



遠くて近い 12 mm —細菌による細胞外電子伝達—

山村 茂樹

我々人類にとって、12 mm というのはあってないような距離に思える。しかし、もし我々が細菌の大きさになったとしたら…、細菌にとっての 12 mm は、我々にとっての約 20 km になる。歩くにはかなり億劫で、食事でも行くなら自動車や電車を使いたいところであるが、細菌の世界ではそうもいかない。しかし、ある種の細菌は、細胞外電子伝達を行うことによって、細胞が直接接触していない電子供与体・受容体を利用することができる。さらに、個々の細菌による細胞外電子伝達は細胞周辺、すなわち μm レベルの範囲で生じるが、環境中では細菌群集によって形成されたそのネットワークを介して、自らが移動することなく 12 mm (我々の感覚でいう 20 km) も離れた場所での酸化還元反応に影響を及ぼしているかもしれない。最近、そんな興味深い研究結果が、海域底泥を用いた Nielsen らの実験によって示された²⁾。

話が前後するが、細菌による細胞外電子伝達について、ここで簡単に説明したい。そもそも細胞外電子伝達は、嫌気的環境において、Fe(III) 鉱物などの細胞内に取り込めない不溶性電子受容体を利用するために、細菌が編み出した実に見事な戦略といえる。筆者の理解で大きく分けると 2 種類のメカニズムが知られており、(i) 細胞内外の水溶性物質を電子伝達の仲介に用いる場合と、(ii) 細胞表面に形成された導電性の構造体によって電子伝達を行う場合がある。

(i) は “electron shuttling” と呼ばれ、細菌は細胞内もしくは表面で酸化型の仲介物質 (メディエーター) に電子を渡す。その後、還元型となったメディエーターが細胞外へと拡散し、不溶性 Fe(III) 鉱物などへと電子を伝達する。ここで、メディエーターは酸化型の状態へと戻るため、分解などで消失しない限り繰り返し利用される。このメディエーターの代表例として、土壌有機物の主要な構成成分である腐植物質があげられる。植物残渣や微生物遺体の分解産物が縮重合を受けて生成した腐植物質は、微生物分解を受けにくいいため、一昔前は環境中の微生物の代謝に直接的な関わりはないものと考えられていた。しかし、Lovley らによって、ある種の細菌が嫌気呼吸を行う際の電子受容体として機能し、さらに不溶性 Fe(III) 鉱物の還元を仲介することが示された³⁾。また、*Shewanella* 属などの一部の Fe(III) 還元細菌は、キノン様のメディエーターを自ら生産し、細胞外電子伝達に利用していることも明らかとなっている⁴⁾。このケースでは、メディエーターが間に入ることによって、細菌自身が還元できない物質の還元・分解も可能となるため、汚染物

質の分解・浄化にも応用されている⁵⁾。

(ii) は、近年、Fe(III) 還元細菌の一種である *Geobacter sulfurreducens* および *Shewanella oneidensis* において確認されたものであり、細胞表面に形成された線毛様の “ナノワイヤー” などを通じて、より直接的に細胞外の不溶性 Fe(III) 鉱物などへの電子伝達が行われる。詳細については優れた総説⁶⁾を参照されたいが、これらの細菌は電子受容体の制限下においてのみ、導電性のナノワイヤーを発現する。また、Gorby らは、これらの Fe(III) 還元細菌以外にも、ある種の光合成シアノバクテリアや好熱性細菌が同様の構造体を形成することを見いだしている⁶⁾。興味深いことに、後者では、他種の細菌と共培養した際に、両者がこのナノワイヤーで結合している様子も観察されているため、異種生物間での電子伝達に利用されている可能性もある。

いずれのケースも、細胞内外での電子授受を通じて電流が生じるため、これらのメカニズムを応用した電気エネルギーの生産、すなわち微生物燃料電池 (microbial fuel cell) の開発が活発に行われている⁷⁾。さらに、冒頭で触れた Nielsen らの実験では、底泥表面の酸素濃度を変化させると、酸化層から 12 mm 以上離れた下層の硫化水素濃度が分子拡散では説明できない速度で変化することが明らかにされ、Fe(III) 鉱物やメディエーター、そしてナノワイヤーを通じた電流のネットワーク網によって、空間的に大きく隔たった生物および化学的反応が共役している可能性が指摘されている。

温暖化に伴う気候変動が現実味を帯び、高度に複雑化してきた現代社会において、化石燃料に依存せずにエネルギーを生産し、それをいかに効率良く (たとえば 20 km) 離れた場所へ伝達・供給するかが、我々の生存基盤を保っていくうえで至上の課題であるといえる。もしかすると、この小さな生命たちを中心としたダイナミックな生物地球化学的プロセスの中に、エネルギー生産のみならず、安定的なエネルギー供給ネットワークを構築するためのヒントも眠っているかもしれない。

- 1) Lovley, D. R.: *Geobiology*, **6**, 225 (2008).
- 2) Nielsen, L. P. *et al.*: *Nature*, **463**, 1071 (2010).
- 3) Lovley, D. R. *et al.*: *Nature*, **382**, 445 (1996).
- 4) Newman, D. K. and Kolter, R.: *Nature*, **405**, 94 (2000).
- 5) Van der Zee, F. P. and Cervantes, F. J.: *Biotechnol. Adv.*, **27**, 256 (2009).
- 6) Gorby, Y. A. *et al.*: *PNAS*, **103**, 11358 (2006).
- 7) Logan, B. E.: *Nat. Rev. Microbiol.*, **7**, 375 (2009).