

ブラック電気細菌たちが来た

岡本 章玄

ピフィズス菌など、ヒトの健康に良い善玉菌に対して悪玉菌は健康を害する原因となる菌の総称である。他にも、鉄パイプライン腐食や水処理膜の目詰まり、いろいろな悪さをする細菌が知られている。しかし、まとめて何と呼べばいいのだろうか？本稿では所謂「悪い菌」をブラック細菌と呼ぼうと思う。そして、中でも人知れず電子を操る「電気細菌」の能力を持ち、巧みに利用してきたことが暴かれつつある「ブラック電気細菌」の世界的な研究動向を紹介する。文字通り黒くなって悪さをする菌もいれば、黒くないのにブラック電気細菌という場合もあるので、以下ではその点ご注意願う。

これまで、電気細菌に関しては「良い菌」として有効活用するための研究や開発が20年ほど前から進められてきた。電気細菌は、細胞膜の外側にある電極やミネラルなどの固体材料との間で電子を流すことで代謝する特徴を持つ。そのため、廃水処理やCO₂の有効利用といった魅力的なバイオプロセスを電力で、もしくは発電しながら駆動できる。しかも、増殖や自己修復する「生きた電極触媒」となるため、化学触媒よりも被毒に強いという特徴を持ち、広く環境・エネルギーの分野で期待・研究されている。また、これら電気細菌が電極へと電子を流す仕組みに関しては、細胞内外をつなぐ導線のような機能を持つタンパク質群が特定されており、その発見以来、鉄還元菌 *Shewanella oneidensis* や *Geobacter sulfurreducens* を使って盛んに基礎研究が進められている。最近、結晶構造が解かれ、電子だけでなくイオンの流れも操るような興味深い構造と機能の関係が明らかになりつつある¹⁾。

このような電気細菌にとって重要な遺伝子・酵素群が明らかになるに従い、多様な電気細菌が見つかることになる。依然その多くは有用な電気細菌であるが、2018年からその流れが変わってきた。これまで見つかった鉄還元菌の持つ遺伝子群に対して大きく異なるものが病原細菌や鉄腐食細菌などのブラック細菌に見つかったのである。Lightらは、食中毒などの原因菌として知られている *Listeria monocytogenes* が、Dengらは激しく鉄腐食を進行させる硫酸還元細菌 *Desulfovibrio ferrophilus* が新規な電子伝達の酵素を持つことを実験的に示した^{2,3)}。驚いたことに、特定された遺伝子群は広く病原細菌や環境細菌のゲノムで見つかっており、さまざまなブラック電気細菌がいることを示している。さらに、これらの遺伝子を持たないにも関わらず電気を流す病原細菌が、*Klebsiella*

pneumoniae, *Enterococcus avium*, *Enterococcus faecalis*, *Aggregatibacter actinomycetemcomitans*, *Porphyromonas gingivalis* と多数確認されている。また、*Desulfovibrio vulgaris* は鉄腐食菌だが、見た目が黒くなることで“ブラック”電気細菌となる⁴⁾。細胞膜を貫通する電子伝達酵素を持たない代わりに電気導電性を持つ硫化鉄の黒いナノ粒子を膜の内外に作り出し電子の通り道として使う。

特筆すべきは、電気細菌としての性質が、彼らの「害」と密接に結びついている点である。鉄腐食細菌に関しては、有機物などの使いやすいエネルギー源が枯渇している状況で鉄を電子源として利用する。この鉄から電子を引き抜く過程は、まさに鉄腐食反応であり、実際に電気細菌の性質を持つ硫酸還元細菌が激しい鉄腐食を引き起こすことが知られている。また、病原細菌においては、バイオフィームによる感染症を悪化させる。バイオフィームとは細菌の高密度集団であり、病原性細菌の場合には、病原因子を作り出して感染症を悪化させる。電子移動を行う条件では、増殖が早まりバイオフィーム形成が促進される^{2,5)}。これらの電氣的性質の重要性は、言い換えると、電子の流れを止めることが、ブラック細菌への新しい対処法になることを示唆している。

このような電子移動をうまく利用するブラック細菌の側面は、逆に、利用すれば少なくとも薬剤開発や、薬剤評価法に新しい方向性を与える。電子を流す際の鍵酵素の特定などのメカニズムの解明は新しい薬剤標的を生み出すことになる。また、電極上で電流生成をしながらバイオフィームを形成する特定の病原細菌では、代謝活性と電流に相関があることが確認されている⁵⁾。バイオフィームに対しての薬剤効果を、電流の時間変化によって直接評価できる初のシステムとなり、創薬の基盤技術となることが期待できる。

よく知られている身近なブラック細菌が実は電気細菌である可能性は高い。皆様のパートナーにも隠された側面がないか、見た目に惑わされず、一度じっくり考えていただければ幸いである。

- 1) Edwards, M. J. *et al.*: *Cell*, **181**, 665 e610 (2020).
- 2) Light, S. H. *et al.*: *Nature*, **562**, 140 (2018).
- 3) Deng, X. *et al.*: *Sci. Adv.*, **4**, eaao5682 (2018).
- 4) Deng, X. *et al.*: *Angew. Chem. Int. Ed.*, **132**, 6051 (2020).
- 5) Divya, N. *et al.*: *Biosens. Bioelectron.*, **162**, 112236 (2020).