

茶色い沈殿物は面白い

牧田 寛子

鉄の酸化物は、私たちの身の回りの至る所に存在する。いわゆる「さび」とよばれるそれらは、材料を脆くしたり見栄えを悪くしたりと、私たちにとっては不要なものと認識されている。鉄の酸化物は、鉄が酸素と反応することで無機的に生じるが、微生物の作用によっても生成する。たとえば、河川や湖沼、水田などで茶色い沈殿物を見たことはないだろうか。それらは、水に含まれる鉄を利用して生きる微生物が、自身の生育のために鉄を酸化することで生じた鉄酸化物と微生物細胞そしてそれらの微生物がその場に固着するために産生した菌体外高分子などの複合体が沈殿し、バイオマット（微生物皮膜）を形成したものである。我々の身近では、水道管や排水溝の目詰まりを引き起こす原因とされ、一見悪者として扱われがちであるが、現在では、バイオマットと有害な重金属との高い親和性を利用して、地下水中の金属イオン（主に Fe^{2+} 、 Mn^{2+} ）除去（生物接触ろ過）法として上水処理プロセスなどに利用されている¹⁾。

バイオマット中には、螺旋状やチューブ状といった特徴的な形態の鉄酸化物が多量に含まれている。中性・淡水環境域では、これら特徴的な形態の鉄酸化物は *Gallionella ferruginea* や *Leptothrix ochracea* といった鉄酸化細菌によって産生されるため、バイオマットの形成にはこれらの鉄酸化細菌の寄与が大きいと考えられる。鉄酸化細菌が代謝の過程で生成する鉄酸化物は、粒子径がナノサイズと小さく、非晶質であるため、工業分野での有益な素材としての可能性を持っている。たとえば、鉄酸化細菌 *L. ochracea* の生育に伴い生成するチューブ状の鉄酸化物は、リチウムイオン二次電池の負極材として優れた特性を持ち、特異な充放電機構を有することが明らかとなっている²⁾。

鉄酸化細菌は、19世紀の先駆的な微生物学者らによって文献に記載された最初の微生物の一つである。これまでにさまざまな環境からの検出例が報告されているが、単離され生化学的性状が明らかになっているものはわずかである。特に海洋性の独立栄養鉄酸化細菌については、*Mariprofundus ferrooxydans*³⁾の単離が2007年に報告されているのみである。*M. ferrooxydans*は、淡水性の鉄酸化細菌 *G. ferruginea* と互いに非常によく似たストークと呼ばれる螺旋状の有機高分子を産生する³⁾。このストークと呼ばれる物質は、鉄の酸化物を吸着・保持する基盤の役目を有しており、これにより特徴的な形態の鉄酸化物が生成する。

深海の熱水活動域や湧水域の近傍には、多量の鉄を含んだバイオマットが存在する。このようなバイオマットは世界各地で確認されており、場所によっては厚さ30 cm以上、百数十m四方にわたって分布する場合もある⁴⁾。先に述べた淡水環境での例と同様に、これらのバイオマット中には微生物由来と考えられる特徴的な形態の鉄酸化物が多量に含まれている。海洋底において鉄酸化

細菌の寄与により生産される有機物は海底バイオマスの50%を占めるとされており⁵⁾、*M. ferrooxydans*も海底において高い有機物生産能力を発揮していると考えられる。

2013年に公開された文献によると、*M. ferrooxydans*の電気培養（培養液中に配置した電極に任意の電位を与える培養法）において、酸化された鉄イオンを培養液中の電極によって+0.1 V（対水素標準電極、中性）で再還元し、連続的なエネルギーの供給を行うことで二酸化炭素から有機物の高効率での生産の可能性が示されたことである⁶⁾。また、好酸性の鉄酸化細菌 *Acidithiobacillus ferrooxidans* では pH 1.8 の環境において+0.4 V（対水素標準電極）の電極から細胞外膜に直接的に電子を与える電気培養で独立栄養的に増殖可能であることが報告された⁷⁾。上述の例は、鉄を酸化する際に得られるエネルギーに相当する正の電位の電気を与えることで、二酸化炭素から有機物を生産できることを意味している。

細胞の外側から電子の受け取りが可能な微生物は、鉄酸化細菌だけでなく多数存在していると考えられている。鉄の沈殿物が含まれる環境では、鉄が種類の異なる微生物間での電子のやり取りのメディエーターとなり、その場の微生物生態系全体の代謝機能を上げる役割を果たすとされている。たとえば、*Geobacter sulfurreducens* と *Thiobacillus denitrificans* との混合培養系において、両者単独では生育できない条件で培養を行ったところ、導電性酸化鉄の存在下で共生関係が成立し、さらに代謝速度が10倍以上に上昇することが実証されている⁸⁾。

これらの知見から、鉄を含むバイオマット中での微生物コミュニティが、代謝機能として細胞外および細胞間の電子移動（細胞外および細胞間の電子伝達網）を利用することによって維持されている可能性を示す。

鉄は周辺環境に応じて自然に安定な状態へと移行する。したがって天然環境ではあらゆるところで鉄の酸化還元反応が生じていると考えられる。このような自然環境で自発的に生じる反応を巧みに取り入れ、微生物は鉄を代謝に利用するようになったのかもしれない。もしどこかで茶色い沈殿物を見かけたら、じっと観察してほしい。その中で生じている微生物の機能や進化を考えながら。

- 1) 鈴木市郎：生物工学，**90**，170 (2012)。
- 2) Hashimoto, H. et al.: *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 5374 (2014)。
- 3) Emerson, D. et al.: *PLoS ONE*, **2**, e667 (2007)。
- 4) 国立大学法人岡山大学プレスリリース：http://www.okayama-u.ac.jp/tp/release/release_id115.html (2016/4/1)
- 5) Bach, W. and Edwards, K. J.: *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 3871 (2003)。
- 6) Mogi, T. et al.: *Chem. Commun. (Camb)*, **49**, 3967 (2013)。
- 7) Ishii, T. et al.: *Front. Microbiol.*, **6**, 994 (2015)。
- 8) Kato, S. et al.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **109**, 10042 (2012)。