

特集「太陽系におけるアストロバイオロジー」

たんぽぽ計画：有機物・微生物の宇宙曝露と宇宙塵・微生物の捕集

山岸 明彦¹

2011年4月7日受領, 2011年5月6日受理.

(要旨)「たんぽぽ計画」では国際宇宙ステーション(ISS)曝露部で微生物を採集することによって、この高度での微生物の存在可能性を検討する。また、微生物が宇宙空間で、どの程度の時間生存できるのかを、微生物を宇宙環境に曝露する事によって調べる。生命の起原以前に、宇宙空間で合成された有機物が宇宙塵とともに地球に飛来した可能性がある。そこで、ISS上で宇宙塵の採集を行い、有機物を解析する。地球周辺には、スペースデブリが多量に蓄積している。本計画ではそのモニターも行う。これらの実験のために $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ という超低密度のエアロゲルを開発した。これは今後の宇宙における様々な微粒子採集に利用可能である。

1. はじめに

タンポポは白い綿毛をもつ種をつくる。種は風に乗って遠くまで運ばれる。地球の生命がタンポポの綿毛の様に宇宙空間を移動する可能性は無いのか、ということを確認する実験として「たんぽぽ計画」が提案された。この計画では国際宇宙ステーション上で微生物を採集することによって、この高度での微生物の存在可能性を検討する。また、もし微生物が宇宙空間を移動可能であるとして、どの程度の時間生存できるのかという点を、微生物を宇宙環境に曝露する事によって調べる[1, 2]。その他にいくつかの実験を行う計画であるが、本稿では特に微生物採集に重点をおいて、解説を行う。

生命の誕生に関するもう一つの大きな問題として、生命の起原以前の地球上での有機物の蓄積がある。生命の誕生以前に有機物が無生物的に合成され地球表面に蓄積されたであろうと推定されている。しかし、地球上にその証拠は残っていない。様々な条件で原始地球環境での無生物的有機物合成の実験が行われた。こうした実験によれば、アミノ酸や有機酸などの有機物

は無生物的に合成されるものの、その合成量は大気組成によって大きく異なる。また原始地球上ではいったん合成された有機物が分解される可能性もある。有機物の蓄積量を考えるうえでは、有機物の分解も考慮しなければならない。こうした点を考慮すると、原始地球上で十分な量の有機物が蓄積されたかどうかは明らかではない。

原始地球に蓄積した有機物のもうひとつの起原として、宇宙起源の有機物が地球に蓄積した可能性がある。低温の宇宙空間で合成された有機物が宇宙塵とともに地球に飛来した可能性である。宇宙塵由来の有機物が生命の起原に貢献した可能性は高い。これまでも南極や成層圏で宇宙塵を採集しその分析が行われている。しかし、宇宙塵を地球由来物質の混入無しに手に入れることは難しい。そこで、国際宇宙ステーション上で宇宙塵の採集を行う事が、「たんぽぽ計画」のもう一つの課題である。

地球周回軌道には、これまでの宇宙探査活動に起因する人工的粒子（スペースデブリ）が多量に蓄積している。これらの粒子が人工衛星に衝突することにより、人工衛星に障害を与えることもある。そこで、スペースデブリの長期的モニターが求められている。「たんぽぽ計画」ではスペースデブリのモニターも行う。

1. 東京薬科大学 生命科学部
yamagish@toyaku.ac.jp

最後に、宇宙空間で微粒子を捕集するためにはエアロゲルとよばれる媒体を用いる。エアロゲルは二酸化ケイ素でできた超低密度の固体である。宇宙空間を移動する高速の微粒子を補足するためには、衝突時の変性をできる限り抑える必要がある。「たんぼ計画」では、 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ という超低密度のエアロゲルを用いることによって、微粒子衝突時の微粒子の変性を極力抑えることを目指している。こうして開発されたエアロゲルは今後の様々な宇宙における微粒子採集に利用可能である。

2. 宇宙塵採集計画

今から約40億年前に地球上で生命が誕生したと考えられている[3,4]。生命の起原の前には有機物が非生物的に合成され、原始地球の表面に蓄積したと想像されている。もし、地球上で生命が誕生したのであれば、生命誕生前には少なくとも局所的には高濃度の有機物溶液ができたはずである。しかし、現在の地球上にその証拠は残っていない。1953年のMillerの実験以来、放電など様々なエネルギーを用いて気体中で有機物を合成する研究が行われてきた。その結果、メタンやアンモニア等を含むような還元的大気中では多量の有機物の合成が行われる。しかし、二酸化炭素を主体とするような非還元的大気中では有機物合成はほとんど起きない。従って、原始地球上で十分量の有機物の蓄積が起きたかどうかを知る為には、当時の大気組成の情報が不可欠である。しかし、現在まだ多くの議論が行われており、統一的な結果が得られているとは言えない。

生命の起原前の有機物合成のもう一つの場所は宇宙空間である。暗黒星雲等では、電波分光学によって有機化合物の存在が明らかとなっている。隕石中にはアミノ酸をはじめとする有機物が検出されている[5,6]。さらに、彗星からスターダスト計画によって捕集された微粒子からもアミノ酸が検出された[7]。こうした宇宙起源の有機物が生命の起原以前に地球上に蓄積したのではないかと推定されている[8]。その際、大型の隕石ではなく1 mm以下の微粒子が量的には大きな寄与をしたのではないかと推定されている[8]。

これまでにも、南極や成層圏等で採集された宇宙塵の解析が行われている。しかし、宇宙塵が南極に到達

してからの地球由来有機物の混入、成層圏で微粒子採集に用いられた媒体からの混入の可能性が残っており、宇宙塵中で検出された有機物に関して、それが本当に宇宙由来であるかどうかは必ずしもはっきりとはしていない。そこで、国際宇宙ステーション上でエアロゲルを用いて宇宙塵を採集しようという計画を「たんぼ計画」の一貫として実施する予定である。

採集した宇宙塵をエアロゲル中から取り出し、有機物を抽出した後に加水分解をおこなう。加水分解産物を蛍光色素で誘導化の後HPLCを用いて分析することにより、アミノ酸の種類および光学活性(DL)の分析を行う予定である。

3. 有機物曝露

さて、低温の宇宙空間で形成された微粒子は、宇宙空間を移動して長時間をかけて地球にまでやってくる。地球近傍まで移動してきた微粒子中の有機物が生命の起原に寄与するためには、その過程で有機物が分解されない内に到達する必要がある。微粒子中有機物の宇宙空間での安定性の検討を行うのが、タンポポ計画のもう一つの計画である。

地球上の生物細胞は70%の水と15%のタンパク質を含んでいる。タンパク質はアミノ酸が重合してできた高分子である。タンパク質を構成するアミノ酸の種類は20種で生物種による差はない(厳密には多少異なるが、ここでは触れない)。こうした特徴をもつ生物由来のアミノ酸をタンパク質アミノ酸と呼んでいる。また、それらのアミノ酸はすべてL型である。それに対して、Millerの実験で代表される非生物学的有機物合成や隕石中ではタンパク質アミノ酸も検出されるが、20種以外の非タンパク質アミノ酸も多く見つかる。また、これらはDLの両方が含まれている。

ここで重要な点として、宇宙空間で合成される有機物はアミノ酸そのものではないという点がある。これまでアミノ酸が「検出」されるという言い方をした場合、無意識に遊離のアミノ酸を考える。しかし、実験室で非生物学的に合成される有機物中のアミノ酸の大部分は高分子有機物を形成していて、遊離で存在しているアミノ酸は極少ない。高分子有機物中のアミノ酸は加水分解後にアミノ酸として検出される。加水分解前の構造は非常に複雑であるが、分子量2000-3000の高

表1：大気圏上空での微生物採集結果(文献14より改変)。下線は孢子形成微生物。

Mission	Altitude (km)	Microbial collection (cultivated bacteria and fungi)	References
Balloon	11-21	<u>Bacillus</u> sp., <u>Macrosporium</u> sp., <u>Rhizopus</u> sp., <u>Penicillium</u> sp., <u>Aspergillus</u> sp.	Rogers and Meier, 1936
Balloon	38-41	<u>Penicillium</u> sp.	Soffen, 1965
Balloon	3-27	<u>Micrococci</u> and <u>spore-forming rods</u> , <u>Aspergillus</u> sp., <u>Alternaria</u> sp., <u>Penicillium</u> sp., <u>Cladosporium</u> sp.	Greene et al., 1964; Bruch, 1967
Aircraft	0.69-3.1	<u>Bacilli</u> , <u>Micrococci</u> , <u>Aspergillus</u> sp., <u>Alternaria</u> sp., <u>Hormodendron</u> sp.	Fulton, 1966
Rocket	48-77	<u>Mycobacterium</u> sp., <u>Micrococcus</u> sp., <u>Circinella</u> sp., <u>Aspergillus</u> sp., <u>Papulaspora</u> sp., <u>Penicillium</u> sp.	Imshenetuky et al., 1976
Aircraft	0.8-12	<u>Deinococcus</u> sp., <u>Streptomyces</u> sp., <u>Bacillus</u> sp., <u>Paenibacillus</u> sp., unidentified fungi	Yang et al., 2008a
Balloon	41	<u>Bacillus</u> sp., <u>Staphylococcus</u> sp., <u>Engyotontium</u> sp.	Wainwright et al., 2003
Aircraft	20	<u>Bacillus</u> sp., <u>Penicillium</u> sp., Micrococcaceae and Microbacteriaceae, <u>Staphylococcus Brevibacterium</u>	Griffin, 2005 2008
Balloon	12-35	<u>Bacillus</u> sp., <u>Paenibacillus</u> sp.	Yang et al., 2008b

分子であることがわかっている。しかし、分子がどのような構造をしているかは明らかではない。この高分子化合物を加水分解するとアミノ酸が得られることから、この複雑高分子がアミノ酸の前駆体であるという言い方もできる。

そこで、複雑な高分子化合物を宇宙空間曝露することによって、アミノ酸前駆体としての複雑高分子有機物の安定性を検討する。比較対象として、アミノ酸を宇宙空間に曝露することによって遊離のアミノ酸およびその前駆体がどの程度の変性を受けるのかも検討する。

4. デブリ評価

これまでの各国の宇宙活動によって宇宙空間には人工的粒子が多数持ち込まれている。これらはスペースデブリと呼ばれている。高速で移動するスペースデブリは、人工衛星等に衝突することにより、障害を与える可能性がある。大きな破片に関しては地上からの追跡が行われている。小さいサイズのスペースデブリに関してはこれまでに何回かの評価が行われた。それらは、改修した宇宙機についた衝突痕を観察する方法(LDEF(84-90, NASA/ESA), EuReCa(92-93, ESA), HST(89-93), NASA/ESA), SFU(95-96, JAXA))

[9,10] と、エアロゲルを用いて衝突した粒子を観察する方法(Euro-Mir(96-97, ESA), ODC(97-98, NASA), MPAC-SEED(02-05, JAXA))によって行われた。その結果、スペースデブリは大きさが小さいほど指数関数的に多くなっていくこと、高度によって密度が異なること、時間経過とともに増加傾向にあることがわかって来ている。「たんぽぽ計画」では、回収したエアロゲル上の衝突痕の数、方向、形状、大きさを計測することから、デブリ密度に関する情報を得る予定である。

5. 微生物採集計画

5.1 微生物の地球脱出可能性

生命は今から約40億年前に地球上で誕生したと考えられている[2,3]。38億年前の岩石中には生命の痕跡と思われる炭素の同位体化石が報告されている。従って、それより前に生命が誕生したと推定される。また、現存する生物の遺伝子の解析から、地球上のすべての生物は共通の祖先から進化してきたと考えられている。共通の祖先が生きていた年代の推定は難しく、非常に幅のある推定であるが、33-40億年前に共通の祖先が初期地球に生きていたと推定されている。これらを総

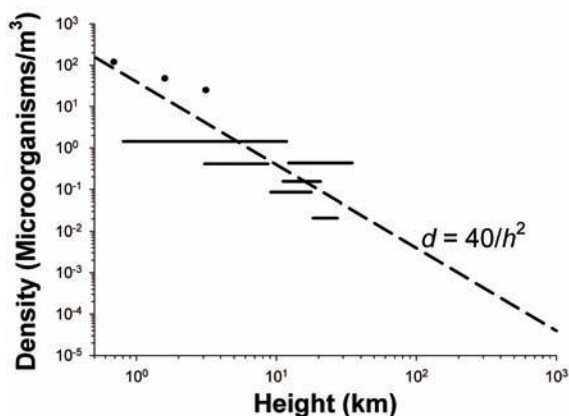


図1：大気圏での微生物密度の高度依存性。微生物採集はある高度の範囲で実施される場合が多いので、採集を行った高度の範囲を水平な実線で表示してある。（文献14より改変）

合するならば、今から40-38億年前には我々の祖先が地球上に生存していたと推定されている。

しかし翻って、現存する地球上の生命に繋がる生命が本当に地球上で誕生したのかと問われると、その証拠もまた無い。生命の種（孢子）が宇宙を漂い伝搬するのではないかという仮説は「パンスペルミア仮説」とよばれ、今から100年程前にArrheniusによって提唱された[11]。しかし比較的最近に至るまでこの仮説を検証する手段も無かった。したがって、この仮説はいわば「荒唐無稽な仮説」ととらえられる場合も多かった。

Arrheniusの唱えた「パンスペルミア仮説」は微生物の孢子(spore)が太陽光に依存して宇宙を漂って移動するという説であった。孢子は乾燥や放射線に対して耐性をもっており、宇宙空間を移動可能なのではないかという仮説である。20世紀後半以降、欧州の研究者を中心に微生物の孢子の宇宙空間での生存可能性が検討された[12,13]。その結果、微生物の孢子は宇宙空間では紫外線によって死滅するが、紫外線から遮蔽されれば1年以上の長期間生存可能で有ることが明らかとなった。火星からの隕石が地球上に到着しているという発見と伴って、隕石中に保存された微生物は宇宙空間を移動可能であると理解されるようになってきている。これは、岩石(litho)によるパンスペルミア仮説という意味で「リソパンスペルミア仮説」ともよばれている。ただし、地球上の全生物が共通の祖先を持つことを考えに入れば、もし地球の生物が地球外由来

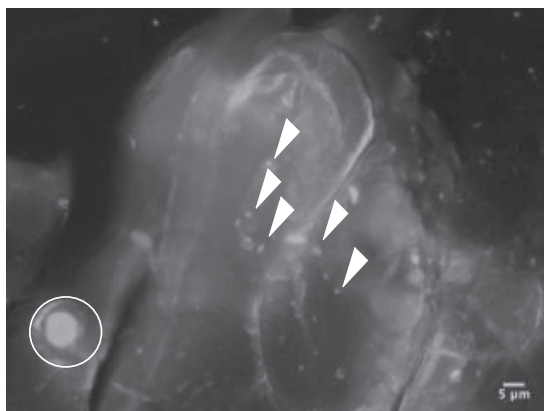


図2：エアロゲルの蛍光顕微鏡像。ゲルの下側方向より微生物と粘土鉱物を4km/secで打ち込んできたトラックの末端を撮影した。左下、円で囲んだ大きな粒子は鉱物のガラス。矢印の先の1μm程度の大きさの白っぽい粒子が微生物。

だとしてもそれは今から38億年以前に地球に到着し、全生物の祖先となったと考えなければならない。

さて、これと少しこととなった系統の実験として大気圏での微生物の分布の研究がある[14]。対流圏では大気は対流しており、その上層まで微生物が到達するであろうことは想像に難くない。しかし、大気中で微生物を採集する手段が限定されるために、大気圏で実際に行われた実験は多くない。表1にはそれら、大気圏での微生物採集実験結果をまとめた。

航空機、大気球、小型ロケットを用いて微生物の採集が行われた。微生物は、フィルターを用いて、空中の微粒子をろ過する方法、あるいは空気を粘着性のある物質（グリセロール等）に衝突させて微粒子を捕集する方法（インパクター）によって採集された。こうした実験結果から、微生物は地上数十kmまで到達していると思われる。さらに上空に微生物が到着する可能性は無いのか、それを確かめる実験が提案された。これが「たんぼぼ計画」の始まりであった。

図1にはこうした微生物採集実験から推定された微生物密度を高度に対して図示してある。微生物の採集はある高度の範囲で行われることも多いので、図中のデータは、採集が行われた高度の範囲を図示するために水平の線で表されている。誤差が非常に大きいので、高度依存性は明らかではない。もし、図中の直線が正しいとすると、国際宇宙ステーションの運行する地球低軌道(300-500km)での微生物密度は大変低い、ゼロではない。後述するように、エアロゲルを用いて1

年間軌道上で微粒子採集を行うと、この直線近似が正しければ、微生物が採集できることになる。もし、地球低軌道上で微生物が発見されなければ、この図のデータの依存性が直線ではないということになる。

微生物が上空まで運ばれる機構に関しては必ずしも明らかではない。隕石の衝突や火山の噴火によって微生物を含む土壌がはじき飛ばされる可能性、航空機やロケットに付着して微生物が運ばれる可能性、雷雲やスプライトとよばれる現象で知られている様な高々度での電場によって電荷を持つ微粒子が加速される可能性等[12-16]が、微生物を含む微粒子が高々度にまで輸送される機構として提案されている。

5.2 微生物採集方法

宇宙空間で微生物を採集する為には、これまで航空機や大気球で用いられた方法を使うことはできない。宇宙空間で微生物を採集するためにはこれまで、宇宙空間での微粒子採集にもちいられてきたエアロゲルを利用することを検討した。国際宇宙ステーションは軌道速度約8km/secで移動しており、もし微粒子が落下することなくこの高度に滞在していたとするとやはり8km/secで移動しているはずである。従って、エアロゲルに微粒子が衝突する場合には相互の軌道角度に応じて0-16km/secで衝突する事になる。この速度で衝突した微粒子中の微生物が検出可能かどうかの検討を行った。

検討には宇宙科学研究所の二段式ガス銃を用いた。地表で粘土等に混ざって増殖した微生物が微粒子として舞い上がることを想定して、粘土と微生物の混合微粒子を作製した。混合微粒子をプラスチック製の弾丸に詰め、4 km/secに二段式ガス銃で加速した。弾丸は飛行中に二つに割れる様に設計されている。弾丸中の混合微粒子は弾丸から放出され、真空中においたエアロゲルに衝突する。衝突した微粒子はエアロゲルに孔（トラック）をあけ、トラックの末端で停止する。エアロゲルからトラックを切り出し、DNAを特異的に染色する蛍光色素で染色した後に蛍光顕微鏡で観察した。図2はトラックの末端を撮影した写真である。円で囲んだ左下の大きな粒子は、衝突の際にエアロゲルと粘土が溶融してできたガラスで、蛍光を発している。矢印で指している1 μm の小さい粒子が微生物である。長時間撮影を続けると、微生物の蛍光は消光す

るのに対し、ガラスの蛍光は消光しないので、両者を区別することができる。この実験から、4 km/secで衝突した微粒子中の微生物DNAが衝突後も残り、検出可能であることがわかる。

微生物が生存しているかどうかはこの実験では明らかではない。培養を行えばわかるはずであるが、いくつかの理由で培養による検討は難しいと考えている。

1) 2段式ガス銃の実験装置も宇宙実験で用いる実験装置も滅菌やその後の滅菌状態の維持が難しいこと。2) 従って、仮に培養で微生物が検出されたとしてもその由来は不明で有ること。3) 地上で遺伝子を解析して存在が推定されている微生物中で培養が可能なのは1%以下と推定されていること。4) 従って微生物がいたとしても培養できない可能性の方が高いこと、である。なお、蛍光顕微鏡で検出された微生物が宇宙空間で採集された物か、あるいは打上の前後に付着した物かという区別は、トラックのあるなしで判定する。すなわち、上述の様に宇宙空間で衝突する粒子のほとんどすべては高速で衝突するはずであるので、トラックを形成するはずである。そこで、トラックの末端にある微粒子だけを解析の対象とする予定である。

5.3 微生物遺伝子の解析

微生物解析の第2段階として、微生物遺伝子の試験管内増幅(PCR: Polymerase Chain Reaction)を行う。PCRは耐熱性のDNA複製酵素、DNAポリメラーゼを用いて、解析対象とする遺伝子を試験管内で増幅する方法である。解析対象とする遺伝子としては16S rRNA遺伝子を対象とする。これまで、微生物生態学の分野では、環境中に存在する微生物の種類を解析するためにもっぱら16S rRNA遺伝子が用いられている。それは、この遺伝子は生物にとって必須であるため、すべての生物がもっているからである。こうした研究によって、非常に多くの生物種の16S rRNA遺伝子の配列情報がデータベース化されている。

衝突した微粒子をマイクロマニピュレータでエアロゲルから取り出し、試験管に入れる。PCR反応によって16S rRNA遺伝子を増幅する。増幅した遺伝子はクローニング（大腸菌中で取り扱えるようにすること）し、その塩基配列（AGCTの文字の遺伝子中での並び順）を解析する。遺伝子の塩基配列を既に知られている微生物の配列と比較することにより、採集され

た微生物がどのような微生物で、地球上ではどのような環境で生育している微生物であるかの推定が可能である。

6. 微生物の宇宙曝露

微生物が宇宙空間に輸送され、さらに他の天体まで移動していく時に、微生物は生存し続けることが可能であるのか。宇宙空間は、真空、無重力等の特性を持っており、また紫外線、銀河宇宙線を浴びる環境である。さらに、地球周回低軌道では残存する原子状酸素が高速で移動する宇宙ステーションに衝突することによる影響、地球の太陽側と影側とを軌道周期で移動することによる高温と低温の温度サイクルなど、低軌道特有の環境も持っている [17]。

高等動物や高等植物等の大型の生物にとっては、酸素が無い環境での生存はあり得ない（特殊な生物、クマムシ、ユスリカ幼虫等を除く）。また、重力も大型生物に対しては様々な重要な効果を持っている。しかし、微生物にとって重力はほとんど何の影響も与えない。また、微生物に対する真空の影響も限定される。すなわち、真空中で微生物は増殖しないが、微生物の生存だけを考えるならば、真空は深刻な問題とはならない。実験で用いられる微生物を保存する場合、微生物を真空乾燥した状態で長期保存される。多くの微生物にとって、真空はむしろ安定に生命を維持する条件となっている。残りの環境因子に関しては、微生物の生存にとってしばしば深刻な制限要因となる。従って、微生物が地球と他の天体間を移動できるかどうかを考える上では、こうした因子の影響が重要となる。

これまで、既に欧州のグループを中心に宇宙環境での微生物の生存可能性の実験が行われてきた [12,13]。枯草菌の胞子を用いた実験から、宇宙環境因子の中で紫外線の影響が最も大きいことがわかっている。そして、紫外線があたる環境では、枯草菌胞子は短時間で死滅してしまうが、紫外線を遮れば宇宙環境で1年以上生存できることが明らかとなっている。こうした実験結果から、「リソパンスペルミア」すなわち隕石中で紫外線から遮蔽した環境で生命が惑星間を移動することは可能であると考えられている [18]。

さて、「たんぽぽ計画」では、隕石中ではなく微生物が菌体の固まりとして宇宙空間を移動する可能性を

検討する予定である。これまでの研究から宇宙空間を移動する際の最大の問題は紫外線であることがわかっている。微生物が1細胞で移動する場合には紫外線によって極めて短時間(1分以下)で死滅してしまう。しかし、多くの微生物はバイオフィームとよばれる細胞の集合体を形成することが知られている。実際、航空機で成層圏下部より採集した菌(*Deinococcus artherius*)は細胞の凝集体を形成することによって強い紫外線耐性も持つことが知られている [19]。そこで、微生物細胞を異なった厚さに充填した標品を宇宙空間で紫外線も含めた環境に曝露する。微生物としては、これまで放射線や紫外線に対して強い耐性を持つことが知られている *Deinococcus* 属の菌を何種類か宇宙環境曝露する予定である。そのなかには大気圏上空で採集した菌種(*Deinococcus aerius* と *Deinococcus aetherius*)も試す予定である。こうした実験から、宇宙環境で微生物が凝集体として生存可能かどうかの検討を行う。

7. エアロゲル評価

さて、微粒子採集に用いるエアロゲルは、超低密度の二酸化ケイ素からなるゲルである。エアロゲルは二酸化ケイ素の超低密度のゲルを作製した後に溶液をエタノールと置き換え、臨界乾燥させることによって作製する。エアロゲルは超低密度で、透明であり、高速で衝突する微粒子の捕捉に最適である。これまでも宇宙空間で微粒子を補足する実験に用いられてきた (EuReCa, Euro-Mir, ODC, MPAC-SEED, Stardust) [20,21]。これまで、用いられてきたエアロゲルは 0.03g/cm^3 程度の濃度の物である。それ以下の濃度になると物理的強度が不足してくる為に取り扱いが難しくなる。そこで、たんぽぽグループの担当者(田端、河合)は 0.03g/cm^3 の比較的取扱いの容易なゲルの上に 0.01g/cm^3 のさらに低密度のゲルをのせた二段構造のエアロゲルを開発した [22]。

さらに、タンポポ計画では、採集した微粒子の有機物解析も予定している。そこで、エアロゲルに混入している微量のアミノ酸の混入が問題となる。タンポポグループでは、利用する溶媒等の試薬として純度の高い物を使用する、用いる容器すべてを一定の基準のもとで洗浄を行う、可能な限りクリーンブース内で作業を行う等の改良を行うことによって、アミノ酸の混入

を低下させた。とりわけ、現在解析対象としている α アミノイソ酪酸、イソバリンに関しては検出限界(1-10fmol)以下にまで混入アミノ酸量を低下させた。タンポポ計画では、こうして作成した超高純度超低密度エアロゲルを用いて微粒子採集を行う予定である。

8. 実験計画

実験では、エアロゲルと曝露パネルをタンポポ実験装置の表面に設置する。実験装置を国際宇宙ステーション(ISS)日本実験棟(JEM)の曝露部(図3)に設置して実験を行う。当初の計画ではタンポポ実験装置を曝露部共用ポートに設置する実験として計画された。その後、タンポポ実験以外の実験計画も曝露部で実施可能な汎用曝露実験装置(ExHAM)として開発が進んでいる。ExHAMに取り付けたたんぽぽ実験装置は無人の宇宙輸送船HTVこうのとりでISSに輸送される予定である。一端予圧部(JEM内部)に運び込まれたExHAMは、エアロックを通して曝露部に出す。エアロックはJEMと曝露部の境に設けられた2重扉で、内側の扉を開けてExHAMをエアロック内に入れたあと、扉を閉める。内部を真空にした後で、外側の扉を開けてExHAMを宇宙空間に出す。エアロックからロボットアームを用いて実験装置を曝露部に設置する。エアロゲルはエアロゲル固定容器に固定し、プラスチ

ック製袋内に密閉した状態で打ち上げる。微生物や有機物を宇宙空間で曝露するためには、曝露パネルを用いる。曝露パネルは金属製の板で、サンプルを入れた曝露セルを10個固定する。エアロゲルはExHAM(汎用実験装置)の宇宙面、進行方向面、側面、場合により進行方向反対面の4面(具体的にはまだ未定)に設置する。曝露パネルはExHAMの宇宙面に取り付ける。

ExHAMを曝露部に設置のまま1年放置する。1年後に装置をロボットアームとエアロックを用いて予圧部内に取り込み、ExHAMからエアロゲルと曝露パネルを取り外し、表面を保護した後に適当な容器に入れ、地上に持ち帰り解析を行う予定である。エアロゲルに関しては、トラックの数、方向、長さ、形状等を記録した後、トラックを切り出してその後の解析に用いる。曝露パネルに関しては、曝露パネルから曝露セルを取り外し、それぞれの曝露試料担当者に分配して解析を行う予定である。

文 献

- [1] Yamagishi, A. et al., 2007, Biol. Sci. Space 21, 67.
- [2] Yamagishi, A. et al., 2009, Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci. Space Tech. Jpn 7, Tk49.
- [3] 山岸明彦, 2004, シリーズ進化学 第3巻「化学進化・細胞進化」(岩波書店), 9.

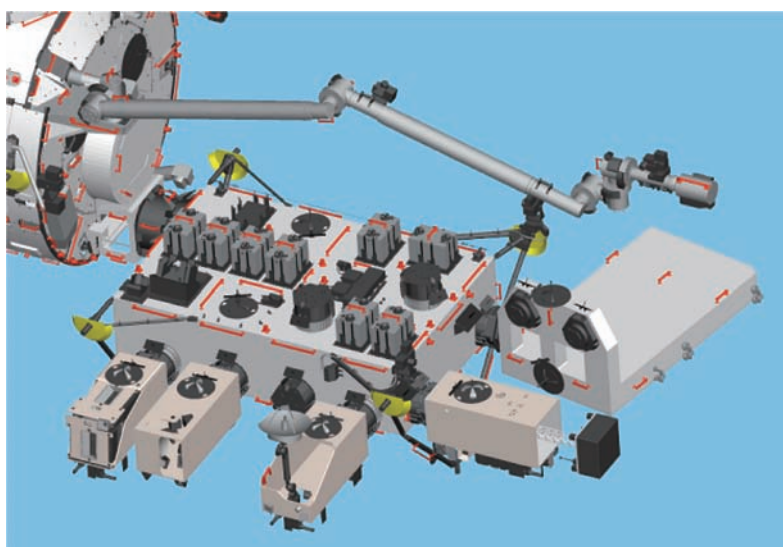


図3：国際宇宙ステーション日本実験棟曝露部(JAXAホームページから)。

- [4] 山岸明彦, 2010, 新しい生物学 第10巻「極限環境生物学」(岩波書店), 1.
- [5] Cronin, J. R. and Pizzarello, S., 1997, *Science* 275, 951.
- [6] Nakamura-Messenger, K. et al., 2006, *Science* 314, 1439.
- [7] Elsila, J. E. et al., 2008, *Meteor. Planet. Sci.* 44, 1323.
- [8] Chyba, C. and Sagan, C., 1992, *Nature* 355, 125.
- [9] Yano, H. et al., 2000, *Adv. Space Res.* 25, 293.
- [10] Yano, H., 1999, *Earth Planet. Space* 51, 1233.
- [11] Arrhenius, S., 1908, *Worlds in the Making: the Evolution of the Universe* (translation to English by H. Borns, New York: Harper and Brothers Publishers).
- [12] Nicholson, W. L. et al., 2000, *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 64, 548.
- [13] Horneck, G. et al., 2001, *Orig. Life Evol. Biosph.* 31, 527.
- [14] Yang, Y. et al., 2009, *Biol. Sci. Space* 23, 151.
- [15] Mileikowsky, C. et al., 2000, *Icarus* 145, 391.
- [16] Dehel, T. et al., 2008, *J. Electrostatics* 66, 463.
- [17] 山岸明彦, 他, 2010, 新しい生物学第10巻「極限環境生物学」(岩波書店), 179.
- [18] Horneck, G. et al., 2008, *Astrobiology* 8, 17.
- [19] Yang, Y. et al., 2009, *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 60, 776.
- [20] Brownlee, D. et al., 2006, *Science* 314, 1711.
- [21] Zolensky, M. E. et al., 2006, *Science* 314, 1735.
- [22] Tabata, M. et al., 2005, *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, Puerto Rico, 816.

特集「太陽系におけるアストロバイオロジー」

極限環境下での植物利用のアストロバイオロジー

橋本 博文¹

2011年4月12日受領, 2011年5月6日受理.

(要旨) アストロバイオロジーは純粋なサイエンスであり, 真理の探究がその目的であるが, 極限環境下での植物の利用という観点から, その応用について考える. 一つは将来の火星の環境下で行われる宇宙農業であり, 低圧下での植物栽培を追求した結果, 与圧温室ドームではなく火星の大気圧下での農作物のハウス栽培の可能性が見えてきた. もう一つは, 放射性物質に汚染された土壌の浄化に植物を用いる方法の有効性である. これらは未来社会でアストロバイオロジーの応用可能性を示している.

1. はじめに

NASA が定義した「アストロバイオロジー」の意味は「地球および地球外での生命の起源・進化・分布・未来」[1]となっており, 純粋なサイエンスである. 日本では宇宙関係の研究者でさえ, アストロバイオロジーについて知る方は多くないが, 欧米の学会に出かけていくと数百人規模の研究者が活発に議論を交わしていることに驚かされる. そのテーマは多種多様であり, 荒削りでまとまりを欠いているようにも見えるが, 学問としての若さと勢いを感じる. まさに, アストロバイオロジーは成長を続けている生きた学問なのである. また, 従来の「生物学」が地球環境の淘汰圧下で進化してきた生物, いわば制限付きの生物学であるのに対して, アストロバイオロジーは宇宙環境全体, さらに過去や未来に範囲を広げた4次元的に生物学を一般化する学問である. したがって, 「生命の起源」等の複雑な環境パラメータの中での化学反応を議論するためには重要な分野である. しかし, アストロバイオロジーの研究対象は「生命の起源」だけではない. 欧米では幅広く柔軟にテーマが設定され, 発展性の高い学問となっている. そこで, 日本で馴染みの薄いアストロバイオロジーを理解してもらうために, どのような応用があるか考えてみたい. その例として, 特に極

限環境下での植物栽培という観点から, 火星という地球外環境下に人類が入植して農業を行う場合に必要となる宇宙農業と土壌浄化の方法としてのファイトレメディエーションについて述べる.

2. 宇宙農業

将来の火星以遠の有人宇宙探査は大規模化および長期化する可能性があり, 食料の自給や酸素を生産する意味でも植物の栽培, つまり宇宙農業は重要な役割を果たす. そこで例として, 火星での有人探査を想定した場合の宇宙農業の課題について, アストロバイオロジーの研究対象になるテーマを考えてみたい.

2.1 低圧ドームの必要性

火星の大気は二酸化炭素を主成分とする. 全圧は約0.7kPaであるが, 季節により変化する. 温度は季節や緯度にもよるが, かなり低い. 砂嵐が吹く季節もある. そこで, 火星表面に植物の栽培環境として温室ドームを考え, さらにその中に人間が生活する環境を居住区として考えることにする. 仮にドーム内の圧力を地球上の大気圧100kPaと同じにすると, ドーム内外で, ほぼ100kPaの差圧が生じることになる. 温室ドームの壁に加わる100kPaの圧力とは, いかなる力であろうか. 100kPaとは1cm²あたり1kgもの力が加わる圧力であり, 一辺10cmの正方形の面積には100kg,

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
hashimoto@surc.isas.jaxa.jp