

2025年度 各務記念材料技術研究所共同研究報告書

研究課題名	海洋性微生物反応を介した硫化鉱物の生成・分離プロセスの検討
重点課題	※II-A (4R とプロセス)
新規・継続	継続
研究代表者	フチダ シゲシ
氏名	淵田 茂司
所属機関・部局・職名	東京海洋大学 海洋資源エネルギー学部門
研究分担者 (氏名・所属機関・部局・職名)	研究代表者 淵田 茂司
研究所側 受入教員名	所 千晴

研究目的

硫化鉱物は非鉄金属資源として重要であり、長年その反応プロセスは無機化学的な主であった。しかし、鉄酸化細菌や硫酸還元菌が硫化鉱物の酸化及び溶解プロセスに寄与することが明らかとなり、鉱物分離技術や廃水処理技術で利用されている。本研究室では海洋微生物を用いた鉱物分離技術や廃水処理技術の開発、海底熱水鉱床成因に関する研究を行っている。微生物—硫化鉱物間で生じる物理化学反応機構を明らかにし、金属資源開発の4Rに資するバイオハイドロメタラジー技術の開発を目指す。

実験内容と研究成果

ZnS のガルバニック反応における好塩性硫黄酸化細菌の影響評価

海底熱水系を模した pH 4.0 の海水に、閃亜鉛鉱(ZnS)および黄鉄鉱(FeS₂)を加え、好塩性硫黄酸化細菌である *Acidithiobacillus thiooxidans* が存在する条件と存在しない条件で 15 日間反応させ Zn の溶出量を比較した。ZnS のみの場合、*Acidithiobacillus thiooxidans* が存在しない条件では pH が 6 まで上昇した一方、*Acidithiobacillus thiooxidans* が存在する条件では pH が 3.5 に低下した。15 日間反応させた後の Zn 濃度は *Acidithiobacillus thiooxidans* が存在しない条件で 12 mg/L であったが、*Acidithiobacillus thiooxidans* が存在する条件では 18 mg/L まで上昇した。pH および Zn 濃度の変化から *Acidithiobacillus thiooxidans* が ZnS の酸化溶解を促進したと考えられる。一方、ZnS に FeS₂ を共存させた場合、15 日間反応させた後の Zn 濃度は *Acidithiobacillus thiooxidans* が存在しない条件で 60 mg/L とかなり大きくなったが、*Acidithiobacillus thiooxidans* が存在する条件では 52 mg/L とわずかに減少した。この結果から、ZnS の酸化溶解速度は黄鉄鉱の共存により著しく促進されるが、その効果は好塩性硫黄酸化細菌によってわずかに抑制されることが分かった。考えられる反応メカニズムとして、好塩性硫黄酸化細菌による硫黄酸化膜など不動態膜の生成である。そこで、実験後に回収した試料を X 線光電子分光法(XPS)で分析したが、好塩性硫黄酸化細菌の有無で Zn や S のスペクトルに違いが見られなかった。

炭酸カルシウム生成における Mn 取り込みメカニズムの解明

Mn, HCO₃⁻, Ca を含む模擬廃水を作成し、攪拌させながら pH を 6~10 に調整して最大 180 分まで反応させた回収した固体試料を用いて X 線吸収端微細構造(XAFS)および電界放出形走査電子顕微鏡(FE-SEM)で分析した。XAFS 分析については、広域 X 線吸収微細構造 (EXAFS) 領域の解析を行い、動径構造関数 (R: 1.05–3.50) に対するカーブフィッティングから原子間距離、およびデバワイラ因子を決定した。沈殿物の EXAFS 領域の解析の結果、溶液中の Ca 濃度が変化しても、沈殿物中の Mn は第一配位圏の Mn と O の原子間距離に変化は見られなかった。一方、第二配位圏の Mn と Ca 間の原子間距離は溶液中の Ca 濃度の増加に伴って増加した。これは主に置換型固溶体に見られる現象であり、Mn は固溶体 (Ca_xMn_{1-x}CO₃) の生成により除去されることが明らかとなった。この粒子の断面を FE-STEM で分析したところ、中心付近で Mn 濃度が高く、外縁に向かって Mn 濃度が低くなる heterogenic は構造が確認された。このことから、Mn 固溶体の生成は一様な反応として生じるのではなく、溶解度積の小さい Mn に富む炭酸塩が核として生成し、その後 CaCO₃ の生成が促進され固溶体が生成するメカニズムが考えられる。

研究成果の公表状況（論文、国際・国内会議、学会発表、特許等の知財）

国際会議(学会発表)

Fuchida S., Makita H., Kato S., Nakamura A., Ito H., Kawahara R., and Ohara Y., “Microbial iron removal process by aeration and schwertmannite formation from acid mine drainage at the Date mine, Japan”, Goldschmidt Conference, July 2025

Kato S., Ohara Y., Kawahara R., and Fuchida S., “Mn removal mechanism from neutral pH mine water coexisting bicarbonate and calcium ions in active treatment”, Goldschmidt Conference, July 2025

Kawasaki M., Tani K., and Fuchida S., “Investigation on arsenic dissolution behavior and its bearing minerals in seafloor massive sulfide ores”, Goldschmidt Conference, July 2025

国内会議(学会発表)

淵田茂司, 加藤聖也, 佐々木直哉, “坑廃水の処理で発生する殿物の減容化に向けた最適な処理条件の検討”, 資源・素材学会春季大会, 2026 年 3 月

中村碧, 伊藤裕基, 加藤聖也, 小原義之, 川原里紗, 牧田寛子, 淵田茂司, “酸性坑廃水中の Fe(II)酸化処理速度における鉄酸化細菌の影響および生成する鉄スラッジのヒ素除去特性”, 第 12 回 ZAIKEN Festa, 2025 年 10 月

佐々木直哉, 加藤聖也, 淵田茂司, “異なる中和剤を用いた坑廃水処理における殿物生成量と有害元素除去効率の違いおよび経済性評価”, 第 12 回 ZAIKEN Festa, 2025 年 10 月

伊藤裕基, 中村碧, 加藤聖也, 小原義之, 川原里紗, 淵田茂司, 牧田寛子, “伊達鉱山酸性坑廃水中の鉄酸化細菌が廃水処理に与える影響”, 第 12 回 ZAIKEN Festa, 2025 年 10 月 (最優秀賞受賞)

加藤聖也, 淵田茂司, “地球化学モデルを用いた坑廃水中のマンガン処理における炭酸塩生成メカニズムの速度論的考察”, 日本地球化学会第 72 回年会, 2025 年 9 月 (学生優秀賞受賞)

中村碧, 伊藤裕基, 加藤聖也, 小原義之, 川原里紗, 牧田寛子, 淵田茂司, “酸性坑廃水中の Fe(II)酸化反応速度における鉄酸化細菌の影響および生成する鉄スラッジのヒ素除去特性”, 日本地球化学会第 72 回年会, 2025 年 9 月

淵田茂司，中村碧，伊藤裕基，加藤聖也，小原義之，川原里紗，牧田寛子，“酸性坑廃水の曝気処理における鉄処理効率に関する化学条件の考察”，資源・素材学会秋季大会，2025 年 9 月

淵田茂司，小山恵史，牧田寛子，“海洋性鉄酸化細菌を用いた銅鉱石の海水浮遊選鉱法”，資源・素材学会秋季大会，2025 年 9 月

加藤聖也，淵田茂司，“炭酸イオンを含む坑廃水の中和処理における Calcite 生成と Mn 除去効率の関係”，資源・素材学会秋季大会，2025 年 9 月

伊藤裕基，中村碧，加藤聖也，小原義之，川原里紗，淵田茂司，牧田寛子，“伊達鉱山酸性坑廃水中の鉄酸化細菌が廃水処理に与える影響”，資源・素材学会秋季大会，2025 年 9 月

加藤聖也，淵田茂司，“高アルカリ度坑廃水の中和処理における Calcite 生成の Mn 除去効率および生成神殿物への影響”，第 22 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会，2025 年 8 月

中村碧，伊藤裕基，加藤聖也，小原義之，川原里紗，牧田寛子，淵田茂司，“伊達鉱山酸性坑廃水中の溶存鉄処理条件の検討および生成するスラッジのヒ素除去特性”，第 22 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会，2025 年 8 月

佐々木直哉，加藤聖也，淵田茂司，“異なる中和剤を用いた坑廃水処理における殿物生成量と有害元素除去効率の違いおよび経済性評価”，第 22 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会，2025 年 8 月

伊藤裕基，中村碧，加藤聖也，小原義之，川原里紗，淵田茂司，牧田寛子，“伊達鉱山酸性坑廃水中の鉄酸化細菌が廃水処理に与える影響”，第 22 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会，2025 年 8 月

中村碧，伊藤裕基，加藤聖也，小原義之，川原里紗，牧田寛子，淵田茂司，“伊達鉱山酸性坑廃水処理における水質の季節変化の影響および溶存鉄の選択的除去方法の検討”，環境資源工学会第 143 回学術講演会，2025 年 6 月（優秀ポスター賞受賞）

伊藤裕基，中村碧，加藤聖也，小原義之，川原里紗，淵田茂司，牧田寛子，“伊達鉱山酸性坑廃水中の鉄酸化細菌叢の季節変化および鉄除去プロセスに与える影響”，環境資源工学会第 143 回学術講演会，2025 年 6 月

（注）様式Bは、A 4 サイズ 2 頁になるようにしてください。