

特集「アストロバイオロジー」

初期地球環境下での微生物進化

掛川 武¹

1. 最初の生命体

地球は生命体を含んだ有機的惑星である。太陽系の中で地球のみが有機的惑星なのかという問題は、「アストロバイオロジー」が取り組む最大の課題である。火星やユーロパなどに生命体が存在する(していた)可能性が指摘されてきている。そこでの生命体は、人類の知識をはるかに超えた極限環境で生息する生物であろう。隕石の衝突、無酸素大気海洋、大規模火山活動などにより、初期地球環境も極限環境であった事が予想される。初期地球の情報を残した地層を丹念に解析する事により、極限環境で生息する生物の情報は入手可能であり、他惑星生命体の生態系を理解する手がかりを与えるであろう。

地球46億年の歴史中で、およそ40億年ほど前に最初の生命体が誕生したと考えられている。海底熱水場での生命起源が有力な説として考えられてきている[1]。初期地球環境は火山活動、プレートの動きも活発であったとされる。極限環境の代表例である海底熱水も、大規模火山活動に誘発されて初期地球海洋に広く分布していた事が知られている。初期地球海底熱水の痕跡を示す岩石を詳査する事で"生命起源海底熱水説"を地質学的に検証できるであろう。RNAの配列を生物ごとに比較して作成された分子系統樹は、初期生命体(コモノート)が超好熱性の化学合成細菌であった事を示している(化学合成型初期生命説)[2,3]。そのような場合、海底熱水活動に依存する生態系が、初期海洋に広く分布していた事が期待され、岩石中に化学合成細菌の情報が残されているかもしれない。

本論分では、Archean時代(25億年よりも古い地質時代)に生息していた微生物がいかに海底熱水活動に影響されながら生息していたか議論して行く。また、地球は内部の熱を放出し冷却する方向に向かっている。この事は、海底熱水活動は、活発な時期(初期地球)から弱まる時期(現世)へ推移していると言う考えにつながる。Archean時代からProterozoic時代(25億年以降から5.45億年までの時代)にかけての海底熱水活動の減衰が微生物進化に与えた影響も本論文で議論する。

2. Archean 海底熱水と微生物

海底熱水活動の産物として、重金属元素に富んだ硫化物鉱床がしばしば形成される。それらは、「黒鉱」鉱床と呼ばれる。Archean時代にも「黒鉱」鉱床は産出し、どの時代のものよりも規模は大きい。この事は、Archean時代の海底熱水活動が、現世よりも活発であった事を示す。注目すべき事実は、Archean時代の「黒鉱」鉱床は、しばしば有機炭素を伴う事である。有機炭素は、微生物由来であり、海底熱水環境で微生物活動が活発であった事を示している。こうした有機炭素に対する研究は「生命起源海底熱水説」「化学合成型初期生命説」を検証する上でも重要である。以下に、Archean 海底熱水場に生息していた微生物の例を紹介する。

西オーストラリアのピルバラ地域には35億年前から32億年前までに海洋底で形成された地層が、あまり変成を受けない状態で保存されている。約32億年前の

¹ 東北大学大学院理学研究科

「黒鉱」鉱床が、サルファー・スプリングと呼ばれる地域に分布している。サルファー・スプリングの「黒鉱」鉱床が、現存する世界最古のものである。興味深いのは、この硫化物鉱床最上部に有機物濃集帯がみられる事である。有機物の中には化石状の形態を示すものもあり、熱水場に生息していた微生物群集の痕跡である可能性がある[4]。

図1(a)に示したような同心円状構造物が、サルファー・スプリング「黒鉱」鉱床中に多く見られる。この同心円状物質は中心部に硫化物(黄鉄鉱:FeS₂)が位置し、それを有機物を取り囲んでいる。あたかも"ストロマトライト"のように見える。このような、構造物は無機的な化学沈澱で形成されにくく、32億年前の海底熱水噴出孔近傍に生息していた微生物の活動痕跡と考えられる。

カナダのオンタリオ州とケベック州境界付近に、27億年前に形成されたアビティビ緑色岩帯(様々なタイプの岩石の複合体)がある。このアビティビ緑色岩帯には、27億年前の海底熱水活動で形成された「黒鉱」鉱床が多数存在する。その中の代表的鉱床がキッドクリーク鉱山であり、現存する「黒鉱」鉱床としては、世界最大規模の鉱床である。図1(b)には、キッドクリーク鉱山内部の写真を示した。硫化物(銅、亜鉛、鉄硫化物)が濃集し鉱床を形成している部分(約1~10m幅)と、有機炭素に富んだ部分(数m幅)とが、密接に関係しあい産出している。海底熱水環境で生息していた微生物活動の死骸が堆積し、有機物に富んだ部分を形成していると考えられている。

アビティビ緑色岩帯には、コマチアイトと呼ばれる Archean 時代を特徴付ける火山岩が見られる。マグネシウムやニッケル含有量が高いのがコマチアイトの特徴である。多くのコマチアイトは、海底に噴出し、そのうちの幾つかは海底熱水活動を起こし、Ni や Cu を主体にした硫化物鉱床を形成した事が知られている。図1(d)には、ムンロ地域から採集された試料の一例を示す。熱水から沈澱した硫化物(Fe-Cu-Niが主体)がノジュール状の形態を示す。これらは、有機炭素に取り囲まれている。硫化物形成と有機炭素沈澱が同時

に起こり、岩石化する過程でノジュールが形成されたと考える。有機炭素は、海底熱水環境で生息していた微生物由来のものである。

先に示したキッドクリーク鉱山は、ムンロ地域に隣接しており、いずれの地域も硫化物鉱床と有機炭素が同じ層に出現する。硫化物鉱床と有機物がカップルで出現する現象が、西部アビティビ緑色岩帯で広域的に見られる事は、地震波による地殻構造探査で確認されている。この事は、27億年前の西部アビティビ地域海底に、大規模堆積盆が存在し、そこでは海底熱水の噴出孔が複数存在していた事を示している。この堆積盆地の中では、海底熱水から供給される化学的成分に依存した微生物活動が行われていた事をほめかしている。

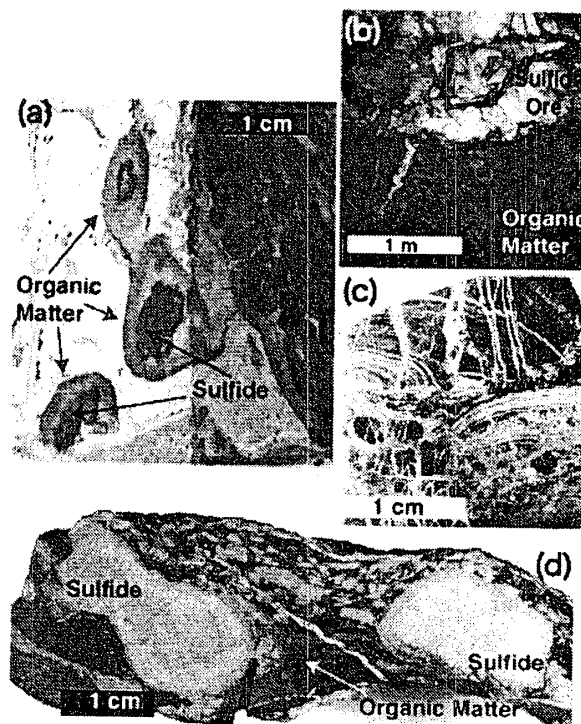


図1 硫化物鉱床と密接に関係した微生物起源有機物
 (a) 32億年前の Sulfur Spring 鉱床に産する"ストロマトライト"状有機物
 (b) 27億年前のキッドクリーク鉱山の硫化物鉱床と有機物との空間的關係
 (c) 27億年前ミシピコテン地域に見られる"ストロマトライト"状構造物。硫化物(明灰色部)と有機物(黒色部)が互層をなす。27億年前の海底熱水活動場で形成された。
 (d) 27億年前のムンロ地域に産する Fe-Cu-Ni 硫化物と有機物との空間的關係

3. 縞状鉄鉱層の存在意義

Archean時代からProterozoic時代初頭(19億年ころまで)にかけて、多量の縞状鉄鉱層が形成された事が知られている[図2]。縞状鉄鉱層は、鉄に富んだ層(Fe_2O_3 や FeCO_3 など)とシリカに富んだ層(SiO_2)で構成され、その繰り返しが数m~数百mにも及ぶ海底堆積物である。縞状鉄鉱層への重要な鉄の供給源として、中央海嶺などで起こる海底熱水が考えられている[5]。

図2(A)に縞状鉄鉱層の時代分布と出現頻度との関係を示した。Isley and Abbott(1999)がまとめた結果に新しい年代を入れて作成し直した物である。従来、縞状鉄鉱層は25億年頃に最大の出現頻度を持つとされていた。しかし、縞状鉄鉱層の堆積年代と鉄の埋没量を、より正確に見積ると、必ずしも従来型の時代分布をしない事が示された[6]。

新しい時代分布図において縞状鉄鉱層は、どの時代にも“均質”に堆積するのでなく、周期的にまとまった量が堆積しているのが読み取れる。27億年前に最大のピークを持ち、25億年、20億年前後にも明確なピークが存在する。興味深いのは、この縞状鉄鉱層の時代分布と、Archean時代の地球規模火山活動分布とが一致している事である[6]。地球規模での火山活動の活性化は、そのまま海底熱水活動の活性化につながる。すなわち縞状鉄鉱層の時代分布は、そのまま火山活動の活発な時代、海底熱水活動の活発だった時代と読み替えられる。地球規模での火山活動の活性化は、おそらくマンタルプルームのような活動で起こされたのであろう[6]。

4. 異常な炭素サイクル

38億年から19億年までの海洋堆積物にみられる有機物の炭素同位体組成を図2(B)に示した。これらは、既存のデータに著者が新たに得たデータを加え、年代ごとにプロットしたものである[7,8,9]。図2のプロット

には、約1000個の有機炭素試料の分析値が含まれている。

海洋堆積物の有機物炭素同位体は、海洋における一次生産者の炭素同位体組成を反映する。有機物炭素同位体組成は、堆積後の続成作用で重い方向に組成を変化しやすい。しかし、軽い方向には変化しないので、最も軽い同位体(図2(B)中の太線)が、最も続成作用の影響を受けていない組成、すなわち、それぞれの時代の一次生産者の炭素同位体組成ということになる。顕生代海洋は、光合成微生物が一次生産者であり、ほぼ-32~-20%の間に入る(図2(B)の矢印(1))。Archean時代から初期Proterozoic時代堆積岩中の有機物の大きな特徴は、光合成微生物が持つ値より、はるかに軽い同位体を有する有機炭素が存在する事である。特に-35~-40% (図中のバー)を遥かに超える時期が、27億年、25億年、20億年と出現する。極端に軽い炭素同位体組成は、メタンを代謝に用いる微生物に特徴的な値である事が知られている(図2(B)中の矢印(2))。すなわち一次生産者の中にメタン生成型、消費型微生物が存在していた事を示している。炭素同位体異常が38億年~20億年の間に広く周期的にみられる事は、海洋環境に溶存メタン濃度が高まった時期が周期的に起こった事を示す。

溶存メタン濃度が高く、それを微生物が一次生産に用いる海洋は、現在には存在せず異常な海洋と言える。溶存メタンが海洋環境に存在する条件としては、

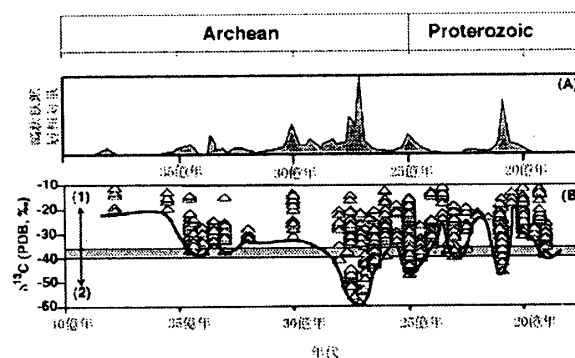


図2 縞状鉄鉱層時代分布と有機物炭素同位体組成変化との関係

(A) 縞状鉄鉱層の出現頻度と時代変化、(B) 有機物の炭素同位体時代変化

(a) 大気が非常に還元的であり、メタンが安定および多量に存在する、(b) 海底堆積物中で微生物によるメタン生産(メタン生成菌など)が現在以上に多い、(c) マグマ-熱水システムから海底熱水経由でメタンが供給される、などが考えられる。

大気とマントルは物質循環を介して、相互作用している。特に初期地球ではマグマオーシャン期があり、マントルの酸化還元度がそのまま大気の酸化還元度を決めた時代があった。マントル自身の酸化還元度は、メタンを安定化するほど還元的でないため、メタンに富んだ Archean 大気(上記(a)の可能性)は考えにくい。(b)か(c)の可能性は、両方ありうるであろう。ここで指摘すべきは、有機炭素同位体組成が-40%よりも低くなる時代と縞状鉄鉱層が大規模に出現する時代が一致する事である。縞状鉄鉱層の出現頻度が、海底熱水の活発度に比例する可能性を前セクションで議論した。仮にマントルブルームのような活動があり、還元的地球深部からメタンを周期的に地表に運ぶシステムが働くと、それを用いる生態系も周期的に海洋に広がる事になる。このモデルによって、有機炭素同位体異常と縞状鉄鉱層の出現モードの一致を説明可能である(可能性(c))。

縞状鉄鉱層は19億年頃から海洋底に沈殿しなくなる(厳密には少量が7億年頃に一旦出現する)。縞状鉄鉱層の消滅は、海洋-大気の大規模酸化により、鉄が海洋中を大規模に移動できなくなったと説明されている[5]。溶存酸素を含んだ海洋では、鉄は熱水から噴出された直後に酸化鉄として沈殿してしまうからである。その一方で、19億年以降に縞状鉄鉱層が消滅するのは、地球規模火山活動の弱体化によって海底熱水活動が衰退したと仮説をたてる事も可能である。海底熱水活動の衰退は、海洋への鉄フラックスの減少を意味し、なおかつ熱水から放出される化学成分に依存する独立栄養化学合成微生物のバイオマス減少を引き起こす。

仮にこのプロセスが進行すると、微生物は生存のために化学反応以外にエネルギー源を求めることにな

る。太陽光は化学反応の代換エネルギーの最大有力候補であったであろう。微生物の主役が太陽光にエネルギー源を求める光合成微生物へと移り、それに依存する生態系(従属栄養型)が順次確立されるとする進化のシナリオを描く事も可能である。19億年以降海洋堆積物中の有機炭素安定同位体組成は、主役が光合成微生物(シアノバクテリア)に移った事を明確に示している。逆に19億年頃までは、海底熱水活動(地球規模火山活動)が生物相の主役をコントロールしていたとも考えられる。

5. 初期地球微生物進化

初期地球環境における生命進化には不明な点が多い。しかしバイオマーカーや安定同位体など、新しいデータの蓄積により、ここ数年間に、初期生命進化に対する理解が増大した。例えば、20億年以降と考えられていた真核生物の出現も、高精度のバイオマーカー測定により現在は27億年頃となっている[10]。現在公表されている化学化石をもとに構築された生物進化と地質時代との関係を図3に示した。基本的に嫌気的環境に生きる微生物から酸素を生成し酸素を用いる好気的微生物へと進化して様子を図3は示している。現在もなお新たなデータが蓄積されつつあり、シアノバクテリア(光合成酸素生成微生物)の発生が27億年より遡る可能性も出てきている。Archean時代の海洋は海底熱水活動の影響を強く受けていたと議論

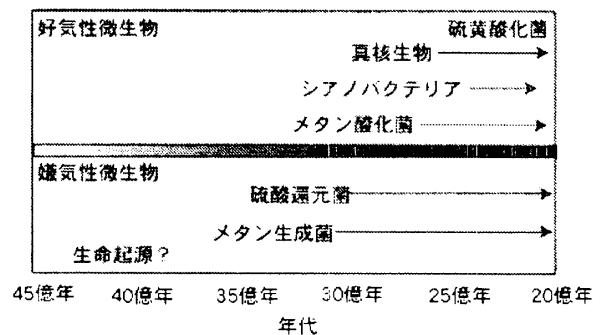


図3 バイオマーカーや安定同位体から規定された初期地球における微生物進化

したが、その中で確実に生物進化は行われ、現在の海洋と変わらない姿へ遷移し、生物多様性が構築されていった。地球外惑星に生命体が存在している場合でも、初期地球環境同様、単純な生命体のみならず、多様な生命生態系が見つかる可能性は否めない。

参考文献

- [1] Wachtershauser, G. 1988: *Microbial Review* 52, 452-484.
- [2] Woese C.R., 2000: *Proc. Nat. Aca. Sci. USA* 97, 8392-8396.
- [3] 大島泰郎 1995: 東京化学同人、科学のとびら 24.
- [4] Rasmussen, B. 2000: *Nature* 405, 676-679.
- [5] Holland D.H., 1984: Princeton Univ. Press, Series in Geochemistry, pp.582.
- [6] Isley, A.E. and Abbott, D.H. 1999: *JGR* 104, 15461-15477.
- [7] Strauss, H. and Moore T.B., 1992: Cambridge Univ. Press 711-798.
- [8] Rosing, M. 1999: *Science* 283, 674-676.
- [9] House, et al. 2000: *Geology* 28, 707-710.
- [10] Brocks, J.J., et al. 1999: *Science* 285, 1033-1036.