

バイオミネラルリゼーションで環境を浄化する

堀池 巧

我々の身近には貝殻や真珠、菌、骨など生物由来の無機固化物（バイオ鉱物）が多く見られる。生体がバイオ鉱物を生成する反応をバイオミネラルリゼーションという。バイオミネラルリゼーションは動物に限らず多くの生物で知られており、特にさまざまな元素を固化することから微生物を対象にした研究が盛んに行われている。

バイオミネラルリゼーションには、生物制御型と生物誘発型の二つが定義づけられている¹⁾。微生物で代表例をあげると、前者では磁性細菌 *Magnetospirillum magneticum* が知られている。*M. magneticum* は、細胞内に微小なフェライト粒子を形成し走磁性を獲得する²⁾。この生物制御型のバイオミネラルリゼーションは能動的な反応ともいえる。一方、生物誘発型のバイオミネラルリゼーションは、細菌類や菌類など多くの微生物で報告されている。たとえば、環境常在細菌 *Pseudomonas aeruginosa* は、カドミウムや鉛などの細胞外の重金属を細胞表面に吸着、固化する³⁾。こうした生物誘発型のバイオミネラルリゼーションは受動的な反応といえる。これらの生物制御型と生物誘発型のバイオミネラルリゼーションは、細胞内外や細胞表面で行われ、そのメカニズムは代謝に伴う酸化還元反応や細胞表面などに表出した官能基（カルボキシル基やリン酸基など）への吸着反応、分泌成分との固化反応など多岐にわたる。バイオミネラルリゼーションは、1) 元素特異性、2) 環境低負荷、3) 低コストという利点から環境浄化や金属資源回収、材料開発などの分野への応用が期待されている。

ここでは、近年の日本において特に重要な環境問題となっている放射性核種汚染の新たな浄化技術となりうるバイオミネラルリゼーション研究を紹介する。環境中に漏れた放射性核種のストロンチウム (Sr) やコバルト (Co) などを吸着除去するために、非生物的に作製されたハイドロキシアパタイト (HAP) やゼオライトが一般的に用いられる。しかし、これらの吸着剤は海水など塩濃度が高い廃水では夾雑イオンに妨害され放射性核種を除去できない。Handley-Sidhuらは、*Serratia* sp. NCIMB 40259株が生成するHAP（バイオHAP）に着目してSr²⁺、Co²⁺吸着能を調べたところ、海水濃度90%においてバイオHAPが非生物的HAPより10倍以上高いSr²⁺吸着能と2倍以上高いCo²⁺吸着能を有することを明らかにした⁴⁾。バイオHAPが高い吸着能を示した理由として、

非生物的HAPと比べて鉱物を構成する単結晶サイズが1/2ほどで(54 nm)、表面積が4倍ほど広い(約94 m²/g)ことから単位あたりの吸着容量が大きい点と、有機物や非晶質構造を含むことによりさまざまな吸着サイトを形成した点があげられた。このことから、非生物的HAPより微細で複雑な構造を持つバイオHAPが環境浄化剤として高いポテンシャルを持つことが示された。今後のバイオ鉱物による海水など高塩濃度下における放射性核種除去方法の開発が期待される。

放射性核種のウラン (U) は、核燃料物質として原子力分野で重要な元素である。その一方で水溶性のU(VI)による地下水汚染が問題となっている。また地中環境（土壌や地下水）における生物とウランの相互作用は、放射性核種を管理するうえで重要な研究課題である。U (VI) 還元によるウランのバイオミネラルリゼーションは、川底堆積物から分離された鉄還元細菌 *Geobacter metallireducens* や *Shewanella oneidensis* MR1、泥状堆積物から分離された硫酸還元菌 *Desulfovibrio desulfuricans* などの微生物で報告されている⁵⁾。上述した微生物のU (VI) 還元は、嫌気呼吸において電子伝達系でシトクロム *c* を介してU (VI) を電子受容体として利用する反応機構である⁵⁾。この反応によりU (VI) をU (IV) へと還元し、ウランイト (UO₂) として固化してウランを水溶液から除去する。アメリカのオークリッジやハンフォードといった放射能汚染域ではすでにウラン除去に向けた実地試験が行われており、バイオミネラルリゼーションの応用研究が進められている⁵⁾。

放射性核種の他にもヒ素やセレンといった毒性元素や重金属のバイオミネラルリゼーションの研究例があるが、実用化された例はきわめて少ない。今後、メカニズムの解明や汚染域での実地試験などさらなる研究が進み、環境汚染問題の解決の糸口になることを期待したい。

- 1) 渡辺哲光：バイオミネラルリゼーション，東海大学出版(1997)。
- 2) 加藤隆史：バイオミネラルリゼーションとそれに伴う新機能材料の創製<普及版>，シーエムシー出版(2014)。
- 3) Vijayaraghavan, K. and Yun, Y. S.: *Biotechnol. Adv.*, **26**, 266 (2008)。
- 4) Handley-Sidhu, S. *et al.*: *Sci. Rep.*, **6**, 23361 (2016)。
- 5) Newsome, L. *et al.*: *Chem. Geol.*, **363**, 164 (2014)。