

資源処理における陸上微生物および海洋微生物の活用

小山 恵史・淵田 茂司・清水 佑馬・牧田 寛子

「環境資源工学」第71巻 第1号（通巻第246号）別刷

2024年6月

資源処理における陸上微生物および海洋微生物の活用

小山 恵史^{1*}・淵田 茂司²・清水 佑馬²・牧田 寛子²¹九州大学²東京海洋大学

Use of Terrestrial and Marine Microorganisms on Mineral Processing

Keishi OYAMA^{1*}, Shigeshi FUCHIDA², Yuma SHIMIZU² and Hiroko MAKITA²¹Kyushu University²Tokyo University of Marine Science and Technology

1. 緒 言

微生物は医療や食品等様々な分野において利用されているが、これは資源処理においても例外ではない。採掘された金属鉱物に土着する鉄・硫黄代謝バクテリアを活性化させることで金属鉱物からの金属抽出を促す技術（バイオリッチング、バイオオキシデーション）は太古の時代から利用されているものの、系統的に理解され始めたのはここ 100 年の話であり、最近も注目を集めている。また、資源開発に伴って排出される鉱山廃水の処理にも微生物の代謝活動が利用され、パッシブトリートメントと呼ばれる自然回帰型坑廃水浄化システム等のプロセス中において微生物による鉱物化反応（バイオミネラリゼーション）は重要な役割を担っている。これら一連の技術は主に陸上鉱山における資源開発活動の中で議論されてきたが、海底熱水鉱床を始めとする海底資源への注目が高まるにつれて、その対象を海洋に広げつつある。このことは、従来考慮されてこなかった海洋微生物が、資源処理プロセスに関与した際の影響を評価する必要があることを意味している。

2. 陸上微生物を活用した
バイオミネラルプロセッシング

陸上微生物、特に金属鉱山の鉱石等に土着する微生物を用いた研究事例は、これまで数多く報告されており、金属鉱物から目的金属を抽出するためにバクテリアやアーキアなどの微生物の代謝活動を利用するバイオリッチング技術は、黄鉄鉱や閃亜鉛鉱、酸化銅鉱や二次硫化銅鉱に対して極めて効果的であることが知られている。ヒープリーチングやタンクリーチングなどの大規模操業がフィンランドの Talvivaara 鉱山や南アフリカの Fairview 鉱山で実施されており、ここでは超好酸性の鉄酸化・硫黄酸化菌である、*Acidithiobacillus* 属や *Leptospirillum* 属、*Sulfobacillus* 属等が反応に関与することで、鉱物の溶解を促進することがわかっている¹。一方、一次硫化銅鉱物である黄銅鉱や斑銅鉱、硫ヒ銅鉱などを対象とした場合のバイオリッチングの有効性は低い。これは一次硫化銅鉱が難溶性であることに加え、鉱物溶解の最適溶液電位帯が二次硫化銅鉱と異なることにも起因する。二次硫化銅鉱は溶液の酸化還元電位が高ければ高いほど溶解速度が大きくなるが、一次硫化銅鉱は顕著な溶解速度の上昇を示す特異的な電位帯が存在する。バイオリッチング過程では鉄酸化菌の代謝により溶液電位が過度に上昇することで、一次硫化銅鉱の最適溶液電位帯に溶液電位を調整することが難しく、その結果鉱物溶解速度が小さくなるのが一次硫化銅鉱へのバイオリッチング適用を困難にしている。これら課題を解決するために、微生物代謝に加え化学的触媒効果等を付与することで溶液電位を制御する研究も盛んに行われており、著者の先行研究では活性炭などの炭素材料を電子仲介触媒として用いることで、バイオリッチング中においても溶液電位を調節できる可能性を示している²。また、海水を模擬した高塩濃度溶液を培地として用いることで微生物の代謝活動を弱め、バイオリッチング中の溶液電位を調整する技術も検討されているが、海水と同程度の塩濃度では陸上微生物は完全に生育が阻害されてしまうことが報告されている³。

3. 海洋微生物を活用した資源処理プロセスの構築

チリやオーストラリアなどの水資源枯渇の懸念がある国々での鉱業活動では、海水利用を想定した模擬環境下での湿式製錬に関する研究が進んでいる。この際、海水中の常在菌の存在を考えると、海洋微生物が資源処理プロセスに混入することは避けられない。しかしながらこの海洋微生物が鉱物界面においてどのような作用をもたらすか、に関してはあまり着目されていないように思われる。この点の理解を深めるために、著者の研究グループでは、海洋性鉄酸化微生物の鉱物表面への付着特性、およびその結果もたらされる浮遊選別（バイオフィロテーション）での鉱物の挙動変化を調査した。2種の海洋性鉄酸化細菌 *Thalassospira* sp. strain TF-1 および *Mariprofundus* sp. strain E-4 を採用し、黄鉄鉱および黄銅鉱の浮遊選別試験に供したところ、*Mariprofundus* sp. を用いた条件において、微生物付着の見られた黄鉄鉱の浮遊性は20%程度に抑制される一方で、黄銅鉱は>98%の浮遊性を示し、海洋性微生物の付着による鉱物表面の物理特性の変化を認めた。このことは、海水を利用した鉱物処理プロセスにおいて、海洋微生物の振る舞いが無視できないことを示しているが、この微生物の付着挙動を制御することさえできれば、エネルギー負荷を抑えた資源処理プロセスが構築できる可能性を示唆しているとも言える。このように、従来着目されることの少なかった海洋微生物も資源処理プロセスにおいて高い有用性を示すポテンシャルを有していることを見出しつつある。

4. 海底熱水鉱床を始めとした海底資源の開発における海洋微生物への期待

海底熱水鉱床を始めとした海底資源の開発における最大の課題は、開発に伴って生じる海洋内の環境変化が現地の生態系に強く影響を及ぼす可能性がある点である。現にEUでは、海底資源開発に伴う環境影響の懸念から開発を中止しており、いかに環境影響を低減化するかが海底資源開発の実現可否を決定すると言っても過言ではない。この課題に対し、筆者は海洋微生物を活用した海底資源開発廃水のバイオレメディエーション技術の開発に向け、予備検討を進めている。山形県酒田湾にて単離

された海洋性硫酸還元細菌である *Desulfogranum Japonicum* strain Pro1 を用い、海底熱水鉱床の資源開発によって生じる重金属汚染海水を想定した模擬溶液中で、当該微生物の生育可否および硫酸還元能の発現の有無を調査した。結果として、亜鉛を10 mMを含む模擬廃液中でも良好に生育することを確認し、重金属汚染海水中に生育する微生物の代謝活動を高めることで、その場水質浄化が実現できる可能性を示した。一方で、銅は0.1 mMでも存在すると生育を著しく阻害する結果が確認され、溶出する重金属に耐性を有する微生物の活用、もしくは耐性獲得が可能となる系の構築が必要であることが示された。硫と鉄鉱を対象としたバイオオキシデーションの先行研究では、複数種の微生物の混合培養によりヒ素に対する耐性を獲得することが報告されており⁴、同様に、今後は集積培養した微生物群集による試験を実施している必要があると考えている。

5. 結 言

これまで資源処理におけるバイオプロセスは陸上鉱物を主体に議論されてきたが、上記に記した通り、今後は海洋微生物利用の必要性和ポテンシャルに着目する必要があると考える。海洋微生物は陸上微生物よりも種類も機能も多岐にわたり、海洋微生物を用いた資源処理開発は、まさに未開の地と言え。今後、海底熱水鉱床等の海底資源開発を通して、資源処理におけるバイオプロセス研究も新たな領域を拓いていけることを期待したい。

References

1. A.-K. Halinen, N.J. Beecroft, K. Määttä, P. Nurmi, K. Laukkanen, A.K. Kaksonen, M. Riekkola-Vanhanen, J.A. Puhakka: *Hydrometallurgy*, **125–126**, pp. 34–41 (2012)
2. K. Oyama, K. Shimada, J. Ishibashi, K. Sasaki, H. Miki, N. Okibe: *Hydrometallurgy*, **196**, 105417 (2020)
3. H. Noguchi and N. Okibe: *Hydrometallurgy*, **195**, 105397 (2020)
4. M. Tanaka, Y. Yamaji, Y. Fukano, K. Shimada, J. Ishibashi, T. Hirajima, K. Sasaki, M. Sawada, N. Okibe: *Geomicrobiology Journal*, **32**, 6, pp. 538–548 (2015)