

火星，パンスペルミア，そして生命の起源

すべてはどこで始まったのか？

ジョセフ L. カーシュビnk* ベンジャミン P. ワイス*

翻訳：磯崎 行雄**

Mars, Panspermia, and Origin of Life: Where did it all begin?

Josef L. KIRSCHVINK* and Benjamin P. WEISS*

Translated by Yukio ISOZAKI**

Abstract

Recent paleomagnetic studies on the Martian meteorite ALH84001 have shown that this rock traveled from Mars to Earth with an internal temperature entirely below 400 °C. Dynamical studies indicate that the transfer of rocks from Mars to Earth (and to a limited extent, *vice versa*) can proceed on a biologically-short time scale, making it likely that organic hitchhikers have traveled between these planets many times during the history of the Solar system. These results demand a re-evaluation of the long-held assumption that terrestrial life first evolved on Earth, as it could just as easily have evolved on Mars and traveled here. We argue here that the chemical environment on early Mars would have been better for the evolution of early biochemical reactions than that of early Earth.

Key words : origin of life, Mars, evolution of atmosphere, early Earth, redox

キーワード : 生命の起源, 火星, 大気進化, 初期地球, 酸化還元電位

I. パンスペルミア説

定常宇宙論がもてはやされていた 19 世紀では、ケルビン卿や S. アーレニアスといった高名な科学者たちでさえも、宇宙の時空間は無限に広がっていると考え、その中では生命が惑星間を移動することなど当然おこるべきことだと信じていた。この生物の惑星間移動という考えはパンスペルミア (Panspermia: 原義は、すべての共通種子の意

味) 説として知られるが、その後ビッグバン理論が受け入れられたこともあって、いつの間にか忘れ去られてしまった。そして、その後の生命の起源を探る試みは、生命が地球上で発生したという前提に縛られることになった。

しかし、まさにパンスペルミア的な生命の惑星間移動が過去にはごく普通にまた頻繁に起きていたことを支持するデータがこの 10 年間に集積しつつある。最近の古地磁気学の研究は、火星起源

* カリフォルニア工科大学地質惑星科学部門

** 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学系宇宙地球科学教室

* Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, CA91125, USA

** Department of Earth Science and Astronomy, The University of Tokyo

This article originally appeared in *Palaeontologia electronica*, vol. 4, no. 2, 1-8 (Jan., 2002), and is translated into Japanese under permission of the authors.

隕石 ALH84001 が火星から地球まで移動した間に、その内部が一度も摂氏 40 以上に加熱されなかったことを明らかにした (図 1: Weiss *et al.*, 2000)。ヨーロッパ宇宙局の長期露出実験施設は、バクテリアの孢子が宇宙空間で 5 年以上生存できることを示し (Horneck *et al.*, 1994; Horneck, 1999), また隕石が惑星からの脱出あるいは着地の際に被る衝撃や振動にもバクテリアは十分耐えることが室内実験により明らかにされた

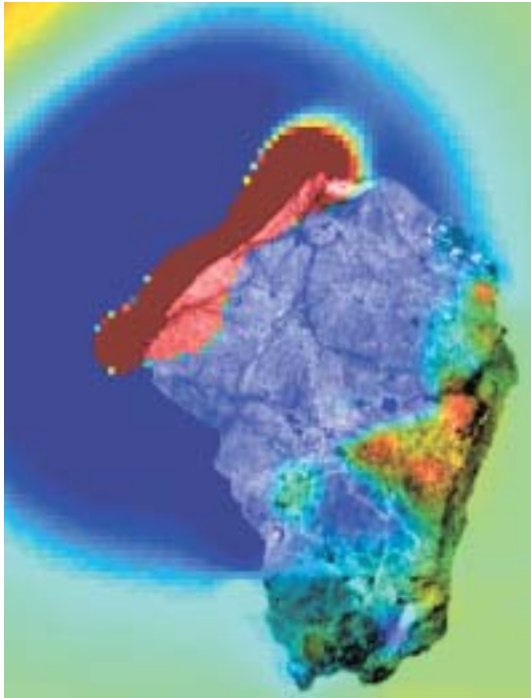


図 1 火星起源 ALH84001 隕石スライスの磁気マッピング (光学写真に重複表示)。画面に垂直方向の磁気強度を赤-青色スケール (画面からが赤、画面へが青) で表示。大きな磁気異常が隕石の外側焼結殻を中心として存在すること、および焼結が表面から数 mm 以下に限られることに注目されたい。岩石サンプルの中心部は不均質な磁気パターンを持っており、1500 万年以上にわたって摂氏 40 以上には加熱されていないことを示す (Weiss *et al.*, 2000)。これは、岩石が火星-地球間を熱殺菌されることなく移動できることを意味している。

Fig. 1 Magnetic scan of a slice of ALH84001, superimposed on its optical image.

(Mastrapa *et al.*, 2001)。さらに動力学研究から、火星から地球への (また限られるとはいえ、その逆の) 岩石の移動が、生物学的には十分短い時間でおきることが示され、太陽系の歴史の中で、このような“宇宙ヒッチハイカー”が惑星間を何度も行き来した可能性が現実味を帯びてきた (Mileikowsky *et al.*, 2000; Weiss and Kirschvink, 2000)。これらの研究によって、地球生命が外界から完全に孤立した地球上で進化したという永く信じられてきた仮定は再検討を迫られるようになった。

II . 40 億年前の共通祖先

地球生命が 40 億年前にはすでにかかなり高いレベルにまで複雑化していたことを示す 3 つの証拠が新たに得られ、初期地球での頻繁な隕石爆撃 (Cohen *et al.*, 2000) が生命の発生や存続にとって致命的であったという仮定も疑問視せざるをえなくなった。一番目の証拠は、グリーンランドの太古代 (38 億年前) の地層中のリン灰石結晶に石墨 (炭素のみから構成される鉱物) が微小な包有物として含まれ、その石墨をつくる炭素が異常に低い同位体比をもつこと (Mojzsis *et al.*, 1996) である。一般に、低い炭素同位体比は生物の炭素分別 / 固定作用でできた有機物、それも光合成の産物であったことを示唆するからである。しかし、このリン灰石結晶自体が 15 億年という明らかに若い放射性 (U-Pb および Pb-Pb) 年代をもつことから、周囲の 38 億年岩石の形成後に結晶成長したか、あるいは二次的な変成作用によって同位体比がリセットされたと考えられ、38 億年前の光合成産物という解釈には疑問が出された (Sano *et al.*, 1999)。また測定サンプル採取地域の地質学的解釈 (起源、形成過程) を疑う研究者もいる (Myers and Crowley, 2000)。

二番目の証拠は、火星起源隕石 ALH84001 中の炭酸塩鉱物に含まれる 39-41 億年前の磁性バクテリア化石 (現世種がつくるマグネトソームという磁鉄鉱結晶に酷似) とされるものの存在である (Thomas-Keprta *et al.*, 2000, 2001; Friedman *et al.*, 2001)。この解釈の正否はまだ議論の渦中

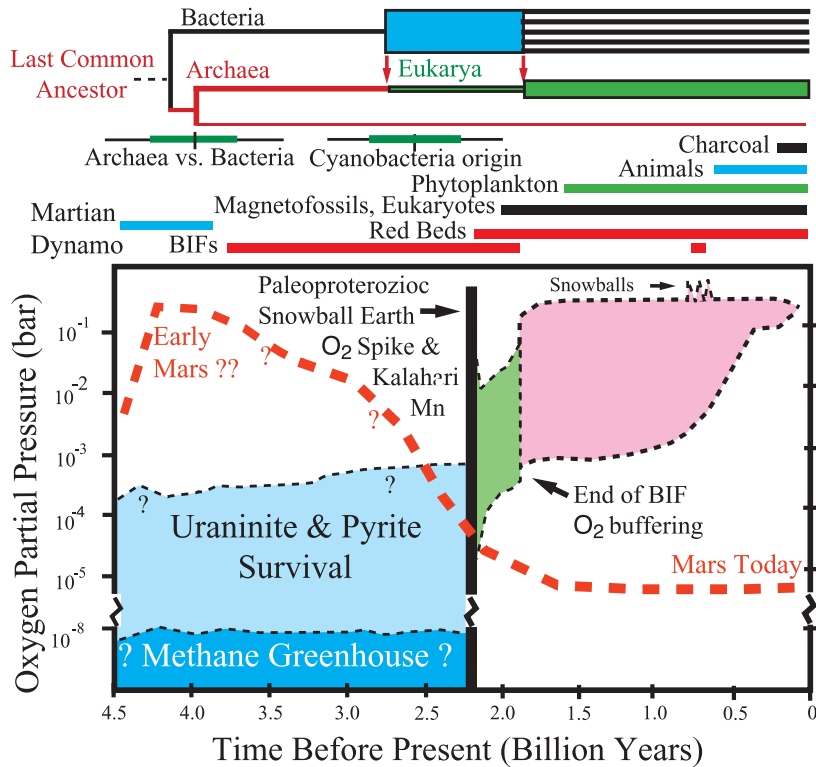


図 2 生物進化と地球大気と火星大気の酸素分圧の経年変化の比較図。

図上段に、最近 Hedges *et al.* (2001) によって推定された、真正細菌 (Bacteria)、古細菌 (Archaea) そして真核生物 (Eukarya) の分岐時期の分子時計の見積もりを示す。図の左最上部に地球生物すべての共通祖先 (Last Common Ancestor; LCA) を表示。その直下の Archea vs. Bacteria と表示された誤差範囲は、この共通祖先の生存期間に関する 1 ないし 2 シグマ (標準偏差) の誤差推定で、同様にその右側はシアノバクテリアの出現時期について誤差範囲を示す。シアノバクテリアすなわち酸素発生型の光化学系 II は、共通祖先よりもずっと後に出現したことに注目されたい。その下に示された色表示バーは、大気や表層海水中の酸素濃度を示す岩石や化石 (層状鉄鉱層、赤色層、磁性バクテリア化石と真核生物、光合成プランクトン、動物、木炭) の地質年代範囲を示す (Kasting, 1993 を改変)。左端の青色バーは、太陽風による大気侵食を防いだ火星磁気ダイナモの推定活動期間 (ALH84001 隕石の磁化年代に基づく; Weiss *et al.*, 未公表) を示す。図の下半は、地球と火星の大気酸素の歴史を表す。地球については、45 23 億年前の淡青色の領域が、流水で円磨された碎屑性の黄鉄鉱 (pyrite) や閃ウラン鉱 (uraninite)、還元的古土壌、層状鉄鉱層 (BIF)、浅海炭酸塩岩中の 2 価マンガンの存在を示す。下部の濃青色の領域は、温室効果が有効に働く領域のメタン主体大気中の酸素分圧の上限 10^{-8} 気圧 (Pavlov *et al.*, 2000 の推定) を示す。地球進化史前半では、火山ガスの供給源であった地球マントルがより還元的であったために、温室効果はより促進された (Kump *et al.*, 2001)。23 億年前の垂直の黒いバーは、約 7000 万年間続いた前期原生代の全球凍結事件 (Snowball Earth)、その後のカラハリ、マンガニ床の堆積 (おそらく既存のシアノバクテリアに新たに光化学系 II が獲得された結果)、そして酸素の大量発生とメタン温室効果 (Pavlov *et al.*, 2001) の崩壊の時期を示す。これに続く緑色の領域は、全球凍結後の事件から、世界中の海洋で酸素バッファーとして働いた 2 価鉄の枯渇がおきるまでの移行を示す。ピンク色の領域は、現在のレベルに至る最終的な酸素分圧の増加を示しており、その中では原生代後期の全球凍結事件に続くシアノバクテリアの大量発生によって 3 回ないし 4 回の酸素急増エピソードがおきた。火星に関する赤い点線は、現世の火星大気中の酸素分圧で右端が固定され、過去については推定に基づき、より濃密な大気が外挿されている。筆者らは、ALH84001 隕石の炭酸塩鉱物が質量比依存性の酸素同位体分別をもつこと (Farquhar *et al.*, 1998) から、40 億年前の火星大気がオゾン層をもっていたと考えピークを示した。また、火星の磁気ダイナモによる火星大気の磁氣的保護が働き、酸素は残る一方、水素のみが宇宙空間へ失われるので、この酸素ピーク以前は酸素が増加傾向にあったと推定した。

Fig. 2 Biological evolution, compared with a schematic representation of the atmospheric partial pressure of oxygen in the earth and martian atmospheres, as a function of geologic time.

にあるとはいえ、同様な粒子を無機的プロセスで人工合成することには未だ誰も成功していない。ディスクドライブや磁気記憶テープなどの磁性体を扱う製造業界(年商総額は350億ドルに達する)は過去60年間に渡って、マグネトソーム類似の磁鉄鉱微小粒子の無機合成を試み続けたが、すべて失敗している。バクテリアが作るものと同じ磁鉄鉱粒子を人工合成することは簡単な芸当ではないのである。Golden *et al.* (2001) は菱鉄鉱を加熱することによってマグネトソーム類似の磁鉄鉱を合成した(すなわち件の「化石」は二次的にできた無機物である)と報告したが、彼らはその「無機合成」磁鉄鉱の形態や組成の詳細を明らかにしていない(Thomas-Keprta *et al.*, 2001)。二次的な衝撃がALH84001隕石中の炭酸塩鉱物にある程度の熱的影響を与えたことを認めるとしても、ゴールデンらの合成メカニズムの可否は引き続き検討されねばならない。

三番目の証拠は、真正細菌、古細菌そして真核生物の完全解読された大量のゲノム情報を用いた最近の分子時計分析の結果である。それによると現存するすべての生物の共通祖先の出現は40億年前まで遡るはずだという(Hedges *et al.*, 2001) (図2)。ヘッジらの系統樹は、より少ないゲノム系に基づく点で従来のものより遥かに興味深い。なぜなら、この結論が全く独立に得られた2つの地質学的な物証と一致するからである。すなわち、1) 最古のバイオマーカー(2メチルホパノイド)が約25億年前のシアノバクテリアを示すものであること(Summons *et al.*, 1999)、そして2) 原形質をもつ真核生物の最古の化石が21億年前のものであること(Han and Runnegar, 1992)は、それより遥かに原始的であったはずの共通祖先が40億年前に現れていたと考えることと矛盾しない。したがって、かつてダーウィンが「暖かな小さな池」と呼んだ生命発生の現場を探し求めるならば、地球の冥王代(46-40億年前)の世界、そして火星のノアク代と呼ばれる地質時代の世界においてということになるだろう。

III. 電気化学勾配と生命の起源

地球生命は電子移動を伴う多様な生化学的呼吸連鎖系に依存している。そのため、電気化学勾配¹⁾の存在は生命の発生にとって最も重要な前提条件であり、かつ初期生命進化において強い選択圧となったはずである。古細菌、真核生物および真正細菌の呼吸系について最近なされた遺伝子解析(Castresana and Moreira, 1999)は、酸素、硝酸基、硫酸基および硫黄を結合した酸化の最終段階を担う酵素を共通祖先がすでに備えていたことを示した。これに対して、大量の遺伝子水平移動²⁾がずっと後の時期におきた結果、このような酸化酵素ができたという別な解釈(Doolittle, 2000)も提案された。しかし、チトクローム酸化酵素の遺伝子は(ある生物の局所領域の特例を除けば)すべての生物のリボソームRNAの系統にそって祖先まで遡ってゆけることから、少なくとも酸素に関する限り、後の時代の遺伝子水平移動の結果という説明はあり得ない。図3は、現世の中性海水中でおきている典型的な電気化学反応の系列を示す。図中に赤色で示したのは、共通祖先がもっていたと考えられる最低電位の酸化酵素である。我々の共通祖先が進化した場合には、エネルギーを帯びた準安定化合物が電位境界を横切って拡散できるくらいに大きな酸化還元電位の勾配があったと考えられる。木星の衛星ユーロパの海(Gaidos *et al.*, 1999)のようにほとんど電位勾配のない、いわば“化学的に身動きがとれない”環境では生命の存続は難しく、そもそも生命が発生することさえできなかったと考えられる。長い時間をかけて、ランダムな突然変異と自然選択(Darwin, 1859)が生物の機能を向上させたが、代謝に関わる原始的な電子伝達系は図3に示す電位対からのエネルギー抽出を現世生物ほどには効果的に行えなかったであろう。実際、祖先型タンパク質の遺伝子重複によってこの電子伝達の連鎖の中に多くの中間のプロセスが生じたと考えられる(Schutz *et al.*, 2000)。祖先型生命は、代謝エネルギーの獲得においても現世生物のように能率的ではなかったと考えられる。以上の理由から、おそらく

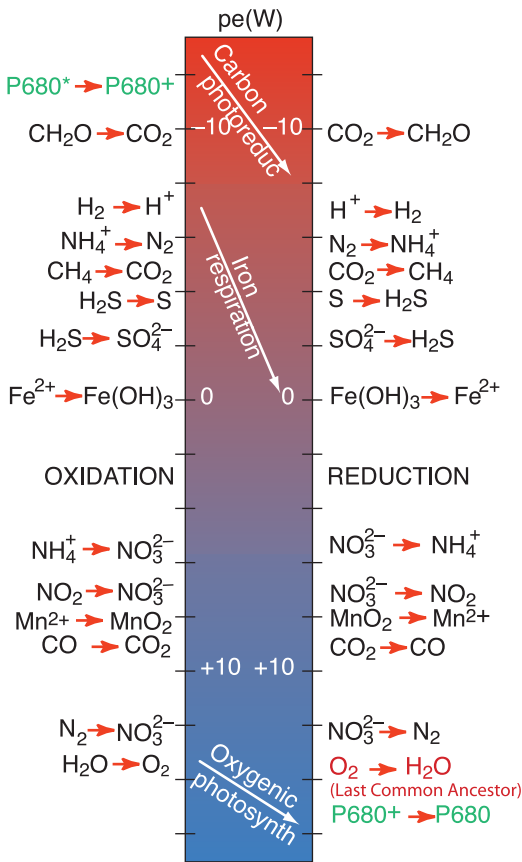


図 3 中性海水中の代表的な酸化還元反応のペア (Gaidos *et al.*, 1999 による)。
縦軸は酸化還元電位を示す。左側の酸化反応は、右側の還元反応と対をなす。最も右下の赤色の反応は、約 40 億年前以前 (Hedges *et al.*, 2001) の共通祖先の呼吸反応系列でなされていた (Castresana and Moreira, 1999) 酸化還元電位が最も低いレベル (酸素分子に至る) への還元反応を示す。P680 は色素の名称。

Fig. 3 Typical redox couples in neutral seawater (adopted from Gaidos *et al.*, 1999).

生命は、かなり広い反応活性範囲をもつ電気化学種が存在した形成初期の惑星 (地球および火星) で生まれたのだらうと筆者らは考えている。

IV . 初期地球 vs. 初期火星

太陽系の最初の 5 億年間において、地球と火星

のどちらが生命の誕生に適していたのかを酸化還元電位という観点から評価してみよう。そのためには、初期地球と初期火星について想定される環境を比較せねばならない。ただし、火星と地球の初期環境の復元とは、地球上に地層記録がほとんどなく、かつ火星の記録もほぼ入手不能という難しい時代の歴史解明に挑むことにほかならず、簡単ではない。

火山から放出される主なガス成分は、惑星の外側マントルに存在した還元的な成分と平衡状態にあったとみなされる。最近の火星起源隕石の研究は、惑星形成直後の火星マントルが地球マントルよりも還元的であったのに対して、当時の火星地殻が極めて酸化的であったことを明らかにした (Wadhwa, 2001)。地球と火星との大きな違いは、火星が地球で見るとようなプレートテクトニクス、すなわち酸化した地殻を還元的なマントル内へリサイクルする機構をもたないという点にある。ただし、プレートテクトニクスが機能してきたとは言え、地球マントルは必ずしも速やかに酸化された訳ではなかった。Kump *et al.* (2001) は次のように論じている。太古代の間、沈み込んだ海洋地殻はおそらく下部マントル深くまでめぐり込んでいたので、太古代 / 原生代境界 (25 億年前) 頃にマントル・オーバーターン (上部と下部が急激に入れ替わる現象) が起きるまでは、火山ガスの組成は、より始原的かつより還元的な上部マントルと平衡状態にあったはずである。太古代初め頃には、両惑星は生命の前駆的化合物を蓄積するのに十分な程度の還元的環境を局所的に持つに至ったであろう。そこで、次の問題は、生命進化を促す原始スープの中へと拡散しうる酸化的大気を地球と火星のどちらがもっていたのかという一点に絞られる。

V . 地球大気の酸素史

図 2 に地質学的記録に基づいた地球表層の酸化還元状態の歴史を示す (Kasting, 1993)。現世の地球および火星の表層は極度な酸化状態にあるが、顕生代以前の地球表層の酸化還元電位については永く議論され続けてきたにも関わらず、まだ決着

していない (Schopf and Klein, 1992 の総括レビュー参照)。太古代と原生代の堆積岩類には、層状鉄鉱層 (BIF) や碎屑性の円磨された黄鉄鉱や閃ウラン鉱が特徴的に含まれる。現世との比較から、これらの岩石・鉱物は還元的環境の指標と一般にみなされる。一方で、太古代における酸素発生を示す最重要の証拠は、オーストラリアの 35 億年前ワラウーナ層群の黒色チャートから産するシアノバクテリア酷似のフィラメント状微化石である (Schopf and Packer, 1987; Schopf, 1993)。これは、光合成生物が周囲の還元的 (酸素欠乏) 環境からは大きな電気化学勾配で隔離された小さな酸素領域を作りつつ散在的に生息していたとするモデル (Cloud, 1988) を支持する。しかし Buick (1988) は、件の含化石黒色チャートは実際にはより若い時代の熱水活動によって出来た二次的な珪質沈積物であって、それらは 35 億年前の地層を斜めに横切った割れ目に沈着したものとみなしている (筆者らは 2001 年 7 月に Buick 氏と現地を訪れ、その観察結果を確認した)。このように、まだ議論の余地のある“最古バクテリア化石”は、太古代環境での酸素の有無を考える上で決定的な証拠にはなりそうもない。むしろ不可解なのは、もしその時代に強力な酸素発生型の光化学系 II を行うシアノバクテリアが実際に現れていたとすると、なぜ彼等が出現するやいなや爆発的あるいは指数関数的に増殖しなかったのかということである。従来“太古代ストロマトライト”と呼ばれてきたものも、無機起源の構造 (Grotzinger and Knoll, 1999) あるいは非酸素発生型の光化学系を利用していた細菌がつくった構造である可能性があり、この議論を収束させられそうにない。

酸素発生型光合成 (光化学系 II) の存在を示す実質上最古の具体的記録は、南アフリカ、カラハリのマンガン鉱床である。これは約 23 億年前の原生代前期におきた全球凍結 (snowball Earth) 事件³⁾が終わった後に、マンガンの酸化物が海底に沈積した堆積鉱床である (Kirschvink *et al.*, 2000)。これは、おそらく地球表層が暴発的に酸化されたために堆積した地層であり、新たに進化した光化学系 II の出現を意味すると考えられる。図 2 に示

すように、カラハリのマンガン鉱床の年代は、Hedge *et al.* (2001) の分子時計によるシアノバクテリアの進化時期と誤差範囲内で一致し、共通祖先の想定される時期とは大きく異なる。

VI. 還元的な初期地球

太古代および初期原生代の地球が極めて還元的な表層環境を持っていたことを支持するいくつかの新しい知見がここ数年間に得られた。一つは、当時の浅海に堆積した炭酸塩岩が、いずれも 2 価のマンガンを含んでいることである (Veizer, 1994; Kirschvink *et al.*, 2000)。2 価のマンガンは還元的条件においてのみ水溶性であり、不溶性の 4 価のマンガンへと酸化されるためには硝酸基あるいは分子酸素などの酸化剤が必要となる。しかし海水中で硝酸基を作るには分子酸素が不可欠となるので、堆積岩中のマンガンの価数は当時の分子酸素の有無を判断する有効な基準となる。これらの 2 価のマンガンは炭酸塩岩が無機沈澱によって堆積した時に海水から取り込まれたと考えられるが、最初の全球凍結事件 (約 23 億年前) 以後に堆積した地層には全く含まれず、明瞭なコントラストをなす。

二つ目は 2 価鉄の存在が炭酸塩結晶の成長核形成を強く支配することである。石灰岩組織の中には、現世海洋の海水混合帯のような 2 価鉄が存在する特殊な条件下のみで形成されるものがある。それと同じ組織が太古代初期の浅海成炭酸塩岩中に産することから、当時の海水は 2 価鉄を溶存していた、すなわち還元条件にあったと考えられる (Sumner, 1997)。

三つ目の情報は、地球における硫黄同位体の質量非依存性分別 (mass independent fractionation)⁴⁾に関する最近の研究結果 (Farquhar *et al.*, 2000) である。それによれば、23 億年前の全球凍結事件以前の地球岩石はすべて、気体硫黄が大気中を循環できるくらいに強い還元的環境で堆積したらしい。一方、40 億年前の ALH84001 火星隕石中の黄鉄鉱にも硫黄同位体の顕著な質量非依存性分別が認められるが、初期火星の還元環境に関してそれがもつ意味はまだ不明である。この特徴

的な同位体分別は、必ずしも還元的大気存在を明示する訳ではなく、むしろ火星で地殻のリサイクルがないことや、また同位体的に不均質な物質が惑星形成の初期に混入したこと (Greenwood *et al.*, 2000) によって説明できるかもしれない。ちなみに同隕石中の炭酸塩鉱物は酸素同位体の質量非依存性分別 (^{17}O の ^{16}O および ^{18}O に対する比) を記録しており、この元素が一旦はオゾン状態を経てきたこと、すなわち大気に豊富な酸素があったことを示している (Farquhar *et al.*, 1998)。

四つ目は太古代に氷河が存在した証拠がほとんどないことである。太陽系進化の標準モデルでは、太古代の太陽輝度が現在よりも 30% 低かったとされ、極めて寒冷な気候が想定されるが、氷河の欠如という事実と大きく矛盾するので、「暗い太陽のパラドックス」 (faint young Sun paradox) としてよく知られる。この矛盾を大気の温室効果で説明するために 10 気圧の二酸化炭素を想定する研究者 (Kasting, 1993) もいるが、太古代の古土壌から推定された低い二酸化炭素分圧値 (Rye *et al.*, 1995) とかみ合わない。そこで Pavlov *et al.* (2000) は、太古代大気が (二酸化炭素のみではなく) メタンに満ちていたとすると、この矛盾を解くことができると述べ、この大気組成の特徴こそが、原生代初期に光化学系 II の出現直後に全球凍結を導く巧妙な仕掛けとなったのではないかと考えた。

もしこれらの論拠のすべてを冥王代の地球にまで外挿すると、強い還元条件にあった当時の地球表層環境が原始生命を発生させるのに十分な酸化還元電位の急勾配を持ちえた可能性はほぼ皆無と判断せざるをえない。

VII. 火星大気進化と生命発生の可能性

一方、火星大気中の酸素の進化過程については、さらに未解明である。現在の火星大気からは、水素と酸素の原子が自律的に 2:1 の比率を保ちつつ、宇宙空間へ失われてゆくため、惑星の酸化状態は一定に保たれている。水の光分解が大気中の水素と酸素の自由原子を作り出し、宇宙空間へ失われる分を順次補填する (Yung and DeMore, 1999)

ため、減少率は今も保持されている。大気からの基本的な消失メカニズムが水素と酸素とでは大きく異なるにもかかわらず、減少率については両者間の 2:1 という比が一定に保たれるのである。水素は主に熱放出に伴って失われる (Nair *et al.*, 1994) のに対して、より重い酸素は主に太陽風プラズマの照射と磁場との働き (例えば、大気スパッタリング、解離性再結合、および直接イオン抽出: Fox, 1997; Hutchins *et al.*, 1997) によって失われる。地球は火星よりはるかに大きな重力と強い磁場をもつために、地球大気組成は水素と酸素の減少による影響をほとんど被らなかつた。とくに地球磁場は、太陽風によるイオン化や太陽風と磁場との相互作用によるイオン化元素の流出をおさえている。

現在の火星はほとんど磁場を持っていないが、40 億年前以前では、かなり強い磁場をもっていたことが最近明らかになった (Acuna *et al.*, 1999; Weiss *et al.*, 2001)。初期火星の強い磁場は火星大気からの酸素の減少を防いでいたのかもしれない (Jakosky and Phillips, 2001)。現世の水素および酸素の自律的減少メカニズムが火星史の初期においても機能していたとすると、酸素の流出が少なかった当時は、水素の減少も極めて少なかったことになる。しかし、それを否定する証拠がある。今日の火星大気の水素/水素比は地球大気の約 5 倍であり、これは大量の水素、すなわち水が宇宙空間へ逃げたことを意味している。しかし一方で、火星大気中の酸素同位体比は、ほぼ地球大気と同様の値をもつので、火星史のある時点で水素の減少と酸素の減少とが互いに独立したプロセスになったと考えられる (Owen, 1992)。以上のことは、初期火星の磁場がガス散逸を阻止したことこそが、実は後の時代により大量の水素と酸素の減少をもたらしたことを意味しており、従ってその時点で生命進化を促す酸化反応の連鎖を生じさせた可能性が考えられる。火星のマントルが地球のものよりも還元的であった (Wadhwa, 2001) と仮定すると、このような表層の酸化条件は初期火星が同時期の地球よりも大きな酸化還元電位の勾配を持ち得たことを意味するからである。

火星隕石 ALH84001 の同位体研究の結果は、太陽光照射されたオゾン層の働き (Farquhar *et al.*, 1998) を含めて、40 億年前の炭酸塩が形成された火星表層環境が酸化的ないし中間的であったことと調和的である。おそらく当時の地球には発達していなかったオゾン層が初期火星にはあって、その生命圏を紫外線照射から保護していたのであろう (Pavlov *et al.*, 2001)。また、隕石中に産するマグネトソーム化石は、走磁性をもつバクテリアにとって不可欠な鉛直方向の酸化還元電位勾配の存在を示している (Chang and Kirschvink, 1989)。地球最古の磁性バクテリア化石は、全球凍結後の約 21 億年前のガンフリント・チャート層から産し、そのタイミングは最初の真核生物の出現 (Han and Runnegar, 1992) とほぼ一致する。

VIII. おわりに

以上述べてきた証拠のすべては、初期火星が初期地球に比べて、生物が利用できるエネルギーに満ちていて、おそらく生命の発生により適していたことを額面通り示している。これらを踏まえて、筆者らはあえて読者諸氏のことを、あの赤い惑星から宇宙旅行してきた微生物の子孫と呼ばせてもらう次第である。

謝 辞

図 1 の画像を合成して下さった F. Macdonald と F. Baudenbacher の両氏、またこの研究を補助して下さった NASA 宇宙生物学研究所および NASA 地球外生命研究プログラムに感謝する。本原稿は、カーシュピングが 2001 年 12 月にアメリカ地球物理学連合で発表した「カール・セーガン記念講義」の内容を修正したものである。

記 注

- 1) 電気化学的勾配: エネルギーや物質の代謝を行う生物の存在そのものは、多様な化学反応の集合である。ある系内において酸化還元電位に大きな偏りがある場合に、その差 (化学ポテンシャル) を利用した様々な化学反応が生じるが、生命の発生にはこのような電気化学的な勾配の存在が不可欠となる。
- 2) 遺伝子水平移動: 生命進化の過程で、一旦別系統として分岐した系列間で、二次的な遺伝子の交換がファージなどの媒介でおきることが確認されている。

時間の流れを縦軸にとる系統樹の中では、遺伝子の横方向の移動なので水平移動と呼ばれる。

- 3) 全球凍結: 極地域のみならず赤道域の海洋表層までも氷に被われる状態を指す。古地磁気データから過去の赤道周辺の低緯度地域で堆積したと推定される地層中に氷河性堆積物が含まれることに注目した (本論文の著者である J.L. Kirschvink が 1992 年に提唱。原生代初期 (23 億年前) および原生代末期 (7.5 億年前) に二度おきたことが指摘されている。海洋がすべて氷結すると、太陽光の反射率 (アルベド) の増加によりますます寒冷化が促進されるという正のフィードバック・ループに陥ったはずだが、やがて地球内部からの火山ガス (主に二酸化炭素) 放出による温室効果で全球凍結から脱出・回復したらしい。全球凍結に至った過程については、逆に大気中の二酸化炭素分圧の減少が不可欠となるが、究極の原因については未解明。
- 4) 質量非依存性分別: ある元素の複数の安定同位体が、熱水活動、風化、海水からの沈澱などの通常の無機化学的プロセスをへる場合に、各々の同位体は質量差にほぼ比例して分別される。これに対して、例えば大気高層では、太陽からの紫外線による光化学反応が酸素からオゾン、また SO₂ ガスから様々な硫黄化学種を形成し、その際には酸素や硫黄の同位体の質量に比例しない (質量非依存性) の特異な分別がおきる。オゾン層によって紫外線から保護されている表層大気 (および平衡状態にある海洋) では質量依存性分別がおきているので、過去の堆積物の同位体分別の特徴を探ることによって地球のオゾン層発達史の解明が可能である。
- 5) 暗い太陽のパラドックス: 太陽が主系列恒星の進化を歩む中で、太陽系惑星の形成 (約 46 億年前) 直後の太陽輝度は現在の 70% 程度であったと推定される。惑星地球の公転軌道そして太陽からの距離はそれ以降大きく変化していないので、日射量が少なかった当時の地球表層は極めて低温環境におかれ、地表の平均気温は氷点下だったと推定される。一方で、地質学的証拠は、約 40 億年前以降、地表には氷結していない海洋が安定に存在していたことを示しており、当時の太陽輝度との間に大きな矛盾 (パラドックス) がある。C. Sagan らが 1972 年に指摘。

文 献

- Acuna, M., Connerney, J., Ness, N., Lin, R., Mitchell, D., Carlson, C., McFadden, J., Anderson, K., Reme, H., Mazelle, C., Vignes, D., Wasilewski, P. and Cloutier, P. (1999) Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars global surveyor MAG/ER experiment. *Science*, **284**, 790-793.
- Buick, R. (1988) Carbonaceous filaments from North Pole, western Australia are they fossil bacteria in Archean stromatolites a reply. *Precambrian Research*, **39**, 311-317.
- Castresana, J. and Moreira, D. (1999) Respiratory chains in the last common ancestor of living

- organisms. *J. Molecular Evolution*, **49**, 453-460.
- Chang, S.-B.R. and Kirschvink, J.L. (1989) Magnetofossils, the magnetization of sediments, and the evolution of magnetite biomineralization. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **17**, 169-195.
- Cloud, P.E. (1988) *Oasis in Space: Earth History from the Beginning*. W.W. Norton.
- Cohen, B.A., Swindle, T.D. and Kring, D.A. (2000) Support for the lunar cataclysm hypothesis from lunar impact melt ages. *Science*, **290**, 1754-1756.
- Darwin, C. (1859) *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. Cambridge University Press. Also: <http://www.literature.org/authors/darwin-charles/the-origin-of-species/>
- Doolittle, W.F. (2000) The nature of the universal ancestor and the evolution of the proteome. *Current Opinion in Structural Biology*, **10**, 355-358.
- Farquhar, J., Thieme, M.H. and Jackson, T. (1998) Atmosphere-surface interactions on Mars: Delta O-17 measurements of carbonate from ALH 84001. *Science*, **280**, 1580-1582.
- Farquhar, J., Bao, H.M. and Thieme, M. (2000) Atmospheric influence of earth's earliest sulfur cycle. *Science*, **289**, 756-758.
- Fox, J.L. (1997) Upper limits to the outflow of ions at Mars: Implications for atmospheric evolution. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 2901-2904.
- Friedmann, I.E., Wierzbos, J., Ascaso, C. and Winklhofer, M. (2001) Chains of magnetite crystals in the meteorite ALH84001: Evidence of biological origin. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, **98**, 2176-2181.
- Gaidos, E.J., Nealson, K.H. and Kirschvink, J.L. (1999) Biogeochemistry: Life in ice-covered oceans. *Science*, **284**, 1631-1633.
- Golden, D.C., Ming, D.W., Schwandt, C.S., Lauer, H.V., Sock, R.A., Morris, R.V., Lofgren, G.E. and McKay, G.A. (2001) A simple inorganic process for formation of carbonates, magnetite, and sulfides in Martian meteorite ALH84001. *American Mineralogist*, **83**, 370-375.
- Greenwood, J.P., Mojzsis, S.J. and Coath, C.D. (2000) Sulfur isotopic compositions of individual sulfides in Martian meteorites ALH84001 and Nakhla: Implications for crust-regolith exchange on Mars. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **184**, 23-35.
- Grotzinger, J.P. and Knoll, A.H. (1999) Stromatolites in Precambrian carbonates: Evolutionary mileposts or environmental dipsticks? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **27**, 313-358.
- Han, T.M. and Runnegar, B. (1992) Megascopic eukaryotic algae from the 2.1 billion year old Negaunne iron-formation, Michigan. *Science*, **257**, 232-235.
- Hedges, S.B., Chen, H., Kumar, S., Wang, D.Y.-C., Thompson, A.S. and Watanabe, H. (2001) A genomic timescale for the origin of eukaryotes. *BMC Evolutionary Biology*, **1**, 4.
- Horneck, G. (1999) European activities in exobiology in earth orbit: Results and perspectives. In Raulin, F., Kobayashi, K. and Brack, A. eds.: *Life Sciences: Exobiology*. Advances in Space Research, **23**, 381-386.
- Horneck, G., Bucker, H. and Reitz, G. (1994) Long-term survival of bacterial spores in space. *Advances in Space Research*, **14**, 41-45.
- Hutchins, K.S., Jakosky, B.M. and Luhmann, J.G. (1997) Impact of a paleomagnetic field on sputtering loss of Martian atmospheric argon and neon. *J. Geophys. Res. -Planets*, **102**, 9183-9189.
- Jakosky, B.M. and Phillips, R.J. (2001) Mars' volatile and climate history. *Nature*, **412**, 237-244.
- Kasting, J.F. (1993) Earth's early atmosphere. *Science*, **259**, 920-926.
- Kirschvink, J.L., Gaidos, E.J., Bertani, L.E., Beukes, N.J., Gutzmer, J., Maepa, L.N. and Steinberger, R.E. (2000) Paleoproterozoic snowball earth: Extreme climatic and geochemical global change and its biological consequences. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **97**, 1400-1405.
- Kump, L.R., Kasting, J.F. and Barley, M.E. (2001) Rise of atmospheric oxygen and the "upside-down" Archean mantle. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **2**, 2000GC 114.
- Mastrapa, R.M.E., Glanzberg, H., Head, J.N., Melosh, H.J. and Nicholson, W.L. (2001) Survival of bacteria exposed to extreme acceleration: Implications for panspermia. *Earth and Planetary Science Letters*, **189**, 1-8.
- Mileikowsky, C., Cucinotta, F.A., Wilson, J.W., Gladman, B., Horneck, G., Lindegren, L., Melosh, J., Rickman, H., Valtonen, M. and Zheng, J.Q. (2000) Natural transfer of viable microbes in space 1. From Mars to Earth and Earth to Mars. *Icarus*, **145**, 391-427.
- 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.
- Myers, J.S. and Crowley, J.L. (2000) Vestiges of life in the oldest Greenland rocks? A review of early Archean geology in the Godthabsfjord region, and reappraisal of field evidence for > 3850 Ma life on Akilia. *Precambrian Research*, **103**, 101-124.
- Nair, H., Allen, M., Anbar, A.D., Yung, Y.L. and Clancy, R.T. (1994) A photochemical model of the Martian atmosphere. *Icarus*, **111**, 124-150.
- Owen, T. (1992) The composition and early history of the atmosphere of Mars. In Kieffer, H.H.,

- Jakosky, B.M., Snyder, C.W. and Matthews, M.S. eds. : *Mars*. The University of Arizona Press, 818 834.
- Pavlov, A.A., Kasting, J.F., Brown, L.L., Rages, K.A. and Freedman, R. (2000) Greenhouse warming by CH₄ in the atmosphere of early Earth. *J. Geophys. Res. -Planets*, **105**, 11981 11990.
- Pavlov, A.A., Brown, L.L. and Kasting, J.F. (2001) UV shielding of NH₃ and O₂ by organic hazes in the Archean atmosphere. *J. Geophysical Research*, **106**, 23267 23287.
- Rye, R., Kuo, P.H. and Holland, H.D. (1995) Atmospheric carbon-dioxide concentrations before 2.2-billion years ago. *Nature*, **378**, 603 605.
- Sano, Y., Terada, K., Takahashi, Y. and Nutman, A.P. (1999) Origin of life from apatite dating? *Nature*, **400**, 127.
- Schopf, J.W. (1993) Microfossils of the early Archean Apex Chert New evidence of the antiquity of life. *Science*, **260**, 640 646.
- Schopf, J.W. and Klein, C. (1992) *The Proterozoic biosphere: A Multidisciplinary Study*. Cambridge University Press.
- Schopf, J.W. and Packer, B.M. (1987) Early Archean (3.3-billion to 3.5-billion-year-old) microfossils from Warrawoona Group, Australia. *Science*, **237**, 70 73.
- Schutz, M., Brugna, M., Lebrun, E., Baymann, F., Huber, R., Stetter, K.O., Hauska, G., Toci, R., Lemesle-Meunier, D., Tron, P., Schmidt, C. and Nitschke, W. (2000) Early evolution of cytochrome bc complexes. *J. Molecular Biology*, **300**, 663 675.
- Summons, R.E., Jahnke, L.L., Hope, J.M. and Logan, G.A. (1999) 2-methylhopanoids as biomarkers for cyanobacterial oxygenic photosynthesis. *Nature*, **400**, 554 557.
- Sumner, D.Y. (1997) Carbonate precipitation and oxygen stratification in late Archean seawater as deduced from facies and stratigraphy of the Gamohaana and Frisco Formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *American J. Science*, **297**, 455 487.
- Thomas-Keprta, K.L., Bazylinski, D.A., Kirschvink, J.L., Clemett, S.J., McKay, D.S., Wentworth, S.J., Vali, H., Gibson Jr., E.K. and Romanek, C.S. (2000) Elongated prismatic magnetite crystals in ALH84001 carbonate globules: Potential Martian magnetofossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**, 4049 4081.
- Thomas-Keprta, K.L., Clemett, S.J., Bazylinski, D.A., Kirschvink, J.L., McKay, D.S., Wentworth, S.J., Vali, H., Gibson, E.K.J., McKay, M.F. and Romanek, C.S. (2001) Truncated hexa-octahedral magnetite crystals in ALH84001: Presumptive biosignatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, **98**, 2164 2169.
- Veizer, J. (1994) *Geochemistry of Carbonates and Related Topics: Database*. Ruhr University, Bochum.
- Wadhwa, M. (2001) Redox state of Mars' upper mantle from Eu anomalies in Shergottite pyroxenes. *Science*, **291**, 1527 1530. <http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/291/5508/1527.pdf>
- Weiss, B.P. and Kirschvink, J.L. (2000) Life from space? Testing panspermia with Martian meteorite ALH84001. *The Planetary Report*, **20**, 8 11.
- Weiss, B.P., Kirschvink, J.L., Baudenbacher, F.J., Vali, H., Peters, N.T., MacDonald, F.A. and Wikswo, J.P. (2000) A low temperature transfer of ALH84001 from Mars to Earth. *Science*, **290**, 791 795.
- Weiss, B.P., Vali, H., Baudenbacher, F.J., Stewart, S.T. and Kirschvink, J.L. (2001) Records of an ancient Martian magnetic field in ALH84001. *Lunar and Planetary Science*, **XXXII**, 1244. pdf. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2001/pdf/1244.pdf>
- Yung, Y.L. and DeMore, W.B. (1999) *Photochemistry of Planetary Atmospheres*. Oxford University Press.

(2003年3月18日受付, 2003年4月1日受理)