

地球環境の地史的変遷

秋山 雅彦*

Environmental change through Earth history

Masahiko Akiyama

Abstract

Earth's environment has been believed to be relatively constant during Archean time, although the solar luminosity has increased by 25% since the formation of the Solar system. This constancy was explained by the greenhouse effect from enhanced CO₂ during geological history. The increase of the luminosity is based on the constancy of the universal gravitation constant G since the formation of the universe. On the contrary, if G increases as the universe evolves, this could also explain the constancy of the Archean Earth's environment. In contrast to the constant environment during geological history, the snowball Earth hypothesis which was recently proposed by Hoffman *et al.* (1998) explained the presence of the thick cap carbonate directly on the glacial deposits in the Congo Craton in northern Namibia. More detailed studies in paleoclimatology and Precambrian geology are needed to test which hypothesis is superior.

1. はじめに

この小論では、地球環境の地史的変遷の総括をする余裕はないので、「地球環境の地史的変遷」についての最近の情報をもとに、それらの意義と問題点に関して述べてみたい。ここに述べる内容は、1999年10月23日に岡山大学臨海実験所で開催された化石研究会第113回例会での講演の要旨である。

2. 地球と火星の生命発展史

地球上での最古の堆積岩はグリーンランドのイスア地域に分布し、その年代は38億年前とされている。イスアの堆積岩からはイースト菌様の微化石の発見という報告 (Pflug and Jaeschke-Boyer, 1979) はなされたものの、それは液体包有物であることが分かり (Bridgwater *et al.*, 1981)、現在でも微化石が存在する証拠は見つかっていない。しかし、同位体組成の分析値からその堆積岩に含まれている炭素は生物に起源を持つとされた (Schidlowski, 1988)。

最近になって、グリーンランドのAkilia島の鉄鉱層のアパタイトに含まれる炭素の同位体組成が明らかに生物起源であることを示すという証拠が発見された (Mojzsis *et al.*, 1996)。その生成年代は38.5億年を示していることから、生命の起源はそれ以前にさかのぼることは確実で、おそらく40億年前ということが出来る。

ちょうどその論文と相前後して、南極のアランヒル

ズで採取された火星由来の隕石中に微化石の証拠が見つかったという報告 (McKay *et al.*, 1996) がなされ、大きな話題となった。その研究は隕石の研究としてはきわめて厳密な検討が加えられてはいるものの、生命の証拠とすることは適当ではないと、私は考えている (秋山, 1994)。

ところで、Akilia Islandのアパタイトの年代については疑問も出されている。Sano *et al.* (1999) はアパタイトの生成年代をU-PbとPb-Pbによって約16億年としている。この年代値はイスア地域の片麻岩中の黒雲母のPb-Sr年代が16-17億年を示していることから、アパタイトはこの時期の変成作用によって生成した可能性があるとされている。したがって、今後の検討が待たれるところである。

地球上の最古の微化石の証拠は西オーストラリアのPilbara地塊に分布する、35億年前のWarrawoona層群のApex Basaltに挟在するチャート中の構造物にまで遡ることができる (Schopf, 1993)。炭素同位対組成から生物起源であるとされるその構造物は、その形態からシアノバクテリアとされている。

最古の真核生物の化石は北アメリカの地域に分布する累層から発見された藻類の化石 (Han and Runnegar, 1992) で、21億年前とされていた。最近になって、先カンブリア時代の地層からバイオマーカーが検出され、cholestoneとC28-30 steranesの存在から27億年前にはす

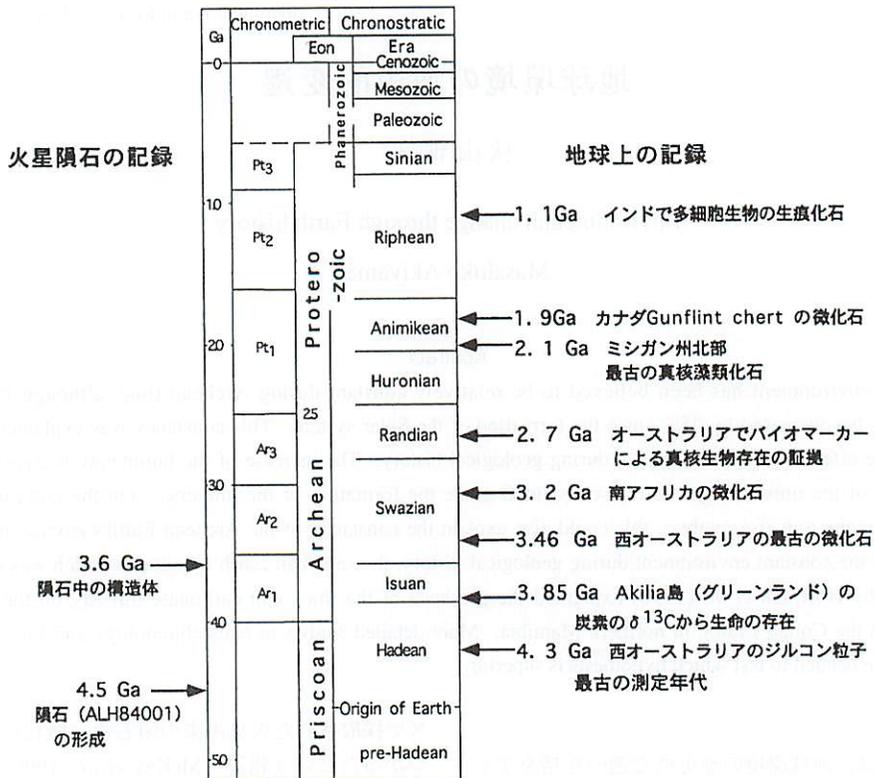


図1. 地球上における生物進化のイベントと火星隕石

で真核生物が地球上に出現していたことが立証されている (Brocks *et al.*, 1999). 炭化水素のように安定性の高い化学化石の研究は、先カンブリア時代の生物相の検討に有力な情報を提供してくれるものと期待される。

地球上の生命と火星の生命とされた隕石に関する情報とを地質年代表にプロットして比較すると、図1のようになる。

3. 大気組成の変遷史

地球環境を規定している要因の一つに地球大気組成がある。地球を取り巻く大気圏は地球の創生期に起きた地球内部からの脱ガスによって生成され、当初のガス組成は $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ であったと考えられている。現在の地球大気組成が $\text{N}_2\text{-O}_2$ から構成されていることは、大きく異なっていた。創世期の CO_2 の大部分は、地球史を通して、地殻を構成する堆積物中に炭酸塩岩や有機炭素として固定されてきたと考えられている。Ronov (1983) が提示した堆積性炭素量の時代的変遷をもとに、それらの炭素が大気中の CO_2 に由来したとして CO_2 の量に換算すると、その総量28.5気圧となる。

この値は地球の兄弟星である金星の大気中を構成する CO_2 の圧力に相当する (秋山, 1994)。

大量の水蒸気は地球表層の温度の低下にともなって、水となって海洋を形成したとして説明されている。金星は太陽に近いため、脱ガスによって生成した水蒸気は強い太陽放射によって光分解を起こしたため、金星の重力圏内に留まらず、海洋がつくられることはなかった。金星の CO_2 は地球の場合と異なり、海洋を通して金星表面に固定することはなかったことから、現在の金星大気中の CO_2 量は初期の値を保持していると見ることができる。したがって、地球初期の CO_2 量の28.5気圧という値は妥当な推定ということができよう。このように考えてくると、 CO_2 は地球史を通して減少してきたという歴史をもつことは確実であろう。

地球大気が金星の大気と大きく異なるもう一つのことは、金星の大気にはほとんど存在しない O_2 分子が地球大気の場合には、その21%を占めるという特徴である。

地球上における O_2 分子の出現はシアノバクテリアによる光合成の結果であると考えられる。①25億年以降の海洋に大量に形成された縞状鉄鉱層、②23億年以降

に限定される赤色層の存在, ③24億年以前は還元状態であるものの20億年以降の堆積物に高度に酸化した paleosol が存在すること, ④25億年以前には河川成の礫岩層の礫として存在するウラニナイト (UO₂) がそれ以降の地層には認められないことなどの地質学的証拠から, 25億年以降, 地球上がO₂によって酸化状態に変化してきたことが主張されてきている (Holland, 1999).

このようなO₂分子の増加が生物に大きな変化をもたらしたといえる. 生命にとっては有毒であり, シアノバクテリアの廃棄物であった酸素分子を生命維持のためのエネルギー代謝に生物が利用することになった. このような効果的な酸素呼吸の機能の獲得は生物進化にとっての革命的な進化であった, ということができよう.

まさに生命によって変革された地球環境によって, 生命は新しい変革を余儀なくされ, それによって飛躍的な進化を遂げるという, 生物と地球環境の相互作用をここに見ることができる.

4. 地球表層の温度条件を規定する要因

第四紀の氷期と間氷期のサイクルを規定している要因としてミランコビッチサイクルはよく知られている. このサイクルは太陽と地球との位置関係に起因することから, 第四紀以前の地球史にも気温を規定する要因として考えられる. しかし, それ以前の地質時代では明確にとらえられていない. その理由は地質時代を遡るにつれて, 時間解析の分解能が落ちてくるためと考えられがちであるが, 実は地球の気候条件を規定する要因にはミランコビッチサイクルを大きく上回る条件が存在する. それらは太陽定数の変化, 大気温室効果ガスの濃度, 海陸分布などの古地理的な条件, 海洋循環などである.

ここでは太陽定数の変化と大気温室効果ガスの濃度の2つの要因を取り上げて論じてみたい.

1) 太陽定数

太陽系生成論によれば, 太陽が星の進化における主系列に入ってから以降, 表1に示されているように, 太陽定数は42.5億年前の1,039W/m²から地質年代の経過とともに増加し, 現在の1,367W/m²の値になった, とされている (Hart, 1978).

もしこのような変遷が正しいとすれば, 42.5億年前の太陽放射は現在の76%という値であったことになる. 地球環境は現在とは全く異なり, 海洋は全面結氷してしまったことになる. しかし, 少なくとも38億年前の地球には海洋が存在し, イスラ地域に分布する堆積岩はその海域に堆積したはずである.

Owen *et al.* (1979) は, 大気中に含まれるCO₂含有

表1. 地球大気の進化と地球表面温度の推定値 (Owen *et al.*, 1979による)

億年前	太陽定数 (ワット/m ²)	二酸化炭素の 圧力(バール)	温 度 (°C)
42.5	1,039	0.31	37
35	1,096	0.07	23
30	1,133	0.033	20
25	1,171	0.018	19
20	1,209	0.0086	17
15	1,247	0.0026	15
10	1,284	0.00065	13
0.5	1,322	0.00032	14
現在	1,360	0.00032	17

量の変化からこの矛盾を解決しようと試みた. そして, 大気中のCO₂分圧を42.5億年前の0.31バールから現在の値に変化したことで, 地球環境の恒常性を説明した (表1). 地球史を通じて堆積岩中に固定されてきた炭酸塩岩の量的な変遷 (Ronov, 1983) からはOwen *et al.* (1979) の推定は正しいとは思えない. 私の主張する「断続脱ガス説」(Akiyama, 1985) に基づく大気・海洋の発展史とは大きく矛盾することになる.

では, 太陽定数が地質年代の経過とともに増大してきたとする太陽系生成論は, はたして正しいのだろうか. もし, 重力定数Gの値が宇宙の発展とともに変化してきたとすれば, 太陽定数の変化は違ったものになる可能性がある. P. A. M. Diracは彼の宇宙論の中で, “宇宙年齢とともに重力定数Gがちいさくなっている”としている (牛来, 1990). そのようなGの変化はあまりにも小さく, 現在の観測から知ることは不可能であろう. したがって, 地球環境の恒常性の問題を解くことによって, それへの解答が得られる可能性がある, と考えている.

2) 温室効果ガス濃度

温室効果ガスとして, CO₂, H₂O, CH₄, O₃, N₂O, フロンなどのガスをあげることができるが, ヒトの社会活動に地球環境に大きく関わってきたガスはCO₂である. CO₂の大気中の濃度は南極の氷床中のボーリングコアから得られる気泡の分析から, 第三間氷期まで解析可能である. ところがそれ以前の地質学的的地質学的情報を得ることはきわめて困難である.

先に述べた太陽定数の変遷史の項では, 地球表層の恒常性を説明するために二酸化炭素の減少の歴史として説明されることを述べてきた. 大気中のCO₂濃度は火山による供給, 海洋への吸収, 炭酸塩岩または有機炭素として堆積物への固定などによって規定される.

温室効果による気温の上昇は, 氷床の後退によるア

ルベドの減少によってさらに拍車がかけて、暴走的な気温上昇をもたらす可能性が、また逆に、気温の下降は暴走的な気温降下に結びつく可能性が予測される。

Hoffman *et al.* (1998) は原生代前期 (2.4~2.2Ga) と原生代後期 (0.82~0.55Ga) に地球をおそった氷河期には雪線緯度が30度付近まで下がり、暴走的な寒冷化によって全地球の凍結が起きたとして、Snowball Earthとして論陣をはっている。そして、その原因として二酸化炭素分圧の低下を挙げている。

田近 (1999) はHoffmanらのSnowball Earth説をうけて、凍結現象における物理化学過程と時間スケールのモデル計算を行っている。それによると、全球凍結は次の4つの段階を経ている、とするモデルを提出している。

①暴走的寒冷化ステージ

CO₂放出率が1/10以下になると、CO₂濃度は10~20ppm、数10万年程度で臨界点に達し、赤道域で-30℃に達する。

②全球凍結ステージ

200~300万年程度の期間で、この間に火成活動によるCO₂の蓄積が起きる。

③氷床・凍結海洋融解ステージ

CO₂分圧臨界値 (0.1気圧程度) に達すると、赤道域で氷床は融解し始め、海洋は数千年~数万年程度で融解する。

④回復ステージ

CO₂濃度0.1気圧のために、地球は一転して高温環境 (~60℃) になる。海水のpHは低く (5~7)、陸上風化により海水のアルカリ度は急上昇し、CO₂は海洋にとけ込む。そして、大量の炭酸塩岩が形成され、大気中のCO₂濃度は1万年程度の期間で減少する。原生代末期の氷河堆積物の直上にあるCap carbonateとよばれる厚い石灰岩はこのステージの堆積物である。

ナミビア北部に発達するOtavi層群は氷河堆積物の上に層厚400mにもおよぶMaieberg Cap Carbonateが重なっている。このCap Carbonateの連続的な層準にわたるδ¹³C分析の結果、その値が氷河堆積物直上の-5‰から順次上昇し、Cap Carbonateの上位の地層では0‰の値をとることを示した (Hoffman *et al.*, 1998)。このようなδ¹³Cの上昇は生物生産活動の復活に伴う結果として、Snowball Earth説からその説明が与えられている。

吉岡ほか (1999) もナミビアのRasthof Cap Carbonateのδ¹³C分析から、Hoffman *et al.* (1998)と同様な結果を提出している。さらにδ¹⁸Oの分析からその値が-5から+5‰へと変化している事実を示し、そのことが氷床の後退に伴う海水温の上昇によ

って説明されるとしている。

5. おわりに

すでに述べたように、はたして万有引力定数Gの値が一定の値をとるのか、それとも宇宙年代の経過とともに変化しているのかといった観測不可能な微小変化も、地球史の変遷という長い時間スケールによって実証される可能性がある。また、全球凍結現象のシナリオが正しいのか、厚いCap carbonateの堆積がそれに代わるシナリオで説明されるのか、その解答は地質学に課せられた使命であろう。

遠くない将来、地質学とその関連科学である地球物理学・地球化学との協力によって上記の課題に対する解答が出されることを期待している。

謝 辞

第113回化石研究会例会で発表の機会を与えてくださった、シンポジウム世話人の岡山大学の白井浩子氏に、また、この小論を読んで貴重な意見を寄せて下さったOttawa大学の児玉秀臣氏と英文要旨の校閲の労をとって下さったSheffield大学のM. A. Whyte博士に厚く御礼申し上げます。

文 献

- Akiyama, M. (1985) A geological consideration of the primordial ocean and atmosphere of the earth. *Modern Geology*, **9**, 301-307.
- 秋山雅彦 (1994) 炭素の地球化学的サイクルと大気・海洋の起源. *地球科学*, **28**, 279-283.
- Bridgwater, D., Allaart, J. H., Schopf, J. W., Klein, C., Water, M. R., Barghoorn, E. S., Strother, P., Knoll, A. H. and Gorman, B. E. (1981) Microfossil-like objects from the Archaean of Greenland: a cautionary note. *Nature*, **289**, 51-53.
- Brocks, J. J., Logan, G. A., Buick, R. and Summons, R. E. (1999) Archean molecular fossils and the early rise of eukaryotes. *Science*, **285**, 1033-1036.
- 牛来正夫 (1990) 大陸地殻進化論序説. 共立出版.
- Han, Tsu-Ming and Runnegar, B. (1992) Megascopic eukaryotic algae from the 2.1-billion-year-old Nagaunee Iron-formation, Michigan. *Science*, **257**, 232-235.
- Hart, M. H. (1978) Evolution of the atmosphere of the Earth. *Icarus*, **33**, 23-39.
- Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P. and Schrag, D. F. (1998) A Neoproterozoic snowball Earth. *Science*, **281**, 1342-1346.
- Holland, H. D. (1999) When did the Earth's atmosphere become oxic? A Reply. *The Geochemical News* #100,

- McKay, D. S., Gibson, E. K. Jr., Thomas-Keprta, K. L., Vali, H., Romanek, C.S., Clemett, S. J., Chillier, X. D. F., Maechling, C. R. and Zare, R. N. (1996) Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, **273**, 924-930.
- Mojzsis, S. J., Arrhenius, G., McKeegan, K. D., Harrison, T. M., Nutman, A.P. and Friend, C. R. L. (1996) Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago. *Nature*, **384**, 55-59.
- Owen, T., Cess, R. D. and Ramanathae, V. (1979) Enhanced CO₂ greenhouse to compensate for reduced solar luminosity of early Earth. *Nature*, **277**, 640-642.
- Pflug, H. and Jaeschke-Boyer, H. (1979) Combined structure and chemical analysis of 3,800-Myr-old microfossils. *Nature*, **280**, 483-486.
- Ronov, A. B. (1983) *The Earth's Sedimentary Shell*. Amer. Geol. Institute, Virginia.
- Sano, Y., Terada, K., Takahashi, Y. and Nutman, A. P. (1999) Origin of life from apatite dating? *Nature*, **400**,

- Schidlowski, M. (1988) A 3,800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks. *Nature*, **333**, 313-318.
- Schopf, J.W. (1993) Microfossils of the early Archean Apex Chert: New evidence of the antiquity of life. *Science*, **260**, 640-645.
- 田近英一 (1999) 全球凍結現象における物理化学過程と時間スケール. 日本地質学会第106年学術大会 (名古屋) 講演要旨, O-290.
- 吉岡秀佳・東條文治・川上伸一・岡庭輝幸・高野雅夫 (1999) 原生代後期におけるSnowball Earthの急激な温暖化について. 日本地質学会第106年学術大会 (名古屋) 講演要旨, O-289.

本論文を投稿後に、岩波書店の「科学 (2000年5月号)」で「7億年前に地球は全球凍結状態におちいったか」という小特集が出版された。田近英一氏および吉岡秀佳氏の論文をその中に見ることができる。