

2. 酸素濃度の増大とスノーボールアース・イベント

田 近 英 一*

1. はじめに

地球形成以来、地球環境がどのように変動してきたのかについては、まだよく分かっていないことが多い。とくに、地球史前半の冥王代から太古代にかけての時代（約46億年前～25億年前）は地質記録がごく限られており、当時の地球環境や生命活動の詳細はほとんど不明である。それに続く原生代（25億年前～約5億4300万年前）についても分からないことが多いものの、この時期にはいくつかの重要なイベントが生じたらしいことが明らかになってきた。その1つは地球大気の進化に関するもので、原生代初期に大気中の酸素濃度が増加したらしい証拠がいろいろと知られている。もう1つは地球の気候状態に関するもので、原生代の初期と後期に地球全体が凍結するような極端な寒冷化が生じたのではないかと考えられるようになってきた（スノーボールアース仮説）。この時代は生命進化においても重要で、原生代初期には真核生物が出現し、原生代末期には多細胞動物が現れた。実は、これら三者は密接な関係にあった可能性もある。以下では、こうした地球環境進化に関する最近の知見について述べる。

2. 地球史における気候変動

過去の地球がどのような気候状態にあったのかについて、さまざまな地質記録に基づいた研究が行われている（詳しくは、田近、2005を参照）。地球の過去の気候状態は、海洋や陸上における生物相、岩石の風化過程、海洋や湖における泥や砂の堆積過程などを通じて、主として海底や湖底の堆積物に記録される。堆積構造や堆積物構成鉱物の種類、鉱物粒子の化学組成や

同位体組成、生物化石や生痕化石などが重要な情報となる。こうしたさまざまな記録を読み解くことによって、過去における気候状態を推定することができる。

そうした研究の結果、少なくとも顕生代（約5億4200万年前～現在）の気候変動に関しては、大局的な描像が明らかになってきた。それによれば、地球の気候は温暖期と寒冷期とが1～2億年スケールで繰り返しており、現在は地球史の中でもとくに寒冷な時期にあたる。ここで、温暖期というのは大陸氷床が存在した証拠が確認されない時代のことで、中生代白亜紀の中頃（約1億年前）や新生代第三紀の初期（約5500万年前頃）などがとくに有名である。実際、こうした時代においては、動植物の化石や堆積物中の酸素同位体比などから、極域も温暖で赤道との南北温度勾配が小さかったことが分かっている。一方、寒冷期というのは氷河性堆積物として知られるドロップストーン（ice-rafted debris, 略して IRDs と呼ばれる）などが発見されている時代のことで、大陸氷床が存在していた、いわゆる氷河時代のことである。現在も新生代後期氷河時代に属する。氷河性堆積物はさまざまな時代で知られており、氷河時代は地球史を通じて繰り返されたことが分かっている（第1図）。

ところで、古地磁気学的手法を用いれば、氷河性堆積物が堆積した場所の当時の緯度（古緯度）を推定することができる。これと同時代の大陸配置の復元とを合わせれば、当時の地球上のどこに氷床が分布していたのかを推定することもできる。ところが、1980年代後半になって、今から約6億年前の氷河性堆積物が露出する南オーストラリアのエラティナ層の古緯度が赤道域であったことが確実となった。実は、こうした低緯度氷床の存在は、それ以前から指摘されてはいたものの、試料の熱変成や測定上の問題が指摘され、その結果は信用されていなかった。しかし、そのことが確

* 東京大学大学院理学系研究科。

© 2007 日本気象学会

実視されるようになり、原生代後期の気候状態がどのようなものであったのかが大きな謎としてクローズアップされるようになった。赤道域に（山岳氷河ではなく）大陸氷床が存在するというような事実は他の時代では全く知られておらず、通常とは異なる状況を想定する必要があった。

3. スノーボールアース・イベント

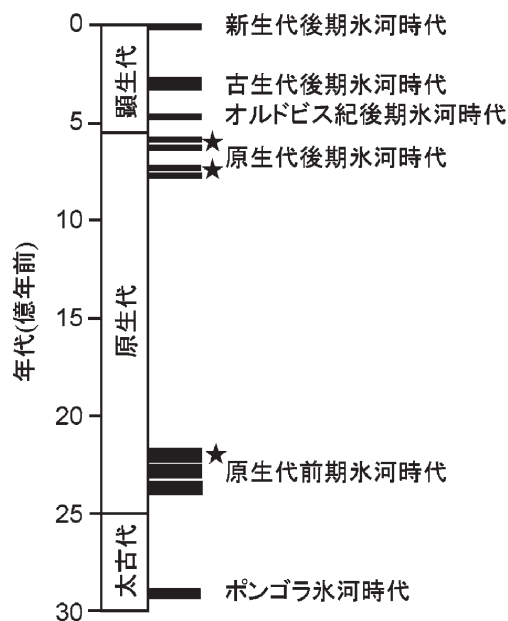
3.1 地球環境の安定性と全球凍結

地球が取り得る安定な気候状態は、エネルギーバランス気候モデルから得られる解の線形安定性解析によって調べられており、無氷床解、部分凍結解、全球凍結解の3種類の安定解が存在することが分かっている（第2図）。つまり、現在のように高緯度地方が雪氷で覆われている状態（部分凍結解）のほかに、まったく雪氷が存在しない温暖な状態も、地球全体が氷で覆われたきわめて寒冷な状態も、理論的には実現し得る。とくに、氷床が中緯度付近（30～20度）にまで拡大すると、氷床の持つ高い反射率（アルベド）のために日射が反射されてますます寒冷化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）が強く働くようになり、ついには全球凍結解に落ち込

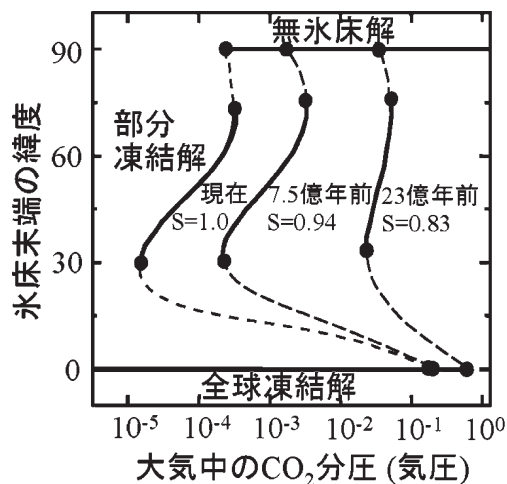
むことが示唆されている（例えば、Budyko, 1969; Sellers, 1969）。

このような理解は1960年代後半には得られていたにもかかわらず、1990年代初めまでは、地球は決して全球凍結解には陥ったことがなかったものと考えられてきた（前述のように、無氷床解は繰り返し生じたと考えられる）。その大きな理由は、地球が全球凍結解にあったことを示す地質学的証拠が存在しなかったことにある。むしろ、地球環境が長期間にわたって安定であることをいかに説明するかが大きな課題であった。そして、炭素循環システムによる気候の安定化メカニズム（ウォーカー・フィードバック）によって地球環境は温暖に維持されてきた、と考えられるようになった（例えば、Walker *et al.*, 1981; Tajika and Matsui, 1992）。

ところが、南オーストラリアで発見された低緯度氷床の証拠は、当時の地球が全球凍結していたことを意味するのではないかと考えられるようになった。これは、カリフォルニア工科大学の J. L. Kirschvink が唱えた説で、「スノーボールアース仮説」と呼ばれている（Kirschvink, 1992）。原生代後期の氷河性堆積物が分布するアフリカ南部（ナミビア）における氷河期直後の炭素同位体比の負異常の発見（Hoffman *et*



第1図 地球史における氷河時代。★印は全球凍結イベントが生じたと考えられている時期。



第2図 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解。Tajika (2003)に基づく。実線は安定解、波線は不安定解、黒丸は臨界点、Sは現在を1とした太陽光度を表す。

al., 1998) に至って、スノーボールアース仮説は一躍脚光を浴びるようになった。

3.2 スノーボールアース仮説

エネルギーバランス気候モデルの結果に基づいて全球凍結した地球の姿を考察すると、その高いアルベドによって全球平均気温は -50°C 程度となる。海洋も表層約1000 m 程度が完全に凍結する。全球凍結解は安定解の1つであるから、いったんこのような状態が実現すると、ここから脱出するのは容易ではない。日射量が大幅に増加すれば、全球凍結解は不安定になることが知られてはいるが (Budyko, 1969; Sellers, 1969), 太陽活動のそのような大きな変動は通常は期待できない。もう1つの可能性は、大気温室効果が強まることで、たとえば大気中の二酸化炭素レベルが0.1気圧のオーダーまで増加すれば、やはり全球凍結解は不安定となる (第2図参照; Caldeira and Kasting, 1992; Ikeda and Tajika, 1999)。通常は、そのような高い二酸化炭素濃度は実現不可能であるが、全球凍結状態の地球では火山ガスとして放出された二酸化炭素が地表の風化や生物の光合成活動によって消費されることがないため、火山活動が数百万年程度継続すれば十分な量の二酸化炭素が大気中に蓄積する。地球が全球凍結解に陥ったとしても、こうしたメカニズムによって脱出できると考えられることから、そのような現象が実際に生じたと考えることは、必ずしも非現実的ではない (Kirschvink, 1992)。

地球が全球凍結したとする直接的な根拠は、低緯度氷床の存在ということであった。しかしながら、原生代後期の氷河性堆積物には他にも不思議な特徴があり、それらすべてを説明するためにも、スノーボールアース仮説が有効である。

例えば、原生代後期の氷河性堆積物はキャップカーボネートと呼ばれる熱帯性の石灰岩 (炭酸塩岩) 層に覆われている。このことは、極域環境から熱帯環境へと気候が急激に変化したことを示唆するが、そのような例は他の時代ではみられない。スノーボールアース仮説によれば、地球が全球凍結から脱出するためには二酸化炭素による強い温室効果が必要であるが、その影響のため、全球融解直後の全球平均気温は 50°C にも達する。そのような高温環境においては、活発な水循環によって大陸は激しく風化浸食され、岩石から溶出された陽イオンが海洋へもたらされ、炭酸イオン種と反応して炭酸塩鉱物が急速に沈澱したであろうことが推察される (Hoffman *et al.*, 1998; Tajika, 2000)。

このほかにも、原生代後期の氷河性堆積物に伴って、それまで10億年以上も形成されなかった縞状鉄鉱床が突然形成されているという謎がある。縞状鉄鉱床の形成には、二価の鉄イオンが海水中に大量に溶存していた必要があるが、通常鉄イオンは酸素と結合して沈澱してしまうため、海水中に蓄積することができない。ところが、海洋表面が凍結して大気と海水のガス交換ができなくなれば、海洋深層水は貧酸素環境となり、海底熱水系からもたらされた鉄イオンが蓄積できる。この鉄イオンが全球融解直後に急速に酸化沈澱したと考えれば、縞状鉄鉱床の形成を説明することができる。

さらに、原生代後期の氷河性堆積物直上では、海水の炭素同位体比が -6% という値にまで低下していることが明らかになった (Hoffman *et al.*, 1998)。この値はマントル起源の炭素同位体比の値として知られているもので、火山ガスとして放出された二酸化炭素が、光合成反応による炭素同位体の分別効果 (同位体比を変える過程) を全く受けていないこと、すなわち生物生産活動が完全に停止していたことを示唆する。これは、有光層を含む海洋表層1000 m が数百万年にわたって完全に凍結したとすれば、当然の結果であるように思われる (むしろ、そのような状況にもかかわらず、光合成藻類が絶滅せずに生き延びたという事実の方が問題となっている)。

このように、原生代後期の氷河性堆積物に固有の特徴は、スノーボールアース仮説によって一通り説明することが可能である。低緯度氷床の解釈として、当時の地球の自転軸傾斜が 54° 以上もあった (現在は約 23°) とする説もあるが、それでは他の特徴を説明することができない。また、低緯度の海洋域が凍結しない解もあり得るという大気大循環モデルの結果を根拠に、全球凍結といっても地球全体が凍結したわけではなかったのではないかとする説もある。しかし、それは光合成藻類などが絶滅しなかったことを説明するのに都合が良くても、キャップカーボネートや縞状鉄鉱床の形成を説明することが困難である。こうしたことから、スノーボールアース仮説は、多くの議論を呼んでいるものの、基本的には支持されるようになった。

地球が全球凍結に陥った原因はよく分かっていない。大気温室効果が急激に低下したことがその原因であることはほぼ間違いないが、温室効果を担っていたのが二酸化炭素 (Hoffman *et al.*, 1998; Tajika, 2003, 2004) なのかメタン (Schrag *et al.*, 2002; Pav-

lov and Kasting, 2002) なのかについてはまだよく分からない。何よりも、顕生代には1度も全球凍結に陥らなかったのに、なぜ原生代に繰り返し全球凍結に陥ったのかは大きな謎である(第1図参照)。顕生代と原生代における境界条件の大きな違いの1つに太陽光度がある。恒星進化論によれば、太陽光度は時間的に増大してきたと考えられ、原生代には現在よりも17~6%程度暗かったと推定されている(第2図)。このことは、原生代の地球が全球凍結に陥りやすかった1つの要因であるようにみえる。ところが、逆に、顕生代に入ってから陸上高等植物が出現した結果、陸面の風化効率が著しく高まり、炭素循環システムにおける二酸化炭素濃度(地表平均温度)の平衡値が大きく低下したという要素もある。両者の効果はほぼキャンセルされるため、暗い太陽という要因は、実は全球凍結とは無関係であることが示される(Tajika, 2003)。ほかに、赤道付近に超大陸が形成され、それが分裂したということが考えられる。二酸化炭素濃度の極端な低下には、赤道付近での風化作用が全球凍結直前まで生じている必要があり、そのためには赤道付近に広い陸地の存在が必要である。少なくとも原生代後期にはロディニア超大陸が赤道付近に存在していたことが知られており、その分裂が二酸化炭素濃度低下の重要な要因になった可能性がある(Schrag *et al.*, 2002; Tajika, 2003)。

4. 全球凍結と酸素増大の関連性

4.1 原生代初期の氷河時代

実は、原生代初期の24~22億年前も、汎世界的な氷河時代であったことが知られている。当時の氷河性堆積物は、北米、北欧、アフリカ南部、オーストラリアなどに分布している。このうち、南アフリカ共和国に露出するトランスバール累層群において、原生代初期にも低緯度氷床が存在した証拠が発見された。したがって、24~22億年前にもスノーボールアース・イベントが生じたと考えられるようになった(Kirschvink *et al.*, 2000)。

大変興味深いことに、この氷河時代直後には、地球史上最初でかつ世界最大のマンガン鉱床(カラハリ・マンガン鉱床)が形成されている。これは、縞状鉄鉱床の形成と同様、全球凍結状態の海洋深層水中に蓄積したマンガンが、全球融解後に酸化・沈殿したものだと考えられる(カラハリ・マンガン鉱床には鉄鉱床も付随している)。マンガンの酸化には酸素分子が絶対

に必要であるため、これは大気中の酸素濃度が増大した最初の証拠であるとみなすこともできる。すなわち、スノーボールアース・イベント直後に酸素濃度が急増した可能性がある。光合成を行うシアノバクテリアが、全球凍結中に深層水に蓄積したリン酸などの栄養塩を利用して大繁殖したために、酸素濃度が増加したのではないかと考えられている(Kirschvink *et al.*, 2000)。

さらに、原生代初期のスノーボールアース・イベントの原因そのものも、酸素濃度の増加によるという可能性も提唱されている。太古代の大気中には高濃度(数百ppm)のメタンが存在しており、地球はメタンの温室効果によって温暖な気候状態にあった可能性がある(Kasting *et al.*, 2001; Pavlov and Kasting, 2002; Pavlov *et al.*, 2003)。光合成生物(シアノバクテリア)の誕生によって大気中に酸素が放出されるようになると、メタンが酸化されて大気の温室効果が急激に奪われる、というイベントが生じるはずである。まさにそのようなことが、原生代初期に生じた結果、地球は全球凍結に陥ったのではないかと考えられる。

4.2 グローバルイベントである証拠

原生代初期には世界各地の地層を対比するための生物化石がほとんど産出せず、絶対年代も地層対比ができるほど細かく分かっていない。その結果、スノーボールアース・イベントや酸素濃度の増加イベントは全球規模の現象であるはずにもかかわらず、こうしたシナリオはトランスバール累層群でのみ議論されている。さらに、この時期に形成されたマンガン鉱床は、なぜか南アフリカ共和国だけでしか知られていない。

そこで、我々は同時代の地質記録が最も連続的に露出しているカナダのヒューロニアン累層群の調査を行っている。気候変動と酸化還元環境の変化についての研究を行っている。ヒューロニアン累層群には、大規模な氷河性堆積物(ダイアミクタイトと呼ばれる堆積物)が3層準存在することが知られている。このうち最も若い氷河性堆積物であるゴウガンダ層付近で酸化還元環境が変化したことが示唆されている。そこで、オンタリオ州コバルト地域においてゴウガンダ層の連続的な掘削コア試料を入手し、従来よりも高い解像度で元素分析等を行った。

その結果、ゴウガンダ層最上位のダイアミクタイト直上に、鉄含有量の増加に続いてマンガン含有量の増加がみられることを発見した。このようなマンガンの

濃集は、これまで調べた範囲では、ヒューロニアン累層群においてゴウガンダ層直上でしかみられない（第3図）。ここでみられるマンガン含有量は最大でも1.7重量%程度に過ぎないが、バックグラウンド・レベルの約60倍も濃集している。しかも、濃集層は400 mにもわたり、単位面積当たりのマンガン堆積総量は、カラハリ・マンガン鉱床の20%にも相当する。

そこでヒューロニアン累層群とトランスバール累層群を対比すると、まずゴウガンダ層のマンガン濃集層の直下に氷河性のダイアミクタイトがあるのに対し、カラハリ・マンガン鉱床を含むホタゼル層の直下にもマクガニン・ダイアミクタイト層と呼ばれる氷河性のダイアミクタイトが堆積している。またゴウガンダ層の上位にはロレイン層の赤色砂岩があり、ホタゼル層の上位にはマペディ層の赤色砂岩がある。これらを比較すると、氷河性堆積物の上位に鉄・マンガンが濃集し、その上位には赤色砂岩が形成されていることになり、層序的な類似性はきわめて高い。

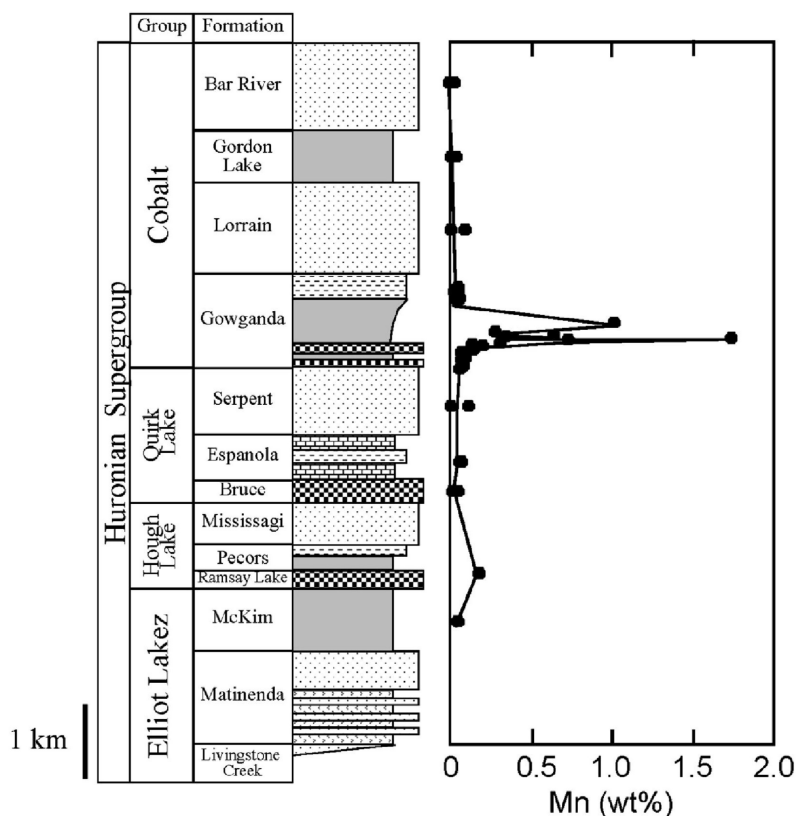
一方、トランスバール累層群ホタゼル層の直下に存在するオンゲルク洪水玄武岩からは 22.22 ± 0.13 億年前という年代が得られている。オンゲルク洪水玄武岩は氷河性堆積物の堆積中に噴出したものであり、ホタゼル層はその直後に形成されたと考えられる。一方、ヒューロニアン累層群に貫入するニピシング・ダイアベースと呼ばれる火山岩からは 22.19 ± 0.035 億年前という年代が得られており、ゴウガンダ層の堆積はこれ以前であることが分かっている。最近、ニピシング・ダイアベースの貫入時にゴウガンダ層を形成する堆積物はまだ未固結であった可能性が指摘された。したがって、ゴウガンダ層の堆積年代はほぼ 22.19 ± 0.035 億年前と考えて良い。これ

らのことから、ゴウガンダ層とマクガニン・ダイアミクタイト層は誤差の範囲でほぼ同時期に形成されたと考えることができる。

これらのことを総合すると、ヒューロニアン累層群のゴウガンダ層はトランスバール累層群のマクガニン・ダイアミクタイト層と同時期の堆積物である可能性が高く、我々の発見したマンガンの濃集は、このときの寒冷化（全球凍結）と酸素濃度の増大がグローバルイベントであったことを示す重要な証拠とみなすことができる。

4.3 硫黄同位体の質量非依存性分別効果

最近、約24億年前よりも古い堆積岩から、質量に依存した通常の変化からは大きくはずれる硫黄同位体の挙動（質量非依存性分別効果；mass independent fractionation, 略してMIFと呼ばれる）が発見され、注目を集めている（Farquhar *et al.*, 2000）。このような挙動は、20億年前以降には全くみられない。



第3図 ヒューロニアン累層群（カナダ・オンタリオ州）にみられるマンガン含有量（重量%：横軸）の鉛直プロファイル。最も若い時代の氷河性堆積物であるゴウガンダ層においてのみ、マンガンの濃集がみられる。

MIFが生じる原因はよく分かっていないが、おそらく大気上層における光化学反応によるものだと考えられている (Farquhar *et al.*, 2000). 現在はオゾン層によって太陽紫外線が吸収される結果、MIFがみられない。すなわち、堆積岩の記録からMIFがみえなくなるタイミングは、大気中の酸素濃度が増加してオゾン層が形成されたことを反映している可能性がある (Farquhar *et al.*, 2000). 硫黄同位体のMIFは、実際には、大気中に還元的な硫黄化合物が存在することを反映しており、大気中の酸素レベルが 10^{-5} PAL (present atmospheric level; 現在の濃度を1とした相対値) を境に、たとえ大気上層でMIFが生じたとしても海底堆積物には記録されなくなる可能性も考えられる (Pavlov and Kasting, 2002). 紫外線吸収能という観点から見たオゾン層の成立条件は酸素レベルで0.01PALと推定されており、24~22億年前にはすでに実現していたと考えられている (Kasting, 1987).

地層に記録されているさまざまな酸化還元指標が反映する酸素レベルはそれぞれ異なるはずであるから、複数の指標がどのようなタイミングで変化したのかを連続した地層において明らかにすることは重要である。そこで、我々は、ヒューロニアン累層群を通じて硫黄同位体のMIFがどのように変化したのかについても調べている。その結果、実はヒューロニアン累層群においては顕著なMIFはみられないことが明らかになった。唯一、ヒューロニアン累層群最下部のリビングストーン層に取り込まれている礫岩中の硫化物にのみ、 $\Delta^{33}\text{S} = -1.7 \sim +3.6\%$ という明らかなMIFの証拠がみられた。このことは、この硫化物の形成時には大気中の酸素濃度は非常に低かったが、ヒューロニアン累層群が形成されたごく初期にはすでに現在の 10^{-5} 程度以上になっていたことを示唆している。

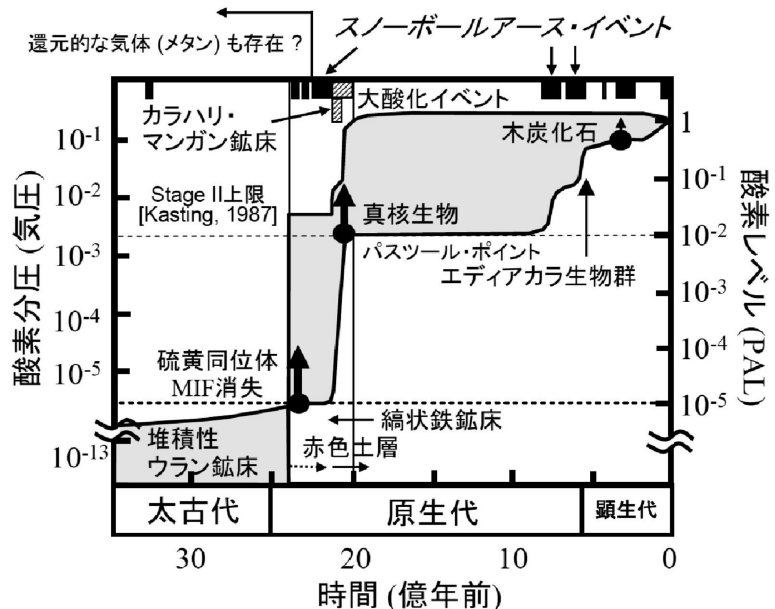
これらの結果を総合すると、大気中の酸素濃度の増加は第4図のようなものであったのではないかと考えられる。

5. おわりに

興味深いことに、原生代初期の氷河時代終了後まもない約21億年前の地層から、最古の真核生物の化石 (*Grypania spiralis*) が発見されている。真核生物は、細胞膜を補強するステロールのような生体化合物を合成するために酸素分子を必要とする。さらに、細胞内のミトコンドリアによって酸素呼吸を行なうために、周囲の酸素濃度が0.01PALよりも高い必要がある。このことは、原生代初期の氷河時代後の酸素濃度の増加が真核生物の誕生につながったことを示唆する。

原生代後期の最後のスノーボールアース・イベント (約6億年前) の直後には、エディアカラ生物群として知られる大型生物化石の出現が知られている。これは最古の多細胞動物ではないかとも考えられているが、こうした生物の大型化にも酸素濃度の増加が重要であったと考えられており、スノーボールアース・イベントとの関連が議論されている。

このように、地球環境進化と生命進化とは強く結び



第4図 地球史における大気中の酸素濃度の増大。右側の縦軸は現在の酸素濃度を1とした相対値 (PAL=present atmospheric level)。

ついている可能性がある。原生代におけるスノーボールアース・イベントは、地球と生命の共進化に関する事例としても大変興味深いといえる。生命のほとんどが絶滅に至るであろう、この極限的な気候変動の実態解明には、従来の学問分野の枠を超えた多面的・総合的な研究が必要である。気象学・気候学、地質学、古生物学、地球化学などの諸分野の協力のもと、今後の研究の進展が大いに期待される。

参 考 文 献

- Budyko, M. I., 1969 : The effect of solar radiation variations on the climate of the earth, *Tellus*, **21**, 611-619.
- Caldeira, K. and J. F. Kasting, 1992 : Susceptibility of the early Earth to irreversible glaciation caused by carbon dioxide clouds, *Nature*, **359**, 226-228.
- Farkuhar, J., J. Bao and M. H. Thiemans, 2001 : Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle, *Science*, **289**, 756-758.
- Hoffman, P. F., A. J. Kaufman, G. P. Halverson and D. P. Schrag, 1998 : A neoproterozoic snowball Earth, *Science*, **281**, 1342-1346.
- Ikeda, T. and E. Tajika, 1999 : A study of the energy balance climate model with CO₂-dependent outgoing radiation : Implication for the glaciation during the Cenozoic, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 349-352.
- Kasting, J. F., 1987 : Theoretical constraints on oxygen and carbon dioxide concentrations in the precambrian atmosphere, *Precambrian Res.*, **34**, 205-229.
- Kasting, J. F., A. A. Pavlov and J. L. Siefert, 2001 : A coupled ecosystem-climate model for predicting the methane concentration in the Archean atmosphere, *Origins of Life and Evol. of the Biosph.*, **31**, 271-285.
- Kirschvink, J. L., 1992 : Late Proterozoic low-latitude global glaciation : The Snowball Earth, *The Proterozoic Biosphere*, Schopf, J. W. and C. Klein, Eds., Cambridge Univ. Press, 51-52.
- Kirschvink, J. L., E. J. Gaidos, L. E. Bertani, N. J. Beukes, J. Gutzmer, L. N. Maepa and R. E. Steinberger, 2000 : Paleoproterozoic snowball Earth : Extreme climatic and geochemical global change and its biological consequences, *Proc. Nat. Sci. Acad.*, **97**, 1400-1405.
- Pavlov, A. A. and J. F. Kasting, 2002 : Mass-independent fractionation of sulfur isotopes in Archean sediments : strong evidence for an anoxic Archean atmosphere, *Astrobiology*, **2**, 27-41.
- Pavlov, A. A., M. T. Hurtgen, J. F. Kasting and M. A. Arthur, 2003 : Methane-rich Proterozoic atmosphere? *Geology*, **31**, 87-90.
- Schrag, D. P., R. A. Berner, P. F. Hoffman and G. P. Halverson, 2002 : On the initiation of a snowball Earth, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **3** (6), doi : 10.1029/2001GC000219.
- Sellers, W. D., 1969 : A global climatic model based on the energy balance of the earth-atmosphere system, *J. Appl. Meteorol.*, **8**, 392-400.
- Tajika, E., 2000 : Physical and geochemical conditions for Neoproterozoic Snowball Earth, *Proc. ISAS Lunar Planet. Sci. Symp.*, **33**, 131-134.
- Tajika, E., 2003 : Faint young Sun and the carbon cycle : Implication for the Proterozoic global glaciations, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **214**, 443-453.
- Tajika, E., 2004 : Analysis of carbon cycle system during the Neoproterozoic : Implication for snowball Earth events, *The Extreme Proterozoic : Geology, Geochemistry, and Climate*, Jenkins, G., M. McMenamin, L. Sohl and C. McKay, Eds., *Geophys. Monogr.*, **146**, Amer. Geophys. Union, 45-54.
- 田近英一, 2006 : 地球史における気候変動, 気象ハンドブック第3版 (新田 尚ほか編), 朝倉書店, 1010pp.
- Tajika, E. and T. Matsui, 1992 : Evolution of terrestrial proto-CO₂-atmosphere coupled with thermal history of the Earth, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **113**, 251-266.
- Walker, J. C. G., P. B. Hays and J. F. Kasting, 1981 : A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature, *J. Geophys. Res.*, **86**, 9776-9782.