

隕石中の地球外生命の痕跡の確からしさ

村江達士（九州大学理学研究院）

始めに

「地球外に生命体は存在するのか？」この問い合わせに物質的に具体的に答える手段は現時点では非常に限られている。ひとつは、地球外の天体に探査機を送り込み、生命探査をすることであり、もうひとつは、地球外から飛来した物体の中に生命体そのもの、又は生命体の痕跡を探すことである。物質的では無いが、現在の人類又はそれ以上に知的に進化した生物が、地球外から発してくる信号をキャッチする試みも行われている。惑星探査機による生命探査としては、火星におけるものがあるが、生命体の存在に対する肯定的な結果は得られていない。現時点では、探査機による生命探査には、機材に対する重量や大きさの制限が厳しく、限られた手法しか使用できない上に、探査位置が広大な惑星表面の一点に固定されているという欠点がある。それに対して、地球外から地上にもたらされた物体に関しては、分析装置に関して大きさや重量の制限が無いため、様々な検出手法が使用可能となる。地球外から地上にもたらされた試料として、アポロ計画で持ち帰られた月の試料があるが、月試料に関しては、生命の存在を示唆する結果は得られていない。月試料以外には、地球外からもたらされた物質としては、隕石と宇宙塵が存在する。これらの試料は、偶然地上に落下してくるのを待つ必要があることと、隕石のもととなった天体（母天体）が明確でなく、母天体に関しては推定の域を出ないという難点がある。宇宙塵は、本体そのものの分析に困難が伴うくらい非常に小さな物体のため、生命体の検索は行われていない。隕石に関しては、地球外生命の存在に関する興味を動機とする研究が 19 世紀から行われている。本講演では、過去に報告された隕石中の生命体の存在又は生命の痕跡の存在に関する議論を紹介し、その確からしさについて有機物の観点から述べる。

1. 有機化合物と生命体

有機化合物に対する古典的な概念と現代的な概念の間の大きな違いの一つに、形成過程に生命活動の介在を不可欠なものとするかしないかがある。現代的概念においても有機化合物が生命現象にとって必須の物質的要件であることに変わりは無いが、有機化合物にとって生命現象が必須の形成条件ではない。古典的定義の有機化合物とは最少でも炭素と水素の共有結合を一つ含んでいる化合物である。従って、ホルムアルデヒド ($\text{H}-\text{C}(=\text{O})-\text{H}$) は有機化合物であるが二酸化炭素 ($\text{O}=\text{C}=\text{O}$) は無機化合物である。しかし、現代の有機化学は、炭素を含んでいる化合物全般を学問的対象とする。従って、かつては有機化学の対象外とされていた二酸化炭素やグラファイトやダイヤモンドも対象に考える。

生命的誕生以前に化学進化という段階が存在することは明白である。この段階で、星間空間での反応や原始惑星大気の反応によって、一酸化炭素 (CO)、二酸化炭素 (CO_2)、メタン (CH_4)、シアン化水素 (HCN) など炭素を含んだ簡単な化合物が、アミノ酸、核酸塩基、糖などのより構造の複雑な化合物へと変化し、それらが重合し高分子を形成し、アミノ酸がたんぱく質へ、核酸塩基や糖が核酸 (RNA や DNA) へと変化して、特殊な機能性

を獲得してゆく。地球型の生命体がその機能を維持するには、酵素の作用を持つたんぱく質、遺伝子の作用を持つ核酸、自己と外界を区別し、自己への物質の出入りを制御する脂質膜の三つの機能が最低限必要である。従って、地球外試料から、これらの3種類の機能性物質の全てが一体化して一つの系として活動している物体を発見すれば、生命体を発見したことになるが、たんぱく質や核酸や脂質膜のどれかを単独で発見したとしても、生命体を発見したことにはならない。ただし、現世の地上生物が持つこれらの機能性物質は、化学進化の段階で直接作られたものでなく、生命活動の進化過程によって分子構造が変化してきているので、現世生物の持つ機能性物質と構造が近いものが見つかった場合には、生命体の存在を強く示唆していると考えることが可能であろう。

上記の機能物質は、地球型生命体の全ての活動に共通したものであり、一次代謝産物と呼ばれる、一次代謝産物は、地球型生命体が存在すれば、必ず存在しなければならないものである。しかし、生命活動が停止した場合には、これらの機能性高分子物質は個々の構成分子へ分解される。例えば、たんぱく質はアミノ酸へと分解される。一見して、化学進化の逆反応が進行したことになる。従って、地球外試料にアミノ酸や核酸塩基といった、生命体の必須機能性高分子の構成要素となる低分子を発見した場合に、それらの低分子化合物の存在が生命体の存在を示すものか否か判定するには、それらの化合物が化学進化の途上産物なのか、生物分子の分解生産物なのかを見極める必要がある。

地球生物は、生命活動を維持してゆく過程でそれぞれの生物種と生息環境に依存して、特殊な化学構造をもった有機化合物を生産する。これらの化合物を二次代謝産物という。二次代謝産物の多くは、低分子化合物であるが、化学構造が化学進化の生産物とは明瞭に異なるものが多く存在する。従って、地球外試料から、二次代謝産物が検出されれば、地球外に地球型生命体が存在することを強く示唆する。しかし、二次代謝産物は生物種に依存するため、生命体が存在すれば必ず存在するという類の化合物ではない。そのうえ、二次代謝産物の存在量は、一次代謝産物に比べて、一般的には少ないので、検出には困難が伴う。二次代謝産物には、生命体から切り離されて地球化学的環境におかれると、化学構造の特徴を失いつつ、エネルギー的により安定な芳香族化合物へ変化するものが多く存在する。この変化過程の終末段階で形成されるものに多環縮合芳香族炭化水素(PAH)があるので、地球外試料からPAHが検出されれば、生命体の存在と結び付けたくなる。ところが、PAHは星間分子としての存在が主張されているもので、化学進化の段階においても形成されることが示されている。従って、地球外試料におけるPAHの検出を生命体の存在と結びつけるためには、それが二次代謝産物由来であることを明確にしなければならない。

2. 領石の種類と有機化合物

領石には、様々な種類のものが存在する。大まかな分類を表1に示すが、それぞれの分類に属する領石がさらに細かく分類されている。このように、領石の種類は多いが、生命体の存在の研究対象になってきたのは炭素質コンドライトに限られている。この最大の理由は、古典的な定義での有機化合物を含んでいるのが炭素質コンドライトに限られている

からである。炭素質コンドライトは、岩石学的および化学組成的見地から、さらに下部グループに分類されており。その中で、有機化合物の分析に用いられるものは、熱変成度の低い C1～C3 に分類されるものである。炭素質コンドライト中では、一般的な傾向として、C1, C2, C3 の順に熱変成度が高くなり、炭素含有量が減少し、抽出性の低分子有機化合物の含有量も減少する。この変化の度合いには、個々の隕石で、かなりのばらつきがある。

ちなみに 1998 年生命の痕跡の発見が報告された火星由来の隕石は、炭素質コンドライトではない。

表 1. 隕石の種類

鉄隕石	ヘキサヘドライト	コンドライト	エンスタタイト	
	オクタヘドライト		ブロンザイト	
	アタキサイト		ハイパーシン	
石鉄隕石	パラサイト	炭素質	アンホテライト	
	メソシデライト			C1
エイコンドライト	オーブライト			C2
	ユレーライト			C3
	ディオジエナイト			
	ハワーダイト			
	ユークライト			
	ナクライト			

炭素質コンドライト以外にも、炭素の含有量の多いものにユレイライトが存在するが、含有炭素の大半がダイヤモンド、グラファイト、無定形炭素に属し、古典的な意味での有機化合物ではないので、生命の存在の議論の対象とはなっていない。

3. 生物と思われる形から見た地球外生物存在の確からしさ

Nagy らは、C1 隕石の中に生物（又は生物の遺骸）が存在するという報告を 1961 年に行った。地球外の生物の存在の検証には、隕石中に生物が存在することを直接示すのが最も手っ取り早いように思われる。ある程度の大きさと、特有の形態を持っていて、形だけから、あからさまに生物と判定される場合にはあまり問題は生じないが、隕石の場合には、ことは必ずしも容易ではない。なぜなら生物の形を持つと指摘されたものが、大きさ 5～10 μm の藻類または胞子の類であるとされ、観察者によって形が異なって見えるからである。この点に関しては、火星隕石の場合は、電子顕微鏡観察で、もう少し形が明瞭になっていると思われるが、これはいわゆる印象化石に類するもので、必ずしも生物の形を持っていると断言できないため、論議を呼ぶのである。微生物や単細胞藻類の存在を顕微鏡で見た形だけで議論するのには限界があるので、現世微生物に関しては形態の内部に存在する生物固有の化合物を蛍光染色（特異染色）することによって、微生物の確認や生死を判

定することが多い。Nagy らも隕石中の生物らしい形をしたものについて、蛍光顕微鏡による確認を行っているが、蛍光を発するものは存在するが、特異染色に関する明瞭な結果は得られなかつたとしている。

我々は、炭素質コンドライト中の炭素質高分子物質について、炭素濃度が高い場合には、炭素質物質が顕微 FT-IR によって、隕石粉末中に直接観察できることを明らかにした。この炭素質物質は芳香属性基本骨格を持ち、その分子サイズはグラファイトと定義するには小さ過ぎるが、通常の PAH と比較するとはるかに大きい。この分子は内部に PAH に相当する構造を持った部分も存在するので、蛍光を発することも期待された。なぜなら、通常の PAH は殆どのものが紫外光で蛍光を発するからである。そこで、重水素光源を用いた蛍光顕微鏡で、幾つかの炭素質コンドライトの粉末について検討を行った結果、炭素含量の多いものについては、隕石を粉末にした試料から直接蛍光物質が観察され、炭素含量の少ない隕石については、酸処理によって炭素質化合物部を濃縮した試料から蛍光物質が観察された。蛍光物質の形態は Nagy らの報告したものに類似性を示した。

隕石の中の微生物を検出するために、隕石粉末を微生物の培養条件下におく試みが行われた。その結果は、隕石を保管している間に紛れ込んだ菌と判断されるもの以外には検出されなかつた。このように、隕石中に生物（又はその遺骸）を直接見つけ出す試みの結果は、生物の存在に関してかなりあいまいなもので、全体的には否定的である。ただし、これらの検索は、存在する微生物が地球型のものであることを前提にして行われたものであり、我々にとって、未知の生命形態が存在した場合には論外となる。

4. 有機分子から見た地球外生物の存在の確からしさ

4.1 一次代謝関連物質

生命活動に関連する有機化合物として、一次代謝関連物質と二次代謝関連物質が存在することは先に述べた。一次代謝関連物質は全地球型生命に共通するもので、化学進化の段階で個々の低分子が形成され、それらが重合して機能性の高分子になり、それらの機能がまとまって一つの系として作用し始める段階が、生命の誕生と考えられる。従って、一次代謝関連物質が地球外試料から検出された場合に、それが化学進化の到達レベルを示すものか、生体物質からの分解生成物なのかを判定しなければ、地球外生命の存在の検証とならない。また、検出された化合物が隕石固有の物質で、地球上に到達してから地球生物の生産物による汚染によってもたらされた化合物でないことが示される必要がある。通常の炭素質コンドライトは隕石内部まで多数のひび割れが存在するので、地上での汚染は内部まで到達しており、内部からの検出物だから隕石固有の化合物であると即断できない。

C2 炭素質コンドライトに分類される Murchison 隕石は、大量に落下し、かつ、地上での汚染が少ない隕石として有名で、この隕石から検出される有機化合物は隕石固有のものであるとする研究が多い。検出された化合物には、脂肪族炭化水素、芳香族炭化水素、フェノール、アミノ酸、核酸塩基、モノカルボン酸、ジカルボン酸など多岐にわたっている。一次代謝関連物質としては、アミノ酸と核酸塩基が存在するが、カルボン酸類もアミノ酸形成の中間化合物と考えると一次代謝関連物質とみなせる。たん白質や核酸のような一次

代謝の中核的機能を担う化合物の検出は報告されていない。地上生物の生産するアミノ酸は、大きく限定されており、主要なものは20種類しかなく、それらのアミノ酸が選択された理由は不明である。それに比べ、隕石から検出されたアミノ酸は、70種以上の多岐にわたり、地上生物のアミノ酸に見られるような特殊な選択は見られない。これらのアミノ酸の種類と存在量の分布は、非生命的な熱力学的支配下の反応産物として理解可能と思われる。この点から考えると、この隕石には地球型生物の一次代謝系は存在しないと推定される。

地球型生物の一次代謝系の非常に大きな特異性として、光学異性体の片方のみを使用する点が上げられる。光学異性体とは、旋光性を除くと相互をエネルギー的に区別できない関係の異性体を意味する。地上生物が光学異性体を選別して使用するようになった過程は明らかではない。結果として、地球外試料において、地球型生物が関与していれば、検出されるアミノ酸は、たんぱく質構成アミノ酸が主体で、かつそのアミノ酸はL-体に偏っているはずである。ただし、たんぱく質が生体を離れて地球化学的に分解されてゆく過程には、光学異性体の他方の異性体への異性化（ラセミ化）が伴い、L-体とD-体の混合物となる。この異性化の速度は、温度や触媒の有無で変化する。隕石から検出されるアミノ酸は、光学活性な全てのアミノ酸に関してL-体とD-体の1:1の混合物であると報告されている。ただし、最近、非たんぱく質系のアミノ酸で、キラル中心に水素が存在しないものに、光学異性体の分布に偏りがあることが報告されている。この報告では、この偏りは宇宙物理学的に引き起こされたもので、生命活動の関与するものではないとしている。以前は、地球外生物の存在の可能性を示唆するものと思われたアミノ酸の存在も、ラセミ体で検出されることから、むしろ化学進化のプロセスの途上の産物であり、検出されたアミノ酸が地球生物の生産物による汚染ではないとの論拠とされ、隕石中の地球型生命体の存在を完全に否定する論理が誕生した。しかし、隕石中に不斉アミノ酸が存在することで、アミノ酸による生命の存在の有無の判定は、論理的にかなり不明確になってきた。

4.2 二次代謝関連物質

二次代謝物質は、一次代謝が完全に機能して初めて生合成される。従って、地球外試料から固有の物質として二次代謝産物が検出されれば、少なくともその試料は生命活動の痕跡を残していると結論される。二次代謝産物の多くは、生物種固有で、この点で、生命活動が存在すれば必ず存在する一次代謝産物とは大幅に異なっている。二次代謝産物は化学構造的に非常に変化に富んでいて、かつ一次代謝産物に比べて量的に少ないのが普通である（高等植物の樹幹のセルロースやリグニンのような、その種においては一次代謝産物よりも多く蓄積されている例も存在する）。従って、地球外試料において、二次代謝産物そのものを検索する場合には、存在すると思われる生物種を想定してからないと、不毛の努力を要求されることになるであろう。

二次代謝産物は、生命活動によって熱力学法則に逆らって合成されている場合が非常に多い。従って、生物が非生物界に放出した二次代謝産物は、光、熱、圧力といった非生物的条件で、より安定な化合物へと変化してゆく。この典型的な反応が芳香族化であり、この反応の終点（グラファイト形成）近くでは、化学的に安定な多環縮合芳香族炭化水素

(PAH) が形成される。隕石は、地球に到達するまでに非生物的反応場に長時間滞在している。従って、母天体での生命活動（もし存在するとして）が生成放出した二次代謝産物を含んでいれば、その化合物は、かなり安定化された構造をもっているであろう。しかし、PAH が検出されたからといって、直ちに地球外生命の存在を立証したことにはならない。なぜなら、PAH の多くが星間空間に存在することが推定され、化学進化論的に形成されることが示されているからである。この点で、火星隕石から検出された PAH についてその化学構造を観察すると、二次代謝産物が安定化してできた化合物か、化学進化で生じた化合物かの判定がつけられない代物である。従って、火星隕石中の有機化合物の検出が、火星の生命体の存在を立証したことにならないのである。

おわりに

地球外における生命体は、地球型の生命体を見本にして推定するしかない。有機化合物で地球型の生命活動の存在を確実に証明するものは、まだ、安定化の程度が穏やかな二次代謝産物の検出であるが、宇宙に長く彷徨った隕石では、あまり望めそうに無い。従って、隕石の母天体に表面を広範囲に移動できる探査機を送り、生物そのものを探すか、生物の二次代謝産物の検索を行うのが最も確かな方法であろう。