

国際宇宙ステーション「たんぽぽ計画」について —宇宙塵中有機物と微生物の捕集と曝露実験—



山岸 明彦
Yamagishi Akihiko

1 たんぽぽ計画の背景と目的

国際宇宙ステーションで実施した「たんぽぽ計画」では生命の起源に関する2つの仮説検証を目的として研究を進めている¹⁾。その1つは、化学進化に関わる仮説である。生物は自分の体で有機物を合成することができるが、生命の誕生以前には非生物的に合成された有機物が地球上に蓄積したはずである。少し前まで、還元的原始地球大気中で有機物合成が起きたと考えられていた。しかし原始地球大気は当初考えられていたようなアンモニアやメタンを含む還元的大気ではなく、CO₂を主成分とするような弱還元的大気だったのではないかと考えられるようになってきた。そのような大気では有機物合成はあまり起きない。そこで、宇宙から有機物が飛来した可能性が考えられるようになってきている。隕石中には数十種類のアミノ酸を含む多種の有機物が見つかっている。隕石の地球到達量はそれほど多くないが、1 mm以下の宇宙塵は年間数万t地表に到達している。そこで、宇宙空間で宇宙塵を捕集して、宇宙塵中に有機物が含まれて生命の起源に寄与したかどうかを調べるのがたんぽぽ計画の第1の目的である。

2つ目の目的はパンスペルミア仮説の検証である。今から100年以上前、スウェーデンの化学者アーレンニウスは、生命が宇宙空間を移動するという仮説を提案した。欧州のチームは、微生物を宇宙空間に

曝露する実験を行い、微生物が岩石等で紫外線から遮蔽されれば、宇宙空間を長期間移動可能であるという結果を得ている。われわれは、微生物が塊で宇宙空間を移動する可能性がないかを検証する。塊を意味するマサをつけて、この仮説をマサパンスペルミア仮説と呼んでいる。このマサパンスペルミア仮説の検証が第2の目的である。本稿は、第56回アイソトープ・放射線研究発表会特別講演（2019年7月5日開催）での発表に加筆したものである。

2 たんぽぽ計画での宇宙実験の運用

たんぽぽ計画では宇宙塵を宇宙空間で捕集するために、エアロゲルという媒体をアルミケースに収めた捕集パネルと（写真1左）、微生物や有機物を宇宙空間で曝露するための曝露パネル（写真1右）を実験で用いた¹⁾。



写真1 エアロゲルを収納した捕集パネル（左）と微生物や有機物を収納した曝露パネル（右）。共に縦横10 cm 厚さ2 cm

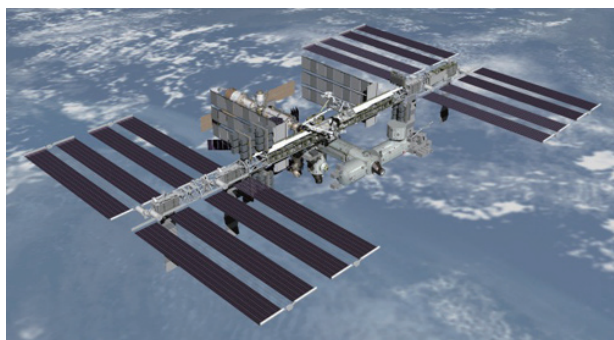


写真2 国際宇宙ステーション。右下方向に地球を周回している

2015年4月、3枚の曝露パネルと36枚の捕集パネルを米国スペースX社のロケットで国際宇宙ステーション（ISS：写真2）に運んだ¹⁾。

ISS船内で、簡易曝露実験装置（ExHAM）に曝露パネル3枚を取り付けた。ExHAMは、エアロックと呼ぶ2重扉を通して宇宙へ搬出、ISSの曝露部に設置された。3枚の曝露パネルは常に宇宙空間の方向を向くように設置されている。そのうちの1枚を1年後に取り外して地上に帰還させた。2年後と3年後にそれぞれ1枚ずつを取り外して地上帰還させた（図1）。これらの曝露パネルの分析を行うことで、微生物を宇宙空間曝露した際の生存曲線を得ることができる。

捕集パネルは、4枚を宇宙に向けた面、4枚をISS進行方向に向けた面、4枚を進行方向側面に設置することで、様々な方向から衝突する粒子を捕集した。1年間曝露した12枚を翌年取り外して地上に帰還させた。新たに12枚の捕集パネルを設置して1年間2回目の捕集を行い、更に3年目にも新しい12枚で捕集を行うことで、合計36枚の捕集パネルで高速衝突粒子の捕集を行った（図1）。

ISSは秒速約8 kmで地球を周回しており、宇宙塵は秒速10 km以上でやって来る。高速微粒子は衝突すると破壊されてしまうが、エアロゲルは高速粒子を捕集するため10 mg/cm³という超低密度の固体でできている。超低密度の固体を用いることで、粒子の破壊を抑えて捕集することが可能になる。

3 国際宇宙ステーションでの環境測定

曝露パネルには、受動的放射線測定素子を取り付けた。OSLD（aluminum oxide（Al₂O₃）based optical stimulated luminescence dosimeter）及びRPLD（silver-

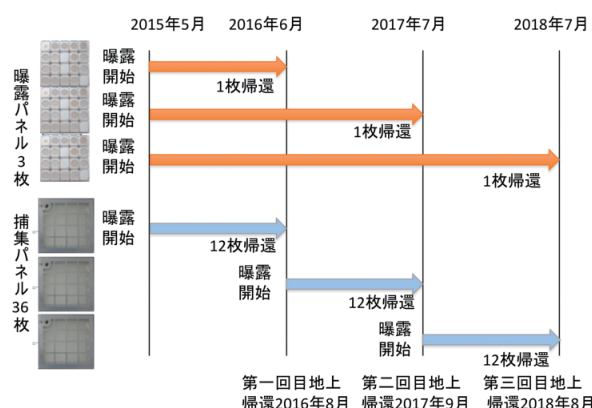


図1 たんぽぽ曝露パネルと捕集パネルの宇宙運用

activated phosphate glass based radiophotoluminescence dosimeter）を用いた放射線量測定を行った。素子に異なった面密度の遮蔽を行うことで、ある程度のエネルギー分別を可能とした。最も薄い遮蔽で、250-350 mGy/year、同じ曝露パネルをISS船内の保管庫に1年間保管した場合には約100 mGy/yearの吸収線量が測定された¹⁾。

曝露パネルにはバイメタル式の温度計を設置した。ISSは太陽に対する軌道面の角度 β 角を変化させながら地球を周回している。 β 角が小さい時には天頂から太陽光を受けて温度が高くなり、 β 角が大きい時には太陽光を側面から受けるために温度が低くなる。様々な β 角で温度測定を行ったところ、最高温度約26℃、最低温度約-35℃であった¹⁾。

4 微生物曝露実験の結果

宇宙空間に脱出した微生物の塊がどの程度の期間生存できるかを調べるために、微生物をアルミニウム基盤にあげた穴に充填して宇宙空間に曝露した。充填する微生物塊の厚さを変えることで、生存に必要な微生物の厚さを検討した。表面の微生物が死滅しても下層の微生物を保護することで、微生物が生存する可能性がある。実験には、放射線、紫外線、乾燥に非常に高い耐性をもつ菌として知られている*Deinococcus radiodurans*を用いた。また、地上の予備実験から、微生物を1 μ mの薄い層で紫外線を照射すると死滅することが分かっていたので、100 μ m、500 μ m、1,000 μ m、1,500 μ mと異なった厚みをもつ乾燥菌体の塊を宇宙空間に曝露した。

宇宙空間に1年間曝露した100 μ mの厚さの微生物

物は帰還後に懸濁して固体培地で培養してもコロニーを形成せず、死滅していることが分かった。一方 500 μm 以上の厚さを持つ微生物塊は、1 年後も 10% 前後の生存率を示した。これは、微生物塊を地上実験室内の乾燥庫に保管した場合や ISS 船内の保管庫に保存した場合と同定度の生存率であった。つまり 500 μm 以上の厚さがあれば、表面の微生物は死滅しても下層の微生物は保護されて、紫外線照射下で 1 年間生存可能であることが明らかとなった¹⁾。

回収した、微生物から DNA を抽出して、DNA がどの程度破壊されずに残っているか、PCR を用いて分析した。DNA の 1 遺伝子分に相当する領域を増幅して、無傷 DNA 量の定量を行った。PCR 反応は、DNA が切断された場合や DNA の塩基が破壊されている場合には阻害される。宇宙空間で紫外線が当たる環境に 1 年間置いた微生物塊の無傷 DNA 量は、500 μm 以上の厚みがあればあまり減少していないが、100 μm の厚みでは 100 分の 1 以下に減少していた。100 μm の微生物の生存率の低下は、無傷 DNA 量が顕著に減っていたことによってもたらされた可能性が高い。

5 捕集実験の結果

地上実験室に帰還した捕集パネル中のエアロゲルを透明なプラスチック容器に移して、表面を顕微鏡で撮像した。2 年分 24 枚の衝突パネル表面を撮像した画像の解析から、0.1 mm 以上の大きさを持つ衝突痕が 200 個以上見つかった。比較的大きい衝突痕を、周囲のエアロゲルを含めたブロックとして掘り出し、詳細分析の担当者に分配して分析をすすめている。

宇宙面のエアロゲルに衝突した微粒子は、宇宙から飛来した宇宙塵である可能性が高い。微粒子の鉱物学的分析から、その内の 1 つから地上では見られない鉱物が発見された。この鉱物は隕石中には見つからない。おそらくこの粒子は宇宙から飛来した粒子であろうと推定された。

今後、衝突痕を材料として、その中に含まれる有機物の分析を行う予定である。

6 火星に生命はいないだろうか

さて、火星に生命はいないだろうか？火星は地球よりも太陽から遠く平均気温は -56°C の低温である。火星の直径は地球の半分程で大気は 0.007 気圧しかない。火星の周囲を回る人工衛星や着陸探査車の測定から、火星のことがかなり詳しく分かってきている。

火星誕生初期には、火星表面の約 1/3 は海洋に覆われ、火星は厚い大気と地磁気を持っていたことが明らかとなっている。初期火星には火山もあり、当時の地球と非常に似ていた。すなわち初期火星には、生命が誕生しうる環境があったと言っても良い。

現在の火星も、平均気温は低い、表面温度は時に 20°C まで上昇する。火星大気圧で増殖可能な微生物も地球で発見された。火星表面の放射線量は 0.4 mGy/day である。放射線耐性菌が半分死滅する放射線量が 1440 Gy であることと比較すると放射線耐性菌の生存に影響は無い。火星表面の紫外線強度は高く、紫外線耐性菌でも紫外線によって数分で死滅するが、薄い土壌の下で遮蔽されれば生存可能である。その他の様々な火星環境因子も、地球極限耐性微生物の生存可能な範囲であることが明らかとなった。

更に、火星表面には化学合成微生物のエネルギー源となりうるメタンガスや硫化物が存在することも明らかとなった。レーダーの探査によって、地下には液体の水（おそらく高濃度の塩水と推定されている）の層があることも明らかとなった。つまり、現在の火星には生命生存環境があると言っても良い。

7 火星の生命をどのように探るか

さて、火星に生命はいないのだろうか。仮に、火星に生命がいるとしてどのような形でどのように探せば良いのか²⁾。火星生命を見た人はいないので、誰も答えを知らない。火星生命が地球生命と異なっている可能性もある。DNA を持っているだろうか。タンパク質を持っているだろうか。C を基礎とした生命だろうか。

しかし、何も分からないでは探す方法も見つからない。火星の初期の環境は地球初期の環境に似ているので、水を基礎とした生命である可能性が高い。

また、火星でも有機物は発見されており、有機物を基礎とした生命である可能性も高い。水と有機物を基礎とした生命の場合、疎水性の膜（脂質膜）で囲まれている可能性が高い。地球上のすべての生物の細胞は、脂質の種類は様々であるが、すべての細胞は脂質膜で囲まれている。膜で囲まれることによって、代謝基質や産物の散逸を防いで、細胞内濃度を維持できるからである。

そこで、1) 有機物でできている、2) 膜で囲まれている、3) 代謝を行っていることの3つを指標とすることで、火星で生命らしい構造を探すことにした。また、地球の微生物（真正細菌と古細菌）の細胞は概ね $1\mu\text{m}$ 程度の大きさを持っているので、 $1\mu\text{m}$ の画像解像度で観察することにした。現在、多くの微生物学者が未知の微生物を土壌等の環境中で探す時には、蛍光顕微鏡を用いる。蛍光顕微鏡では DNA を特異的に染色する色素、核酸や膜構造を観察する色素が用いられる。火星での探査のために、上記 1)～3) の特徴を識別できる蛍光色素を選んだ²⁾。すなわち、1) 広範囲な種類の有機物を染色する SYPRO Red、2) 2つの色素の組み合わせで膜構造を持つ細胞（生細胞）を緑に膜構造の透過性の高まった細胞（死細胞）を赤に染色する SYTO24 と Propidium Iodide の組み合わせ、3) 触媒作用がある場合に緑色の蛍光を発する CFDA-AM である。

火星に向けて宇宙空間を移動し火星表面を移動している間に浴びる放射線や温度変化等、予想される物理作用や化学作用によって、これらの色素が分解しないような色素液を開発した。この色素溶液は、動作温度範囲（ $-30^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ）、圧力 0.007 気圧で液体状態を保ち、土壌中にある粘土鉱物で擬陽性を引き起こさない組成にしてある²⁾。

蛍光顕微鏡も人の作業を全く必要としないで、探査車のシャベルから試料を観察筒に受け取り、自動で染色して撮像、画像を転送する装置として開発した（図 2）。現在の仕様では、大きさ $160\times 120\times 240\text{ mm}$ 、約 6 kg である²⁾。

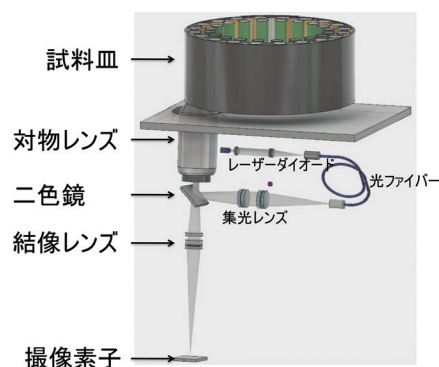


図 2 火星での生命探査用の自動蛍光顕微鏡²⁾

8 宇宙探査の未来

もし、火星に生命らしい物が見つかったら、その生命の特徴を調べる。それがタンパク質を持っているか。タンパク質構成アミノ酸は地球生物の使っている 20 種のアミノ酸と同じか違うか。DNA をもっているか。塩基として AGCT を使っているか。これらを調べることで、火星由来の生物かどうかを判定できる。もし DNA 配列をもっているならば系統樹を作製して、その生き物は地球生物が火星に移動したものか、行った時期を判定することができる。

現在、太陽系外に 5,000 個もの惑星が見つまっている。その中には、液体の水を持つ可能性のある適当な温度の惑星も見つまっている。太陽系の中か外か、どちらかでも地球外生命が見つければ、これまで我々の知っている地球生命以外の生命が研究対象となる。現在の生物学は地球生物を対象とした生物学であるが、地球外生物を対象として初めて真の生物学が誕生することになる。この分野は、宇宙生命科学あるいはアストロバイオロジーとよばれている。

引用文献

- 1) Yamagishi, A., et al., *Astrobiology*, **18**, 1369-1374 (2018)
- 2) Yamagishi, A., et al., *Aerospace Technology Japan*, **16**, 299-305 (2018)

（東京薬科大学生命科学部）