

## 「フロンティアセミナー・テキスト」

# 宇宙での生命の起源, 進化, 伝播および探査 第3回 大気圏および宇宙における生命実験と探査

山岸明彦<sup>1</sup>

2023年6月7日受領, 査読を経て2023年7月20日受理

(要旨) 1930年代から大気圏での微生物採集実験が行われて, 胞子を形成する*Bacillus*属とカビ, 紫外線耐性菌が採集されている. 100年以上前にパンスペルミア仮説が提唱された. パンスペルミア仮説と, 宇宙由来の有機化合物が地球に飛来した可能性の検討を, 地球低軌道での微生物・有機化合物実験(たんぼぼ計画)で行った. 紫外線耐性菌*Deinococcus radiodurans*の細胞塊(0.5 mm厚)は紫外線が当たる宇宙空間で3年間生存した. この紫外線耐性菌の生存率の年変化から, 紫外線があたる環境で2~8年間, 紫外線があたらない環境では48年間この紫外線耐性菌が生存可能であると推定された. シアノバクテリアの3年間の宇宙生存と, 有機化合物の宇宙環境での安定性, 超高速衝突痕が分析された. 火星探査の結果から, 火星表面に生命増殖環境がある可能性がでてきている. 生命探査では, 高解像度の顕微撮像と, 擬陽性を許容しつつも検出漏れのない方法による探査が重要である. また見つかった生物の候補微粒子が, 非生物か地球生物か地球外生物かを, アミノ酸種とDNAの分析で識別するフローチャートが提案されている. 惑星保護に関してもふれる.

## 1. はじめに

本稿は, 2019年2月18日~19日北海道大学で開催された惑星科学フロンティアセミナー2018「生命の起源: 地球上の生き物はどこでどのように誕生したか」の聴講ノートを元に, 加筆修正した. 聴講ノートを作成した, 千葉 紗登子氏, オン 碧氏に感謝する.

本稿は, 三回に分けて連載された. 第一回は地球に残されている生命の痕跡と, 地球化学や宇宙科学から明らかになりつつある有機化合物の起源を解説した[1]. 第二回は生命科学からわかる生命の起源と進化について解説した. 特にRNAワールドや遺伝子からわかる生命の進化, ダーウィン進化や生命の定義, 地球外生命に想定しうる性質等に関して解説した[2]. 第三回は地球大気圏での微生物採集, 地球低軌道での微生物・有機化合物実験, 火星での生命探査について解説する.

本稿の記載分野は極めて広いが, 周辺分野に関しては概略記載で済まし, 関連する総説を紹介するようにした. ただし, 重要な文献に関しては書誌情報をのせた.

## 2. 地球大気圏の微生物

今日, 太陽系の惑星や氷衛星, 太陽系外の惑星に生命がいるかどうか大きな研究課題となっている. 地球から宇宙への接続点という意味で, 大気圏での微生物調査が1930年代から行われてきた(表1)[3]. 本節では地球大気圏での微生物採集実験に関して解説する.

### 2.1 大気圏微生物採集実験

地球上の微生物は大気圏のどのくらいの高さまでいるのか. それを調べるために, 大気圏での微生物採取実験が行われた. その実験は古くは1930年代から今世紀にいたるまで, 航空機, 大気球, ロケット

1. 東京薬科大学, 生命科学部, 応用生命科学科  
yamagish@toyaku.ac.jp

表1:大気圏における微生物採集実験結果[3].

References	Mission	Sampling method	Altitude (km)	Microbial collection (cultivated bacteria and fungi)	Total colony number	Sampled air volume <sup>ATP</sup> (m <sup>3</sup> )	Sampled air volume <sup>STP</sup> (m <sup>3</sup> )	Density <sup>ATP</sup> (microorganisms per m <sup>3</sup> )	Density <sup>STP</sup> (microorganisms per m <sup>3</sup> )
Rogers and Meier, 1936	Balloon	Sterile cylindrical sampling device descending by parachute	11-21	<i>Bacillus</i> sp., <i>Macrosporium</i> sp., <i>Rhizopus</i> sp., <i>Penicillium</i> sp. and <i>Aspergillus</i> sp.	10	66	8.45	0.152	1.18
Soffen, 1963	Balloon	Drawing air through filter papers by a motor blower	38-41	<i>Penicillium</i> sp.	14	56.6	0.182	0.247	76.92
Greene et al., 1964; Bruch, 1967	Balloon	Drawing large volumes of air by a fan through polyurethan foam filter	3-9 9-18 18-27	(Predominant isolates) Micrococci and spore-forming rods. <i>Aspergillus</i> sp., <i>Alternaria</i> sp., <i>Penicillium</i> sp. and <i>Cladosporium</i> sp.	847 678 304	2095 8014 14611	1070 1522 665	0.404 0.085 0.021	0.79 0.45 0.46
Fulton, 1966	Aircraft	Air pass through gelatin foam filter in sampling probe in front of bombardier's compartment	0.69 1.6 3.1	(Predominant isolates) Bacilli, Micrococci, <i>Aspergillus</i> sp., <i>Alternaria</i> sp. and <i>Hormodendron</i> sp.	not given not given not given	not given not given not given	not given not given not given	128* 48* 26*	144* 59* 37*
Imshenetyuk et al., 1975	Rocket	Sterile medium exposed on the forepart of the rocket during ascent	48-77	<i>Mycobacterium</i> sp., <i>Micrococcus</i> sp., <i>Circinella</i> sp., <i>Aspergillus</i> sp., <i>Papulaspora</i> sp. and <i>Penicillium</i> sp.	31	unknown	unknown	unknown	unknown
Yang et al., 2008a	Aircraft	Drawing air through membrane filters by pumps	0.8-12	<i>Deinococcus</i> sp., <i>Streptomyces</i> sp., <i>Bacillus</i> sp. and <i>Paenibacillus</i> sp., and unidentified fungi	8	5.51	2.69	1.45	2.97
Wainwright et al., 2003	Balloon	Cryosampler comprised of sterile cylindrical probes	41	<i>Bacillus</i> sp., <i>Staphylococcus</i> sp., <i>Engyotontium</i> sp.	7	6.69	0.017	1.05	406.98
Griffin, 2003 2004	Aircraft	Sterile impactor plates exposed on the underside of aircraft	20	<i>Bacillus</i> sp., <i>Penicillium</i> sp., <i>Micrococcaceae</i> and <i>Microbacteriaceae</i> , <i>Staphylococcus</i> and <i>Brevibacterium</i>	592	unknown	unknown	unknown	unknown
Yang et al., 2008b	Balloon	Drawing air through membrane filters by pumps	12-35	<i>Bacillus</i> sp., <i>Paenabacillus</i> sp.	4	9	0.35	0.44	11.45

Note. a: Approximate mean density values. ATP: ambient temperature and pressure. STP: standard temperature and pressure (0 °C and 1 atm).

トを用いて, 高度は最高77 kmまでで実施された[3] (表1). 捕集方法は様々であるが, 大別すると二通りである. 一つは吸引ポンプを用いて大気を吸い込んで, 大気中微粒子をフィルターでろ過して捕集する方法. もう一つは高速で衝突する微粒子を捕集板に衝突させて捕集する, インパクトと呼ばれる方法である[3]. 何れの方法でも, 試料を固体培地で培養して, 微生物はコロニーとして検出された. 培養法による微生物検出では, その時に用いた培地で増殖する微生物のみが検出される. したがって実際の微生物密度は, 培養法で得られた微生物密度よりも高い可能性がある.

Yangらによって成層圏最下部で行われた航空機を用いた微生物採集によって, 5株の微生物が採取された. それらの微生物のうちの2株は, *Deinococcus*属の新種である事がわかった. *Deinococcus*属には*Deinococcus radiodurans*という種が含まれている.*D. radiodurans*は放射線や紫外線に対する大変強い耐性を持つことで有名な種である. なお, *D.* は*Deinococcus*の略で, 学名の属名部分は初出の後は略記する. *Deinococcus*属の新種2株を, それぞれ*D. aeri*usおよび*D. aetherius*と命名した. これらの株は, これまで紫外線耐性が強いことで知られている*D.*

*radiodurans*と同程度, あるいは, より強い紫外線耐性をもつことが示された[4](図1).

大気圏で採取された微生物の多くは, 胞子を形成することのできる細菌*Bacillus*属と真菌類(カビの仲間)であった(表1). 一方, 以前に行われた採集実験では, 胞子を形成しない*Micrococcus*属の細菌が何回か採集されている. Yangらは*Deinococcus*属を採集しているが, *Deinococcus*属は古くは*Micrococcus*属に分類されていた.*Deinococcus*属は胞子を形成しないが, 高い乾燥, 放射線, 紫外線耐性をもっている. したがって, かつて採集された*Micrococcus*属の株は, *Deinococcus*属であった可能性がある[4].

なおここで細菌と古細菌は核を持たない原核生物である. 一方, 真菌はカビの仲間とキノコの仲間を含み, 核をもつ真核生物で, 分類学上は原核生物と大きく異なる[2]. 微生物は, 細菌と古細菌それに真菌(キノコの仲間を除く)をまとめて呼ぶ場合に用いられる. 微生物には単細胞真核藻類や単細胞原生生物も含まれるが, これらは本稿には登場しない.

Yangらによって大気球を用いた微生物採集実験も行われた[5]. 採集された微生物の遺伝子を解析したところ, 同種あるいは近縁の微生物がアメリカやインドの上空でも採集されていることが明らかに

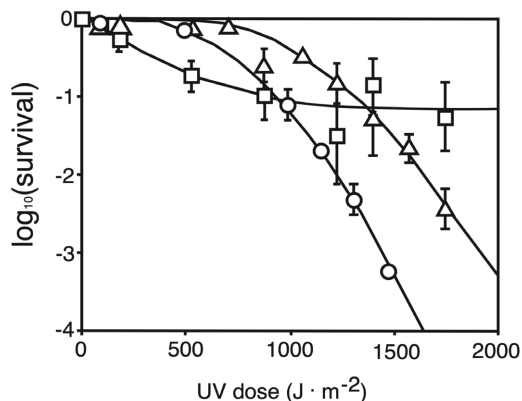


図1: 航空機で採集された種を含む*Deinococcus*属に属する種の紫外線耐性[4]. ○: *D. radiodurans*, □: *D. aetherius*, △: *D. aerius*.

なった。遠く離れた場所で、同種あるいは近縁の微生物が採集されたことから、これらの微生物が大気圏で選択的に生存しているか、あるいは大気圏を移動している可能性がある[5]。

これらの微生物採集実験では、異なった採集装置、採集方法、培養方法が用いられているので、互いに比較するのは無理も大きい。しかし、あえてその微生物密度を採集高度あるいは採集高度範囲に対して図示すると、図2のようになる。微生物密度は大局的には高度に依存して低下している[3]。

大気圏の下部、対流圏では微粒子が対流によって移動している。一方、地上の微粒子がどのように成層圏以上に到達するかという機構は明らかではない。提案されている機構として、大きな火山噴火、隕石衝突がある。また人工的な微粒子移動媒体として、航空機やロケット、大気球などに付着して移動した可能性がある。さらに、近年、成層圏・中間圏・下部熱圏など大気圏上空での放電現象が多数観測されている。それらは、エルプスやブルージェット、スプライトなどと呼ばれている放電現象である。粒子が電荷を帯びていた場合、放電現象をおこしている電場によって加速されて粒子が移動する可能性も考えられる[6]。

## 2.2 大気圏微生物採集実験のまとめ

1930年代より航空機、大気球、ロケットを用いて、大気をフィルター濾過する方法とインパクターによる微生物採集実験が行われてきた。これらの実験に

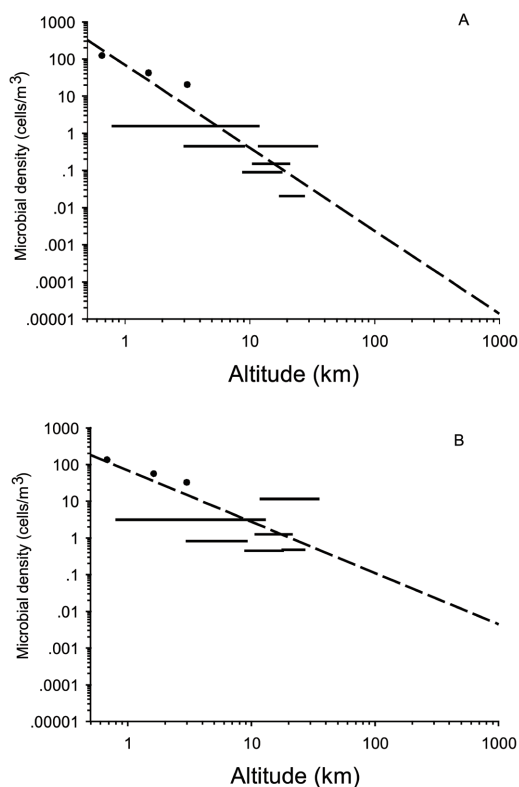


図2: 大気圏での微生物密度の高度依存性[3]. A. 気体量を現場体積で図示した場合. B. 気体量を標準状態 (0 °C 1気圧) で図示した場合. 採集高度に範囲がある場合は高度範囲を示す線で図示している。

よって高度77 kmまでの大気から、孢子形成微生物や紫外線耐性菌が捕集されてきた。微生物密度は高度が上がるにつれて低下する傾向が見られた。上空へ微生物を含む微粒子が上昇する機構として、隕石衝突、火山の大規模噴火があるが、航空機や大気球、ロケット等により人工的に移動する可能性もある。さらに最近発見された大気圏上空でのエルプスやブルージェット、スプライトなどと呼ばれている放電現象で、電荷を帯びた粒子が加速される可能性もある。

## 3. 地球低軌道での微生物・有機化合物実験

### 3.1 背景と概略

前節で解説したように、高度数十kmまでの大気圏中での、微生物採集実験結果が報告されている。

さらに高い高度まで微生物が到達する可能性はないだろうか。古くは二十世紀初頭アレニウス(Svante August Arrhenius)によって、パンスペルミアという仮説が提唱された[7]。パンは「汎」と同義であまねくという意味、スペルミアは胞子を意味しており、パンスペルミアは惑星間空間にあまねく胞子が存在しているという意味である。アレニウスは胞子が太陽風によって惑星間を移動する可能性を提案した。

パンスペルミア説が生命の起源に対する答えを与えない、という批判は妥当である。パンスペルミア説は、どこかの惑星で誕生した生命が惑星間を移動可能なのではないかと、という仮説として理解すべきである。ただし、もしどこかで誕生した生命が惑星間を移動可能であるならば、生命の起源や進化に関して、それを考慮して検討する必要がある。例えばもしパンスペルミアが可能であれば、火星で誕生した生物が地球に移動して地球生物の祖先になったのかもしれない。あるいは仮に火星生物が発見されたとして、それらは地球から移動した生物の子孫かもしれない。

惑星間での微生物の移動を考える上では、惑星からの生物の離脱と移動、移動する間の微生物の生存、微生物が次の惑星へ着陸して増殖する過程が、それぞれ別々に検討されている[6]。これまで、欧州のグループを中心に、惑星間を移動する際に微生物が生存可能かということを試す実験が、主に地球低軌道(国際宇宙ステーションが周回する400 km上空)で行われてきた[8]。微生物の宇宙空間での生存は、真空、電離放射線、紫外線、温度等の環境因子により影響を受けることが予想される。これらの個々の環境因子の影響は地上での実験によって調べることができるが[9]、その環境因子の正確な模擬は困難であり、またこれらの環境因子が総合的に作用している可能性もある。そこで、これらの環境因子の総合的影響を調べる為に宇宙での曝露実験が行われている[8]。

これまでに実施された宇宙環境での微生物曝露実験に関しては、Cottin ら(2017) [8]が1965年以降の実験をまとめている。1965年以降、多数の微生物宇宙環境曝露実験が行われているが、表2には2008年以降の実験を抜粋した。欧州およびロシアのグループは、主に国際宇宙ステーションの船外で曝

露実験を行ってきた。これらの宇宙環境曝露実験では極めて広範な生物種の曝露が行なわれ、生物生存や細胞に与える宇宙環境の影響が検討されてきた。

その結果、微生物は紫外線が当たる環境では死滅するが、紫外線から遮蔽されると長期間生存可能であるという実験結果が得られた。そこから、微生物が岩石中で紫外線から保護されて移動したのではないかという、リソパンスペルミア説が提唱された[8]。リソは岩を意味している。一方我々は、微生物が塊、バイオフィーム(微生物が固相表面に形成する細胞の集合体)、で存在すれば、紫外線が当たる環境でも長期間生存できるのではないかと考え、マサパンスペルミア説を提案した。マサは塊を意味している[9]。

### 3.2 たんぼぼ計画の科学目標

たんぼぼ計画では、生命の惑星間移動仮説である「パンスペルミア仮説」の検証と化学進化の検証を行った[6,10]。化学進化とは、生命の起源以前における有機化合物合成と蓄積に関する研究分野である。生命が誕生する前に宇宙由来の有機化合物が地表に蓄積した可能性がある。しかし、地球に到達する隕石の量はそれほど多くなく、どのような方法で、宇宙由来有機化合物が地表に到着したかは不明である。一方、現在でも1 mm以下の微小隕石は年間数万トン地上に到達している。微小隕石中にもアミノ酸等の有機化合物が含まれている可能性があり、それを確認するのが、たんぼぼ計画のもう一つの目標である[10]。その他、宇宙開発利用の発展に繋がる先端的技術開発も含めて、以下の6つの項目を宇宙実験の目標とした[10]。それらは、1)大気圏外での微生物密度上限の推定、2)微生物の大気圏外生存実験、3)有機化合物の変性実験、4)微小隕石の採集とその分析、5)高性能エアロゲルの実証、6)微小デブリフラックス量の評価、である。

これらの課題を達成するために、「有機物・微生物の宇宙曝露と宇宙塵・微生物の捕集(たんぼぼ)」通称たんぼぼ計画が国際宇宙ステーション日本実験棟・船外曝露部で実施された[11]。たんぼぼ計画では2種類の実験装置が用いられた。一つは曝露パネルで(図3)、曝露パネルを構成する曝露ユニットの試料板に微生物あるいは有機化合物試料を充填して、宇宙環境に曝露した。もう一つは、捕集パネルで(図



表2: 2008年以降に実施された生物宇宙曝露実験. Cottinら (2017) [8] からの抜粋に追加記載.

Year	Facility	Mission	Test organism	Duration of exposure	Space parameters studied	Phenomena studied
2008-2009	ISS-Columbus-EuTeF	EXPOSE-E	<i>B. subtilis</i> 168 spores, <i>B. pumilus</i> spores, <i>Halococcus dombrowskii</i> , <i>Anabaena cylindrica</i> , Antarctic cryptoendolithic communities, <i>Cryomyces antarcticus</i> , <i>Cryomyces minteri</i> , <i>Rhizocarpon geographicum</i> , <i>Xanthoria elegans</i>	1.5 yr	Space vacuum, solar UV (> 110 nm), simulated Martian atmosphere and UV climate (> 200 nm)	Survival, protection, DNA photoproducts, gene activation
2009-2011	ISS-Zvezda-URM-D	EXPOSE-R	<i>Bacteriophage T7</i> , <i>B. subtilis</i> 168 spores, <i>B. pumilus</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>Halorubrum chaoviatoris</i> , <i>Chroococcidiopsis</i> , <i>Synechococcus</i> (Nägeli), <i>Penicillium italicum</i> , <i>Penicillium expansum</i> , <i>Trichoderma koningii</i> , <i>A. sydowii</i> , <i>A. versicolor</i> , <i>Geomyces pannorum</i> , <i>Trichoderma koningii</i> , <i>B. subtilis</i> 168, <i>B. subtilis</i> WN1087 (radiation-sensitized mutant)	2 yr	Space vacuum, solar UV (> 110, > 200 nm)	Survival, protection, DNA photoproducts, gene activation
2010-2011	O'REOS Nanosat 650 km	SESLO		6 mon	Trapped radiation (inner Van Allen belt) + GCR (high-inclination LEO)	Survival; metabolic & population, growth rates in space
2014-2016	ISS-Zvezda-URM-D	EXPOSE-R2	<i>Chroococcidiopsis</i> sp. 029; <i>Chroococcidiopsis</i> sp. 064; <i>Chroococcidiopsis</i> sp. 057; <i>Gloeocapsa</i> OU 20; <i>Cryomyces antarcticus</i> CCFEE 515; <i>Sphaerocystis</i> sp. CCCryo 101-99; <i>Nostoc</i> sp. CCryo 231-06; <i>Circinaria gyrosa</i> ; <i>Buelia frigida</i> ; <i>Grimmia sessiana</i> De Not.; <i>Marchantia polymorpha</i> L.; <i>D. geothermalis</i> ; <i>D. radiodurans</i> ; <i>B. horneckiae</i> ; <i>B. pumilus</i> ; <i>B. licheniformis</i> ; <i>Halomonas muralis</i> ; <i>Halococcus morrhuae</i> ; <i>A. versicolor</i> ; <i>A. sydowii</i> ; <i>Penicillium expansum</i> ; <i>Methanosarcina soligelidi</i> SMA-21; Kombucha consisting of <i>Gluconacetobacter xylinus</i> , <i>Gluconobacter oxydans</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>Zygosaccharomyces bailii</i> , <i>Dekkera bruxellensis</i> ; <i>Ulocladium botrytis</i> ; <i>Misuna</i> ; <i>Zingiber biebersteiniana</i> ; <i>Brachypodium distachyon</i> ; <i>Hordeum vulgare</i> ; <i>Polypedilum vanderplanki</i> larvae; <i>Thriops cancriformis</i> eggs; Biofilm formed from <i>D. radiodurans</i> , <i>Leptothrix</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Hyphomonas</i> sp., <i>Tetrasphaera</i> sp.; <i>Pedomicrobium</i> sp. Pigments: chlorophyll a, $\beta$ -carotin, tetrahydroxyl; naringin; quercetin; melanin; parietin; cellulose; chitin	1.5 yr	Space vacuum, solar UV (> 110 nm), simulated Martian atmosphere and UV climate (> 200 nm)	Survival, resistance by biofilm formation, protection by Martian regolith, DNA photoproducts, gene activation
2015-2018	ExHAM, ISS-Kibo	Tanpopo	<i>D. radiodurans</i> R1, <i>D. aerius</i> , <i>D. aetherius</i> , <i>D. radiodurans</i> KH311, <i>D. radiodurans</i> UVS78, <i>D. radiodurans</i> rec30, <i>Nostoc</i> sp. HK-01, <i>Schizosaccharomyces pombe</i> JY3.	1, 2, 3 yr	Space vacuum, solar UV (> 110 nm or 170 nm), cosmic radiation, temperature changes	Survival, DNA damages, chemical analysis
2019-2021	ExHAM, ISS-Kibo	Tanpopo-2	<i>Nostoc</i> sp. HK-01	14 mon	Space vacuum, solar UV (> 110 nm, 170 nm, w/o UVC), cosmic radiation, temperature changes	Survival, DNA damages, transcript analysis, chemical analysis
2020-2022	ExHAM, ISS-Kibo	Tanpopo-3	<i>D. radiodurans</i> , <i>Nostoc</i> sp. HK-01, <i>Physomitrella patens</i> , <i>Cerasus</i> sp., <i>Oryza sativa</i>	14 mon	Space vacuum, solar UV (> 110 nm, 170 nm), cosmic radiation, temperature changes	Survival, DNA damages, transcript analysis, chemical analysis
2022-2023	ExHAM, ISS-Kibo	Tanpopo-4	<i>Nostoc</i> sp. HK-01, <i>Physomitrella patens</i> , <i>Metallosphaera sedula</i>	9 mon	Space vacuum, solar UV (> 110 nm, w/o UVC), cosmic radiation, temperature changes	Survival, DNA damages, transcript analysis, chemical analysis
2023-2023	ExHAM, ISS-Kibo	Tanpopo-5	<i>D. radiodurans</i> , <i>Physomitrella patens</i>	2 mon	Space vacuum, solar UV (> 110 nm, w/o UVC), cosmic radiation, temperature changes	Survival, DNA damages, transcript analysis, chemical analysis

Abbreviations of genera: A.: *Aspergillus*, B.: *Bacillus*, D.: *Deinococcus*.

4) エアロゲルという超低密度のアモルファス・シリカゲルを、前面に開放部をもうけたアルミケースに収納した。エアロゲルは、中心部を0.01 g/cm<sup>3</sup>という超低密度のエアロゲルとして、それを0.03 g/cm<sup>3</sup>の比較的強度の高いエアロゲルで取り囲んだ構造のものを開発した[11]。捕集パネルを宇宙曝露することで、高速衝突微粒子の捕集が行われた。

たんぼぼ計画に使用した実験装置は、2015年4月14日、米国のスペースX社のロケットで打ち上げられた。同年の5月26日から、国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟・船外曝露部で実験装置の宇宙空間曝露が開始された[11]。2016年以降3年間、宇宙曝露した曝露パネルと捕集パネルが毎年地上に持ち帰られ、2018年にすべての実験装置が帰還した(図5)。地上に帰還した曝露微生物とエアロゲルはそれぞれ、分析担当者に配分され分析されつつある。

### 3.3 地球低軌道の環境

地球低軌道の環境因子を表3にまとめた[12,13]。紫外線量は、曝露ユニットをアラニン紫外線量計として用いて測定した。紫外線量は窓材によっ

て少し異なるが、114~177 (MJ/m<sup>2</sup>/year)であった。ISSは約90分で地球を周回しており、その太陽β角(ISS地球周回軌道面の太陽方向との角度)も-75度~75度の間で周期的に変動する。さらに曝露パネルがISS船体の陰になる場合もある。そこで、微生物試料が宇宙曝露中に受けた紫外線量を、太陽からの距離が地球と同程度の惑星間空間に微生物塊がある場合の紫外線量に換算すると、1年間に受ける紫外線量は惑星間空間で受ける紫外線量41~58日分に相当した[12]。放射線量は232 ± 5 mGy/yearで、地上の値に比べれば200倍以上であった。しかし、実験に用いた放射線耐性菌*D. radiodurans*のD<sub>10</sub>値(生存率が10%になる放射線量)は6.7 kGy(Yang et al. 2010)なので、この放射線耐性菌の生存への放射線による影響はない。温度に関しても、一般に低温は微生物の生存にほとんど影響しない。高温も35℃では*D. radiodurans*の生存に影響しない[13]。

### 3.4 微生物の宇宙空間曝露実験結果

微生物試料として、放射性耐性菌*D. radiodurans*,

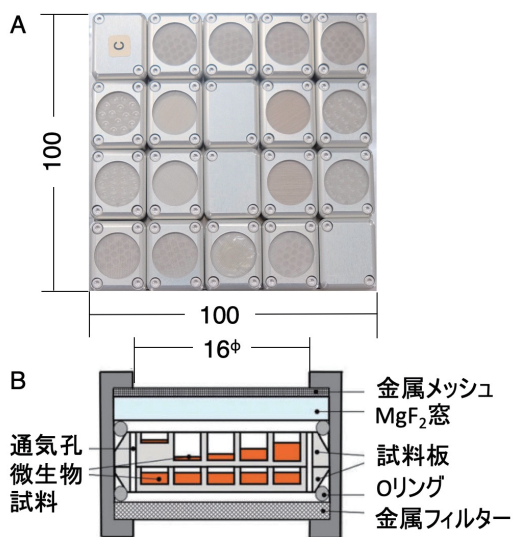


図3: 曝露パネル(A)と曝露パネルを構成する曝露ユニットの断面(B) [11]. 曝露パネル(100 mm × 100 mm × 20 mm)は曝露ユニット20個で構成されている。それぞれの曝露ユニットの断面をBに示した。金属メッシュ下の窓材の下に試料板が置かれた。試料板にあけた穴には微生物試料あるいは有機化合物試料を充填した。試料板は2枚あり、下の試料板には紫外線があたらない暗所対照標品を入れた。試料は裏側の金属フィルター、通気口を通して外部の真空と連絡している。曝露パネル(A)の窓のないユニットには放射線測定素子を入れた。

シアロバクテリア、酵母が宇宙空間曝露に使用された [10]. *D. radiodurans* を3年間曝露した後の生存率を図6に図示した [13]. *D. radiodurans* の 0.5 mm 以上の厚さがある細胞塊を地上保管した場合には、3年後に10%前後の生存率が得られた。それと比較して、宇宙空間で紫外線照射された場合には、細胞塊の厚みが0.1 mm以下で顕著に生存率が低下したが、0.5 mm以上の厚さがある場合には、地上対照と同程度の生存率を示した。*D. radiodurans* の0.5 mm厚以上の細胞塊は紫外線照射下3年間の宇宙空間曝露に耐えることがわかった。

厚さ0.5 mmの*D. radiodurans*細胞塊の3年間の生存率変化を図7に図示した [13]. ISSの室内保管室に保管した標品は顕著な生存率の低下を示したが、これは表3に見られるようにISS室内の湿度が要因とおもわれる [13]. 地上対照標品はデシケーターに保存したのに対し、ISS保管標品は密閉プラスチック袋に乾燥剤とともに保管した。ISS保管室

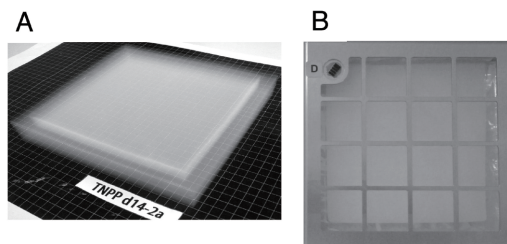


図4: エアロゲル(A:写真提供、千葉大学田端誠)とエアロゲルを収めた捕集パネル(B:100 mm × 100 mm × 20 mm) [11]. エアロゲルは内側が0.01 g/cm<sup>3</sup>でその周りを0.03 g/cm<sup>3</sup>のエアロゲルで取り囲んで補強した。

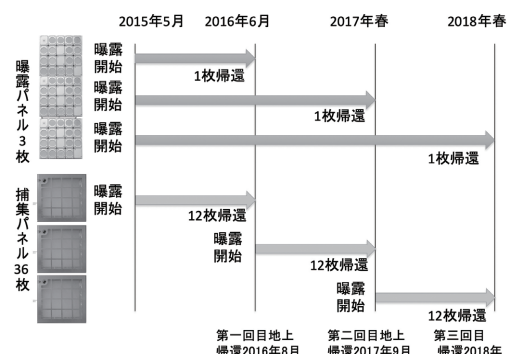


図5: たんぼば計画実験装置の運用 [11]. 曝露パネル3枚と捕集パネル36枚が同時に打ち上げられ、国際宇宙ステーション (ISS) 予圧部保管庫に保管された。曝露パネル3枚はISS曝露部の同じ場所で曝露が開始された。その内の1枚は1年間宇宙曝露した後に取り外され地上に帰還した。残りの2枚はそれぞれ、2年後、3年後に取り外され地上に帰還した。捕集パネルの内の12枚が曝露され、1年後に取り外されて地上に帰還した。次の12枚が1年間曝露されたのち地上に帰還した。最後の12枚が1年間曝露されたのち地上に帰還した。実際の運用は、他の計画との関連で、多少変更された。

での長期保存中に乾燥剤の機能が失われた可能性が高い。湿度が高い場合には、微生物は酸素の影響を受けてその生存率は低下する。

それ以外の条件に試料を置いた場合、すなわち宇宙空間暗所に置いた場合、宇宙空間明所に置いた場合、地上保管した場合、生存率の低下速度は相互に似た値を示した。それぞれの、細胞塊の実験開始時の細胞数と、生存率の低下速度から、細胞数が1以下になる時間、すなわち生存時間を推定した [13] (表4)。ただし、地球を周回する間にISSは太陽からの陰になる。またISS船体によって曝露パネルが

表3. たんぽぼ宇宙曝露実験3年間の環境因子[12, 13].

Experimental place	Wavelength range (nm) /window type	UV fluence <sup>*a</sup> (MJ/m <sup>2</sup> /year)	Ionizing radiation (mGy/year) <sup>*b</sup>	Temperature range (°C) <sup>*c</sup>	Pressure range (Pa) <sup>*d</sup>	Humidity (%)
Space						
Upper plate <sup>*c</sup>	110–400/ MgF <sub>2</sub>	124 – 177	232 ± 5	29 ± 5 ~ -42 ± 5	10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>-7</sup>	–
Upper plate <sup>*c</sup>	170–400/ SiO <sub>2</sub>	114 – 163	232 ± 5	29 ± 5 ~ -42 ± 5	10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>-7</sup>	–
Dark control in space						
Lower plate <sup>*f</sup>		–	232 ± 5	29 ± 5 ~ -42 ± 5	10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>-7</sup>	–
ISS pressurized area		–	83 ± 1	19~25	10 <sup>5</sup>	45~55
Ground control <sup>*g</sup>		–	1	20	10 <sup>5</sup>	5~15

\*a: UV fluence was calculated using the data from the alanine UV dosimeter [12].

\*b: Ionizing radiation was measured with the dosimeters [12].

\*c: Maximum and minimum temperatures were measured as in the reference [12].

\*d: Outside pressure estimated in Rabbow et al. (2015) [12].

\*e: Sample plates were set on the upper side of the exposure unit; the plates were irradiated with solar UV.

\*f: Sample plates were set under the upper plates; UV was completely blocked by the upper plates.

\*g: The ground control was stored in a desiccator in an incubator at Tokyo University of Pharmacy and Life Sciences.

太陽からの陰になる場合もある。微粒子が惑星間空間にある場合に比べると、曝露パネルの紫外線照射量は41~58日/年と推定された[12]。これを補正すると、*D. radiodurans*の細胞塊は、惑星間空間の紫外線があたる環境で2~8年間、紫外線があたらない環境では48年間生存できると推定された[13](表4)。

火星と地球の間を移動するのにかかる時間は軌道によって変わる、ランダムに地球を飛び出した場合には、平均すると火星に衝突するまでに数千万年かかる。しかし、丁度良い時期に丁度良い方向に地球を飛び出した物体は1年前後で火星に到着する。逆の方向の移動も同様である。したがって、火星と地球の間を最短距離で移動した微生物は、宇宙空間で移動中に生存できると推定された[13]。

### 3.5 シアノバクテリアの宇宙空間曝露実験結果

シアノバクテリアは独立栄養光合成生物である。したがって、仮に惑星間移動ができて、増殖可能な場所に着地できた場合に、シアノバクテリアは独立で増殖可能である。また、例えば火星でテラフォーミングを行うために、独立栄養光合成生物を土壌改良に利用できるかもしれない[14]。

シアノバクテリアの中にはアキネートと呼ばれる環境耐性細胞を形成する種がある。そこで、シアノバク

テリアにアキネートを形成させて、そのバイオフィルムを乾燥させた試料を宇宙空間に曝露した。シアノバクテリアの乾燥バイオフィルムの宇宙空間曝露実験は*D. radiodurans*と同様の方法で実施された。その結果、暗所に置かれたシアノバクテリアの乾燥バイオフィルムは3年間宇宙空間曝露後に30%前後の生存率があった。また、宇宙空間明所に置かれたシアノバクテリアも、ある程度のバイオフィルムの厚さがある場合に、3年間生存できることが明らかとなった[14]。

### 3.6 有機化合物の宇宙空間曝露実験結果

有機化合物は隕石や微小隕石中に含まれている可能性がある。しかし微小隕石中では、惑星間を移動する間に有機化合物が変成してしまう可能性がある。そこでその可能性を確かめるため、アミノ酸グリシン、アミノ酸の前駆体化合物ヒダントイン(加水分解によってグリシンを生じる)、隕石中複雑有機化合物の模擬物質(CAW:一酸化炭素とアンモニア、水の存在下で放射線を照射して得られた複雑有機化合物)の宇宙空間曝露実験が行われた[15]。

曝露実験には、微生物と同様の装置が用いられた。曝露実験の結果、ISS船内に置いた場合には、これらの有機化合物は3年間でほとんど変成しなかった(図8)。一方、宇宙空間で暗所に置いた場合に

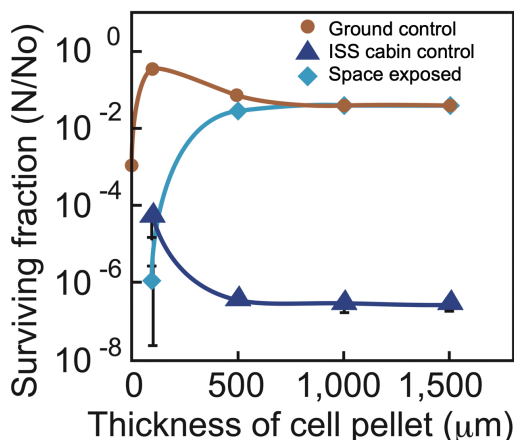


図6: たんぼぼ計画で放射線耐性菌*D. radiodurans*を厚さの異なる細胞塊として、3年間置いた後の生存率[13]。地上対照(Ground control)は、試料を実験室デシケーター中に保管した。船内対照(ISS cabin control)は、乾燥剤とともに密閉プラスチック袋に収納しISS保管庫に保管した。宇宙曝露標品はSiO<sub>2</sub>の窓材の下で宇宙真空下に置かれた。生存率は、試料調製直後の生存細胞数との比較。

は、グリシンとヒダントインはそれぞれ90%あるいは数%にまで減少した。また宇宙空間で紫外線があたる環境に置いた場合、グリシンとヒダントインは1%以下に減少した。しかし、複雑有機化合物CAWは、暗所で90%、紫外線のあたる環境でも10%程度残存した[15]。隕石中および微小隕石中で、アミノ酸は複雑有機化合物に類似の分子形態で存在していると推定されている。アミノ酸が複雑有機化合物の状態である事が、宇宙空間を移動する際にアミノ酸が保存されることに寄与するかもしれない[15]。

これまで地球周回低軌道で行われた宇宙化学実験を表5にまとめた。これまでの実験では曝露期間は1回だけなので、変成の時間変化を追うことができなかった。グリシンでは、紫外線が当たる環境で2年目以降に変成が加速する傾向が見えている。

### 3.7 捕集パネル・アルミニウム枠の衝突痕解析

帰還した捕集パネルのアルミニウム枠に、高速衝突粒子による衝突痕が検出された。この衝突痕の解析が行われた[10]。ISS進行方向面および宇宙面に曝露した捕集パネルの、アルミニウム枠にできた直径50 μm以上の衝突痕の数と直径、深さを計測した。衝突痕の直径と深さから、衝突エネルギーを割

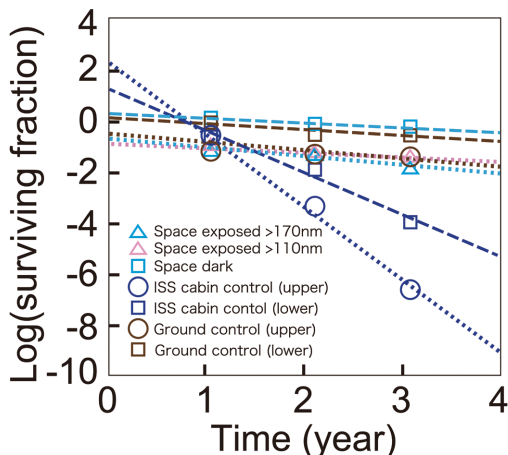


図7: たんぼぼ計画で宇宙曝露した放射線耐性菌*D. radiodurans* 0.5 mm細胞塊の生存率の時間経過[13]。宇宙曝露標品は、SiO<sub>2</sub>あるいはMgF<sub>2</sub>の窓材の下で(窓材によってそれぞれ波長170nm以上あるいは110nm以上の紫外線を透過する)あるいは暗所で宇宙真空下に置かれた(Space dark)。船内対照(ISS cabin control)は、乾燥剤とともに密閉プラスチック袋に収納しISS保管庫に保管した。地上対照(Ground control)は、試料を実験室デシケーター中に保管した。生存率は、試料調製直後の生存細胞数との比較。

り出し、その頻度を図示した(図9)。これまでに行われた類似の解析から得られている微粒子のエネルギー分布モデルと比較すると、ISS進行方向面と宇宙面の両方で、頻度分布が誤差の範囲でエネルギー分布モデルと一致した。このエネルギーの範囲での微小デブリ密度の変動はあまりないことが明らかとなった[10]。

### 3.8 捕集パネル・エアロゲルの衝突痕解析

帰還した捕集パネルから、36枚のエアロゲルを取り出し、透明プラスチック製の容器に移し替えた。エアロゲル表面を目視で確認したところ、何枚かのエアロゲルに部分的に割れている場所が認められた。しかし、それらを含めてすべてのエアロゲルが、高速衝突微粒子の解析に十分な健全さで帰還した[10]。

個々のエアロゲルの正面全面を顕微鏡で撮像し、0.1 mm以上の傷や粒子を識別した。次いで、これらの傷や粒子の顕微鏡撮像を複数の焦点深度で行い、疑似立体画像を取得した。この疑似立体画像を精査することで、300カ所以上の超高速衝突痕を検出した[10]。それらの衝突痕に粒子が有るか無い



表4.D. *radiodurans*の細胞塊が宇宙空間で生存できる時間[13].

曝露条件	厚さ(μm)	生存時間*(年)	惑星間空間での生存時間**(年)
MgF <sub>2</sub>	500	35.6 ± 0.5	4.3 – 6.1
	1000	43.4 ± 0.2	5.2 – 7.5
	1500	45.3 ± 0.5	5.5 – 7.8
SiO <sub>2</sub>	500	14.8 ± 0.5	1.8 – 2.6
	1000	24.6 ± 0.7	3.0 – 4.2
	1500	30.8 ± 0.7	3.7 – 5.3
Dark	1000	48.1 ± 0.1	48.1 ± 0.1

## Note.

\*:細胞塊の細胞数と, 死亡率の低下速度から, 細胞数が1以下になる時間.

\*\* :曝露実験で微生物が照射される紫外線量は, 惑星空間に比べると遮蔽の関係で41~58 日/年に相当する. これを補正した値が一番右の欄に記載してある.

表5. 地球周回低軌道で行われた宇宙化学実験. Cottinら (2017) [8]に補足.

Experiment	Support	Launch/return	Exposure	Interest for
ERA	EURECA	1992–1993	12 mon	Interstellar medium, comets
DUST 1	Biopan 1 (FOTON capsule)	Jun 14–Jul 2 1994	12 d	Meteorites
DUST 2	Biopan 2 (FOTON capsule)	Oct 8–Oct 23 1997	10 d	Meteorites
PERSEUS	MIR space station	Apr 16–Jul 23 1999	97 d	Meteorites
Exobiology				
ORGANICS	Biopan 5 (FOTON capsule)	May 31 2005–Jun 16 2005	15.8 d	Interstellar medium
UVolution	Biopan 6 (FOTON capsule)	Sep 14 2007–Sep 26 2007	12 d	Comets, Titan, Mars
ESS	EXPOSE-E on the ISS	Feb 2008–Aug 2009	18 mon	Comets, Titan, Mars, meteorites
AMINO	EXPOSE-R on the ISS	Mar 2009–Mar 2011	24 mon	Comets, Titan, meteorites
ORGANIC	EXPOSE-R on the ISS	Mar 2009–Mar 2011	24 mon	Interstellar medium
PSS	EXPOSE-R2 on the ISS	Oct 2014–Feb 2016	16 mon	Comets, Titan, Mars, meteorites, interstellar medium, biochips
Tanpopo (sub-theme 3)	ExHAM-1&2, Kibo on the ISS	Apr 15 2015–2016, 2017, 2018	1, 2, 3 yr	Micrometeoroids, interstellar medium
Tanpopo-2	ExHAM-1, Kibo on the ISS	Jul 2019–Jan 2021	14 mon	Micrometeoroids interstellar medium
Tanpopo-4	ExBAS-1, Kibo on the ISS	Feb 2022–Jan 2023	9 mon	Micrometeoroids interstellar medium
Tanpopo-5	ExBAS-1, Kibo on the ISS	Mar 2023–Jul 2023	2 mon	Micrometeoroids interstellar medium

か, 粒子の大きさの計測をおこなった. 衝突痕のシンクロトロン放射X線を用いた三次元立体構造解析を行った. 粒子は切り出して, 鉱物, 有機化合物, 微生物の分析を行っている.

### 3.9 地球低軌道での微生物・有機化合物実験(たんぼぼ計画)のまとめ

国際宇宙ステーションでの微生物と有機化合物の曝露実験(たんぼぼ計画)が行われた. 1) 大気圏外での微生物密度上限の推定に関しては, 解析を現在継続中である. 2) 微生物の大気圏外生存実

験に関して, 放射線耐性菌 *D. radiodurans* の細胞塊(厚さ0.5 mm以上)は3年間生存した. 3年間の生存率を外挿することから, 太陽紫外線のあたる環境で2~8年間, あたらない環境では48年間, *D. radiodurans* の細胞塊(厚さ0.5 mm以上)が宇宙空間で生存できると推定された. シアノバクテリアのバイオフィルムが宇宙空間で3年間生存した. 欧州のグループがこれまでに実施した微生物の宇宙空間曝露実験では, 紫外線があたらない環境でのみ微生物が生存し, リソパンスペルミア仮説が提唱されてきた. たんぼぼ計画では紫外線が当たる環境でも微

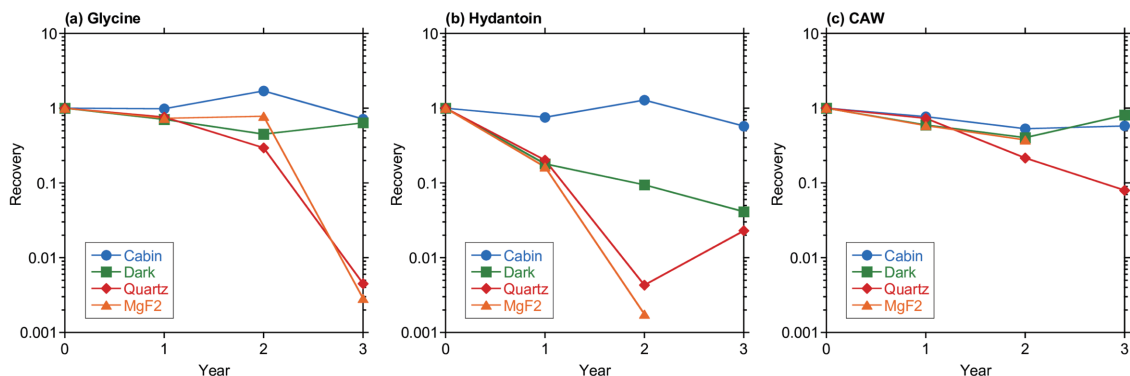


図8: たんぼ計画で宇宙曝露した有機化合物試料残存率の3年間の変化。ISS船内に保管した標品(●), 宇宙暗所(■), 石英窓(◆), MgF<sub>2</sub>窓(▲)で宇宙曝露した標品の残存率[15]。CAWは一酸化炭素とアンモニア、水の存在下で放射線を照射して得られた複雑有機化合物。

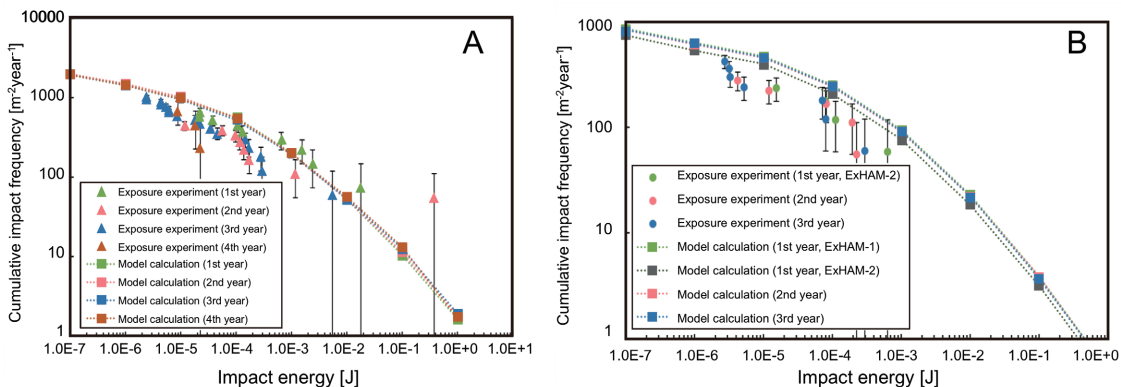


図9: たんぼ計画の捕集パネルアルミニウム枠にできた衝突痕の測定から得られた、衝突粒子頻度の衝突エネルギー依存性[10]。A: 進行方向面。B: 宇宙面。これまでにに行われた類似の実験から得られている微粒子速度分布モデルからの推定値を■と点線で、たんぼ計画の捕集パネルの解析から得られた微粒子エネルギー分布を▲, Bは●で示す。

生物細胞塊が数年間生存できることが明らかになった。この結果はマサパンスベルミア仮説を支持している。3) 有機化合物の変性実験に関して、宇宙空間での有機化合物曝露実験では、アミノ酸やその前駆体に比べて、複雑有機化合物の宇宙環境耐性が高いことが確認された。複雑有機化合物の宇宙環境耐性が、宇宙空間でのアミノ酸の長期安定性に寄与している可能性がある。4) 微小隕石の採集とその分析に関して、エアロゲルの分析から、0.1 mm以上の超高速衝突痕が300カ所以上見つかった。これらの衝突痕とそこに含まれる粒子の分析が行われている。5) 新たに開発した超低密度エアロゲルを用いて、超高速衝突微粒子の捕集が宇宙で実証され

た。6) 微小デブリフラックス量に関して、捕集パネルのアルミニウム枠に形成された高速衝突微粒子の頻度解析が行われた。以前行われた実験から得られているモデルと比べて、宇宙空間微粒子頻度の変動は少ないと推定された。

## 4. 火星での生命探査

### 4.1 火星に関するあらたな認識

火星は太陽系で最も地球に似た惑星である。一方で、火星の平均表面温度は- 50℃ ~ - 60℃、表層大気圧は地球の0.6 ~ 0.8%と低く、火星での生

命の増殖は困難と考えられてきた。しかし、極限環境微生物学の研究結果と火星探査による火星に関する知識の増加から、その認識は大きく変わってきている[16,17]。

火星探査によって、火星の情報は増えている[16-18]。過去の火星に液体の水と海があった証拠が複数見つかっている。火星表面には、水が流れた跡だと思われる地形や岩石、水が存在で形成される粘土鉱物などが見つかっている。初期火星には大気も海洋も存在した可能性があり[19]、地磁気も火山活動もあった。したがって、初期火星は当時の地球と似た環境だった[16, 20, 21]。

現在の火星表面にも地球の極限環境生物であれば生存可能な場所があると考えられるようになってきている[17, 18, 20]。火星の地下に、大量の水があることが周回衛星等の地下探査から明らかにされている。また、周回機からのレーダー探査によって、火星南極域地下に液体の水の存在を示唆する反射が報告された[22]。

なお火星の環境に関して、COSPAR(Committee on Space Research, 宇宙空間研究委員会)の惑星保護方針(Planetary Protection Policy)に関わる検討委員会MEPAG (Mars Exploration Program Analysis Group)が広範な情報をまとめている[17]。また米国ではCoPP(Committee on Planetary Protection:米国アカデミーの惑星保護委員会)が2020年に設立され、火星の環境に関して報告した[18]。本節ではこれらの報告も参考にしている。なお、惑星保護に関しては本章の最後に解説する。

### (1) 現在の火星表面環境

表6は火星表面の環境因子と地球生物の増殖限界および生存限界をまとめたものである[17, 18, 20]。火星の平均表面温度は低温(− 50℃ ~ − 60℃)であるが、高温時には地球生物が充分増殖可能な温度となる。火星大気圧で増殖可能な微生物が地球で発見されている[17, 20]。土壌pHも中性の場所がある。Viking 探査機着陸地点のレゴリスはpH 7.2 ± 0.1 [24]、Phenix 探査機着陸地点のレゴリスはpH7.7 ± 0.3 [25]、Gale Crater内Yellowknife Bay 泥岩のpHは中性付近とそれぞれ推定されている[26]。放射線は地球微生物に充分耐えられる強度

である。レゴリス中の過塩素酸の存在が知られているが、地球生物で過塩素酸耐性および、過塩素酸を呼吸基質として利用する生物が知られている[17]。紫外線強度は大変つよく、直接浴びると生存できる地球微生物はいないが、紫外線は厚さ1 mm以下のレゴリスで充分遮蔽される[17, 18]。したがって、火星表面の個々の環境因子をとって見た場合には、地球微生物が増殖可能な環境がある [17, 18]。

### (2) 化学合成菌のエネルギー源

NASAの探査車MSL(Mars Science Laboratory; 通称Curiosity)は、ゲール・クレーター内を移動しながら様々な分析を続けている。火星レゴリスを加熱すると、水蒸気の他に、二酸化硫黄や硫化水素が放出されることから、レゴリス中の硫化鉱物の存在が示唆されている[27]。Curiosityは大気中のメタン濃度を測定した。探査初期の測定結果は大気中にメタンがほとんど含まれないという結果であったが、探査期間のうちのある期間にメタンが10 ppb近く検出された[28]。この結果から、近くにメタンが噴出する場所があることが推定されている。

こうした、硫化鉱物やメタンは化学合成菌のエネルギー源となりうる化学物質である[17, 21, 23]。生物はその増殖と細胞の維持にエネルギー源を必要とする。好気性従属栄養生物は有機化合物を摂取して、酸素との反応でエネルギーを得ている。化学合成菌は、有機化合物に頼らず、無機化合物や小さい有機分子(メタンなど)の反応でエネルギーを入手できる細菌および古細菌である[1]。なお、細菌と古細菌の両方を意味する場合には菌と呼んでいる。

表7は火星表面あるいは大気中で検出されている分子種あるいは火星表面付近での存在可能性がある分子種の中で、化学合成菌がエネルギー源として利用可能な分子の組み合わせである。水素は、大気中には検出されていないが、メタンが発生する際に水素が関与している可能性がある。還元型の分子、メタンや二価鉄、無機イオウ等は、様々な酸化物質(電子受容体)との組み合わせで、種々の化学合成菌のエネルギー源となり得る[17, 21, 23]。すなわち、火星表面に様々な化学合成菌のエネルギー源となりうる化合物の組み合わせが見つかっている。

表6. 地球生物の増殖・生存限界と火星の表面環境[17, 18, 23].

注\*: 報告された3カ所のpH推定値の範囲. 本文参照.

環境因子	地球生物増殖・生存限界	火星表面環境
表面温度	- 18°C ~ 122°C (増殖) - 33°C ~ 122°C (代謝) - 196°C ~ 122°C (生存)	- 130°C ~ 20°C
大気圧	700 Pa ~ (増殖) 上限は不明	600 ~ 800 Pa (6/1000 ~ 8/1000 気圧)
水活量	a = 0.6 ~ 1.0 (増殖) a = 0.0 ~ 1.0 (生存)	氷/液体? 0.0 ~ 1.0
pH	- 0.06 ~ 12.5 (増殖)	7 ~ 8*
紫外線	2,000 J m <sup>-2</sup> (生存)	20 J m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
放射線	5,000 Gy (生存)	0.225 mGy day <sup>-1</sup>
酸化還元状態	不明	強酸化的 (過塩素酸塩)

表7. 火星表面で増殖可能な化学合成菌[17, 21, 23].

電子供与体	電子受容体	化学合成菌
(H <sub>2</sub> )	CO <sub>2</sub>	メタン菌
(H <sub>2</sub> )	ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Fe(OH) <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , etc	水素酸化菌
CH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , MnO <sub>2</sub> , Fe(OH) <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , etc	メタン酸化菌
Fe(II)-sulfides	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , MnO <sub>2</sub> , etc	鉄酸化菌
S <sup>0</sup>	ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , MnO <sub>2</sub> , etc	硫黄酸化菌

### (3) 火星の有機化合物

Curiosityは火星ゲール・クレーター中の各所で表面試料を採集して、加熱で発生するガスの分析を行った。カンバーランドという場所で採集した堆積岩の試料から、クロロベンゼンが検出された[29]。加熱により堆積岩粉末中の過塩素酸が有機化合物と反応してクロロベンゼンが放出されたものと推定される。有機化合物が、宇宙より飛来したものなのか、生命と関連するものなのか、有機化合物の由来は不明であるが、いずれにせよ火星泥岩中に有機化合物が存在したと推定されている[29]。

## 4.2 生命探査手法について

### (1) 火星での生物関連成分の検出と方法

Enyaらは、生命探査の対象となる生物の性質や分子とその分析方法をまとめた[30]。それらは、培養による増殖の検出、細胞形態を観察する方法、有機化合物一般の検出、タンパク質、アミノ酸、核酸、DNA、ATP(アデノシン三リン酸:生体内でのエネルギー移動を媒介する分子)、酵素反応等の検出であ

る(表8)。

表8に取り上げた性質や成分は、いずれも地球生物が必ず持っている性質や成分である。また、これらのうちのいくつかは生物特有で、生物以外が持つ可能性はない。たとえば、タンパク質と酵素はアミノ酸重合体が立体構造を形成したものであるが[1]、これはダーウィン進化の結果として誕生した。したがって、生物以外がタンパク質あるいは酵素を持つ可能性はない[2]。また、DNAが非生物的に存在する例や非生物的な合成は報告されていない[2]。したがってタンパク質やDNAが検出された場合には、それが生物である可能性が高い[30]。

一方、これらの成分は地球生物では普遍的であるが、地球外生物が核酸やDNA、タンパク質を用いるという保証はないので、これらを指標にすると生物を見落とす(偽陰性)可能性がある[30]。また、培養を行う場合や、酵素活性を検出する場合、培養条件や測定条件が適切でなければ検出されないため、偽陰性の可能性がある[30]。反対に、有機化合物、アミノ酸、触媒活性などは非生物的にも存在するの



表8. 探査の対象となる生物の性質や成分とその特徴. Enya et al. [30]を参考に作製.

注

\*:+++ 必ず持っている. ++ 高い確率で持っている. + 持っている可能性がある.

\*\*\*: DL分析とは、分子の鏡像異性体を分析すること. ここではアミノ酸のD体とL体を分析する.

探査対象となる性質や成分	地球外生物が持っている蓋然性*	主な問題点	擬陽性、偽陰性の理由	その性質を持っていた場合に地球生物と判別する方法
増殖能	+++	偽陰性	未知の微生物の培養は地球生物でも困難	成分の詳細分析
細胞形状	+++	偽陰性 偽陽性	形状では判定できない場合もある	成分の詳細分析
有機化合物	++	偽陽性	隕石有機化合物との識別が必要	成分の詳細分析
タンパク質	++	偽陰性	持たない可能性あり	アミノ酸種分析, DL分析**
アミノ酸	++	偽陽性	隕石アミノ酸との識別が必要	アミノ酸種分析, DL分析**
核酸	+	偽陰性	持たない可能性あり	核酸種分析, 配列解析
DNA	+	偽陰性	持たない可能性あり	核酸種分析, 配列解析
酵素	++	偽陰性	持たない可能性あり	アミノ酸種分析, DL分析**
触媒	+++	偽陽性	無機触媒と識別必要	アミノ酸種分析, DL分析**

で、偽陽性(生物であると誤認する)の可能性もある[30]. さらに、細胞形状だけで生物と判定するのは難しい. 細胞形状だけで判定しようとすると、偽陽性(緩い基準で判定した場合)と偽陰性(不定形の細胞等、一般的でない形状の細胞の場合)の両方の可能性がある. すなわち一つの成分や性質の検出だけを探査対象とすると、生物を見落とす可能性と、非生物を生物であると誤認する可能性の少なくともいずれか、項目によっては両方の可能性がある(表8).

こうした検討を元に、Enyaら[30]は、1) こうした生体成分や生物の性質を用いた探査の内の、どの一つも単独では地球外生物を検出できないこと、2) こうした様々な生体成分や性質を測定する方法のなかで、すべての点で優れているものは無いこと、3) これらの内のどの一つの方法も単独で地球外生物であることを判定できないこと、を指摘した. そして生命探査では、一度に地球外生物の判定を目指すのではなく、第一段階では多少の擬陽性(非生物を検出すること)を容認しても、地球外生物の見落としができる限り少ない方法で探査すべきであるという提案を

行った[30].

## (2) 蛍光顕微鏡とその他の顕微鏡

Enyaらは、これまでの火星探査で用いられたアストロバイオロジー関連の探査装置をまとめた[31]. 火星で生命探査を目指す海外の研究者達は、これまで質量分析装置を主に用いている. 海外の研究者は、主に有機化合物および過去の生命の痕跡の探査に主眼を置いている[31].

我々は、第(1)項で提案した第一段階の生物細胞の探査では形態を知ることが必須であり、成分の情報とともに顕微画像情報を得ることが重要であることを主張している[20, 30, 31]. 成分検出だけでは単なる有機物との識別は困難で、形状だけは無機物との識別が難しいが、両者を同時に行うことで、有機物でできた粒子を広範に検出できるからである. しかも、地球の原核生物(細菌と古細菌)のほぼすべての細胞は直径1  $\mu\text{m}$ 以下の球状か、棒状(桿菌)であることから、地球微生物を参考にすれば、生命探査においてはそれを判定できる画像解像度が必

要である [20, 30, 31].

画像解像度をもつ顕微鏡としては可視顕微鏡、蛍光顕微鏡、ラマン顕微鏡、赤外顕微鏡、紫外蛍光顕微鏡、深紫外蛍光顕微鏡、電子顕微鏡、原子間力顕微鏡等がある [30, 31]. 電子顕微鏡と原子間力顕微鏡は画像解像度が最も高いが、抗体染色等の特殊な技術を用いない限り成分分析ができない。可視顕微鏡は、染色により成分分析が可能であるが、撮像感度が蛍光顕微鏡におとる。ラマン顕微鏡、赤外顕微鏡、紫外蛍光顕微鏡、深紫外蛍光顕微鏡は、ある程度の成分分析ができるが、画像解像度の高いラマン顕微鏡や赤外顕微鏡は大型で宇宙機には向かない。小型ラマン顕微鏡と深紫外蛍光顕微鏡の宇宙機が開発されているが地球微生物細胞(1  $\mu\text{m}$ )を判別する解像度はもたない[30, 31]. 地球微生物細胞を判別する解像度をもち、成分の情報も得られる蛍光顕微鏡(LDM: Life signature Detection Microscope) 宇宙機の開発がすすんでいる[20, 30, 31]. 表9にはLDMのBBM (Bread Board Model: 設計の実現性を確認するため、宇宙用の部品ではなく、地上の一般用部品や材料を使用して製作した装置)の諸元を載せた。顕微鏡は、特にその振動耐性が気になるが、通常顕微鏡が3軸で観察位置を制御するのに対して、1軸で観察位置を制御することで振動耐性を持ち得る設計としたBBMでの自動染色と自動撮像に成功している[31].

日本の研究グループが開発をすすめている蛍光顕微鏡LDM(表9)は単に粒子の形状を観察するのではなく、粒子の成分の情報も得られるという長所をもっている[20, 30, 31]. すなわち蛍光顕微鏡は生物学一般で汎用されていて、様々な染色特性をもつ5000種を越える色素が蛍光顕微鏡用に開発されている[32]. それらの色素は、それぞれの色素ごとに異なった特異性で様々な成分を検出できる。染色可能な対象としては、有機化合物一般、タンパク質、核酸、DNA、膜成分などがある[31]. さらに微生物の死細胞を赤に、生細胞を緑に染色して両方を検出でき、細胞の生死を色によって判定できる色素の組み合わせもある[20, 31]. 酵素活性によって発色する蛍光基質を用いることで、酵素反応を検出することもできる。しかも、蛍光顕微鏡の特性として、こうした成分や活性をもつ粒子の画像を得ることができる(図

表9. LDM-BBMの諸元[31].

視野	1.12 mm x 0.894 mm
画像解像度	1 $\mu\text{m}$ (目標)
励起光源	Laser diode, $\lambda = 488 \text{ nm}$
明視野光源	LED + Koehler optics, $\lambda = 472, 525, 632 \text{ nm}$
検出器	CMOS. 1280 x 1024 pixels, 8 bit
試料容器数	20
質量	合計5.7 kg 蛍光顕微鏡: 1.8 kg 試料ローター: 1.6 kg 電気系: 2.3 kg
電力	30 W
外寸	160 mm x 120 mm x 240 H mm
温度範囲	-30 ~ +30°C (動作時) -40 ~ +70°C (非動作時)
大気圧	700 Pa

10). こうした利点があるので、地球での様々な環境での水中や土壌中での環境微生物探査では、ほとんど例外なく蛍光顕微鏡が利用されている [31]. (2.1節で解説した大気中微生物の場合には微生物細胞の生存率は低いと推定されるので、培養による生細胞の検出が行われている.)

### (3) 生物細胞候補を地球生物と識別する手法

Enyaら[31]は、何らかの生命の徴候をもつ試料が得られたときに、次の段階でそれが何なのかを判別するフローチャートを提案している。生命の徴候が、生物なのか否か、地球生物とどのような関係にあるかを、アミノ酸種、アミノ酸の鏡像異性、DNAの解析で判定することができる。

例えば、得られた試料のアミノ酸分析を行って(図11)、アミノ酸が無ければ生物でないか地球外生物である[31]. アミノ酸が無い場合には、その対象が地球外生物なのか非生物なのかを判定するためには、広範囲有機化合物分析を行う必要がある。

アミノ酸が有った場合、その種類を分析することで、地球外生物か、隕石由来アミノ酸か、地球生物のアミノ酸かという識別が可能である。地球上の生物はすべて20種類の標準アミノ酸を用いている[2]. 地球生物が過去に火星から移動した生物であるか、あるいは火星生物が地球から移動した生物である場合には、火星生物も同じ20種の標準アミノ酸を使っている可能性が高い。また、地球生物がなぜ20種の標準アミノ酸を使っているかという理由は現在不明であるが[2], その理由があるのであれば、火星生

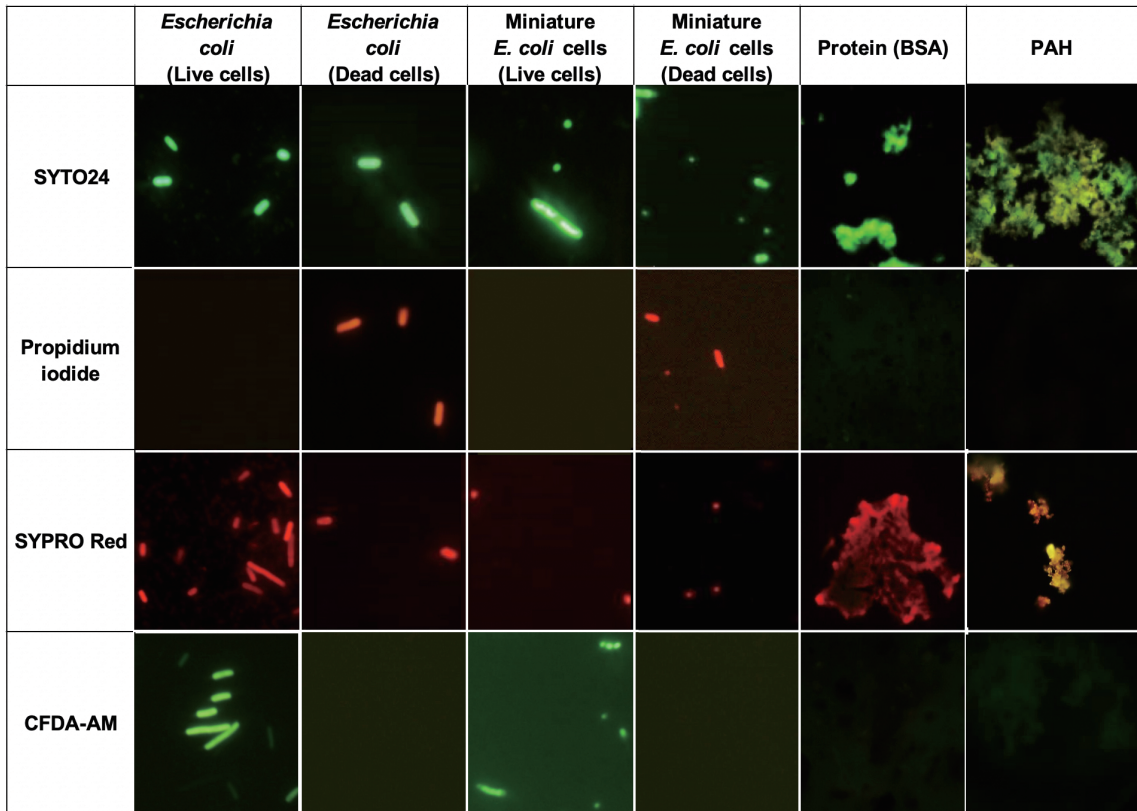


図10: 生物実験用蛍光顕微鏡で撮像した種々の微生物細胞と有機化合物の顕微撮像写真[31]. 左から大腸菌生細胞, 死細胞, ミニセル(大腸菌変異株で小さい細胞中にはDNAが含まれない)の生細胞と死細胞, タンパク質(BSA), プロテノイド, 多環芳香族炭化水素(PAH). 各行はそれぞれ別の蛍光色素で染色している.

物が地球生物とは独立に誕生した生物であっても地球生物と同じ20種の標準アミノ酸を使っている可能性もある. こうした場合, つまり対象が20種類の標準アミノ酸を用いていたなら, それを地球型生物と呼ぶことにする.

隕石は地球型生物が用いているアミノ酸に限らず多種のアミノ酸種を含んでいるので, 容易に地球型生物と区別ができる[1]. もし, 試料が限定的な種数のアミノ酸だけをもっていて, かつそれが地球型生物の20種の標準アミノ酸とは異なっていた場合には, 地球外生物と判定できる(図11)[31].

同様の判定は, アミノ酸の鏡像異性体の分析で行うこともできる(図12)[31]. 地球型生物であれば, L型アミノ酸だけ(特殊な非タンパク質アミノ酸は例外的にD型の場合があるが)を持っている. DL両方の混合物であれば, 隕石由来か地球型生物の化石で

あると判定できる.(隕石由来か, 地球型生物の化石かという判定は, 上記アミノ酸種の分析で可能である.) D型アミノ酸だけで構成されていれば, 地球外生物であると判定できる(図12).

アミノ酸種の分析によって地球型生物であると判定された場合には, 生物が火星と地球間を移動した可能性を考慮する必要がある. さらに, 独立に誕生した生物であっても地球型生物の20種のアミノ酸を使う可能性もある. これらの可能性はDNAを分析することで判別することができる(図13)[31]. 例えば, DNAを持たない場合や, DNAを持っていても塩基が地球生物と同じACGT(アデニン, シトシン, グアニン, チミン)でない時, PCR(試験管内遺伝子増幅)で増幅しない場合や, 塩基配列が解析できない(地球生物配列と相同な配列部分がない)場合, 配列が読めたとしても系統樹が作製できない場合には技術

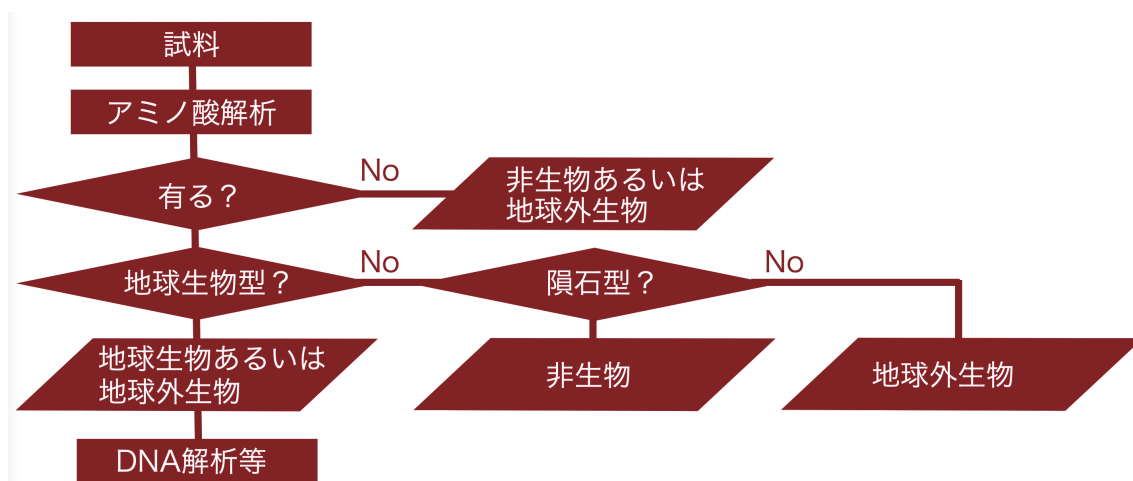


図11: 地球外試料のアミノ酸分析フローチャート[31]. 得られた試料のアミノ酸分析を行って, アミノ酸が無ければ生物でないか, 地球外生物である. アミノ酸があった場合, その種類を分析することで, 地球型生物か, 隕石等の非生物由来か, 地球外生物かの区別がつく. 地球型生物は20種のアミノ酸を含んでいる. 多種のアミノ酸種を含む場合, 隕石等の非生物と判定される. 地球型生物と同じ20種のアミノ酸ではなく, また隕石特有のアミノ酸種でもない場合, 地球外生物と判別される. 地球生物型アミノ酸組成の場合には, その後DNA分析等の解析で地球生物か地球外生物かの判定を行う.

的な問題の可能性は残るものの, 地球生物とは独立に誕生した生物である可能性が高い. つまり, 地球生物と同じ20種の標準アミノ酸を使っていたとしても, DNAを分析することで地球生物とは独立に誕生した生物であるかどうかを判定できる[31](図13).

地球生物の配列とともに系統樹が作製できた場合には, その生物が系統樹上のどこに位置するかで, その生物がどのような生物かが判定できる[31]. もし生命誕生直後に地球生物と分かれた生物種であれば, その生物の配列は地球生物系統樹の根元に付くはずである. あるいは, ごく最近(探査装置に付いていた場合も含む)地球から移動した生物の場合には, 地球生物系統樹の枝の端で地球の既知の生物種と枝分かれするはずである. つまり, その生物の持つ配列が系統樹上のどの位置につくかで, その生物と地球生物との系統関係が判定できる[31].

このように, アミノ酸種とDNAの詳細分析によって, 地球生物, 地球生物と過去に分岐した生物, 地球生物とは独立に誕生した生物, 非生物を判別することができる[31]. 裏返せば, 表8の中の一成分の検出だけではこれらの判別は困難である[31]. したがって, Enyらは二段階の生命探査を提案している. その一段階目では, 広く有機化合物を含む粒子

を見落としなく検出する. 二段階目ではアミノ酸種とDNAの詳細な分析を行い, どのような有機化合物であるかの判別を行う. 二段階目の分析はその場で行うか, 火星有人基地で行うか, 試料を地球へ持ち帰って行う等の可能性がある[31].

例えば, 既に有機化合物の存在が確認されているゲール・クレーターのカンバーランド泥岩掘削試料が地球に帰還した場合には, 蛍光顕微鏡や赤外顕微鏡, ラマン顕微鏡等で有機化合物の形状を確認し, 有機化合物を含む粒子が見つかった場合には, アミノ酸種分析やDNA分析によってその有機化合物の正体を明らかにできるはずである.

これらの検討結果は, 氷天体や金星など, 火星以外の太陽系天体における生命探査においても参考になる.

### 4.3 生命探査の意義と戦略

#### (1) 生命探査の意義

ここで, あらためて火星あるいは他の太陽系天体で生命を探査する意義はどこにあるのだろうか. それは, もし地球外生命が発見されたとき, 人類史上の非常に大きな発見になることである. 太陽の周りを地球が回っていることを発見したコペルニクスの



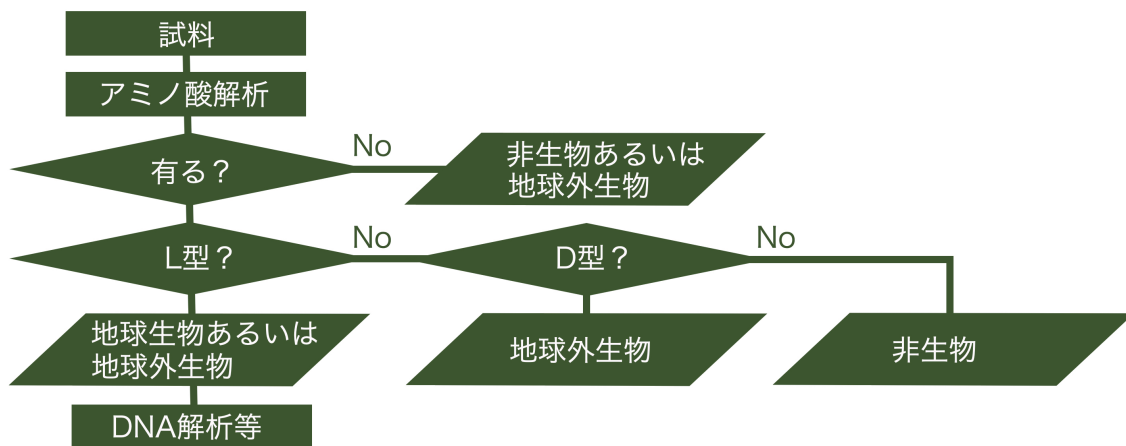


図12: 地球外試料のアミノ酸DL分析フローチャート[31]. 得られた試料のアミノ酸DL分析を行って、アミノ酸が無ければ生物でないか、地球外生物である。アミノ酸があった場合、そのDL分析をおこなうことで、地球外生物か、隕石等の非生物由来か、地球型生物かの区別がつく。D型アミノ酸の場合、地球外生物と判別される。DLの混合したラセミ体の場合には、非生物か生物の痕跡の可能性が高い。L型アミノ酸の場合にはDNA分析等の解析で地球生物か地球外生物かの判定を行う。

発見、生物がどのように進化するかを示したダーウィンの「種の起源」に匹敵する発見といえるかもしれない。

また今後、火星での有人探査が計画されている事を考えると、火星表面に火星特有の生物がいるかどうかを確認することは、火星特有の生物がいるかどうかに関わらず、惑星保護の観点から重要である[18]。すなわち有人探査では宇宙飛行士の滞在と活動によって地球由来微生物が火星環境に広がる可能性がある。したがって、探査地付近で火星固有の生物が存在する可能性を確かめておく必要がある[18]。

系外惑星に生命が見つかることを期待する天文学者は多い。地上および軌道上の様々な波長域の望遠鏡を用いて、太陽系外生命の徴候を探す計画が進行している[33]。生命の発見をそう遠くない将来に想定する天文学者も少なくない。しかし、仮に太陽系外に生命が発見されたとしてもその試料を地球に持ち帰ることは当分できない。

一方、もし太陽系内に地球外生物が発見されたならば、その場観測によって詳細な分析を行うことが可能である。さらに試料を地球に持ちかえることによって、高度な分析手法が利用可能になる。

それらの分析によって、生命に関するいくつもの根源的問いに関する情報も得られる。例えば、地球

外生物は細胞から構成されているのか。細胞の大きさはどれくらいか。生物を構成する元素は地球生物と同じなのか。水を溶媒として用いているのか。炭素を主成分として用いているのか。アミノ酸を用いているのか。核酸を用いているのか。脂質膜を用いているのか。これらを用いている場合に、アミノ酸、核酸、脂質、糖の種類は地球生物と同じか。これらの分子の光学異性は同じか。やがて地球外生物の遺伝学も始まるかもしれない。これらの分析結果によって、生物形成要素の一般性と多様性、偶然性と必然性の研究がすすむ。その生物と地球生物との比較から、両者で同じ点はどこでそれはなぜなのか、両者で異なっているのはなぜなのか、という理由に迫ることが可能になる。すなわち、地球生物に限定されない一般生物学とも言うべき生命科学が始まる。

## (2) どのような生命を想定するか

とは言っても、生命を探索しようとするならば、探索対象天体にありうる生物の特徴をある程度想定する必要がある。そうしなければ、探索された対象が生物であるかどうかを判別することも困難である。

この点に関して、本連載第2回目に検討した、宇宙にありうる生命の形が参考になる[2]。すなわち、上述の元素、分子、アミノ酸の種類、核酸の種類などは、いくつかの環境因子によって影響を受ける可能

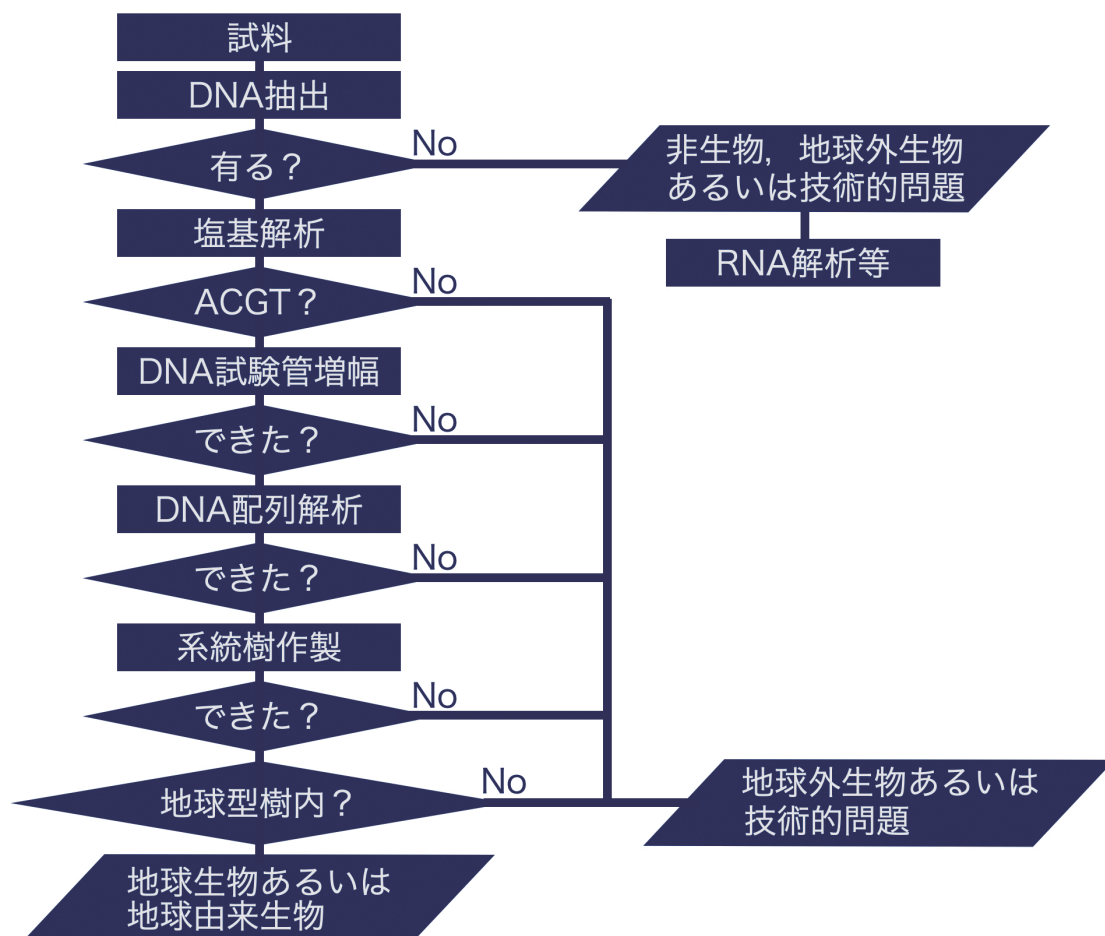


図13: 地球外試料のDNA分析フローチャート[31]. 得られた試料のDNA分析を行って、DNAが無ければ生物でないか、地球外生物あるいは技術的問題である。その場合RNA分析等を行う。DNAがあった場合、その塩基を分析しACGTであれば、PCR増幅、DNA配列決定、系統樹を作製して、地球生物の系統樹に入るかどうかを分析する。塩基がACGTでない場合やこれらの分析ができない場合には、地球外生物か、技術的問題である。系統樹解析ができる場合には系統樹上の位置から、どのような生物であるかの判定ができる。地球から移動した生物か、その天体から地球に移動した生物が系統樹上の位置で判定できる。

性があるという点である。例えば、ある液体が生命に利用可能であるためには、その液体が天体表面に存在する必要がある。同様に元素がその環境に存在しなければ利用できない。ある元素が炭素のように多種の分子を構成するためには、中心となる元素が多価で、しかもその元素の酸化還元状態が極端な還元型や極端な酸化型でなく、多種の原子と結合できる必要がある[2]。生命の基礎となる分子が生命誕生前にその天体表面に非生物的に供給されなければ利用される可能性が低い[2]。

こうした点を考慮するならば、太陽系の地球型の

天体、すなわち火星では、水を液体として用いて、炭素を主要元素として用い、酸素、水素、窒素を用いた有機化合物を主成分とする生命である可能性が高い [2, 30]。隕石からアミノ酸が多種供給されることを考えれば、アミノ酸の重合体を触媒分子として用いる可能性も高い[2, 30]。

一方、核酸を構成するリボースや核酸塩基が隕石中に見つかっているが、隕石中リボースの含量が低いことを考えると、遺伝物質としてDNAあるいはRNAを用いているという保証はない[2, 30]。アミノ酸の種類や核酸塩基が地球型と異なる可能性も考

表10. 火星で地球由来微生物が増殖可能な微小環境[17].

地球由来微生物が増殖可能な天然微小環境	説明
水蒸気が利用可能	大気中, 土壌間隙空間, 岩空隙等の水蒸気あるいはエアロゾル
氷関連	霜, 氷, レゴリス等の地下水, 氷河由来の液体あるいは気体の水
塩水関連	潮解塩, 水中, 氷表面, 結晶塩, 岩塩中の塩水
岩や土壌粒子の表面の水薄膜 (水活量が 0.9 以上の場合)	レゴリス粒子, 粘土鉱物, 氷表面, 岩石表面の水薄膜
地下水あるいは熱水 (微小環境ではない)	液体水
周期的凝集水や結露を受ける場所 (水活量が 0.9 以上の場合)	レゴリス粒子, 粘土鉱物, 氷表面, 岩石表面の水薄膜
鉱物中の水 (微生物生存可能ではない)	鉱物に結合した水 (粘土鉱物薄膜間水分子等)

慮しておく必要がある[2, 30].

膜脂質に関しても同様の推定ができる。つまり、地球生物の細胞は脂質膜で囲まれていて、脂質膜が細胞内部の分子を閉じ込めているが、地球生物の脂質膜には多種類の脂質が使われている[34]。したがって、地球外生物の細胞も脂質膜で囲まれているはずであるが、膜脂質分子として特定の脂質分子を想定することはできない。

地球の原核生物種の多くは、細胞の大きさが直径  $1 \mu\text{m}$  ほどであり、形は球状あるいは桿状である。地球外生物の細胞の大きさと形は不明である。しかし地球生物を参考にするならば、細胞の最も小さい可能性として  $1 \mu\text{m}$  ほどの直径で、球状あるいは桿状細胞を想定しておく必要がある[2, 30].

#### 4.4 どこを探すか: 地球微生物の生存場所

この項では、まず地球の微生物を対象に増殖可能な場所の検討を行う。微生物の増殖に必要な因子や成分は多種にのぼる。元素でいうと本連載第一回[1]表10に示した元素が生体内に含まれている。主要な生命構成元素として炭素、水素、酸素、窒素、硫黄、リンがある。エネルギーを確保するための電子受容体と電子供与体の組み合わせも必要である。増殖するためには液体の水が細胞内で保持される必要がある。増殖の環境も、適切な温度、pH、酸化還元

状態、紫外線強度の範囲である必要がある(表6)。これらの中で一つでも条件が欠けると微生物は増殖できない。

微生物細胞の密度は、必要な物質の中で、最も少ない物質の量によって規定される。しかし、微生物細胞が  $1 \mu\text{m}$  以下の直径で、質量も一細胞あたり  $1 \text{ pg}$  以下であることから、その増殖に必要なとするエネルギーや元素の量は非常に少ない[2, 21, 30]。したがって、これらの環境因子を考える上で、必要な物質が得られる環境はほとんどどこにでもあった方がよい。すなわち、微生物は  $\mu\text{m}$  スケールの微小環境で増殖可能であると理解されている。実際 COSPAR の議論に基づく報告[17]では、微生物が増殖可能な微小環境を表10のように整理している。すなわち、微生物は微小な環境であっても増殖可能である。

生物が増殖できる環境としては温度 ( $-18^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ )、水活量 ( $1.0 \sim 0.6$ , これは相対湿度  $100\% \sim 60\%$  に相当する) が重要である(表6)。放射線耐性微生物は  $5,000 \text{ Gry}$  まで生存可能なので、火星表面で放射線強度が問題になることはない[17, 21, 30]。紫外線も太陽光の直射を受けると生存できないが、ダストやレゴリスは厚さ  $1 \text{ mm}$  以下で紫外線を遮蔽できるので[17]、土壌中で紫外線の影響は受けない。つまり、温度と湿度を同時に満足する範囲であれば、

土壌中で微生物は増殖可能と考えて良い[17, 21, 30].

生命が誕生すれば、生存可能な場所に生命は進出する。地球表面近くでは、火成岩の塊の中以外の場所には、ほとんどすべての場所に微生物がいると考えて良い。溶融溶岩中では炭素化合物は安定に存在できないので火成岩中に微生物はいない。一方、火成岩であっても水の浸透が可能な亀裂部分には微生物細胞が見つかった[35]。これ以外の場所でも、水と微生物が侵入することが可能であれば、どこであれ微生物が増殖する可能性がある。海水表面付近では光合成に依存した生物相があり、200 m以深の海水では生物密度は低下するが、その密度は深海でもゼロにはならない[1]。また、アタカマ砂漠の最も乾燥した地帯や南極の砂漠でも $10^4$  細胞/g土壌程度の微生物が見つかった[36]。こうした環境では、水がほとんど無かったり、極低温であったりする。こうした因子は細胞数を少なくする効果をもつものの細胞を完全になくすわけではない。

地球生物が死滅しない環境、つまり生存可能な環境はさらに広範囲である。温度が増殖条件より低く液体窒素温度まで、湿度が増殖条件より低く湿度0%まで、圧力が増殖条件より低く真空まで、微生物は増殖できないが、死滅することはない(表6)[17, 18, 30]。微生物が増殖できない場合でも特に低温あるいは乾燥では死滅することなく、仮死状態で休眠細胞が保存される。低温や乾燥は寧ろ休眠細胞の保存に適した環境である。実際、研究室や微生物種保管施設では凍結乾燥した微生物細胞が半永久的に保存されている[17, 18, 30]。

いっぽう増殖を停止した微生物細胞はその成分が何らかの理由によって分解することでやがて死滅し、仮に増殖可能な環境に再度おかれたとしても増殖することはできなくなる。また細胞構成成分も変質してしまう。死滅の要因として例えば放射線や紫外線によるDNAの切断あるいは損傷がある。紫外線耐性の微生物も紫外線が当たる環境で数年、紫外線が当たらない環境では数十年で死滅する[30]。

それよりもはるかに長い時間スケールで、細胞を構成する高分子の分解が進行する[30]。分解の速度は環境に依存するために単純に何年と言うことはできない。例えば、分解酵素が働く常温の水中では数

時間から数日で核酸やタンパク質の分解は進行する[30]。逆に、乾燥した状態、真空中、低温では分解は極めて遅く、核酸やタンパク質は数千年以上保存される。数千万年前の化石中のペプチド鎖(タンパク質の一部)が報告されている[30]。

つまり、高分子が残存している細胞を検出しようとした場合には火成岩中以外の様々な場所が対象となりうる。ただし注意すべきは、化石中のペプチド鎖分析は大型化石でおこなわれたという点である。つまり、試料を目視で発見できれば解析して有機化合物を検出することができるが、問題は試料をどのように発見するかということになる。微生物細胞は小型で、細胞一つであれば顕微鏡無しに検出することはできない。バイオマツ(微生物細胞の層状の被膜)、バイオフィルムであれば目視できるが、岩石試料であればそれを見つけるためには新しい試料面を研ぎだす必要がある。つまり、目視によって試料を見つけることは極めて困難である。ただし、手当たり次第に有機化合物ないし有機物粒子を探査するという方法はありうる。有機化合物が発見された場合には前記フローチャートのような詳細分析を行うことが可能であり、その価値がある。

#### 4.5 探査地で検討すべき環境因子

具体的な探査地は生命探査以外の科学目標や工学目標、探査可能性や容易性、装置の開発段階など様々な因子を考慮して検討されるはずである。

前項で検討したように、微生物の増殖を制限する重要な因子は、水の活量と温度である[17, 18]。水の活量と温度は細胞内で液体の水が存在できるかどうかに関わる。ここで水や凍土は、その中あるいはその側で、水の活量は1.0となり、増殖に必要な水の活量0.6を上回る。あるいは、蒸気の噴出している場所では、水の活量は高くなる可能性が高い。こうした水の活量の大きい場所で、温度の充分高い場所があれば、生命探査候補地となる(表6参照)。つまり、温度と水の活量が増殖条件を満たす場所(温度 - 18°C ~ 120°C, 水活量1.0 ~ 0.6)が生命探査の第一の候補地となる。

ここで、温度と水活量を考える理由は液体の水が鍵となる。しかし、上記の条件の外でも塩の潮解による塩水は存在する。上記の温度水活量の範囲か



ら外れれば地球微生物の生育はできないが、火星に微生物が存在したとして、塩の潮解による塩水の存在場所が増殖可能な場所となるかもしれない。

#### 4.6 火星表面での特徴的地形や環境の評価

後述するように、火星表面にある環境を地球由来微生物で汚染しないことが国際条約によって要求されている。これは惑星保護とよばれている。火星表面で地球生物が増殖可能な場所は、惑星保護上の特別領域とよばれている[17]。惑星保護方針では、特別領域を、それ以外の場所と比べてより強い惑星保護の対象領域としている。火星に現在も増殖する生物がいた場合に、特別領域はそれを見つける可能性の高い場所とも考えられる。この節ではRummelら(2018)が行った火星特別領域の報告[17]、CoPP(米国アカデミーの惑星保護委員会)の火星での惑星保護に関する報告[18]を参考に地球生物が増殖可能な場所を検討する。

##### (1) RSL.

周回機の撮像によって、クレーター斜面で季節的に現れては消える黒い筋(0.5~5 m)が多数確認されている(図14)。これは、Recurring Slope Lineae (RSL)と呼ばれる現象である[17, 37, 38]。温暖な時期にクレーター斜面に黒い筋が伸長し、やがて消える。この現象が毎年繰り返されることが確認されると「確定したRSL」と呼ばれる。黒い筋の伸長あるいは繰り返しのどちらかだけが確認された場合には、「部分的に確定したRSL」とよばれる。RSLがどのような機構で現れるかははっきりしていないが、Rummelら(2018)はいくつかの機構を紹介して、RSLは地下の水に由来する活動である可能性が高いとしていた[17]。しかし、CoPPでは水の関与に関しては否定的な解釈を行っている[18]。その理由はいくつかあるが、RSLに含水過塩素酸塩の赤外線吸収があるという結果はデータ処理の不備であった可能性があると指摘されている。また、RSLが観測されている緯度を考えるとRSLの流出高度は地下凍土の位置より高いこと、RSLが停止する地形の斜度が粒子の流れで説明できること、等が指摘されている[18]。ただし、地下凍土からの水蒸気の発生がRSLと関連している可能性はまだ残っている。



図14: マリネリス峡谷メラス谷のRSL (11.5 S, 290.3E) [17]. HiRISE 画像 ESP\_031059\_1685の一部。画像はNASA/JPL/University of Arizona.

##### (2) ガリー

ガリー(gullies)は浸食によってできた尾根(alcoves)に挟まれた峡谷(channels)と扇状地(aprons)を持つ構造である[17, 39](図15)。Rummelら(2018)は火星特別領域の関連でガリーを4種に分類した。Taxon 1のガリーは南半球中緯度にある温度が極めて低い場所(CO<sub>2</sub>露点温度)のガリーで、極低温であるため、おそらく水は関係しない。Taxon 2は比較的新しい比較的低温な地域のガリーで、地下に氷があるかもしれないが、氷の融解による水でできた可能性が高い。Taxon 3は温暖な地域のガリーで、地下の氷がない。Taxon 4はRSLに付随して観察されるガリーで、項目(1) RSLの記述が適用される[17]。しかしその後CoPPでは、多くのガリーに水は関係せず、CO<sub>2</sub>の霜が関係した現象であろうと結論している[18]。

##### (3) クレーター

クレーターは、その形成時のエネルギーによって熱水活動が起きるが、現在に至るまで熱水活動が継続していると推定されたクレーターはない[17]。

##### (4) 地下水

地下水が存在する可能性も検討されている[17]。

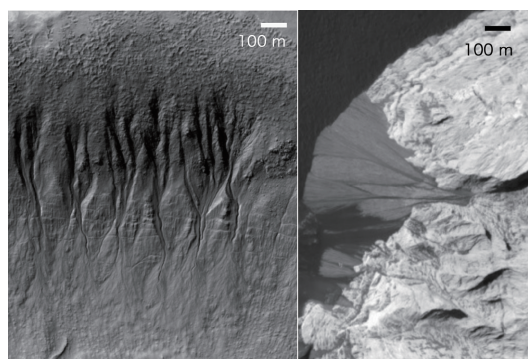


図15: 火星のガリーで、浸食によってできた尾根(alcoves)に挟まれた峡谷(channels)と扇状地(aprons)が見られる[17]. 左: 中緯度(37.46 S, 222.95 E)のクレーター斜面のガリー(HiRISE画像 ESP\_033290\_1420の一部). 右: 赤道域(8.41 S, 313.31 E)のガリー(HiRISE画像 ESP\_018518\_1715の一部). 画像は NASA/JPL/University of Arizona.

火星表面の浸食の度合いと火星史初期の地下水量の推定から、最大時(30~35億年前)には火星が平均0.5 ~ 1 kmに相当する水を保有していたと推定されている。現在でもこれらの水の大部分は、表面付近から少なくとも数kmの深さにおよぶ極域の氷と、元素崩壊熱によって氷層の下に形成される深部地下水として残っている可能性がある。これらの水の大部分は鉱物空隙水としてトラップされるが、それ以上の水量がある場合には液体の水として存在する可能性がある[17]。流出峡谷(outflow channels)は、この地下水の存在を反映している可能性がある。流水峡谷の中には200万年前から10億年前に形成されたと推定されるものも報告されている[17]。

地下水のもっとも直接的な探査は、周回機 Mars Express からのレーダー(MARSIS: Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding)探査として行われた。この探査によって火星南極域(Planum Australe地域)地下水の下に2 km幅の液体の水の存在を示唆する反射が報告された[22]。

火星全域の地下200 ~ 300 mより浅い地下水は検出されていないが、それが発見された場合には特別領域として扱われる。また、地下10 m程度より浅い部分のレーダーの解像度は低いので、表面25 cm

から10 mまでの地下水の存在可能性は否定できない[17]。

### (5) 斜面の黒い筋(線)

斜面の暗い筋模様(dark slope streak)が数十年にわたって現れたり消えたりする現象が主に赤道域で報告されている[17, 39](図16)。この現象は、季節変化や筋の伸長がない点がRSLとは異なっている。この現象に水の関与した可能性も提案されているが、大部分は乾燥ダストの崩壊であろうと推定されている[17]。

### (6) 極域砂丘斜面の黒い筋(線)

極域砂丘(dune)斜面で黒色の筋が観察されている。火星の冬季、温度がCO<sub>2</sub>の霜点(約150 K)から上昇する時に現れ、幅2~3 mで数十mほどの長さになる。夏期には見えなくなるが翌年同じ場所に出現する。温度が低温であるため、塩水であっても液体では存在し得ないので、地球由来生物増殖の可能性は無いと判定されている[17]。

### (7) 地熱地帯

周回機Odysseyに搭載されたTHEMIS (Thermal Emission Imaging System)の赤外線画像(約100 m / pixel)の解析から地熱異常の検出が試みられた。しかし赤外線画像は、場所による撮像時間の違い、表面の粒子径の違い、岩石類度、地形の斜度や割れ目等によって影響を受けるため、解析は複雑で、はっきりとした地熱地帯は報告されていない[17]。

### (8) 洞窟や岩石亀裂

火星でも火山性洞窟が多数検出されている(図17)。洞窟は地表に比べて湿度が高く、温度変化が少ない、太陽紫外線から護られるなど、微生物増殖や生存に対して有利な条件をもっている。地球由来微生物の増殖可能性は不明であるが、潜在的に特別領域として扱う事になっている[17]。

CoPPでは岩石亀裂内部の温度は場所により充分高く(-25°C, 248 K)準安定な水があり、地球微生物が代謝可能な場所があるかもしれないとしている[18]。ただし、地球微生物が増殖可能かどうかは不明である。



図16: ダストで覆われた斜面にある黒い筋. 火星Acheron Fossae地域にある地溝の日の当たる斜面と地溝底の画像(37.32 N, 229.11 E) [17]. HiRISE画像 PSP\_001656\_2175の一部. 画像はNASA/JPL/University of Arizona.

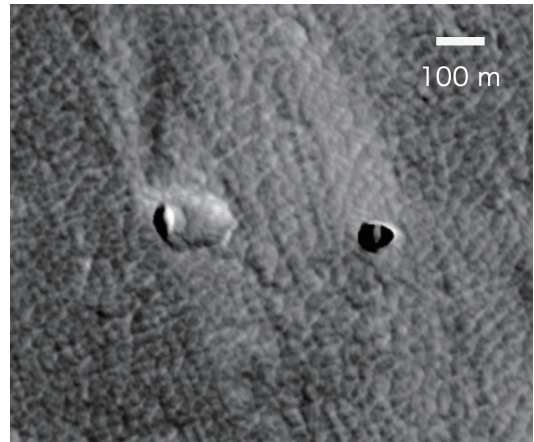


図17: アルシア山の北東部にある陥没でできた穴(2.27 S, 241.90 E) [17]. HiRISE画像 ESP\_014380\_1775の一部. 画像はNASA/JPL/University of Arizona.

### (9) 表層付近の土壌

表層付近の土壌中の温度と湿度のモデル計算が行われている。Phoenix着地点での表面土壌温度、大気湿度を用いて、土壌中の凍土をモデル化した場合、湿度60%を実現する際の温度は $-73^{\circ}\text{C}$ 以下であり、夏期に $255\text{K}$ ( $-18^{\circ}\text{C}$ )以上になる場合の湿度は10%以下であった[17]。

VikingからCuriosityに至る観測結果を用いて、過塩素酸塩の潮解図との比較も行われた[17, 40]。温度が高い場合に過塩素酸塩は広い湿度の範囲で潮解を起こす(図18)。一方、温度が低く湿度が低すぎる場合には結晶となり、温度が低く湿度が高すぎる場合には塩の結晶と水の混合物となる。VikingからCuriosityに至る観測結果を用いた解析の結果、過塩素酸塩が潮解を起こす時間帯は限られていた[17, 40]。また潮解が起きた場合でも、その温度は地球由来生物の増殖温度をはるかに下回っていた[17, 40](図18)。

CoPPは火星全球に対して地下温度と湿度のモデル計算を行った[18]。このモデル計算では、熱特性の異なるいくつかの地表(レゴリス, 小石, 氷で固化したレゴリス等)を仮定し、一年で最も高温になる時の一日の平均温度を推定した。その結果、表層約

10 ~ 60 cmの温度は北半球では $245\text{K}$ ( $-28^{\circ}\text{C}$ )以下であった。しかし南半球では地表の組成によるが、少なくとも約60 cmの深度まで $245\text{K}$ ( $-28^{\circ}\text{C}$ )以上になった。さらに、地下数十mから地下100 m以深まで、地熱によって $245\text{K}$ ( $-28^{\circ}\text{C}$ )以上になると予想された[18]。

温度と相対湿度の両方を考慮した検討も行われた。土壌中と大気とのガスの交換がない閉鎖環境(塩が固化している場合など)であれば、表面20 ~ 30 cmの氷あるいはレゴリス中で微生物の増殖可能な環境、 $245\text{K}$ ( $-28^{\circ}\text{C}$ )以上で水活量0.5以上、が実現可能であると結論している[18]。

その後の研究から新しい知見も増えている。火星表面で液体の水は存在しにくい、火星表面にある塩(過塩素酸塩等)の潮解によって塩水は存在する可能性がある[41]。実験的にも、赤道域から高緯度域にかけて一日に6時間程度であれば、表面か表面直下に準安定な潮解水が一年の内の数日間存在しうることが示されている[41]。

またExoMars Trace Gas Orbiter (TGO)は、赤道付近にあるマリネリス峡谷の中央部に40.3重量%の水に相当する水素を含む領域を報告している[42]。この観測結果は、この領域の表層近く深さ1 m前後のレゴリス中に、氷か水和塩が存在していることを示唆している[41]。



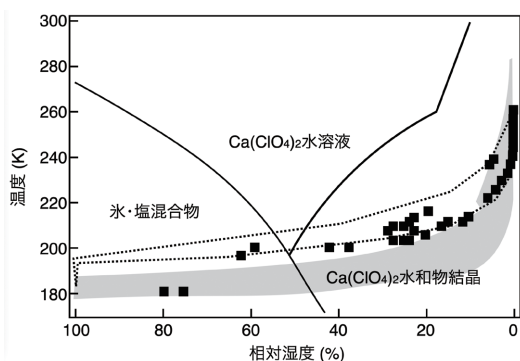


図18: 過塩素酸の状態図。点線はVikingのモデル計算結果, 黒四角はPhoenix着陸機の測定データ。灰色領域はCuriosity探査車測定データの範囲。Rummel J. D., et al. (2014)[17]およびMartínez, G. M. et al. (2017) [40]より作成。



図19: 明るい色の物質を放出した新しいクレーター (55.58 N, 150.6 E)。クレーターは2008年1月26日から2008年9月18日の間にできた[17]。HiRISE画像 PSP\_010625\_2360の一部。画像はNASA/JPL/University of Arizona。

### (10) 降雪

Phoenix 着陸機の LIDAR (Light Detection And Ranging) によって、日の出前に雪が地上に到達することが観測された[17]。これは火星の極域に限らず火星のどこでも起きうる。ただし、雪は夜の最低温時に積もり、日が昇るとすぐに昇華、融解／蒸発するので、この現象によって地球由来微生物の生存可能な環境が形成されるかどうかは不明である[17]。

### (11) 新しいクレーター

周回機の観測によって、中緯度から高緯度域で新しいクレーターが見つかっている (例えば図19)。直径は1.0～24 mで、衝突によって放出された白っぽい物質がクレーター周辺に広がっている場合もある。放出された白っぽい物質は数ヶ月から数年で消失するので、衝突によって放出された氷の破片であろうと推定されている[17]。赤道付近の新しいクレーターは黒色なのに対し、白っぽいクレーターの大部分は北緯39～65度で見つかっている。これは、氷層より上のダスト層が低緯度で厚く、高緯度で薄いことと付合している。これらの氷は白色で、土壤間隙水ではなく、レゴリス含量が1%以下の氷であろうと推定されている[17]。

### (12) 多角形が多数連続する地形

中緯度から高緯度では、数mから数十mの多角形が蜂の巣状に続く地形が広く見つかっている (図20)。こうした地形は地球でもあり、比較的浅い凍

土が徐々に消失することに起因していると推定されている。また火星の多角形連続地形の見られる場所は、周回機の中性子分光測定によって地下水が想定される地域と付合している。これらの場所では比較的浅い凍土が想定されるので、探査機の着陸あるいは衝突によって地球由来微生物が生存可能な領域となりうる[17]。

### (13) 地下水床

火星は歴史的に、自転軸や軌道要素の変化によって現在の低緯度地域にも氷河を発達させた可能性がある。極域から赤道域までアマゾニア代(30億年前から現在まで)の氷関連堆積物が見つかっている[17]。

地下水に関する情報は、レーダー、中性子分光法、赤外線画像解析によって行われてきた。この中で、サウンディング・レーダーSHRADとMARSISはそれぞれ垂直解像度約10 mあるいは100 mである。レーダーによって38度以北でレゴリス間隙水以上の氷を含む厚さ80～170 mの氷床が見つかっている。これらは表層から10 m近くにまで達しているかもしれない[18]。実際、北緯39度以北でレゴリスをほとんど含まない氷が地表数m近くにまで存在することが、新しいクレーターの存在によって分かっている[18]。

中性子分光法と赤外線画像解析によって表面付近約1 mの氷の情報が得られる。中性子分光法の約500 km/pixelの画像によって北緯45度以北および南緯60



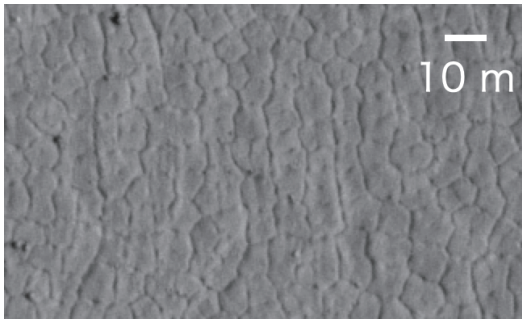


図20:多角形の連なる地形の例. こうした地形は地下にある永久凍土が季節的熱収縮によって割れる事で形成される. 表面の柔らかい土壌が次第に失われると, 蜂の巣形の浅い溝が見えるようになる[17]. HiRISE画像 PSP\_005761\_1145 (65.305 S, 136.562 E)の一部. 画像はNASA/JPL/University of Arizona.

度以南の中高緯度地域の大部分の領域で表面付近1 mに氷が見つかった[18]. 約3 pixels/degreeの粗い画像分解能の赤外線画像解析によって, 北緯35度以北および南緯60度以南にほぼ連続した氷カレゴリス空隙を埋める氷が検出されている[18].

ただし, 中性子分光法と赤外線画像解析は地下約1 mよりも深い部分の情報は与えない. また赤外線画像解析では, 赤道付近は表面温度の季節変化が少ないため, また南半球ではダストが多いため, 地下10 cmより深い部分にある氷を検出できない. したがって, 赤道付近で表面付近の氷が赤外線画像解析で検出されないことは氷が無いことを意味するわけではない[18]. 実際Mars Odysseyの中性子分光法による観測は赤道付近のいくつかの場所で水素の過剰を検出していて, これは地下水由来である可能性がある[18, 42].

前述した地下温度と湿度のモデル計算では, 南北緯度49度以下の低緯度地域の水平な表面あるいは南北緯度25度以下の赤道域の極に向けた斜面には, 表面約1 mに安定な氷が存在し得ないという結果である[18]. しかし, こうしたモデル計算は土壌が大気と拡散平衡にあることを仮定している. 大気との拡散が塩の固化などで妨げられた場合には, 氷が存在しても良い[18].

以上をまとめるなら, 北緯35度以北および南緯約50度以南の両極側表面付近深さ1 mより浅い場所には氷があり, 赤道付近でも表面付近深さ1 mより

浅い場所に氷がある可能性がある. すなわち北緯約35度から南緯約50度の間の低緯度で, 約10 ~ 100 cmの深さに氷がないとするはっきりとした証拠はない. また全球において1 ~ 10 mに氷が無いとするはっきりとした証拠はない[18].

#### (14) 着陸機由来の環境変化

着陸機による様々な作用で, 地下水を融解して地球由来微生物の生存可能な環境が人工的に形成される可能性がある. 着陸機の脚, ローバーの車輪, 熱源, 特にロボットアーム, 岩の掘削等でその場所に氷がある場合, エアロシェル, 熱シールド, スカイクレーン等が氷を含む場所に落下した場合なども考慮する必要がある. 衝突によって破壊炎上する場合も想定する必要がある. これらの現象は個々の計画や計画外の事象を含めて個別に検討すべきであるが[17], ここではこれ以上ふれない.

#### (15) 水の流出や, 蒸気や粒子の噴出地

上述の地形的要素以外でも, 地下水の流出あるいは, 地下の氷や水からの蒸気や粒子の噴出の場所があれば, 生命生存可能性のある場所となる. 例えばガリーやRSLの深部地下水から蒸気が噴出する経路があった場合, その途中で生命増殖条件を満たす可能性がある.

メタンの生成過程は, 生物的なものと同様に非生物的なものが知られている. しかし, 何れのメタン生成機構でも, メタン生成のために水あるいは蒸気が関与している[43]. メタン噴出地はまだ見つからないが[39], もし見つければエネルギー源と蒸気も同時に発見されることになり, 重要な生命探査地の候補となる.

#### (16) 生命探査候補地のまとめ

Rummelら(2018)の報告[17]とCoPPの報告[18]をまとめるならば, 火星表面での様々な特徴的な地形のなかで, はっきりと水の活動と関係づけられるものは無い.

一方, 低緯度地域に地下水床(1 mより浅い)がある可能性があり, 大気との気体交換が無い土壌など, その上に地球微生物増殖可能な環境がある可能性がある. 中性子分光法と赤外線画像解析で地

下水床が見つかった場所であれば、地下水床の深度は地下1 m以内でありその可能性がある[18]。実際ExoMars TGOは、赤道付近にあるマリネリス峡谷の中央部に40.3重量%の水に相当する水素を含む領域を報告している[42]。これは、この領域に表層近く深さ1 m前後のレゴリス中に氷か水和塩が存在していることを示唆している[41]。こうした地球微生物の増殖可能な場所は、生命探査地の第一の候補である。

地下の水か氷に由来する液体、あるいは蒸気や粒子が噴出している場所が生命探査地の第二の候補となる。すなわち、ガリーやRSLの流出物、未発見ではあるがメタンと共に噴出してくる粒子あるいは液体等が分析対象物となる。これらは特別領域からはずれるわけではないが、地球由来微生物の生存可能領域に試料採集装置を直接接触させる可能性のある第一の候補に比べて、そこからの流出物を探査の対象とする第二の候補の方が、惑星保護の観点から好ましい。

また、中高緯度地域には数 mより浅い地下水床が見つかっている。これらの場所の温度は低く、地球微生物の増殖は困難である。しかし、水活量が高いはずで、火星微生物がいないとは断言できない。地下水床があり潮解塩水の存在が可能な場所は第三の候補としても良い。例えば、中緯度から高緯度域の新しいクレーター周辺に広がっている、衝突によって放出された白っぽい物質は、潮解塩水由来の物質を含む可能性がある。

## 4.7 惑星保護との関連

前項で解説した火星表層の解説は、惑星保護に関わる報告を参考にした[17, 18, 41]。惑星保護では地球由来の微生物によって地球外の環境を汚染しないこと(フォワードコンタミネーション)と地球外の有害な物質を地球環境に持ち込まないこと(バックワードコンタミネーション)が目的とされている。惑星保護は国際宇宙条約第9条によって規定されており、惑星保護方針(具体的な方法)はCOSPARの惑星保護パネル(Planetary Protection Panel)によって審議決定され、COSPAR理事会によって承認される[41]。日本ではJAXA(日本宇宙航空研究開発機構)がCOSPAR惑星保護方針を元に惑星保護の

プログラム標準を定めている[44]。

### (1) 特別領域

COSPARの惑星保護パネルでは様々な検討を行ってきたが、2023年報告では、特別領域を次のように定義している。特別領域とは、地球由来生物が増殖する可能性のある領域で、それは火星現存生物が存在する可能性が高い場所と理解される[41]。COSPAR2020年の報告では確定した特別領域はないが、下記のような地形はさらに詳しいことがわかるまでは特別領域として扱うことが提案されている[45]。

- ・ 観測によって見つかっている地形  
ガリー(taxon 2~4)、それに付随した明るい筋、地下洞窟、5 m 以深の地下、RSL(確定したものと及び部分的に確定したもの)
- ・ まだ見つかっていない地形  
地下水、メタン発生源、地熱活動、新しい流出峡谷
- ・ ケース・バイ・ケースで評価することが必要な地形  
斜面の黒い筋、Pasted-on terrain(ガリーで新たに堆積した層)、RSL(候補)

COSPAR2020年の報告ではガリーTaxon 1はCO<sub>2</sub>によると考えられるので特別領域ではないが、他のガリーTaxonは特別領域として扱われている。これらのガリーは地下に融解する可能性のある氷があるか、RSLに関連している場合に特別領域となり得るとしていた[17]。

次項で説明する2023年の報告[41]では上記のような地形の個別検討は行っていないが、COSPAR2021年の報告[46]ではCOSPAR2020年の報告[45]を踏襲しているのでこれらの地形の特徴に係わる検討は今後も参考になる。

### (2) COSPARの惑星保護パネル2023年報告

COSPAR惑星保護パネル2023年報告では火星無人探査車に関わる惑星保護に関して報告している[41]。そこでは、知られている微生物増殖の下限温度 - 18℃に対して、低温での微生物活動の低下は指数関数なので最低温度の認定が困難であるとして、温度のマージン10℃を採用した。そして惑星保護の

特別領域を温度 $-28^{\circ}\text{C}$ 以上で水活量0.5以上の場所と定義している[41]. さらに、特別領域を判定する時間範囲を指定し、今後500年間、温度と水活量が上記の基準を満たす可能性がある場合に特別領域となることを確認している[41].

一方、惑星保護の制約を多少緩める提案もある[41]. すなわち、1a) 探査活動が表面だけの場合、あるいは1b) 探査活動が地表から1 m以内でありそこに地下水の存在が中性子や熱的データによって見られない場合であって、かつ2) 活動場所が特別領域から十分に離れている場合には惑星保護要求を緩めてもよいのではないかと提案である。また、探査機表面の微生物が火星で探査活動を行っている過程で死滅することを、惑星保護要求実現の過程として考えることが提案されている。しかし、微生物の環境耐性が強く、紫外線も薄いダスト層(数 $\mu\text{m}$ )で遮蔽される事等から、これらの提案はガイドラインとしてはまだ採用されていない[41].

報告では、探査車に付着した粒子がダストストームによって火星全球に運ばれる可能性を検討しているが、今後の検討が必要であるとしている。微生物の火星環境での死滅効果の検討や、火星で微生物が運搬される機構の検討、火星地下に関する情報、気候モデルも必要であるとしている[41].

また、計画では予期しなかった特別領域が探査中に見つかった場合などには、運用中に惑星保護の検討を行う必要性も指摘している[41]. さらに、JAXAのMMX (Mars Moon eXploration)での惑星保護の検討[36]が参照されて、惑星保護基準の達成が一律な方法ではなく、探査計画ごとに検討され、審査、評価されて良いと、個別の惑星保護審査過程が承認されている[41]. 惑星保護検討ではリスク・マネジメントの手法が参考になるとして、NASAの場合に標準となる方法を提案している[41]. さらに、今後予想される有人探査では地下水、洞窟等の利用が予想される。その前に、有人探査によるこれらの場所への影響に関する知見を得る必要があるとしている[41].

### (3) 惑星保護に関する今後の検討事項

COSPAR惑星保護パネル2023年報告[41]では変更された点が多く、火星における着陸探査を進め

る上では、予め様々な点を検討しておく必要がある。本項では、筆者の私見を付記して今後の検討の参考に資する。

着陸地に関して、高緯度はもちろん赤道域であっても地下水存在の可能性があるので、まずは中性子分光結果等から地下水存在可能性を把握する必要がある。そして着陸地に関してモデル計算を行い、特別領域であるかどうかの評価を個別に行っておく必要がある。

生命探査を行うのであれば、生命増殖条件(温度と水活量)を満たす場所を探す可能性があり、必然的に特別領域の探査となる。赤道域で中性子分光によって水素が検出されている場所や、地下からの噴出・流出等のある場所が生命増殖条件を満たす場所の候補になるが、これは特別領域となり得る。したがって生命探査を行う場合には、惑星保護との関連を予め検討しておくことが必要である。

また、これまでの特別領域の定義では、地球生物増殖可能な場所すなわち温度と水活量を指標にしている[41]. さらにその周辺で、探査車から遊離した粒子が、地球生物増殖可能な場所に風などによって搬送される可能性を考慮している。こうした地球生物増殖可能な場所を汚染する具体的な過程の検討が、必要かつ十分な惑星保護措置を設計する際に必要となる。

こうした点に関してCoPPでは、単に地球由来の微生物が増殖するかどうかではなく、それが周囲に伝播するかどうかという点に着目していることは検討に値する[18]. そして、地下水が相互に連結していない場合には、かりに地下水が地球由来微生物で汚染した場合でも、それが伝播する可能性は低いと言及している[18]. 予め、生命のいる可能性の高い場所、汚染の可能性の低い場所、汚染の伝播可能性の低い場所を識別して評価する必要がある。

こうした点では、前述の第二の候補、すなわち生命増殖可能性のある場所からの噴出物や流出物を探査対象とする場合、地球生物による汚染が広がる確率を下げるができる。さらに第三の候補、高緯度地域の地下水の上は塩の潮解液があっても低温であるため地球生物増殖可能性が低い。

掘削する場合や試料採集時には、ドリル先端や試料採集部分が生命増殖可能領域に接触する可能



性がある。この部分の滅菌を保証することが重要で、現場での滅菌手法の検討(要否も含めて)が必要である。

さらに、米国アカデミーCoPP報告の1ページ目では「宇宙機で運ばれた地球生物による汚染と、地球外天体上の地球外生命をどのように識別するか、という方法に関する科学的共通認識はない」としている[18]。つまり、地球由来微生物が火星環境で増殖したとき、それを地球外生命と区別できないことを危惧している。しかし、本解説の4.2項で説明したように、発見された微生物のアミノ酸種とDNA配列の解析から、それが火星固有の生物か探査機に付着して到着した生物かを判別することは可能である[31]。この点も今後の惑星保護で検討すべき項目である。

惑星保護方針は国際的な協議によって決まるので、欧米の検討状況を把握するとともに、我が国でも必要な検討を行って、惑星保護の国際的な議論をリードする必要がある。MMXの惑星保護方針に関わる研究成果[36]は、惑星保護検討の先進的例として高く評価されている[41]。

#### 4.8 火星での生命探査のまとめ

探査する具体的な場所に関しては、他の探査関連項目(緯度、地形、斜度、日照、土質等)、あるいは生命探査以外の科学目標と合わせて検討し決定されるべきである。探査においては、これらの環境因子の観測や土質、土壤成分の分析等も、生命生存や生命増殖可能性を判定するうえで重要な資料となる。とりわけ温度と湿度は微生物の有無との関連を調べる上で重要な測定項目である。

火星は全体としては乾燥して低温であり、生命にとっては過酷な環境である。しかし、局所的には地球生物であっても増殖可能な環境がありうる。温度(-18℃ ~ 120℃)と水活量(0.6 ~ 1.0:湿度60% ~ 100%に相当する)が同時に達成されて、生命増殖を支え得る場所が生命探査の第一の候補となる。例えば低緯度での1 m以浅の地下水床等が候補となる。次に生命増殖を支える場所からの流出物が第二の候補となる。すなわち、ガリーやRSLの流出物、メタンと共に噴出してくる粒子あるいは液体が第二の候補となる。惑星保護の観点からどちらも特別領域であることにはかわりないが、第二の候補の方が汚染

を広げる可能性が低い。さらに第三の候補として、中高緯度地域の数 mより浅い地下水床がある。中高緯度地域の地下水床の温度は低く、地球微生物の増殖は困難である。しかし、潮解塩水の存在可能な場所は火星微生物がいないとは断言できない。

生命探査では必然的に惑星保護における特別領域を探査することになる。予め、十分な惑星保護の検討を行い、国際的な議論をリードしつつ準備を行うことが必要である。

地上実験室や宇宙で用いられている様々な測定の方法も、一度で地球外生命を検出することはできない。したがって、生命探査では多段階の探査が必要である。その際、初段の探査で、多少の擬陽性の可能性があっても、できるかぎり検出漏れの少ない方法で探査を行うことが重要である。厳密な基準で地球外生命を判定しようとすると、非地球型の生命を見逃す可能性が高まるからである。例えば、有機化合物、アミノ酸、触媒活性を探査の対象として、その形状を補助的に用いることで、見逃し無く生物の候補粒子を探査することが期待される。

これまでのアストロバイオロジー関連の火星探査では、質量分析装置が頻度高く用いられてきたが、 $\mu\text{m}$ の画像解像度をもつ顕微画像取得が重要である。この点では成分別に染色できる蛍光顕微鏡が有用である。非生物の有機化合物、たとえば隕石由来の有機化合物の粒子を擬陽性として検出する可能性があるが、これは生命の存在可能性を考える上で重要な情報である。

一端、有機化合物の粒子が発見された場合には、アミノ酸の種類およびDL分析、さらにDNAの塩基分析、配列解読と系統樹作製によって、非生物、地球生物、地球から移動した生物、地球外生物を判定することができる。アミノ酸種を地球生物が用いている20種あるいは隕石が含む多種のアミノ酸と比較することで、生命かどうかの判定、および地球型生物か地球外生物かの判定を行うことができる。アミノ酸種のDL解析を行うことでそれを補助することができる。DNA塩基配列を解析することで、火星固有の生物か地球と火星の間を移動した生物かということも判定することもできる。

既に有機化合物の存在が確認されているゲール・クレーターのカンバーランド泥岩掘削試料が地球に



帰還した場合には、蛍光顕微鏡や赤外顕微鏡、ラマン顕微鏡で有機化合物の存在形状を確認し、アミノ酸種分析によってその有機化合物の由来を明らかにできるはずである。

生命探査を行う意義として、もし地球外生命が発見されたとき、それが人類史上の非常に大きな発見になることがある。また今後、火星での有人探査が計画されている事を考えると、火星表面に火星特有の生物がいるかどうかを確認することは、火星特有の生物がいるかどうかに関わらず、惑星保護の観点から重要である。

もし太陽系内に地球外生命が発見されるならば、その場観測によって詳細な分析を行うことが可能である。さらに試料を地球に持ちかえることによって、高度な分析手法が利用可能になる。それらの分析によって、生命に関するいくつかの根本的問いに対する情報を得ることが可能になる。つまり地球外生命が発見されれば、地球生物に限定されない一般生物学とでも言うべき生命科学が始まることになる。

## 引用文献

- [1] 山岸明彦, 2023, 日本惑星科学会誌 32, 16.
- [2] 山岸明彦, 2023, 日本惑星科学会誌 32, 68.
- [3] Yang, Y. et al., 2009, *Biol. Sci. Space* 23, 151.
- [4] Yang, Y. et al., 2008, *Biol. Sci. Space* 22, 18.
- [5] Yang, Y. et al., 2008, JAXA-RR-08-001, 35.
- [6] Kawaguchi, Y. et al., 2016, *Astrobiology* 16, 363.
- [7] Arrhenius, S., 1908, *Worlds in the making: The evolution of the universe*. Translated by Borns, H. (New York: Harper and Brothers).
- [8] Cottin, H. et al., 2017, *Space Sci. Rev.* 209, 83.
- [9] Kawaguchi, Y. et al., 2013, *Origins. Life. Evol. Biosph.* 43, 411.
- [10] Yamagishi, A. et al., 2021, *Astrobiology* 21, 1451.
- [11] Yamagishi, A. et al., 2021, *Astrobiology* 21, 1461.
- [12] Yamagishi, A. et al., 2018, *Astrobiology* 18, 1369.
- [13] Kawaguchi, Y. et al., 2020, *Frontiers Microbiol.* 11, 2050.
- [14] Tomita-Yokotani, K. et al., 2021, *Astrobiology* 21, 1505.
- [15] Kobayashi, K. et al., 2021, *Astrobiology* 21, 1479.
- [16] 宮本英昭ほか, 2016, *地学雑誌* 125, 171.
- [17] Rummel, J. D. et al., 2014, *Astrobiology* 14, 887.
- [18] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2021, *Report Series: Committee on Planetary Protection: Evaluation of Bioburden Requirements for Mars Missions* (Washington, DC: The National Academies Press).
- [19] Villanueva, G. L. et al., 2015, *Science* 348, 218.
- [20] 吉村 義隆ほか, 2018, 日本惑星科学会誌 27, 147.
- [21] 吉村 義隆ほか, 2021, *分析化学* 65, 1.
- [22] Orosei, R. et al., 2018, *Science* 361, 490.
- [23] 山岸 明彦, 2011, 日本惑星科学会誌 20, 108.
- [24] Plumb, R. C. et al., 1993, *Mars: Past, Present, and Future - Results from the MSATT Program, Part 1* (Houston: Lunar and Planetary Institute) 40.
- [25] Hecht, M. H. et al., 2009, *Science* 325, 64.
- [26] Grotzinger, J. P. et al., 2014, *Science* 343, 388.
- [27] Vaniman, D. T. et al., 2014, *Science* 343, 1243480.
- [28] Webster, C.R. et al., 2015, *Science* 347, 415.
- [29] Freissinet, C. et al., 2015, *J. Geophys. Res. Planets* 120, 495.
- [30] Enya, K. et al., 2022, *Life Sci. Space Res.* 34, 53.
- [31] Enya, K. et al., 2022, *Space Sci. Rev.* 218, Article number 49.
- [32] ThermoFisher, 2010, *Molecular Probes Handbook*, 11th ed. (ThermoFisher Scientific).
- [33] Impey, C., 2022, *Acta Astronautica* 197, 387.
- [34] Alberts, B. et al., 2010, *細胞の分子生物学 第5版* (Newton Press).
- [35] Suzuki, Y. et al., 2020, *Commun. Biolo.* 3, Article number 136.
- [36] Fujita, K. et al., 2019, *Life Sci. Space Res.* 23, 73.
- [37] McEwen, A. S. et al., 2011, *Science* 333, 740.
- [38] Ojha, L. et al., 2015, *Nature Geosci.* 8, 829.
- [39] 逸見 良道ほか, 2018, 日本惑星科学会誌 27, 152.
- [40] Martínez, G. M. et al., 2017, *Space Sci. Rev.* 212,

295.

[41] Olsson-Francis, K. et al., 2023, *Life Scie. Space Res.* 36, 27.

[42] Mitrofanov, I. et al., 2022, *Icarus* 374, 114805.

[43] Atreya, S. K. et al., 2007, *Planet. Space Sci.* 55, 358.

[44] 宇宙航空研究開発機構, 2022, JMR-014惑星等保護プログラム標準 改訂A.

[45] COSPAR, 2020, *Space Res. Today* 208, 10.

[46] COSPAR, 2021, [https://cosparhq.cnes.fr/assets/uploads/2021/07/PPPolicy\\_2021\\_3-June.pdf](https://cosparhq.cnes.fr/assets/uploads/2021/07/PPPolicy_2021_3-June.pdf)

---

## 著者紹介

---

### 山岸 明彦



東京薬科大学 生命科学部 名誉教授. 東京大学 大学院理学系研究科 相関理化学専攻 博士課程修了. 理学博士. 日本学術振興会 奨励研究員, カリフォルニア大学バークレー校 博士研究員, カーネギー研究所 植物生理学部門 博士研究員, 東京工

業大学 生命理工学研究科 助手, 東京薬科大学 助教授, 准教授, 教授を経て, 2018年3月退職して4月より名誉教授. 専門は分子生物学・微生物学. 日本惑星科学会, 極限環境生物学会, 宇宙生物科学会, 生命の起原および進化学会に所属. 日本学術会議 連携会員.