

## 味気のないエネルギーの微生物によるおいしい話

若井 暁

微生物はどうやら特殊である。というのも、多くの生物が有機物をエネルギー源として利用しているのに対して、さまざまな微生物が無機物をエネルギー源として利用できるからである。微生物は教育を受ける前に“バイキン”として教えられ、教育過程で食物連鎖における分解者として登場する。分解者として有機物を分解することで、地球規模での炭素循環に大きく貢献している。一方で、微生物はさまざまな無機物の循環にも大きく貢献している。本稿では、到底おいしいとは思えない無機物（水素、アンモニア、鉄、硫黄など）を食べてエネルギーを獲得する微生物とその産業利用について記述する。

水素を利用するものとしては、水素酸化細菌、水素資化性の硫酸塩還元細菌やメタン生成菌などが挙げられる。これらの微生物が持つヒドロゲナーゼの中には、水素生産に働く酵素も存在する。現在、クリーンエネルギーとして注目される水素の製造は石油を原料としているが、廃棄物やバイオマス（生物資源）といった安価な原料から水素が生産できれば、資源の競合が減る。

アンモニアを利用するものとしては、大きく分けて硝化細菌と嫌気性アンモニア酸化細菌（Anammox細菌）が挙げられる。硝化細菌は、アンモニアを亜硝酸や硝酸に変換し、地球規模での窒素循環に貢献している。Anammox細菌は、嫌気的環境でアンモニアを窒素ガスに変換する。アンモニアを含む廃水の処理は一般的に強制的に通気する活性汚泥法で行われるが、意外とコストが高い。通気を必要としないAnammox細菌を使用する低コストシステムが最近注目されている。

次に鉄である。鉄は金属鉄と鉄イオンの形態を取り、それぞれ使える微生物が異なる。二価鉄を三価鉄に酸化する鉄酸化細菌は古くから知られているが、金属鉄をエネルギー源にはできない。一方で、近年、金属鉄をエネルギー源とする硫酸塩還元細菌やメタン生成菌の報告がある<sup>1,2)</sup>。これらは、微生物による金属材料の腐食現象（微生物腐食）に関与している<sup>3)</sup>。

微生物腐食は古くに見つかった現象であるが、その重要性はあまり広く認識されていない。石油パイプライン、ジェット燃料タンク、工場の配管、スプリンクラーなど、さまざまなものが微生物腐食を受けると報告されている。たとえば、石油パイプラインの腐食では、操業停止による経済活動の停滞、石油漏出による環境汚染問題なども併発する。腐食に関わる国内の全コストは約3.7兆円/年との試算がある。微生物腐食のリスクを低減し、腐食を抑制することは、産業活動を行う上で重要な課題

である。

さて、もう一つ、硫黄についてはどうだろうか？ 硫黄酸化細菌という微生物がさまざまな硫黄化合物を利用している。硫黄はさまざまな形態で自然界に存在しているが、酸化されるといずれも硫酸となるため、環境の酸性化を引き起こすという問題がある。しかし、この微生物の産業利用のポテンシャルは高い<sup>4)</sup>。

微生物の能力を使って鉱石から有用金属を回収する技術としてバイオリッチングというものがある。主に硫黄を含む銅鉱石から銅を回収する際に利用されている。硫黄酸化細菌が鉱石中の硫黄分を酸化することで、金属を取り囲む硫黄層を物理的に除去し、生じた硫酸によって金属の溶出を促す。実は、この技術には前述の鉄酸化細菌も関与している。銅鉱石には、鉄分も含まれており、鉄酸化細菌がこの鉄を酸化して三価鉄を生成する。この三価鉄が酸化剤となり、ケミカルアタックとして金属の溶出を促すのである。

バイオリッチングは、比較的古くからある技術であるが、再び脚光を浴びている。近年、半導体や燃料電池などに使われる希少金属（レアメタル）の需要が高まっている。しかしながら、レアメタルの供給は、偏在的な産出状況と国際的な取引の問題を抱えている。そこで、国内の都市鉱山（実際の山ではなくレアメタルを含む廃棄物など）の有効利用の観点から、微生物を用いたレアメタルの高効率・低コスト回収技術の開発が進められている。

最後に、近年、炭素循環のバランスが崩れ、二酸化炭素の蓄積が問題となっている。蓄積した二酸化炭素の環境への影響を懸念し、生物工学分野を含め、さまざまな学術分野で、グリーンイノベーションに対する研究が精力的に行われている。グリーンイノベーションとは、環境エネルギー技術革新、すなわち、環境に優しい技術を開発し、二酸化炭素の排出量を減らそうというものである。本稿で取り上げた微生物と無機物の関係は、グリーンイノベーション分野にも貢献できるポテンシャルを持っている。この関係をうまく利用した技術開発が、今後の産業応用の戦略に組み込まれていくことを期待する。

- 1) Dihn, H. T. et al.: *Nature*, **427**, 829 (2005).
- 2) Uchiyama, T. et al.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **76**, 1783 (2010).
- 3) <http://www.bio.nite.go.jp/nbdc/mic2009/index.html>
- 4) 若井, 三本木: *バイオサイエンスとインダストリー*, **68**, 327 (2010).