

微生物の長期宇宙生存の科学的検証：宇宙実験「たんぽぽ」

河口 優子

パンスペルミア仮説

パンスペルミア仮説とは、「生命が宇宙空間を自由に飛び交い、惑星間を移動している」という考えである。ギリシャ語で「pan」は「汎（すべて）」、「sperm」は「種子」を意味する。古くはギリシャの哲学者Anaxagoras（紀元前500–428）が主張したといわれている。もちろん、当時はこの仮説を検証する方法もなく、実は生命そのものの定義も曖昧であった。そのため、この仮説は長らく放置されていた。しかし、1830年代に化学者であるBerzeliusらにより、宇宙から地球に到達した隕石中に有機物が含まれることがわかり、再度パンスペルミア説に注目が集まった。現在では、「生命が隕石内に存在し、宇宙空間を移動するのではないか」という岩石パンスペルミア (*lithopanspermia*, *ballistic panspermia*, *transpermia* と呼ばれる) として広まっている¹⁾。また、1930年代には、ノーベル物理化学賞を受賞したArrheniusが、孢子が太陽光子の放射圧を駆動力として、惑星間を移動しているのではないか、という説を発表した²⁾。これは、光パンスペルミア (*radiopanspermia*) と呼ばれる。これらのパンスペルミア仮説はいずれも地球生命の起源について言及した訳ではないが、地球の生命は他の惑星で誕生して地球に持ち込まれた、と解釈する見解もある。いずれの仮説に対しても、発表当初から強烈な批判があった。岩石パンスペルミアに対しては、岩石が惑星を脱出、着地する際に生命は生き延びることはできないと考えられ、光パンスペルミアについては、孢子単体では、宇宙空間で強烈な紫外線で死滅する点が批判された。これらの批判を受け、パンスペルミア仮説はいくつかの過程に分けられて科学的検証が進められている(表1)。

宇宙実験「たんぽぽ計画」

宇宙実験たんぽぽ計画 [研究代表：山岸明彦教授（東京薬科大学）] では、国際宇宙ステーション（ISS）日本実験棟曝露部（船外部）を利用して、パンスペルミア仮説の検証を行っている^{11,12)}。たんぽぽ計画では、パンスペルミア仮説の中でも、惑星脱出の可能性を調べるために微生物の捕集実験を行っている。また、惑星間を移

表1. パンスペルミア仮説の科学的検証の一例

検証内容	方法
惑星脱出	コンピューターシミュレーション ³⁾ 、地球上空での微生物捕集実験 ⁴⁾ 、たんぽぽ計画
惑星間生存	宇宙環境模擬実験 ⁵⁾ 、軌道での曝露実験 ⁶⁾ 、たんぽぽ計画
着地衝撃	衝突実験 ^{7,8)} 、人工衛星を用いた衝突実験 ⁹⁾
到達後の生存	火星模擬環境での生存実験 ¹⁰⁾

動する際に微生物が生存できるかを調べるために微生物の曝露実験を行っている。たんぽぽ計画は2015年から実施されており、すでにサンプルの初期解析結果が報告されている¹³⁾。たんぽぽ計画全体の詳細は山岸ら¹⁴⁾、概要は本号特集（後編）の山岸の「特集によせて」の稿¹⁵⁾を参考にされたい。本稿では微生物の曝露実験の成果について記す。

微生物の宇宙生存実験

微生物の曝露実験は、19世紀以降、人工衛星、宇宙ステーションを利用して行われている⁶⁾。乾燥した生物を宇宙空間で、紫外線、放射線、真空などが複合的に作用する環境に一定期間曝し、地球上に持ち帰ったのち培養して、その生存を確認する実験である。その一例として、欧州らのグループにより真正細菌である*Bacillus*属の孢子は単一では紫外線で死滅するが、粘土鉱物やグルコースを混ぜ曝露すると約6年間生存することが明らかとなった^{16,17)}。これは岩石パンスペルミアを支持する結果である。地球初期の後期重爆撃期には、巨大隕石が地球に衝突し、その衝撃で地球上から岩石が飛び出したとされる。その岩石の中に生物が存在し、他の惑星へ伝播した可能性は十分にありうる。一方で、近年では地球上の重力を振り切り岩石が出て行くような巨大衝突はおきていない。筆者らは地球の大気圏上空で単離された微生物が凝集体状であり、この状態の微生物は紫外線を遮蔽して長期間生存できることに注目した¹⁸⁾。そこで、たんぽぽ計画では微生物が隕石中ではなく、微生物の塊として宇宙空間を移動しているのではないか、という仮説を検証している⁵⁾。この仮説を筆者らはマサパンスペルミ

ア仮説と名づけている。マサとは塊を意味するラテン語である。アルミ基板にあげた円柱状の穴の中に放射線耐性で知られる *Deinococcus* 属細菌の乾燥菌体を充填し、宇宙空間に1年間曝した(図1)。地上帰還した曝露微生物の生存率を解析したところ、100 μm 厚の菌凝集体は死滅していたが、500 μm 厚以上であれば、90%生存した。紫外線を遮蔽し宇宙曝露した菌体は、地上サンプルとほぼ同等の生存率を示した。これは真空、温度変化、放射線は深刻な生存率低下の要因ではないことを示す。つまり、菌凝集体が100 μm 厚では紫外線が透過し死滅するが、500 μm 厚あれば表層の細胞は死滅するものの、内部まで紫外線が到達せず生存できることがわかった(図2)。またDNA損傷を、DNA修復系遺伝子変異株を用いて調べたところ、500 μm 厚の凝集体の菌体内には塩基損傷、二本鎖切断が蓄積するが、復水したのち、DNA損傷を修復して生存できることがわかった(Kawaguchi, Y. *et al.*, under review)。また、共同研究者らによってプロテオーム解析が行われている。地上模

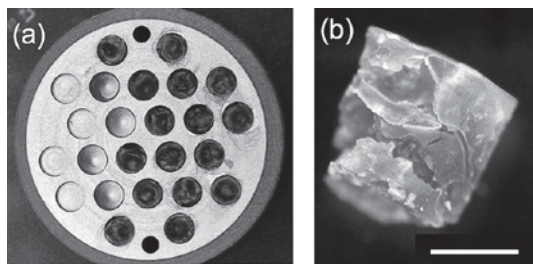


図1. (a) 1年間宇宙に曝露されたアルミ板(直径2 mm)を上から撮影。円柱状の穴が複数あり、その中に異なる量の乾燥菌体が充填されている。(b) アルミ板の穴に充填された *Deinococcus* 属細菌の乾燥菌体を取り出し撮影。Bar = 1 mm。

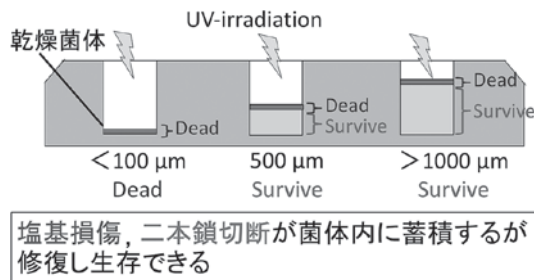


図2. たんぽぽの微生物曝露実験の結果のまとめ。アルミ板断面の模式図を示す。100 μm の厚さの菌凝集体は死滅するが、500 μm 以上の厚みがあれば表層下の菌体は生存可能である(Kawaguchi *et al.* under review)。

擬実験にてUVC照射した菌体は転写制御因子、クエン酸回路、DNA修復、活性酸素除に関わるタンパクが通常の菌体よりも大幅に増加することがわかった¹⁹⁾。現在、宇宙曝露した菌体のプロテオーム解析を進めており、生存だけでなく、宇宙環境が菌体内に及ぼす影響を生体分子レベルで解明する(Ott, E. *et al.*, in preparation)。

これまでの宇宙実験はそれぞれが1回限りの曝露実験として行われたのに対し、本計画では、ISSの同じ場所で1年、2年、3年間の曝露実験を行っている。1年目の結果はすでに得られているが、今後2年間、3年間曝露した後の生存率をプロットし、推定生存曲線を外挿することで、100年、1000年先の生存率も推定することが可能になる。一方で、500 μm 厚の菌凝集体が地球の重力を振り切り脱出することが物理的に難しいのも事実である。筆者らは、菌凝集体厚が500 μm より薄くても長期生存できる閾値となる厚みが存在するのではないかと考えている。より小さい凝集体の長期生存を確認する次期宇宙実験を検討中である。たんぽぽで得られた成果は、今後生命探査計画を考えるうえで、そこにどのような生物がいる可能性があるかを検討する際、非常に重要である。

文 献

- 1) Nicholson, W. L.: *Trends Microbiol.*, **17**, 243 (2009).
- 2) Arrhenius, S.: Die Verbreitung des Lebens im Weltenraum. *Umschau*, **7**, 481 (1903).
- 3) Worth, R. J. *et al.*: *Astrobiology*, **13**, 1155 (2013).
- 4) Smith, D. J. *et al.*: *Astrobiology*, **13**, 981 (2013).
- 5) Kawaguchi, Y. *et al.*: *Orig. Life Evol. Biosph.*, **43**, 411 (2013).
- 6) Onofuri, S. *et al.*: *Astrobiology*, **12**, 508 (2012).
- 7) Fajardo-Cavazos, P. *et al.*: *Proc. Astrobiology*, **9**, 647 (2009).
- 8) Burchell, M. J. *et al.*: *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **352**, 1273 (2004).
- 9) Cockell, C. S. *et al.*: *Astrobiology*, **7**, 1 (2007).
- 10) Schuerger, A. C. *et al.*: *Icarus*, **165**, 253 (2003).
- 11) Yamagishi, A. *et al.*: *Biol. Sci. Space*, **21**, 67 (2007).
- 12) Kawaguchi, Y. *et al.*: *Astrobiology*, **16**, 363 (2016).
- 13) Yamagishi, A. *et al.*: *Astrobiology* (2018). doi.org/10.1089/ast.2017.1751
- 14) 山岸明彦ら: 日本航空宇宙学会誌, **66**, 173 (2018).
- 15) 山岸明彦: 生物工学, **96**, 680 (2018).
- 16) Hornek, G.: *Orig. Life Evol. Biosph.*, **23**, 37 (1993).
- 17) Horneck, G. *et al.*: *Adv. Space Res.*, **14**, 41 (1994).
- 18) Yang, Y. *et al.*: *Biol. Sci. Space*, **22**, 18 (2008).
- 19) Ott, E. *et al.*: *PLoS ONE*, **12**, 1 (2017).