

「招待講演」 生物を利用した資源開発と環境修復

Resources Production and Environmental Remediation using (Micro-)organisms

東北大学大学院環境科学研究科：井上千弘

Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University : Chihiro Inoue

e-mail address: inoue@mail.kankyotohoku.ac.jp

1. はじめに

微生物は地球上のいたるところに存在し、自然界の物質循環において大きな役割を担っている。微生物の活動は多岐にわたり、微生物同士のみならず他の植物・動物とも共生しながら、現在の生態系を築いてきた。また、同時に生物は、岩石、鉱物、土壌など自然界に存在する無機物質や人工的に合成された化学物質ともさまざまな相互作用を示す。生物が担う反応は常温常圧で行われるため、省エネルギー、低環境負荷プロセスとしての利用が期待され、特に環境対策の分野での適用が注目を集めている。

我々はこれまで微生物による未利用地下資源の開発と、微生物や植物の機能を利用したさまざまな有害物質で汚染された地下環境の修復に関する研究に取り組んできた。また、同時に生物反応以外の反応にも着目してきた。ここではそれらの研究のうちの代表的なものについて、解説を加えながら報告する。

2. バイオリーチング

バイオリーチングとは、鉱石に含まれる有価金属を微生物の働きを利用して抽出、回収する技術である(1,2)。鉄酸化細菌を利用して銅地金を生産する方法が最もよく知られており、世界の銅生産量の 2 割近くを占める方法となってい

る。銅のバイオリーチングでは、図 1 に示すヒープリーチングがよく用いられている。この方法は銅鉱物を含む鉱石を堆積し、堆積層上部から散水して堆積層内部での細菌の活動を活性化させて銅を溶解させるものである。得られた浸出液中の銅イオンは溶媒抽出—電解採取(SX-EW)により回収している。乾式製錬による銅生産方式と比較すると、低コスト、低環境負荷で銅を生産できるという優位性がある。

しかし銅資源として最も賦存量が多い黄銅鉱は、一般に知られる鉄酸化細菌(最適温度は 30℃付近)によるバイオリーチングでは低い銅浸出率しか得られていない。そこで我々はバイオリーチングによる黄銅鉱の溶解を促進する方法として、70℃以上の温度で生育する高度好熱性細菌を利用した研究を行ってきた。これまでに、種々の条件での好熱性細菌によるバイオリーチング(3,4)を行い、短期間でほぼ 100%の黄銅鉱浸出を達成するとともに、共存する化学浸出反応の評価を行い(5)、これらの効果を組み込んだ反応モデルを作成した(6)。また、黄銅鉱の溶解は発熱反応なので、ヒープ内部のような環境では熱の蓄積が期待でき、外部から熱を加えなくても好熱性細菌の生育環境を維持できる可能性がある。このことをモデルにより評価、検証した(7,8)。

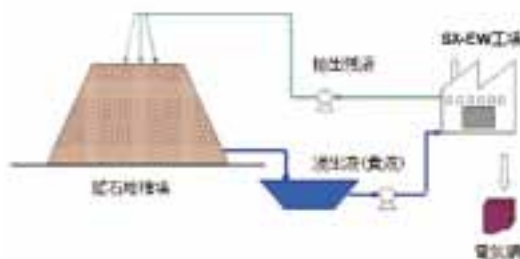


図 1 銅鉱石のヒープリーチング模式図

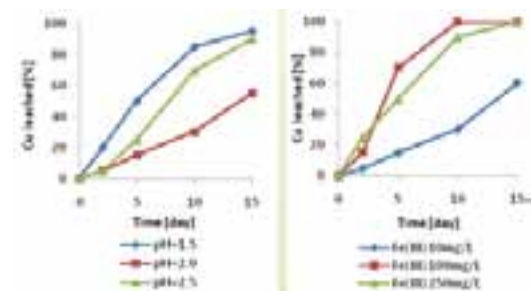


図 2 好熱性細菌による黄銅鉱バイオリーチングの結果

3. 微生物を利用したエネルギー資源の生産

微生物石油増進回収法（MEOR）は、既存の石油採掘技術では取り残されている油層中の石油を、微生物の力を活用して回収する方法である(11). 油層内での石油の流動性を改善させるために、微生物の生産する界面活性剤やポリマーを利用するもので、油層内に廃糖蜜などの有機物を供給し、その場で微生物にこれらを生産させ石油の増回収を図るものである。我々は以前に中国の吉林油田と共同で、実操業中の油層での MEOR の実証試験を実施し、一部の油層において良好な結果を得ている(11). 吉林油田では、その後 MEOR を実操業に移行させ、現在も継続している。

水素生産方法のひとつに、光触媒を用いて太陽の光エネルギーを利用する方法が提案されている(9,10). その場合、原料に硫化水素溶液を用いるため、水を原料にする場合よりも効率的に太陽光エネルギーを利用することができるが、反応後にポリ硫化物が残留するため、その処理が必要となる。我々は硫酸還元細菌を用い、このポリ硫化物の硫化水素への還元を行うことに成功した(12,13). 硫酸還元細菌による硫化水素への変換過程はエネルギーを必要とするが、そのエネルギーは廃棄バイオマスでまかなうことが可能である。これによって、微生物反応による硫化水素の再生と光触媒による水素生成がカップリングされ、システム全体でみると自然エネルギーと廃棄物から水素生成が行われていることになる(図3)。

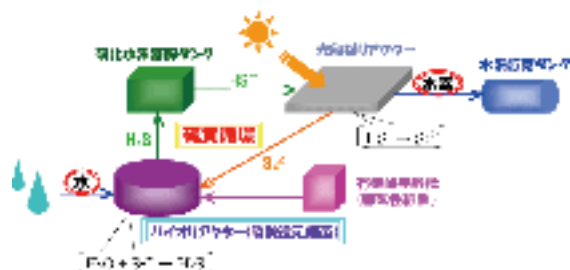


図3 光触媒と硫酸還元細菌を利用した水素生産

4. 石油系炭化水素や有機塩素化合物のバイオレメディエーション

バイオレメディエーションは、汚染物質の分解・除去に微生物を利用する方法であり、有機塩素系溶剤・石油炭化水素等による土壌・地下水汚染を低コストで環境に負荷を与えずに浄化することができる。地下の汚染部分に微生物の栄養源等を送り込むことにより、その場所に棲息する分解微生物を活性化させ、汚染物質を無害化していくものである。図4に原位置バイオレメディエーションの概念図を示す。また、場合によっては分解能力の優れた微生物を外部的に

に汚染現場に注入することも行われる。

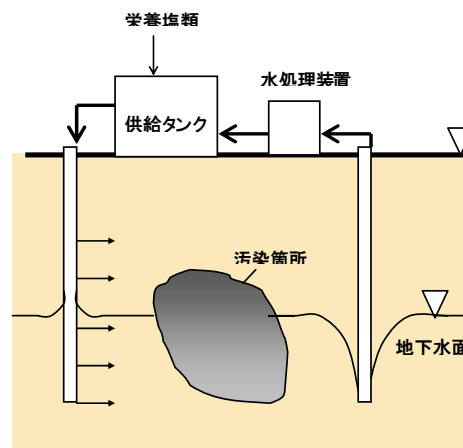


図4 バイオレメディエーションの模式図

石油は古くから地球上に存在する物質であるため、石油系炭化水素を分解する細菌は土壌に普遍的に棲息している。そのため、石油系炭化水素のバイオレメディエーションは比較的実用化が進んでいる。しかしながら、石油系化合物の中には、多環芳香族炭化水素類やイソアルカンなど微生物分解を受けにくい成分もある。我々は、これら微生物分解が起き難いとされる物質についての分解能力を持つ細菌の探索を進めている(14,15)。また最近、n-アルカン類よりもベンゼン、トルエンなどの単環芳香族類を優先的に分解する微生物コンソーシアムを見出している(未発表)。

揮発性有機化合物による土壌汚染事例として最も多く報告されているのは、トリクロロエチレン（TCE）とテトラクロロエチレン（PCE）である。TCE と PCE は取り扱いが容易で優れた脱脂力を有するため、金属材料の前処理、電子部品の洗浄やドライクリーニングの溶剤などに広く用いられてきた。1980年代まではこれらの物質に対して排出基準や環境基準などの規制がかけられてなかったこともあり、その土壌汚染が顕在化してきた。TCE や PCE は発ガン性が疑われている物質であるが、自然分解性や生分解性が低いため、ひとたび地下環境中に放出されると長期間にわたり残存し蓄積してしまう恐れがある。人工的に合成された有機塩素化合物等は、極めて微生物分解を受けにくいため、それらが地下環境に廃棄された場合、長期間にわたり蓄積することが多い。

その一方で、これらの有機塩素化合物を脱塩素する能力を持つ微生物も見つかっている。我々は TCE で汚染された現場から採取した地下水から、TCE をエチレンまで脱塩素する微生物コンソーシアムを獲得した。図5は嫌気状態でこのコンソーシアムによる TCE の分解を示したものである(16)。この場合、TCE は 300 時

間ほどで完全に脱塩素され、無害なエチレンに変換されており、この反応を担う細菌は脱塩素呼吸と呼ばれる過程で有機塩素化合物を脱塩素しエネルギーを獲得している。このコンソーシウムは5年間にわたり安定してTCEの脱塩素活性を示しており、共存する微生物の動態や役割を含め、現在さらに解析を進めているところである。

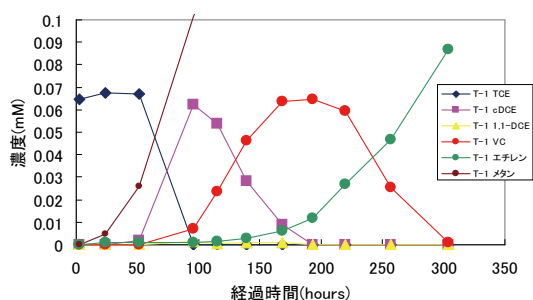


図5 微生物コンソーシウムによるTCEの脱塩素

土壌中の有機塩素化合物が極めて高濃度になった場合、分解微生物は有機塩素化合物の毒性で生育できなくなるので、微生物以外の分解方法を検討する必要がある。我々は鉄粉や黄鉄鉱を利用した有機塩素化合物の化学分解手法も検討を行ってきた(17-19)。図6は黄鉄鉱を用いてPCE、TCEおよびDCE類の分解を行った結果であるが、3週間程度でこれらの有機塩素化合物はほとんど分解されることがわかる。鉄粉や黄鉄鉱のように比較的身近にある物質によっても有機塩素化合物は分解が可能であり、その反応が起こる環境条件は微生物反応のそれと類似のものである。今後の展望として、微生物分解と化学分解の両者を組み合わせて行くことにより、両者の特徴をとものに生かせる、より有効な有機塩素化合物汚染土壌の修復を行うことができる

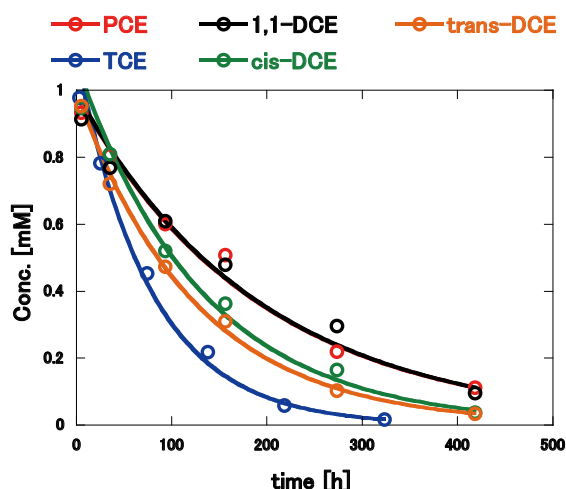


図6 黄鉄鉱によるTCEの脱塩素

と考えられる。

また我々は、有機塩素系農薬をはじめとする難分解性化学物質の土壌中での分解にもチャレンジを開始している。

5. 植物を利用した土壌汚染修復

植物を利用した土壌汚染修復（ファイトレメディエーション）が現在注目を集めている。この手法は、植物が根から水分や養分を吸収する際、同時に土壌中の有害物質(主として重金属類)を取り込ませて植物体内に蓄積させる、あるいは植物根圏に生息する微生物との共同作業により汚染物質を分解浄化する方法である。このうち前者の植物体内に吸収、濃縮する方法(ファイトエクストラクション、図7に概略を示す)が一般的であり広く検討が進められている。

高濃度の重金属を濃縮する植物体は、ハイパーアキュムレータと呼ばれ、重金属類を植物体の乾燥重量あたり0.1% (1000ppm)以上蓄積するものをいう。植物体としては亜鉛、カドミウム、ニッケルなどを蓄積するナズナ類や、鉛、ヒ素、カドミウムなどを蓄積するシダ植物などが知られている。なかでもモエジマシダでは乾燥重量の2%を超えるヒ素が濃縮されることが報告されている(20)。

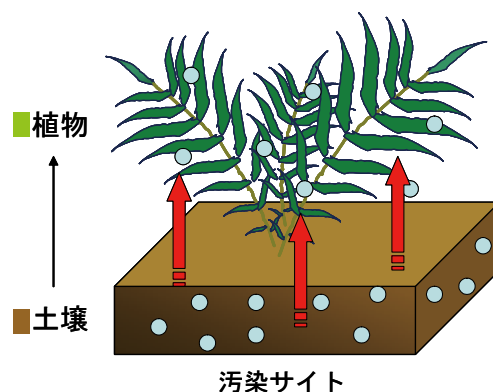


図7 ファイトエクストラクション法の概略

我々はヒ素のハイパーアキュムレータであるモエジマシダの水耕栽培を行い、ヒ素の吸収に関する諸条件の検討を行い、ヒ素は主に5価のヒ酸イオンの形態で吸収されること、ヒ素吸収の際にリン酸の影響が見られることなどを示してきた(21)。また、モエジマシダをヒ素模擬汚染土壌で栽培し、葉(羽片)に蓄積したヒ素濃度を調べるとともに、その分布をX線顕微鏡で測定した。各測定時間で20枚前後の羽片について1枚ずつ灰化して調べたところ、羽片間でのヒ素濃度のばらつきは小さく、土壌中から吸収されたヒ素は、すべての羽片にほぼ均等に輸送されていることが推定された。一方、1枚の羽片におけるヒ素の濃度分布を調べると、図8に示すよう

に、羽片の輪郭部にヒ素が偏在しており、その傾向は生育とヒ素の吸収が進み、色が褐変した羽片で特に顕著であった(図8)。また、モエジマシダのヒ素吸収過程におけるヒ素の化学形態の変化を追跡するとともに、このハイパーアキュムレータにおけるヒ素耐性の分子生物学的機構解明にも取り組んでいる。

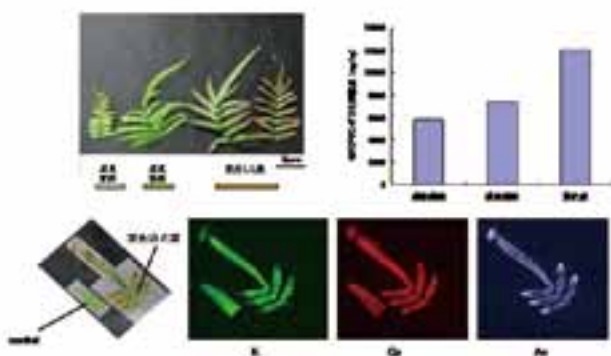


図8 モエジマシダ羽片におけるヒ素の蓄積
左上 各生育段階の羽片の写真
右上 書く生育段階における羽片全体のヒ素濃度
下 変色後の羽片における元素分布

6. まとめ

人類が利用できる資源は有限であり、また地球環境に対してこれ以上の負荷を与えることは難しい状況にある。その状況下で、新たな資源を獲得するためには、低濃度でかつ複雑な形態で存在する金属などの地下資源や廃棄物の有効利用を図る必要がある。また広範囲に広がってしまったさまざまな汚染物質に対して、我々は極力投入する資源を抑えながら、汚染された環境の修復に当たらなければならない。このような課題に対し、微生物あるいは植物などの高等生物を利用するプロセスは、今後一層重要になると考えられる。また、そのプロセスを検討するうえで生物反応のみに固執するのではなく、化学的プロセスあるいは物理的プロセスとうまく組み合わせることにより、双方の特徴を生かしたより有効なプロセスが構築できるのではないかと考えている。

引用文献

- 1) 渡邊信 他編, 微生物の事典, 朝倉書店, (2008)
- 2) 植田充美他編, メタルバイオテクノロジーによる環境保全と資源回収, シーエムシー出版, (2009)
- 3) J. Vilcaez, K. Suto, C. Inoue : International Journal of Mineral Processing, 88 (1-2), (2008), 37-44
- 4) J. Vilcaez, K. Suto, C. Inoue : Minerals engineering, 21, (2008), 1063-1074
- 5) J. Vilcaez, R. Yamada, C. Inoue : Hydrometallurgy, 96, (2009), 62-71
- 6) J. Vilcaez, K. Suto, C. Inoue : Minerals Engineering, 22, (2009), 951-960
- 7) J. Vilcaez, C. Inoue : Hydrometallurgy, 94, (2008), 82-92
- 8) J. Vilcaez, K. Suto, C. Inoue : Advanced Material Research, 71-73, (2009), 357-360
- 9) T. Arai et al. : Proc. Int. Symp. On Cluster Assembled Materials, IPAP Conf. Series 3, (2001), 75-78
- 10) Shinoda et al. : Materials Trans., 43, (2002), 1512-1516
- 11) 千田 佑 : バイオサイエンスとバイオインダストリー, 58, (2000), 401-404
- 12) Y. Takahashi et al. : 16th International Biohydrometallurgy Symposium Abstracts, (2005), 260-262
- 13) Y. Takahashi et al. : Journal of Bioscience and Bioengineering, 106 (3), (2008), 219-225
- 14) T. Ohnuma, K. Suto and C. Inoue : Water Dynamics, 4th International Workshop on Water Dynamics, AIP Conference Proceedings, 898, (2007), 231-234
- 15) H. Bacosa, K. Suto, C. Inoue : Journal of Water Resources and Environmental Engineering & Proceedings of Japan-Vietnam Estuary Workshop, Special Issue, (2007), 144-149
- 16) K. Ise, K. Suto and C. Inoue : Water Dynamics, 4th International Workshop on Water Dynamics, AIP Conference Proceedings, 898, (2007), 231-234
- 17) J. Hara et al. : Water Research, 39, (2005), 1165-1173
- 18) P. T. Hoa et al. : Environmental Science & Technology, 42, (2008), 7470-7475
- 19) P. T. Hoa et al. : Environmental Science & Technology, 43 (17), (2009), 6744-6749
- 20) Ma L. Q., et al : Nature, 409, p.579 (2001)
- 21) K. Tashiro et al. : Proceedings of the second IASTED international conference on advanced technology in the environmental field, (2006), 244-246