

バイオレメディエーション

Bioremediation

青木 卓也

Aoki Takuya

産業発展の過程で多くの有害物質が環境中に放出され、蓄積されてきた。近年、法制度の整備や土地取引の活発化等に伴い、土壤・地下水汚染が顕在化してきた。これらに対して様々な浄化技術が開発されてきている。ここでは、特に微生物を利用した浄化方法であるバイオレメディエーションについて概説する。

In the course of industrial development, lots of poisonous substances are discharged in the environment, and have been accumulated. Recently, the soil and the groundwater contamination have been actualized by maintenance of legislation degree and activation of transactions in land. A variety of purification technologies have been developed for these. Here, the bioremediation that is the purification method using the microorganism is outlined.

キーワード：バイオレメディエーション、土壤汚染、利用指針、課題

1 はじめに

産業発展の過程で、いくつもの化学物質が環境中に放出されてきた。当時は有害と考えられていなかつた物質が現在ではその有害性が明らかになっているものがある。これらの物質は広く環境中に存在しており、その適正処理が重要な課題となっている。

熱処理や物理的、化学的な処理技術など多くの技術が実用化されている。近年ではこれらの技術に比べてより「環境負荷の低く」、「安価な処理が可能な」微生物を利用した浄化方法であるバイオレメディエーション(Bioremediation)が注目されており、いくつかの技術については実用化されている。ここでは、主に汚染土壤・地下水に適用されるバイオレメディエーションについて紹介する。

2 土壤汚染の現状

(1) 土壤汚染の存在量

土壤が有害物質により汚染されると、その汚染された土壤を直接摂取したり、汚染された土壤から有害物質が溶け出した地下水を飲用すること等により、人の健康に影響を及ぼすおそれがある。

こうした土壤汚染は、これまで明らかになることが少なかったが、近年、企業の工場跡地等の再

開発等に伴い、重金属、揮発性有機化合物等による土壤汚染が顕在化してきている。特に最近における汚染事例の判明件数の増加は著しく、ここ数年で新たに判明した土壤汚染の事例数は、高い水準で推移してきている。(図1)

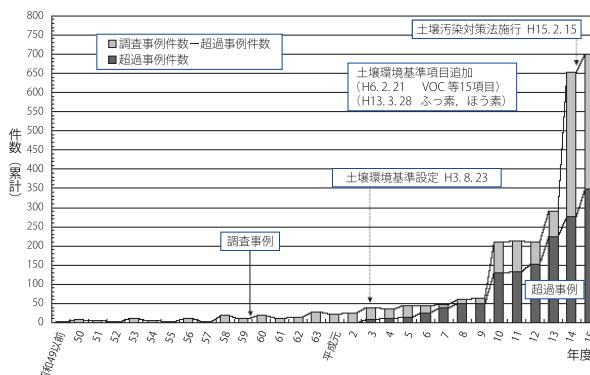


表1 土壤・地下水等環境修復技術の分類²⁾

技術手法		浄化に使用するもの（例）	対象物質（例）	サイト	国の対応	備考
バイオレメディエーション	バイオスティミュレーション	・インサイト微生物 ・栄養塩類（窒素、リン酸等）	油類（軽～中質油） VOC（揮発性有機化合物）	原位置処理 地上処理	なし	現在の汎用的技術
	テバクシオヨウイグメン	組換え微生物 未開発	特定の難分解性物質（？）	原位置処理 地上処理	カルタヘナ法 第一種使用等	未開発技術
	非組換え微生物	・自然界より単離し、培養した微生物（場合に応じ栄養塩類） ・自然界からの複合微生物（バイオ製剤含む） ・その他カルタヘナ法適用除外のもの	主に難分解性物質（トリクロロエチレン、多環芳香族、PCB、ダイオキシン）	原位置処理 地上処理	経済省指針 環境省指針	現地点で4件の確認実績あり
	ファイトレメディエーション	植物（研究開発段階）	VOC 重金属	—	なし	
物理・化学処理	物理的処理	真空吸引法（活性炭吸着） 地下水の揚水・曝気（活性炭吸着） セメントによる固化 分級洗浄	VOC 油類（軽質油） 重金属	原位置処理 地上処理 場外処理	なし	
	化学的処理	不溶化処理 分解剤 溶媒や薬剤による洗浄	重金属 VOC 難分解性物質	原位置処理 地上処理	なし	
熱・焼却処理	熱処理	加熱による固化 熱脱着・揮発	VOC 重金属 油類（重質油） 難分解性物質	場外処理	なし	
	焼却処理	焼却炉、キルンによる焼却・熱分解				

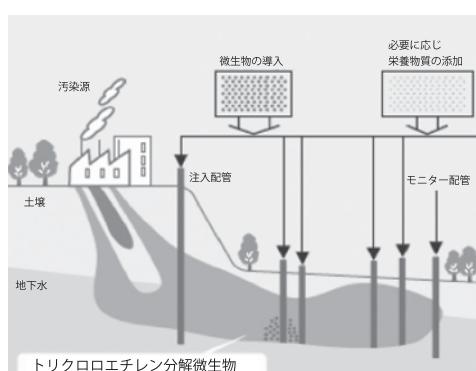
働きを利用して汚染物質を分解等することによって、土壤、地下水等の環境汚染の浄化を図る技術をいう。

(2) バイオレメディエーションの種類

バイオレメディエーションには、微生物の利用法による分類、処理位置による分類などがある。ここでは、代表的な2つの分類法について説明する。

① 微生物の利用法による分類

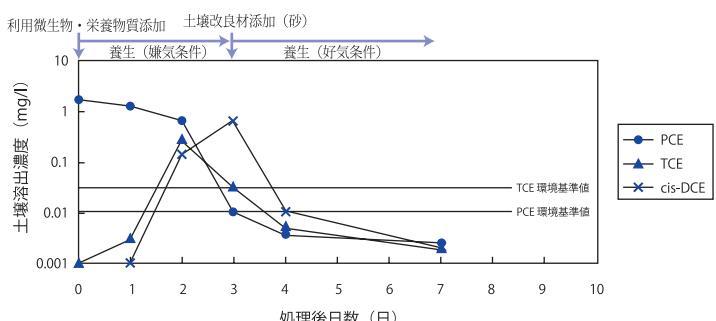
バイオオーグメンテーションとバイオスティミュレーションの2つに分類される。

図2 バイオオーグメンテーションの概念図³⁾

i) バイオオーグメンテーション(Bioaugmentation)
分解微生物を別途培養し、外部から汚染現場に供給する方法である。図2に概念図を示した。

図3はポリクロロエチレン(PCE)の浄化事例を示したものである。自然減衰よりも遙かに短い数日間で環境基準以下にまで浄化が進行していることがわかる。

ii) バイオスティミュレーション (Biostimulation)
元々現場に生息する土着の分解微生物を、栄

図3 バイオオーグメンテーションによる浄化事例⁴⁾

※PCE, TCE: ポリクロロエチレン (PCE), トリクロロエチレン (TCE) は、有機塩素系溶剤の一種で、無色透明の液体でエーテル様の臭いを有し、揮発性、不燃性、水に難溶。ドライクリーニングのシミ抜き、金属・機械等の脱脂洗浄剤等に使われるなど洗浄剤・溶剤として優れている反面、環境中に排出されても安定で、地下水汚染などの原因物質となっている。

※cis-DCE: cis-1, 2-ジクロロエチレン。自然の状態ではそれ以上分解が進まないため、汚染物質として処理の対象に含まれる。

※利用微生物: KBC1, PCEを脱塩素化してTCEに変換するDesulfotobacterium属細菌。

養塩や誘導基質を添加することにより現場で増殖させる。微生物は様々な有機物を分解することによってエネルギーや、成長に必要な物質を得ている。生物分解は酸素を必要とする好気性分解と水素を必要とする嫌気性分解とに大別される。また、微生物が生きるためにミネラル(栄養分)と水が必要であり、通常、ミネラル・水・酸素／水素のいずれかが不十分な場合には、微生物による汚染物質の分解は減衰・停止する。

バイオスティミュレーションは、これらの不足している要素を汚染土壤中に添加することで、微生物の活動を活性化させ、汚染物質の分解を促進する仕組みである。

(2) 処理位置による分類

- i) 原位置：汚染現場の土壤を掘削することなく対象汚染物質の浄化を図る方式
- ii) オンサイト：汚染現場の土壤を掘削した後、掘削した土壤を作業区域から搬出することなく、作業区域内地上部において対象汚染物質の浄化を図る方式
- iii) オフサイト：作業区域から汚染土壤等を搬出して、再度、埋戻す方式

(3) 新たな手法～ナチュラルアテニュエーション

積極的な浄化手法であるバイオレメディエーションに加えて、新たな手法が注目されている。

汚染現場の帶水層が保有する自然現象によって、地下水中の汚染物質の濃度が自然に減少することを「Natural Attenuation(自然減衰)：NA」と呼ぶ。地下水中の汚染物質のNAには、①土壤粒子への吸着、②気相への揮発、③希釈・拡散、④化学分解、⑤微生物分解などの様々な現象が含まれている。このようなNAのメカニズムはサイト固有のものであるが、これを科学的に測定・評価して、このメカニズムを地下水汚染浄化手法に組み入れる手法をMNA(Monitored Natural Attenuation)と呼んでおり、研究、一部での利用が進んでいる。⁵⁾

4 バイオレメディエーション関連施策

以下にバイオレメディエーションに深く関連する法令等について記載する。

(1) 土壤汚染対策法

近年、土壤汚染が判明する事例が増加して社会問題としてクローズアップされてきたこと、土壤汚染対策の実施例の増加によりそのルール化の必要性が認識されてきたことといった土壤汚染をめぐる社会的状況の変化から、土壤汚染対策の法制化の機運が高まってきた。

土壤汚染対策法はそのような状況を背景に、平成15年2月に施行された。(図4)

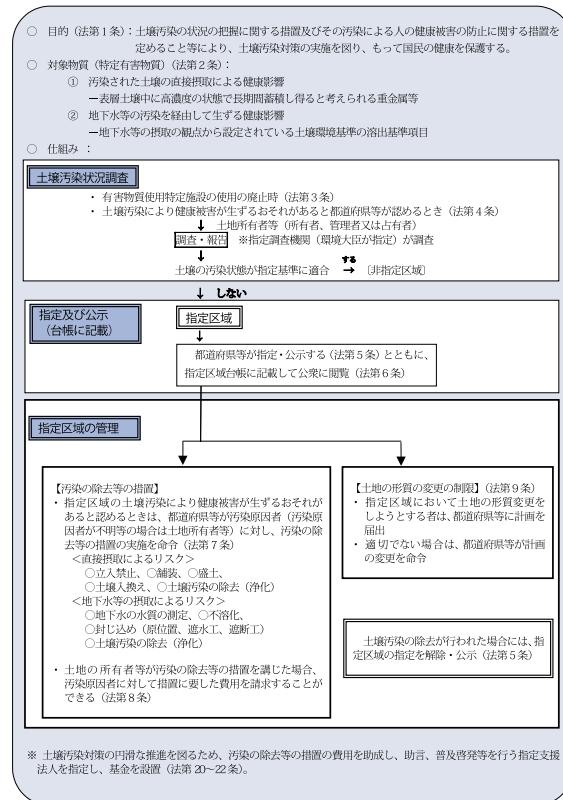


図4 土壤汚染対策法の概要⁶⁾

(2) 微生物によるバイオレメディエーション 利用指針

① 利用指針策定の背景

バイオオーグメンテーションの利用を妨げる要因として、環境省と経済産業省が個別に定めていたバイオレメディエーションに関する指針の存在が挙げられていた(「組換DNA技術工業化指針」および「微生物を用いた環境浄化の実施に伴う環境影響の防止のための指針」)。バイオオーグメンテーションのように外来の微生物を環境中に放出することによる生態系への影響は、当然考慮すべき問題であるが、これらの指針では、安全性を確保するために多くの調査を必要とし、実質的に実

行不可能であるという批判があった。また、両省で異なる指針を出しておらず、整合性のとれない二重指針であるといわれていた。

これらの指針を一本化し、バイオレメディエーションの利用を推進する目的で、新たに「微生物によるバイオレメディエーション利用指針」を策定して、平成17年3月30日に告示された。

② 利用指針の対象

本指針は、微生物を利用したバイオオーフェンテーションにより土壤・地下水を浄化する場合で、遺伝子組換微生物は含まず、自然環境から採取した単一微生物及び複合微生物系の利用を対象とする。これを行う事業者は利用微生物・浄化技術・作業区域等の情報から生態系等への影響評価を行い、浄化作業計画を策定することとされ、この浄化作業計画が本指針に適合しているか否かを経済産業大臣および環境大臣に確認することができる」とされた。

③ 利用指針の意義

本指針の策定によって、バイオレメディエーションの利用がどの程度活性化されるかは不明であるが、少なくとも行政が、これまで利用を妨げていた要因を減らし、バイオレメディエーションによる浄化対策を促進しようとする姿勢を示したものと評価できる。

(3) 関連法令

土壤汚染対策法は、既に発生した土壤汚染について、その状況の把握・汚染の除去等の措置という事後的な対策を講ずるものである。土壤汚染の未然防止については、水質汚濁防止法、廃棄物処理法等に基づき必要な規制がなされている。

(4) バイオレメディエーションの課題と今後

① 技術的課題

生物を利用して浄化を行うため、土壤条件や気象条件等により「浄化効果が一定でない」、「高濃度汚染への対応が困難である」、「浄化完了まで時間がかかる」等の技術的課題が残されている。

② 普及に向けての課題

バイオレメディエーションは、他の物理・化学的な対策技術とは異なり、汚染物質量をゼロにする技術ではない。対象物質を環境基準未満、ある

いは健康に安全な水準にまで低減させることにより、人体や生態系へのリスクを低減する技術である。経済的にリスクを低減していくという観点からは望ましい技術といえるが、汚染地域近傍の住民の合意を得ることが困難であるという普及面での課題がある。

S おわりに

「環境負荷が小さく」、「安価に処理が可能」なバイオレメディエーションは、現段階では技術面・普及面の両面において発展途上の技術である。今後、これらの技術の効果的な利用を図っていくには多くの課題を克服していくことが必要である。我々技術士には、技術の開発、適正な評価、利用の促進に貢献していくことが求められている。

<引用文献>

- 1) 環境省 水・大気環境局：平成15年度土壤汚染対策法の施行状況及び土壤汚染調査・対策事例等に関する調査結果の概要、2005.12
- 2) 中央環境審議会 水環境・土壤農薬合同部会第2回バイオレメディエーション小委員会資料、2004.6
- 3) 経済産業省、環境省：微生物によるバイオレメディエーション利用指針の解説、2005.7
- 4) 経済産業省・環境省：「微生物によるバイオレメディエーション利用指針」に基づく浄化事業計画の確認について、2006.3
- 5) 土壤環境センター：MNA～自然の回復力をを利用して～
<http://www.gepc.or.jp/mna/mnatop.html>
- 6) 環境省：パンフレット「土壤汚染対策法のしくみ」、2005.3

<参考文献>

- 7) William C. Anderson 編、軽部征夫監修、池上雄二・角田英男訳：バイオレメディエーション 微生物による環境修復技術の実際、シュプリンガー・フェアクラーク東京、1997.7
- 8) 牧秀明：「微生物で環境をきれいにする～バイオレメディエーションとは？」、国立環境研究所公開シンポジウム 2003

青木 卓也 (あおき たくや)
技術士 (生物工学／総合技術監理部門)

(財)河川環境管理財団
環境計量士、公害防止管理者

