

微生物を利用した土壌浄化技術

国立研究開発法人国立環境研究所 企画部次長
地域環境研究センター 土壌環境研究室長

岩崎 一弘 *Kazuhiro Iwasaki*

1. はじめに

近年、トリクロロエチレンやベンゼン、あるいはダイオキシン、PCB や油、さらにはヒ素や水銀などの有害な有機化合物や重金属による土壌・地下水汚染が日本各地で検出され大きな社会問題となっている。本稿を準備しているタイミングでちょうど東京都議会議員選挙（投開票2017年7月2日）が実施されたが、今回の選挙の争点の一つが土壌汚染を発端とした築地市場の豊洲移転問題であった。

築地移転の経緯を表1¹⁾ にまとめたが、当初からその土地利用状況などによりベンゼンやヒ素などによる土壌汚染の存在が知られており、2007年には土壌汚染対策などに関する専門委員会が設置されている。浄化対策中の2012年には移設計画が市場業界と合意されていたが、2016年に安全性への懸念などを理由に小池知事が移転延期を発表した。そ

の後、2016年11月から12月にかけて実施された第9回モニタリング結果では汚染が依然検出されており、例えばベンゼンでは最も高い地点で0.23mg/L（土壌環境基準値0.01mg/L）、ヒ素では0.021mg/L（土壌環境基準値0.01mg/L）であった。一方、2008年8月の第1回豊洲新市場予定地の土壌汚染対策工事に関する技術会議では表層土壌の当初汚染濃度はベンゼンで430mg/L と報告されており、もともと非常に高濃度汚染現場ではあったが、土壌浄化工事に一定の効果があったことがわかる。この現場での土壌浄化技術としては、洗浄処理、中温加熱処理に加えて、特にベンゼンの浄化に効果的な微生物処理も採用されていた。

2. 改正土壌汚染対策法

ところで、わが国の市街地での土壌・地下水汚染問題に対して2002年に土壌汚染対策

表1 東京都中央卸売市場移転の経緯

2001年12月	豊洲への移転を決定
2005年4月	東京都卸売市場審議会で「2012年度開場を目的」を明記
2007年4月	豊洲新市場予定地における土壌汚染対策等に関する専門家会議設置
2011年3月	東京ガスと土地売買契約を締結
2011年3月	国が、新設市場として位置づけ
2012年11月	施設計画を市場業界と合意
2013年1月	汚染対策の最大1年間延伸の公表
2014年2月	市場建設工事の起工式
2014年11月	汚染対策が全街区において完了
2014年12月	2016年11月上旬開場を市場業界と合意
2016年8月	小池知事が開場延期を発表
2016年11～12月	第9回モニタリング
2017年7月	東京都議会議員選挙

法が成立し、さらに法制定時の課題や施行後の問題点に対応するためにその改正法「土壤汚染対策法の一部を改正する法律」が2010年4月に施行された。現在はこの改正法に準じて土壤汚染対策が進められている。なお、さらに本法の改正法が第193回国会で可決され、2017年5月19日に交付されている（2017年9月現在では未施行）。

環境省が公表²⁾している土壤汚染調査・対策事例などに関する調査結果によると、改正土壤汚染対策法施行以降2014年度までの累計で、土壤の汚染状態が指定基準を超過した事例は2,203件となっている。なお、2002年の法施行から2009年度末までの累計では1,487件となっている。これらの件数は都道府県が把握した事例数であり、同様に環境省が公表³⁾している土壤汚染の可能性のある土地面積は、27.2万 ha とも試算されており、

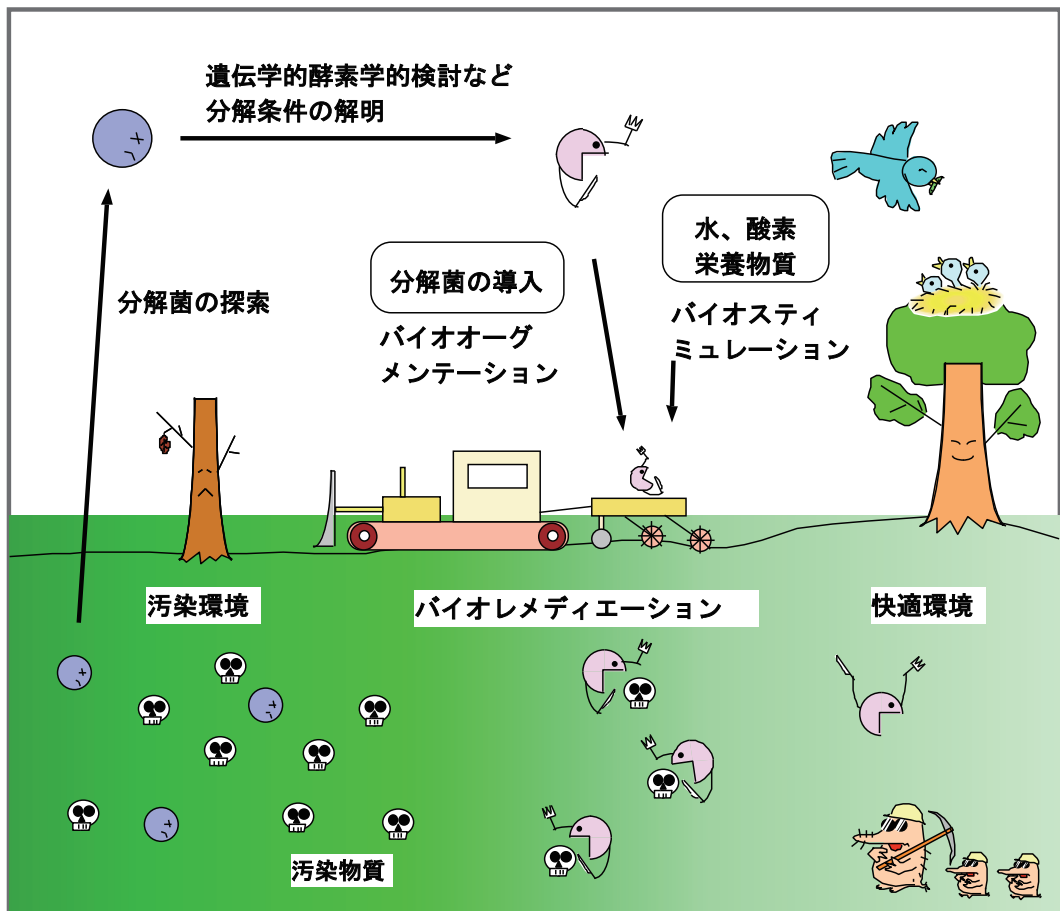
実際には前述の基準超過事例件数よりも莫大な汚染事例が潜在しているものと考えられる。

一般社団法人土壤環境センターが報告している会員企業における調査結果⁴⁾では、2015年度の土壤汚染状況調査・対策の受注件数は7,106件で、受注高は773億円となっている。また、対策技術（のべ647件）としては「土壤汚染の除去」が44%を占めており、このうち80%は掘削除去であるが、20%が原位置浄化であった。原位置浄化のうち63%（のべ47件）が生物処理となっており、対策技術全体の7%であった。

3. 生物処理技術

微生物機能を活用して汚染した環境を修復する技術は、バイオレメディエーション⁵⁾

図1 バイオレメディエーション技術



と呼ばれており、微生物の活用法により二つに分類される(図1)。一つはバイオスティミュレーション(Biostimulation)で、汚染した土壌・地下水に栄養塩類、酸素などを注入し、現場に生息している微生物の浄化活性を高める方法であり、もう一つはバイオオーグメンテーション(Bioaugmentation)と呼ばれ、汚染現場の微生物による生分解活性が低い場合に、外来の浄化微生物を導入して汚染環境を浄化する方法である。さらに、バイオレメディエーションの実施プロセスにより、バイオリアクター、個体処理、スラリー処理、原位置バイオレメディエーション(図2)などに大別される。

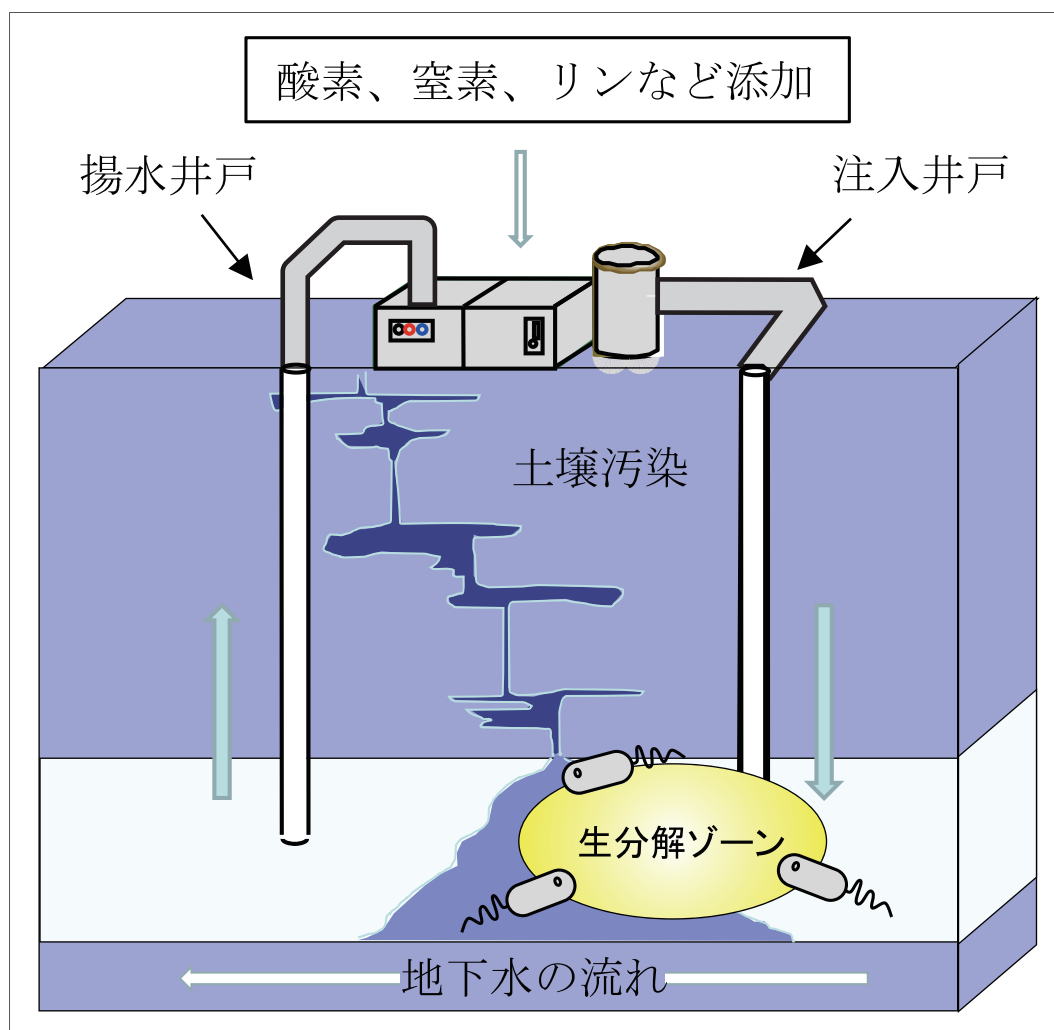
このうち、特に現場での浄化を目的とした原位置バイオレメディエーション技術は、自

然に起こりうる分解メカニズムの効果を高めるための工学的システムで、以下に示す点などを考慮してデザインされる。

(1) 微生物の添加(バイオオーグメンテーション)

対象とする汚染化学物質の分解菌が少ない場合に実施される。現場に生息する分解菌を分離してリアクターなどで増殖させて添加するケースと、すでに別の環境から分離されてその分解活性などが明らかとなっている分解菌を導入するケースとがある。このバイオオーグメンテーション技術では、非常に多くの微生物が生息している汚染現場環境中において、特定の微生物すなわち目的の分解菌のみの増殖を制御することが必要である。従っ

図2 原位置バイオレメディエーション事例の模式図



て、この技術による浄化の成否は、現場の微生物生態系および地下環境の物理的条件に強く依存している。なお、現在の日本では後述する利用指針が公示されている。

(2) エネルギー源、栄養塩類の添加

窒素、リン、その他の生育因子などの微生物の増殖に必要であり、汚染現場において生物学的に鍵となる栄養を添加する。一般にこうした栄養源が現場における生分解の制限因子にならないように他の技術と共に用いられる。

(3) 電子供与体の添加

汚染源である化学物質を分解する微生物がエネルギーを得るための酸化還元反応において、電子供与体として働く基質を添加する。汚染物質が酸化される場合は、トルエン、プロパン、メタンのような共代謝酸化剤 (co-metabolic oxidant) を添加する。汚染物質が還元される場合は、水素を遊離する化合物などの還元剤を添加する。

(4) 電子受容体の添加

汚染現場で働かせる分解菌の性質に応じて、好氣的分解では直接酸素を注入する、あるいは過酸化水素などの酸素を供給する化合物を添加する。また嫌氣的分解では硝酸などの電子受容体を添加する。

(5) 水分、pH、温度の管理

浄化を実施する土壤環境、地域の状況により分解微生物の活性を阻害しないよう、また十分に能力を発揮させるようにこれらの条件を調整する。

以上に述べた原位置バイオレメディエーションの技術は表2に示す工法などにより実施される。また、汚染現場の状況によっては原位置において自然浄化が生じる場合もあ

る。この自然浄化力を定量化する技術は、ナチュラルアテニュエーション (natural attenuation) と呼ばれており、これに関する研究は現在米国をはじめとして日本でも注目されている。

バイオレメディエーション技術には、その技術の現場への適用にあたり、考慮すべき利点と欠点がある(表3)。特にわが国において実施例がまだ少なく、他の技術と比べて十分に確立された技術とはいえない点、浄化期間の予測が難しい点が大きな欠点であるといえる。

4. 微生物によるバイオレメディエーション利用指針

バイオレメディエーション技術のうち前述したバイオオーグメンテーションに関しては、2005年3月に経済産業省および環境省が公示⁶⁾した「微生物によるバイオレメディエーション利用指針」にてガイドラインが示された。なお、本指針においてバイオスティミュレーションは対象とされていない。事業者は浄化事業計画および影響評価書を作成し、ついで浄化事業計画が指針に適合しているかを判断する。この中で特に浄化微生物が現場微生物生態系に及ぼす影響の評価に関しては、この分野が発展途上でもあり方法論が十分に確立していないことから、多くの時間と費用が費やされる傾向にあり、規模の小さい事業者などにとってはハードルが高いものとなっている。本指針が公示されてから現在(2017年7月)まで既に12年以上が経過しているが、これまでに10件の事業についての適合確認がなされているにすぎない。今後、バイオレメディエーション市場の発展に向けては、これまでに得られてきた知見を整理し、評価内容の見直しなど事業者への負担が軽減されるような運用が期待されている。

表2 原位置バイオレメディエーションの工法

工法	目的	長所	短所（限界）
直接注入	土壌および地下水中の生分解の活性化	地上部分の施設が小規模	添加物質の拡散の制御が難しい 化学物質を地下水に注入するので環境基準等の規制に配慮する
微生物バリア	地下水中の汚染の封じ込めバリアを通過する地下水の浄化	地上部分の施設が小規模	バリアを通過する地下水だけしか処理されない
バイオベンティング バイオスパーキング	酸素の供給による生分解の活性化	地上部分の施設が小規模 土壌の浄化が可能 (バイオベンティング)	バイオベンティングでは地下水を浄化する他の工法との併用が必須である
地下水循環	地下水中の汚染の封じ込め地下水循環エリアでの生分解の活性化	汚染の封じ込めが可能 地下水中への物質添加の制御が易しい	規制の関係で汚染地下水の再注入が難しい場合がある 注入あるいは揚水井戸中に粘土層が存在すると浄化効果が減少する

表3 バイオレメディエーションの利点と欠点

利点	欠点
現場での実行が可能	高濃度汚染には対応が難しい
汚染物質の分解による恒久的除去	浄化期間が長く予測が難しい
比較的安価なシステムの構築が可能	広範なモニタリングが必要
浄化現場の攪乱が少ない	現場生物への十分な影響評価が必要
他の技術との組合せが可能	新しい技術への不信感

5. バイオレメディエーション実施における安全性評価

ところで、バイオレメディエーション技術の実施においては、その有効性ばかりでなく、環境への影響などの安全性についても十分に評価する必要がある⁷⁾。環境影響評価において、重要な評価項目である現場の微生物群集の構成変化（プロファイル変化）の解析は、現在各種の手法が開発されつつある分野で、今後の発展が期待されている。

筆者らは評価手法の開発を目指した研究⁸⁾として、土壌・地下水汚染の原因物質の一つであるトリクロロエチレンを密閉したバイアルビンに0、10、100mg/Lになるように添加し、土壌中の微生物群集に及ぼすトリクロロエチレンの影響について解析を試みた。いずれの濃度においても微生物生菌数の変化は認められなかった。近年、こうした微生物群

衆のプロファイル変化を解析するために、環境試料中の全微生物 DNA を回収し、リボゾーム遺伝子をターゲットとした手法が広く実施されてきている。そこで土壌中の全微生物群集および培養可能な微生物群集のプロファイル変化を解析したところ、全微生物群集の解析ではトリクロロエチレンによる影響はほとんど認められなかったが、培養可能な微生物群集では影響が観察され、非汚染の対照系と比較して汚染濃度10mg/Lと100mg/Lとともに50日目のプロファイルが大きく変化していることが示された。培養微生物の遺伝子を網羅的に解析する本方法では、サンプル内の全ての微生物は培養可能である。現在、筆者らは環境影響評価手法を開発する一助にすべく、汚染物質に応答する微生物の分離を試みている。

6. おわりに

わが国でのバイオレメディエーションの実施例はまだ少ない状況であるが、産官学の多くの研究者が環境浄化微生物および浄化工法の開発を試みており、2009年の「第15回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会」においても、全体の3割弱の発表が生物関連技術であり、関心の高さがうかがわれる。従って、今後経済状況が上向き、再開などによる土地取引が活性化してくれば、環境浄化事業も必ず活性化してくるものと考えられる。本稿で述べたように比較的安価で原位置での処理が可能であり、さらに汚染物質の恒久的な除去が期待できるバイオレメディエーション技術は、近い将来重要な環境浄化技術の一つの選択肢となるであろうと信じている。

参考文献

- 1) 東京都：中央卸売市場, <http://www.shijou.metro.tokyo.jp/>
- 2) 環境省：土壌汚染対策法の施行状況及び土壌調査・対策事例等に関する調査結果, <http://www.env.go.jp/water/dojo/chosa.html>
- 3) 環境省「土壌汚染をめぐるブラウンフィールド対策手法検討調査」中間とりまとめの公表について, <http://www.env.go.jp/press/8300.html>
- 4) 一般社団法人土壌環境センター土壌汚染状況調査・対策に関する実態調査, <https://www.gepc.or.jp/04result/info1.htm>
- 5) 岩崎一弘：バイオレメディエーション技術を活用した土壌・地下水の浄化, ケミカルエンジニアリング, 49, 53-57, 2004.
- 6) 環境省：微生物によるバイオレメディエーション, <http://www.env.go.jp/air/tech/bio/>
- 7) 岩崎一弘：“バイオレメディエーション技術の有効性 (Efficacy) と安全性 (Safety)”, 電気評論, 92, 62-63, 2007.
- 8) Mera, N. and K. Iwasaki : Use of plate-wash samples to monitor the fates of culturable bacteria in mercury- and trichloroethylene- contaminated soils, Appl. Microbiol. Biotechnol., 77, 437-445, 2007.

いわさき ● かずお

東京理科大学大学院修士課程修了。環境庁国立公害研究所に入所。微生物による環境浄化、微生物多様性の解析、遺伝子組換え微生物の環境影響評価など環境バイオテクノロジー研究に従事。2012年～2014年内閣府参事官。