

地球環境と微生物

栗原 達夫*

微生物は肉眼では見ることのできない微小な生物であるが、地球上のほとんどあらゆる環境に生息し、地球環境や私たちの生活と密接な関わりをもっている。環境中の微生物の数を正確に見積もることは難しいが、土壌 1g 中にはおよそ 1~10 億個、海水 1ml 中には水深の浅いところで 100 万個、深海でも 1,000 個程度の微生物が存在すると推定されている。さらに高密度で微生物が生息するのはわれわれヒトなどの動物の体内であり、唾液 1ml 中には 1,000 億個、腸内細菌を含む乾燥糞便 1g 中には 1 兆個もの微生物が存在する。地球上の微生物の総数を見積もることはさらに難しいが、およそ 10^{30} 個程度の原核生物が存在するとの推定もある。われわれにとって住みやすい温暖な環境ばかりでなく、熱水が噴出する海底の高温環境、極地などの低温環境、深海のような高圧環境、塩湖のような高塩濃度環境など、われわれが生きていけない極限的な環境にも微生物は適応し、生息している。

地球上で原始生命体が誕生したのは今から約 38 億年前のこととされる。その時から今日に至るまで、長い年月をかけて微生物は地球上のさまざまな環境に適応し、その生息域を広げてきた。微生物は単に環境に適応するだけでなく、生命活動を営む過程で、地球環境を作りかえてきてもいる。もっとも顕著な例は、約 27 億年前に出現したとされるシアノバクテリア（ラン藻）による大気環境の変化である。シアノバク

テリアは酸素発生型の光合成システムを獲得したことにより、地球上の大気環境を、それ以前の嫌氣的なものから、現在のように酸素濃度の高いものに作りかえた。この変化は、酸素による酸化ストレスに耐性をもつ生物や、好気呼吸を行う生物の出現を促した。地質への影響もきわめて大きく、嫌氣的な環境で海水に溶存していた二価の鉄イオンが、酸化により不溶性の酸化鉄に変化し、大量に沈殿することになった。これにより、現在の地球上に見られる巨大な縞状鉄鉱層が形成されることとなった。縞状鉄鉱層はわれわれが利用できる鉄資源（1,500 億トン）の大部分を占めている。鉄に支えられたわれわれの社会が成立するのも、元をたどればシアノバクテリアのおかげとすることもできる。

これまでに地球上のさまざまな環境から微生物が分離され、それらの生育条件が調べられている。現在知られている微生物の生育可能温度域は $-10\sim 122^{\circ}\text{C}$ 、圧力上限は約 1,000 気圧、pH 範囲は 1~11 である。浸透圧に関しては $\sim 25\%$ の塩濃度存在下で生育可能なものが知られており、放射線に関しては大腸菌の 100 倍以上の耐性をもつものが知られている。利用可能な栄養素の種類も動植物と比べるときわめて多様であり、例えば炭素源に関しては、われわれが利用できる糖質や脂質やタンパク質とはまったく異なるさまざまな有機化合物を利用するものが存在する。呼吸基質としても、動植物が利用する分子状酸素以外の化合物を呼吸鎖の最終電子受

*京都大学化学研究所教授

容体として利用できるものが存在する。このように微生物の世界はきわめて多様であり、われわれから見ると特殊で極限的な環境にも微生物は生息している。このような微生物は極限環境微生物や特殊環境微生物と総称されるが、地球環境全体での物質循環や環境保全に必要な役割を担っている。

新しい極限環境微生物を探索し、微生物がどこまで過酷な環境に生息できるか調べることは生命のポテンシャルを調べることでもある。地球外生命の探索を進める上でも重要な手がかりをあたえようと考えられている。リンの代わりにヒ素を利用する微生物を発見したとする NASA の研究グループの報告（2010 年）が、宇宙に地球上の生物とはまったく異なる生命が存在する可能性を示唆するものとして、センセーションを巻き起こしたことは記憶に新しい。この発見はその後否定されたが、極限環境微生物の研究は地球外生命探索における基盤的知見をあたえるものと考えられ、現在も新しい環境適応能力を持った微生物の探索が精力的に続けられている。

このように、現在の地球上の微生物はきわめて多様な環境に適応しているが、その起源となる原始生命体は高温環境で誕生したと考えられている。あらゆる生物を含む進化の系統樹を作成したときに、その根っここの部分に位置付けられる生物が、ことごとく 90℃ 以上の高温で生育する超好熱菌であることがその根拠となっている。超好熱菌はこのように生物進化を研究する視点から興味深い研究対象であるばかりでなく、その酵素がきわめて高い熱安定性をもつことから、産業上の利用価値も高い。超好熱菌や好熱菌由来の耐熱性酵素は、高温などの過酷な環境でも変性することなく反応を触媒することができ、取り扱いも容易であるため、さまざま

な産業プロセスや基礎研究で利用されている。もっとも広汎に利用されている耐熱性酵素は、遺伝子増幅技術 PCR に用いられる DNA ポリメラーゼであろう。PCR では二本鎖 DNA を 90℃ 以上の加熱処理で解離させて一本鎖 DNA を調製し、これを鋳型として DNA を複製するプロセスを繰り返し行うが、耐熱性 DNA ポリメラーゼは加熱処理で失活しないため、途中で新しい酵素を追加する必要がなく、PCR の利便性向上に必須の役割を果たした。イエローストーン国立公園の地熱地帯から分離された好熱菌由来の DNA ポリメラーゼが、その最初の利用例であったが、現在では、さまざまな高温環境から分離された超好熱菌や好熱菌由来の酵素が市販され、多くの研究者に用いられている。

一方、生命が高温環境で誕生したとすると、0℃ 付近の低温環境に適応した低温菌は、温度軸で見た場合、最も進化した生物と捉えることができる。低温菌は、化学反応速度が低下する低温下でも速やかに代謝反応を進行させるために、触媒能の優れた好冷酵素を進化の過程で作り出してきた。また、低温で流動性を失わない細胞膜を構築するとともに、タンパク質や核酸の適切なフォールディングを介助する種々のシャペロンや、細胞内の水の凍結を防ぐ不凍タンパク質を生産するなど、低温適応のためのさまざまな仕組みを獲得してきた。地球はいわば低温の惑星であり、その生命圏のおよそ 8 割は深海、極地、高山など一年を通して 5℃ を超えることがない低温環境であるが、微生物はさまざまな低温適応機構を獲得することで、その生息域を飛躍的に広げてきたといえる。低温菌由来の酵素も産業上の利用価値が高く、特に品質保持などの観点から低温での処理が望まれる食品加工分野などで注目されている。

地球環境と微生物はおよそ 38 億年の長い歴

史の中で互いに影響をおよぼし合ってきた。優れた環境適応能力をもつ多様な微生物を研究することは、地球上の物質循環や環境形成の仕組みを理解する上で重要である。微生物やそれらが作り出す酵素などの生体分子には産業応用や環境保全における利用価値の高いものも多く、われわれのよりよい生活にも直接的に寄与している。地球環境や人類の生存は、日常的には意識されることのない、目に見えない微生物に支えられているのである。