

太陽系天体に生命を探る

横浜国立大学大学院工学研究院教授 小林憲正

1. はじめに

これまで「水金地火木土天海冥」と9つあるとされてきた太陽系の惑星から、冥王星が外されることが国際天文学連合(IAU)で採択されるなど、太陽系の惑星や衛星に関する関心が高まっている。太陽系天体は、天文学のみならず、地球生命の起源や地球外生命との関連からも極めて興味深い存在である。ここでは、最近の太陽系惑星探査の結果などをもとに宇宙と生命の関係を考えてみよう。

2. 地球生命の起源の古典的シナリオ

19世紀中頃まで、生命は物質からひとりだけで生じてくる、という生命の自然発生説が広く信じられていた。フランスのパスツール(L. Pasteur)は「白鳥の首フラスコ」を用いて、たとえ微生物といえども自然には発生しないことを証明した。同時期、ダーウィン(C. Darwin)らは生物「種」は生物進化により誕生する、という生物進化説を提唱した。では、最初の生命はどのようにして誕生したのだろうか？ここから生命の起源の問題が自然科学上の重大問題に浮上した。

1920年代になると、ロシアのオパーリン(A. I. Oparin)らが、生命は原始地球上で単純な物質から複雑な物質への進化の末に誕生した、とする「化学進化」説を提唱した。1953年、ミラー(S. L. Miller)はメタン・アンモニア・水素・水蒸気の混合気体中で放電を行い、重要な生体分子であるアミノ酸が生物のはたらきを借りなくても簡単に生成しうることを示した。以後、このような化学進化過程を実験的に調べる研究が多数行われた。

3. 隕石や彗星中の有機物

しかし、その後、原始地球大気はミラーが考えたようなメタンやアンモニアを高濃度を含む「強還元型」のものではなく、二酸化炭素を主とし、一酸化炭素・窒素・水蒸気などを含む還元性の低いものと考えられるようになった。このような大気からは、放電や紫外線などではアミノ酸の生成は難しくなる。

一方、地球外にもさまざまな有機物が存在することがわかってきた。地球に落下してくる隕石の中には、炭素を多く含む黒っぽいものがある。このような「炭素質コンドライト」と呼ばれる隕石中にアミノ酸が存在することは、早くから報告されていた。しかし、それが地球落下後に混入した可能性も指摘されていた。

1969年、オーストラリアに黒っぽい隕石が落下した。この「マーチソン隕石」は、地球環境からの物質の混入を防ぐための施設(クリーンルーム)内に運び込まれた。その精密な分析の結果、マーチソン隕石からの抽出液中にアミノ酸が含まれること、それが地球上で混入したのではないことが確認された。

また、彗星にも有機物が含まれることは地上からの分光観測により知られていた。1986年、ハレー彗星が地球に接近した際、欧州とソ連(当時)は共同で探査機によるハレー彗星探査を行った。探査機にはカメラの他、質量分析計が積まれ、彗星本体(核)に接近したおりに、核のまわりをとりまく塵の分析を行った。その結果、分子量100以上の極めて複雑な有機物が存在することがわかった。

ところで、月には多数のクレーターが存在するが、その研究から、月および地球は太陽系ができてから数億年間に無数の隕石(微惑星)や彗星の衝突を受けたことがわかった。つまり、隕石や彗星に複雑な有機物が含まれていることは、最初の地球生命の素材が、これらの小天体により地球に持ち込まれた可能性を示唆する。

4. 星間での有機物の生成

では、隕石や彗星中に見られる有機物は、どこでどのようにして生成したのだろうか。望遠鏡で宇宙を観測すると、星が観測されない真っ黒な領域がある。これが分子雲(暗黒星雲)である。分子雲の中で物質がさらに集まってきて、太陽系のもとになる「原始太陽系星雲」になったとされる。この分子雲を電波望遠鏡で観測したところ、様々な分子、および塵(星間塵)が存在していることがわかってきた。

分子雲内部は分子やダストの密度が高いため、恒星の光が入らず、温度が10K程度と極めて低温である。このため、塵の表面に星間に存在する多くの分子が凍結している(図1)。地上からの観測により、このような氷の主成分は水であり、次いで、一酸化炭素、メタノール、アンモニア、メタンなどが多く含まれていることがわかっている。窒素分子は、赤外線やマイクロ波を発光しないため、これまで星間物質として確認するのが難しかったが、ごく最近、星間に存在することが確認された。このような氷に宇宙線や、宇宙線と分子の相互作用により生成した紫外線があたることにより、様々な反応が引き起こされる。ただ、地上からの観測ではこのような反応による微量生成物は検出が困難である。

では、星間塵上で生じる分子にはどのようなものがあるのだろうか。日米欧のいくつかのグループがその実験的検証を行った。クライオスタット(低温実験装置)内に置かれた金属製基板上に、水・一酸化炭素・アンモニアなどからなる混合気体を吹き付けて氷を作る。これに加速器からの高エネルギー陽子線や重水素ランプからの紫外線などを照射する。照射後、生成物を取り出し、加水分解後に分析すると、種々のアミノ酸が生成することが確認された。つまり、星間塵のような極低温の固相環境下でもアミノ酸のもとになる分子「アミノ酸前駆体」は十分生成可能ということになる。ただ、このアミノ酸前駆体がどのような分子かは不明であった。

われわれは放射線医学総合研究所(千葉市)のガン治療用加速器 HIMAC を利用して、水・メタノール・アンモニアの混合物を液体窒素中で凍結したものに重粒子線を照射する実験を行っている。この系でも生成物を加水分解するとアミノ酸が確認された。さらに加水分解前の生成物は分子量2000程度の複雑な高分子状有機物であることがわかった。つまり、

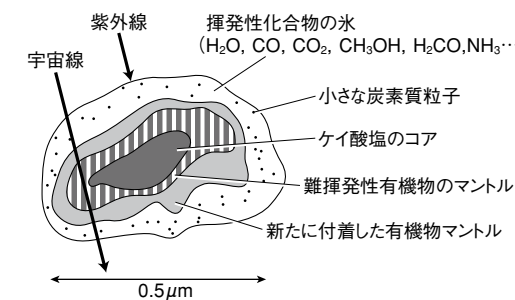


図1 分子雲中の星間塵

星間で宇宙線の作用により、極めて複雑で、かつアミノ酸の素となりうる有機物が生成しうるということが強く示唆された。

5. なぜ地球生物は左手型のアミノ酸を使うのか

グリシンなどを除く多くのアミノ酸は、ひとつの炭素に4つの異なる基(一般にはアミノ基、カルボキシル基、水素、および各アミノ酸固有の基)が結合しているため、左手型(L体)と右手型(D体)の光学異性体が存在する(図2)。しかし、地球生物が用いているタンパク質はほぼL体のアミノ酸のみからできており、D-アミノ酸は例外的にしか見られない。なぜ、一方の光学異性体のみが使われるようになったのだろうか。これは生命起源研究の中でも大きな謎となっている。

1997年、クローニン(J. R. Cronin)らは、マーチソン隕石から抽出したアミノ酸にL体の過剰が見られることを報告した。それまでも隕石中にL-アミノ酸が多く含まれるという報告はあったが、地球上で生物由来のL体のアミノ酸が混入した可能性が高いとされてきた。クローニンの報告では(1)地上で混入しやすいタンパク質アミノ酸にはL体の過剰がみられないこと、(2) α 炭素(アミノ基とカルボキシル基の結合した炭素)に水素が結合していない、特殊なアミノ酸(イソバリンなど)にのみL体の過剰がみられることなどから、地上での混入の可能性は低く、隕石中にもともとL体の過剰が存在することが強く示唆された。(2)に関しては、かつては α 炭素に水素が結合しているアミノ酸にもL体の過剰があったが、宇宙でのラセミ化(D体 \rightleftharpoons L体の変化)速度が α 炭素に水素が結合していないア

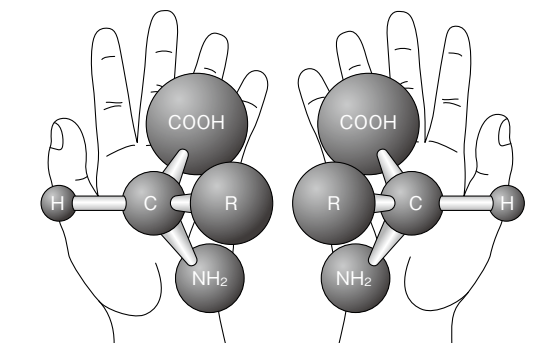


図2 左手型(L-)アミノ酸と右手型(D-)アミノ酸

ミノ酸よりも速いため、今日ではL体の過剰が検出されなかったと解釈される。

隕石中になぜL体のアミノ酸が多いのだろうか？いくつかの説があるが、中では中性子星からの円偏光が注目されている。中性子星は、大質量の恒星が超新星爆発を起こした後に残った、密度の極めて高い星である。中性子星の回りに捉えられた電子は高速で回転するため、「シンクロトロン放射光」が発生する。これが光を出す方向により円偏光となる(図3)。1998年、ベイリー(J. Bailey)らは、宇宙空間に円偏光が存在することを

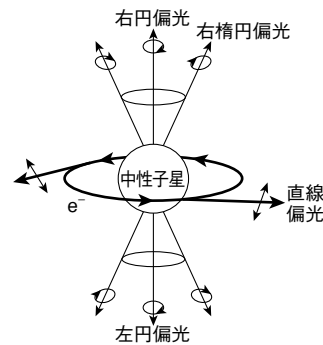


図3 中性子星からの円偏光

見いだした。また、アミノ酸(もしくはアミノ酸前駆体)に円偏光を照射すると、一方の光学異性体が他方よりも早く分解あるいは生成することも報告されている。

以上のことから、次のようなシナリオが描かれる：星間で生成したアミノ酸(前駆体)に中性子星からの円偏光が当たり、L体のアミノ酸(前駆体)の過剰が生じる。これが原始太陽系星雲中で彗星や微惑星に取り込まれ、それらにより原始地球に運び込まれる。原始海洋中で何らかの自己触媒的な反応の結果、L体の過剰が増幅され、生命誕生に使われた。このシナリオが正しいとすると、地球外有機物は生命誕生に不可欠なものということになる。

6. 火星、エウロパに生命を探す

地球以外の太陽系天体に生命は存在するのだろうか。火星はその最大の候補である。1877年、イタリアのスキヤパレリ(G. Schiaparelli)は火星に「運河」があると発表して、火星人ブームを巻き起こした。その後、運河の存在は否定されたものの、火星生命の可能性は議論されつづけた。1976年、NASAは2機のヴァイキング探査機を火星に着陸させ、種々の「生物学実験」を行った。これらは、火星の表土に地球型(光合成、あるいは有機物代謝を行う)微生物を検出しようとするものだった。しかし、結果として火星に生命が存在する証拠は見いだせなかつ

た。

1996年、NASAのマッケイ(D. McKay)らは、火星から飛来した隕石ALH84001中に生命の痕跡を発見したと発表した。彼らの分析結果とその解釈は多くの論争を生んだが、その結論は将来の火星探査結果まで待つこととなった。そして、1996年以降、NASAやヨーロッパ宇宙局(ESA)は相次いで火星探査機を打ち上げ、探査を行った。生命の誕生と維持には水(溶媒)、有機物、エネルギーの3つが不可欠とされるが、原始火星は原始地球と似た環境と考えられており、有機物とエネルギーは存在したはずである。あとは、現在は火星表面に存在しない水が、いつ頃までどのくらい存在したかである。近年の探査の結果、火星には比較的最近まで、大量の水が存在したことが確認された。次の課題は探査ポイントと生命探査法の選択である。

木星には現在、60個を越す衛星が発見されているが、その中のイオ、エウロパ、ガニメデ、カリストの4大衛星はガリレオが発見したことからガリレオ衛星と呼ばれている。イオには火山活動が、他の3つの衛星は表面が水の氷で覆われていることが知られていたが、ボイジャー探査機およびガリレオ探査機の近接観測により、エウロパの氷の下に液体の水が存在することが強く示唆された。このことから、エウロパは火星以上に「現存する」生命が期待できる天体と考えられている。なお、2006年になって、カッシーニ探査機は、土星の衛星、エンケラダスにも氷の下に液体の水が存在することを発見した。これらの「氷衛星」の今後の生命探査が楽しみである。

7. タイタン:天然の化学進化実験室

土星にも50個を越える衛星が発見されているが、その最大のものがタイタンである。タイタンは、濃い(約1.5気圧)大気を有する唯一の太陽系衛星である。その大気主成分は窒素であるが、これは太陽系では地球とタイタンのみである。大気の副成分はメタンであり、メタンと窒素から生成したと考えられる有機物と褐色の霧(もや)の存在が地上観測やボイジャー探査機による観測により知られていた。

以上の点から、タイタンは原始地球環境と類似した「天然の化学進化実験室」として注目されてきた。そして、タイタン大気を模した窒素とメタンの混合気体に種々のエネルギーを与え、どのような有機物

が生成するかを調べる実験が数多く行われてきた。例えば、セーガン(C. Sagan)らは、模擬タイタン大気中でコールドプラズマ放電を行い、黄褐色の固体有機物(ソーリンと名付けた)の生成を見いだした。これはタイタン上層大気への土星磁気圏に捕捉された電子の作用を模擬したものである。

筆者らは、タイタンの下層大気での有機物生成の可能性を調べた。下層大気中での重要なエネルギーは宇宙線であるので、窒素とメタンの混合気体に加速器からの高エネルギー陽子線を照射した(図4)。

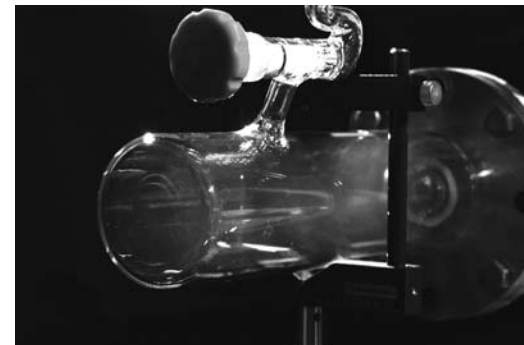


図4 模擬タイタン大気への陽子線照射実験

すると、黄褐色の固体生成物が生成し、これを分析すると、分子量数百~千程度の高分子化合物であること、加水分解するとアミノ酸が生成することなどがわかった。

1997年、NASAとESAは共同で土星探査機カッシーニを打ち上げた。2005年、カッシーニから切り離されたタイタン探査機「ホイヘンス」は、大気中の分析をしながら降下し、無事着陸した。タイタン地表温度は-170℃であり、予想されていた「メタンの海」は見つからなかったものの、川(メタン?)の流れた跡と考えられる地形が観察された。タイタンには液体の水は存在しないが、地表に水の氷は存在するので、タイタン大気中で生成した有機物(ソーリン)が何らかのエネルギーにより水と反応すればアミノ酸が生成することが期待できる。もし、液体メタンの雨が降り、液体メタンの川が流れると考えられるタイタンで生命が存在すれば、それは水を溶媒とする地球型生命と異なる生命形態も期待できる。

8. おわりに

近年の太陽系探査のもうひとつのハイライトは、小惑星や彗星といった小天体の探査である。日本も

この分野では遅れをとっておらず、探査機「はやぶさ」を小惑星イトカワに送り、その表面物質のサンプルリターンに挑戦している。

NASAはすでにヴィルト第2彗星からのダストのサンプルリターンを敢行した(スターダスト計画)。また、テンペル第1彗星には衝撃弾を発射し、内部物質の分光分析を行った。ESAは2004年に彗星探査機ロゼッタを打ち上げ、2014年、チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星への着陸と分析を試みている。

彗星や小惑星から試料を持ち帰り、その有機物分析ができれば、地球(及び他の天体)での生命の誕生に向けた化学進化経路解明が進むことが期待できる。ただ、小天体からスターダスト計画などで採取できる試料量は極めて少なく、詳細な有機分析は困難である。そこで急遽浮上するのが冥王星である。

冥王星は惑星から矮惑星(Dwarf planet)に格下げとなったが、これは、冥王星をエッジワース・カイパーベルト(EKB:海王星軌道の外側で、太陽からの距離30-48天文単位の環状の領域)にある多くの小天体のひとつとした方が自然と考えたためである。このEKBは短周期の彗星の故郷と考えられている。つまり、冥王星は彗星の兄貴分とみなせる。

2006年、NASAはニューホライズン探査機を打ち上げ、2015年に冥王星の接近探査をめざしている。ただ、「惑星探査」機として計画されたこともあり、彗星有機物を調べるような機器は搭載されていない。次世代の冥王星の有機物探査やサンプルリターンを期待したい。

参考文献

- (1) 日本化学会編:「先端化学シリーズIV 理論・計算化学・クラスター・スペースケミストリー」, 丸善(2003), pp. 162-169.
- (2) 久保田鏡, 馬場悠男, 小林憲正他:「自然の謎と科学のロマン 下 生命と人間編」, 新日本出版社(2003), pp. 59-79.
- (3) 伏見譲(責任編集):「生命の起源」, 丸善(2004).
- (4) 嶺重慎, 小久保英一郎編:「宇宙と生命の起源」, 岩波書店(2004).
- (5) 石川統, 山岸明彦他:「シリーズ進化学3 化学進化・細胞進化」, 岩波書店(2004).
- (6) 長沼毅:「生命の星・エウロパ」, 日本放送出版協会(2004).
- (7) 高橋淳一, 高野淑識, 金子竹男, 小林憲正:放射光, 17, 74-82(2004).
- (8) 小林憲正:現代化学, 2006(6), 24-30.