

## 電子を放出する微生物

井上 謙吾

生物が呼吸をする限り、そこには必ず電子供与体と電子受容体が存在する。我々ヒトであれば電子供与体は食物、電子受容体は酸素である。食物からエネルギーを得る異化の過程で生じた電子を酸素に「捨てている」のである。微生物も同様で、電子供与体としてさまざまな有機物を利用するが、こちらの場合は電子受容体もまた多様である。嫌気的な呼吸を行う微生物は多く存在し、微生物の世界では一般的な呼吸様式である。実験によく用いられている大腸菌も嫌気的な呼吸が可能である。地球表層が酸素に覆われているとはいえ、地中や海中では嫌気的な環境が多くを占めており、そこに住む微生物が酸素を必要とせずに呼吸をしていることは容易に想像できる。嫌気条件下で利用される電子受容体には、硫黄、硫酸、硝酸、鉄などがあり、他にもさまざまな物質が利用される。

鉄還元菌は嫌気性菌を代表する菌の一種で、その名の通り、鉄を還元して生活をしている。つまり、鉄を電子受容体として利用する（電子を渡す）ことができる。鉄を電子受容体とする呼吸形式は進化的に非常に古くから存在し、酸素がまだ地球大気の主な構成成分となる以前から行われていたと考えられている<sup>1)</sup>。一言で「鉄」といってもその酸化物（酸化鉄）にはさまざまな状態が存在する。鉄還元菌は水に溶けているFe(III)を還元することができるが、それだけでなく水に溶けていない状態で存在する酸化鉄（自然界で鉱物として見いだされるFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>など）へも電子を伝えることができる。つまり、固形状の物質に電子を渡すことが可能である。そのため、グラファイトや白金でできた電極にも電子を伝えることで、微生物燃料電池への応用が可能である。鉄還元菌を用いた微生物燃料電池の中には、非常に高い効率で発電が可能なのが開発されている<sup>2)</sup>。

電子受容体が水溶性の物質であれば、細胞内に取り込まれた後、細胞内で電子受容体として利用されればよい。しかし、不溶性の物質が電子受容体となると、細胞内で生じた電子を細胞外へ伝える必要がある。細胞膜は脂質できており、絶縁体のような性質を持つため、そこを電子が通り抜けるためには特別なしくみが必要である。これまでに詳細な研究が行われてきた鉄還元菌 *Shewanella oneidensis*, *Geobacter sulfurreducens* では効率的な細胞外への電子移動には主にc型ヘム（ヘムc）を補因子とするシトクロムcが利用される<sup>2)</sup>。シトクロムcは電子の受け渡しが可能なたんぱく質である。鉄還元菌では、細胞内膜、ペリプラズム、細胞外膜それぞれに

異なるシトクロムcが局在し、バケツリレーのように電子の授受を行って細胞内から細胞外へ電子を移動させると考えられている。全ゲノム配列の決定から、*S. oneidensis* や *G. sulfurreducens* はそれぞれ39, 111個と非常に多くのシトクロムc遺伝子を持つことが明らかになっている（大腸菌ではたった7個である）。それらシトクロムcの大半は一分子中に複数のヘムcを持ち（*G. sulfurreducens* では最大で34個）、効率的に電子を伝えることを可能にしていると考えられる。

鉄還元菌はシトクロムc以外にも電気伝導性ナノワイヤーを産生して細胞外への電子伝達を行っていることが示されている<sup>3)</sup>。電気伝導性ナノワイヤーの構成単位は明らかになっていないものの、絨毛と類似した直径数ナノメートルの構造物で、温度依存的に電気伝導度を変える金属に似た性質を持つことが示されている<sup>4)</sup>。電気伝導性ナノワイヤーは、酸化鉄や電極などの細胞外電子受容体への電子伝達のみならず、個体間の電子の授受にも寄与していることが示されている。ここでいう「個体間」には異種微生物間も含まれ<sup>5)</sup>、自然界ではこのような異種微生物間の電子伝達は当たり前のように行われ、それにより多様な代謝が行われているのかもしれない。微生物が外部から電子を受け取り、利用できれば、稿頭で示した呼吸に必要な電子供与体は何も有機化合物である必要はなく、電子そのものが供給されれば呼吸ができる場合もある<sup>2)</sup>。微生物のこの能力を利用して電極を用いて微生物に電子を供給し、代謝をさせて二酸化炭素から新たに有用な多炭素化合物を合成させるといった研究も行われている<sup>6)</sup>。

微生物が行う電子の授受は古くから知られていたが、最近になって精力的な研究がなされはじめたように見受けられる。その背景には、当該研究の物質生産、エネルギー生産、環境浄化への応用可能性が見いだされたことがある。今後のさらなる発展により、人類のよりよい生活に役立つ技術の基盤となることを期待する。

- 1) Vargas, M. et al.: *Nature*, **395**, 65 (1998).
- 2) Rabaey, K. and Rozendal, R. A.: *Nat. Rev. Microbiol.*, **8**, 706 (2010).
- 3) Reguera, G. et al.: *Nature*, **435**, 1098 (2005).
- 4) Malvankar, N. S. et al.: *Nat. Nanotechnol.*, **6**, 573 (2011).
- 5) Summers, Z. M. et al.: *Science*, **330**, 1413 (2010).
- 6) Lovley, D. R. and Nevin, K. P.: *Curr. Opin. Biotechnol.*, **22**, 441 (2011).