
 総説

生命の起源—宇宙生物学へのアプローチ—

Origin of Lives - Approach to the Cosmic Biology -

小出良幸

神奈川県立生命の星・地球博物館

Yoshiyuki Koide

Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, 499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Abstract. Recently, some new scientific attainments on the origin of the life are reported. They led to an important discussion on the nature of life. The life, in this paper, means the whole living existence which indicates both terrestrial organisms and extra-terrestrial organisms, and both present organisms and fossil organisms. The origin of life should be revealed by the wide scientific fields such as astronomy, planetary science, meteorite science, geology (paleontology), organic synthetic science, terrestrial biology. I extracted the achievement on the life's origin from these fields, and reviewed them.

Key Words : Origin of lives, Terrestrial organisms, Cosmic biology

I はじめに

「生命が地球固有である」ということを論理的に証明することは非常に難しい。否定するには一つの反例があればよい。生命は「地球固有」でなく、「宇宙生命の多様性の一つ」であるという考えの研究者も多い。「宇宙における生命の多様性」を発見する試みがことごとく失敗していく中で、「地球固有」というあきらめに似た定説ができつつあった。

1996年8月、その定説を覆すような発見があった。火星起源隕石から生命の痕跡（化石）らしきものが発見されたのである（McKay et al., 1996）。その報告の真偽は、今も研究者の間で議論が続いている。「いる」か「いないか」のどちらかに決着するとしても、非常に大切な議論を起こす起爆剤となった。

一方、地球生命に関してもいくつかの重要な発見があった。今まで地球最古の生物化石とされていた35億年前の生物化石より3億年も古い生命の痕跡が発見のである（Mojzsis et al., 1996）。生命をいかに定義するか、いかに検出するかなど重要な議論を起こした。

McKeyらの論文もMojzsisらの論文も、最新の分析装置の発達に負うことが大きい。微小部分における高精度の同位体組成測定による新知見に基づいたものである。技術の進歩によって、より古い生命の発見や、今まで全く知られなかった生命を発見できる可能性を示したのである。2つの報告で、より生命の根源に迫る議論が起ってきた。

このような論文によって、「生命とは何か」、「生命を

いかに定義するか」、「生命の認定法」などが再検討されるようになってきた。しかし、基礎としているのは、地球生物学である。地球生物学をより一般化して宇宙生物学へと変換するには、生命の根源を知る必要がある。本論文では、エポック・メイキングな論文とその周辺の議論をまとめ、あわせて生命の起源に関する各分野の研究の方法と、最近の動向をまとめる。

II アプローチの方法

生命が、地球外からもたらされたという考えもある。しかし、その生命はどこで発生したかという、「鶏と卵とどちらが先か」のような堂々めぐりの議論が始まりかねない。地球で生命が発生し得ないということが証明されてから、議論すべきテーマであろう。一般には、ある天体の生命は、その天体で独自に発生、発達したという考え方にに基づき、研究が進められるべきであろう。

アプローチの方法として、天文学的アプローチ、惑星科学的アプローチ、隕石学的アプローチ、地質学的アプローチ、合成実験的アプローチ、地球生物学的アプローチに大分される。

天文学的アプローチとは、太陽系外の天体に生命の有無を調べることである。しかし、現状では生命の有無よりも、生命が存在しうる環境（材料物質の有無や惑星の有無）を探索したり、知的生命の存在の有無を調べている。

惑星科学的アプローチは、太陽系内で生命の有無を調べるものである。遠くの天体では望遠鏡や探査機による

表1 有機物の一覧

地球**核酸塩基**

アデニン、クアニン、シトシン、チミン、ウラシル

アミノ酸

グリシン、アラニン、バリン、ロイシン、イソロイシン、メチオニン、プロリン、フェニルアラニン、リプトファン、セリン、トレオニン、システイン、チロシン、アスパラギン、グルタミン、アスパラギン酸、グルタミン酸、リジン、アルギニン、ヒスチジン

糖質

グリセルアルデヒド、ジヒドロキシアセトン、キシロース、グルコース、フルクトース、マンノース、ガラクトース、フコース、グルクロン酸、イズロン酸、グルコサミン、ガラクトサミン、N-アセチルグルコサミン、N-アセチルガラクトサミン、N-アセチルムラミン酸、N-アセチルノイラミン酸、グリセロール、イノシトール、ショ糖、麦芽糖、乳糖、セロビオース、トレハロース、アミロース、セルロース、キチン、ヒアルロン酸、コンドロイチン6硫酸、ケラタン硫酸、ヘパリン

脂肪酸

ラウリン酸、ミリスチン酸、パルミチン酸、ステアリン酸、オレイン酸、リノール酸、リノレン酸、アラキドン酸

隕石**核酸塩基**

アデニン、クアニン、ピボキサンチン、ウラニル、チミン

核酸塩基誘導体

4-ヒドロキシピリミジン、4-ピロキシミチルピリミジン、4-ピロキシ2-メチルピリミジン、キサンチン

核酸塩基様化合物

メウミン、シアヌル酸、クアニル尿素

アミノ酸

グロシン、アラニン、バリン、プロリン、イソロイシン、ロイシン、β-アラニン、N-メチルグリシン、N-エチルグリシン、N-メチルアラニン、イソバリン、ノルバリン、セリン、アスパラギン酸、グルタミン酸、α-アミノ-n-酪酸、α-アミノ-i-酪酸、β-アミノ-n-酪酸、β-アミノ-i-酪酸、γ-アミノ酪酸、ピペコリン酸、α-アミノアジピン酸、スレオニン、サルコシン、スレオニン、プロリン

カルボン酸

酢酸、シュウ酸、グリコース酸、プロピオン酸、マロン酸、乳酸、酪酸、2-メチルプロピオン酸、イソ酪酸、コハク酸、α-ビドロキシ酸、α-ヒドロキソ酸、吉草酸、2-メチル酪酸、3-メチル酪酸、2,2-ジメチルプロピオン酸、クルタル酸、メチルコハク酸、α-ヒドロキシ吉草酸、α-ヒドロキシイソ吉草酸、α-ヒドロキシ-α-メチル酪酸、ヘキサン酸、2-メチル吉草酸、3-メチル吉草酸、4-メチル吉草酸、2,2-ジメチル酪酸、2,3-ジメチル酪酸、3,3-ジメチル酪酸、2-エチル酪酸、アジピン酸、2,2-ジメチルコハク酸、2,3-ジメチルコハク酸、3-メチルグルタル酸、ヘプタン酸、ヘキサン酸、アクトン酸、オルト-,メタ-,パラ-メチル安息香酸、フェノール、ノナン酸、デカン酸、ウンデカン酸、安息香酸、ドデカン酸、フェニル酢酸

芳香族炭化水素

ナフタレン、ジメチルナフタレン、1-メチルナフタレン、2-メチルナフタレン、2,6-ジメチルナフタレン、1,3-ジメチルナフタレン、ピフェニル、ジフェニルメタン、c-3ナフタレン、アセナフテン、フルオレン、c-4ナフタレン、フェナントレン、アントラレン、メチルフェナントレン、1-メチルフェナントレン、フルオランセン、ピレン

宇宙空間**簡単な水酸化物、酸化物、ハロゲン化合物など**

H₂、HCl、H₂O、N₂O、CO、SiO₂、SO₂、OCS、NH₃、SiH₄、C₂、CH₄、CS、SiS、H₂S、PN、NaCl、AlCl₃、KCl、AlF₃

ニトリル、アセチレン誘導体など

C₃、C₅、C₃O、C₅O、C₄Si、HCN、HC₃N、HC₅N、HC₇N、HC₉N、HC₁₁N、HC₂CHO、CH₃CN、CH₃C₃N、CH₃C₅N、CH₃C₇N、CH₃C₉N、CH₃CH₂CN、CH₂CHCN、HNC、HNCO、HNCS、HNCCC、CH₃NC、HCCNC、C₂H₄、C₂H₂

アルデヒド、アルコール、エーテル、ケトン、アミドなど

H₂CO、H₂CS、CH₃CHO、NH₂CHO、CH₃OH、CH₃CH₂OH、CH₃SH、(CH₃)₂CO、HCOOH、HCOOCH₃、(CH₃)₂O、H₂CCO、CH₂NH、CH₃NH₂、NH₂CN、CH₂CC、CH₂CCC、CH₃COOH、H₂C₃、H₂C₄、H₂C₆

環状分子

c-C₃H₂、SiC₂、c-C₃H、c-C₂H₄O

分子イオン

CH⁻、HCS⁻、CO⁻、HCO⁻、HOCO⁻、H₂COH⁻、HCNH⁻、HC₃CH⁻、SO⁻、H₃O⁻、HOC⁻、HN₂⁻、H₃⁻

ラジカル

OH、CH、CH₂、NH、NH₂、HNO、C₂H、C₃H、C₄H、C₅H、C₇H、C₆H、C₈H、CN、C₃N、HCCN、CH₂CN、CH₂N、NaCN、C₂O、NO、SO、HCO、MgNC、MgCN、C₂S、NS、SiC、SiN、CP

地球生命の生体物質は代表的なものだけを示した。隕石中の有機物は、各種の炭素質コンドライトで発見されたもの示した。宇宙空間の有機物は1997年6月までに観測されたものを示した。データは国立天文台(1997)、下山(1987)による。

リーモートセンシングで生命の痕跡を探し、近くの天体では探査機を着陸させ、カメラや検証実験によって生命の有無を確認することが可能である。天文学と惑星科学的アプローチは距離が離れるに従って、情報量が減り、より高度の情報を発信する生命しか捕らえることができない。

隕石学的アプローチは、地球外物質で分析可能な試料あるいは惑星材料物質として隕石の中から生命の材料や痕跡を探すものである。炭素質コンドライトや火星起源隕石はその重要な試料となっている。

地質学的アプローチは、地球生命の起源や進化を過去の地層から探るものである。過去になるほど生命は単純

で硬質部が少なくなるため、保存されにくい。また、初期の生命は単純で有機物の複合も少なく分解されやすい。生命であるという認定は時代が古くなるほど議論を呼ぶ。

合成実験的アプローチは、生命の誕生を再現しようというもので、古くから取り組まれている。その結果、生命の合成まではいっていないが、生命の起源に関してかなり重要な情報が得られている。

地球生物学的アプローチは、いわゆる現在ある生物学からのアプローチである。生物学は現世の生物のメカニズムをある程度明らかにした。しかし、その起源については解明されていない。

Ⅲ 天文学的アプローチ

天文学的に生命の起源を探る試みはいくつかなされている。宇宙空間に生命の材料となるような分子があるかどうかを調べたり、直接地球外の知的生命を探したり、理論的あるいは哲学的なアプローチの仕方がある。

1 宇宙空間の有機物

宇宙空間の主成分は H_2 と He である。しかし、その他の成分も量は少ないながら含まれている。O、C、N など有機物合成に不可欠な成分もある。宇宙線によって分子合成がおこなわれている（西，1984）。多くは低分子量の成分であるが、生命の材料として重要な成分もたくさん発見されてきた（表1）。このような成分から直接生命が合成されることはないであろう。しかし、このような分子の存在は、宇宙空間のような真空中に近い低密度、極低温、低エネルギー状態であっても分子合成が可能であることを示している。生命の材料物質は、特別な元素や特別な物理化学的条件を必要とするものではない。ごくありふれた存在であることを示している。宇宙は生命の材料合成の場として不適ではない。まして、天体上の恵まれた環境では、生命の合成はより有効におこなわれるであろう。

2 地球外生命の探査

1959年9月19日のイギリスの *Nature* 誌に Cocconi & Morrison による「星間通信への模索」という論文が掲載された。この論文で、始めて地球外知的生命について科学的議論がされた。そして1960年春、Ozma 計画で地球外知的生命の探査が実施された。1960年11月1日から2日、Greenbank 天文台で「地球外知的生命体に関する Greenbank 会議」が開催され、研究者が地球外生命に関して真剣な取り組みを始めた。

地球外生命の探査は困難である。遠い天体上での生命活動の有無の探査である。このような探査は、地球上の生命を宇宙から検出できるかどうかという問題に交換できる。酸素の多い大気が生命活動に由来しているのであれば、地球を太陽系内から生命の星として検出することは可能である。しかし、他の恒星の惑星系の大気状態は、今の技術では知ることができない。他の恒星の惑星系の存在がやっと検出できるようになったにすぎない（井田，1997）。

地球外の生命よりも、文明を持つ知的生命を探すこと

が現在の主要な探査のテーマとなっている。地球外文明は、太陽系にはないので、太陽系外の天体での探査となる。地球外文明の探査は、地球外生命よりもっと少ない数の探査になる。しかし、探査は比較的効率が良いはずである。それは、電波による人工の信号を探知すればよいからである。

地球外知的生命を ET または ETI (Extra-Terrestrial Intelligence) と呼んでいる。このような ET を探査する研究分野を SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence) という。UFO (Unidentified Flying Object) や SETI はかつては空想のエセ科学のようなとらえ方をされていたが、今ではれっきとした科学の一分野として確立されている（大島，1984；平林・寿岳，1984）。表2に今までおこなわれた地球外生命の探査の歴史をまとめた（横尾，1991）。

調べる対象の星は、地球から25光年あるいは50光年の距離が一つの目安になる。その理由は、TV 電波（電離層を突き抜ける）が利用されてほぼ50年たつためである。50光年の距離の星は、最初の TV 放送を今見ていることになる。また、25光年の距離は、最初の TV 放送を見て、地球に文明があること知り、折り返し返事を送ったとしたら、メッセージが着く距離である。このような意味で、25光年と50光年は重要な区切りとなる。

地球外文明の存在する確率を推定する式が、Drake (1961) によって提案されている。これは Drake の式あるいは Drake-Sagan の式、Greenbank 方程式とも呼ばれている。

$$N = R \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

ここで N (個) は求めるべき銀河系内の文明の数である。銀河系内としたのは、我々にとって意味を持つ文明とは、銀河系内に限られるはずである。現実的にコンタクト可能な星の母集団を銀河とするのは、ごく普通的前提である。銀河系内の恒星の数 R (個/年)、誕生した恒星が惑星を持つ確率 f_p (個/個)、その惑星の中で生命生存に適した惑星が存在する確率 n_e (個/個)、その惑星上で生命が発生・進化した確率 f_i (個/個)、生命から知性が発生する確率 f_c (個/個)、その知性が文明をつくる確率 f_c (個/個)、その文明の継続する長さ L (年)、である。ここでいう文明とは、宇宙空間へ向けて電波による交信能力を持ち、そして実行能力のある技術文明をいう。

このような方程式の変数に数値を代入する場合、「メディアオクリティの仮定」という一般哲学の仮定を導入する (Rood & Trefil, 1981)。この仮定は、「太陽系あるいは地球は、宇宙で何ら特別な存在ではない」というものである。

地球は天体として普遍性と特異性をもつ。地球は主系列星の G2 型星の惑星系に属するごくありふれた天体である (小出，1994；1995b；1997；小出・山下，1995；1996b)。地球は大きな衛星系 (月) や強い磁場 (小出，1997；小出ほか，1997a) を持ち、才差運動による周期的変動によって気候変動がおこる。ただし、その気候変動は生命を滅ぼすには至らない程度のものである。

この式の変数のうち正確にその数あるいは値が解っているのは少ない。いくつかの推定値があるにすぎない。

表 2 地球外文明の探査

期間	研究者	場所	アンテナ (m)	周波数 (MHz)	分解能 (Hz)	対象	限界感度 (Wm^{-2})	観測時間 (H)
1960	Drake (Ozma)	NRAO, U.S.A.	26	1,420-1,420.4 (H)	100	2 S	$4 \cdot 10^{33}$	400
1968-69	Troitsky et al.	Chimenki, USSR	15	926-928 1,421-1,423	13	12 S	$2 \cdot 10^{31}$	11
1970-	Troitsky et al.	USSR	Dipole	1,863 927 600		AS, Pulse	$10^{33} Hz^{-1}$	700
1971-72	Felshell (Ozma)	NRAO, U.S.A.	91	1,419.8-1,421	490	9 S	$5 \cdot 10^{34}$	13
			43	1,410-1,430	6,900		$2 \cdot 10^{23}$	
1972-76	Palmer et al. (Ozma II)	NRAO, U.S.A.	91	1,415-1,425 1,420.1-1,420.7	64,000 4,000	600 S	$1 \cdot 10^{33}$ $3 \cdot 10^{24}$	500
1972-	Kardashev	Eurasia, USSR	Dipole	1,337-1,863		AS, Pulse	$10^{32} Hz^{-1}$	
1973-	Dixon & Cole	Ohio Univ., U.S.A.	Dipole	1,420.40	20,000-100,000	AS, Beacon	$1.5 \cdot 10^{31}$	Allways
1974-	Bridle & Feldman	Argonquin, Canada	46	22,200 (H ₂ O)	30,000	500 S		
1975-76	Drake & Sagan	Arecibo, U.S.A.	305	1,420 1,653 2,380	1,000	4 G	$3 \cdot 10^{35}$	100
1976-	Serendip	Barkeley, U.S.A.	26	1,410-1,430 1,853-1,873 917-937	2,500	AS	$5 \cdot 10^{34}$	
1976	Clark et al.	NRAO, U.S.A.	43	8,522-8,523	5	4 S	$2 \cdot 10^{34}$	7
1977	Black et al.	NRAO, U.S.A.	91	1,665-1,667 (OH)	5	200 S	$4 \cdot 10^{25}$	100
1977	Drake & Stale	Arecibo, U.S.A.	305	1,664-1,668	2.5	6 S	$8 \cdot 10^{34}$	10

AS: all sky (全天), S: stars (星), G: Galaxies (銀河)。データは横尾 (1991) のコンパイルによる。

銀河系内の星の数は 10^{11} 個である。恒星の寿命はその質量に依存する (小出, 1997)。質量が大きいほど寿命は短くなる。多くの主系列星の質量は太陽質量程度である。太陽質量程度の星の寿命は100億年 (10^{10} 年) である。従って星の生成率は年間数十~数個となる。この数は正確性を欠き、数桁の変化も起こりうる。

恒星が惑星を持つ確率は、最近では、比較的はっきりしてきた。それは、最近主系列星の周りで惑星が発見されたからである。従来、恒星の動きの揺れから、随伴する惑星 (不可視伴星) の存在を推定していた。Mayor & Queloz (1995) がペガサス座51番星の周りに木星程度の質量の星を発見して以来、今では10個の太陽系外惑星が発見された (井田, 1997)。これによって惑星の存在の確率は0から1に近づいた。また、太陽系形成のシミュレーションや標準モデルを見ると、惑星の形成は必然性がありそうである。このようなことから、恒星が惑星系を持つ確率は1に近いと考えられる。

惑星の中で生命生存に適した惑星の存在確率 n_e や生命から知性が発生する確率 f_i 、その知性が文明をつくる確率 f_c 、その文明の継続年 L は正確にはわからない。従って、銀河系内の文明の数 N は不明である。

Drake の式を強引に試みた結果、楽観的なシナリオでは N が 5×10^6 個、悲観的なシナリオでは限りなく0に近い値、中立的なシナリオでは1.25個となる (表3)。

このような各種の計算結果がどの程度信じられるのか現在評価できない。だが、もしメディアオクリティの仮定を導入すれば、導ける結論は、我々は銀河系内で最初の高度文明であるか、ほかにも高度文明があるがまだ我々のところに届いてないということになる。中立的な計算結果の1.25個という値は、非常に意味深長である。1.25個のうち一個が地球だとすると、残りの0.25個は地球外文明の数である。

もし文明の数が決まれば、現在のテクノロジーでの通信が可能かどうか分かる。文明を持つ天体同士の平均距離 (文明間平均距離) d は、

$$d = (R/N)^{1/3}$$

という式で求められる。 N は上で求めた値である。 R は銀河系の半径である。 $d/2$ を電磁波の速度 (光速) で割った値が、文明の継続年 L より短ければ、通信は不能となる。

3 テクノロジー文明の分類

Kardashev は、文明をいくつかに分けた (表4)。I型文明、II型文明、そしてIII型文明の3つである。

I型文明は、一つの惑星上で利用できるエネルギーを使っている文明をいう。地球文明はこのレベルで、今後しばらくはI型文明の状態が続く。地球の知的生命・人類は、地球生命の特性を持ち好奇心が旺盛で、ニッチがあればそこを目指すという習性を持つ。そのため、長く文明が継続すれば、人類は宇宙空間へ進出するはずである。今は、地球軌道付近がターゲットになっているが、月面にも人類の足跡が刻まれている。今後も地球外への進

表 3 銀河系内の地球外生命存在率

記号	内容	楽観論的	中立	悲観論的
R	星の形成速度	100	10	0.005
f_p	惑星形成率	0.3	0.1	~ 0
n_e	生活可能惑星存在率	0.2	0.05	~ 0
f_i	生命発生率	0.5	0.01	~ 0
f_i	知的生命発生率	1.0	0.5	~ 0
f_c	通信文明発生率	1.0	0.5	~ 0
L	文明時代の長さ	10^6	10^4	10^2
N	通信可能知的生命数	3×10^6	1.25	~ 0

表4 テクノロジー文明の分類

文明	利用量	エネルギー (erg/sec)	空間領域
I型	地球人類程度	10^{19}	1つの惑星表面
II型	恒星の全出力	10^{33}	恒星を囲む空間
III型	銀河の全出力	10^{44}	銀河系全体

データは横尾(1984)による。

出は続くであろう。ただ、宇宙への進出は非常にコストがかかる。そのため、商業的にメリットがあるか、コストに関わらず進出しなければならないような非常事態が起こった時などが、宇宙への進出の動機となるであろう。

その前に、現在直面している危機を乗り越えなければならない。現在、地球において人類を襲いそうな危機として、エネルギー危機、食糧危機、資源の枯渇、人口増加などが考えられる。過去にも、何度も危機があったが、人類は知恵で克服してきた。次回も大丈夫という保証はない。このような危機を乗り越えた時、次への飛躍ができる。それが地球外進出である。地球外へ進出した人類は、太陽エネルギーを最大のエネルギー源として、地球軌道から、周りの惑星軌道へと進出するはずである。

ここで一つの選択として、人類は進歩を諦めるということもあり得る。惑星内での「鎖国」である。人類の歴史において鎖国を選択したこともあった。「鎖国」の終了は、外部からの圧力と内部からの圧力の二つがある。外部からの圧力とはETから「開国」要求である。しかし、今のところ、この可能性は不明である。Drakeの式のNやdの値が決定すれば推測も可能であろう。「鎖国」が続くのはせいぜい数100年程度である。人類の歴史を見る限り、すべての「鎖国」には終わりがある。内在する人類自身の外への圧力が、「鎖国」終了の原因である。

II型文明は、惑星が属している恒星が出しているエネルギーを使うタイプである。I型文明でも恒星のエネルギーを使っているが、II型文明では恒星のほとんどのエネルギーを利用してしまふものである。ダイソン文明と呼ばれる。黄道面上にリング状の構造物で構成の放射エネルギーを利用したり、恒星をすべて包むものだったりする。II型文明は外からは、恒星の光あるいは電磁波がもれず、探知できないかもしれない。しかし、エネルギーとはいえ劣化がおこり、その劣化したエネルギーは赤外線として宇宙に放出されると考えられる。発展したII型文明は、恒星クラスの赤外線源を探せばよいことになる(Dyson, 1960)。この仮定が正しければ、II型文明はI型文明より発見しやすいかも知れない。また、II型文明が他の知的生命と交信を希望すれば強力な人工の電波源となるであろう。

II型文明が発展してくると、近隣への恒星系へと進出が始まるであろう。その増殖の程度は、星間を移動するスピードが上限となる。光速(c)より当然遅い速度(v)での増殖となる。II型文明の増殖によってその銀河全体に広がるのにかかる時間は、(銀河直径)/vである。

この時間と銀河の年齢 10^{10} 年が比較対照される。そして、速度が充分速ければ、文明化された銀河が可能となる。

III型文明は銀河全体のエネルギーを使いこなす文明をいう。発展したII型文明からIII型文明は、我々の銀河には存在しない。それは、地球にまだ、知的生命が訪問したという事実がないからである。

4 Fermiのパラドックス

人類の発達性から類推すると、知的生命はやがては生まれた天体の外へも拡散すると考えられる。そして発展した文明になると、論理的に矛盾が生じる。知的生命はIII型文明まで発展しようのに、我々人類は、ETとの接触や文明の痕跡を観測していないという事実と矛盾している。Fermiはこのような状態をかくれんぼ遊びにたとえて、"Where is everybody?"という疑問を發した。このような矛盾をFermiのパラドックスと呼ぶ。

世間にはUFOの存在を信じている人がいるが、科学的に実証されていない。「異星人が地球に飛来したことはない」という事実は"Fact A"と命名され(Hart, 1975)、これを前提に科学的議論をすべきとされている。

N=1なのかN>1なのか、それが問題である。N=1であれば、他文明もないし、SETIはお金の無駄遣いである。N>1であれば、Fermiのパラドックスをいかに説明するかが問題である。極論としては、我々の太陽系は、銀河文明の自然公園で、わざと放置されているという「動物園仮説」がある(Ball, 1973)。

現状では中立的な、接触できないほどdが大きいという考えが妥当であると考えられる。もしそうだとすると、我々人類はII型やIII型文明への発展は宇宙文明論的に難しいということになる。

5 パンスパーミア説

パンスパーミア説(panspermia)とは、胚種広布説とも呼ばれるものである。パンスパーミア説は、古くはArrheniusが1908年に提唱した。最近では、Hoyle & Wickramasinghe (1978)などが現在版パンスパーミア説を提唱している。パンスパーミア説は、生命は地球外から飛来したというものだが、現在ではその内容は多様化し、生命の地球外起源説の総称としてパンスパーミア説が使われている。

パンスパーミア説の起こりは、Pasteurの長フラスコによる生命の自然発生説の否定によって、地球外に生命の由来を求めようになったものである。

現在のパンスパーミア説は、多様である。Crick & Orgel (1973)では、他の文明生物が、地球に生命を打ち込んできたと考えた。Hoyle & Wickramasinghe (1973)では彗星で発生した生命が、地球に降ってきたという説で、生命は今も地球に降り、病原微生物にも地球外生物が含まれているという。

多くの説は、根拠が不十分であったり、実証されてなかったりで、信頼性が低い。その中で、Crick & Orgelの説は、一時重要視された。その根拠は、生体内のモリブデン(Mo)量の濃集があげられた。生体構成元素は基本的に、惑星の生命発生環境と類似すると考えられる。

表 5 火星探査の歴史

探査機名	国名	打ち上げ日	到達日	結果
None	U.S.S.R.	1960/10/14		地球の軌道にのれず
None	U.S.S.R.	1962/10/24		地球の軌道を離脱できず
Mars1	U.S.S.R.	1962/11/1		1963年3月21日、地球から1億560万kmで通信途絶
None	U.S.S.R.	1962/11/4		地球の軌道を離脱できず
Mariner3	U.S.A.	1964/11/5		打ち上げ後に耐熱カバーがはずれず、失敗
Mariner4	U.S.A.	1964/11/28	1965/7/14	最初の探査機、9850km上空を通過、22枚の写真撮影
Zond2	U.S.S.R.	1964/11/30		途中で通信途絶
Zond3	U.S.S.R.	1965/7/18		火星の軌道を通過、通信テスト
None	U.S.S.R.	1967/3/27		打ち上げに失敗?
Mariner6	U.S.A.	1969/2/24	1969/7/31	火星を通過して75枚の写真を送信
Mariner7	U.S.A.	1969/3/27	1969/8/4	火星を通過して126枚の写真を送信
None	U.S.S.R.	1969/3/27		詳細不明
None	U.S.S.R.	1969/4/14		詳細不明
Mariner8	U.S.A.	1971/5/8		打ち上げ失敗
Cosmos419	U.S.S.R.	1971/5/10		地球の軌道を離脱できず
Mars2	U.S.S.R.	1971/5/19	1971/11/27	周回に成功、probeは墜落して故障
Mars3	U.S.S.R.	1971/5/28	1971/12/2	周回に成功、着陸船が地表に到達、110秒間作動
Mariner9	U.S.A.	1971/5/30	1971/11/13	1972年10月27日まで周回し写真7329枚を撮影
Mars4	U.S.S.R.	1973/7/21		1974年2月10日に火星を通過したが周回軌道に乗れず
Mars5	U.S.S.R.	1973/7/25	1974/2/12	周回軌道にのる
Mars6	U.S.S.R.	1973/8/5	1974/5/12	着陸失敗
Mars7	U.S.S.R.	1973/8/9		1974年3月9日行方不明
Viking1	U.S.A.	1975/8/20	1976/6/19	2450枚の写真撮影、probeはクリセ平原に着陸
Viking2	U.S.A.	1975/9/5	1976/8/7	2170枚の写真撮影、probeはユートピア平原に着陸し
Phobos1	U.S.S.R.	1988/7/7		通信途絶
Phobos2	U.S.S.R.	1988/7/12	1989/1/29	周回軌道に乗り写真撮影したが通信途絶
Marsglobalsurveyer	U.S.A.	1996/11/7	1997/9/12	火星周回軌道に入る
Mars'96	C.I.S.	1996/11/16		失敗
Marspathfinder	U.S.A.	1996/12/4	1997/7/4	ローバーで火星表面を探査

小出・山下(1996a)のコンパイルに天文年鑑編集委員会(1997)のデータを加えた。

海水や地殻構成成分を考えると、生命はMoに豊んでいる。したがって、地球生命はMoの多い天体から由来しているという考えである。しかし、原始海水組成を再測定してみると、Moの異常ではなくなったため、この議論は終結した。

バンスパーミア説は、いまのところ論理的に完全に否定されたわけではない。太陽系は、宇宙ではごくありふれた化学成分から構成されており、元素組成に特異性は見られない(小出, 1997)ことから、地球外生命も似たような元素組成でできているかもしれない。地球外知的生命が、タネが育ちやすい、化学組成の同じ天体として地球を選び、送り込まれたとしても区別できない。

IV 惑星科学的アプローチ

惑星科学的アプローチは、太陽系の惑星をターゲットにしている。地球から探査機を送り生命の有無を調べるものである。多くの探査は、生命探査を目的にしたものではなく、惑星の物理的・化学的状態を詳しく調べるものであった。その中には、惑星表面に着陸して写真を撮る探査もあった。そこに生命がたくさんいれば、どのような目的の写真であろうとも探知できる。ここでは探査の

概要と惑星科学から見た生命発生の条件をまとめる。

1 惑星探査

人類がロケットを飛ばし始めたのは1950年代にまで遡る。第二次世界大戦後、ドイツの有能なロケット学者を得たU.S.A.とU.S.S.R.は、宇宙に目を向けて激しい争いをおこなった。1970年代から1980年代は、まさに宇宙時代と呼ぶにふさわしく、他の天体への各種の探査計画が実行に移された(小出・山下, 1996a; 小出ほか, 1997b)。

水星は太陽に近い惑星で、地球からの観測も難しく、詳細が永く不明であった。しかし、Mariner10が1974年3月と9月、1975年3月の3回の接近をおこない、写真撮影をして水星の情報が格段に増した。

金星は厚い大気におおわれているため、直接地表の様子を見ることができない。金星の周回軌道上からレーダーを用いて表面地形を観測する方法と、Probeをおろして観測する2通りの探査法がとられた。1967年にU.S.S.R.のVenera4が初めて表面に硬着陸し、1970年にVenera7は表面に到達するまでデーターの伝送をおこなった。1982年にVenera13、14では表土の直接分析がおこなわ

れた。一方、レーダーによる観測は、1978年に U.S.A. の Pioneer Venus 1 や、1983年に U.S.S.R. の Venera15、16が周回軌道上からおこなった。U.S.A. の Magellan でのレーダー観測で、詳細な地図が作られた。

火星の大気は薄いため、表面の様子が比較的良く観測できた。火星は古くから天文学的観測がおこなわれた。火星探査では(表5)、1965年に U.S.A. が探査機 Mariner 4を送り、上空9,850kmから22枚のクローズアップ写真を撮った。つづいて、1971年に Mariner 9も火星の周回軌道に乗り多くの写真を送ってきた。1976年には U.S.A. の Viking 1と2による生命体の探査がおこなわれた。残念ながら生命の存在も痕跡も発見されなかった。1975年(C.I.S. では1988年)以来、探査されていなかった火星が1996年から再び探査されるようになった。探査空白の時代は、政治、経済の情勢の反映である。しかし、Marspathfinderの成功によって、継続的探査が期待できる。

火星の流水活動は、大きく2つに区分される(佐々木, 1997a; 1997b)。バレーネットワーク(valley network)とアウトフローチャンネル(outflow channel)である。バレーネットワークは衝突クレーターの外縁から出た流路が集まって大きく深い谷になっていく。そして平地に到達すると地形が消える。バレーネットワークは、40億年前の火星が氷点前後の温暖な気候であったことを示している。アウトフローチャンネルは大量の水が非常に短時間に流出したもので、マリネリス峡谷及びその周辺である。水の量は、火星全体を40mの厚さでおおうほどと見積られる。アウトフローチャンネルはバレーネットワークより新しい時期(25億年前以降)に形成された。

太陽光度が過去ほど低い(40億年前は現在の70%)という状態の時に水の存在する温暖な気候であったのに、後の光度の大きい時期ほど寒いというパラドックスが生じる。温室効果も大気量も過去に多く現在は少ないため有効ではない。火星の表面温度のパラドックスはまだ未解決である。

外惑星の探査は、U.S.A. の Pioneer10,11そして Voyager 1、2が外惑星に接近した。木星、土星、天王星そして海王星の鮮明な画像を得た。そして、木星で3つの衛星を土星で8個の衛星、天王星で10個の衛星、海王星で6個の衛星を発見した。

ハレー彗星が太陽に接近した時、世界各国が合計6機の探査機をハレー彗星に向かわせた。その結果、彗星の実体が汚れた雪だるまであることを明らかにした。

2 生命探査

生命の存在について正面切っておこなわれた惑星探査は、U.S.A. の Viking 計画である。

1976年 Viking 1の着陸船はクリセ平原に、Viking 2の着陸船はユートピア平原にそれぞれ着陸した。「火星生命」を検出するための実験をおこなった。Vikingでの生物実験は、3つの実験装置とガスクロマトグラフ質量分析計を結びつけておこなわれた。呼吸実験、新陳代謝実験、光合成実験、有機物検出実験であった(河島・小池, 1997)。

・呼吸実験(ラベル放出実験)は、 ^{14}C でラベルした栄養液を砂に与え、二酸化炭素ガスなどになってでてくる代謝ガスを検出する。

・新陳代謝実験(ガス交換実験)は、砂に栄養物を少量加え、出てきたガスの成分を調べる。

・光合成実験(炭酸同化実験)は、砂に ^{14}CO 、 $^{14}\text{CO}_2$ と H_2O をいれ、数日間光を当てる。砂を熱し有機物を追い出し、その有機物を分解して質量分析する。

・有機物検出実験は、ガスクロマトグラフ質量分析計で極微量の有機物を検出する。

このガスクロマトグラフ質量分析計は生体有機分子なら ppb レベルの分解能を持っており、メタン程度の簡単な分子でも ppm レベルあれば分析可能な装置である。地球なら南極の土からでも有機物が検出できる精度である。

4つの実験すべてにおいて、生物の存在に対して否定的結果がでた。そのため、火星には生命の痕跡すらないものとあきらめられていた。

楽観的あるいはより厳密な意味では、Vikingによる実験は、直径数十メートルの2地点の火星表面に、当時は生命活動が存在しなかったということになる。従って、生命現象に関して、Viking計画が否定したものはあまりなかったという見解にも立ちうる。

生命が存在しないということを証明することは非常に難しく、存在するということは1つの実例がえられれば証明できる。その証明になり得るのが、火星起源隕石からの生命の痕跡発見の報告(McKey et al., 1996)であった。決着は、現在進行している Marspathfinder や次期火星探査の結果を待たなければならない。

3 生命発生の条件

生命が天体上で発生・発展するいくつかの条件が必要となる。その一つは、安定した環境の継続である。このような条件は生命の発生は規制しないが、進化を規制する。水の存在は生命の発生・進化の両者を制約する。ここでは、両条件について検討する。

母恒星の条件

恒星からの距離が適当であることが生命発生の必要条件である。恒星が熱ければ遠くの惑星が、冷たければ近くが、生命の発生しやすい条件を持つ適当な天体となる。熱い星ほど生命発生の条件を満たす軌道範囲が広がる。公転半径の2乗(公転面として考える)もしくは3乗(恒星から3次元的位置)の割合で範囲は広がる。ただ、熱い星は寿命が短く、太陽質量の10倍の恒星では数千万年の寿命となるので、生命が発生して進化するには時間が足りない。逆に冷たい星は十分に進化をする時間が得られる。太陽質量の半分の恒星で、寿命は1,000億年ほどあるため、十分な時間が保証されている。しかし、適当な温度範囲は、太陽系の10分の1しかない。そこに適当な惑星がある確率は小さくなる。

恒星の寿命と適当な温度範囲の両方を満たさなければ、恒常的な生命は存在し得ない。適当な温度を水の存在範囲と考えると、質量は太陽の0.7倍から1.4倍程度となる

(小尾・森, 1985)。質量が太陽の0.7倍の恒星は表面温度約4,400度、寿命数百億年となり、質量が1.4倍の恒星は表面温度約6,500度、寿命30億年となる。

水の存在範囲

惑星の重要なエネルギー源は恒星の放射である。惑星が受ける放射は太陽からの距離の2乗に逆比例して減る。惑星の太陽からの距離によってその温度 (T : K) が決定できる (小尾・森, 1985)。我々の太陽系では、

$$T=395 \cdot a^{-1/2}$$

という式で決定される。ここで a は天文単位である。

地球では、395K (122°C) となる。この温度は太陽からのエネルギーをそのまますべて利用できたときの値である。軌道上で取りうる最高の温度といえる。実際には、惑星は太陽のエネルギーを反射している。惑星の反射能 (アルベド) を A とすると、惑星表面に吸収され惑星を暖めるのに使われるエネルギーは $(1-A)$ 倍となり、温度は下がる。また、惑星の自転が速いと太陽放射を吸収するのは太陽側だが惑星全体から熱の放射がおこなわれるので、温度はさらに下がる。以上のような冷却効果を考慮すると、平衡温度の下限は、

$$T=277 \cdot a^{-1/2}$$

となる。この値から、液体の水が存在しうるのは、太陽から0.55AU から2.09AUの範囲が最大である。この範囲が水の存在可能領域となる。金星から火星の範囲が水の存在可能域となる。

水の存在範囲は、着目点により、見積りには誤差が生じる。気候変動モデルでは、0.9~1.3AU (水谷, 1984) という見積りもある。正確な値は、決着が付いてない。

V 隕石学のアプローチ

隕石学のアプローチは、McKay et al. (1996) によって注目を浴びている。McKay らが検討したのは、石質隕石のエイコンドライト SNC に分類されるものである。SNC の中でも今までにないタイプの隕石であった。ここでは、隕石の分類、隕石中から発見された有機物について概要をまとめ、火星起源隕石と火星生物化石に関連した議論について詳しく述べる。

1 隕石の分類

隕石は、その岩質や鉱物組み合わせ、化学組成、組織などの違いにより、いくつかに分けられる。隕石は、カンラン石 (olivine)、輝石 (pyroxene)、斜長石 (plagioclase) からなる珪酸塩鉱物と、Ni-Fe 合金からできている。珪酸塩鉱物と金属の量比から、珪酸塩鉱物を主とする石質隕石 (stony meteorite)、珪酸塩鉱物と金属からなる石鉄隕石 (stony-iron meteorite) および金属からなる鉄隕石 (iron meteorite) に大別される。

鉄隕石は、Fe-Ni 合金と、少量のトロイライト (troilite, FeS) を伴う。鉄隕石は、Fe-Ni 相の組織によって、ヘキサヘドライト (hexahedrite)、オクタヘドライト (octahedrite)、アタキサイト (ataxite) の3つに区分される。また、鉄隕石は、Ni, Ga, Ge および Ir の含有量によって13の化学グループに区分される (IAB, IC, IIAB, IIC, IID, IIE, IIF, IIIAB, IIICD, IIIE, IIIF, IVA, IVB)。

石鉄隕石は、基本的には Fe-Ni 合金の基質部に珪酸塩鉱物を含むポリミクト角礫岩である。石鉄隕石は、珪酸塩鉱物の組み合わせによって、メソシデライト (mesosiderite)、パラサイト (pallasite)、ロドラナイト (lodranite)、シデロファイア (siderophyre) の4つに区分される。これらは非常に稀なタイプの隕石で、Catalogue of Meteorites (Graham et al., 1985) では、73個しか記載されていない。

石質隕石は、コンドリュール (chondrule、顆粒) を含むコンドライト (chondrite) と、含まないエイコンドライト (achondrite) の大きく2種に分かれる。

コンドライトは、隕石の中ではもっとも多く見られるものである。コンドライトの構成は、一般にはコンドリュールと岩片 (fragment: コンドリュールの破片、結晶片を含む)、インクルージョン (inclusion) からなり、その間をマトリックス (matrix、基質) が充填している。コンドライトは、炭素質コンドライト (carbonaceous chondrite、C と略される)、アンフォテライト (amphotelite、LL)、カンラン石-ハイパーシム・コンドライト (olivine-hypersthene chondrite、L)、カンラン石-ブロンザイト・コンドライト (olivine-bronzite chondrite、H) およびエンスタタイト・コンドライト (enstatite chondrite、E) の5つのグループに区分される。Van Schmus & Wood (1967) は、同じタイプのコンドライトでも、岩石学的な組織が連続的に変化していくことに着目して、1から6に区分した。タイプ1から6になるにしたがって、熱変成の程度は強くなる。

エイコンドライトは、地球上の岩石と区別しにくい。エイコンドライトの不透明鉱物は、トロイライトやクロム鉄鉱 (chromite)、チタン鉄鉱 (ilmenite) で、Fe-Ni 合金を含まない。エイコンドライトは、オーブライト (aubrite)、ユレイライト (ureilite)、ダイオジュナイト (diogenite)、シャツシナイト (chassignite)、ホワルダイト (howardite)、ユークライト (eucrite)、ナクライト (nakhilite)、アングライト (angrite)、および月起源の隕石 (anorthositic regolith breccia) がある。成因関係を重視して、ホワルダイトとユークライト、ユレイライトは3種の頭文字をとって HED と呼ばれ、シャゴッタイトとナクライト、シャツシナイトは SNC と呼ばれる。このうち SNC が火星起源隕石である。

2 隕石中の有機物

隕石の精密分析から、有機物が検出されている。発表当初地球の有機物の汚染が指摘された。汚染のない南極隕石の分析や1969年にオーストラリアに落下した汚染のない Murchison 隕石の分析などの、各種の検証によって、隕石に有機物が含まれていることが確実にになった。有機物は、炭素質コンドライトからたくさん発見された (西, 1984)。隕石には、地球生命の生体物質あるいはその前駆体、材料物質となるものが多数発見されている (表1)。

隕石から発見される有機物は、アミノ酸も糖も D-体と L-体が1:1に混合しているラセミ体である (下山, 1987)。隕石中では、D-体と L-体の分別は見つかっていない。D-体と L-体を分別するには、何らかのエ

表 6 火星起源隕石の産状

Name	Location	Year	Classification	Rock Type, Texture	Mass	Curatorial Location
ALH84001	Allan Hills, Antarctica	Find 1984, D 1993	orthopyroxenite	orthopyroxenite, monomict breccia, cataclastic	1.93 kg	MWG, SI
Shergotty	Bihar, India	Fall 1865/8/25	shergottite	gabbro, gabbroic, coarse-grained	5.00 kg	Calcutta, SI, Vienna
Zagami	Katsina, Nigeria	Fall 1962/10/3	shergottite	gabbro, gabbroic, preferred pyroxene	18.00 kg	dealers, New Mexico, Berlin, London, Paris
EETA79001	Elephant Moraine, Antarctica	Find 1979, D 1980	shergottite	dolerite & basalt doleritic, interstitial	7.94 kg	MWG, SI
QUE94201	Queen Alexandra Range, Antarctica	Find 1994, D 1995	shergottite	dolerite, doleritic	12 g	MWG
ALH77005	Allan Hills, Antarctica	Find 1977, D 1978	shergottite	olivine websterite, crystalline, preferred clinopyroxene	482.5 g	MWG NIPR
LEW88516	Lewis Cliffs, Antarctica	Find 1988, D 1991	shergottite	olivine websterite, poikilitic	13 g	MWG
Y793605	Yamato, Antarctica	Find 1979, D 1995	shergottite	lherzolite, poikilitic	16 g	NIPR
Nakhla	Alexandria, Egypt	Fall 1911/1/29	nakhlite	werlilite, cumulate, preferred clinopyroxene	40 kg	Cairo, London, SI, Berlin, Vienna, Paris, dealers
Lafayette	Indiana, USA	Find 1931	nakhlite	wehrlite, granular, preferred clinopyroxene	800 g	SI, Chicago
Governador Valadares	Minas Gerais, Brazil	Find 1958	nakhlite	wehrlite, granular, preferred clinopyroxene	0.158 kg	Rome, London
Chassigny	Haute-Marne, France	Fall 1815/10/3	chassignite	dunite, cumulate	4.00 kg	Paris, Vienna, London

Year は落下 (Fall) と発見 (Find) と火星起源隕石と確定された (D) を示した。MWG (JSC) と SI は アメリカ合衆国の隕石採集プログラムで NIPR (Tokyo) は日本の隕石採集プログラムである。略号: ALH: Allan Hills, EETA: Elephant Moraine, LEW: Lewis Cliff, QUE: Queen Alexandra Range, Y: Yamato, opxnite: orthopyroxenite, SI: Smithsonian.

エネルギーを注入しなければならない。エネルギーを使った D-体や L-体の分別が認められないため、隕石には生命活動の痕跡はない。

3 火星起源隕石の岩石記載

火星起源隕石は、現時点で12個ある (表6)。すべて火成岩である。総重量は約78kgである。

12個の火星起源隕石のうち Shergotty, Zagami, Nakhla, Chassigny の4個は、落下が目撃され、すぐに回収されたため、風化や変質はない。また、南極に落下した隕石は一部風化を受けているが、地球生物の汚染も比較的軽微である。特に南極で発見された隕石は、回収後の保存は注意深くなされている。

火星起源隕石の特徴的な付随鉱物として、角閃石 (ケルースト閃石) や黒雲母を含む。両鉱物はいずれも火成鉱物 (マグマからできた鉱物) で、結晶構造内に H₂O を含んでいる含水鉱物である。つまり、マグマの形成場 (一般的にはマントル) には、水が存在していた証拠となる。風化鉱物のイディングサイト (iddingsite) やイライト (illite) が発見されている。火星表層には水が存在し、風化作用が進行していたことを示す。二次鉱物として産する炭酸塩鉱物や炭化水素は、表層部の環境を示す指標となり、間接的ではあるが水や有機物の存在を示唆する。

火星起源隕石には、ピジョン輝石が含まれている。ピジョン輝石は地表近くで急冷された岩石に特徴的に産出する鉱物であるため、orthopyroxenite グループ以外の火星起源隕石は、深成岩の組織を持つが、浅所で急冷固結したと考えられる (池田, 1997)。

従来、火星起源隕石は、shergottite, nakhlite, chassignite の3つのグループが知られていた。各隕石の頭文字をとって SNC 隕石とよばれていた。しかし、新たに orthopyroxenite (斜方輝石岩: ALH84001) が発見された。現在、火星起源隕石は、shergottite, orthopyroxenite, nakhlite, chassignite の4つに分類される。shergottite の QUE94201 だけが玄武岩質火山岩で、あとの11個はドレライト・斑れい岩から超苦鉄質岩の深成岩類である (矢内, 1996)。

以下では、shergottite, orthopyroxenite, nakhlite, chassignite の4つグループ毎に特徴をまとめる。表7に火星起源隕石の岩石記載をまとめた。

shergottite

shergottite グループの隕石は、7個が発見されている。shergottite は、さらに basalt タイプと lherzolite タイプの2種に細分されている。

basalt タイプは Shergotty, Zagami, QUE94201 の3個で、地球の岩石と比較すると玄武岩からドレライトに似ている。3個の隕石は互いに良く似ている。輝石が8割、マスケリナイトが2割程度含まれる。組成も鉱物組成も類似したものである。lherzolite タイプは ALH77005, Y793605, LEW88516 の3個で、地球のレルズライトに似ている。ポイキリティック組織の部分とノン・ポイキリティック組織の層が数 mm の厚さで互層する層状構造を持つ。lherzolite タイプはカンラン石 (40%) と輝石 (50%; 斜方輝石、ピジョン輝石、オーラセイト) と少量のマスケイリナイト (10%) とクロム鉄鉱を含んでいる。3個の隕石は互いに良く似ている。

表 7 火星起源隕石の岩石記載

	AHL84001	Shergotty	Zagami	EETA79001 Lith-A	EETA79001 Lith-B	ALH77005	Nakhla	Lafayette	Governador Valadares	Chassigny
olivine	+			7-10		52	15.5	minor	minor	91.6
orthopyroxene	95			3-6		+	+			+
pigeonite		36.3	36.5	60-63	32	26	+			+
augite	+	33.5	36.5	3-7	24	11	78.6	major	major	5.0
pyroferroite					+					
maskelynite	1	19-25		16-18	29-30					
pl-glass						10				
plagioclase			21.7				3.7	trace	trace	1.7
K-feldspar							1.1	trace	trace	+
mesostasis		1.7-5.2		+	+		+			+
silica minerals		+			+		+			
fayalite		+								
kersutite		+								+
biotite										+
phosphate	+	+	2.1	+	+	+	+	trace	trace	+
chromite	2			+	+	1				1.4
magnetite	+	2-2.5	2.1	+	+		1.9	trace	trace	
spinel		+								
ilmenite		+		+	+	+	+			+
rutile										+
baddeleyite		+								+
troilite						+	+			+
pyrrhotite	+	+		+	+					
pentlandite						+				+
pyrite	+						+			
marcasite										+
chalcopyrite							+			
spalerite	+									
greigite	+									
iddingsite						+				
illite				+	+					
carbonate	1			+	+		+			+
Ca-sulfate				+	+		+			+
Fe-sulfate	+									
halide							+			
hydrocarbons	+			+	+		+			

データは池田(1997)のコンパイルと Banin *et al.* (1992) による。

basalt タイプの3つの隕石と lherzolite タイプの3つは岩石学的に似ている。岩石種は異なるのだが、岩相が非常に似ている。EETA97001が南極で発見されて、両岩石の関係が明らかになった。EETA79001には、両方の岩相が接して産したのである (McSween & Jarosewich, 1983)。B相が basalt タイプで A相が lherzolite タイプにあたる。A相は、火星のマントル物質がB相のマagmaに捕獲されたものであると考えられている。以下に各岩石の記載を示す。

ALH77005: 輝石がカンラン石を包有するポイキリチック組織を示す。少量の斜長石 (マスケリナイト化) を含む。鉱物組成は、 Fa_{25-31} 、 $\text{En}_{47-78}\text{Fs}_{13-26}\text{Wo}_{2-23}$ 、 An_{49-56} である。

Y793605: 輝石がカンラン石を包有するポイキリティック組織を示す。マスケリナイト化した斜長石を含む。鉱物組成は、 Fa_{26-34} 、 $\text{En}_{50-77}\text{Fs}_{14-29}\text{Wo}_{2-36}$ 、 An_{49-61} である。diogenite に類似するが、酸素同位体組成と斜長石組成が異なる。

EETA79001: A相とB相があり、A相は粗粒でB相は細粒である。明瞭な岩相変化があり貫入関係を示している。A相は均質な斑れい岩質岩で、B相はカンラン石や輝石の巨晶を含むドレライトである。A相は、輝石とマスケリナイトの体積比で4:1ほどで、Mg-richカン

ラン石や斜方輝石、クロム鉄鉱を外來結晶として含む。このような外來結晶は lherzolite タイプの Shergotty と類似している。B相は輝石とマスケリナイトの体積比が1:1である。輝石はノーマル・ゾーニングをしている。**LEW88516**: カンラン石 (Fo_{67}) と輝石 ($\text{En}_{67}\text{Fs}_{28}\text{Wo}_{5}$)、斜長石 (An_{53}) からなり、少量のクロマイトやガラスを含む。ALH77005に類似する。

QUE94201: 組成範囲の広い輝石 ($\text{En}_{1.0-60.5}\text{Fs}_{21.2-83.3}\text{Wo}_{9.6-34.7}$) とマスケリナイト化した斜長石 ($\text{An}_{51.9-57.8}\text{Ab}_{32.9-46.0}\text{Or}_{0.0-2.3}$) を主とする。試料は13gと小さく、80%が fusion crust で被われおり、ドレライトの組織をもつ。

Shergotty: ピジオン輝石 ($\text{En}_{58}\text{Fs}_{30}\text{Wo}_{12} \sim \text{En}_{22}\text{Fs}_{58}\text{Wo}_{20}$)、普通輝石 ($\text{En}_{48}\text{Fs}_{20}\text{Wo}_{32} \sim \text{En}_{32}\text{Fs}_{38}\text{Wo}_{30}$)、マスケリナイト化した斜長石 (An_{43-57}) を主とする。当初は eucrite に分類されていたが、火星起源隕石を代表するものである。

Zagami: ピジオン輝石 ($\text{En}_{58}\text{Fs}_{30}\text{Wo}_{12} \sim \text{En}_{39}\text{Fs}_{48}\text{Wo}_{13}$)、普通輝石 ($\text{En}_{48}\text{Fs}_{20}\text{Wo}_{32} \sim \text{En}_{32}\text{Fs}_{38}\text{Wo}_{30}$)、マスケリナイト化した斜長石 (An_{43-57}) を主とする。少量のガラスとチタン鉄鉱、イルメナイト、ピロータイト、ごく少量のカンラン石 (Fo_{10}) を含む。

shergottite の成因は、岩石学的検討から比較的よくわ

表 8 火星起源隕石の化学組成

Name	ALH 84001	Shergotty	Shergotty	Zagami	Zagami	EETA79001	EETA79001	EETA79001	EETA79001	QUE 94201	ALH77005
Type	S-opx	S-b	S-b	S-b	S-b	Lith- A	Lith-A	Lith-B	Lith-B	S-b	S-l
SiO ₂	52.84	50.5	49.50	51.1	50.52	48.5	48.5	49.0	49.0	46.5	43.2
TiO ₂	0.20	0.85	0.87	0.78	0.84	0.63	0.70	1.17	1.23	1.87	0.41
Al ₂ O ₃	1.21	6.78	7.59	6.1	6.27	5.69	5.68	10.7	9.93	9.93	2.83
Cr ₂ O ₃	1.07	0.19	0.200	0.32	0.15	0.61	0.58	0.17	0.14	0.15	1.00
Fe ₂ O ₃					0		0.70		0.22		
FeO	17.24	19.5	19.8	18.4	18.03	18.6	17.9	17.4	16.9	19.4	20.1
MnO	0.47	0.52	0.518	0.52	0.44	0.48	0.52	0.43	0.47	0.49	0.46
MgO	24.71	9.39	8.95	11	12.14	16.4	16.6	7.12	7.32	6.25	27.7
CaO	1.82	10	9.63	11	9.57	7.22	7.10	11.2	11.0	11.1	3.46
Na ₂ O	0.14	1.31	1.47	1.17	0.13	0.84	0.84	1.61	1.68	1.44	0.47
K ₂ O	0.015	0.17	0.189	0.14	0.08	0.04	0.05	0.08	0.09	0.04	0.03
P ₂ O ₅		0.67	0.72	0.53	0.46	0.6	0.65	1.28	1.25	2.04	0.37
S		0.11	0.157	0.19		0.2		0.2			0.05
H ₂ O+					0		<0.1		<0.01		
H ₂ O-					0		0.09		0.09		
FeS					1.58		0.49		0.60		
Ni							0.03		<0.01		
Co							<0.01		<0.01		
C							0.02		0.01		
Total	99.715	99.99	99.594	101.25	100.21	99.81	100.45	100.36	99.93	99.21	100.08
Ni (ppm)	44.6				26						
Co (ppm)	<12				<30						
C (ppm)			430								
Cl (ppm)			108								

Name	ALH77005	LEW 88516	LEW 88516	Y793605	Governador Valadares	Governador Valadares	Lafayette	Nakhla	Nakhla	Chassigny	Chassigny
Type	S-l	S-l	S-l	S-l	N-w	N-w	N-w	N-w	N-w	C-d	C-d
SiO ₂	43.03	48.2	46.21	42.51	49.5	49.52	46.8	48.6	48.24	37.2	37.22
TiO ₂	0.36	0.35	0.32	0.60	0.35	0.35	0.33	0.33	0.29	0.11	0.10
Al ₂ O ₃	2.54	2.38	2.93	4.01	1.74	1.74	1.55	1.6	1.45	0.49	0.80
Cr ₂ O ₃	1.00	0.91	0.85	0.82	0.25	0.21	0.27	0.28	0.42	0.69	0.83
Fe ₂ O ₃	0.38			0.22		1.14					
FeO	18.97	19.3	18.91	20.52	19.6	18.62	22.5	21.3	20.64	27.2	27.07
MnO	0.45	0.47	0.48	0.44	0.67	0.67	0.5	0.5	0.54	0.53	0.48
MgO	29.69	24.7	25.54	25.98	10.9	10.92	12.9	12	12.47	31.9	32.31
CaO	2.84	4.41	4.11	3.76	13.9	15.82	14.1	15.3	15.08	1.37	0.91
Na ₂ O	0.37	0.47	0.52	0.24	0.65	0.82	0.46	0.45	0.42	0.12	0.15
K ₂ O	0.03	0.03	0.03	0.03	0.14	0.43	0.11	0.13	0.10	0.04	0.05
P ₂ O ₅	0.39	0.39		0.51				0.11	0.12	0.04	0.08
S		0.1		0.56			0.04	0.04		0.04	
H ₂ O+	0.28			0.3							
H ₂ O-	0			0							
FeS	0.25					0.0					
Ni	0.024										
Total	100.604	101.71	99.9	100.5	97.7	100.25	99.56	100.64	99.77	99.73	100
Ni (ppm)				193							
Co (ppm)				<30							

データは URL: [http:// www-curator.jsc.nasa.gov/curator/antmet/marsnets/SampleSummary.htm](http://www-curator.jsc.nasa.gov/curator/antmet/marsnets/SampleSummary.htm) と Yanai (1997) による。

かっている。それは、各隕石がすべて類縁関係のある火成岩であることが明らかになってきたからである。まず、すべてが同源のマグマから形成されたという立場で起源を考える（三河内・宮本，1997）。マグマから最初に晶出したのはクロム鉄鉱とカンラン石である。このようなクロム鉄鉱やカンラン石は EETA79001 の岩相 A に含まれる外来結晶として産する。次いで輝石（斜方輝石あるいはビジョン輝石）が晶出する。カンラン石を輝石が取り囲んだポリキリティックな組織を持つ ALH77005、LEW8856、Y793605 の lherzolite タイプが形成される。カンラン石の晶出が終わり、ビジョン輝石と普通輝石の2種の輝石が晶出し、Shergotty、Zagami、EETA79001 の岩相 A を形成する。最後に斜長石が晶出して、輝石と斜長石のインターステイシャル組織を持つ QUE94201、EETA79001 の岩相 B を形成される。

このような一連の形成過程で説明できるのは、shergottite が一つの火成岩体として形成され、一つのインパクトで火星からはじき飛ばされたものであることを強く示唆する。

orthopyroxenite

orthopyroxenite グループは、ALH84001のみである。orthopyroxenite グループは、地球の斜方輝石岩に類似する。

ALH84001：ほとんど角礫状の斜方輝石 (En₇₀Fs₂₇Wo₃) から成る (90%以上) 超苦鉄質岩である。少量のマスクエリナイト化した斜長石と鉄にとむ炭酸塩鉱物 (Fe₂₉Mn₆₀Ca₁₁)、クロマイトを含む。炭酸塩鉱物は体積で1%ほど含み、隕石の中でも非常に特異である。当初は diogenite に分類されていた。しかし、斜長石の組成が An₃₅₋₃₉と他の SNC と同じであることから、diogenite とは区別で

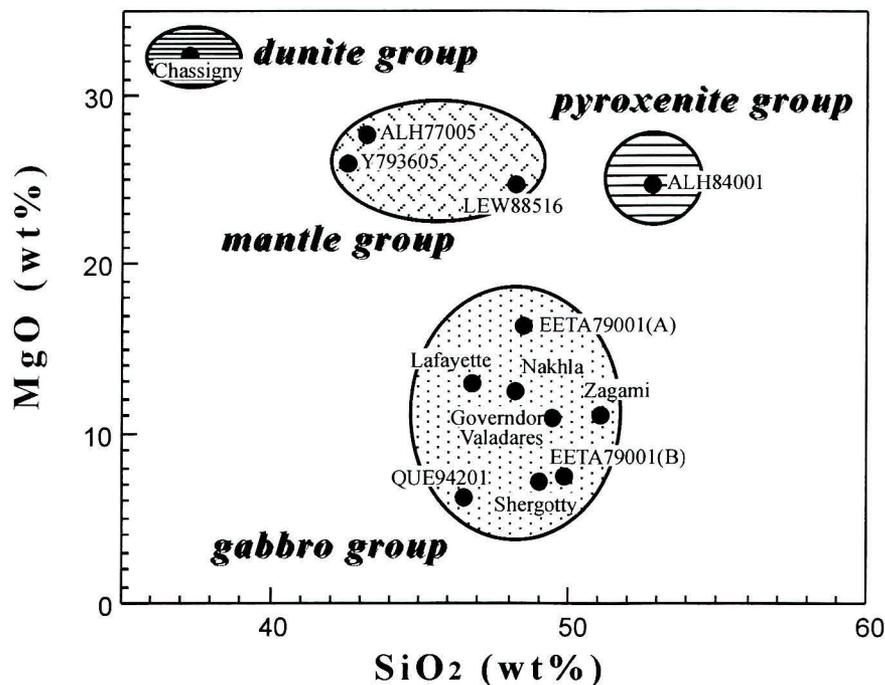


図1 火星起源隕石のSiO₂-MgO
データは、表8のものを使用した。

きる。

nakhlite

nakhlite グループは、Nakhla、Lafayette、Governador Valadares の3個である。nakhlite は8割以上の普通輝石からできており、1割強のカンラン石と少量の斜長石を含む。普通輝石は弱い累帯構造を示すが、カンラン石は均質な化学組成を持つ。nakhlite は典型的な集積岩の組織を持つ。nakhlite グループは、地球のカンラン石単斜輝石岩 (olivine-clinopyroxenite) に類似している。

Nakhla: 普通輝石 (En₃₈Fs₂₃Wo₃₉) とカンラン石 (Fo₂₃₋₃₃) からなり、少量の斜長石 (An₃₀Ab₆₅Or₅)、カリ長石 (An₅Ab₃₀Or₆₅) とマグネタイトを含む。

Lafayette: 普通輝石 (En₃₈Fs₂₃Wo₃₉)、カンラン石 (Fo₂₃₋₃₃) そしてマスケリナイト化した斜長石 (An₅₃) からなる。

Governador Valadares: ビジョン輝石の離葉組織を持つ普通輝石 (En₃₉Fs₂₃Wo₃₈) を主とし、カンラン石 (Fo₃₃) からなる。少量のマグネタイト、斜長石、ガラスを伴う。

nakhlite は、普通輝石と少量のカンラン石が晶出し、粒間に残った液から斜長石が晶出した。元素の拡散により、カンラン石はFeに富む均質な結晶へと組成を変化させ、普通輝石には累帯構造が残されたと考えられる (Harvey & McSween, 1992)。このような成因は nakhlite が溶岩ではなく、やや深部でゆっくりと結晶化し再結晶化したことを示している (McSween, 1994)。

chassignite

chassignite グループは、Chassigny の1個のみである。chassignite グループは、地球のダナイト (dunite) に相

当する。

Chassigny: ほとんどカンラン石 (Fo₆₇) からなり、少量の普通輝石 (En₆₉Fs₂₈Wo₃ ~ En₄₅Fs₁₂Wo₄₃)、斜長石 (An₁₆₋₃₇)、クロム鉄鉱を伴う超苦鉄質岩のダナイト (dunite) である。カンラン石の液体包有物中から含水珪酸塩鉱物のケルスート閃石と黒雲母が見つかった。

chassignit はほとんどカンラン石からできており組織も集積岩である。形成過程はより集積岩的であるが、カンラン石と輝石の量の違いがあるだけで、nakhlite と似た起源であると考えられる (三河内・宮本, 1997)。

4 火星起源隕石の化学組成

火星起源隕石12個の主要化学組成はすべて求められている。その化学組成を表8にまとめた。

図1より、火星起源隕石は、4つのグループに分かれることがわかる。矢内 (1996) は pyroxenite グループ、dunite グループ、mantle グループそして gabbro グループと呼んだ。pyroxenite グループは ALH84001 からなり、dunite グループは Chassigny からなり、mantle グループは ALH77005、Y793605、LEW88516 からなり、そして gabbro グループは Zagami、Shergotty、EETA79001、QUE94201、Nakhla、Governador Valadares、Lafayette からなる。矢内 (1996) は化学組成から、ALH77005 が推定される火星マントル組成 (Wanke & Dreibus, 1988) に類似することから、mantle グループは火星マントルを代表していると考えた。このようなマントルを起源としてマグマができ、その沈積相が dunite グループになり、残りのマグマが gabbro グループとして固結したと考えた。pyroxenite グループはマグマオーシャンが固まったときの地殻に相当すると考えた。

Yanai (1997) は、火星起源隕石を化学組成から、さ

らに chassignite (dunite) グループ、Yamato (Iherzolite ~ ol-webstelite) グループ、nakhlite (wehrlite) グループ、shergottite (gabbro) グループ、ALH84 (orthopyroxenite) グループの5つのグループに区分した。

インコンパティブル元素 (incompatible elements) のうち揮発性の違うものを比べると、天体固有の値を持つことがわかってきた (Dreibus & Wanke, 1985)。インコンパティブル元素は、一般に化学的に正の相関を持つ。同じ天体では、起源の全く違う岩石も同じ直線状の相関を持つ。このような相関を分化線と呼ぶ。分化線は平行であるが、天体毎に違ったものとなる。図2の K-La の相関を見ると、同じ La 濃度で比べると、K の濃度が、月、玄武質エイコンドライト、地球、火星起源隕石の順に富んでいる。一般的には、火星起源隕石は、中程度の揮発性のアルカリ元素 (K, Na, Rb など) に富んだ天体である。

親銅元素 (Co, Ni, Ca, In, Tl など) は地球に比べて著しく乏しい。このような傾向は火星の核に FeS が多いことを反映していると考えられる。FeS の核への移動に伴って親銅元素が核に多く分配され、地殻やマントルから枯渇したと考えられる。

shergottite グループの basalt タイプは、地球や月の玄武岩とは違っている。火星の玄武岩は、地球のものとは比べて、 Al_2O_3 やアルカリ元素に乏しく、FeO が多い。

月の玄武岩と比べると、 TiO_2 に乏しく、 Fe_2O_3 やアルカリ元素、 H_2O に富むという特徴がある (池田, 1997)。

火山岩は、マグマの組成を反映しているため、マグマが由来した起源物質やマントルを推定することができる。一方、shergottite グループや orthopyroxenite グループの沈積岩の場合は、直接マグマの組成を反映していないため、マグマの由来を調べることは難しい。しかし、nakhlite グループや chassignite グループは、沈積岩の隙間を埋めていた物質の組成や結晶中のマグマ包有物から、もとの玄武岩マグマの組成を推定することができる (池田, 1997)。

chassignite を枕積岩相として晶出させたマグマは、地球のボニナイト・マグマに似ている。nakhlite を枕積岩相として落としたマグマは、地球の岩石と比べるとピクライト質玄武岩マグマあるいはコマチアイト・マグマに類似したものである (池田, 1997)。

nakhlite の希土類元素 (rare earth elements: REE と略す) は、軽 REE に富み重 REE に乏しい分化したパターンを示す。このようなパターンは、沈積岩相という岩石学的特徴と矛盾するものである。このような矛盾は、nakhlite のメソスタシス中に液相濃集元素が分布するためによることがわかった。見かけは沈積岩相の様相を呈するが、鉱物粒間には、分化した残液が固化したものが

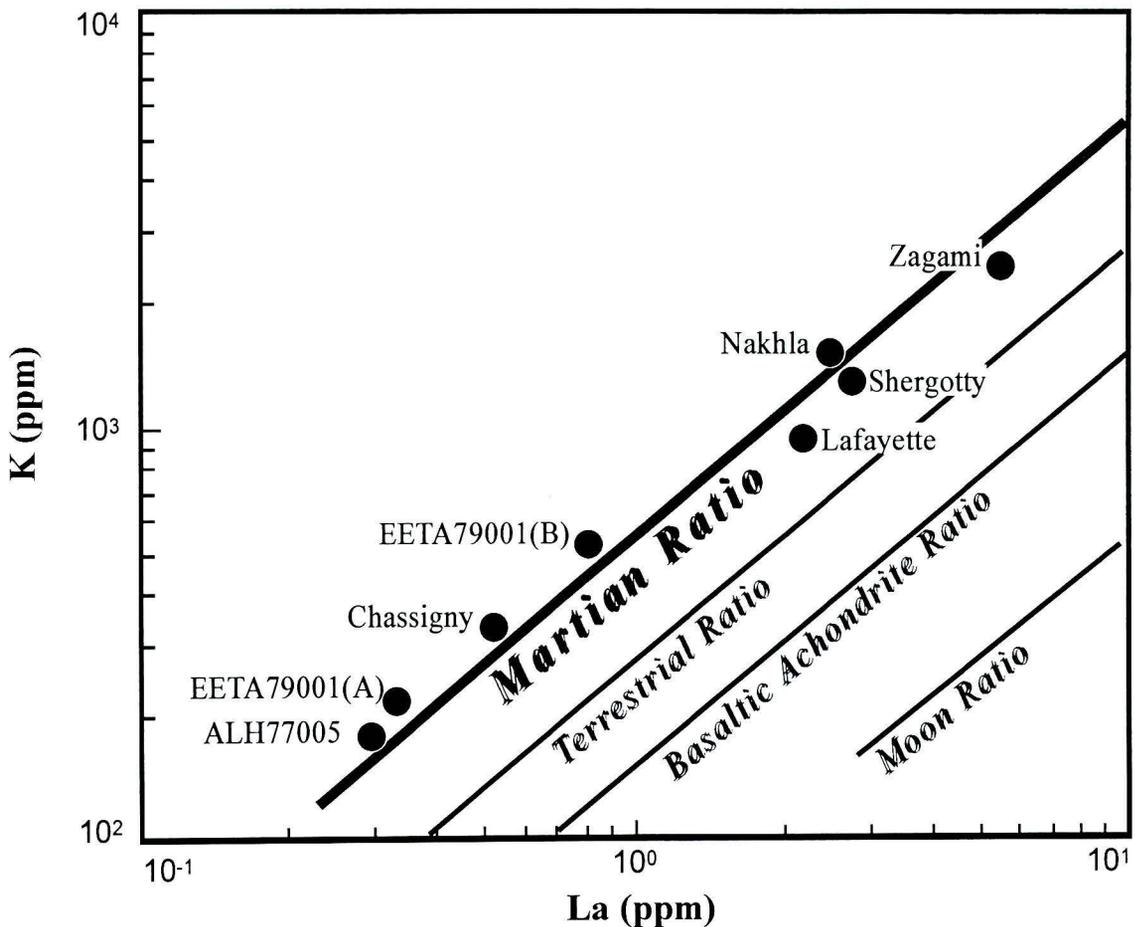


図2 火星起源隕石の K-La

たくさん埋めている。

shergottite は軽 REE が乏しく、重 REE は Dy 付近で凸のパターンを持つ。basalt タイプの shergottite は lherzolite タイプの shergottite に比べて REE の濃度が高く、軽 REE に富み、重 REE に乏しい。このような特徴は basalt タイプの shergottite が液の成分が多いという岩石学的特徴と一致する (中村, 1997)。

火星起源の隕石中の磁鉄鉱やイルメナイトから、マグマ固結時の酸素分圧を推定することができる。火星のマグマの酸素分圧は QFM (石英-ファヤライト-磁鉄鉱) バッファ付近である (池田, 1997)。この酸素分圧は、地球のマグマより還元的で、月のマグマより酸化である。

含水鉱物から水蒸気分圧が推定できる。もし角閃石がマグマと平衡に晶出したとすると、角閃石は斜長石より先に晶出したことになる。火星のマグマの水蒸気分圧は 100MPa 以上でなければならない。このような圧力は、火星では地下 7.5km 以深で達成される。

shergottite タイプと orthopyroxenite タイプは、マスケリナイト化した斜長石を含んでいる。マスケリナイト化とは斜長石が激しい衝突によってガラス状になったものである。カンラン石や輝石も激しい衝撃を受けて、結晶構造が変化している。その衝撃の圧力は、30~45GPa であると見積もられている。shergottite タイプの ALH77005 では、衝撃溶融でできたガラスのポケット (shock melt pocket) や脈 (shock melt vein) ができ、衝撃はさらに強く 60GPa に達していると考えられている (池田, 1997)。

nakhlite グループや chassignite グループにも、斜長石があるが、マスケリナイト化はしていない。しかし、カンラン石や輝石は衝撃を受けているため、25GPa 以下の衝撃圧であったと考えられる。

5 火星起源隕石の年代

物体に含有されている放射性核種を精度良く測定すると、その物体に刻まれたいろいろな時間の情報が読み取れる。

物体は宇宙空間では高エネルギーの宇宙線 (陽子) による核反応によって、物質内部に宇宙線生成核種ができる。宇宙線生成核種のうち、 ^3He や ^{21}Ne 、 ^{38}Ar などの安定核種は物質内部に蓄積され、その量を測定すれば、宇宙空間に存在した期間 (宇宙線照射年代) がわかる。宇宙線には、太陽フレアによるもの (10~100MeV) ともっと高エネルギーの銀河系からくる宇宙線 (1~10 GeV) がある。太陽起源の宇宙線は物体内に 1~3 cm 程度しか進入できない。隕石が大気圏に突入するときに表層部はほとんど消失してしまうため、太陽宇宙線で形成された核種は、検出しにくい。銀河宇宙線はメートル・オーダーで物体内に進入する。宇宙線照射年代は銀河宇宙線によるものである。

宇宙線生成核種のうち ^{10}Be や ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{53}Mn などの放射性核種を用いると、比較的短い照射の期間や照射の条件 (シールドの大きさ、太陽宇宙線の影響)、大気圏突入時の表面溶融量の見積もりなどを求めることができる (長尾, 1997)。

火成年代と固結年代は、似た意味で使われる。火成年

代とは火成作用が起こった時期を示し、固結年代はマグマが固まった時期を示す。

宇宙線生成放射性核種のうち半減期の比較的短いものは崩壊と生成の量が平衡に達する。平衡に達した放射性核種が宇宙線の当たらない天体 (地球など) に落下すると、放射性核種の崩壊が起こる。その放射性核種と娘核種を測定すれば、天体に落下した年代 (落下年代) がわかる。

放出年代は、隕石が属していた天体 (母天体) から放出され、天体 (地球) に落下するまでの期間を意味する。放出年代は、宇宙線照射年代と落下年代を足したものである。宇宙線照射年代は普通 100 万年より長く、落下年代は 30 万年より短いため、放出年代は宇宙線照射年代にほぼ等しい (長尾, 1997)。

火星起源隕石の火成年代は、orthopyroxenite の 45.0 億年前が一番古い。nakhlite の固結年代は 13 億年前で、shergottite は 1.5~1.8 億年前である (表 9)。

nakhlite の 13 億年前の年代については、様々な議論が起こった。しかし、Nd-Sm 系での鉱物アイソクロンによる年代決定により火成年代であると決着が付いた (Nakamura et al., 1977)。

chassignite も 13~12 億年前の年代が出されている。風化作用や衝撃による変形を受けているが、この年代は火成年代であると考えられている。

shergottite は、斜長石がマスケリナイト化していることから強い衝撃を受けていることがわかる。shergottite は鉱物粒間にメルト成分が多く含まれている。年代決定に使われる元素 (K, Rb, Sr, Sm, Nd, U, Th) は液相に濃集しやすいため、メルトの効果を考慮しなければならない。shergottite の年代の解釈をめぐる様々な議論がなされた。大きく分けて、36 億年前、25 億年前、18 億年前、13 億年前の 4 つの年代がある。36 億年前は Rb-Sr や Nd-Sm のアイソクロン年代 (Jagoutz & Wanke, 1986) で、25 億年前は Ar-Ar 年代 (Bogard et al., 1979)、18 億年前は Rb-Sr のアイソクロン年代 (Shih et al., 1982)、13 億年前は Nd-Sm の全岩アイソクロン年代である (Shih et al., 1982)。一般には 36 億年前は、メルトのミキシングによる見かけによるアイソクロン年代で、18 億年前が火成年代、25 億年前は Ar の不完全脱ガスの効果と考えられる (中村, 1997) が、決着は付いてない。

orthopyroxenite は、Rb-Sr 法と Nd-Sm 法による 45.6 億年前 (Jagoutz et al., 1994) と 45.0 億年前 (Nyquist et al., 1995) がある。Ar-Ar 法による 40 億年前 (Ash et al., 1996) は、衝突年代である。炭酸塩鉱物の年代は K-Ar 法では 36 億年前 (Knott et al., 1995) と、炭酸塩鉱物とマスケリナイトを結んだ Rb-Sr アイソクロン年代は 13.9 億年前 (Wadhwa & Lugmair, 1996) の 2 つの年代が発表されている。

宇宙線照射年代は、orthopyroxenite、nakhlite と chassignite の宇宙線照射年代は 1200 万~1500 万年、shergottite は 250 万~280 万年である。EETA79001 は 60 万年という一番短い年代を示す。

同じ岩石タイプの火星起源隕石は、似た放出年代を持つ。一番古い ALH84001 の 1440 万年から一番若い EETA

表 9 火星起源隕石の放射性年代

Name	Crystallization Age				Ejection Age	Exposure Age	Terrestrial Age
	Ar-Ar	Rb-Sr	Sm-Nd	U-Th-Pb			
ALH84001 (whole rock)	3840 ± 50	4500 ± 130	~ 4560	-	14.4 ± 0.7	14.3 ± 0.7	0.0065
" carbonate	~ 3600						
" maskelynite	4010 ± 14						
" maskelynite	3940 ± 70						
" maskelynite	4110 ± 90						
" carbonate+maskelynite		1390 ± 1000					
Shergotty	245 ± 10	165 ± 11	(360)	170 ± 30	2.71 ± 0.45	2.71 ± 0.42	-
		360 ± 12	360 ± 16	200 ± 4			
			(1220)	205 ± 8			
Zagami	250 ~ 260	180 ± 4	116 ± 47	170 ± 30	2.76 ± 0.50	2.76 ± 0.50	-
	186 ± 5	186 ± 37		230 ± 5			
					229 ± 8		
EETA79001	176 ± 26	-	-	170 ± 30	0.82 ± 0.25	0.65 ± 0.20	0.17
QUE94201	144	327 ± 12	327 ± 19		2.91 ± 0.60	2.62 ± 0.58	0.29
ALHA77005	(1050)	187 ± 12	135 ± 40	150 ± 15	3.52 ± 0.60	3.32 ± 0.53	0.21 ± 0.08
		156 ± 6	240 ± 150	170 ± 29			
		185 ± 25					
		173 ± 10					
		15 ± 15					
LEW88516					4.00 ± 0.60	3.98 ± 0.58	0.0215
Y793605					-	5.4 ± 0.3	0.035 ± 0.035
Nakhla	1300 ± 30	1310 ± 20	1260 ± 70	1280 ± 50	11.6 ± 2.00	11.6 ± 2.0	-
		1224 ± 12					
Lafayette	1330 ± 30	-	-	-	11.4 ± 2.10	11.4 ± 2.1	-
Governador Valadares	1332 ± 40	1330 ± 10	-	-	10.0 ± 2.0	10.0 ± 2.0	-
Chassigny	-	1223 ± 14	1360 ± 60	-	11.6 ± 3.6	11.6 ± 3.6	-

年代はすべて 100 万年 (Ma) の単位で示した。() 内のデータは精度が良くないものである。データは中村 (1997)、池田 (1997)、長尾 (1997)、Yanai (1997) のコンパイルによる。

79001の80万年までに、5から6回の隕石を放出した事件があったことが推定される。basalt タイプの shergottite (Shergotty, Zagami, QUE94201) が約280万年、lherzolite タイプの shergottite (ALH77005, LEW88516) が約380万年、ただし Y793605の照射年代は540万年である (Nagao et al., 1997)、naxhlite (Nakhla, Lafayette, Governador Valadares) は約1100万年、chassigny は1160万年である。

6 火星起源隕石の起源

火星起源隕石は、他の隕石には見られない角閃石や磁鉄鉱を含むため、地球の火成岩に似た「特殊な隕石」と考えられていた。

1970年代末には、多くの研究者は「特殊な隕石」が火星起源ではないかと考えるようになった。1980年頃からその起源について論争が起り、1984年頃には「火星起源隕石」であることが決着した。その証拠は、火星起源隕石が以下のような特徴をもつことである。

・特異な酸素同位体を持つ

火星起源隕石の酸素同位体組成は、地球と月起源の岩石固有の値とは違うため、区別できる。地球や月とは別天体の起源でなければならない (Clayton & Mayeda, 1996)。これは、地球や月とは別の軌道上で別の材料から

形成されたことを意味する。

・希ガスの同位体組成が火星大気と一致する

1976年に Viking 1 と 2 が相次いで着陸し、火星大気の希ガス同位体組成が求められた。火星起源隕石は、他の隕石や月隕石、地球大気とは全く違い、火星大気の希ガス組成と一致した。

・火成岩の沈積岩の組織を持つ

沈積岩 (cumulate) とは、マグマから晶出した結晶が沈み、マグマ溜まりの底にたまったものである。このような火成岩組織は大きな重力を持つ天体でできたことを示す。

・含水鉱物が存在する

含水鉱物は水の存在下で形成される。水の存在した証拠がある天体は火星だけである。

・強い衝撃を受けた

強い衝撃を受けた証拠は、結晶が一部溶けだしたり、斜長石が非晶質化したマスケリナイトという鉱物になっていることからわかる。このような衝撃は、火星表面に小天体が衝突して火星の岩石を砕き飛ばしたものと考えると説明できる。

・形成年代が若い

多くの隕石が約45億年を示すのに対し (小出, 1995a)、

火星起源隕石は ALH84001 を除くと 13 億年から 1.8 億年前の若い年代がでている。惑星形成 (45.6 億年前) から最近 (1.8 億年前) まで火成作用が続いた天体は、天体内部に保存された熱エネルギーが多かったことを意味する。大量の熱エネルギーを蓄えるには天体のサイズが大きくなければならない。金星、地球、火星のような大きさでなければならない。水星や月では小さすぎる。

・大きな天体で形成される REE パターンを持つ

nakhlite の REE パターンは軽 REE に富み、重 REE に乏しい。このような REE パターンは、ガーネットからなるマントルの部分溶融とガーネットの分別結晶作用によって作られる。ガーネットは高圧鉱物で、小天体内部では存在できない。月より大きな天体内部でないとガーネットは形成されない。このようなことから、火星以上の大きさの天体でなければならない。

7 火星起源隕石からの「生命化石」発見

McKay et al. (1996) の報告が掲載される前に、NASA の長官がプレス発表し、マスコミがセンセーショナルに取り上げた。新聞各紙は 1996 年 8 月 7 日の朝刊から、火星生物 (?) の写真を載せた。8 月 7 日、大統領再選中のクリントン大統領が、この件について発言したため、マスコミの扱いは大きくなった (例えば、Newsweek 日本語版 1996 年 8 月 28 日号, 14-23)。当然、天文や地質関連の雑誌でも大きな話題として取り上げた (例えば、Nature, 1996, August 15, 575-577; GSA Today, 1997, July, 1-7; Astromy, 1996, November, 46-53)。

McKay らの論文はアメリカの科学雑誌 Science に掲載された。科学界での反響が大きく、Science 誌上で、McKay らの論文に関する公開の議論がおこなわれた。公開の議論とは、誌上で McKay らの論文に関する問題点や疑問点を指摘し、著者がそれに対して回答するというものである。

Science 誌以外の場でも、McKay らの論文に関しては、さまざまな議論がなされている。このような議論を積み重ねて、今回の報告に関する各種の問題点や課題が明らかにされてきた。以下では、主要な議論をまとめて示す。

McKay et al. (1996) 論文

ALH84001 の形成年代 (固結年代、結晶化年代) は 45.6 億年前である。おそらく 40 億年前頃に亀裂ができ、36 億年前にその亀裂に炭酸塩鉱物が形成された。1500 万年前に小天体の衝突によってはじき飛ばされ、宇宙空間を漂い続けた。多数の破片のうち、発見されたときに約 1.9 kg となる破片が、地球軌道に入り、1 万 3000 年前に南極に落下し、1984 年に発見された。1993 年に火星起源隕石とされ、1996 年に生命化石の痕跡が発見されたとの報があった。これが ALH84001 の略歴である。

ALH84001 には割れ目があり、炭酸塩鉱物の小球体 (globule) が特徴的に存在する。その炭酸塩鉱物やその周りに発見される物質の組成、状態、組織などが生物の特徴を示すとされている。

生命化石の根拠をまとめると、以下の 4 点に要約される。

(i) 炭酸塩鉱物は無機的には形成しにくい化学組成である

炭酸塩鉱物の小球体 (1~250 μm) は、36 億年前の年代を示す。これは 36 億年前には、火星に水と CO₂ が存在していたことを示し、その頃火星には水や大気があったことと対応している。δ¹³C (-17~+42‰) は無機的に形成するには幅が広く軽い。δ¹³C の値を広く軽くするメカニズムは生命活動が主要な要因である。また、炭酸塩鉱物の化学組成 (Ca, Mn, Fe, Mg など) や同位体組成 (¹⁶O) のデータは、生物起源と考えてもよい。

(ii) 炭酸塩鉱物には数種類の PAH が存在する

多環式芳香族炭化水素は、polycyclic aromatic hydrocarbons の和名で、PAHs と略される。発見された PAHs は、三環式のフェナトレン (C₄H₁₀)、四環式のピレン (C₁₆H₁₀)、三環式のクリセン (C₁₈H₁₂)、五環式のピリレン (C₂₀H₁₂) あるいはベンゾピレン (C₂₀H₁₂)、六環式のアンケンスレン (C₂₂H₁₂) などである。PAHs は単純な分子だが、複雑な有機物が続成作用で分解したと考えられる。PAHs は炭酸塩物質の多いところに多く分布し、1 ppm ほどの含有量がある。PAHs の濃度分布を見ると地球での汚染と考えられない。

(iii) 炭酸塩鉱物の微粒子の周りに化学的に共存できない鉱物の共存する

化学的に共存できないはずの磁鉄鉱 (magnetite) や磁硫鉄鉱 (pyrrhotite) が共存している。両鉱物は単粒の小球体 (spherule) で、10~100 nm のサイズである。両鉱物の形成の酸化還元条件は著しく違う。酸化的環境で形成される磁鉄鉱と炭酸塩溶解痕が、還元的環境で形成される磁硫鉄鉱と共存している。固溶体を形成するはずの鉄炭酸塩とマグネシウム炭酸塩が共存している。磁鉄鉱や磁硫鉄鉱は、2 次的に生成されたもので、地球の走磁性細菌が作り出す鉱物と形態が似ている。

(iv) 炭酸塩鉱物の表面に特異な形態の微粒子が存在する

20~100 nm の微粒子は、卵型でウーボイド (ovoid) とよばれ、特異な形態を持つ炭酸塩である。微粒子は、サイズは非常に小さく、ナノ細菌のサイズである。形態は地球生物の細菌に類似し、火星のナノ細菌の化石痕ではないかと考えられる。

McKay et al. (1996) は、以上の特徴の一つ一つは無機的にも形成可能だが、総合的に判断して生物が関与したものであると考えるのが良いとしている。

Anders (1996) の議論

・PAHs は無機的に生成可能であるし、その種類が少なすぎる。そして、炭酸塩粒子と同時に形成されたとしているが、PAHs は吸着しやすい性質を持っているために、成因が異なっても吸着したかも知れない。

・化学的に共存できない鉱物とされているが、無機的に共存可能である。

・形態だけからでは形成機構を特定できない。各種の非生物起源のものと比較検討が不十分である。

回答: McKay et al. (1996)

100 μm の非常に小さい領域で鉱物は共存している。このような領域での変質鉱物の組合せはない。炭素粒子

は炭素質コンドライトの低温変質で生成されるが、異なる生成環境の非平衡なものである。無機的生成の可能性を認めるが、複雑な過程を想定しなければならない。また、このような形態を持つ構造は他の隕石では認められない。

Sheater & Papike (1996) の議論

- ・ ALH84001の黄鉄鉱のイオウ同位体分析から、+5~+8%という $\delta^{34}\text{S}$ を得た。嫌気性細菌による同位体分別や酸化環境での無機的形成の可能性はある。しかし、月では、micro-impact で無機的に同位体分別した例があり、火星でも同じことが起こったかも知れない。
- ・ 地球最古の還元的硫黄細菌の出現は27億年前で、進化の時間を考えると38億年前の火星では出現できなかった可能性がある。

回答：Gibson, Jr. et al. (1996)

Sheater & Papike (1996) らの分析した黄鉄鉱は15~40 μm より小さく、熱水などの別の起源が考えられるので黄鉄鉱を議論の対象として使えない。細粒の硫化鉄鉱はCs+のビームが8 μm までしか絞れないので、分析できない。Sの同位体組成のデータは議論に使えない。

Bell (1996) の議論

PAHsが、無機的にできた他の隕石から供給された可能性がある。PAHsは隕石中には普遍的にあり、月面にも1~2%存在する。火星表面では有機物が紫外線によって分解されるため、存在しないかも知れないが、深部には存在可能である。有機物に富むクラスDの小天体が低角度で衝突し、火星深部に有機物が供給されれば長く存在できる。PAHsの質量頻度分布がCMコンドライトと同じであることは、このような起源を示唆している。

回答：Clemett & Zare (1996)

PAHsの構造からは生物起源か否かは判定できない。この隕石は火成岩で、炭素は含まず、PAHsは系外から来た成分である。炭酸塩粒子とPAHsの分布に相関が見られたことから、成因関係があると考えられる。

赤井 (1996, 1997a, 1997b) の議論

- ・ 南極での汚染
- 極寒の世界に住む細菌もある。有機物の増加は1.2mmまでの内部までしか示されていない。溶融皮膜(fusion crust)から分析をしているが、溶融皮膜はもとも有機物の含有量は少ない。
- ・ 火星生命を地球型生命と比べて判断してよいのか
- ・ 走磁性細菌は36億年前に誕生できない
- 地球の走磁性細菌は20億年前に出現したもので、細菌の中でもかなり進化したものである。そのため火星でも36億年前では走磁性細菌まで進化していないのではないかと考えられる。
- ・ 火星に磁気があったのか
- 現在では火星にはほとんど磁気がない。磁鉄鉱がもっている性質を有効に利用するのは、方向センサーとしてである。このような性質を利用しているのは、走磁性細菌である。走磁性は磁気がある環境で有効な機能

だが、現在磁気のない火星で有効に利用してのであろうか。火星には過去に磁気があったのか。

- ・ 地球での磁鉄鉱のバイオミネラリゼーションは主要なタイプでない
- ・ 地球の走磁性細菌は好気性で水環境を好む
- 水があるなら風化過程があり、粘土鉱物が産出するはずだが報告されていない。
- このような疑問点があり、解決されていないのに総合的に判断して生命活動があったとは考えられない。

小島 (1997) の議論

1996年11月22日、国立極地研究所でおこなわれたシンポジウム「火星隕石と生命」における議論を総括している。シンポジウムでは、慎重派あるいは懐疑派が議論の主流となった。議論の概要を要約すると、以下のようになる。

- ・ 形態の類似だけで、生体の証拠はない
- ・ 生命体にしては小さすぎる
- ・ 細菌と鉱物のサイズ分布が異なる
- ・ PAHは4種で、無機的なPAHは30種以上ある

以上の点から、現時点では、生物の痕跡とするには不十分である。

Mikouchi et al. (1997) の議論

炭酸塩粒子に対する鉱物学的特徴について検討した。その結果、炭酸塩粒子に見られる各種の現象は、無機的な起源よりも、生物起源の可能性が高いように見えるが、生物起源での説明もかなり困難である。現在のデータでは、生物源か無機的起源かは判断できない。ALH84001や火星起源の隕石をもっと調べる必要がある。現状では、否定とも肯定ともつかないのが結論である。

池田 (1997) の議論

- ・ 炭酸塩鉱物の形成年代
- 形成年代は従来36億年前と考えられていたが、Wadhwa & Lugmair (1996) は約14億年前という結果を報告した。もしこの14億年前という年代が正しければ、火星は現在と同じように、液体の H_2O は存在せず、生命発生や生存には不適な環境となっていた可能性が高い。
- ・ 炭酸塩グロビュールの起源
- 酸素同位体のデータからは、炭酸塩鉱物は低温(0~80°C)で析出した可能性がある。一方、炭酸塩グロビュールの熱水(650°C以上)起源説(Harvey & McSween, 1996)もある。ALH84001には含水鉱物がない。以上の主張がすべて正しければ、以下の形成条件となる。熱水が短時間のみ進入し、高温から低温にわたって、含水鉱物を作らずに、炭酸塩物質のみを析出したことになる。このような条件は、生命生存には不適である。
- ・ 炭酸塩ウーボイドのサイズ
- 炭酸塩ウーボイドのサイズは、20~100nmしかなく、非常に小さい。地球の細菌では10 μm 以上ある。ALH84001の化石は酸素イオン(0.27nm)100個分のサイズしかない。生物としては小さすぎる。
- ・ 磁鉄鉱と硫化物の起源

磁鉄鉱や硫化物が生物起源のものがあることは知られている。しかし、他の火星起源隕石にもこれらの鉱物は普通に産し、無機的に形成されたと考えられる。したがって、ALH84001だけが生物起源とは考えられない。

・炭化水素の起源

炭化水素は、他の火星起源隕石でも発見されているが、地球での汚染と考えられる。他の隕石でも各種の有機物が発見されているが、すべて無機的に形成されたとされている。ALH84001の炭化水素が、生命の有機物起源であれば、窒素やリンなどを含む有機物が存在しても良いのだが、発見されていない。

・総合的判断

総合的に判断して無機起源より、生物によって形成されたと考えたほうがよいとしているが、「彗星衝突説」のほうが、総合的によいと考える。「彗星衝突説」とは、氷と岩石片、各種の炭化水素を含む彗星が火星に衝突し、炭酸塩鉱物や磁鉄鉱、硫化物が析出したという説である。

下山 (1997) の議論

・PAHs の検出法

質量数だけで有機物を同定しているが、同じ質量数だが異なった化合物や異性体も一つのピークとして検出してしまう。有機物を同定するときは質量数だけでは不十分である。

・PAHs の種類と存在度

検出された質量数のピークは178、202、252、278である種のPAHsに相当するとしている。しかし、異性体は区別されていない。

・PAHs の分布と起源

ALH84001から検出されたPAHsは、同じ方法で分析された別の南極隕石 (EETA79001) から発見されたものと類似している。しかし、ALH84001から検出されたPAHsは生物起源で、EETA79001から発見されたものは南極の氷からの汚染 (McDonald & Bada, 1995) というのは変である。溶融皮膜に比べて炭酸塩類は有機物を付着しやすいので、汚染の反映かもしれない。

秋山 (1997) の議論

・サイズ

火星隕石の構造体のサイズは20~100nmで、生命活動を営むには小さすぎる。

・母岩の種類

地球の微化石はチャートであるのに対し、火星隕石では石灰岩である。

・ナノバクテリアへの疑問

地球では30~50nmのナノバクテリアが化石や現世種として発見の報告があるが、まだ生命であると立証されていない。だから、火星隕石中の構造体をナノバクテリアとの類似性を根拠に生命とするのは問題がある。

・PAHs は生命の根拠たりえない

PAHsは炭素質コンドライトからも発見されており、太陽系初期には極普通に存在し得た化学物質である。PAHsの存在から生命の根拠とできない。

Gleason et al. (1997) の議論

隕石のREEパターンは、不均質で分化している。炭酸塩鉱物の複雑な累帯構造から、さまざまな組成を持ったCO₂に富む流体から非平衡に形成されたことを示している。以上の根拠から、炭酸塩は無機的にできた。

McKay らの論文の意義

どの反論や議論でもいくつかの問題点が指摘されている。この発見の重要性は多くの研究者が認めている (土山, 1997; 田崎, 1996)。現状のデータでは、結論は出せず、より詳しい調査が必要であるとしている。事実、マスコミがこれだけ騒ぎ、関連の学会誌も特集を組んでいるという点を見ても非常に衝撃的な論文であった。本稿も、McKay らの論文は大きな動機の一つとなっている。そして、研究者や一般市民の関心のもとMarspathfinderが発射され、成果を上げた。否が応でも、Viking 以来の火星への生命探査の要望が高まる。火星起源隕石からの生命化石の真偽のほどは不明である。決着はさらなる火星探査によってのみつくのであろう。

VI 地質学的アプローチ

生命の起源への地質学的アプローチは、地球の岩石中から生命の化石を捜してその特徴を記載することである。古い生命の化石が発見されると、その判定をめぐる常に議論を生じる。その議論は、生命の本質に迫る内容が含まれている。ここでは化石の認定法と最古の化石についてまとめる。

1 化石の認定

古い時代の岩石から検出された微少な構造体を、化石であると認定するためには、以下のような根拠が必要である (秋山, 1997)。

- ・形態の類似
- ・構造体の生物学的特徴を持つサイズ分布
- ・細胞分裂の証拠
- ・有機物の存在
- ・炭素同位体組成の証拠

このような条件を満たしている時、生命の化石であると判定される。判定基準を満たしていないものは生命化石でないというわけではない。現在の基準では生命と判定できないのである。発生初期の生物は化石になりにくく、このような判定基準を超えた部分でおこなわなければならない。そのような基準として有効な手がかりは、有機物の化学的性質である。

有機化合物が非生物的過程によって形成される場合、熱力学的反応に従った組合せを持った一連の構造異性体を作る。一方、生物的由来の有機化合物は熱力学的にエントロピーの小さな化合物を含む。

地球生物を構成している基本的な有機化合物は炭水化物、アミノ酸、糖類、脂肪酸、脂質 (脂肪酸以外)、核酸塩基である。地球生物内で、炭水化物は組織表面の保護の機能を持つ。アミノ酸はタンパク質として生体内の反応の触媒作用をしたり膜の物質となる。糖類は、炭水化物としてエネルギー貯蔵や細胞壁の形成をする。脂肪

酸は細胞膜の形成に使われる。脂質は細胞膜の機能維持を担う。核酸塩基は遺伝や複製をおこなう。

有機化合物は、堆積環境下でケロジェンと呼ばれる高分子化合物を経て、グラファイトへと変換されていく。このような有機化合物の構造が特異であったり選択的であった場合、生物起源の可能性は高くなる。従って生物が直接作った化合物でなくても、分解された痕跡であっても、生物の存在を推定することが可能となる。

以下では、有機物の時間的变化と生物の材料の認定基準をまとめる。

炭化水素

炭化水素は有機化合物の中では最も安定である。また、分析も比較的容易であることから、生命活動の根拠にされることが多い。炭化水素が直鎖状に連なった脂肪族化合物とベンゼン環を持つ芳香族化合物がある。生物起源の脂肪酸化合物は、炭素数が奇数のものの方が偶数のものより多くなる。芳香族化合物は、脂肪族化合物に比べて、水素結合量が少なく、二重結合の環状構造を持つため安定である。芳香族化合物は、隕石からも多数発見されている（下山, 1987）。また、生物が形成したものも知られているが、有機物の燃焼や二次的過程によって形成されることが多い。そのため、芳香族化合物の生物起源を検討する場合、充分注意する必要がある。

アミノ酸

違った構造を持つアミノ酸が無数といえるほど存在している。地球生命はその内、20種のアミノ酸だけを利用している。地球生命を作るアミノ酸は光学活性体(L-体)として存在している（グリシンは除く）。無機起源のアミノ酸はラセミ体と呼ばれる光学的に不活なものとなり、20種以外のアミノ酸も形成される。アミノ酸を生物の根拠とするには、その種類数あるいは組み合わせと、光学活性の有無が重要な点となる。

糖類

一番簡単な糖類であるホルムアルデヒドは、星間分子として宇宙空間に存在する。ホルムアルデヒドは無機的に形成されるが、隕石から糖類の発見はない。生体で糖類は、二酸化炭素から光合成によって形成され、光学活性をもつ。糖類は不斉中心（光学異性体を形成する分子の構造的因子）となる炭素原子を同一分子内に多く含むため、もし糖類が検出された場合、その光学活性が重要な決め手となる。

脂肪酸

細胞膜を構成している脂肪酸は、炭素数が10~30の鎖が直鎖に連なったものである。炭素数は偶数が優勢である。隕石から検出された脂肪酸は10以下の炭素数で、構造的な特異性は認められない。そのため隕石の脂肪酸は無機起源であると見なされている。

脂質（脂肪酸以外）

脂質には、熱力学的にエントロピーの低い化合物が含

まれる。このような低エントロピー脂質は生物の関与が考えられる。脂質は、堆積物中で続成作用が進むと、芳香族炭化水素へと変化していく。ある程度以上に安定化が進むと、生物活動の特異な特性が失われていく。

核酸塩基

核酸塩基は、構造的には多くの類似体が存在しているが、生物によって形成された核酸塩基は、4種類（厳密には5種）しかない。類似の分子は宇宙空間にたくさん存在するシアン化水素から、無機的に形成される。生命の痕跡として考えた場合、ある限られた数種の核酸のみで、類似の化合物が検出されない場合には、生命体の可能性が高いことになる（村江, 1997）。

2 最古の生命化石

古い生命は、古い岩石に含まれる。図3に太古代の地塊（craton）の中で一番古い岩石の産地と特徴をまとめた。岩石は時代が遡るほど、その分布や多様性は減っていく。それは地球表層が常に更新されているからである。

最古の碎屑性 zircon 粒子は西オーストラリアの42.76億年前で、最古の岩石は約40億年前のカナダ北西準州のアスタ片麻岩で、最古の堆積岩はグリーンランド Isua 地方の38億年前のものである。

初期の生命は海洋で発生したと考えられる。海洋で生成された岩石は堆積岩である。生命の化石は堆積岩中に含まれているはずである。生命は有機物を材料としているため、高温高圧条件にさらされ変成岩になっていけば、生命の痕跡を発見するのは困難である。このような古い岩石のうち、生命の起源の探るのに重要なのは、変成作用を受けていない堆積岩である。

38億年前の化石

最古の生命は、最古の堆積岩から発見されるはずという考えでいくつかの試みがなされている（下山, 1995）。

地球最古の堆積岩はグリーンランド Isua 地方の38億年前のものである。そのため Isua の堆積岩から化石を出そうという試みが何度もなされた。1979年に *Isuasphaera* というイースト菌状の微化石が記載された（Pflug & Jaeschke-Boyer, 1979）。しかし、後に液体包有物であることが判明した（Bridgwater et al., 1981）。また、グラファイトの炭素同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) が、 -21% より軽いものがあることから、生物起源であるとされた（Schidolowski et al., 1979）が、決着はつかなかった。

グリーンランド Isua 地方の38億年前の縞状鉄鉱層（banded iron formation ; BIFと略される）と近くの Akikia 島にある38.5億年前の BIF に含まれるリン灰石（apatite）中の炭素質包有物の炭素同位体比を測定した結果、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比が低かった Mojzsis et al. (1996)。この値は無機的に形成される既知のものより低いことから生物活動があったことを示している。

このような報告に対して、疑問の声も上がっている（Holland, 1997）が、その決着はついていない。

BIFは海中の Fe を酸化させ沈殿したものである。遊離酸素がまだない時代であるから、BIFは鉄細菌によ

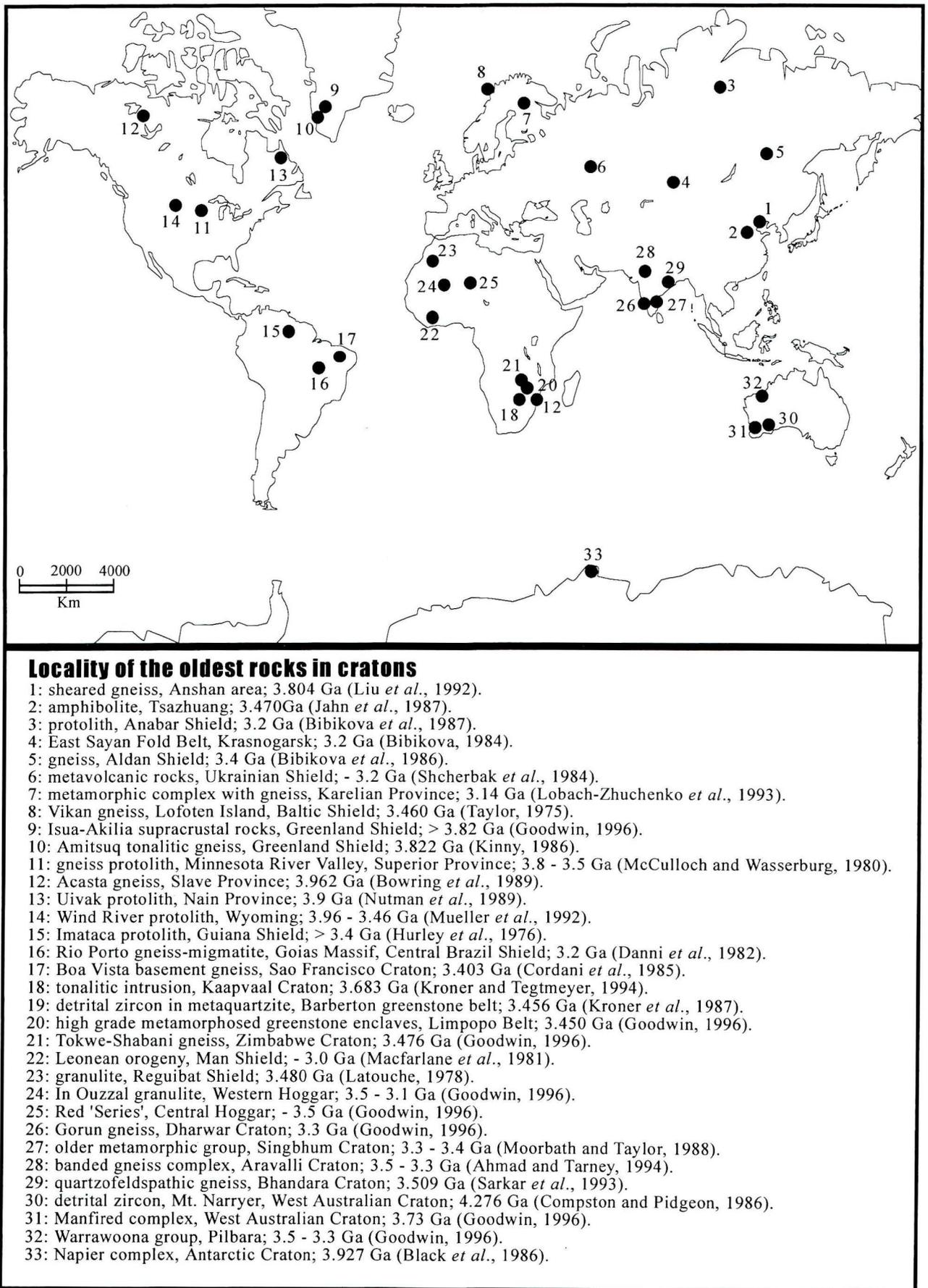


図3 太古代クラトンにおける最古の岩石
最古の岩石の分布、岩石種、形成年代と文献をまとめた。

る産物かもしれない(川上・熊沢, 1995)。鉄細菌は、水中の Fe^{2+} を酸化して炭素固定をおこないエネルギーを得る生物である。

太古代の化石

最初の細胞の出現は、35億年前までは確実に遡れる。35億年前の化石は、オーストラリアの Marble Bar に分布する Warrawoona 層群 Towers 層 Apex chert から発見された (Schopf, 1993)。地層の年代は34.70億年前より古い。産出した化石は、繊維状と球状の形態で、0.5~19.5 μm で平均5.0 μm である。形態の類似性からシアノバクテリアと同定されている。その根拠は、微化石のサイズが現世のシアノバクテリアの一種に類似することと、炭素の同位体組成が生物起源という点である。シアノバクテリアは、ストロマトライトを形成していたと考えられる。最古の化石がシアノバクテリアであれば、35億年前にすでに光合成をおこなう生物いたことになる。生命誕生は35億年前より遡るはずである。

オーストラリアの35億年前のストロマトライトの起源として磯崎ほか (1995) が中央海嶺での熱水循環堆積物の可能性を指摘した。もし、35億年前のストロマトライトが無機的なものであれば、27億年前の西オーストラリア Fortescue Group のストロマトライトが最古となる。

南アフリカの Barberton 地方で、34億年前の Greenstone belt の硫化鉄 (pyrite) のイオウの同位体測定から、生物の証拠が発見された (Ohmoto et al, 1993)。硫化鉄は、バクテリアが海水中の硫化物を還元してできるような同位体組成をもつ。そして、量は少ないが、多少の遊離酸素があったとしている。

南アフリカの Swaziland 地方で、32億年前の FigTree 累層 Swartkoppie 層のチャートから藻類の微化石が発見されている (Knoll & Barghoom, 1977)。化石は数 μm の球状で、現世のシアノバクテリアの分裂段階に相当するものが発見されている。

真核細胞の出現時期は、化石では21億年前 (Han & Runneger, 1992)、分子時計では18億年前 (Doolittle et al., 1989)、有機分子化石 (ステラン) では17億年前 (Summons et al., 1988) になる。この頃には、遊離酸素が、海水中 Fe^{2+} を消費し尽くし、大気中に蓄積される。シアノバクテリアの光合成系 (葉緑体) や、好気性細菌の酸素呼吸システム (ミトコンドリア) が共生して真核細胞が誕生した。やがて、多細胞動物が出現し、陸上への進出、人類の誕生まで進化していく。

VII 合成実験的アプローチ

合成実験的アプローチとは、生命を実験室で作ることを最終目的とする。生命を合成することはまだ達成されていない。合成にいたるステップは着実に進んでいる。ここでは、その現状を概観する。

1 材料の合成

生命の誕生には、アミノ酸20種類、ヌクレオチド5種類、グルコース、脂肪酸、リン酸、リボース、デオキシリボ核酸の合計30種類の部品があればよい (小尾・森,

1985)。そして、このような部品は、ある種の条件を持つ気体あるいは液体中で合成できることがわかってきた。

有機物は、生命のみが作り出す化合物であった。無機的には簡単に合成できないと考えられていた。地球がおこなったように、長い時間と無数の試行錯誤を繰り返さなければならぬものとされていた。

Urey と Miller によって、生命の化学進化の時代が再現 (実験) できることがわかった (Miller, 1953)。Urey - Miller の実験は、原始大気を想定したメタン、アンモニア、水素ガスの混合気体と、原始海洋を想定した沸騰した水を入れた容器で、雷を想定した放電を起こした。放電によって化学反応が起こり、下の原始の海に合成物質がたまる。グルシンやグルタミン酸などのアミノ酸、尿素や有機酸を合成するのに成功した。その後、各種のエネルギー源によってタンパク質を構成するアミノ酸、核酸を構成する塩基や糖 (リボース)、各種の有機酸、炭化水素、ポルフィリンなど生命を合成するのに必要な材料は無機的にすべてそろえることが実証された。

Urey - Miller の実験に用いたメタン・アンモニア・水素ガスの混合気体は「還元的」なもので、木星や土星の大気と同じである。しかし、地球の原始大気は、「還元的」でなく、二酸化炭素・水蒸気・窒素を主とする「酸化的」のものあるいは、一酸化炭素を共存する「弱還元的」大気と考えられている。

酸化的大気あるいは弱還元的大気では、水素がないと有機物の合成は著しく低下し、生命の発生は難しくなる (Bar-Nun & Chang, 1983)。この難点を克服するために、代案がいくつか提案された (川上・熊沢, 1995)。微惑星中の金属鉄が水と反応して還元的大気が形成された。海水中の Fe^{2+} の光化学反応で水素が発生して局所的に還元的環境が出現した。有機物は彗星がもたらした。微惑星の衝突で還元的化合物が合成された。いずれもあまり説得力のあるモデルではない。最近、海底火山活動による熱水活動によって有機物の合成が可能であるというモデルが提示された。このモデルにより、大気の状態や組成に左右されることなく、海洋さえあれば生命の発生が可能であることになる。

実験的研究の次の興味は、このような低分子の有機化合物の材料がどのように連なって、タンパク質などの高分子ができたということである。

高分子化のエネルギーは、低分子の有機物合成と同様に紫外線・放電・熱などである。Urey - Miller の実験と同じ材料に、熱 (1000 $^{\circ}\text{C}$) を加えてたり、白陶土にアミノ酸を吸着させたりして、高分子化やタンパク質が合成された。その後も、各種の材料や方法でタンパク質合成がおこなわれた。

何らかのエネルギーは必要とするが、原始惑星でごく普通に存在するものを利用して、高分子の合成ができる。生命の発生に必要な有機材料から高分子までは、比較的短時間に形成されることがわかってきた。

2 細胞膜の形成

生命機能を持つ材料の入れ物としてミクロスフェアやコアセルベートが考えられる。

コアセルベートは Oparin が提唱した生命の入れ物である。タンパク質の濃縮したコアセルベートには、周りの溶液からいろいろな成分を吸収できることがわかった。酵素のはいったコアセルベートに外から有機物を与えると、酵素活性をもち、産物を外に出すこともできた。

何種かのアミノ酸を数百度の高温で水も加えず熱するとタンパク質もどき（プロテノイド）ができる。プロテノイドが海水に入ってゆっくり冷えると小球（ミクロスフェア）ができた。このミクロスフェアは外部から成分を取り込んだり排出したりできる。ミクロスフェアがコアセルベートより優れている点は、膜の構造がしっかりしていて壊れないことと、ミクロスフェアが増えたり、小さなミクロスフェアを取り込んだり、その小さなミクロスフェアを隣のミクロスフェアに移したりできることである。

このようなミクロスフェアの機能があれば、細胞を作ることば可能である。

3 自己増殖

自己増殖のものは核酸である。核酸を細胞膜の中に取り込まねばならない。生命の誕生まで何度も試行錯誤ができる時間はあったであろう。したがって、生命は、たった一度のチャンスを使って生命が発生したと考える必要はなく、何度もやり直しをしながら地球にもっとも適切な生命が作られたと考えられる。

生物の起源を分子レベルで見た場合、情報が先か機能が先かわかっていない。情報は DNA が担い、機能はタンパク質が担っている。まるで卵が先かニワトリが先かという議論と同じである。

原始の海洋では、有機物のスープが形成される。アミノ酸と核酸塩基が生命の材料として貯まる。アミノ酸は、タンパク質となり、代謝能力を持つようになる。ある種のタンパク質は自己複製能力を持つようになり、生命の前駆体（リボヌクレオプロテイン）といえる世界が出現する。このようなタンパク質の前生命を「タンパク質ワールド」と呼ぶ。一方、核酸塩基は RNA となり自己複製機能を持つようになる。そこに触媒反応を持つ RNA が出現し、代謝機能が発生する。RNA も自己複製と代謝によって「RNA ワールド」を持つ。

タンパク質ワールドと RNA ワールドは共生をし、発達していったと考えられる。

RNA は当初一本鎖であったのが安定化をするために二本鎖の RNA となり、DNA と発展していく。DNA は遺伝情報を蓄積する場となり、RNA はその遺伝情報を読みタンパク質を生成する機能を充実させていく。タンパク質は、代謝機能を充実させていく。共生によって DNA、RNA そしてタンパク質がそれぞれの機能を分業化し、高度化できるようになった。そして、DNA、RNA、タンパク質が一つの入れ物にはいることによって今の生物の原型が誕生したと考えられる。

VIII 地球生物学的アプローチ

地球生物学的アプローチとは、現世の生物から、その仕組みを解明していき、生命の起源を知るものである。

いわゆる生物学における生命の起源追求である。研究の歴史はそれほど古くなく、分子生物学や遺伝子レベルによる系統解析などによって、生命の起源に言及できるようになってきた。ここでは、現代生物学の成果をまとめる。

1 生命とは

我々は地球型生命しか知らない。逆に地球型生命については、ある程度の知識はある。

生命の本質は、オーゲルの定義によると「複雑な情報伝達と再生産可能な自然選択によって進化した対象体」と呼んだ。非常に哲学的で抽象的な表現である。具体的に見ていく。

生命を機能という視点でとらえると遺伝・代謝・適応の3つ機能を持つ物体である（清水, 1985）。遺伝は、核酸が担っており、自己複製に関わっている。自己複製は、地球生命の場合 DNA がその根源となっている。DNA が分裂して自己複製がおこなう。DNA は有機塩基、糖、リン酸から構成されている。代謝は、タンパク質が担っており、個体の維持をおこなう。代謝とは、外界からエネルギーの基となる養分を取り入れ、不要になった物質を外界に廃棄することをいう。内部では、触媒としてのタンパク質とエネルギー源としての ATP による化学反応が、成長や生殖のエネルギーを生み出す。遺伝と代謝は生命系の自己複製を支える内因となるものである。適応は、外界と生命自身の相互作用の結果である。生命は外界と個体を区別するための境界をもつ。その実態を、地球生命では細胞と呼ぶ。細胞は細胞膜というリン脂質で包まれている。細胞膜を通じて代謝が営まれる。

遺伝には進化というもう一つの重要な機能を含んでいる。進化とは、自己複製過程におこる変化が種のレベルあるいはもっと上位の分類群に発展、固定したものである。当然進化を担っている物質は自己複製と同じ DNA である。進化のメカニズムはダーウィン以来盛んに研究や議論がおこなわれているが、決着がつかないほど難問である。

進化とは、地球生命に固有のものなのかそれとも普遍的なものなのかは不明である。進化と呼べるものは、可変性のある体勢をもつ多様な生命を前提としている。もし多様性がなく1種の生物種であれば、その発展とは数の増減だけである。また、個体内に可変性のメカニズムが組み込まれてなければ、多様性があっても、種毎の数の変化あるいは絶滅を起こすにすぎない。生命に多様性があり、異種の生命間で強弱関係があったとしたら、そこには何らかの競争がおこり、変化してより強いものが生き残り個体数を増やすことになる。しかし、このような多様性と可変性が、生命にとって普遍的なメカニズムかどうかは不明である。

地球生命で最小の生物、あるいは一番原始的な生物は、バクテリアである。小さいがためにバクテリアであるという認定が困難である。バクテリアの存在を実証するには、5つの条件を満たす必要がある（Folk, 1993）。

- ・孤立した個体の集合
- ・同サイズの個体群

- ・似たような形態の個体群
- ・Fe を含まず Ca か Si を含んだ個体
- ・鉱物や人工物でないもの

である。

生命の定義やバクテリアの認定基準にあてはまらない生きものも、地球生命にはある。ある種のウイルスのように RNA だけをもち、他の生命体の中でのみ生命活動をおこなえる生命もある。

ウイルスは生命と非生命の中間なものである。ウイルスのサイズは20~450nmで、普通の細胞(20~30 μ m)と比べて2、3桁小さく、バクテリアの1~5 μ mとくらべても1、2桁小さい。ただし、有機物の高分子の大きさ1~10nmと比べると1桁ほど大きいといえる。ウイルスはDNAあるいはRNAの周りをタンパク質の殻が包むだけの簡単な構造である。スタンレーが1935年にダバコモザイクウイルスの結晶化したことから、生命と非生命の区別のつけづらい存在となった。現在のウイルスは、生命に寄生することによって生きている。既存の生命なくしてはあり得ない存在なのである。このような定義は地球生命に関する定義であって、宇宙生命には当てはまらないものがあるかもしれない。しかし、このような定義なくして生命を語ることは難しい。

2 生命の構成

生命を構成する基本的な化合物は、一般細胞で、水(70生体重量%)、タンパク質(16.5wt%)、脂質(6.0wt%)、炭水化物(3.5wt%)、核酸(1.3wt%)、無機塩類(0.5wt%)、その他(Mo、Fe、Co、Cu、Zn、Mn、I、Bなど:2.2wt%)となる。ヒトを元素組成で見ると、O(66.1生体重量%)、C(16.9wt%)、H(9.5wt%)、N(4.5wt%)、Ca(1.2wt%)、S(0.65wt%)、P(0.55wt%)、Na(0.23wt%)、K(0.19wt%)、Cl(0.16wt%)、Mg(0.04wt%)となる。

以下で、生命を構成する基本的な化合物についてまとめる(表10)。

水

構成成分の水は、細胞では65~95wt%となる。水の機能は、酵素反応の場を提供すること、比熱の大きいため温度の急変を防止すること、CO₂とO₂のガス交換をすること、細胞内のpHを緩衝することである。

タンパク質

タンパク質は、C、HとOで構成されており、NやSを含むこともある。多数のアミノ酸がペプチド結合したものである。タンパク質の機能は、酵素の本体として代謝を推進したり、脂質と結合して生体膜を構成したり、核酸と結合して染色体を形成することである。タンパク質は、アミノ酸のみからなる単純タンパク質(アルブミン、インシュリン、リゾチーム、ヒストンなど)と、アミノ酸以外の化合物も含む複合タンパク質に区分される。複合タンパク質は、核酸と結合した核タンパク質(デオキシリボ核タンパク質)、糖と結合した糖タンパク質(ムチンなど)、リン酸と結合したリンタンパク質(ペプシン(カゼインなど)、色素と結合した色素タンパク質(ヘモ

グロビン、シトクロム、カタラーゼ、ペルオキシダーゼなど)などがある。

脂質

脂質は、C、HとOから構成されており、PやNを含むこともある。炭水化物と比べよりOのモル比が少ない。脂質は、リン脂質は生体膜(細胞膜)の成分であり、エネルギー源、ビタミン、ホルモン、光合成の補助色素として働く。グリセリンと脂肪酸からなる単純脂肪と複合脂質に分類される。単純脂肪は脂肪や油脂とも呼ばれる。脂肪や油脂は、固体の脂肪と液体の油(液体)の総称である。生体の単純脂肪はオリーブ油、肝油、バター、ラードなどである。複合脂質は、脂肪酸の1つがリン酸化合物のリン脂質(生体膜の成分)、構成成分として糖を含む糖脂質(生体膜の成分)、ステロイド核をもつステロイド(ビタミンD、コレステロール、性ホルモン、副腎皮質ホルモンなど)、色素のカロテノイド(カロテン、キサントフィルなど)に区分される。

炭水化物

炭水化物は、CとH、Oで構成される。HとOは2:1の割合で結合している。生体内でエネルギー源となっている。糖の数によって、単糖類、二糖類、多糖類に分類される。単糖類(C₆H₁₂O₆)は、炭素の数によって、五糖類(デオキシリボース、リボースなど)と六糖類(ブドウ糖、果糖、ガラクトースなど)に細分される。二糖類(C₁₂H₂₂O₁₁)は、2分子の単糖類に分解される。麦芽糖は2個のブドウ糖に、ショ糖はブドウ糖と果糖に、乳糖はブドウ糖とガラクトースに分解される。多糖類((C₆H₁₀O₅)_n)は、多数の単糖類に分解される。デンプンは多数のブドウ糖に、グリコーゲンは多数のブドウ糖に、セルロースは多数のブドウ糖に分解される。

核酸

核酸は、塩基と糖とリン酸からなる。アデニン(A)、グアニン(G)、シトシン(C)、チミン(T)、ウラシル(U)の5種類のヌクレオチドからなる。機能は、自己複製や遺伝、タンパク質合成を支配している。核酸は、DNAとRNAに分類される。DNAはデオキシリボ核酸のことで、二重らせん状の二重鎖をもつ。核内に存在する分子量6,000,000~16,000,000の化合物である。DNAは、A、T、GとCからなり、遺伝子本体である。DNAは、RNAを合成する。RNAは、リボ核酸のことで、一重鎖である。分子量は、150,000~500,000で、A、U、GとCからなる。RNAはタンパク質を合成する。RNAは、機能によってmRNA、tRNAとrRNAに区分できる。mRNAは伝令(messenger)の意味で、tRNAは転移(transfer)の意味で、細胞質に存在する。rRNAはリボソーム(libosomal)の意味で、核小体と細胞質に存在する。

無機塩基など

無機塩類は、Na、K、Ca、Mg、Cl、Fe、S、P、Cu、Zn、Co、Mn、Bなどである。Naの機能は動物体液の浸透圧を調整する。PとCaはリン酸カルシウムとして

表 10 生命の構成

構成成分比**一般細胞 (生体重量 %)**

水: 70, タンパク質: 16.5, 脂質: 6.0, 炭水化物: 3.5, 核酸: 1.3, 無機塩類: 0.5, その他 (Mo, Fe, Co, Cu, Zn, Mn, I, B): 2.2

ヒト 元素組成 (生体重量 %)

O: 66.1, C: 16.9, H: 9.5, N: 4.5, Ca: 1.2, S: 0.65, P: 0.55, Na: 0.23, K: 0.19, Cl: 0.16, Mg: 0.04

構成成分**1 水**

構成: H₂O、65～95 %

機能: 酵素反応の場を提供、比熱の大きい温度の急変防止、CO₂ と O₂ のガス交換、細胞内の pH を緩衝

2 タンパク質

構成: C, H, O (N や S を含むこともある)、多数のアミノ酸がペプチド結合

機能: 酵素の本体として代謝を推進、脂質と結合して生体膜を構成、核酸と結合して染色体を形成

分類

単純タンパク質: アミノ酸のみからなる; アルブミン、インシュリン、リゾチーム、ヒストン

複合タンパク質

核タンパク質: 核酸と結合; デオキシリボ核タンパク質

糖タンパク質: 糖と結合; ムチン

リンタンパク質: リン酸と結合; ペプシン、カゼイン

色素タンパク質: 色素の結合; ヘモグロビン、シトクロム、カタラーゼ、ペルオキシダーゼ

3 脂質

構成: C, H, O (P や N を含むこともある、炭水化物より O が少ない)

機能: リン脂質は生体膜 (細胞膜) の成分、エネルギー源、ビタミン、ホルモン、光合成の補助色素

分類

単純脂肪

脂肪 (油脂): 脂肪 (固体) と油 (液体) の総称、グリセリンと脂肪酸からなる; オリーブ油、肝油、バター、ラード

複合脂質

リン脂質: 脂肪酸の 1 つがリン酸化合物; 生体膜の成分

糖脂質: 構成成分として糖を含む; 生体膜の成分

ステロイド: ステロイド核をもつ化合物; ビタミン D、コレステロール、性ホルモン、副腎皮質ホルモン

カロテノイド: 色素; カロテン、キサントフィル

4 炭水化物

構成: C, H, O (H と O は 2 : 1 の割合で結合)

機能: エネルギー源

分類

単糖類 C₆H₁₂O₆; 五糖類: デオキシリボース、リボース。六糖類: ブドウ糖、果糖、ガラクトース

二糖類 C₁₂H₂₂O₁₁ (2 分子の単糖類に分解); 麦芽糖 (→ブドウ糖×2)、ショ糖 (→ブドウ糖+果糖)、乳糖 (→ブドウ糖+ガラクトース)

多糖類 (C₆H₁₀O₅)_n (多数の単糖類に分解); デンプン (→多数のブドウ糖)、グリコーゲン (→多数のブドウ糖)、セルロース (→多数のブドウ糖)

5 核酸

構成: 塩基+糖+リン酸からなる 5 種類のヌクレオチド; アデニン (A)、グアニン (G)、シトシン (C)、チミン (T)、ウラシル (U)

機能: 自己複製や遺伝、タンパク質合成を支配

分類

DNA デオキシリボ核酸: 二重鎖 (二重らせん)、核内、分子量 6,000,000～16,000,000、A, T, G, C、遺伝子本体、RNA を合成

RNA リボ核酸: 一重鎖、分子量 150,000～500,000、A, U, G, C、タンパク質を合成

mRNA: 伝令 (messenger) RNA、細胞質

tRNA: 転移 (transfer) RNA、細胞質

rRNA: リボソーム (ribosomal) RNA、核小体と細胞質、全 RNA の 85 %

6 ATP アデノシン三リン酸

構成: 塩基 (アデニン) + 糖 (リボース) + リン酸 × 3

機能: 1、2 個目のリン酸が高エネルギーで結合、エネルギーの貯蔵と発生

7 無機塩類

構成: Na, K, Ca, Mg, Cl, Fe, S, P, Cu, Zn, Co, Mn, B など

機能: Na 動物体液の浸透圧調整; P, Ca リン酸カルシウムとして骨の成分; Mg 植物のクロロフィルの成分; Fe ヘモグロビンやシトクロムの成分; Cu, Zn, Co, Mn, B 酵素の補助因子

骨の成分となる。Mg は植物のクロロフィルの成分である。Fe はヘモグロビンやシトクロムの成分である。Cu、Zn、Co、Mn と B は酵素の補助因子である。

その他に、ATP（アデノシン三リン酸）と呼ばれる重要な生体化合物がある。ATP は、塩基（アデニン）と糖（リボース）、3 個のリン酸からできている。1、2 個目のリン酸は、高エネルギーで結合しており、エネルギーの貯蔵と発生をおこなう。

3 生命の種類

地球生命は炭素を基準としている。しかし、他の元素や仕組みをもつ生物がいてもよいはずである。例えば、炭素の似た機能を持つケイ素（Si）やゲルマニウム（Ge）など 4 価の元素を基にする生命が想定できる。

ケイ素型の生命は熱に強く、マグマオーシャンのような惑星があれば発生したかもしれない。最終産物は炭素型生命は二酸化炭素だが、ケイ素型生命は二酸化ケイ素になるはずである。代謝や遺伝などのメカニズムは不明である。

木星のようなガス惑星で、メタンやアンモニアを利用した炭素型生命の材料が生成できることが実験で確認されている。Sagan et al. (1967) は、このような環境では浮遊性の生命が可能である。気球のように水素を入れたり、暖めたりして大気中に浮いている生命が考えられる。浮遊性生命は、天体内から十分なエネルギーが発生していればそのエネルギーで活動できる。例えば、木星では太陽から得ているエネルギーの 2 倍ほどのエネルギーを発生している。このようなエネルギーを活用すれば、太陽から遠く離れた惑星でも生命が発生可能である。

炭素型生命は水の中に発生すると考えられている。水は、いろいろな物質を溶かせること、物質をイオン化できること、比熱が大きいことが挙げられる。しかし、水に変わるような媒質があれば、別の形態の生命が発生していいはずである。アンモニアは、宇宙にたくさんある物質で、液体の水に比較的似た性質をもつ。アンモニアの海では、やはり有機物を中心とした炭素型生命が誕生する可能性がある。しかし、タンパク質や核酸は全く違ったものになるはずである。アンモニア型タンパク質やアンモニア型核酸と呼ぶべきもので構成されているはずである。このような生命の代謝や機能は、有機化学の知識が役立つはずである。このようなアンモニア型生命体は、窒素を吸収して最終産物としてシアンを出すと考えられる。シアンは地球生命にとって有毒だが、酸素もかつては嫌気性生命の世界では有毒な物質であった。それに、アンモニア水の中でも生きていける生物が地球から見つかっている。水から生まれた生物だが、雨傘を広げたような形のバクテリアである。20 億年前の地層から、そっくりな化石が見つかっている。

渡辺格は「沼生物」という地球生物とは全く違った生きものを考えた。一つの沼が変化しながらも永遠に生き続けるものである。Bernal たちは、このような沼生物みたいな「生きている沼」が最初の地球生命であったと考えた。小さな沼に川から有機物や栄養物質が流れ込み、各種の反応を起こす。やがて、ある限られた反応が一

定のスピードで進む。このような沼が、機能を保ちながら干上がって、小さくなり細胞膜のようなものが生じれば細胞としての機能をもつ生命となる。これを、Bernal たちは、地球生命の始まりと考えた。

このほかにも、SF 的な生命はいくつも考えられているが、まだ科学といえる段階に達していない。それは宇宙生命の存在が確定されていないことが一番の原因である。しかし、このような別タイプの生命体は、生命の合成実験的アプローチが可能である。また有機化学や無機化学、あるいは岩石・鉱物学などの学問の知識の応用で各種の生命体の可能性を探ることができる。

4 地球生命の進化

地球の生命は、古代からいくつものに分類されてきた。現生生物の記載は、150 万種を終えたに過ぎない。実際に現生生物は数千万種あるいは億に達するとされる。まして過去に生きていた古生物までの分類を考えると、生物の全てを知るには多大なる労力と時間が必要となる。

地球生物の分類には、人為分類と自然分類、系統分類がある。系統分類が一番科学的で普遍性があるものだが、まだまだ系統分類は完成していない。かつて、地球生物は、動物界と植物界の 2 界分類がされていた。しかし、菌類の発見により、全く別の菌界が増え、3 界分類になった。3 界分類では、栄養の流れを中心にみていくと、菌類が栄養の吸収、植物界が独立栄養で、動物界が摂食という大区分が可能で、菌類から植物界、動物界と栄養摂取の方法が、系統分類に適合している。

顕微鏡や電子顕微鏡の発達によって、いままで認識できなかったほど小さな生物の詳細な観察がおこなわれ、原生生物界とモネラ（原核生物）界が新たに区分された。原生生物界とモネラ界は、生物の系統を無視したもので、系統分類とはいえない。しかし、現在では仮としてではあるが、分類の体系として使われている（八杉ほか、1996）。

生命の起源を、系統関係から推定する方法として、できるだけ古い生命様式を求めて、最初の生命にたどりつこうとする方法がある。このような最初の生命を、コモノート（Commonote）と呼んでいる（大島、1995）。コモノートは日本では使われているがあまり国際的には普及していない。生命の起源が一種の生物から誕生したという保証はない。いくつもの生命が共生して、進化してきたとも考えてもよいので、あくまでもコモノートとは架空の生物である。

このような状態であるから、系統分類からの生命の起源は完成されていない。以下では、現時点での、系統分類からみた生物の進化を概観する。

一番古いタイプの生命は、古細菌と考えられている。古細菌は、生育環境が温泉中や海底火山、塩湖などの特殊な環境で発見される。古細菌は、嫌気性生物、生育環境の異常性、生化学的独自性、系統樹状での位置などから、非常に原始的であると考えられている。

古細菌から、やがて光合成のできるシアノバクテリアが誕生する。シアノバクテリアはラン藻として C3 光合成生物へと進化する。酸素を利用できる環境ができると好気性細菌が誕生する。その後、古いタイプの核を持つ

古核生物が出現する。ラン藻と好気性細菌が、古核生物と共生して植物的真核生物となる。この植物的真核生物が、現在の植物の祖先である。古核生物と好気性細菌そしてべん毛細菌が共生して原始べん毛生物として、菌類と動物の祖先となった。

このようなシナリオが、現生生物からみた地球生物の進化過程である。

5 セントラル・ドグマ

セントラル・ドグマ (central dogma) とは、中心教義と訳され、遺伝情報は DNA→RNA→タンパク質へと一方向に流れていくことをいう。Crick が提唱した考え方であるが、現在ではセントラル・ドグマはかなり詳しくわかってきた。概略は図4のようになる。

DNAには遺伝情報がおさめられている。遺伝情報とはタンパク質合成に必要な塩基配列のことである。その遺伝情報は原核細胞にはぎっしりと書き込まれているが、真核細胞には、意味ない配列部が含まれている。タンパク質を作るための塩基配列部をエクソンといい、意味ない(発現しない)塩基配列部をイントロンと呼ぶ。長いDNAほどイントロンの占める割合は多くなる。ヒトのDNAは30億対の塩基があるが、エクソンはそのうち5~10%にすぎない。エクソンがイントロンに分断されているのである。

DNAからRNAへの転写がおこなわれるが、イントロンも一緒にコピーされる。そのようなRNAをhnRNA(前駆体 mRNA)と呼ぶ。イントロン部を切断してエクソンだけにするためのプロセッシングと呼ばれる作業を経て、成熟した mRNA となる。プロセッシングでは1割ぐらいの分子量まで小さくなる。例えば、ヒトのアルブミンの合成のための遺伝子は DNA 上では25,000塩基で表されている。プロセッシングを受けた mRNA では2,100塩基になっている。

mRNAは、細胞質に出て、配列すべきアミノ酸の種類と数や順序を指定する。tRNAは、mRNAに指定されたアミノ酸をリボソームまで運ぶ。tRNAはアミノ酸の種類に対応しているため種類が多い。61種のtRNAがあると考えられている。

小胞体上にはリボソームと mRNA が一緒になって、tRNA が運んできたアミノ酸によってタンパク質が合成されていく。核小体(仁)にあるDNAで、rRNAが合成され核外に出てリボソームとなり、小胞体に付着する。

現在非常に細部にわたってセントラル・ドグマは解明されている。究極としてセントラル・ドグマはすべて化学反応式と熱力学によって記述される見通しが付いた。しかし、何故このような方法を地球生物がとっているかは不明である。

IX まとめ

我々は、自分自身について意外なほど知らない。生命の誕生は偶然が必然か、何故地球生命は分子レベルで一種しかないのか、何故炭化水素と水を基盤にしているのか、何故20種のアミノ酸を利用しているのか、何故アミノ酸はL-体で核酸を構成している糖はD-体なのか、

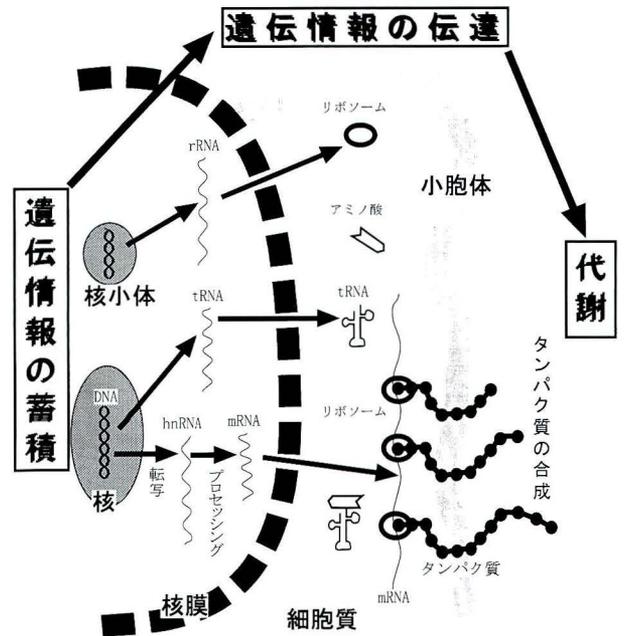


図4 セントラル・ドグマの概念

生命の根本に関わる疑問に答えを持ってない(河崎, 1997)。このような疑問に対する答えは我々の外にある。地球外生命の存在は、生命の唯一性を否定し、多様性あるいは必然性の程度を導き出せる。そして、地球外生命と地球生命の比較は、地球生命の特性と普遍性を導き出すはずである。火星生命化石の発見の真偽は、このような根本的疑問に対する答えを得る可能性を示したのである。

本論文で述べた地球生命の誕生と進化を素描としてまとめる。図5に生命の起源に関して、重要と考えられる事件をまとめた。

生命発生のための必要条件は、地表での液体の水の定常的な存在である。定常的な水とは、海を意味する。海が安定に存在し始めたときが、生命の誕生の上限であろう。海の存在は、地表の証拠から、38億年前まで遡る。

地球初期には、カタストロフィックな微惑星の衝突が何度もあったはずである。そのたびに、地表は壊滅的な状況におちいった。微惑星の衝突は、指数関数的に減っていくが、生命は、ある程度突発的な出来事から身を守る必要がある。現在、生命発生の場として、深海の熱水噴出の場が有力視されている。実験の試みによって、有機物の合成は条件さえと整えば、比較的簡単にできることがわかった。海底火山の熱水循環で有機物が合成され、一旦合成された有機物は還元的な水中では分解することなく蓄積していく。そして、原始の海洋で、タンパク質の材料となるアミノ酸や核酸の材料になるヌクレオチドに満ちた有機物のスープができる。

その後の生命の進化は、短期間には起こらない。十分な時間をかけて行われる。試行錯誤と生存競争、別の種との共同作業によってより強く成長してきた。

生命進化におけるイベントとして、以下の7つが挙げられている(川上・熊澤, 1995)。化学進化、最初の細胞の出現、シアノバクテリアの出現、真核細胞の出現、

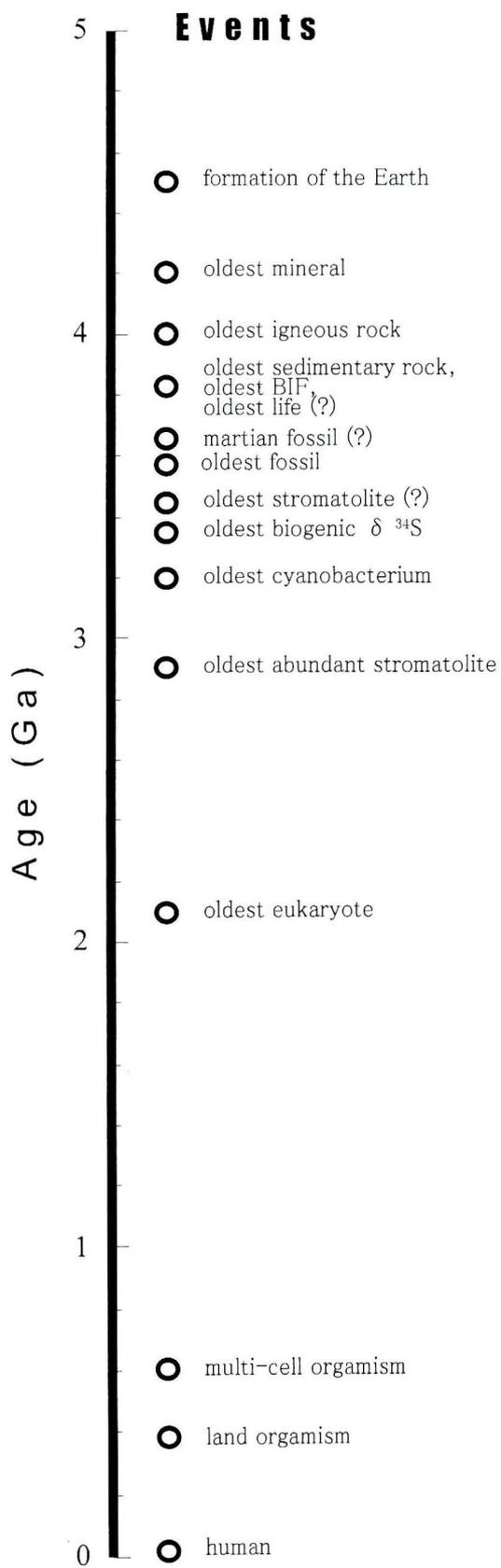


図5 生命の起源に関するベンチマーク

多細胞動物の出現、陸上への進出、人類の誕生である。

これは、地球生命に関する重大イベントであるが、宇宙生命に適用すると、化学進化は、素材から生命物質への変化を意味する。最初の細胞の出現は、最初の生命の誕生である。シアノバクテリアの出現は、生命と惑星とのグローバルな相互作用と言い換えることができる。真核細胞の出現と多細胞動物の出現は、生命の複雑化・高機能化である。陸上への進出は、惑星内の新天地への進出である。人類の誕生は、知的生命の誕生になる。さらに、もう一つ付け加えるべきことは、生命の惑星外への進出である。我々の惑星外への進出はすでに始まったが、まだ短期間の一時的な滞在である。しかし、今後の大きなステップは始まったのである。

文献

Ahmad, T. & J. Tarney, 1994. Geochemistry and petrogenesis of late Archaean Aravalli volcanics, basement enclaves and granitoids. *Precamb. Res.*, 65:1-23.

赤井純治, 1996. 火星隕石 (ALH84001) とバクテリア起源の磁鉄鉱・磁硫鉄鉱, 惑星地質ニュース, 9:2-6.

赤井純治, 1997a. 火星隕石 (ALH84001) 産磁鉄鉱・磁硫鉄鉱はバクテリア起源か—地球でのバイオミネラリゼーションの知識からの比較検討—. *月刊地球*, 19:451-459.

赤井純治, 1997b. 火星隕石 (ALH84001) と生体鉱物. *日本惑星科学会誌*, 6:46-51.

秋山雅彦, 1997. 火星隕石にナンノバクテリアは検出されたか. *月刊地球*, 19:447-450.

Anders, E., 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. *Science*, 274:2119-2125.

Arrhenius, S. A., 1908. *Worlds in the making*. 100pp. Harper & Row, London.

Ash, R. D., S. F. Knott & G. Turner, 1996. A 4-Gyr shock age for a martian meteorite and implications for the cratering history of Mars. *Nature*, 380:57-59.

Banin, A., B. C. Clark & H. Wanke, 1992. Surface chemistry and mineralogy. In Kieffer, H. H. et al., eds., *Mars*, pp. 594-625. Univ. of Arizona Press, Tucson.

Bar-Num, A. & S. Chang, 1983. Photochemical reactions of water and carbon monoxide in Earth's primitive atmosphere. *J. Geophys. Res.* 88:6662-6672.

Bell, J.F., 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. *Science*, 274:2121-2122.

Bibikova, E. V., 1984. The most ancient rocks in the USSR territory by U-Pb data on accessory zircons. In Kroner, A., G. N. Hanson & A. M. Goodwin eds., *Archean Geochemistry*, pp. 235-250. Springer-Verlag, Berlin.

Bibikova, E. V., A. N. Belov, T. M. Gracheva, et al. 1987. On the age of the granulite metamorphic and metasomatic processes. *Transaction of the 23 rd Session on Isotope Geochron.*, pp. 71-85. Nauka, Moscow.

Bibikova, E. V., G. M. Drugova, V. L. Duk & L. Keysky, 1986. Geochronology of the Aldan-Vitim Shield. In Shukolyukov, Y. A. ed., *Isotopic Methods in Geology and Geochronological Scale*, pp. 135-159. Nauka, Moscow.

Black, L. P., I. S. Williams & W. Compston, 1986. Four zircon ages from one rock: the complex history of a 3930Ma old granulite from Mount Sones, Enderby Land, Antarctica. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 94:427-437.

Bogard, D. D., L. Husain & L. E. Nyquist, 1979. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of

- the Shergotty achondrite and implications for its post-shock thermal history. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43:1047-1055.
- Bowring, S. A., I. S. Williams & W. Compston, 1989. 3.96Ga gneisses from the Slave Province, Northwest Territories, Canada. *Geology*, 17:971-975.
- Bridgwater, D., J. H. Allaart, J. W. Schopf, C. Klein, M. R. Water, E. S. Barghoorn, P. Strother, A. H. Knoll & B. E. Gorman, 1981. Microfossil-like objects from the Archaean of Greenland: A cautionary note. *Nature*, 289:51-53.
- Clayton, R. N. & T. K. Mayeda, 1996. Oxygen isotope studies of achondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60:1999-2018.
- Clemett, S. J. & R. N. Zare, 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. *Science*, 274:2122-2123.
- Cocconi, C. & P. Morrison, 1959. Searching for interstellar communications. *Nature*, 184:844.
- Compston, W. & R. T. Pidgeon, 1986. Jack Hills, evidence of more very old detrital zircons in Western Australia. *Nature*, 321:766-769.
- Cordani, V. G., K. Sato & M. M. Marinho, 1985. The geological evolution of the ancient granite-greenstone terrane of central-southern Bahia, Brazil. *Precamb. Res.*, 27:187-213.
- Crick, F. M. C. & L. E. Orgel, 1973. *Icarus*, 19:341.
- Danni, J. C. M., R. A. Fuck & J. R. Leonardos, 1982. Archean and lower Proterozoic units in Central Brazil. *Geol. Rdsch.*, 71:291-317.
- 出村祐英, 1996. 火星生命痕跡発見の報に関する議論. 惑星地質ニュース, 9:7-8.
- Doolittle, R. F., K. L. Anderson & D. -F. Feng, 1989. Estimating the prokaryote-eukaryote divergence time from protein sequences. In Ferheim, B. et al., eds. *The hierarchy of Life*, pp. 73-85. *Excerpta Medica*, Amsterdam.
- Drake, F. D., 1961. Project Ozma. *Phys. Today*, 14:40.
- Dreibins, G. & Wanke, H., 1985. Mars, a volatile-rich planet. *Meteoritics*, 20:367-381.
- Dyson, T. J., 1960. Search for artificial stellar sources of infrared radiation. *Science*, 131:1667.
- Gibson Jr. E. K., D. S. McKay, K. Thomas-Keptra & C. S. Romanek, 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. *Science*, 274:2125.
- Goodwin, A. M., 1996. *Principles of Precambrian Geology*. 327pp. Academic Press, Toronto.
- Folk, R. L., 1993. SEM imaging of bacteria and nanobacteria in carbonate sediments and rocks. *Jour. Sediment. Petrol.*, 63:990-999.
- Gleason, J. D., D. A. Kring, D. H. Hill & W. V. Boynton, 1997. Petrography and bulk chemistry of Martian orthopyroxenite ALH84001: Implications for the origin of secondary carbonates. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61:3503-3512.
- Graham, A. L., Bevan, A. W. R. & Hutchison, R. 1985. *Catalogue of Meteorites* (4th edition). 460pp. Univ. Arizona Press, Tucson.
- Han, T. -H. & B. Runneger, 1992. Megascopic eukaryotic algae from the 2.1 billion-year-old Negaunee iron-formation, Michigan. *Science*, 257:232-235.
- Hart, M. H., 1975. *Q. Jour. Res. Astr. Soc.*, 16:128.
- Harvey, R. P. & H. Y. McSween, Jr., 1992. Petrogenesis of the Nakhilite Meteorites: Evidence from Cumulate Mieral Zoni. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56:1655-1663.
- Harvey, R. P. & H. Y. McSween, Jr., 1996. A possible high-temperature origin for the carbonates in Martian meteorite ALH 84001. *Nature*, 382:49-51.
- 平林久・寿岳潤, 1984. 宇宙に文明をさがす—文明探査の基礎と現状-. *科学*, 54:437-444.
- Holland, H. D., 1997. Evidence for life on Earth more than 3850 million year ago. *Science*, 275:38-39.
- Hoyle, F. & C. Wickramasinghe, 1978. *Life Cloud: The Origin of Life in the Universe*. J. D. Dent & Sons Ltd., New York.
- Hurley, P. M., H. W. Fairbairn & H. E. Gaudette, 1976. Progress report on early Archean rocks in Liberia, Sierra Leone and Guyana, and their general stratigraphic setting. In B. F. Windleg ed., *The Early History of the Earth*, pp. 511-521. John Wiley, New York.
- 井田茂, 1997. 惑星系の多様性と普遍性—太陽系外の惑星の発見—. *日本惑星科学会誌*, 6:4-18.
- 池田幸雄, 1997. 火星隕石と火星生命. *月刊地球*, 19:403-412.
- 磯崎行雄・寺林優・柁島太郎・角田地文・恒松知樹・鈴木良剛・小宮剛・丸山茂徳・加藤泰浩, 1995. "35億年前最古ストロマトライト"の正体—西オーストラリア、ビルバラ産、太古代中央海嶺の熱水性堆積物—. *月刊地球*, 17:476-489.
- Jagoutz, E., A. Sorowka, J. D. Vogel & H. Wanke, 1994. ALH84001: Alien or progenitor of the SNC family? *Meteoritics*, 29:478-479.
- Jagoutz, E. & H. Wanke, 1986. Sr and Nd isotopic systematics of Shergotty meteorite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50:939-954.
- Jahn, B. -M., B. Auvray, J. Cornichet, et al. 1987. 3.5 Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China: field occurrence, petrography, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry. *Precamb. Res.*, 34:311-346.
- 川上紳一・熊澤峰夫, 1995. 生命と地球の共進化解説へ向けて—全地球史解説—. *月刊地球*, 17:433-440.
- 河崎行繁, 1997. 地球外に生命を探す—裏方にも光を—. *日本惑星科学会誌*, 6:52-58.
- 河島信樹・小池博平, 1997. 火星探検—火星人から生命探査まで—. 205pp. PHP 研究所, 東京.
- Kinny, D. D., 1986. 3820Ma zircon from a tonalitic Amitsoq gneiss in the Godthab district in southern West Greenland. *Earth Planet -Sci. Lett.*, 79:337-347.
- Knoll, A. H. & E. S. Barghoorn, 1977. Archean microfossils showing cell division from the Swaziland System of South Africa. *Science*, 198:396-398.
- Knott, S. F., R. D. Ash & G. Turner, 1995. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of ALH 84001: Evidence for the early bombardment of Mars. *Lunar Planet. Sci.*, 26:765-766.
- 小出良幸, 1994. 総説: 地球形成の場にまつわるモデルとその束縛条件. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 23:51-86.
- 小出良幸, 1995a. 総説: 隕石—地球の材料物質としての隕石—. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 24:9-38.
- 小出良幸, 1995b. 地球前史—地球形成場の素描—. *月刊地球*, 17:203-209.
- 小出良幸, 1997. 宇宙階層概論—宇宙の階層内における私たちの普遍性と特異性—. 神奈川県立博物館調査研究報告(自然科学), 8:131-170.
- 小出良幸・山下浩之, 1995. 地球前史—地球形成場と原料への束縛条件—. *地学雑誌*, 104:167-188.
- 小出良幸・山下浩之, 1996a. 総説: 地球初期への惑星物理的束縛条件. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 25:1-26.
- 小出良幸・山下浩之, 1996b. 総説: 地球初期への惑星化学的束縛条件. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 25:27-55.
- 小出良幸・山下浩之・佐藤武宏, 1997a. 惑星進化論へのアプローチ: 要因と概論. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 23:1-25.
- 小出良幸・山下浩之・佐藤武宏, 1997b. 惑星科学の現状—惑星の調べ方と調べてわかったこと—. 神奈川県立博物館研

- 究報告(自然科学), 8:13-29.
- 小島秀康, 1997. 隕石探査と火星隕石. 月刊地球, 19:395-402.
- 国立天文台編, 1997. 理科年表平成10年. 1054pp. 丸善, 東京.
- Kroner, A., R. Greiling, T. Reischmann, I. M. Hussein, R. J. Stern, S. Durr, J. Kruger & M. Zimmer, 1987. Pan-African crustal evolution in the Nubian segment of northeast Africa. In A. Kroner ed., Proterozoic Lithospheric Evolution. Amer. Geophys. Union Geodynamics, 17:235-258.
- Kroner, A. & A. Tegtmeyer, 1994. Gneiss-greenstone relations in the Ancient Gneiss Complex of southwestern Swaziland, southern Africa, and implications for early crustal evolution. Precamb. Res., 67:109-139.
- Latouche, L., 1978. Etude petrographique et structurale de Precambrien de la region des Gour Cumelalen (Nord-Est de l'Ahaggar, Algerie). These. Doct. Etat. Univ. Paris.
- Liu, D. Y., A. P. Nutman, W. Compston, J. S. Wu & Q. H. Shen, 1992. Remnants of >3800Ma crust in Chinese part of the Sino-Korean craton. Geology, 20:339-342.
- Lobach-Zhuchenko, S. B., V. P. Chekulayev, S. A. Sergeev, O. A. Levchenkov, & I. N. Krylov, 1993. Archaean rocks from south-eastern Karelia (Karelian granite-Greenstone terrain). Precamb. Res., 62:375-397.
- Macfarlane, A., M. J. Crow, J. W. Arthurs & A. F. Wilkinson, 1981. The geology and mineral resources of northern Sierra Leone. Overseas Mem. Inst. Geol. Scilond., 7.
- Mayor, M. & D. Qeloz, 1995. A Jupiter-mass companion to a solar type star. Nature, 378:353-359.
- McCulloch, T. M. & G. J. Wasserburg, 1980. Early Archean Sm-Nd model ages from a tonalitic gneiss, northern Michigan. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper, 182:135-138.
- McDonald, G. D. & J. L. Bada, 1995. A search for endogenous amino acids in the Martian meteorite EETA79001. Geochim. Cosmochim. Acta, 59:1179-1184.
- McKay, D.S., E. K. Gibson Jr., K. L. Thomas-Keprta, H. Vali, C. S. Romanek, S.J. Clemett, X. D. F. Chillier, C. R. Maechling, & R. N. Zare, 1996. Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. Science, 273:924-930.
- McKay, D.S., K. L. Thomas-Keprta, C. S. Romanek, E. K. Gibson Jr. & H. Vali, 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. Science, 274:2123-2125.
- McSween, H. Y., Jr. & E. Jarosewich, 1983. Petrogenesis of the Elephant Moraine A79001 meteorite: Multiple magma pulses on the shergottite parent body. Geochim. Cosmochim. Acta, 47:1501-1513.
- McSween, H. Y. Jr., 1994. What we have learned about Mars from SNC meteorites. Meteoritics, 29:757-779.
- 三河内岳・宮本正道, 1997. 火星隕石の岩石・鉱物学. 日本惑星科学会誌, 6:29-36.
- Mikouchi, T., A. Tsuchiyama, J. Akai, S. Nakashima, K. Tazaki, T. Itaya & K. Yanai, 1997. Mineralogical consideration of possible microfossils in martian meteorites ALH84001. Mineral. Jour., 19:47-64.
- Miller, S. L., 1953. A production of amino acids under possible primitive earth condition. Science, 117:528-529.
- 水谷仁, 1984. 生命が生まれる惑星の条件. 科学, 54:401-409.
- Mojzsis, S. J., G. Arrhenius, K. D. McKeegan, T. M. Harrison, A. P. Nutman & C. R. L. Friend, 1996. Evidence for life on earth before 3,800million years ago. Nature, 384:55-59.
- Moorbath, S.&P.N.Taylor, 1988. Early precambrian crustal evolution in Eastern India: the ages of the Singhbhum Granite and included remnants of older gneiss. Geol. Soc. Ind., 31:82-84.
- Mueller, P. A., J. L. Wooden & A. P. Nutman, 1992. 3.96Ga zircons from an Archean Quartzite, Beartooth Mountains, Montana. Geology, 20:327-330.
- 村江達士, 1997. 隕石の有機化合物分析. 日本惑星科学会誌, 6:37-45.
- 長尾敬介, 1997. 火星隕石研究の現状—希ガス—. 月刊地球, 19:413-425.
- 中村昇, 1997. 火星隕石の化学組成と年代. 月刊地球, 19:426-438.
- Nakamura, N., D. M. Unrh, M. Tatsumoto & R. Hutchison, 1977. Nakhla: further evidence for a young crystallization age. Meteoritics, 12:324-325.
- 西信之, 1984. 宇宙における生命起源分子の生成—星間分子—彗星—地球の点と線—. 科学, 54:419-428.
- Nutman, A. P., B. J. Fryer & D. Bridgwater, 1989. The early Archean Nulliak (supracrustal) assemblage, northern Labrador. Canada. J. Earth Sci., 126:2159-2168.
- Nyquist, L. E. & C. -Y. Shin, 1992. The isotopic record of lunar volcanism. Geochim. Cosmochim. Acta, 56:2213-2234.
- 小尾信彌・森暁雄, 1985. 地球外生命の謎. 235pp. 大和書房, 東京.
- Ohmoto, H., T. Kakegawa & D. R. Lowe, 1993. 3.4-billion-year-old biogenic pyrites from Barberton, South Africa: Sulfur isotope evidence. Nature, 262:555-557.
- 大島泰郎, 1984. ET探しは市民権を得たか. 科学, 54:386-387.
- 大島泰郎, 1995. 生命は熱水から始まった. 141pp. 東京化学同人, 東京.
- Pflug, H. D. & H. Jaeschke-Boyer, 1979. Combined structural and chemical analysis of 3,800-Myr-old microfossils. Nature, 280:483-486.
- Rood, R. T. & J. S. Trefil, 1981. Are we alone? The possibility of extraterrestrial civilizations. Charles Scribner's Sons, New York.
- 出口威夫訳, 1983. さびしい宇宙人. 283pp. 地人書館, 東京.
- Sagan, C. E., Lippincott, E. R. & R. V. Eck, 1967. Organic molecules and the coloration of Jupiter. Nature, 213:273.
- Sarkar, G., F. Corfu, D. K. Paul, N. J. McNaughton, S. N. Gupta & P. K. Bishui, 1993. Early Archean crust in Bastar Craton, Central India—a geochemical and isotopic study. Precamb. Res., 62:127-137.
- 佐々木晶, 1997a. 地形から見た、火星の古環境そして生命. UP, 301:32-38.
- 佐々木晶, 1997b. 火星の表層環境とその歴史. 日本惑星科学会誌, 6:70-79.
- Schidlowski, M., P. W. U. Appel, R. Eichmann & C. E. Junge, 1979. Carbon isotope geochemistry of the 3.7×10⁹-yr-old Isua sediments, West Greenland: Implications for the Archean carbon and oxygen cycles. Geochim. Cosmochim. Acta, 43:189-199.
- Schopf, J. W. 1993. Microfossils of the Early Archean Apex Chert: New evidence of the antiquity of life. Science, 260:640-646.
- Shcherback, N. P., E. N. Barnstinsky, E. V. Bibikovo & V. L. Boiko, 1984. Age and evolution of the Early Precambrian continental crust of the Ukrainian shield. In Kroner, A., G. N. Hanson & A. M. Goodwin eds., Archean Geochemistry. pp.251-261. Springer-Verlag, Berlin.
- Sheater, C. K. & J. J. Papike, 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. Science, 274:2121.
- Shih, C. -Y., L. E. Nyquist, D. D. Bogard, G. A. McKay, J.L. Wooden, B. M. Bansal & H. Wiesmann, 1982. Chronology and petrogenesis of young achondrites, Shergotty, Zagami and

- ALHA77005: Late magmatism on the geologically active planet. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46:2323-2344.
- 下山晃, 1987. 南極隕石の有機化合物. 国立極地研究所編, pp. 243-275. 南極の化学6. 南極隕石, 古今書院, 東京.
- 下山晃, 1995. 原始地球と化学進化. 月刊地球, 17:440-447.
- 下山晃, 1997. 火星隕石の有機物と化学進化. 月刊地球, 19:439-447.
- 清水幹夫, 1985. 宇宙の生命. 152pp. 共立出版, 東京.
- Summons R. E., T. G. Powell & C. J. Boreham, 1988. Petroleum geology and geochemistry of the Middle Proterozoic McArthur Basin, Northern Australia. III Composition of extractable hydrocarbon. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52:1747-1763.
- Taylor, P. N., 1975. An early Precambrian age for migmatitic gneisses from Viken IBO, Vesteralen, north Norway. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 27:35-42.
- 田崎和江, 1996. 火星の生物痕跡?—バクテリアによる生体鉱物作用の立場から—. 惑星地質ニュース, 8:37-44.
- 天文年鑑編準委員会, 1997. 天文年鑑1998年版. 286pp. 誠文堂新光社, 東京.
- 土山明, 1997. Dr. D. McKay の講演要旨の和訳と総合解説. 日本惑星科学会誌, 6:21-28.
- Van Schmus, W. R. & J. A. Wood, 1967. A chemical—petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31:747-765.
- 矢内桂三, 1996. 火星起源 SNC 隕石について. 惑星地質ニュース, 8:1-10.
- Yanai, K., 1997. General view of twelve martian meteorites. *Mineral. J.*, 19:65-74.
- 八杉龍一・小関治男・古谷雅樹・日高敏隆編, 1996. 生物学辞典 第4版. 2027pp. 岩波書店, 東京.
- 横尾広光, 1984. 文明の研究—地球外生命探査の論理構成—. 科学, 54:445-448.
- 横尾広光, 1991. 地球外文明の思想史. 174pp. 恒星社厚生閣, 東京.
- Wadhwa, M. & G. W. Lugmair, 1996. The formation age of carbonates in ALH84001. *Meteoritics and Planetary Science*, 31:145.
- Wanke, H. & G. Dreibus, 1988. Chemical composition and accretion history of terrestrial plants. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A235:545-557.

摘要

小出良幸, 生命の起源—宇宙生物学へのアプローチ—. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 27:1-30. (Y. Koide, Origin of Lives—Approach to the Cosmic Biology—. *Bull. Kanagawa prefect. Mus. (Nat. Sci.)*, 27:1-30.)

近年、生命の起源についていくつかの重要な報告があった。これらの報告によって、生命の根源にせまる議論が起こっている。本論文では、生命を広い視点でとらえ、より普遍化された存在として考察した。生命とは、地球生物だけでなく、宇宙に存在しうるすべての生物という視点でとらえた。生命の起源をたどるためには、広範な分野の研究を概観しなければならない。天文学、惑星科学、隕石学、地質学(古生物学)、有機合成学、地球生物学の分野で、生命誕生に関連のある研究成果を抽出し、その概略をまとめた。

(受付：1997年11月26日，受理：1997年12月11日)