

第4回 9月11日(火)

かくされた自然～低温環境で活躍する微生物たち～

講師：低温科学研究所 教授 福井 学

1. 低温環境に生息する微生物 ～南極への誘い～

[求む男子。至難の旅。僅かな報酬。極寒。暗黒の長い日々。絶えざる危険。生還の保証なし。成功の暁には名誉と賞賛を得る。アーネスト シャックルトン]

これは、1910年代に英国人極地探検家シャックルトンがロンドンの新聞に出した南極大陸横断探検求人広告です。南極点到達をノルウェーのアムンゼンに先を越されたため、より難易度の高い探検を企てたのです。危険な探検にも関わらず、隊員を希望する人が後を絶たなかったそうです。1914年に南極に向かったのですが、その年はいつになく寒冷で、とうとう隊員28名を乗せたエンデュランス号(「不屈の精神」と言う意味)はウェッデル海の氷塊に阻まれて、2年にも及び漂流生活を余儀なくされました。その間、船は氷山の圧力で破壊され、氷盤でのテント生活、救命艇での航海と苦難が襲いかかりました。その間南極の真冬も経験しています。想像してみてください。太陽が全く姿を見せない極地で、しかも、氷盤でのテント生活を。現在のように機能的な装備、計測機器、そして通信手段は発達している訳でもなく、しかも食料も十分ではありませんでした。時に激しいブリザードに見舞われたり、極寒のなかで生命を維持することなど不可能に近く、絶望的です。シャックルトン隊が経験した最低気温は不明ですが、たとえば、昭和基地周辺ではマイナス50を記録しています。現在記録に残っている世界最低気温は南極のポストーク基地(ソ連)でマイナス89.2でした(1983年7月21日)。こうした極寒の極限環境では防寒具なしでは私たちヒトは生存できません。また、防寒具だけでは不十分で、私たちの体温を維持するためには食料が必要です。食料を摂取し、体内で燃やすことによりエネルギーを得ることが出来ます。このときに酸素が使われます。ロウソクを燃やすには酸素が必要なことは良く知られていることですが、同様に体内でも食料を酸素を用いて酸化することで生体エネルギーを生産することが出来ます(酸素呼吸)。文明社会から遠く離れた南極の地では当時食料の補給は自前で行うしかありませんでした。漂流生活の中で得られる食料はアザラシやペンギンだったそうです。

2. 南極にすむ微生物たち

2-1. 宗谷海岸に点在する露岩地帯

氷点下の世界では多くの生命は生きていくことが出来ず、死に至ります。それは細胞が凍ってしまうからです。細胞内の水が凍結してしまうと、水中に含まれていた塩類が水の結晶から除かれ、結果として細胞内が高い塩濃度になります。また、結晶水が鋭い刃物のように振る舞い、細胞膜や細胞内器に損傷を与え、細胞死に至ります。南極では「低温」という環境条件の他に、「強い紫外線」「乾燥」「貧栄養」など、生命にとって不適な環境因子が加わります。

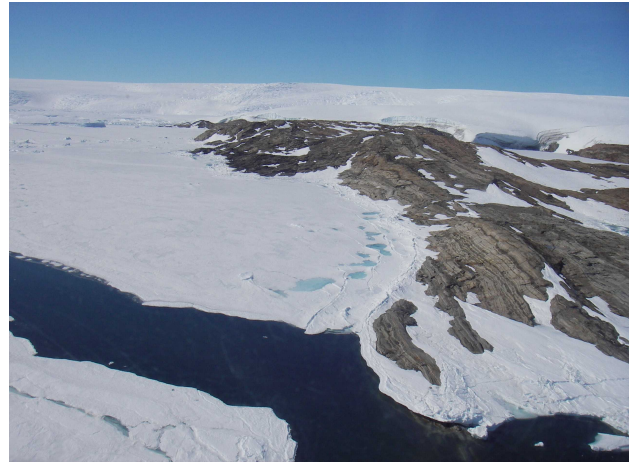
夏の間、強い紫外線は南極観測隊員を常に悩ませます。紫外線はDNAに損傷を与え、最悪の場合、皮膚がんを誘発します。微生物は体重に対して表面積が大きいので紫外線の影響は甚大です。乾燥は、液体の水が少なくなことを意味します。つまり、水なしでは微生物は活発に活動できません。



図1 南極宗谷海岸の地図

さらに、微生物の増殖のための栄養分が極めて希薄です。はたして、こうした過酷の環境で微生物は生きていけるのでしょうか？

2005年12月、私は生まれて初めて南極に行く機会に恵まれました。オーストラリアのフリーマントルで砕氷艦しらせに乗り込み、南極宗谷海岸に向けて出航。約2週間で昭和基地沖に数十kmのところまで停泊。長い船内生活に終止符をうち、ヘリコプターでランドボックスヘッタに移動しました(図1)。



飛行中、広大な氷海、ところどころに筋状にのびるアイスクラック、そして大陸から迫り来る氷河を目の当たりにして、「こんなところに生き物が住んでい

図2 南極の露岩地帯

るのだろうか？」と疑問がわいて来ました(図2)。さらに飛行を続けると、赤茶けた岩盤が見えて来ました。これが露岩地帯と呼ばれるところです。南極大陸と言うと、氷の世界と想像しがちですが、大陸の約1%がこうした露岩地帯です。ヘリコプターで大地に降り立つと、そこは草も木も生えていない、無機質の世界が広がっています。火星には行ったことはありませんが、アメリカ航空宇宙局(NASA)の写真で見たように、「なんか火星みたい」と言うのが率直な感想でした。

2-2. 南極のオアシス

太陽の沈まない夏の期間、こうした露岩地帯を歩いていると、至る所に大陸氷河が解け出して、水たまりや小さな沢ができます。そうした場所にはコケや藻類が生息していることがあります。まさに、砂漠のオアシスのようです。乾いた露岩の表面には、黄色、オレンジ、灰白色と言ったシミのような模様が観察されます。これらは地衣類です。地衣類は、藻類(緑藻類やラン藻類)と菌類が共生したもので、藻類が光を利用して光合成を行い、その産物を菌類が利用しています。先に紹介しましたが、極地は低温でしかも水分不足と言う、生物にとっては厳しい環境です。地衣類の間には野外でマイナス50の低温でも死滅しないものもいます。これは細胞の内部は脱水濃縮されるのですが、氷は地衣体組織の隙間で成長することによって細胞が破壊されないような仕組みがあるからです(細胞外凍結)。マイナス20以下でも光合成が出来る種類も知られており、藻類と菌類がお互いに共生体を形成することによって、極地の低温環境や乾燥条件から構造的にも機能的にも適応していると考えられています。



2-3. 雪の中で増殖する微生物

ラングホブデの雪鳥沢と呼ばれる地域は南極特別保護地区(ASP)に指定されており、立ち入りには環境大臣の許可が必要です。大陸氷河がせり出し、融解水が沢伝いに流れ、海に流出していますが、ユキドリと呼ばれる白い鳥の営巣地になっています。ユキドリの排泄物が沢に負荷され、コケや地衣類の群落が発達しています(風衝地生態系)。雪鳥沢から一本西側に広がるやつで沢で

図3 南極で観察される赤雪現象(宗谷海岸ラングホブデやつで沢)

は日当たりの良い傾斜地があり、万年雪も存在します。良く観察すると雪が赤くなっている場所があります(図3)。また、緑色の雪もあり、これらは彩雪現象と呼ばれています。なぜ雪が色つくのでしょうか?手がかりを得るために、赤くなっている雪を採取して、顕微鏡で見てください。約20ミクロン位の球形の赤い色素で満たされた藻類が数多く観られ、クラミドモナスと呼ばれる緑藻類の胞子です(図4)。赤い色素は光合成のための補助色素でカロチノイドですが、南極のような強い紫外線から細胞を守る働きがあります。赤い雪を良く観察すると、緑色のラン藻やバクテリアも観察されます。冰雪表面で増殖することのできる藻類のことを氷雪藻と呼びます。

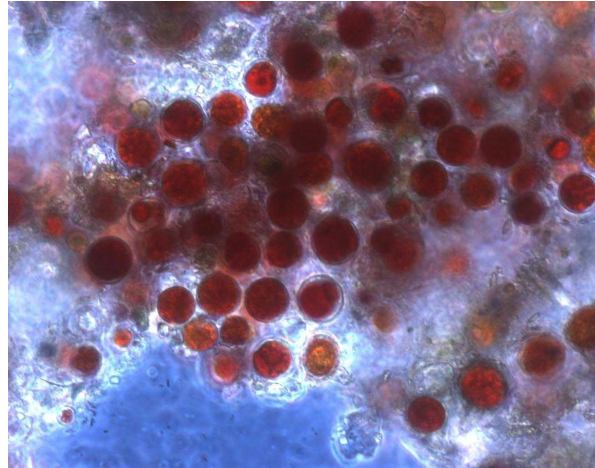


図4 赤雪の中で増殖した藻類(緑藻のなかま)

ではいったい、冰雪の上でこれらの微生物はどのように生活しているのでしょうか?日中日射が強くなり、冰雪表面が温められると僅かに氷が解けます。冰雪中の液体の水の中で藻類は光合成を行い、有機物を作ります。ただし、藻類自身の増殖のためには栄養分が必要ですが、冰雪中には窒素分が不足しています。窒素を補うために、

大気中の窒素ガスからアンモニアに変換する窒素固定作用により細胞内に取り込みます。しかしながら、窒素固定作用はエネルギーを消費する反応ですので、藻類は身を削って何とか窒素を賄うとします。もし、たまたま、ユキドリの排泄物(窒素分を多く含んでいる)が藻類の住んでいる冰雪に落ちて来たら、藻類にとってはとても幸運なことです。このようにして栄養分が供給されれば、藻類は活発に光合成を行い、冰雪表面を緑~赤色に彩色するくらいに増殖を行います。その結果、有機物も作られ、その有機物を利用する従属栄養性のバクテリアも増えることとなります。バクテリアの作用の結果、有機体の窒素からアンモニアや硝酸などの栄養塩に変換され、再び、藻類によって利用されます。夜間になれば気温も下がり、冰雪表面も凍結してしまいます。ブリザードが吹けば、冰雪表面温度がぐっと下がり、新雪で覆われたりもします。4ヶ月間も太陽が出ない冬期間、氷雪藻やバクテリアがどのように生き残り、どのようにして次の夏に彩雪現象を復活させるかはまだ良く分かっていません。

3. 融雪時に観察される身近な微生物現象

冰雪と言う、生物にとって過酷な環境で増殖する微生物は極地に行かなくても身近に観察することが出来ます。例えば、雪解けのころの水田や湿原です。一例として、尾瀬のアカシボ現象をご紹介します。毎年4月末から6月にかけて尾瀬沼や尾瀬ヶ原湿原では短期間に雪が茶褐色になります(図5)。茶褐色の雪を融かして顕微鏡で観察すると、ガリオネラと呼ばれる鉄酸化バクテリアの鞘や茶褐色の鉄酸化物が認められます(図6)。これは、どういことでしょうか?雪解けとともに地下水が泥炭層を浸透し、積雪中に押し上げられます。その際、融解水中に大量の還元型の鉄(Fe^{++})がとけ込んでいて、



図5 雪解けのころ尾瀬ヶ原(群馬県片品村)に発達したアカシボ現象

この鉄を空気から供給される酸素や雪中に含まれる硝酸塩 (NO_3^-) を用いてバクテリアが酸化します (微生物学的鉄酸化)。この仕組みはホッカイトと同じです。ホッカイトには還元鉄が含まれており、良く振って空気と触れさせると熱が発生します (化学的鉄酸化)。このときに熱が発生するのですが、バクテリアはこの時発生するエネルギーを生体反応に用います。このように冰雪と言う低温環境であってもエネルギー源が供給されれば、微生物が活躍できるのです。

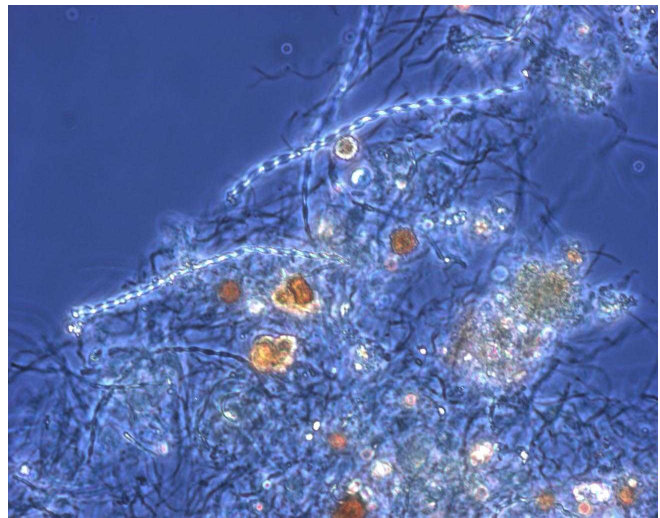


図6 アカシポの中で生息している微生物の顕微鏡写真

4. 微生物の低温環境での適応に仕組みと今後の研究展開

以上のように、普通の微生物が活躍できない低温環境でも好冷性や耐冷性の微生物が生態系の物質の循環に関与しています。それでは、これらの微生物は

いったい低温環境でどのようなメカニズムで活動できるのでしょうか？生体内での化学反応には酵素が必要です。残念ながら好冷性酵素については十分理解されていません。一般に、好冷性酵素は α -シート構造に比べて α -ヘリックス構造の割合が多いことが知られています。シートは固くて曲がらない構造をとりやすいのですが、ヘリックスを多く含む好冷性酵素は、低温環境でもタンパク質が柔軟性に富むのだそうです。また、低温で活性を持つ酵素は、極性アミノ酸含量が高く、疎水性アミノ酸含量が少ない傾向があります。これも低温環境でも酵素は柔軟性を保つことができ、結果として代謝活性を高く維持することができます。さらに、好冷性微生物の原形質膜は低温環境でもその構造を保つことができ、膜を介した物質の輸送が阻害されません。これは、好冷性微生物の原形質膜の組成において、不飽和脂肪酸の割合が高いため低温環境でも原形質膜の半流動性を維持することができからです。飽和脂肪酸の割合が高い原形質膜は低温環境でワックスのよう固化してしまい、機能が失われてしまいます。逆な見方をすれば、好冷性微生物は低温環境下では形や機能が失われないように適応していますが、中温環境や高温環境ではすぐに失活しやすいということです。このことは、好冷性微生物の研究のむずかしさを物語っています。つまり、極地等の野外で採取した微生物試料を 20 以上の高温にさらすことなく、低温で保存して実験室に持ち帰らなければなりません。

低温環境に適応した微生物の生態については中温性や好熱性の微生物に比べて未知の分野です。しかし、最近、低温環境微生物は注目を浴びるようになってきました。それは地球外生命の探求とつながるからです。アメリカ航空宇宙局 (NASA) は南極で採取した火星からの隕石中に生命の痕跡を発表しています。火星にはかつて大量の水が存在したと考えられており、現在でも地下や極域で氷が存在するかもしれません。こうした低温環境に微生物が存在する可能性が示唆されています。地球外生命は地球で誕生した生命と共通性はあるのでしょうか？低温環境微生物の研究は地球外生命の存在の可能性を探る手がかりになるかもしれません。

<参考となる一般書>

1. 日本微生物生態学会教育研究部会編著. 微生物ってなに? ~もっと知ろう! 身近な生命~. 日科技連出版.
2. 日本微生物生態学会教育研究部会編著. 微生物生態学入門~地球環境を支えるミクロの生物圏~. 日科技連出版.