データのコンパイル結果によれば、上述のような炭素同位体比の負異常は原生代後期だけで4-5回もみられるため、このような現象はスターチアン氷河期及びヴァランガー氷河期を通じて何度も繰り返して生じた可能性が指摘されている[5]。また、低緯度氷床の存在はこれまで主として原生代後期の氷河時代において議論されてきたが、最近南アフリカにおける地質調査により、原生代初期にも低緯度氷床が存在したことが明らかになった[6]。したがって、原生代の三大氷河時代はすべて異常な状態にあったことが確実な状況になってきた。

最初に述べたように、現在では、この問題はスノーボール・アース仮説によって説明できるのではないかと考えられている。すなわち、地球表面の大部分が凍結したと考えれば、上述した特徴をみな説明することができる[2, 3]。たとえば、スノーボール・アース状態に陥ると海洋表面が凍結するため、大気海洋間のガス交換が遮断され、海洋は貧酸素環境になる。その結果、海底熱水噴出口から放出された還元的な二価の鉄イオンが海水中に蓄積され、それが氷河期の終了とともに酸化されて鉄鉱床を形成する。また、スノーボール・アース状態を終了させるためには、大気中に莫大な量の二酸化炭素が蓄積する必要があるが(後述)、このため氷河期終了直後の地球環境はきわめて高温となり、地表面の激しい風化作用を経て海水から炭酸塩が急速に沈殿することによって、キャップカーボネートが形成されたと考えられる。また、海洋の有光層が凍結するような条件下では、生物の大量絶滅は避けられず、生物生産性がしばらくのあいだ大幅に低下したとしても不思議ではない。

以下では、気候モデルと炭素循環モデルを用いてスノーボール・アース現象を理論的に検討した結果について議論する。

3. 全球凍結現象

地球表面全体が水で覆われた状態は、気候学的には全球凍結状態と呼ばれる。地球の気候状態は、地球が受け取る正味太陽放射と地球が宇宙空間へ射出する地球放射のバランスによって規定される。寒冷な環境下では極冠が形成され、それは日射量の低下とともに中低緯度へと拡大する。極冠は通常の地表と比べてアルベド(反射率)が高いので、極冠の拡大に伴って地球が受け取る正味太陽放射は減少する。そうした地球のエネルギーバランスを記述したモデルにおいて、日射量の変化に対し極冠がどのくらいの緯度まで張り出すかについて定常解を求めると、全球凍結状態が安定解のひとつであることが分かる。ただし、地球史における気候変動は、日射量の変化というよりも、大気中の二酸化炭素分圧の変化に起因しているものと考えられる。そこで、地球放射の二酸化炭素分圧依存性を考慮した南北1次元エネルギーバランス気候モデル[7]を用いて、日射量ではなく、大気中の二酸化炭素分圧の変化に対して極冠がどのくらいの緯度まで張り出すかについて定常解を求めた結果を図2に示す。横軸は大気中の二酸化炭素分圧、縦軸は極冠

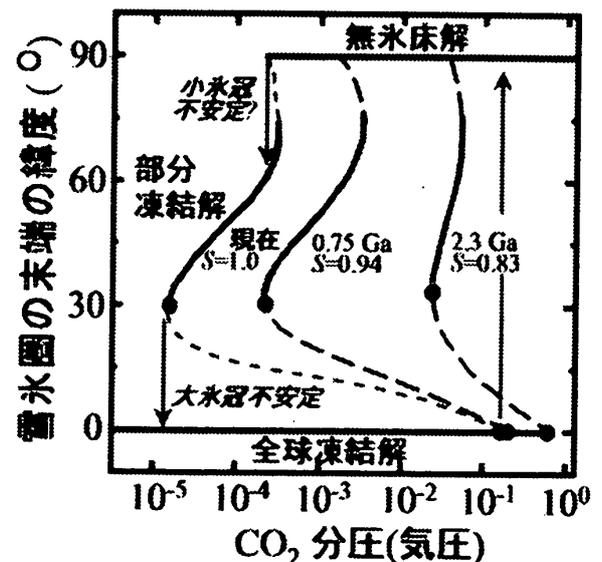


図2: 南北1次元エネルギーバランス気候モデルから得られる定常解。各時代における太陽放射(S)に対する解を示す。実線は安定解、破線は不安定解、黒丸は臨界条件、矢印は気候ジャンプを表す。

の末端緯度である。この結果は、日射量変化に対する結果と本質的に同じ構造を持っているが、地球史における気候変動を理解する上ではより有用なものであると考えられる[7]。この図から、気候システムの安定解(実線)を、無氷床解、部分凍結解、全球凍結解の三つに分類することができる。

気候システムの挙動を考える上では、極冠のアルベドが高いことが重要な役割を演じる。すなわち、極冠が拡大するとその高いアルベドのために地球が受け取る正味の日射量が低下し、地球はますます寒冷化し、極冠がさらに拡大する、という正のフィードバック(アイスアルベド・フィードバック)機構が働くことになる。極冠がある緯度(約30~20°付近)まで張り出すとこの効果が強く働き、地球は部分凍結解から、突然、全球凍結解に落ち込んでしまう。これは、気候ジャンプとも呼ぶべき現象で、惑星の気候状態の“相変化”とみなすこともできる[7]。このような気候ジャンプは、安定解が消失する条件(以下では臨界条件と呼ぶ)で生じる。図2によれば、現在の太陽放射では、臨界条件における二酸化炭素分圧は約10ppm程度である(ただし、臨界条件の詳細は、実際には大気や海洋の運動に伴う南北間熱輸送や水循環など、さまざまな要因が複雑に関係するものと考えられる)。

全球凍結状態に陥ると、地球が受け取る正味太陽放射は非常に小さいが、地表気温が低いため、地球が放出する惑星放射も非常に小さいという、エネルギー的に釣り合った状態が実現する。日射量や二酸化炭素分圧が少しぐらい変化しても、地表気温は常に0℃よりも低いため、地表面が凍結した状態は維持される。したがって、いったん全球凍結解に陥ると、そこから脱出するのは容易ではない。この状態から抜け出すためには、太陽放射が非常に大きくなるか、または大気中に大量の温室効果物質が蓄積することが必要である。たとえば、もし二酸化炭素が大気中に0.1気圧オーダー蓄積されれば、地球は無氷床解へ気候ジャンプし、全球凍結状態から脱出することができる。

気候システムが臨界条件に達する原因としては、大

気中の二酸化炭素分圧の低下が考えられる[8, 9]。二酸化炭素分圧は炭素循環によって規定されており、炭素循環システムの変動によって二酸化炭素分圧の変動が生じる。大気海洋系における二酸化炭素の滞在時間である数十万年以上の時間スケールでは、大気海洋系へ流入する正味の二酸化炭素フラックス(正味二酸化炭素供給率 F_{in})は大気海洋系から正味で流出する二酸化炭素フラックス(= 珪酸塩鉱物の風化率 F_{w}^{\dagger})と釣りあっているとみなすことができる($F_{in} = F_{w}^{\dagger}$) [8, 9]。一方で、珪酸塩鉱物の風化率は、温度 T と二酸化炭素分圧 pCO_2 に対して、 $F_{w}^{\dagger} \propto f_e (pCO_2)^n \exp(-E_a/RT)$ のような依存性を持つことが知られている[1, 10]。ここで、 f_e は陸上生物による地表面の風化効率(後述)、 E_a は反応の活性化エネルギー、 R は気体定数である。いま、正味二酸化炭素供給率が非常に小さい場合を考えると、それと釣り合うべき珪酸塩鉱物の風化率も非常に小さくならなければならないが、それは二酸化炭素分圧及び気温(主として二酸化炭素の温室効果によって規定されている)の低下によって実現される。すなわち、正味二酸化炭素供給率の低下に対し、炭素循環システムは二酸化炭素分圧が低下するように応答する[8]。正味二酸化炭素供給率とは、火成活動による脱ガス率(二酸化炭素の供給率; F_D)と有機物の風化率(二酸化炭素の供給率; F_{w}^{\dagger})の和から、有機物の埋没率(二酸化炭素の消費率; F_B)を引いたものとして定義される($F_{in} = F_D + F_{w}^{\dagger} - F_B$)。すなわち、このフラックスが低下するということは、原理的には、火成活動度が低下するか、有機物風化率が低下するか、または有機物埋没率が増加することによって実現される。現在の F_{in} の大きさは約 7.9×10^{12} mol/年[10]であるが、これが約1/40にまで低下すると、それと平衡にあるべき二酸化炭素分圧が約10ppmにまで低下する。このことは、臨界条件においては非常に寒冷な環境が実現されることになるため、地表面の風化率もきわめて低い条件($F_{in} = F_{w}^{\dagger} \sim 0$)になっている、ということを考えれば理解しやすい。正味二酸化炭素供給率の変動に対する炭素循環システムの応答時間は、簡単な海洋化

学を考慮した炭素循環モデルから数十万年オーダーであると推定される[8,9]。臨界条件が実現されると、気候システムはアイスアルベド・フードバックによって数千年オーダーで全球凍結状態に陥る[11]。

全球凍結状態は全球平均気温が摂氏マイナス40度という極端な寒冷環境である。このため、海洋も表面から凍結する。凍結時の潜熱放出を考慮した熱伝導計算によれば、海洋の冷却固化の時間スケールは10万年程度である[9]。ただし、地球内部からの地殻熱流量の存在のために、海洋表層の約1000 mが固化したところで、海洋全体として熱平衡に達する。このような状態は、火成活動によって二酸化炭素が大気中に0.1気圧オーダー蓄積し、気候システムがふたたび臨界条件に達するまで継続される。現在の島弧火成活動による二酸化炭素の脱ガス率を仮定すると、0.1気圧相当の二酸化炭素が蓄積するには数百万年かかる。

一方、海洋表層は氷に閉ざされているが、海洋深層は凍結していない。大気とのガス交換が遮断されているため、深層水はだんだんと貧酸素環境になっていく。そのような環境下では、熱水起源の還元的な物質(二価の鉄イオンなど)が溶存でき、海水中や海底堆積物中では硫酸還元細菌が活動していた可能性がある。

さて、二酸化炭素が大気中に0.1気圧オーダー蓄積すると、気候システムはふたたび臨界条件に達し(図2)、全球凍結状態は不安定になる。そして、赤道域で氷が融解し始めると、高いアルベドのコントラストのため、極域まで氷が一気に融解する。その時間スケールは千年程度である[11]。したがって、地表面の氷がなくなった直後においても、大気中にはまだ0.1気圧程度の二酸化炭素が存在した可能性がある。すると、その強い温室効果によって、今度は全球平均温度が摂氏約60度というきわめて高温な環境が実現する。一方、高温環境では水循環も活発となり、地表は激しく風化侵食される。風化によって大量の陽イオンが海洋に供給され、海洋において炭酸塩鉱物が沈殿する。海洋化学を考慮した炭素循環モデルによれば、大気中の

二酸化炭素分圧は数十万年スケールで減少していくが、その際の炭酸塩の沈殿速度は現在の20-30倍に達すると見積られる[9]。このような急速かつ大量の炭酸塩の沈殿は、氷河堆積物直上に普遍的にみられるキャップ・カーボネートの形成メカニズムである可能性が高い。気候システムは、こうして温暖な環境に戻っていく。

全球凍結現象は、こうした一連のプロセスから構成され、全体としては数百万年から一千万年に及ぶ現象である。その間、大きな二酸化炭素分圧の変動(2-3桁)及び地表温度の変動(～100℃)が生じる。全球凍結の前後では気候ジャンプが生じることから、全球凍結現象とは単に氷河期の大規模なものではなく、気候状態の相変化を伴うような特異な現象であることが分かる。このように理論的に予測された全球凍結現象が現実のスノーボール・アース現象と全く同じものかどうかはまだ不明であるが、さまざまな地質学的証拠との整合性を考えると、大局的にはかなり近いものであった可能性が高いように思われる。

4. スノーボール・アース現象と太陽進化

原生代における三つの大氷河時代は、すべてスノーボール・アース状態に陥っていた可能性がある。それに対し、顕生代においては一度もそのような状態に陥っていない。この理由はまだ不明であるが、直感的には、太陽放射が原生代において小さかったことが関係しているのではないかと考えられる。太陽進化論によれば太陽光度は時間とともに増大していると考えられており、たとえば原生代後期においては現在の94%、原生代前期においては現在の83%程度の明るさしかなかったと推定されている。地球のエネルギーバランスを考えれば、太陽放射が気候形成に決定的な役割を果たしていることは明らかである。したがって、このことが顕生代と原生代の境界条件の大きな違いであった可能性は高い。

図2をみると、原生代においては太陽放射が弱いた

め、安定解は現在の場合よりも高二酸化炭素分圧側にシフトしている。それにともなって、臨界条件における二酸化炭素分圧も、原生代後期で一桁、原生代前期で三桁、現在よりも高くなっている。すなわち、原生代においては、現在よりも高い二酸化炭素分圧条件でスノーボール・アース現象が生じることになる。さらに、原生代前期の太陽放射条件に対する解をみると、部分凍結解の勾配が現在と比べて大きいことが分かる(図2)。これは、現在のような気候状態(全球平均気温や極冠の広がり)が現在と同じような条件から臨界条件に移行するための二酸化炭素分圧の低下が、現在よりも相対的に小さくてよいということの意味する。たとえば、現在の太陽放射条件下で臨界条件を実現するためには二酸化炭素分圧が標準レベルの数十分の一にまで低下する必要がある。これに対し、たとえば原生代前期の太陽放射条件下で臨界条件を実現するためには、二酸化炭素分圧が標準レベルの約1/2-1/3程度に減少するだけでよい。すなわち、原生代においては相対的に小さな二酸化炭素分圧変動でスノーボール・アース現象が生じた可能性がある。したがって、やはり原生代は太陽放射が小さかったために、顕生代よりもスノーボール・アース現象が生じやすかったのかも知れない。

しかしながら、二酸化炭素分圧の変動は炭素循環システムの変動によって規定されていることを思い出してみよう。炭素循環の観点から見ると、スノーボール・アース現象が生じる条件は、あくまでも臨界条件をもたらす正味二酸化炭素供給率が実現されることである。そこで、太陽放射の変化に対する正味二酸化炭素供給率と気候状態の関係を調べた結果を図3に示す。すると、臨界条件における正味二酸化炭素供給率は現在よりも原生代の方が大きく、正味二酸化炭素供給率の低下という条件からすれば、確かに原生代の方がより実現されやすいようにも見える(図3(a))。

ところが、図3(a)の結果は原生代の地表面状態が現在と同じであること($f_e = 1$)を仮定した場合の結果である。実は、原生代の陸上には現在のように陸上高

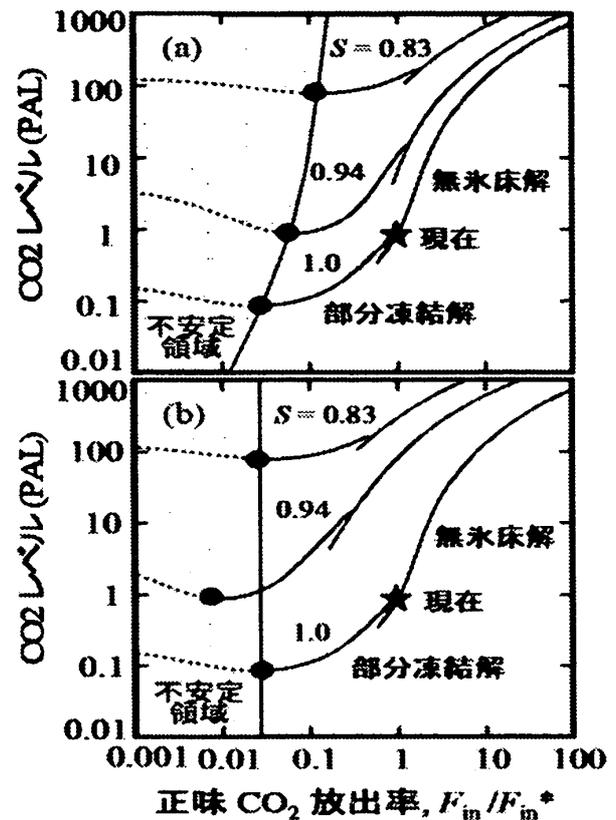


図3: 正味二酸化炭素供給率に対する大気中の二酸化炭素レベル(PAL: 現在の二酸化炭素レベルを1とした相対値)。黒丸印は臨界条件を示す。(a)太陽放射(S)の違いのみを考慮した場合。(b)太陽放射及び陸上生物活動による地表面風化効率の違いを考慮した場合。

等植物が存在していなかった(植物の陸上進出は5-4億年前のオルドビス紀~シルル紀)。このため、当時の地表面状態は現在とは大きく異なっていたと考えられている。ここで地表面状態の違いというのは、具体的には土壌形成とその安定維持による地表面の風化効率の違いのことである。土壌は水分を貯蔵するだけでなく、細かい粒子から構成されているために溶解反応が生じる鉱物表面の総面積が大きく、実効的な風化効率が非常に高くなっている。陸上植物は、地表鉱物の物理風化を促進し土壌形成に寄与するだけでなく、有機酸の分泌や栄養塩類の吸収による土壌水分中のイオン活動度の低下などによって溶解反応を促進している。さらに、陸上植物の存在は土壌流出を抑制し、土壌を安定に維持する役割も果たしている。

たとえば、ハワイやアイスランドで溶岩流が噴出した直後やアルプスの植生限界よりも高い高度など植生が

ほとんどない地域の風化率は、被子植物に覆われた通常地域の風化率の1/7程度 ($f_e = 0.15$) である[e.g., 10]. そこで、これが原生代の風化効率だとみなせることを仮定すると、結果は図3 (b) のようになる。原生代における弱い太陽放射の影響は、陸上高等植物が存在しなかったことによる低い風化効率の影響によって完全に打ち消されてしまうことが分かる。したがって、正味二酸化炭素供給率の観点からすると、原生代における臨界条件の達成しやすさは、現在と本質的に変わらないと結論される。

結局、原生代と顕生代の違いはどこにあるのだろうか。炭素循環からみた臨界条件が同じであるとすれば、この問題はなぜ原生代において正味二酸化炭素供給率が現在の数十分の一にまで低下したのかという問いに帰着される。実は、少なくとも原生代後期においては、平均的な正味二酸化炭素供給率がそもそも現在より小さかった可能性がある。

たとえば、現在における二酸化炭素の脱ガスの大部分は島弧火成活動によるものであり、その起源は沈み込み帯に持ち込まれる炭酸塩堆積物である。ところが、炭酸塩堆積物のほとんどはジュラ紀以降に出現した有孔虫の殻などであり、ジュラ紀以前には遠洋性の炭酸塩堆積物は現在と比べてずっと少なかった可能性がある。そうだとすれば、ジュラ紀以前の二酸化炭素脱ガス率は現在よりも低かった可能性が高い。とくに原生代後期においては、ウィルソンサイクル(超大陸の形成と分裂のサイクル)との関係で火成活動度自体も低かった可能性がある。また、原生代においては大気中の酸素濃度が現在よりも低かったと考えられているため、有機物の風化率が低かった可能性もある。さらに、少なくとも原生代後期においては、海水の炭素同位体比が顕生代と比べて平均的に重く[5]、有機炭素の埋没率が高かった可能性がある。とりわけ氷河期直前には、炭素同位体比の値が非常に大きくなっており(前述)、有機炭素の埋没率がとくに増大したことが示唆される。

したがって、原生代後期においては正味二酸化炭

素供給率が平均的にみて低い条件にあり、氷河期直前に有機炭素の埋没率が増加したことがスノーボール・アース現象の直接の引き金になった可能性が高い。ただし、なぜ有機炭素の埋没率が氷河期直前に増大したのかについてはよく分からない。当時、超大陸ロディニアが分裂を開始したために、有機炭素の主要な堆積場である浅海域の面積が拡大したことがその原因ではないかという可能性が指摘されている[3]。もしそれが本当であれば、火成活動度や生命活動の場と密接な関係を持つテクトニックな環境が、原生代と顕生代とで大きく異なっていたことが究極の原因だったのかも知れない。

5. スノーボール・アース現象と生物進化

スノーボール・アース仮説には、生物進化の観点からみて重大な問題がある。それは、もしこのような現象が生じたならば海洋表層の有光層は数百万年間に渡って完全に凍結するため、海底熱水噴出孔生物群集以外のほとんどすべての生物種(海洋表層に生息する光合成生物や浅海域に生息する底棲生物など)が絶滅する恐れがあるが、原生代後期のスノーボール・アース・イベントでは、原核生物ばかりか緑藻類、紅藻類、褐藻類など真核生物の一部も絶滅を免れたからである。全球凍結状態が実現されたとしても、実際には、現在のアイスランドやハワイのような火山地域周辺で生物が生存できたのではないかという説もあるが、実際のところは分からない。これは、スノーボール・アース仮説の最大の課題であるといえる。

これに対し、大気大循環モデルによれば赤道域の海洋表面が凍結しないような解が存在するので、問題は解決できるという主張がある[11]。けれども、そのような場合には鉄鉱床やキャップカーボネートの形成、炭素同位体比の負異常、地質学的・古地磁気学的なデータから示唆される氷河期の時間スケールなどを説明することが難しく、現実のスノーボール・アース現象とは必ずしも整合的ではないと考えられる。したがっ

て、この問題はまだ解決されていないと考えるべきであろう。

スノーボール・アース現象は生物進化と密接な関係にあった可能性が指摘されている。たとえば、原生代前期のヒューロニアン氷河期は、縞状鉄鉱床やマンガン鉱床の形成、大気中の酸素濃度の急増などとはほぼ同時期であり、酸素発生型光合成生物(シアノバクテリア)の大繁殖や真核生物の出現と関係していた可能性もある[4]。また、原生代後期のスノーボール・アース現象は、多細胞動物の出現との関連が指摘されている[e.g. 3] (図4)。

化石として保存されやすいような硬骨格を形成する生物種の出現は顕生代(カンブリア紀)以降なので、原生代における生物進化や大量絶滅の詳細はよく分からない。しかし、スノーボール・アース現象に伴う極端な大量絶滅の繰り返しが生物進化を促した可能性は十分考えられる。スノーボール・アース現象においては、マイナス40℃の寒冷環境からプラス60℃の高温環

境へと非常に大きな環境変化が生じる。これは、生物進化において強い淘汰圧として働き、そのような環境変化でも生存可能な特定の生物種(または個体)のみが自然選択されるということが生じたかも知れない。

地球システムの極端な変動と大量絶滅の繰り返しが生物進化にどのような影響を及ぼすのか。原生代氷河期と生物進化との因果関係の解明は、今後の大きな課題である。

謝辞

査読者の方には有益なコメントをいただきましたことを感謝致します。

参考文献

- [1] Walker, J. C. G. et al., 1981: J. Geophys. Res. 86, 9776.
- [2] Kirschvink, J. L., 1992: in "The Proterozoic Biosphere" (Schopf, J. W. and Klein, C. eds.), Cambridge Univ. Press, 51.
- [3] Hoffman, P. F. et al., 1998: Science 281, 1342.
- [4] Kirschvink, J. L. et al., 2000: Proc. Nat. Acad. Sci. 97, 1400.
- [5] Kaufman, A. T., et al., 1997: Nat. Aca. Sci. Proc. 94, 6600.
- [6] Evans, D. A. et al., 1997: Nature 386, 262.
- [7] Ikeda, T. and Tajika, E., 1999: Geophys. Res. Lett. 26, 349.
- [8] 田近英一, 1999: 地球化学 33, 255.
- [9] Tajika, E., 2000: Proc. 33rd ISAS Lunar Planet. Sci. Symp., 131.
- [10] Berner, R. A., 1994: Am. J. Sci. 294, 56.
- [11] Hyde et al., 2000: Nature 405, 425.
- [12] Erwin, D. H., 2001: in "Paleobiology II" (Briggs, D. E. G. and Crowther P. R., eds.), Blackwell Science, 25.

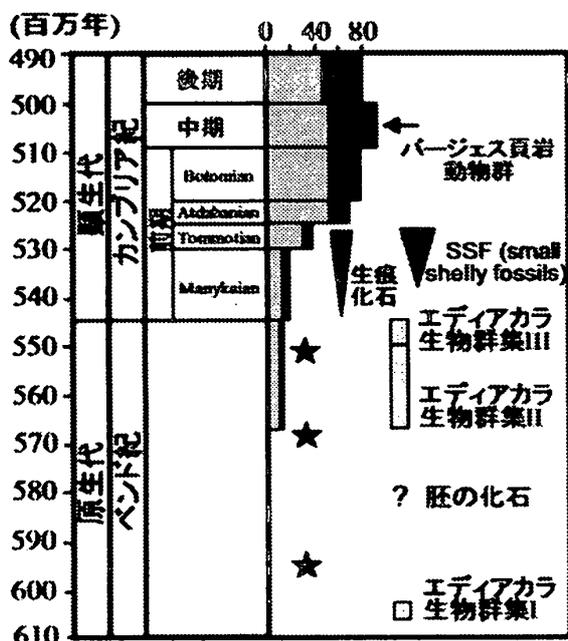


図4: 原生代末期の氷河期(★: 炭素同位体曲線から推定されたもので、約6億年前以外のものについては真偽は不明)とエディアカラ生物群集などの出現時期(エディアカラ生物群集Iはカナダのマッケンジー山脈でのみ知られている。胚化石の年代は良く決まっていない)との関係([12]に基づく)。灰色と黒色のボックスは海棲動物の目と綱のレベルでの多様性の変化を表す。