

惑星科学フロンティアセミナー 2018

「宇宙における生命の起源と生命探査」

(2日目)

講師：山岸明彦 氏

(東京薬科大学生命科学部)

平成 31 年 2 月 18 日 (月) ～ 19 日 (火)

ノート作成者: オン 碧

目次

第1章 生命の初期進化	P. 3
1-1 真核生物の起源	
1-2 真核生物の系統学的な位置	
1-3 アミノアシル tRNA 合成酵素を用いた全生物の分子系統解析	
1-4 アミノアシル tRNA 合成酵素の分類	
第2章 生命の定義	P. 16
2-1 日本における生命の定義	
2-2 海外における生命の定義	
2-3 その他の生命の定義	
2-4 生命の定義のまとめ	
第3章 宇宙にありうる生命	P. 21
3-1 元素の可能性	
3-2 宇宙生命におけるありうる化学	
3-3 なぜ進化できたか	
3-4 知的生命は誕生するか	
第4章 宇宙に生命を探す	P. 25
4-1 地球大気圏の微生物	
4-2 地球低軌道の微生物	
4-3 火星での生命探査	
用語解説	P. 39
用語は、用語右上に“※章番号—アルファベット”を付け順に記す。	
参考文献	P. 40
第1章から順に記す。	

※各章において、会場での質問や議論についても記す。

質問・議論は (Discussion) と示す。

第1章 生命の初期進化

● 1-1 真核生物の起源

—真核生物の特徴

真核生物は、核やミトコンドリアなど様々な細胞器官を持つ。真核生物と原核生物（真正細菌・古細菌）では、細胞の大きさも構造も全く異なる（Fig. 1-A）。

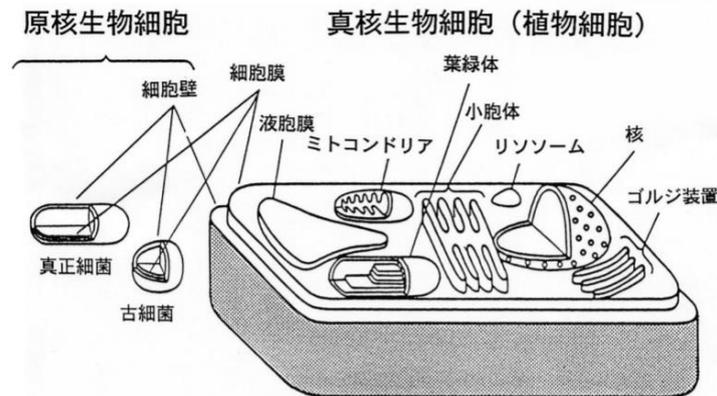


Fig. 1-A. 真正細菌・古細菌・真核生物の細胞内構造¹⁾

—真核生物への進化

真核生物がどのような過程を経て誕生したのかは様々な説が提案されている（Fig. 1-B）。Fig. 1-B (A) は、古細菌と真正細菌が融合したことから細胞質ができたというモデルである。さらに、Fig. 1-B (B) は、単なる融合ではなく真正細菌が古細菌を取り込む過程で真核生物が誕生したというモデルもあり、核の由来を示している。マーグリスの細胞内共生説を示す Fig. 1-B (C) は、細胞壁をもたない古細菌にスピロヘータが共生し、鞭毛をもつ細胞が誕生した。その後、 α プロテオバクテリアが共生してミトコンドリアに、シアノバクテリアが共生して葉緑体になったと考えられている。Fig. 1-B (D) は、現在の嫌気的環境に見られるメタン菌と真正細菌との共生関係に着目したモデルである。このような環境下では、古細菌であるメタン菌と真正細菌との水素を媒介とした共生関係が成立している。その共生関係がより密接になり、真正細菌がミトコンドリアになったと考えられている。Fig. 1-B (E) も、Fig. 1-B (D) と同様の考えを取り入れたモデルである。このモデルは、共生に関与した真正細菌として、 α プロテオバクテリアの他に δ プロテオバクテリアも関与してミトコンドリアになったと考えられている。

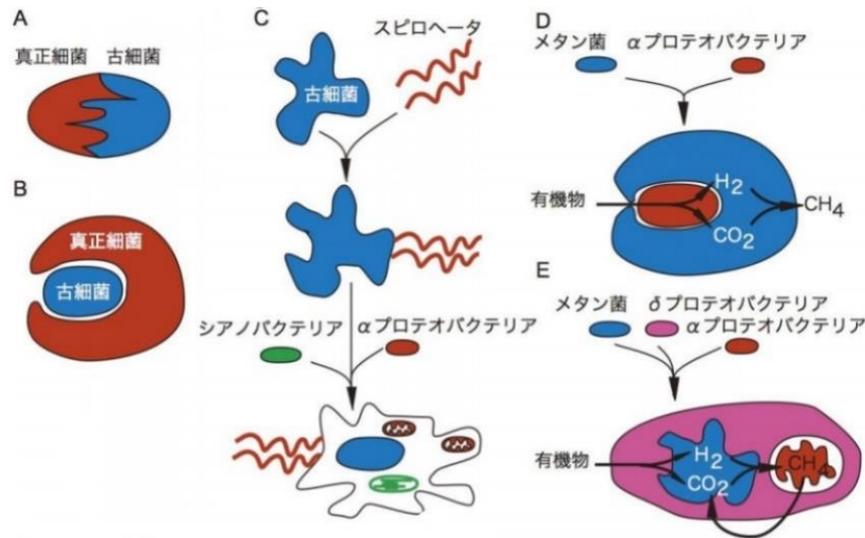


Fig. 1-B. 真核生物誕生として考えられる 5つのモデル²⁾

- A : 古細菌と真正細菌は融合したというモデル
- B : 真正細菌が古細菌を食べた（取り込んだ）というモデル
- C : 細胞壁を持たない古細菌に、まずスピロヘータが融合して鞭毛となり、その後 α プロテオバクテリアが細胞内共生してミトコンドリアに、シアノバクテリアが細胞内共生をして葉緑体になるというモデル（細胞内共生説）
- D : 古細菌（メタン菌）が真正細菌（ α プロテオバクテリア）と水素を介在した共生関係を経て融合し、 α プロテオバクテリアはミトコンドリアとなったという説
- E : 水素を介在とした古細菌（メタン菌）と α プロテオバクテリアだけではなく、 δ プロテオバクテリアも一緒に共生したことにより、細胞質および核などが形成された説

《Column》 進化は簡単に起こるのだろうか？

—タンパク質耐熱化酵素遺伝子の選択法

常温菌（大腸菌あるいは枯草菌など）の遺伝子を好熱菌に組み込み高温環境で培養すると好熱菌は生育しない。しかし、一晩常温で培養した後、高温環境下で培養すると好熱菌が生育する。生育したコロニーの遺伝子配列を調べ、どの遺伝子配列が変異したことで耐熱化することができたのかを調べることができる。

—枯草菌 IPMDH の進化的耐熱化³⁾

上記のタンパク質耐熱化酵素遺伝子の選択法を用いて枯草菌 IPMDH の進化的耐熱化の検証を行った。好熱菌（*T. thermophilus* BT5601）に常温菌の遺伝子（*B. subtilis* leuB）を組み込むと、56°Cでは生育するが 61°Cでは生育しなかった。しかし、一晩 56°C環境下で培養した後、61°C環境下で培養したところ生育するコロニー

が現れた (BTH6121, BTH6141, BTH6151)。そのうちの BTH6121, BTH6141 は、308 番目のスレオニンがイソロイシンに変わったことで、61°C環境下でも生育できるようになった。一方で、BTH6151 のように変異がなくとも生育可能になる株も出現する。続いて、同様に、一晚 61°C環境下で培養した後、66°C環境下で培養したところ、更に新たな変異を持った株が出現した。これを繰り返すことで、56°Cでしか生育できなかった株から、73°Cでも生育できる株が作出された (Fig. 1-C)。つまり、73°C環境下でも生育できる好熱菌は 4 日間で誕生することが示された。

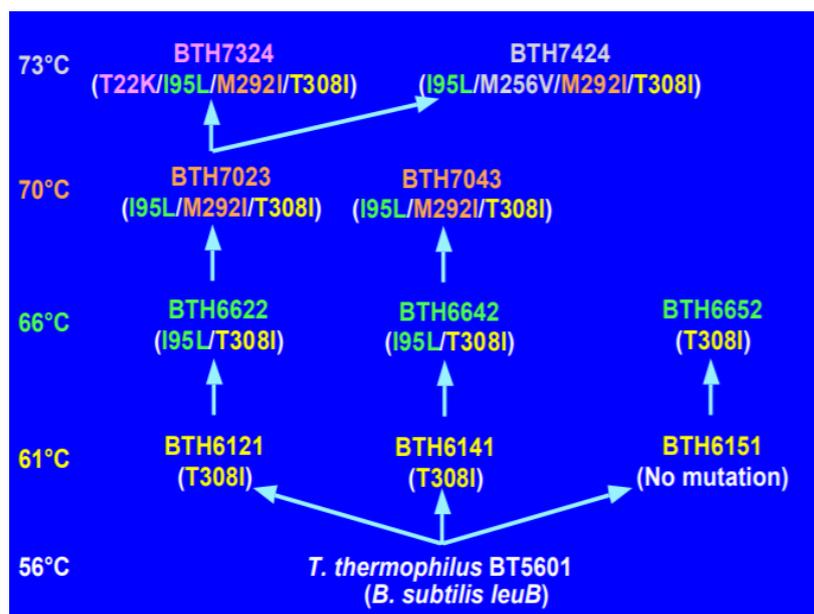


Fig. 1-C. 枯草菌 IPMDH の進化的耐熱化

—枯草菌 IPMDH の耐熱性の上昇

枯草菌 IPMDH の進化的耐熱化、クローニングした遺伝子を大腸菌の中で発現させそれがどのくらい耐熱性があるか検証した (Fig. 1-D)。Fig. 1-D から、実際に、耐熱性があることが示され、進化は 4 日間で起こることが示された。

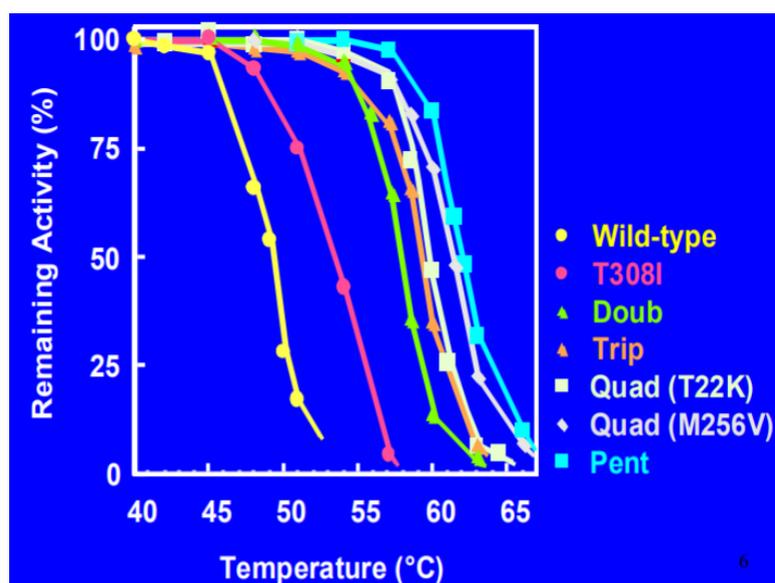


Fig. 1-D. 枯草菌 IPMDH の耐熱性の上昇

(Discussion) ただの常温菌をお湯にいれて少しずつ温度上昇させて耐えられる？
→耐えられない。

(Discussion) 一つの遺伝子を組み換えたのがポイントなのか？
→はい。

(Discussion) 好熱菌は目的をもって進化したわけではない？
→あたかも定向進化のように見えるが、あらゆる環境変化に対応できるようにランダムに起きた様々な変異の中で、耐熱できる菌が選択できたことを示している。個々のプロセスは完全なランダムである。

(Discussion) 菌にとって 56°C を居心地が良いのか？
→居心地が良いかは検証していない。居心地がいいかどうかは、培養して増殖速度をみてみないとわからない。

(Discussion) なぜ、一日に一つの変異なのか？
→①確率の問題、塩基数などとの兼ね合い。②良い変異がいくつも入る確率は低いため、変異が入るのは一つだろう。

(Discussion) この実験はいつ頃？
→1990年代。

● 1-2 真核生物の系統学的な位置

—系統関係についての議論（古細菌と真核生物は一緒か）

現在、生物は3つの大きな分類群から成り立っている（Fig. 1-E. Woeseの系統樹）。古細菌は真正細菌とは系統樹上ではっきりと分かれている一方で、古細菌と真核生物は接近しており、真核生物と古細菌は似た性質を多数持っている。そのため、真核生物が古細菌をもとに誕生したという考え方が近年受け入れ始めている（Fig. 1-E. Lakeの系統樹）。

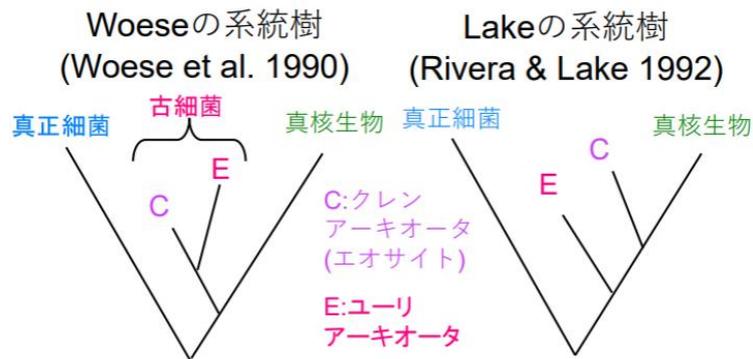


Fig. 1-E. 生物の系統分類。3ドメイン説（Woeseの系統樹）と2ドメイン説（Lakeの系統樹）^{4,5)}

では、もし真核生物が古細菌の中に入るのであれば、どの古細菌が一番真核生物に近いのか、また、2ドメイン説の場合、真核生物の祖先は何であるのだろうか。

—古細菌について

これまでに多くの古細菌が発見され、グループ分けされている（Table. 1-A）。学名がメタンで始まる種は、メタンを発生する微生物。サーモで始まる種は、高温に棲む微生物である。

Table. 1-A. 古細菌のグループ分け

TACKスーパーファイルム	ユーリアーキオータ	DPANNスーパーファイルム
クレンアーキオータ	アーケオグロビ	ディアフェロトリテス
タウムアーキオータ	ハロバクテリア	パーヴアーキオータ
コルアーキオータ	メタンバクテリア	ミクルアーキオータ
アイグアーキオータ	メタンコッキ	アエニグムアーキオータ
ゲオアーキオータ	メタンマイクロビア	ナノハロアーキオータ
バスイアーキオータ	メタンパイリ	ウーズアーキオータ
ロキアーキオータ	サーモコッキ	ペースアーキオータ
	サーモプラズマータ	

この中で、TACK スーパーファイルムのロキアーキオータは、他の古細菌よりも多くの真核生物特有の遺伝子を持っており、真核生物の祖先と考えられている（古細菌の中で一番真核生物に近い古細菌）（Fig. 1-F）。つまり、3分岐説ではないということが示される。また昨今は、2分岐説を支持する論文が多数投稿されている（祖先がどの古細菌であるかは諸説あるが、特に TACK スーパーファイルムを支持する論文が多い）（Table. 1-B）。

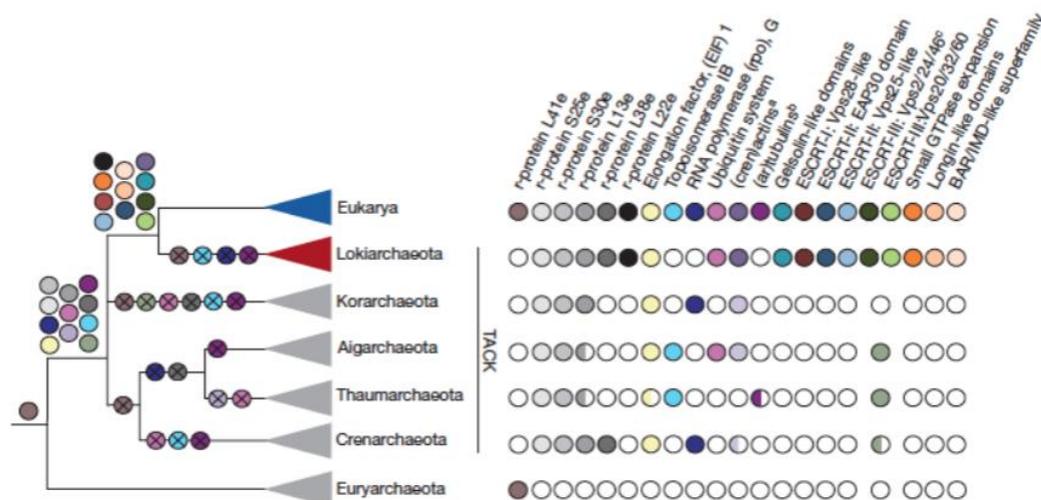


Fig. 1-F. 真核生物と古細菌の遺伝子解析⁶⁾

Table. 1-B. ゲノム配列解析で支持された進化もでると真核生物の近縁種

著者と出版年	遺伝子の数	モデル	真核生物近縁種
Ciccarelli et al. (2006)	31	三分岐	
Pisani et al. (2007)	No data	二分岐	Thermoplasma
Yutin et al. (2008)	136	三分岐	
Cox et al. (2008)	45	二分岐	Crenarchaeota 門
Foster et al. (2009)	41	二分岐	Cren. & Taum.
Kelly et al. (2011)	320	二分岐	Taumarchaeota 門
Guy and Ettema(2011)	26	二分岐	TACK 上門
Williams et al.(2012)	29	二分岐	TACK 上門
Rinke et al. (2013)	38	三分岐	
Williams et al.(2014)	29	二分岐	TACK 上門
Embley and Willams(2015)	36	二分岐	Lokiarchaeota 門

しかし、水平伝播があった場合にどの遺伝子で系統分類をするのが正しいかという問題がある。そのため、一つ一つの遺伝子で系統解析をする必要がある。

Fig. 1-G は、真核生物にどれくらい遺伝子が飛んでいるかを表した図である。図から、古細菌では、クレンアーキオータやユーリアーキオータから多数の遺伝子が飛ん

でいることが確認できる。また、真正細菌においても α 、 δ に関わらず遺伝子が飛んでいることがわかる。つまり、真核生物は様々な遺伝子で成り立っていることがわかった。これは、真正細菌・古細菌にも同様のことが言える。系統分類において、遺伝子解析は非常に重要であることがここから確認できる。

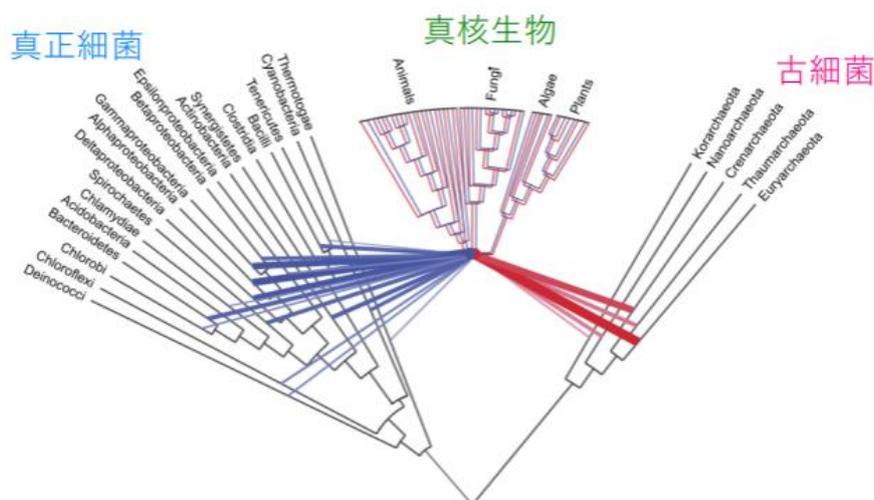


Fig. 1-G. 571 遺伝子それぞれの最尤系統樹によって構築された水平伝播のネットワーク 7)

一配列アライメントを用いた分子系統解析の問題点

ゲノムを用いた系統解析には、配列アライメント^{*1-A}の正確さ、遺伝子間での進化の道筋の違い、遺伝子水平伝播などの問題点がある。これらを解消するには、個々の遺伝子ごとにアライメントを吟味した上で、系統樹を作り、それを比較することで統合的に生物の進化を結論付けることが必要である。

(Discussion) 新しい古細菌は今でも見つかるのか？

→現在、ゲノムのみで新しい古細菌が見つかることが多い。まだゲノム配列解析がされていない古細菌も多くあるため、より真核生物に近い古細菌が見つかる可能性もある。

(Discussion) ロキアーキオータが遺伝子ジャンプで真核生物にたまたま入って、真核生物の祖先と考えられていることはないのか？

→可能性はある。系統樹をして解析をすると飛んだのか垂直伝播なのかの区別がつく。しかし、全部をまとめてしまった系統樹であると、中和してしまっているため判断ができない。複数の遺伝子がないと系統樹の形が違うとは言えない。

(Discussion) 真核生物だけ水平伝播が起こっているのか？

→真核生物だけでなく古細菌や真正細菌でも起こっている。系統樹は網である。どのドメインでも遺伝子解析が必要であるが、膨大すぎてまだできていない。

● 1-3 アミノアシル tRNA 合成酵素を用いた全生物の分子系統解析

—アミノアシル tRNA 合成酵素とは

tRNA は 100 塩基に満たない短い RNA で、翻訳を担う重要な分子である。tRNA のコドンに対応する正しいアミノ酸が末端部分に結合される。この反応を担っているのがアミノアシル tRNA 合成酵素 (ARS) である。タンパク質は 20 種類のアミノ酸から構成されるが、各々のアミノ酸に対応して ARS も 20 種類ある。例えば、グリシンを結合する酵素はグリシン tRNA 合成酵素であり、バリンを結合する酵素はバリン tRNA 合成酵素である。それぞれの酵素は、それぞれのアミノ酸に対応したアンチコドンを持つ tRNA だけとアミノ酸を結合するように働き、翻訳される (Fig. 1-H)。

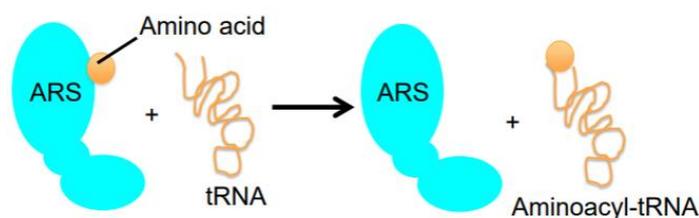


Fig. 1-H. アミノアシル tRNA 合成酵素の働き ⁸⁾

ARS は異なる起源を持つ 2 つのグループ Class I ARS と Class II ARS に大別され、それぞれの Subclass に配列や構造から分類される (Fig. 1-I)。

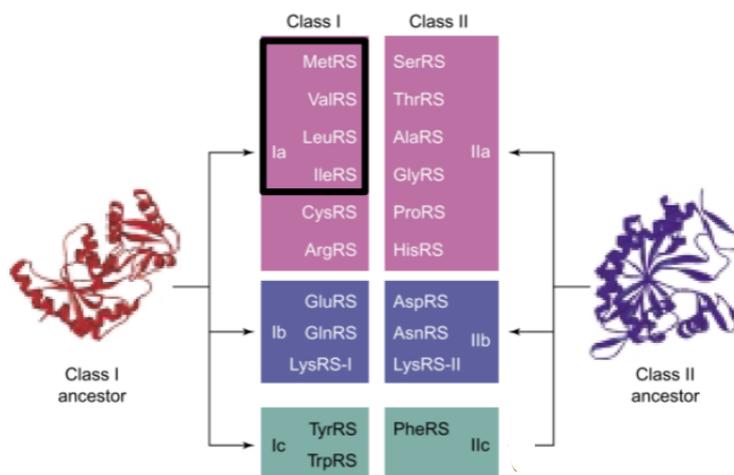


Fig. 1-I. アミノアシル tRNA 合成酵素のグループ分け ⁹⁾

—なぜARSを用いるのか

ARSを遺伝子解析に用いる理由として、以下の3点が挙げられる。

1. 翻訳に関わるため生物にとって重要な酵素である
2. 全生物が持っている酵素であることが期待されることから分子系統解析に適している。
3. 全生物の系統関係を議論できる

—ARSの系統樹からみた真核生物の成立過程

Fig.1-Jより、Ser、Glu、Gly、LeuRS系統樹においても真核生物は古細菌に由来し、二分岐説を支持していることが示された。真核生物SerRSに最も近縁な古細菌はロキアーキオータSerRS、真核生物GluRSに最も近縁な古細菌はタウムアーキオータGluRS、真核生物GlyRSに最も近縁な古細菌はメタノコッカスGlyRS、真核生物LeuRSに最も近縁な古細菌はクレンアーキオータLeuRSであることがわかる。真核生物が単系統の場合、7つの真核生物細胞質ARSの祖先として推定される古細菌と真核生物と近縁な分類群を示す (Table. 1-C)。Table. 1-Cより、TACKスーパーファイラム、ユーリアーキオータ、DPANNスーパーファイラムのいずれもが真核生物の祖先であると推定された。つまり、真核生物ARSは複数の古細菌ARSに由来していることがわかる。また、真核生物が単系統の場合、5つの真核生物細胞質ARSの祖先として推定される真核生物と近縁な真正細菌の分類群を示す (Table. 1-D)。Table. 1-Dより、5つの真核生物ARSはミトコンドリアの祖先であると考えられている α プロテオバクテリアと関係のない種に由来した。オルガネラの祖先とは関係ない真正細菌から複数の遺伝子水平伝播が真核生物の誕生に関与していることを示している。また、Table. 1-CおよびDより二分岐説を支持できることがわかる。

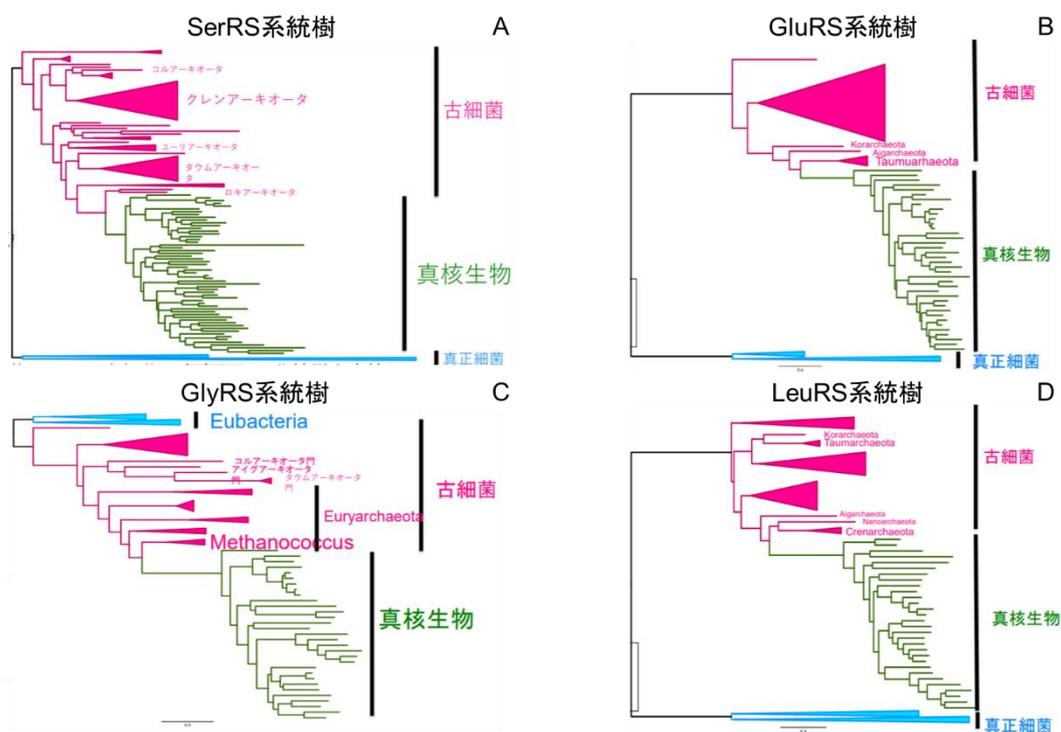


Fig. 1-J. ARS の系統樹⁸⁾

Table. 1-C. 真核生物細胞質 ARS の推定される古細菌祖先⁸⁾

	真核生物と近縁な分類群	推定される古細菌祖先
SerRS	ロキアーキオータ	TACKスーパーファイラム
GlyRS	ハロバクテリア	ユーリアーキオータ
GluRS	ミクラーキオータ (タウムアーキオータ)	DPANNスーパーファイラム (TACKスーパーファイラム)
LeuRS	ウーズアーキオータ (クレン、 アイグ、ナノ、パーヴ、アエニグム)	DPANNスーパーファイラム (TACKスーパーファイラム)
TrpRS	パーヴアーキオータ (TACKスーパーファイラム、 DPANNスーパーファイラム)	DPANNスーパーファイラム (TACKスーパーファイラム)
PheRS- α	ハロバクテリア、パーヴアーキオータ、ユーリアーキオータ、 ウーズアーキオータ	DPANNスーパーファイラム
PheRS- β	TACKスーパーファイラム、 ユーリアーキオータ	TACKスーパーファイラム、 ユーリアーキオータ

Table. 1-D. 真核生物細胞質 ARS の推定される真正細菌祖先⁸⁾

	真核生物の由来	真核生物と近縁な分類群
ValRS	真正細菌由来	δプロテオバクテリア (クリシオジェネンテス、プロテオバクテリア)
LysRS	真正細菌由来	アクイフェックス
ThrRS	真正細菌由来	δプロテオバクテリア、ジェマティモナス、ポリバクテリア (クリシオジェネンテス)
IleRS	古細菌由来の真正細菌由来	レンティスファエラ (クラミジア、フィロバクター、スピロヘータ)
AspRS	古細菌由来の真正細菌由来	真正細菌

—ARS に基づく新しい系統樹

ARS に基づく新しい系統樹を Fig. 1-K に示す。Fig. 1-K より、真核生物はドメインアーキアのサブドメイン、古細菌はドメインアーキアのサブドメイン、真正細菌はドメインバクテリアのサブドメインと考えられる。

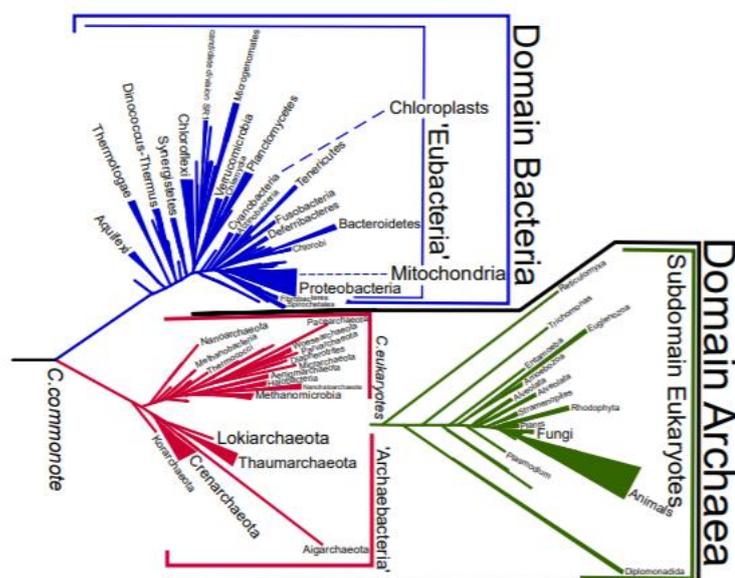


Fig. 1-K. ARS に基づく新しい系統樹⁸⁾

ここまでをまとめると、真核生物は、古細菌や真正細菌の遺伝子水平伝播で誕生し、その後ミトコンドリアや葉緑体が共生したと考えられる (Fig. 1-L)。

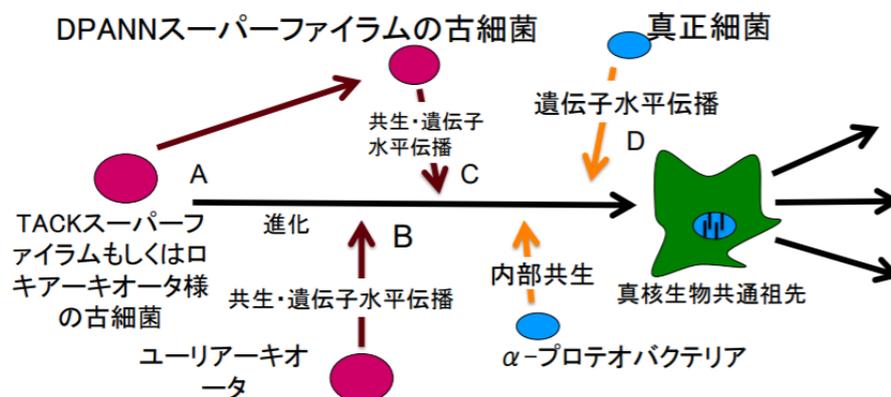


Fig. 1-L. ARS の系統樹からみた真核生物成立過程⁸⁾

A: SerRS, (GluRS), (LeuRS), (TrpRS), (PheRS-β), (ProRS)

B: GlyRS, CysRS, (PheRS-α), (PheRS-β)

C: GluRS, LeuRS, TrpRS, AsnRS, ProRS, (AlaRS), (PheRS-α)

D: ValRS, LysRS, TheRS, IleRS, AspRS, AlaRS, MetRS, ArgRS

(Discussion) 新しい系統樹に対する批判は？

→なぜ ARS を用いるのかという意見がある。重要な遺伝子であるため行ったが、すべての遺伝子で解析を行う必要がある。しかし二分岐説であると考ええる。

(Discussion) 新しい系統樹において真核生物は特殊なのか？

古細菌は特別なバラエティなのか？

→細胞内の形が違うから真核生物と古細菌は別物。この考え方は、生物学者には受け入れられるが系統分類学者には受け入れるのが難しい。真核生物を分子、原核生物を原子と考える。真核生物の取り扱いはまだ確定していない。

(Discussion) 絶滅した古細菌から水平伝播した可能性はないのか？

→可能性はある。系統樹からもわかり、水平伝播ではない。

● 1-4 アミノアシル tRNA 合成酵素の分類

アミノアシル tRNA 合成酵素の分類を Fig. 1-M に示す。20 種のアミノアシル tRNA 合成酵素は全生物の共通祖先 (コモノート) で既に誕生していたと考えられる (細かい例外を省く)。コモノート以降の ARS の分類の進化的変遷を推定するために、Subclass 別 ARS の分子系統解析を行った。ARS はコモノートで 20 種出そろっていたと推定できる。しかし、コモノート以前では ARS の種類は 20 種もなかったと考えられる。Class IIa ARS において、アミノ酸の類似性やタンパク質の構造から、ThrRS と SerRS が近縁であると考えられていたが、ProRS と SerRS がより近縁であった。このことから ThrRS と SerRS が分岐した後に ProRS が誕生したと推定さ

れ、Pro がアミノ酸レパートリーに後で入って来たと考えられる。Class IIa ARS では、HisRS、GlyRS ($\alpha 2$ 型)、ThrRS、ProRS、SerRS の順に分岐していることがわかる。これらのことから、ARS が順に分岐してきたことがわかる。

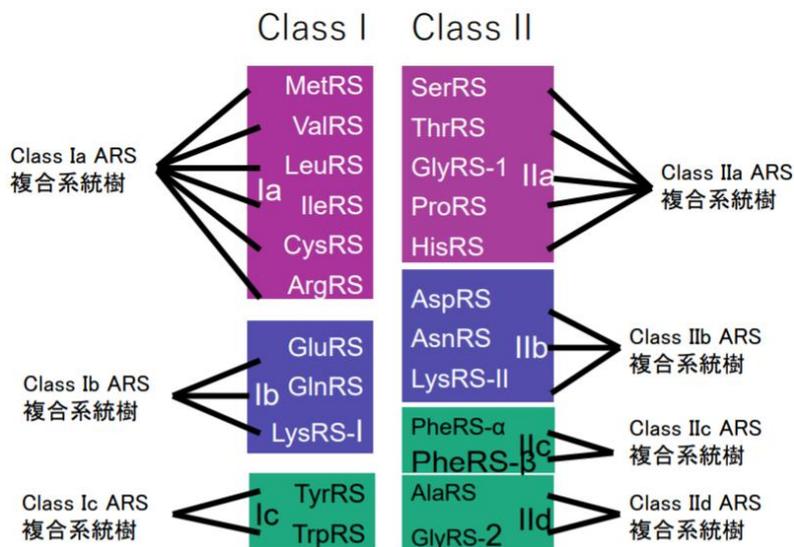


Fig. 1-M. アミノアシル tRNA 合成酵素の分類^{9, 10)}

(Discussion) 酵素を構成していたアミノ酸は何種類のアミノ酸でできていた？
 →これも疑問の一つである。酵素は 20 種のアミノ酸でできていたという考え方と、
 現在よりも少ないアミノ酸でできていたという考え方がある。

第2章 生命の定義

地球外に生命を探すとき、どのような生命がいるのか、何でできているのか、どのような形であるのか、考える必要がある。つまり、地球外で生命探査をする上で生命を定義づけなければ、生命であることを判断し難くなってしまう。この章では、現在ある生命の定義について、いくつか紹介する。

● 2-1 日本における生命の定義

次の6項目のうち生命と呼べるのはどれか、考えてみてほしい。

ウサギ、ミツバチ、赤血球、コンピュータウイルス、ローソクの炎、コンピュータ（会場では、ウサギ・ミツバチが生命であるという意見が多数であった。）

現在、日本では以下の4つの項目が生命の定義として考えられている。

1. 境界（膜）に囲まれている
2. 代謝している
3. 複製（増殖）する
4. 進化する

これは、日本の生化学者である江上不二夫博士の著書「生命を探る（岩波新書）」からまとめられた項目である。これを踏まえた上で、先ほどの6項目の生命についてもう一度考えると以下のように考えられる（Table. 2-A）。

Table. 2-A. 日本の生命の定義で生命を考える。○；生命である、×；生命でない

	ウサギ	ミツバチ	赤血球	PCウイルス	ローソクの炎	PC
膜	○	○	○	×	×	○
代謝	○	○	○	×	○	○
複製	× ^{※2-1}	× [※]	×	○	○	○
進化	×	×	×	○	×	○

※2-1：ウサギやミツバチは雄雌が存在しないと複製することができないため×と考えている。

ここからもわかるように、「境界（膜）に囲まれている」と「代謝している」の項目は比較的容易に判断することができるが、「複製（増殖）する」と「進化する」は、判断が難しい。

● 2-2 世界における生命の定義

生命の定義はないという考え方もあるが、ここでは海外で考えられている生命の定義を紹介する。

ーサッピの定義

フレデリック・サッピは、「The structure of Scientific Theories」において、生命の定義を必要条件と十分条件と示している。

ーニーチェの定義

フリードリヒ・ヴィルヘルム・ニーチェは、生命を “There are concepts that can be defined, whereas others only have a history.” と述べている。

ージョイスの定義（NASA の定義）¹¹⁾

ジェラルド・ジョイスは、生命を「ダーウィン進化^{※2-A}を行いうる、自己維持できる科学システムである。」と定義している。これを踏まえて先ほどの 6 項目の生命についてももう一度考えると以下のように考えられる（Table. 2-B）。

Table. 2-B. ジョイスの定義で生命を考える

ウサギ	ミツバチ	赤血球	PCウイルス	ローソクの炎	PC
○	○	○	△ ^{※2-2}	×	△

※2-2：システムをどう考えるかで PC ウイルスも生命になり得る。

しかし、まだ生命と判断し難い項目があり、NASA はこれに「カーボンベースドライフ（炭素が主な元素である生命）」を加えて、生命の定義を考えている。

ーコシュランドの定式化¹²⁾

ダニエル・コシュランドは、生命を定義づけるのは難しいと考え、生命を特徴づける 7 つの基礎的な原理をまとめた。

1. Program—プログラム（遺伝情報）を持つ

DNA に記録されたプログラムを持つこと。遺伝情報に記録されたプログラムによってタンパク質が作られ、細胞内で反応を起こさせる。

2. Improvisation—適応進化をする

環境の変化が起きた場合、プログラムに変異がはいる、変異が入ったプログラムを持つ生き物の中からより好ましい対応をしたものが選択される。

3. Compartmentalization—境界で囲まれている

細胞膜あるいは皮膚で外界から区切られていること。生命が営む反応に関与する分子や触媒の濃度を維持することが必須であり、それを維持するための境界が必要である。

4. Energy—エネルギー

生物は開放系であり、様々な分子を取り込んで反応を進行させている。そこでは必ずエントロピーの増加があるので、それを補うためにエネルギーを常に補給する必要がある。地球では主に太陽のエネルギーによって生命活動は維持されている。

5. Regeneration—再生

例えば心筋は一生の間止まることなく動き続けることができる。それは、心筋をつくるタンパク質が新たに作られ常に古い物に置き換わっている（再生している）からである。生命はそれだけで無く、細胞分裂によって古い細胞を新しくし、年取った個体が子供を産むことによって新しい個体となり再生する。

6. Adaptability—適応

適応進化が遺伝のプログラムを書き換える事によって環境変動に適応するのに対し、生命はもっと短時間のうちに環境変動に対して適応できる。これは、適応が予めプログラムの中に書き込まれていることによって実現している。

7. Seclusion—隔離

情報や反応が隔離されていること。細胞内では様々な反応基質や様々なシグナル伝達物質が共存している。しかし、それらの反応やシグナルはお互いに混線することなく独立した反応経路やシグナル伝達経路を実現している。

● 2-3 生命の性質

生命を定義づけるのは難しいため、いくつかの性質から生命の在り方を考えた。

—負のエントロピー

シュレディンガーは、生命の維持に負のエントロピー^{*2-B}が必要であると主張した。

「生命を持っているものは、崩壊して平衡状態になることを免れている。生物体は負のエントロピーを食べて生きている。」と、シュレディンガーは述べている。

※後に、エントロピーではなく自由エネルギーと論じるべきであるという批判から、生物体は負のエントロピーではなく自由エネルギーを食べて生きている、と考えら

れている。

—自由エネルギー（≒エネルギー）

生物は、自由エネルギーを使って生きている。自由エネルギーが平衡に達すると反応は停止するため死滅する。ヒトの場合を例に挙げると、自由エネルギーは食物と酸素である。自由エネルギーは、乱雑が多くなる反応および発熱反応を組み合わせることでエントロピーを減少させている。つまり、自由エネルギーを獲得してシステムを維持しているため、自由エネルギーがゼロになると反応は停止し死んでしまう。

—動的平衡

動的平衡について川を例に挙げて説明する。川が流れると、川の水分子は下流に流れる。その瞬間に川を構成していた分子は次の瞬間にはなくなる、川はなくならない。次に人を例に挙げてみよう。人の原子は、数百日後には全く別の物になるため、構成する原子で我々を定義することはできない。つまり、このことが生命の特徴のひとつであると考えられる。しかし、川のように生命でないものも含まれるため、生命の特徴であると断言するのは難しい。

—オートポエティックシステム（Autopoietic system）¹³⁾

オートポエティックシステムは、今まで挙げられた生命の定義や性質に重なる部分がある。オートポエティックシステムとは、自己維持的・自己増殖的な内部システムを持った存在であり、自立的に維持することができ、プロセスも含んでいるものを指す。

—散逸構造

散逸構造の例として、ジャボチンスキー反応

（関連動画：<https://www.youtube.com/watch?x-ytel=84924572&x-yttts=1422411861&v=IBa4kgXI4Cg>）を挙げる（Fig. 2-A）。

ジャボチンスキー反応とは、自己触媒的（フィードバック）酸化還元反応により、時間的空間的周期構造が生まれ、あたかも生きているかのように見える反応である。また、酸化還元基質が無くなると反応が終わるためあたかも、死滅したように見える。



Fig. 2-A. ジャボチンスキー反応

ーダイナミックカイネティックスタビリティ (DKS ; Dynamic kinetic stability)

ダイナミックカイネティックスタビリティもこれまでの定義や性質と重なる部分があり、自由エネルギーを使って非平衡に向かって進むが、そのプロセスでエントロピーの低い状態を維持している、ということを示している¹⁴⁾。

● 2-4 生命の定義のまとめ

- 1) 無いという考えもある、または、歴史的に定義される／説明される
- 2) NASA の定義 (あいまいな部分をまとめているためもう少しはっきりさせたい)
- 3) 日本での理解 (境界 (膜) に囲まれている、代謝している、複製 (増殖) する、進化する)
- 4) 生命を定義づけるのは、現在も研究対象である
- 5) 生物はシステムでありその要素は生きている (自由エネルギーや動的平衡は性質としてはいいが、定義としてはまだ弱い)

第3章 宇宙にありうる生命

● 3-1 元素の可能性

水素・炭素・窒素・酸素は宇宙で最も多い元素である (Fig. 3-A)。Table. 3-A は、ヒトの元素組成である。Fig. 3-B は、地球大気の組成および地球の元素組成を示している。これらのことより、地球の生命は宇宙のありふれた原子で作られたことがわかる。つまり、水素・炭素・窒素・酸素を使わない生命は少ないであろうと考えられる。水素と酸素は水の主成分であり、水が生体の70%を占めているので、この2つが主要な元素であることがわかる。また、タンパク質と核酸は水素・炭素・窒素・酸素を主成分としている。これら4種の元素に加えて、タンパク質には硫黄が、核酸にはリンが含まれていることから、硫黄とリンも生命にとって重要な元素である。

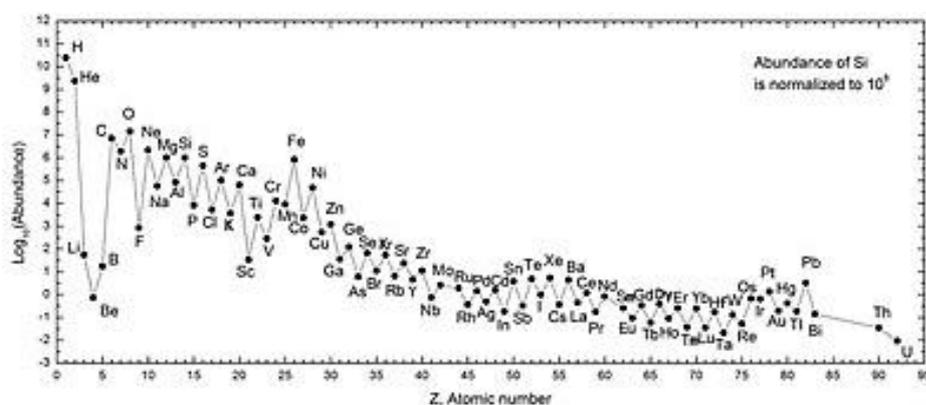


Fig. 3-A. 宇宙における元素の存在量¹⁵⁾

Table. 3-A. ヒトの元素組成¹⁶⁾

元素	乾燥重量(%)	元素	乾燥重量(%)
C	61.7	F	痕跡
N	11.0	Si	痕跡
O	9.3	V	痕跡
H	5.7	Cr	痕跡
Ca	5.0	Mn	痕跡
P	3.3	Fe	痕跡
K	1.3	Co	痕跡
S	1.0	Cu	痕跡
Cl	0.7	Zn	痕跡
Na	0.7	Se	痕跡
Mg	0.3	Se	痕跡
B	痕跡	Mo	痕跡

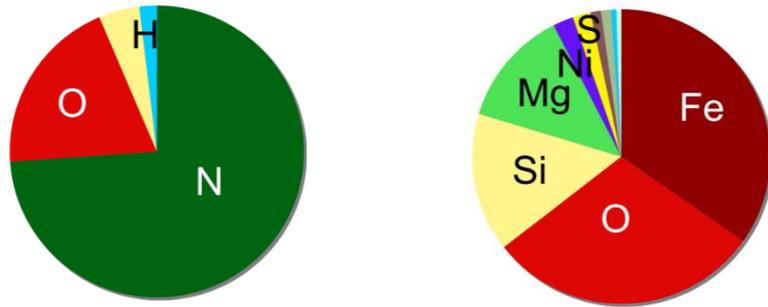


Fig. 3-B. 地球の大気を組成する元素（左）、地球の元素組成（右）

● 3-2 宇宙生命におけるありうる化学

—元素の置き換えの可能性

液体として水を使用し、生命に重要と考える6種の元素（水素・炭素・窒素・酸素・リン・硫黄）の置き換えを考える。水素をリチウムに置き換えることは、元素の性質が異なるため不可能である。炭素は、ケイ素に置き換えが可能である。窒素は、リンに置き換えることは可能であるが、アミノ酸の窒素をすべてリンに置き換えることは難しいと考えている。酸素は、硫黄に置き換えが可能だが、酸素は水中に多く存在するため置き換える必要がない。リンは、ヒ素に置き換えることが可能であるが、ヒ酸はリン酸に比べて不安定である。硫黄は、セレンに置き換えが可能であり、実際にすべての生命でセレンを硫黄の代わりに使うセレノシステインというアミノ酸が使われている。しかしすべてを置き換えているわけではない。

—ケイ素 (Si) 生命の可能性

ケイ素を使用した生命について考える。ケイ素は炭素と同様に4つの原子と結合できるが、炭素と酸素の結合に比べてケイ素と酸素の結合は、非常に安定であることから、二酸化ケイ素は二酸化炭素に比べて、還元するのにより大きなエネルギーが必要となる。つまり、光合成にケイ素を利用した生命は莫大なエネルギーが必要になる。また、二酸化ケイ素は、融点が1650°Cで沸点が2230°Cであり、水の中では固体で存在する。つまり、常温で気体である二酸化炭素よりも溶解度が低く使用が難しい。また、ケイ素が使用されたアミノ酸の代わりとなる化合物は天然には存在しない。このことから、ケイ素生命が存在する可能性はほとんどないと考えられる。

—水以外の液体を溶媒とする可能性

液体として表面に存在するのは、水・メタン・ケイ酸である。しかし、ケイ酸は融点・沸点が高温であるため、メタンあるいは水の液体が溶媒として存在する可能性が大きいと考えられる (Table. 3-B)。

Table. 3-B. 水とそれ以外の化合物について

		融点(°C)	沸点(°C)	存在	場所
水	H ₂ O	0	100	ある	表面
アンモニア	NH ₃	-77.7	-33.3	ある	内部
メタン	CH ₄	-182.5	-161.6	ある	表面
ケイ酸	SiO ₂	1650	2230	ある	表面
鉄	Fe	1535	2750	ある	内部

生命に欠かせない分子として、脂質がある。脂質でできた膜（脂質膜）によって細胞は包まれている。脂質は、分子内に親水性部分と疎水性部分がある（Fig. 3-C）。水が溶媒の場合、Fig. 3-Cのように疎水性部分を背中合わせに親水性部分が水に面し膜を作る。水以外の液体として考えられるメタンが溶媒である場合、メタンは親水性でないため、水の膜とは親水性・疎水性部分が逆になる。

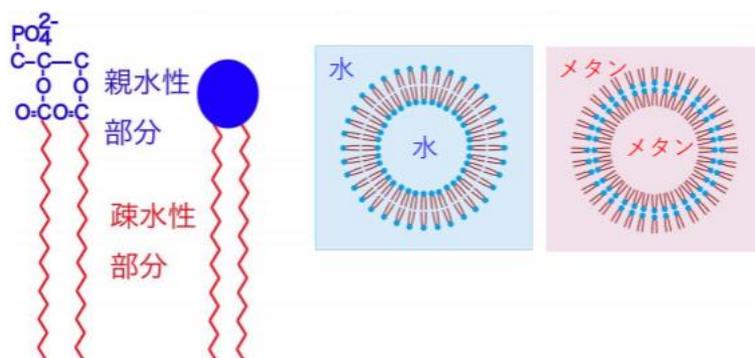


Fig. 3-C. 脂質と脂質膜の構造

● 3-3 なぜ進化できたか

—タンパク質の誕生

例えば、100 アミノ酸のすべての可能性を試してタンパク質ができたとすると、タンパク質の誕生には、 $20^{100} = 10^{130}$ 通りある。宇宙のすべての原子（ 10^{70} 原子）を使って、宇宙が誕生して（ 3×10^{17} 秒）から毎秒一回試すと考えると、 3×10^{87} 通りとなり、タンパク質は宇宙時間では1個もできないことになる。

では、どのようにしてタンパク質ができたのだろうか。答えは、ダーウィン型進化である。ダーウィン型進化では、ある個体から多数の変異を持つ個体が誕生し、そこから最適者が選ばれる。それを繰り返すことにより変異が蓄積し進化できる（Fig. 3-D）。つまり、まずでたらめに100アミノ酸配列を作り、そのうちのひとつのアミノ酸に変異を加える。そのなかで一番良いものを選択することを100回繰り返すと 20^{100} 通

りを試すことができる。生物の場合、一世代で個体数通りの変異を調べることができる。例えば、海水の場合、 $10^{21}\text{L} \times 10^7$ 細菌 = 10^{28} 細菌があり、100 世代/年 = $(10^{28})^{100}$ 、変異確立が 10^{-8} としても、年に $(10^{20})^{100}$ 試すことができる。生物が徐々に進化してきたことを考えると生命が誕生する可能性は宇宙時間で十分に考えられる。

● 3-4 知的生命は誕生するか

— 知的生命が誕生する確率

知的生命（高度に発達して電波文明もつ）が誕生するか考えてみる。現在、存在する生命の種数は 870 万種（諸説あり）である。これまで存在した生命（仮に 10 億種だとする）の中に知的生命は 1 種（人類）だけであった。つまり確率は $1/10$ 億であるが、地球上ではこれまで 10 億種で試されたと考えると、 $(1/10$ 億) $\times 10$ 億 = 1 となり、知的生命が誕生する確率は 1^{*3-1} となる。

※3-1：この確率は、地球のみで考えている

— 知的生命が誕生するには

知的生命誕生のためには、大きさや重力が地球と同じであり、水があるハビタブルな惑星（地球型）だと考える。生命誕生には水が重要になるが、知的生命体が電波を用いて情報通信を行うと考えると、知的生命体の誕生には陸も重要となる。陸上で生息すると考えると、足・手・頭（脳）・口・目・情報伝達（意思疎通）が必要であると考える。以下に、それぞれの理由や特徴を示す。

手：知性が発達すると生活の上で道具が必要となる。道具を作るために、道具を作れる手のようなものが必要であり、作業をするとなると 2 本以上は必要となる。

脳：他の生物を捕らえエネルギーを獲得する生物ならば、外界から情報を受け取り得られた情報を処理する機能が発達していると考えられる。つまり、少なくとも神経系を持ち、神経系が進化して脳を持っていると考えられる。

目：太陽と同じような恒星のある惑星に棲む生物は、可視光線を情報入手手段としていると考えると目を持っていると考える。

情報伝達：情報伝達として、視覚に頼った情報伝達手段（手振り身振り、表情、手話）などがあるが、目の前を遮るものがあると伝達が難しくなる。音波による情報伝達は、相手が見えない場所においても情報を伝えることができるが、遠距離や真空である宇宙空間だと伝達できない。電波を使用した情報伝達は、情報を伝える速度および距離の点で特に優れている。知的生命の誕生には、音波（言語）や電波による情報伝達が行われてると考えられる。

第4章 宇宙に生命を探す

● 4-1 地球大気圏の微生物

一大気圏微生物採集実験

地球上の微生物がどこまでいるのか、惑星間の移動は可能なのか、これらを検証するために、これまでに大気圏微生物採取実験が行われていた (Table. 4-A)。

Table. 4-A. 大気圏微生物採取実験の歴史

年	実験手法	高度 (Km)	採集方法	分離菌	研究者
1936	気球	11-12	パラシュートで落下する無菌のサンプリング装置	<i>Bacillus</i> sp., Fungi	Rogers, L. A., Meier, F. C.
1966	航空機	3	溶解性のゼラチン泡フィルター	Fungi, <i>Bacillus</i> , <i>Micrococcus</i>	Fulton, J. D.
1967	気球	10-30	ポリウレタン泡フィルターによる空気の吸引ろ過	<i>Micrococcus</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Calosporium</i>	Bruch, C. W.
1976	気象観測 ロケット	48-58	フィルム上の栄養培地	<i>Micrococcus</i> , <i>Micobacterium</i>	Imshenetsky, A. A., Lysenko, S. V., Kazakov, G. A., Ramkova, N.V.

Yinjie Yang、板橋志保、横堀伸一、山岸明彦らによって航空機を用いて成層圏で行われた微生物採集で、5株の微生物が採取された (Table. 4-B)。採取した株は非常に強い紫外線耐性を示し、これまで最も紫外線耐性が強い *Deinococcus radiodurans* と同程度、あるいは、より強い紫外線耐性を有することが示された (Fig. 4-A)。

Table. 4-B. 成層圏で行われた微生物採集で採取された微生物¹⁷⁾

Clone	Altitude	Related genus
ST 0316	10-12	<i>Deinococcus</i>
TR 0125	0.8-5.8	<i>Deinococcus</i>
TR 0126	4.6-10	<i>Streptomyces</i>
TR 1103-2	1.2-7.8	<i>Bacillus</i>
TR 1103-3	7.8-12.2	<i>Paenibacillus</i>

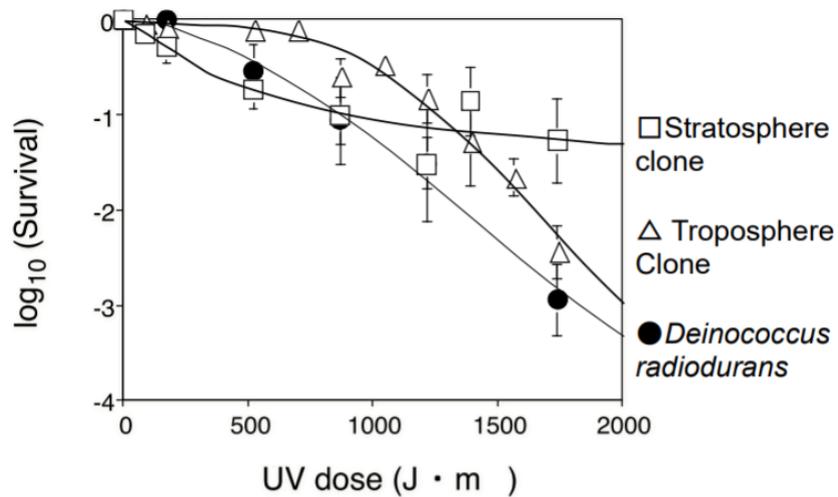


Fig. 4-A. 採取された株の紫外線耐性¹⁷⁾

Yinjie Yang、横堀伸一、山下隆正、斉藤義隆、福家義一、山岸明彦らによって大気球を用いた微生物採集が行われた。Fig. 4-Bは採集した微生物である。採集された微生物の遺伝子を解析した (Fig. 4-C)。Fig. 4-C より、アメリカやインドの上空でも似たような微生物が採集されていることが明らかになった。

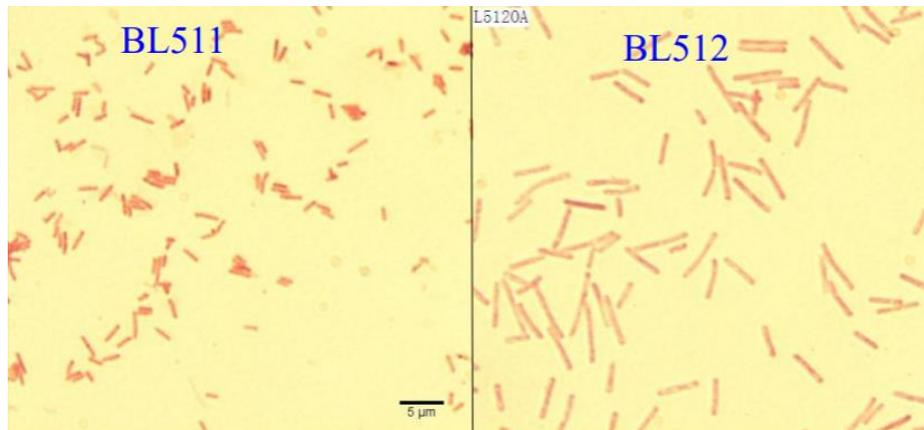


Fig. 4-B. 大気球で採集された微生物¹⁷⁾

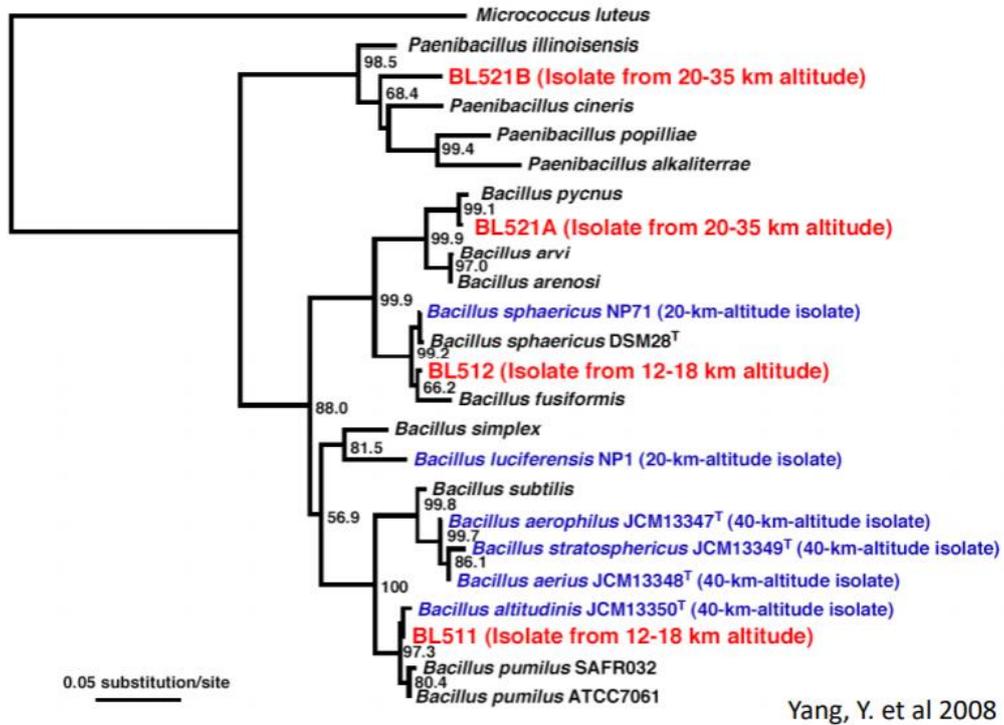
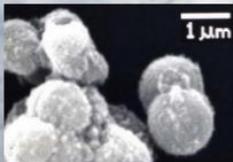


Fig. 4-C. 大気球で採集された微生物の遺伝子解析による分類¹⁷⁾

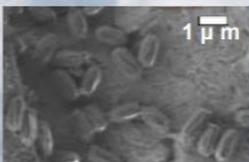
微生物採集実験で採集された微生物一覧を Table. 4-C に示す。Table. 4-C より、胞子を作る菌が多いことが明らかになった。

Table. 4-C. 大気圏微生物採集実験で採集された微生物の一覧

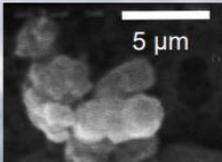
高度 (km)	方法	捕集された微生物種 (文献)
0.8-12	飛行機	<i>Deinococcus</i> sp., <i>Streptomyces</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Paenibacillus</i> sp. [1]
12-35	大気球	<i>Bacillus</i> sp., <i>Paenibacillus</i> sp. [4]
20	飛行機	<i>Micrococcaceae</i> , <i>Staphylococcus</i> , <i>Brevibacterium</i> . [5]
41	大気球	<i>Bacillus</i> sp., <i>Staphylococcus</i> sp., <i>Engyotontium</i> sp. [3]
48-77	ロケット	<i>Mycobacterium</i> sp., <i>Micrococcus</i> sp. [6]



Deinococcus sp. [1]



Bacillus sp. [2]



Aggregated cells [3]

[1] Yang et al., 2008 [2] Smith et al., 2011 [3] Wainwright et al., 2004, [4] Yang et al., 2008b [5] Griffin et al., 2008 [6] Imshenetsky et al., 1974

—微粒子上空移動機構

微粒子が上空に移動する仕組みとしていくつかの要因がある (Fig. 4-D)。ロケットなどによって粒子が移動したと考えられる。また、エルブスやブルージェットスプライトなどの放電現象において粒子が電荷を帯びていた場合、移動すると考えられる。

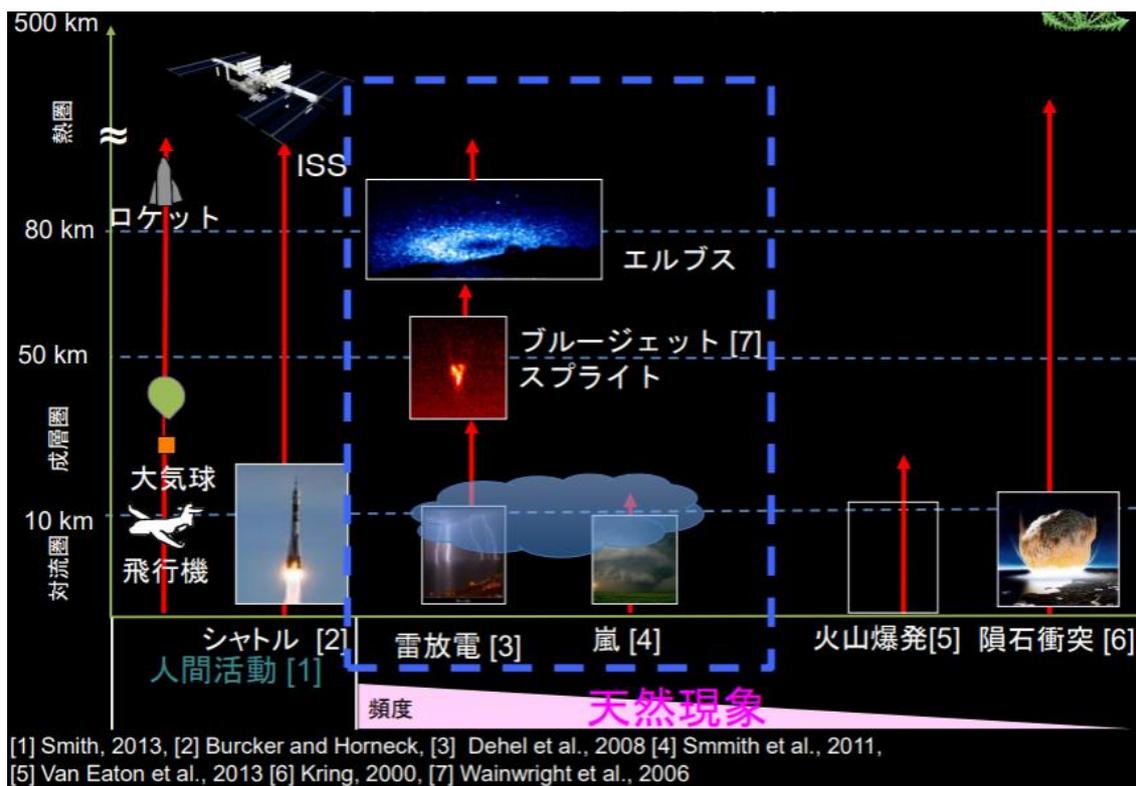


Fig. 4-D. 微粒子上空移動機構について

● 4-2 地球低軌道の微生物

4-1では、数十キロメートル上空まで微生物が存在することが示された。4-2では、地球低軌道（国際宇宙ステーションが周回する400キロメートル上空）で行われている微生物・有機物の曝露や探索の宇宙実験（たんぼぼ計画）について示す。

—たんぼぼ計画とは

たんぼぼ計画では、国際宇宙ステーション^{*4-A}が周回する地球低軌道において、有機物・微生物の宇宙曝露と宇宙塵^{*4-B}・微生物の捕集を行っている (Fig. 4-E)。たんぼぼが綿毛のついた種を風でふわふわ飛ばすことをパンスペルミア仮説^{*4-C}になぞり「たんぼぼ計画」と呼ばれている。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、国際宇宙ステーション「きぼ

う」日本実験棟船外曝露部で、同年の5月26日から宇宙空間曝露実験が開始された (Fig. 4-F)。2016年以降3年間、宇宙曝露した微生物とエアロゲルが毎年地上に持ち帰られ、2018年にすべてのサンプルが帰還した。地上に帰還した曝露微生物とエアロゲル^{*4-D}はそれぞれ、分析担当者に配分され分析されている。また、同プロジェクトの第二弾が先日開始された。

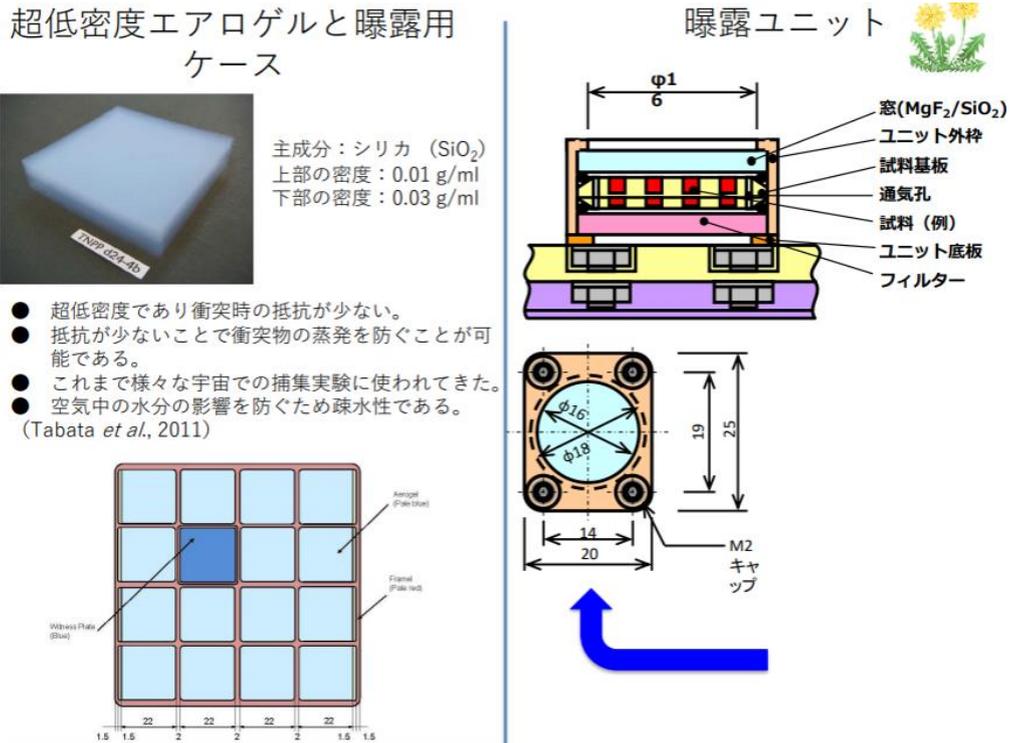


Fig. 4-E. たんぽぽ計画で用いている実験器具
左：宇宙塵を捕集するエアロゲル、右：有機物・微生物の曝露パネル

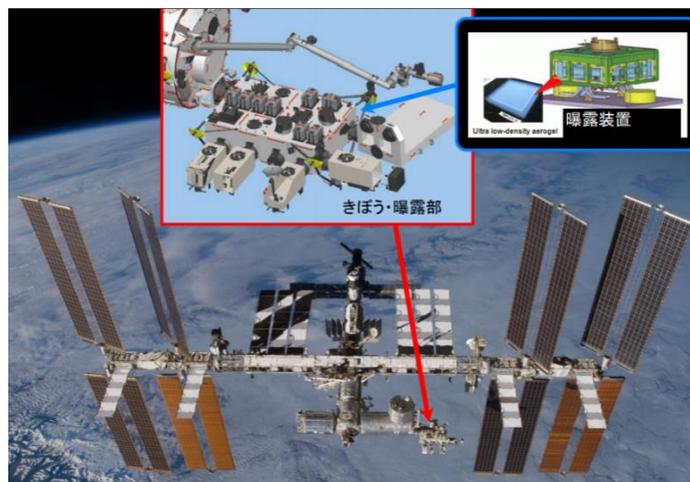


Fig. 4-F. 「きぼう」日本実験棟船外曝露部と曝露装置取り付け場所

—たんぼぼ計画の目的

生命の惑星間移動仮説である「パンスペルミア仮説」の実証と化学進化（生命の起源以前の宇宙由来有機物の地球到達の可能性）、宇宙開発利用の発展に繋がる先端的技術開発を目的とし、以下の6つの項目を行っている。

1. 圏外で微生物採集
2. 微生物の圏外生存実験
3. 有機物の変性
4. 有機物含有宇宙塵の採集
5. 高性能エアロゲル実証
6. 微小デブリフラックス評価

—たんぼぼ計画のこれまでの結果（1年目のみ）

・微生物の曝露

曝露微生物として、放射性耐性菌、シアノバクテリア、酵母が使用された（Fig. 4-G）。

放射線耐性菌は、0.5 mm の厚さで宇宙曝露を耐えることがわかった。紫外線による塩基変性、二本鎖切断が明らかになった。ISS 与圧部では、乾燥時酸化による二本鎖切断が明らかになった。シアノバクテリアは、紫外線遮蔽されれば宇宙空間でも生存することがわかった。

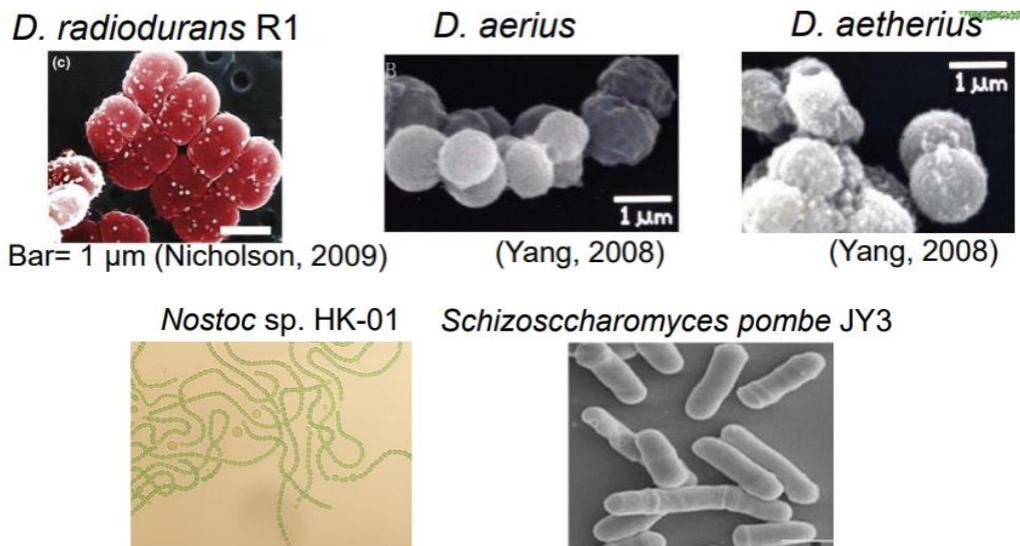


Fig. 4-G. たんぼぼ計画で用いられた曝露微生物

- ・有機物の曝露

有機物によっては、宇宙空間曝露後も残存する

- ・エアロゲルを用いて採集された有機物

帰還した曝露エアロゲルの衝突痕、粒子の有無、大きさの計測をする。衝突痕や粒子は切り出して、鉱物、有機物、微生物の分析をした。微生物解析は、蛍光色素で染色して微生物を検出し遺伝子の解析を行う。有機物解析は、有機物を抽出してアミノ酸の高感度分析を行う。鉱物分析は、シンクロトン放射を用いた分析を行う。

初期分析では、優先順位第一位の衝突痕 12 個見つかった。

—まとめ

たんぼぼ計画で得られた結果より、マサパンスペルミア仮説^{*4-E}を支持する結果となった。

● 4-3 火星での生命探査

—なぜ火星で生命探査を行うのか

・火星について

火星は地球のすぐ外側を回る惑星で、火星の直径は地球の約半分、質量は約10分の1である。24時間37分かけて自転しながら、687日かけて太陽のまわりを公転し、太陽系で最も地球に似た惑星である。これまでに、過去の火星に液体の水と海があった証拠が複数見ついている。火星には、水が流れた跡だと思われる地形や岩石、水の存在で形成される粘土鉱物などが見ついている。これらのことから生物が存在する可能性があると考えられている。

・火星の水

火星の地下に、大量の氷があることが周回衛星の地下探査から明らかにされている。水の氷は、極域に多いが、赤道近くの地下にも見ついている (Fig. 4 H-J)。また最近、周回機からのレーダー探査によって、火星南極地下に液体の水の存在が報告された (Fig. 4 H-J)。高緯度に着陸した火星探査機フェニックスの着陸機は、表面土壌を掘ってできた塊が数日後に消滅することを観察した。その地点の温度と圧力を考慮すると水の氷の塊であると考えられた。火星の周回機、マーズ・リコネッサンス・オービターが撮影した異なる時期の画像を比較すると、春と夏にクレーターの斜面に液体（濃い塩水の可能性）が確認されている。

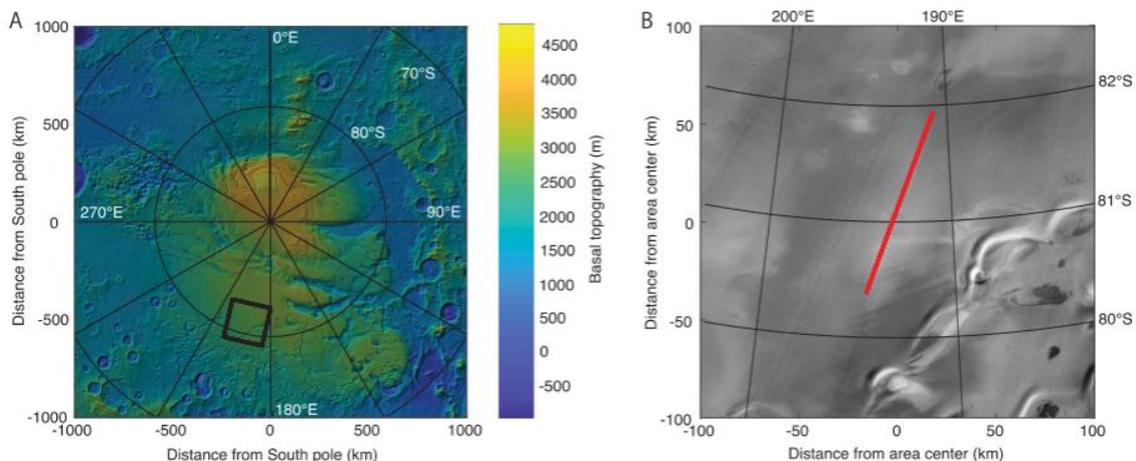


Fig. 4-H. 火星における水の存在（地下）¹⁹⁾

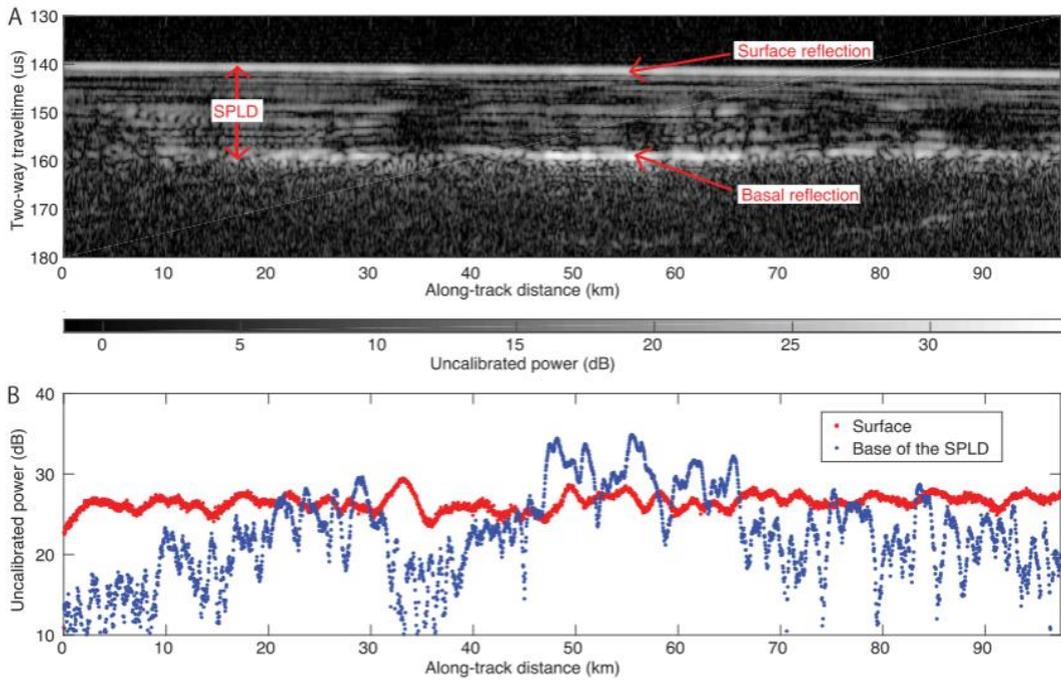


Fig. 4-I. 火星における水の存在（地下）¹⁹⁾

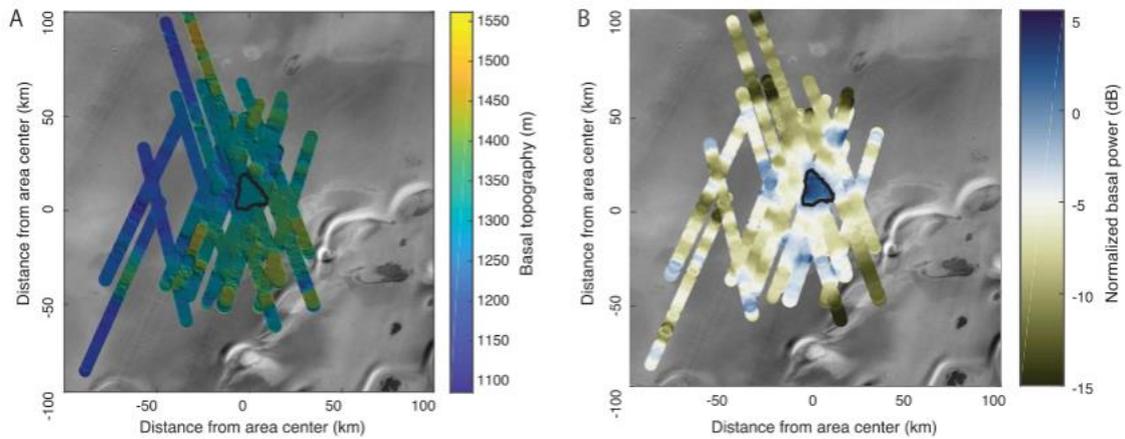


Fig. 4-J. 火星における水の存在（地下）¹⁹⁾

・火星のメタン

NASA の探査車 MSL（マーズ・サイエンス・ラボ；通称キュリオシティ）は、ゲルクレーターの中を移動しながら様々な分析を続けている。キュリオシティ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、探査期間のある一時期にメタンが低濃度ではあるが 10ppb 近く検出された（Fig. 4-K）。どこかにメタンが噴出する場所があることが考えられる。

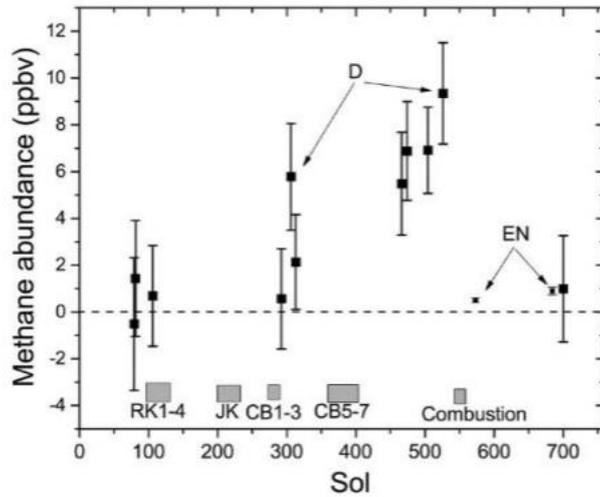


Fig. 4-K. 火星におけるメタンの存在 ²⁰⁾

・火星のエネルギー源

キュリオシティが還元型鉱物を検出した (Fig. 4-L)。地球の微生物の中には硫化鉄をエネルギー源にできる微生物がいることから、火星にもそれらをエネルギー源として生きられる生命があることが考えられる。

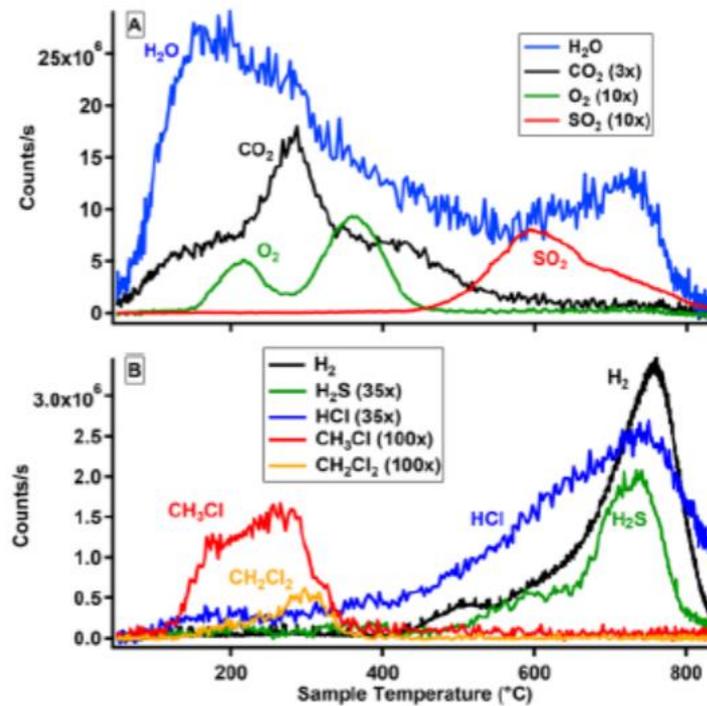


Fig. 4-L. 火星におけるエネルギー源の存在 ²¹⁾

・火星の有機物

キュリオシティが有機物を検出した (Fig. 4-M)。堆積岩で構成されているカンバーランドでも有機物 (クロロベンゼン) が検出された (Fig. 4-N)。

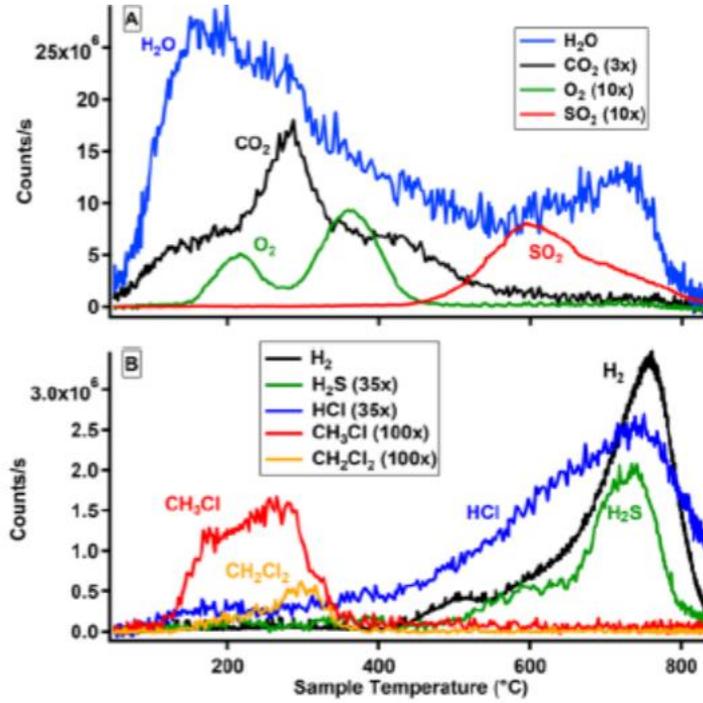


Fig. 4-M. 火星における有機物の存在 ^{21, 22)}

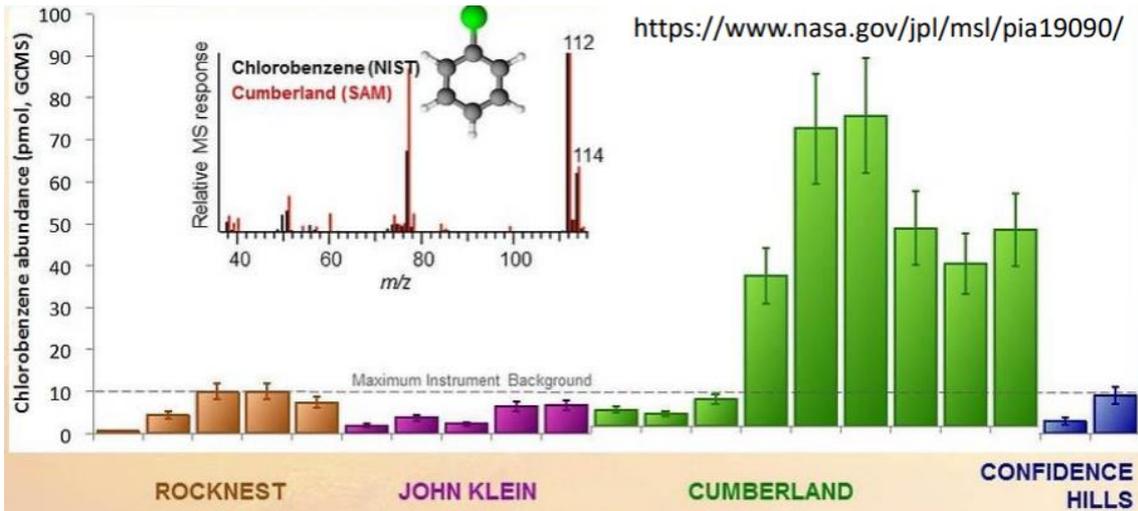


Fig. 4-N. クロロベンゼンの火星での局在

—火星に生命はいるか

火星表面で生育可能な化学合成細菌を示す (Table. 4-E)。地球の生命の生存限界と火星の環境比較した (Table. 4-F)。これらのことから、微生物は火星表層で生存可能であることがわかった。火星には地球の微生物が生存可能な環境、エネルギー源、生命の構成元素 (水素、酸素、窒素、硫黄、リン) が存在する。

Table. 4-E. 火星表面で生育可能な化学合成細菌 ²³⁾

電子供与体	電子受容体	化学合成細菌
(H ₂)	CO ₂	(メタン生成菌)
(H ₂)	ClO ₄ ⁻ , NO ₃ ⁻ , Fe(OH) ₃ , SO ₄ ²⁻ , etc.	(水素酸化細菌)
CH ₄	NO ₃ ⁻ , MnO ₂ , Fe(OH) ₃ , SO ₄ ²⁻ , etc.	メタン酸化細菌
Fe (II)-sulfides	NO ₃ ⁻ , MnO ₂ , etc.	鉄酸化細菌
S ⁰	ClO ₄ ⁻ , NO ₃ ⁻ , MnO ₂ , etc.	硫黄酸化細菌

Table. 4-F. 地球の生命の生存限界と火星の環境 ²³⁾

Factor	地球微生物の生存限界	火星表層環境
Temperature	-20~122°C (Metabolism) -18°C (Cell division) -196°C (Survival)	-130~20°C
Pressure	700 Pa (Cell division)	600~800 Pa (6/1000 of the Earth's)
Water	Water activity: a _w =0.4	Ice/Liquid?
pH	-0.06~12.5	7.7±0.5
UV radiation	~5,000 J m ⁻²	20 W m ⁻²
Ionizing radiation	1,440 Gy day ⁻¹	0.4 mGy day ⁻¹
Redox potential	Limits undefined	Highly oxidizing (perchlorate)

—探査地の候補

生命の探査地候補として以下の4項目がある。

1. 水の活性が0.5以上でかつ温度が -20°C 以下になる場所
2. 地下から何か(水蒸気・メタン)が噴出している場所(ダークパッチ (Fig. 4-O)・ホワイトパッチ (Fig. 4-P))
3. 永久凍土の下
4. 永久凍土から水蒸気あるいは水が噴出している場所

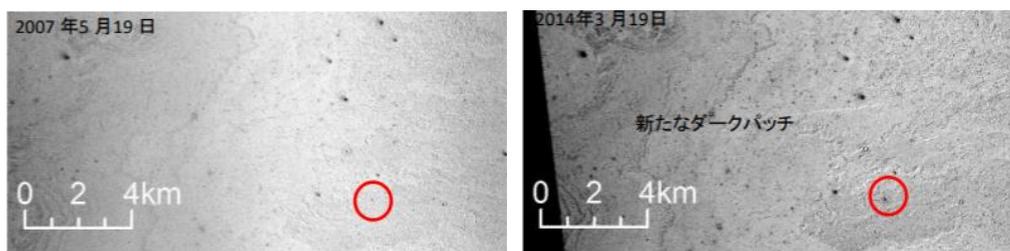


Fig. 4-O. ダークパッチ²⁴⁾

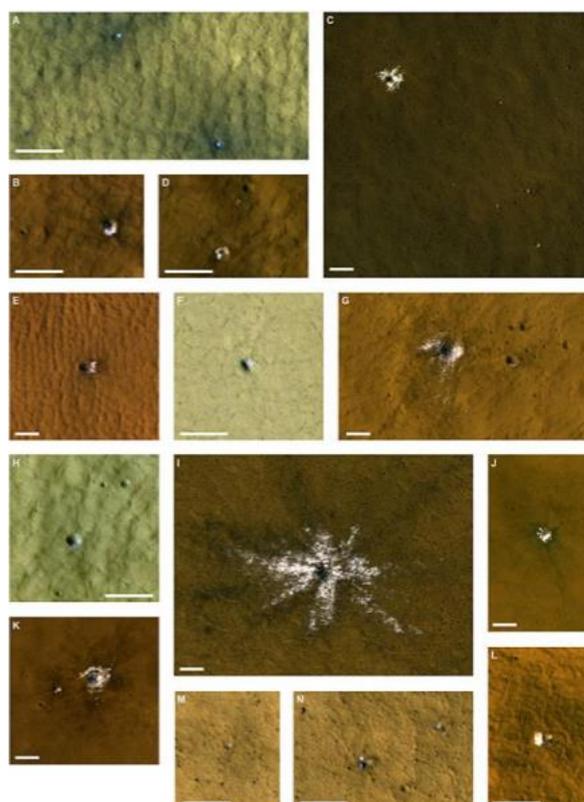


Fig. 4-P. ホワイトパッチ²⁵⁾

—蛍光顕微鏡を用いた火星における生命探査の提案

火星で生命探査を目指す日本の研究者らは、蛍光顕微鏡開発に取り組んでいる。一方で海外の研究者らは、質量分析装置を主に用いている。蛍光顕微鏡では、普通の顕微鏡に比べてはるかに高感度で試料を観察することが可能である。

—まとめ

これまでに検討されている火星における生命探査をまとめる。H3で打ち上げられた探査機は約1年で火星に到着し、火星に着陸後、探査車で移動しながらシャベルで土壌を採集する。採取された土壌を蛍光顕微鏡で観察し、得られた画像を処理した後、地球に顕微鏡画像を転送することで、火星における生命探査が可能となる。

用語解説

1-A) 配列アライメント

DNA や RNA、タンパク質の配列（一次構造）の類似した領域を特定できるように並べたもの。

2-A) ダーウィン進化

生存可能な数よりも多くの子孫がそれぞれの種から生まれる。そのため、生存のための競争が頻繁に繰り返される。その結果、複雑な時々変化する生存条件の中で、もしほんの少しでも何らかの点で有利であるような個体があると、その個体にはより大きな生存の機会が生じ、その結果、その個体は自然によって選択されることになる。強力な遺伝のしくみにより、選択された個体のもつ変化した新しい性質は広がっていくことになり、これがダーウィン進化である。まとめると、ダーウィン進化の本質は次の 5 つの項目にまとめられる；①生命の多産、②限られた資源、③生存競争、④変異の存在、⑤適者生存

2-B) エントロピー

熱力学系の状態量の 1 つで、ギリシア語のトロペ（変化）からクラウジウスが命名した。クラウジウスの定理によると、可逆変化において系が得る換算熱量の総和は過程の始めと終りの状態だけで定まり、途中の経路に依存しない。このことから、適当な状態 O を基準に定め、系を状態 O から任意の状態 Z まで可逆変化させたときに系が得る換算熱量の総和を、状態 Z において系がもつエントロピーと定義する。

4-A) 国際宇宙ステーション

国際宇宙ステーション（ISS ; International Space Station）は、地上から約 400km 上空に建設された巨大な有人実験施設である。1 周約 90 分というスピードで地球の周りを回りながら、実験・研究、地球や天体の観測などを行っている。

4-B) 宇宙塵

宇宙から飛んでくる塵で、1 ミリメートル前後のものは大気圏突入の時に燃え尽きて流れ星となり、それよりも小さい宇宙塵は大気上空で減速して地球表面に到達する。年間何万トンもの宇宙塵が地球にやっけてきていると推定されている。

4-C) パンスペルミア仮説

今から 100 年以上前に、アレニウスという物理化学者が提案した仮説である。パンとは「汎」であり全てを意味し、スペルミアは「孢子」のことを意味する。宇宙空間に孢子（生命）が満ちていると考えたのである。

4-D) エアロゲル

宇宙塵捕集の際に使われるケイ酸でできたスポンジのようなもの。超多孔質で密度が低いので、高速で宇宙から飛来する宇宙塵を優しく捕集することができる。たんぼぼ計画で用いられているエアロゲルの密度は $10 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ で大気密度の 8 倍以下である。

4-E) マサパンスペルミア仮説

マサは「塊」を意味し、日本のアストロバイオロジー研究チームが、微生物が塊で移動すれば生存可能ではないかと考え、提唱した仮説である。その他に、欧州のアストロバイオロジーチームが提唱したリソパンスペルミア仮説もある（リソは「岩」を意味し、岩石中ならば微生物が生存可能であると考えている。）

参考文献

- 1) 山岸., 1993, 科学 (岩波) .
- 2) Lopez-Garcia, P. and Moreira, D., 1999, *Trends Biochem. Sci.* **24**: 88-93.
- 3) Akanuma et al., 1998, *Protein. Scie.*
- 4) Woese et al., 1990.
- 5) Rivera & Lake 1992.
- 6) Spang et al. 2015.
- 7) Thiergart et al. 2012.
- 8) Furukawa et al. 2017 *J. Mol. Evol.*
- 9) Pouplana & Schimmel 2001.
- 10) Valencia-Sánchez et al. 2016.
- 11) G. Joyce., Forward for Origins of Life, 1993.
- 12) コシュランド., 2002, *Science* **295**: 2215-2216.
- 13) Maturana and Verela 1981, *Autopoiesis and Cognition-the Realization of the Living.*
- 14) Pross, A. 2011 *J. Systems Chem.* **2**, 1-14.
- 15) Katharina, L., 2003.
- 16) 山岸., 2015, 東京大学出版会.
- 17) Yang Y. Itahashi S., Yokobori S. and Yamagishi A. UV-resistant Bacteria isolated from upper troposphere and lower stratosphere. *Biol.Sci.Space* 22:18-25 (2008)
- 18) K. Kobayashi et al., *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, 12, No. ists29 (2014). Exposure experiment of organic compounds 3
- 19) Orosei, R. et al., Radar evidence of subglacial liquid water on Mars, *Science* **361**, 490-493, 2018.,
- 20) Webster, C.R. et al., *Science Express*, 2014.,
- 21) D. W. Ming et al., *Science*, 2013.,
- 22) Freissient, C. et al. *J. Geophys. Res. Planets*, 2015.,
- 23) Yoshimura 2018.,
- 24) Malin et al., 2006.,
- 25) Dundas, C.M. et al., HiRISE observations of new impact craters exposing Martian ground ice, *J. Geophys. Res.* **119**, 109-127, 2014.