

第 5 回 地球史セミナー

# 微生物の基礎と極限環境微生物

担当: 高山 歌織

2001/9/8

微生物は水中空气中, 口の中, とにかく地球上のどこにでもいる生物である. 例えばテーブルスプーン 1 杯の土壌には日本の人口以上の無数の微生物が生息している. 微生物は肉眼で見ることができないが, 人類は古代より, 微生物の存在を発酵や腐敗, さらに疫病の流行などの目に見える結果として生活のなかで経験してきた. 微生物の種類と, その分類法は複雑多岐にわたっているため, 今回は微生物の基礎のみをまとめた.

## 1 微生物の分類

約 1mm 以下で肉眼で識別できないような小さい生物を微生物という. 微生物は植物界や動物界とは異なる別の界を形成すると考えられており, 細胞の構造や機能の研究から, 真核生物, 真正細菌, 古細菌の 3 群とウイルスを含めたものを一般に微生物と呼ぶ.

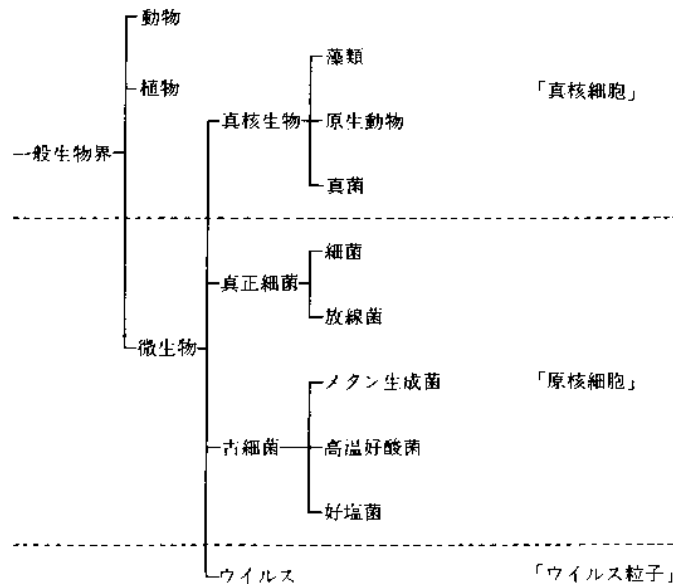


図 1: 生物界における微生物, 緒方, 1997, P.19

分類階級: ある微生物を表す場合には属 (genus) と種 (species) を記して示す二名法が一般的. 例えばアルコール酵母は *Saccharomyces cerevisiae*, 大腸菌は *Escherichia coli*.

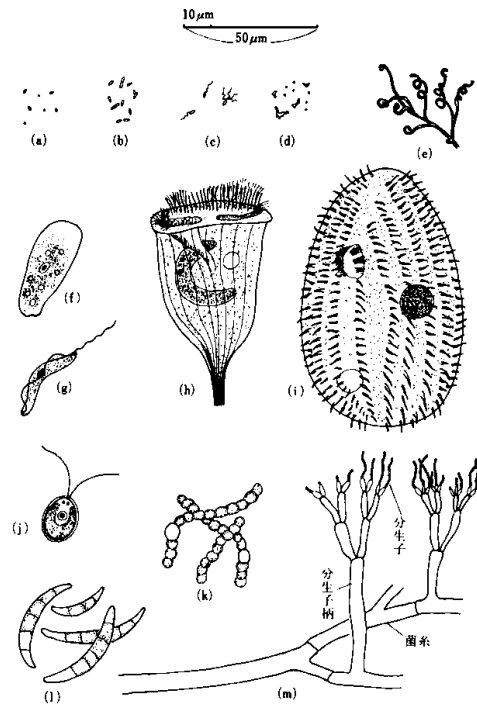


図1 各種微生物の生態と大きさの比較  
 (a)~(e) 細菌と古細菌, (f)~(i) 原生動物(活動体), (j) (k) らん藻類, (l) (m) 糸状菌。  
 (f) 小型アメーバ, (g) トリパノゾーマ, (h) ツリガネムシ, (i) テトラヒメナ, (j) クラミドモナス, (k) ノストック, (l) フザリウムの分生胞子, (m) アオカビの菌糸と分生胞子。

図 2: 微生物の大きさ比較, 服部, 1990, P.6

### 1. 真核生物: 核を持つ.

- 藻類 (algae): 主に水中に生息し, 光合成を行う下等植物の総称だが, 褐藻や紅藻は多細胞で微生物とはいいがたい. これらに対して緑藻, ミドリムシ, 鞭毛藻類は主として単細胞からなり, 微生物として扱われる.
- 原生動物 (protozoa): 極めて多様な単細胞性の非光合成原生生物. 鞭毛虫類, 根足虫類, 孢子虫類, 繊毛虫類の 4 つの網に分類される.
- 真菌 (fungi): ほとんどすべての真菌は多核性の生物で非光合成性である. 菌糸体と呼ばれる栄養体構造を持っており, 1 個の菌糸体は一つの生殖細胞または胞子が発芽し, 成長することによって形成される.

### 2. 真正細菌: 原核細胞からなり, 多くの種があり, 土中, 水中, 空気中などあらゆる場所で見出される. 単細胞からなる細菌と多細胞からなる放線菌に分類されている.

- 細菌 (bacteria): このなかのシアノバクテリアはクロロフィルを有する酸素発生型の光合成原核微生物で窒素固定能を持っている.
- 放線菌 (actinomycetes): 偏性嫌気性か好気性で, 非運動性の糸状細菌. 菌糸があるのでカビに似ているが, 大きさははるかに小さい. 放線菌の大部分は土壌中に存在し, 抗生物質の生産菌として大変重要である.

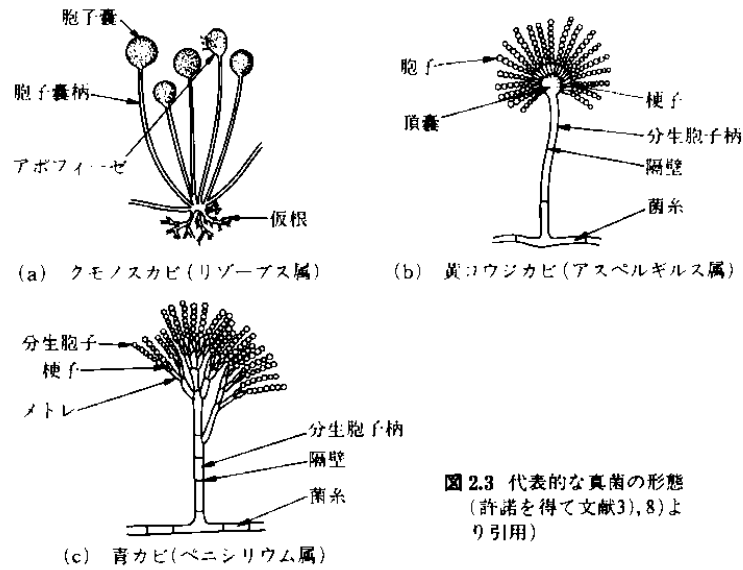


図 2.3 代表的な真菌の形態  
(許諾を得て文献3), 8)より引用)

図 3: 代表的な真菌の形態, 緒方, 1997, P.24

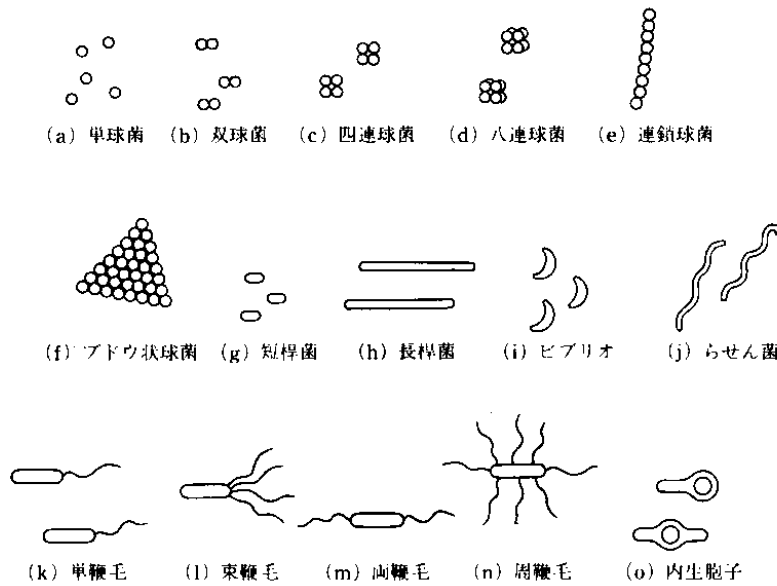


図 4: 細菌の形態, 緒方, 1997, P.27

3. 古細菌: 高温, 高酸性等の厳しい条件下に生存. リボソーム RNA の塩基配列がほかの原核細胞のものと大きく異なっており, 細胞壁の構成成分も異なっている. 古細菌は原核細胞であるが, 真核生物の性質も備えている.

- メタン生成菌: メタンを特徴ある最終産物とする独特のエネルギー代謝を行う.
- 高温好酸菌: 高い温度と低い pH という条件で生育できる能力により規定された不均一

な菌群.

- 好塩菌: 非常に塩濃度の高い環境 (塩水湖, 塩水) に生息.
4. ウィルス: 他の生物の生きた細胞に寄生して増殖する. 細菌よりはるかに小さいので電子顕微鏡で観察する. 多くのウィルスは遺伝物質である核酸 (DNA, RNA) とそれを保護しているタンパク質で構成されている.

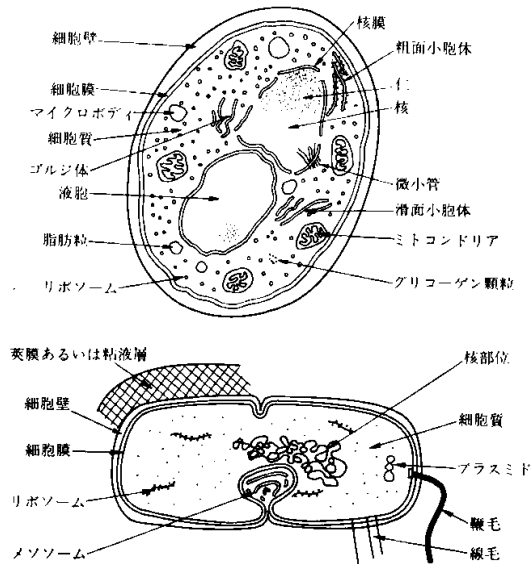


図 5: 真核細胞 (上) と原核細胞 (下), 緒方, 1997, P.26,28

## 2 微生物の増殖に及ぼす環境因子

### 1. 栄養

エネルギー源, および菌体成分として必要な栄養分は, 炭素源, 窒素源, 無機塩類および生育因子.

独立栄養微生物	}	光合成… 紅色および緑色硫黄細菌, シアノバクテリア
		化学合成… 硝化細菌, 硫黄酸化細菌, 鉄細菌, 水素細菌
従属栄養微生物	}	光合成… 紅色非硫黄細菌
		化学合成… 上記以外の細菌, カビ, 酵母など大多数の微生物

図 6: 独立栄養微生物と従属栄養微生物, 緒方, 1997, P.45

独立栄養微生物: 無機の炭素源 (二酸化炭素, 炭酸塩) を利用できる微生物.

従属栄養微生物: 有機の炭素源 (有機物) を利用する微生物.

## 2. 酸素

生育に体する酸素の必要性により、次の3群にわけることができる。

好気性菌：酸素を必要とする菌。カビ、酢酸菌、枯草菌。

通性嫌気性菌：酸素の有無に関わらず生育する菌。乳酸菌、大腸菌、酵母等。

偏性嫌気性菌：酸素濃度がある程度高いと生育できない菌。酪酸菌等。

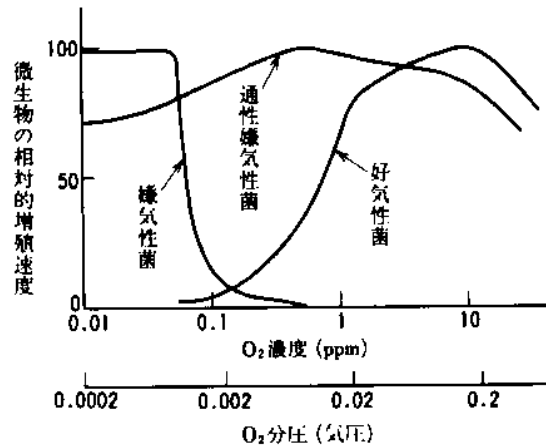


図 7: 酸素濃度と微生物の増殖, 服部, 1990, P.10

## 3. 温度

生育最適温度の範囲により、次の3群にわけることができる。

低温菌：最高温度 25 - 30 °C, 最適温度 10 - 20 °C, 最低温度 0 - 10 °C. 水中の細菌や発光細菌がこれに属する。

中温菌：最高温度 40 - 45 °C, 最適温度 20 - 40 °C, 最低温度 5 - 10 °C. 大部分の発酵菌, カビ, 酵母, 腐敗菌, 病原菌がこれに属する。

高温菌：最高温度 70 - 80 °C, 最適温度 50 - 60 °C, 最低温度 30 - 40 °C. 堆肥や温泉にいる細菌など。

## 4. pH

一般に細菌は中性または微アルカリ性に至適 pH があるが、乳酸菌等はかなり酸性 (pH 3.5) でも生育する。カビ、酵母は一般に微酸性 (pH 5-6) に至適 pH があるが、耐酸性を有するものは pH2 でも増殖する。微生物は培地の pH を自分である程度調節する能力を持っている。もし、培地が酸性であればアミンを生成し、アルカリ性であれば有機酸を生成する。

# 3 極限環境微生物

一般に微生物は中性付近の pH, 20 - 37 °C の温度, 1 気圧, そして適当な栄養と塩分を含んでいるような温かな環境にいるものだが、中には生命の存在を許さないように見える極限の環境にいるものもある。温泉, 高濃度の塩水湖, 砂漠, 海底などがそれである。

好アルカリ性, 好熱性, 好塩性, 好酸性, 好圧性, 好塩性, 好冷性等

今回観察に行くイデユコゴメは酸性, 高温の環境で生息する微生物であるため, ここではとくに好熱性, 好酸性の2つについてその機構を解説する.

イデユコゴメ (*Cyanidium caldarium*)

今回のカムイワッカ湯の滝巡研でのターゲット. 好酸性, 好熱性の単細胞紅藻類であり, 世界中の酸性泉で一般的に見られる.

図 8: イデユコゴメ

### 3.1 好熱性

一般に 55°C 以上に生育至適温度を示す微生物を好熱細菌という. 好熱細菌の分類は図のとおり.

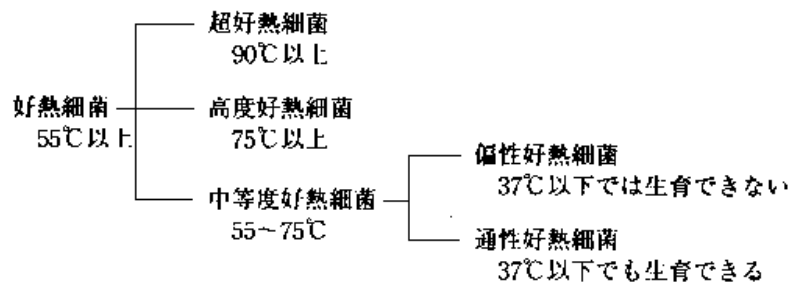


図 9: 好熱菌の種類

生育特性

- 至適温度での増殖速度は, 高温化での生育を考慮すると, 常温菌と比較して必ずしも早いとはいえない.
- 細胞が高温化で安定であるには, 活発な代謝が起こっており, エネルギーも必要とする.
- 好熱性を維持することは効率がよくない→酵素の生産性も低い.

- 好熱細菌は細胞膜に融点の高い脂肪酸を構成成分として持っているので、膜の機能発現に必要な転移をおこす温度が高く、高温下で相分離状態に膜を保ち膜機能にとって都合のよう柔軟性を保持している。

#### たんぱく質 (酵素) の特徴

- 好熱細菌酵素は、常温酵素に比較して熱、有機溶媒に対して安定。
- 好熱細菌酵素の触媒機構、分子量などは常温酵素と同じか、それに近い。
- 好熱細菌酵素と常温酵素の立体構造には大きな差がない。
- 安定性の仕組みは酵素分子内にある。

#### どうやって安定しているのか?

好熱細菌酵素が高温化、変性剤存在下で安定であるには、高次分子が硬いこと、すなわち高次構造が崩れにくいことが必要である。たんぱく質の安定化に寄与する因子はさまざまで、たんぱく質中には多数の安定化と不安定化の因子があり、それらが相殺された結果のわずかなエネルギー差 (約 5 - 15 kcal/mol, たかだか一個のイオン結合や数個の水素結合のエネルギーに相当) によって安定性は維持されている。

好熱細菌 / 常温生物	酵 素	安 定 化 因 子
<i>Bacillus stearothermophilus</i> / 枯草菌	DNA-結合タンパク質HU	ターン構造内のコンホメーションのゆがみの排除
<i>Bacillus stearothermophilus</i> / 酵母		分子内部の疎水性の増加、イオン対の増加、ループ領域の短縮、 $\alpha$ ヘリックスの安定化
<i>Bacillus stearothermophilus</i> / ロブスター	グリセルアルデヒド-3-リン酸デヒドロゲナーゼ	分子内部のイオン対の増加、イオン対の増加と疎水性相互作用による四量体の安定化
<i>Thermoactinomyces vulgaris</i> / <i>B. amyloliquefaciens</i>	サーミターゼ	Ca <sup>2+</sup> 結合部位の強化、イオン対の増加、芳香環相互作用の増加
<i>Thermus thermophilus</i> / 大腸菌	リボスクレアーゼH	コンホメーションのゆがみの排除、好ましい芳香環相互作用、イオン対の増加
<i>T. thermophilus</i> / 大腸菌	3-イソプロピルリンゴ酸デヒドロゲナーゼ	サブユニット境界面での疎水性相互作用の増加
<i>T. thermophilus</i> / 大腸菌	セリル (RNA シンセターゼ	分子内部の疎水性の増加、二量体境界面における疎水性の増加、プロリン含量の増加、コンホメーションのゆがみの排除
<i>Thermoplasma acidophilum</i> / ブタ	クエン酸シンターゼ	分子内充填密度の増加、サブユニット境界面の疎水性の増加、芳香環相互作用の増加
<i>Pyrococcus furiosus</i> / <i>Clostridium symbiosum</i>	グルタミン酸デヒドロゲナーゼ	イオン対ネットワークの増加

図 10: 好熱細菌の熱安定化因子

疎水性相互作用: 油に近い性質を持ったアミノ酸同士が水中で互いに水を避けて集まろうとする

凝集力.

イオン対の形成: たんぱく質中の正電荷と負電荷を持つアミノ酸による電氣的に引き合う力によってできる結合をイオン対, あるいは塩橋と呼ぶ. たんぱく質の折りたたみと安定性にイオン対の形成が重要な働きをしていることは多くの研究で明らかにされている.

変性状態でのエントロピーの減少 変性状態のポリペプチド主鎖のコンホメーションのエントロピーは天然状態のたんぱく質に比較して大きく, このエントロピー効果はたんぱく質を不安定にする方向に働く. したがって, 変性状態の主鎖の揺らぎを押さえてエントロピーを減少させる, すなわちコンホメーションの自由度を下げることによってたんぱく質を安定化できる.

$\alpha$ ヘリックスの安定化:  $\alpha$ ヘリックスはポリペプチド鎖がらせん状に折りたたまれた構造で, 4番目ごとのアミノ酸のカルボニル基とイミノ基間の水素結合により形成される.  $\alpha$ ヘリックスの両末端近くにそれぞれ異なった電荷をもつアミノ酸側鎖がくると, 正電相互作用によりヘリックスは安定化する.

水素結合: たんぱく質の規則構造である  $\alpha$ ヘリックスと  $\beta$ シートはペプチド主鎖中のカルボニル基とイミド基間の水素結合によって形成される. さらに, アミノ酸残基の側鎖間の原子あるいは, 側鎖と主鎖間の原子によって形成される水素結合もたんぱく質の構造と安定化に寄与する重要な因子.

ループの安定化: ループはたんぱく質の構造の中でもっとも柔軟性のある領域で, 熱変性の過程で初期に変性する. 好熱細菌酵素のループは, 常温生物の酵素のループより短い例や, プロリンを多く含むことがよくある. つまり機能に関係のないループを短くして柔軟性を減少させたり, ループにプロリンを導入することで主鎖のコンホメーションの動きを制限し, 熱安定性を高めていると思われる.

### 3.2 好酸性

pH 2-3 付近に生育至適 pH を持っている微生物の総称. 好酸性微生物は, 硫黄又はその化合物が存在しているところで最も生育しやすい (たとえば硫黄泉などは pH 2-3 程度のものが多く分布しておりその中など). 外部の pH が低いにもかかわらず菌体内は常に pH5-7 程度に保たれている. 分離されている微生物の例としては

- ・ 真核微生物: 鉱山の排水などから多くのカビが発見されている. この他にも藻, プロトゾア等も酸性でよく生育するものが多い.
- ・ 硫黄細菌, 鉄細菌: 硫黄や鉄を酸化しエネルギー源としている微生物の多くは好熱性.
- ・ 高熱好酸性微生物: 大きく分けて原核微生物 (バクテリア) と古細菌 (アーキア) の 2 つ.

## 4 バイオマット

バイオマットとは微生物が様々な物質の表面に固着し増殖した膜状の構造物のことである. 微生物のコロニーである. 温泉・河川・湖沼・深海底・地熱地帯などのあらゆる環境条件で形成されている. そのなかでは微生物が外界よりイオンを摂取し, 細胞の内外に沈着か化学反応を起こして様々



な元素を蓄積し、鉱物や縞状堆積物を形成している。この堆積物の縞には生息当時の地球環境が記録されており、太古の地球の環境や生命活動の謎をとく鍵がある。

●有名なバイオマットの例

ストロマトライト：シアノバクテリア\*のバイオマットに細粒の石灰質の粒子がとらえられ、マットの部分だけに層状に積み重なってできたもの。断面ではドーム状あるいは半円形、棒状などのかたちに見える。ストロマトライトは、約35億年前以降、様々な時代の地層から見つかっている。これは生物そのものの化石ではないが、生物がつくった構造という点で化石の一種（生痕化石）として扱うことができる。

\*シアノバクテリア：シアノバクテリアは原核生物のひとつのグループで、光合成による酸素を生産した最初の生物であると考えられている。プランクトンとして、あるいはバイオマットをつくって、比較的身近なところでも見られる生物である。真核細胞の出現までの15-20億年もの間、酸素を生み出し地球表層を酸化してきた主役は、現在も生きているこの小さな藍藻（シアノバクテリア）の仲間である。

参考文献

- 緒方 靖哉, 微生物とその利用, 1997, コロナ社  
服部 努, 微生物生態入門第2版, 1990, 東京大学出版社  
堀越 弘毅, 極限環境微生物とその利用, 2000, 講談社  
J.F. ウィルキンソン, 基礎微生物学 微生物学入門, 1991, 培風館