

第3章：極限環境に生きる微生物

人間は地球上の寒い場所や暑い場所、高地など、色々な環境に適応して暮らしており、熱水、氷中、強酸性、強アルカリ性、飽和食塩水、超高压、放射線等の中では生活できません。しかしそのような中でも平気で生きている微生物が多く発見されています。極限環境にいる微生物は、苛酷な環境でも生きていくために、普通の微生物とは異なった特殊な機能を有していることがわかってきています。

アメリカの缶詰工場で、強い放射線を浴びて破壊されてしまった遺伝子（DNA）を自ら修復して生き続けることができる、常識を超えた驚くべき能力を持った細菌が見つかっています。この能力を調べることによって、近い将来、ガン治療にも利用できるのではないかと期待されています。

科学技術庁の諮問機関である資源調査会は、地球環境問題の解決には、きびしい環境条件下で生き、その環境に耐える物質をつくり出したり、特異な物質を分解したりする能力をもっている微生物の有効利用が必要だという調査報告書を提出しています。また、そのような微生物の能力を大いに活用しようとするバイオテクノロジーは、医学、薬学、農学、理学、工学などの広い分野で、急速に研究が進められています。

過酷な環境にいる微生物は、地球上の生物全体から比べると種類は少ないですが、質的存在価値は非常に高いように思います。

特殊な微生物は、100℃を超える海底火山周辺や数百気圧に達するような深海底でも、また、極寒の地、南極大陸においても多くの微生物が棲息しています。このような極限環境で微生物がどのようにして生きているのかという問いは、私たちにとってよい研究材料になると思います。これらの微生物を調べることによって、少しでも我々の生活を豊かにすることができるものと考えられています。極限環境微生物の定義を表3-1に示し、極限環境である放射線に耐える放射線耐性菌を口絵2(C)に示しました。

表3-1. 極限環境微生物の定義*

極限環境	極限条件	微生物の種類
温度	60℃以上、10℃以下	好熱菌、好冷菌
水素イオン濃度	pH9以上、pH3以下	好アルカリ菌、好酸菌
塩濃度	15% (NaCl) 以上	好塩菌
圧	400気圧以上	好圧菌
乾燥	湿度0%	好乾燥菌
有機溶媒	10%以上	溶媒耐性菌
放射線	5000グレイ程度	放射線耐性菌

* 今中、「微生物利用の大展開」(一部改変)、エヌ・ディー・エス、p.100 (2002)

ゾーベルらは、フィリピン海溝の深度10,000m、約1,000気圧の水圧がかかっている堆積物に、細菌が棲んでいることを報告しています。この細菌は、1気圧では増殖せず、1,000気圧で増殖する好圧性の細菌です。深海の環境は高い水圧と低温（5℃以下）であり、低分子の有機物は海底に達するまでには、キチンやセルロース以外はほとんどなくなっていると考えられています。そのような深海の海底で細菌はキチンやセルロースしか含まれていないような堆積物を分解して生きています。そこに生息しているいろいろな細菌の種類と1g中に含まれる細胞の数は、好気性細菌（1g中 10万～100万細胞）、嫌気性細菌（1g中 10万細胞）、硝酸還元菌（1g中 1万～10万細胞）、アンモニア化成菌（1g中 1万～10万細胞）、デンプン分解菌（1g中 100～1000細胞）、硫酸還元菌（1g中 10～100細胞）などです。

海底火山の近くではマグマが噴出し、200℃以上の熱水が吹き出しています。通常の微生物は90℃以上の高い温度で酵素が変性し、細胞膜が破壊されて死んでしましますが、そういう環境でも、ある種の微生物は生きています。日本でも1993年夏から、海洋科学技術センターの森屋らが深海微生物の研究をはじめています。深海底は高水圧、低温（場所によっては高温）、そして暗黒という極限環境です。高水圧に適応していると考えられる好高圧性微生物には、私たちの住む環境の1気圧では全く生育できず、200気圧でよう

よく生育が観察され、400～600気圧において非常によく生育する細菌が見つけられています。また、20%濃度のベンゼンがある中でも増殖する有機溶媒に耐性のある微生物や、高いアミラーゼ生産能をもった低温細菌、100℃以上の熱水にいる好熱菌も見つかっています。

一般の動植物に比べると、微生物の生活環境はたいへん変化に富んでいて、強い酸性（温泉、鉱山）、強いアルカリ性（温泉、火山地帯）、高い塩濃度（塩田、塩湖）、沸騰しているような温泉の熱水中でも生きている微生物など、自然界にはいろいろな微生物が数多く見られます。真核生物にも原核生物にも属さない微生物を古細菌と呼ばれています。しかし、この細菌には普通の微生物では増殖できない極限の環境で増殖できるものが多く、メタン細菌、超好塩細菌、超好熱細菌、好熱好酸細菌などが、極限環境で生息しています。古細菌の電子顕微鏡写真を図3-1(A)に示しました。

このような過酷な環境で生活している微生物は、どのような機能をもっているのでしょうか、少し紹介します。

3.1 温泉が好きな細菌

2005年、別府大学の村松らは、新種の細菌を別府温泉から見つけています。70～80℃の温泉に生息しているもので、タンパク質分解酵素をつくり出す機能を有しています。高温で生育できる細菌「*T.thermophilus* HB8」がつくりだすタンパク質分解酵素であれば、反応速度の高い高温でタンパク質分解ができるとともに、培養容器を殺菌する心配が要らないように思います。これまでに多くの好熱細菌が見つけられていますが、今回のものは新しく見つけられた細菌であるために、新たな機能をもっている可能性があります。色々な好熱細菌の生育温度を図3-1に示しました。

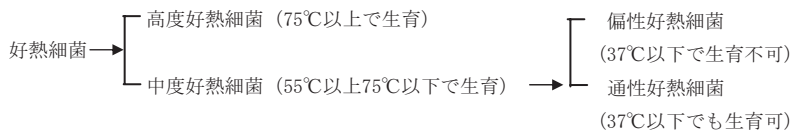


図3-1. いろいろな好熱細菌

今中ら、：「極限環境微生物ハンドブック」、サイエンスフォーラム、p.15（1991）

第3章 極限環境に生きる微生物

一般の細菌は、平均的な温度の環境で生きていますが、高い温度の環境（海底火山付近、源泉付近、温水装置など）に適応して生きている細菌を総称して好熱細菌と呼んでいます。

好熱細菌の起源については、地球が高温であった時代の原始生物であるという説もあります。好熱細菌の定義はあまり明確ではないようですが、一般には次のように分類されています。

高度好熱細菌はグラム陰性菌で、黄色の色素を出しているものが多く、栄養要求性が高く合成培地では培養しにくいと言われています。グラム陰性菌であるにもかかわらず、抗生物質に対する感受性が高いことが知られています。高度好熱細菌が繁殖する温泉地（アメリカ、イエローストーン国立公園）を口絵4(C) に示しました。

中度好熱細菌のもっとも代表的な菌は、グラム陽性菌の*Bacillus*属菌で、孢子を形成し、室温の環境でも生活していますが、この菌にとって温泉がもっともよい生活環境です。この菌の近縁種で、日本で分離された中度好熱性細菌は、耐熱性プロテアーゼを生産します。

特殊な好熱細菌で、酸性（pH1.0～1.5）かつ高温の環境を好む性質の細菌を好酸性好熱菌と呼んでいます。この細菌は、内野らが東北の温泉から最初に分離し、その後、アメリカやイタリアの酸性温泉からも分離しました。この細菌は、孢子をつくる桿菌で、pH2.0、70℃付近で増殖し、非常に熱安定性の高い酵素（グリセルアルデヒド-3-リン酸デヒドロゲナーゼ）をもっており、70℃付近の高温でも変性しないことがわかっています。しかし、この酵素は中性付近では安定しているが、少し酸性にすると分解します。また、この細菌の細胞膜に含まれている脂質成分の主な脂肪酸組成を調べると、脂肪酸残基の約90%がシクロヘキサン環をもった化合物であり、一般の細菌とは異なって脂肪酸残基にシクロヘキシルウンデカン酸をもっていることがわかっています。

好熱細菌のもっとも興味あるところは、この細菌の生産する酵素のほとんどが耐熱性だということです。熱に対してだけではなく、化学的につくられた変性剤にも耐性が高く安定しています。このように好熱細菌の酵素が安定

3.2 アルカリ性が好きな細菌

しているのは、一般の酵素の化学構造と僅かに変化した部分があるからだといことがわかっています。この好熱細菌の性質を利用して、加熱の工程を加えて雑菌汚染を防いだり、培養後の冷却を省くために、蒸留の際に予熱の必要がなくなるなど、コストの節減が期待されています。最後に主な好熱細菌の最適温度、pH、及び分離源を表3-2に示しました。

表3-2. 主な好熱細菌の最適温度、pH、及び分離源

菌株名	最適温度 (℃)	生育pH	色素生産	分離源
<i>Thermus thermophilus</i> HB8	65-75	6.5-9.0	黄色	峰温泉
<i>Thermus aquaticus</i> YT 1	70	7.5-9.0	黄色	イエローストン公園
<i>Bacillus caldodenax</i> YT-G	80	7.5-8.5	黄色	イエローストン公園
<i>Methanobacterium</i> <i>thermoautotrophicum</i>	65-70	7.2-7.6	なし	アメリカの下水泥

3.2 アルカリ性が好きな細菌

自然界の生物圏の多くは、中性あるいは微酸性のpHを示していますが、これらのpH領域で生育する細菌の研究が多く行われてきました。しかし、自然界にはアルカリ性の環境があるにもかかわらず、アルカリ性で生育する細菌の研究はあまり行われていませんでしたが、1970年代に、堀越らのグループが好アルカリ性細菌を生産する酵素の研究を開始し、アルカリ側でよく増殖する細菌を好アルカリ性微生物と呼ぶようになりました。

この細菌を自然界から分離するためには、培地のpHの調製が大切で、普通なら水酸化ナトリウムを使用するところ、全て1%の炭酸ナトリウムを培地に加えることで調製をしています。まず、好アルカリ性細菌がどのような場所に棲んでいるのかを調べた結果、アルカリ性の土壌だけではなく、pH5以上の土壌にも多く分布し、増殖のための最適pHは10付近で中性付近に生育する普通の細菌とは著しく異なっていることがわかりました。好アルカリ性細菌には、これまでに知られていないような機能をもった酵素がたくさん見いだされています。堀越らは、好アルカリ性細菌を液体培養し、その上澄み液から分離した菌体外酵素のアルカリプロテアーゼの最適pHが12付近で、

第3章 極限環境に生きる微生物

pH13でも高い活性をもち、耐熱性も比較的高いことを報告しています。

ある企業が開発した洗剤には、好アルカリ性細菌の生産するアルカリ性セルラーゼが入っています。これまでの洗剤と違い、木綿単繊維の内部の非晶領域に侵入している汚れまでを繊維を傷めずに落とす力を持っています。家庭衣料の9割は、木綿か木綿混紡のものであることから、このアルカリセルラーゼが入った洗剤はすぐれた洗浄効果を示し、ヒット商品になったことはご存じのことと思います。

高いアルカリ性の培地で培養した好アルカリ性細菌の菌体外酵素ではじめて見つかったのがアルカリアミラーゼであり、この酵素の最適pHは11付近でした。今までに知られている微生物由来のアミラーゼは、pH11ではほとんど活性を示さなかったが、この酵素にカルシウムイオンを添加すると、熱に対しても、pHに対しても、酵素を安定に保護できることが認められています。この酵素でデンプンを加水分解したときの最終生産物は、グルコース、マルトース、マルトトリオースなどです。

好アルカリ性細菌の中には、シクロデキストリングルコシルトランスフェラーゼを多量に生成する菌株があり、生成されてできた酵素をデンプンに作用させるとシクロデキストリンが生成されます。シクロデキストリンの安全性が高いことはすでに確認されています。シクロデキストリンはブドウ糖が6個以上環状につらなっているドーナツ状の構造をしており、適当な大きさの有機分子（エタノール、揮発性物質、香気成分、あるいは医薬品など）をドーナツ状の構造の中央に包接することができます。この性質を利用して、いろいろなものが開発されています。

3.3 酸性が好きな細菌

化石燃料の起源に微生物が大いに関与していたことは先に述べましたが、やはり地史的な時代に微生物の働きで硫黄が生成されたことを忘れてはなりません。現代の主要な産業では、必ずと言ってよいほど硫酸を使っていますが、この硫酸は硫黄を燃やして酸化硫黄をつくり、水と反応させることで製造しています。

世界の硫黄産出は、メキシコ湾周辺だけでも95%と言われていますが、ど

うしてこのような硫黄鉱床が特定の地域にあるのかについてはポストゲートの説では、気温が高くて日射量の多かった2億年ほど前の地史的時代に、干し上がった海で微生物が活発に活動し、硫黄鉱床が形成されたというもので、その海で硫酸還元菌や光合成硫黄細菌の働きで硫黄粒子へと酸化され蓄積していったのではないかとされています。その後は動物や植物、微生物のつくる生態系の中で硫黄が循環し、含硫アミノ酸をはじめとする生体に重要な役割をもった硫黄の世界ができ上がったものと思われます。

地史的時代の自然界で活躍し、特に硫黄に関係の深い微生物について述べることにします。そういう微生物は、酸性領域の環境下で生活しています。代表的な好酸性細菌の1つは硫黄酸化細菌です。この細菌は、元素硫黄あるいは無機硫黄化合物を分解し、その後エネルギーを得て空気中の炭酸ガスを固定しながら増殖していく好気性の独立栄養細菌で、pHが1.0付近でもかなり旺盛に増殖し、pHが6.5～7.0になると増殖しなくなることが報告されています。

現在、この細菌は、鉱石から有用金属イオンを回収するバクテリアリーチング（微生物選鉱）とか、サンドオイル、石油、石炭などからの脱硫黄、鉱山排水処理や悪臭の分解などに応用することが試みられています。

1970年には高度好熱性好酸性の古細菌が見つけられています。この細菌は木の葉形で不定形の形態をしており、大きさは0.8～1.0 μm で、増殖温度は、55～85℃、pH2付近で、分離された場所は温泉でした。

1981年に、好酸性従属細菌が発見されてから、多数の同じような細菌の存在が明らかにされています。この細菌の特徴は、生育に適したpHが高く、クエン酸を分解しますが酢酸は分解しません。また、乳酸やコハク酸によって増殖が阻害され、酸性環境である鉱山からの排水や微酸性の土壌から多く分離されており、多数の制限酵素を生産することがわかりました。最近では精製方法の検討が行われ、この菌からの制限酵素の量産化が試みられています。制限酵素とは核酸の塩基配列を分断する酵素で、最近の遺伝子工学に有用な酵素です。

他にも好酸性細菌として、酸性（pH1～2）で、かつ高温（65℃）の温泉

第3章 極限環境に生きる微生物

から分離された細菌（*Bacillus*属）が発見されています。

一般には、微生物酵素は中性付近に高い活性がある場合が多いですが、先にも述べたように、好アルカリ性微生物が生産する酵素には、アルカリ性で活性の高い酵素のアミラーゼ（pH10.5）、プロテアーゼ（pH11.5）、セルラーゼ（pH10）などがあります。また、好酸性細菌の生産する酵素の中にも、酸性領域で活性の高い酵素があり、将来、それらの酵素の応用も期待されます。

3.4 塩が好きな細菌

古くから日本では、食品を保存するのに塩漬けにする方法を行なってきました。しかし、塩漬けした食品が、ときには腐敗して赤く着色したりして腐ることがあります。その場合の汚染菌は、塩分の濃度が高いところを好んで生育する高度好塩細菌であることがほとんどです。好塩細菌は増殖できる塩濃度で区別されます。塩が好きな細菌を表3-3に示しました。

表3-3. 塩が好きな細菌

分類	増殖最適食塩濃度（M）
非好塩細菌	0.0～0.2
低度好塩細菌	0.2～0.5
中度好塩細菌	0.5～2.5
高度好塩細菌	2.5～5.2

世界ではじめて、石川県能登地方の塩田土壌から三角形の平板状の好塩性古細菌が見つかっています。この細菌は高度好塩細菌の新種であり、鞭毛や運動性を有するグラム陰性菌で赤色のコロニーを形成します。この菌は海水の約8倍の塩濃度（20%）で良好に生育し、温度42℃、中性を至適生育環境としており、原始細胞の直系と思われるため、古細菌で細胞の形が三角形のおにぎりのようです。三角形の好塩性古細菌を口絵2（E）に示しました。

すべての生物では、脂質としてエステル結合の炭化水素が含まれています。古細菌ではエーテル結合のイソプレノイド側鎖を含んでおり、細胞壁にはペプチドグリカンの成分（ムラミン酸）を欠いています。

高度好塩細菌の他に、メタン細菌、高度好酸性好熱細菌、嫌気性好熱細菌なども古細菌に属しており、現在では分類学上は約12属が知られています。

大西らは、海藻、海砂、塩蔵魚、塩田などの試料を塩化ナトリウムを多く含む高度好塩細菌用培地に添加して培養を行い、高度好塩細菌を分離しています。その分離株には、好塩性アミラーゼやヌクレアーゼを生産する菌、あるいは高濃度のカドミウムに耐性をもった細菌など、非常に興味ぶかい性質をもっているいろいろな菌株が含まれています。これらの細菌は、利用面からとても興味がもたれています。

イタリアでは海底の熱水噴気孔から0.5～5.0%の塩分があっても生育し、70～103℃の高温でよく増殖する新種の好塩細菌が分離されました。この細菌は高度好熱性メタン生成菌で、酸素と二酸化炭素を含む気相中の培養液で培養温度85℃、2～3%の塩分濃度のときに最大の生育を示します。

アメリカのユタ州の塩湖からも新種の細菌が分離されました。これは塩分濃度13%、37℃、pH7.2が生育に最適で、グルコースから有機酸（酢酸、プロピオン酸、酪酸）を生産します。この高度好塩細菌は3つの特性を持っていることが知られています。特性の1つは、水または希薄な塩水にさらすと溶菌現象を起こして死んでしまうので、短時間であっても塩分濃度が15%以下の塩水にさらさないこと。2つ目は、細胞膜の脂質成分が他の菌と変わっているため、エステル結合のある脂肪酸のグリセリドをもたず、そのかわりに2つのエーテル結合のあるリン脂質と糖脂質をもっていること。3つ目は、細胞膜に赤色カロチノイドが組み込まれていて、細胞の光化学的障害を予防していることです。

好塩細菌の酵素やその生産物の産業への応用開発はほとんど行われていませんが、今後、大いに期待がもたれています。

3.5 海水で生活する微生物

最近、マリンバイオテクノロジーが、バイオテクノロジーのフロンティアとして期待がもたれ、1988年から当時の通産省で新たに海洋バイオの大型プロジェクトがはじまっています。海洋微生物の棲んでいる環境は、一般に温度や有機炭素濃度が低く、塩分が一定で水圧がかかっていること、そして

第3章 極限環境に生きる微生物

それらの変動が少ないことなどが特徴です。海洋微生物はこのような環境条件に対応するため、陸上の微生物とは異なった代謝様式を持っています。したがって、今後は新しい生理活性物質の探索があまり進んでいない海洋微生物を調べることに期待がかけられています。海洋細菌は、直径が $1\mu\text{m}$ にも満たない粒子で、顕微鏡観察によれば、細菌の多くは鞭毛を持っていないことがわかっています。

矢澤らは、サバやアジの腸内細菌からエイコサペンタエン酸（血液中の中性脂肪を低下させる作用、コレステロール低下作用を持つ）の生成能力の高い菌株を分離しています。この細菌は通常の培養条件において、極めて生育のよい海洋細菌ですので、この菌を用いてエイコサペンタエン酸を工業的に生産することも期待されます。また、今後、魚に共生している微生物に、さらに新しい働きを調べる研究が待たれます。

一般に海洋微生物は、陸上微生物に比べて耐塩性が高いと考えられますが、陸上微生物にも耐塩性の高い微生物がいることから、海洋微生物だけの特性と言うことではありません。池田らは、グルコースとイノシトールのみを分解する新しい細菌を相模湾の海水から分離し、その細菌がグラム陽性菌と陰性菌の生育を阻止できるアミノ配糖体を生産することを報告しています。

海洋生物は、寒天、アルギン酸、フノランなどの多糖類を生産しています。海洋微生物にも多糖類を生産するものが多く見つけられています。梅沢らは、海草から分離した細菌をポリペプトンと酵母エキスを添加した海水で 27°C 、48時間培養すると、多糖類を生産し、その多糖をマウスの固定ガンに投与した結果、ガン細胞の増殖が阻止されて治癒したことを報告しています。この多糖は、ガンに対する免疫性を強めることで抗ガン性を示しています。また、岡見らは海洋細菌から免疫増強作用を持つ新しい物質を分離しています。

今田らは、海洋細菌がプロテアーゼ活性を阻害する物質（タンパク質）を生産することを見つけ、この阻害物質のアミノ酸配列が陸上に棲む微生物がつくる阻害物質とは異なることを報告しています。

また、ドンらは、相模湾の海水から高度好塩細菌を分離し、約20%の塩濃度で最適な作用活性をもつプロテアーゼを分離、精製しています。この酵素は、現在、醤油の製造に利用されています。最近、絵面らは、魚類の病原ウイルスを殺す作用をもった海洋細菌について研究を行ない、海洋には抗ウイルス作用をもつ細菌が多いことを報告しています。

深海底の熱水噴出孔から単離された好熱細菌は、メタン発生型の好熱細菌で、生育の最適温度は85℃、絶対嫌気性のために酸素存在下では生育できません。この細菌は、古細菌に属し、細胞膜は、グリセリンに飽和したイソプ ラニルアルコールがエーテル結合してできた脂質で構成されています。

高度好熱細菌の中のある種のもものは、硫黄や硫化物を酸化し、そのエネルギーで炭酸ガス固定を行っています。この細菌の遺伝子GC（グアニンとシトシン、DNAの4成分のうちの2つ）の含有量が特に変わっているとは思われないことから、高度好熱細菌の細胞内か細胞膜に何らかの保護機能があるものと思われます。超好熱性のメタン細菌を口絵2(B)に示しました。

1990年、ドンらは、数種の海洋細菌がフグ毒を生産することを見つけています。これは非常に興味ぶかいことで、国際的にも大きな反響を呼んでいます。フグ毒をつくる細菌は、これまでにかなりの種類が見つけられています。現在、海洋の動植物のもっている薬理活性物質は、約3,000種類も見つけられており、それらの中には直接的、間接的に細菌が関与しているものが多いです。

このように海洋微生物の生理活性物質は無限に近いほどあり、将来に研究が残された未開の領域です。

3.6 低温が好きな細菌

海も含めて、地球上の生物圏のうちの約80%以上の領域は5℃以下です。従って、地球は低温の環境と言えるので、低温で生活できる微生物が多く棲んでいます。培養にあたっては、特別な装置（5℃以下の低温培養装置）が必要であるうえに、長時間の培養を要するため、これまで好冷細菌についてはあまり研究されていません。

一方、低温環境から分離した細菌は、5～20℃の広い温度範囲で生活でき

第3章 極限環境に生きる微生物

ることから通性好冷細菌と呼んでいます。低温微生物の機能性を表3-4に、低温微生物の用途を表3-5にまとめました。

表3-4. 低温微生物の機能性*

細胞表層機能	低温でも基質との親和性が良い。低温で好都合な構造を維持
膜脂質	膜脂質のイオン透過性が低温で一定の値を示す 膜脂質の流動性が低温でも保つ
タンパク質	低温で機能する代謝に必要な酵素を持つ 凍結保護タンパク質を持つ
リボソーム	低温で機能するタンパク質合成系を持つ
DNA	低温でも機能できる状態を維持
mRNA	低温でも安定

表3-5. 低温微生物の用途*

氷核活性タンパク質	食品加工（野沢菜の漬物）、人工降雪剤、凍結濃縮剤、蓄熱剤
不凍タンパク質	冷凍パン、冷凍食品、生体試料保存剤
低温酵素	低温における活性や処理後の失活が好まれる時（アミラーゼ、カタラーゼ、プロテアーゼ、リパーゼ等）に利用
メタン発酵	低温下の条件で産業廃棄物等を原料にメタンの生産
高度不飽和脂肪酸	高度不飽和脂肪酸がリン脂質
抗菌微生物	新鮮な食品の低温保存の改善
低温発現システム	低温で発現させる必要性の強いタンパク質の発現に応用
バイオレメディエーション	低温下での環境修復（重油汚染等）

*今中、監修「微生物利用の大展開」（一部改変）p.134（2002）

これらの細菌の細胞膜の脂質には不飽和脂肪酸が多く含まれ、低温に適応しています。通常、好冷細菌がもっている酵素は低温が最適の作用温度であり、家庭などで冬期に使う洗濯用洗剤に加える酵素として応用することが可能で、低温でも高い洗浄作用が期待されます。

南極大陸に棲む微生物から分離されている好冷細菌は、*Micrococcus*,

Streptomyces, *Nocardia*の各属に分類されています。好冷細菌の宝庫と言われている南極大陸の半不凍湖（18℃～-23℃）にも、微生物が棲んでいます。なぜ、微生物細胞が凍結しないのか、そんな疑問が残ります。その半不凍湖から分離された1菌株が一般の細菌と異なり細胞表面に多糖のようなもので覆われていました。また、細胞内には低温感受性酵素である乳酸デヒドロゲナーゼの凍結保護タンパク質を持っていることを、私たちの研究室ではじめて報告しました。その凍結保護タンパク質は細胞保存剤や臓器保存剤に利用されることが期待されています。この細菌（*Pseudomonas antarctica*）の電子顕微鏡写真を**口絵1(A)**に示しました。

2002年5月、兵庫県の阪神地区に降った雹（1個の平均が約4g）の中心部から多くの微生物が見つかりました。

採取した雹を殺菌した生理食塩水で表面を洗浄し、緩衝液で溶解後、その液を培養液の入っているシャーレの上に流し、18℃で培養して微生物を分離しました。その微生物を含む水溶液の凍結する温度を測定した結果、約160個あるコロニーの菌株のほとんどは-20℃付近で凍結し、2個のコロニーが-3℃付近で凍結しました。-3℃付近で凍結した菌株の菌学的諸性質を調べ、同定した結果、2菌株とも氷核活性細菌であることがわかりました。これらの菌株が雹中に含まれていたことから、凍結耐性を有していることが考えられます。そのうちの1菌株の凍結耐性を-20℃で24時間後の生存率を調べた結果、雹中に含まれていた菌株は凍結耐性能が高いことがわかりました。凍結耐性能が高い要因として、生存の温度を低下することによって、2種類の酵素が活性化され、菌体内に糖類が蓄積し、凍結防止に寄与しているものと思われます。まだまだ、好冷細菌には、研究課題が多く残っており、将来の研究の進展が楽しみです。阪神地区に降った雹の写真を**口絵4(B)**に示しました。

3.7 環境ストレスに強い微生物

紫外線に対する微生物の反応

微生物がいろいろな環境にどのようにして耐えているのか、または適応できるのかを知ることはきわめて興味深いことです。通常、微生物は殺菌燈

第3章 極限環境に生きる微生物

（紫外線、波長、200～300nm）を照射することで死滅します。つまり細胞内の遺伝子が紫外線をよく吸収して、そのために遺伝子のDNAの塩基配列に狂いが生じることで細胞が死んでしまうのです。

それでは、遺伝子が紫外線によってどのように損傷されて死ぬのか、また損傷された遺伝子がどのような仕組みで修復されるのか、いろいろと興味があります。微生物の遺伝子の分子に紫外線が吸収されて、もっとも安定で、しかも、もっとも多量にできる光化学反応物はピリミジン2量体（2つのピリミジン塩基間にシクロブタン型架橋結合が生じた2量体の呼称）です。その2量体が平均1～2個できると死に至ると推定されています。

紫外線照射を受けた細胞に、300～500nmの可視光線を当てると、致死効果著しく減少することが知られています。これは光回復酵素（大腸菌のものは分子量5万程度）が可視光線を利用して、ピリミジン2量体を開裂し、もとのチミンに戻すからだということがわかっています。大腸菌に紫外線を照射して生き残っている菌株の中には、野性株よりも紫外線に対して感受性の高い変異株が約20倍も多く見つけられています。その変異株は、修復の機能を失うことで感受性が高まったものと考えられています。

浸透圧に対する微生物の反応

私たちにもっとも身近な微生物である大腸菌は、私たちの生活の中で、栄養源、温度、pH、酸素、浸透圧などの変化に対してもさまざまな反応を示します。

例えば、微生物による腐敗を防止しようとするとき、浸透圧が高い環境のもとでは微生物が生育できないことを利用して、食品を砂糖漬けにしたり塩漬けにしたりします。微生物の細胞がこれまでとは違う浸透圧に直接さらされると、細胞が膨張して壊れたり、逆に縮んだりするので、微生物の細胞は浸透圧の変化に対応して、細胞の内外の浸透圧を調節する何らかの機能が働いていると考えられます。

大腸菌は、細胞内に糖類や無機化合物などを取り込んで、エネルギーを生産し、また、大腸菌の外膜の中にあるタンパク質は、小さいトンネルを形成していて、高分子物質が膜を透過できず、栄養物（低分子物質）だけが自由

に膜を通過して、それを細胞が利用できるようにしています。そういう普通の仕組みのほかにも浸透圧に反応する別の機能があります。

水野らは、培養液の組成をいろいろと変えて大腸菌を増殖させて外膜の中にある2種類のタンパク質の量が変化していることを見つけました。これは培養液の浸透圧に反応しての変化だと報告しています。例えば、培地に食塩や砂糖を加えて浸透圧を高めた状態で増殖させた大腸菌は、ある種のタンパク質を外膜につくりませんが、反対に浸透圧の低い培地で増殖させた大腸菌の外膜には、浸透圧を高めた時にできるようなタンパク質はほとんど合成されずに他のタンパク質が合成されていました。このように大腸菌は、その外膜に2種類のちがったタンパク質を外界の浸透圧に反応しながら合成しています。

これは高浸透圧または低浸透圧の条件で、いろいろな遺伝子が活性化されるためにもたらされる結果だと考えられています。

熱ショックに対する微生物の反応

増殖期の大腸菌は、低温（30℃）から高温（42℃）に移すと、5～10分間で、熱ショックタンパク質の合成率が著しく上昇します。これまでに電気泳動で分析した結果、17個の熱ショックタンパク質の存在が確認されています。大腸菌を高温にすると、それに伴って熱ショックタンパク質の発現が活性化され、その効果は速やかに現れますが、なぜ速やかに遺伝子が活性化するのか、そのメカニズムは十分にはわかっていません。

しかし、菌体内でいろいろな反応を行っているタンパク質の能力には驚くべきものがあり、生まれもった性質を発揮しながら、いろいろな場所で働いているのが熱ショックタンパク質で、シャペロニン（chaperonin）と呼ばれています。細菌が高温のストレスにさらされると、細胞の中のタンパク質は変性しやすくなり、シャペロニンはその変性しかかったタンパク質と結合して、変性タンパク質相互の凝集を防いでいます。シャペロニンと結合した中間体は、ATPのエネルギーを使ってシャペロニンから離れ、離れたものもとのタンパク質の構造と同じものになっています。

最近、ガン細胞に熱を加えると死滅することが知られています。そのこと

第3章 極限環境に生きる微生物

と、熱ショックに対するガン細胞の反応との因果関係は、大きな研究課題になっています。様々な環境で生活している細菌類の区分と生育条件を表3-6に示しました。

表3-6. 様々な環境で生活している細菌類の区分と生育条件

酸・アルカリ性因子による区分	
好酸性細菌	: pH3またはそれ以下で増殖できる細菌。
好アルカリ性細菌	: pH10またはそれ以上で増殖できる細菌。
混合領域による区分	
好酸性好熱細菌	: pH2から6で増殖できる好熱細菌。
好アルカリ性好熱細菌	: pH8から10で増殖できる好熱細菌。
好アルカリ性好塩細菌	: pH9から10で増殖できる 高度好塩細菌

乾燥に強い地衣類

地衣類は菌類と藻類の共生体で微生物に扱われ、カビやキノコと同じ真菌に属し、互いに助け合って生活しています。その地衣類は、世界中に広く分布し、国内では多くの種類が知られています。我々の身边にも多くの地衣類が生育していますが、大気汚染や環境の変化に弱い種類は都会から急激に減少しています。しかし、都市部から離れたところでは、岩の表面や木の枝や古木の表面に多くの地衣類を見ることができます。また、少し変わったところでは、砂漠、高山の岩場、南極大陸、大木の表面、酸性、塩基性に至る通常植物が生息できないような極限環境にも生息しています。

エジプトでは、紀元前18世紀から生活に利用された記録があり、ヨーロッパでは、15世紀に民間薬として、現在でも健胃薬、風邪薬、健康増進薬、鎮咳薬等に利用されています。南アメリカでは、地衣体（サルオガセ）を水で溶かした物に皮膚改善効果があることが知られています。北海道、青森、秋田地方を除く国内至る所の低山地に、よく生育しているウメノキゴケを口絵4 (E) に示しました。口絵から明らかなように灰緑色の葉状で、腹面は、黒褐色です。

表3-7. 地衣類、コケ、キノコの差異

	地衣類	コケ	キノコ
細胞	菌類と藻類の共生体	葉緑体をもつ細胞	菌糸
外形	葉状、樹枝状	葉と茎が区別される	葉と茎が区別なし
色	橙色、黄緑、灰色	緑色	茶色、黄色、赤色
増殖	胞子、粉芽等	主に胞子	胞子
菌学上	共生体	植物	菌類

地衣類、コケ、キノコの差異を表3-7に示しました。地衣類の形により樹枝状、葉状、痂状の3つに区別されています。地衣類の生育は、他の植物や微生物に比べて著しく遅いことから、地衣成分には、生長抑制物質が含まれていると考えられています。また、地衣類自身が極限環境に耐えるための、耐乾機能、耐凍機能、耐寒機能、その他、保湿機能、抗酸化機能、紫外線保護機能、殺菌機能等を持っています。

樫の木に寄生している地衣類（サルオガセ科）から抽出したオイルは、香水によく使用され、粘度が高く、香りの持続性が高いため、香りの定着剤として使用されます（肌に直接つけるのは避けたほうがいいようです）。特にシプレー系香水には欠かせない香りです。シプレー系香水とは、一言で言えば、オークモス+ベルガモットの香りで、深い森林や湖を思わせるような格調高い香りです。サルオガセ科の1種であるササクレカラタチゴケの写真を口絵4（E）に示しました。